

Steel Structure Bridge Engineering Technology and Quality Control

钢结构桥梁工程工艺与质量控制

gang jie gou qiao liang gong cheng gong yi yu zhi liang kong zhi

乔新旺 著

Qiao Xinwang Author



钢结构桥梁工程工艺与质量控制

gang jie gou qiao liang gong cheng gong yi yu zhi liang kong zhi
Steel Structure Bridge Engineering Technology and Quality Control

Copyright reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without prior written permission from the Director General of the National Library of Malaysia.

责任编辑 Responsible Editor: 徐少静 Xu Shaojing 校对 Proofreader: 徐静 Xu Jing
装帧设计 Layout Designer: 梁晓 Liang Xiao

书名 Title of the Book: 钢结构桥梁工程工艺与质量控制

gang jie gou qiao liang gong cheng gong yi yu zhi liang kong zhi

Steel Structure Bridge Engineering Technology and Quality Control

作者 Author: 乔新旺

Qiao Xinwang

出版发行 Publisher and Distributor: Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

社址 Address of the Press: B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

网址 Website: <https://opacnew.nsci.net/>

电子邮箱 E-mail: contact@zycentre.com

开本 Format: 170mm × 240mm 1 / 16

印张 Number of Printed Sheets: 17.75

字数 Number of Words: 230 千字 230,000 words

版次 Edition: 2026 年 6 月第一版 First edition in June 2026

印次 Printing: 2026 年 6 月第一次 First printing in June 2026

国际书号 International Standard Book Number (ISBN): 978-629-7906-68-3



Cataloguing-in-Publication Data

National Library of Malaysia

A catalogue record for this book is available from the
National Library of Malaysia

ISBN 978-629-7906-68-3

非开放获取 • 电子版请联络出版社购买 • 版权归出版社所有 • 侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher. Infringement will be prosecuted.

内容简介

钢结构桥梁作为现代土木工程的集大成者，以其高强、轻质、跨越能力大的显著优势，已成为大跨径公路、铁路及城市景观桥梁的首选结构。然而，随着桥梁建设向更大跨径、更高速度、更重荷载及更复杂服役环境迈进，传统的施工模式与粗放的质量管理已难以满足当前工程对精细化、长寿命的要求。《钢结构桥梁工程工艺与质量控制》一书正是立足于这一行业转折点，旨在为工程实践提供一套系统、严密、可操作的技术指南。

本书打破了传统教材重理论轻实践的窠臼，以“全生命周期”和“精细化控制”为核心理念，构建了从设计源头到运维末端的全链条知识体系。全书从材料性能与设计基础讲起，深入剖析了钢材、连接材料及新型高强耐候钢的底层逻辑。在核心的制造与涂装环节，本书不避繁难，对数控切割、复杂组装、焊接变形控制、防腐体系构建等关键工艺进行了抽丝剥茧式的解读，将工厂化预制与标准化管理的要求落到实处。

针对现场施工的复杂性，本书详细梳理了支架、悬臂、顶推、转体等主流安装方法的工艺要点，并深度融入了高强度螺栓与现场焊接的实操规范。更为难得的是，本书紧跟行业智能化趋势，将施工测量、结构健康监测及全过程质量控制与验收体系独立成章，为毫米级的精度控制和隐形病害的精准预警提供了系统方案。最后，通过对常见病害机理的剖析与管养策略的探讨，完成了从“建好”到“管好”的闭环。

无论是对一线钢结构工程师、质检与监理人员，还是高等院校相关专业师生，本书都是一部不可多得的案头必备工具书。它不仅传递了冷冰冰的技术参数，更传递了精益求精的工匠精神，是连接理论知识与工程现场的坚实桥梁。

ABSTRACT

Steel structure bridges, as the epitome of modern civil engineering, have become the preferred choice for long-span highway, railway, and urban landscape bridges due to their significant advantages of high strength, light weight, and large spanning capacity. However, as bridge construction advances towards greater spans, higher speeds, heavier loads, and more complex service environments, traditional construction methods and rough quality management are no longer sufficient to meet the current engineering requirements for precision and long service life. The book "Steel Structure Bridge Engineering Technology and Quality Control" is precisely positioned at this industry turning point, aiming to provide a systematic, rigorous, and practical technical guide for engineering practice.

This book breaks away from the traditional textbook's emphasis on theory over practice, taking "full life cycle" and "precision control" as its core concepts, and builds a comprehensive knowledge system from the design source to the operation and maintenance end. Starting from material properties and design fundamentals, the book delves into the underlying logic of steel, connection materials, and new high-strength weathering steel. In the core manufacturing and coating processes, the book does not shy away from complexity, providing a detailed and in-depth analysis of key techniques such as numerical control cutting, complex assembly, welding deformation control, and anti-corrosion system construction, effectively implementing the requirements of factory prefabrication and standardized management.

In response to the complexity of on-site construction, the book meticulously outlines the key points of mainstream installation methods such as formwork, cantilever, jacking, and rotation, and deeply integrates the practical norms for high-

ABSTRACT

strength bolts and on-site welding. Even more commendably, the book keeps pace with the industry's intelligent trend, dedicating separate chapters to construction measurement, structural health monitoring, and the entire process quality control and acceptance system, providing systematic solutions for millimeter-level precision control and accurate early warning of hidden diseases. Finally, through the analysis of common disease mechanisms and the discussion of maintenance strategies, the book completes the closed loop from "building well" to "managing well".

This book is an indispensable reference tool for front-line steel structure engineers, quality inspection and supervision personnel, as well as teachers and students in related majors of higher education institutions. It not only conveys cold technical parameters but also the spirit of craftsmanship that pursues excellence, serving as a solid bridge connecting theoretical knowledge with engineering practice.

前言



一座大桥的跨越，不仅是地理空间的征服，更是工业实力与工程智慧的集中检阅。在过去的几十年里，中国桥梁建设者们逢山开路、遇水架桥，创造了一个又一个令世界瞩目的工程奇迹。然而，当我们站在这些钢铁巨兽面前，除了惊叹于它的宏伟，作为从业者，我们内心更多的是一种如履薄冰的敬畏。因为，图纸上的每一根线条，最终都要转化为数以万计的构件，任何一个微小的工艺失误，都可能在狂风巨浪与密集车流的撕扯下被无限放大。

工程界有一句老话：“三分设计，七分制造，十二分管理”。这虽然是句略带夸张的调侃，却道出了制造工艺与质量控制在钢结构桥梁建设中的决定性地位。在追求速度与规模的粗放发展期，我们曾交过不少学费。有些桥梁通车没几年，正交异性桥面板就出现了难以根除的疲劳裂纹；有些钢梁表面的涂层在恶劣环境的侵蚀下过早剥落，锈迹斑斑。这些痛点时刻提醒着我们，缺乏精细工艺支撑的桥梁，哪怕设计再先进，也不过是提前透支了它的生命。

这本书的酝酿，正是源于一线现场的这些真实痛点与深切反思。我们试图跳出单一规范的罗列，去探寻工艺背后的底层逻辑。钢结构桥梁的本质，是将各种特性的钢材通过连接与涂装，组合成一个能够共同受力的有机体。因此，书中没有吝啬笔墨，而是用大量的篇幅去解构材料的选择与匹配。因为，如果不理解高强钢的碳当量与焊接裂纹敏感性，不了解耐候钢裸用环境与稳定化处理的苛刻条件，所有的“高精尖”都只是空中楼阁。

全书的重心，落在制造与涂装这两个最核心的环节上。工厂预制是桥梁质量的基石。我们把目光聚焦在切割下料的精度预留、板单元组装的胎架刚度、复杂节段的连续匹配预拼装等细节上。很多时候，现场安装的痛苦，根源都在工厂制造的精度失控。同时，涂装也绝非简单的“刷漆”，它是桥梁

抵御外界侵蚀的第一道也是最重要的一道防线。从喷射除锈的粗糙度控制，到富锌底漆与面漆的协同机理，本书试图还原一个科学的防腐体系建立过程，纠正以往施工中容易被忽视的盲区。

当构件运抵现场，真正的考验才刚刚开始。现场环境远比工厂车间复杂多变，风力、温差、临时荷载无一不在考验着方案的弹性。书中详细梳理了各类安装方法的适用边界，并着重探讨了高强度螺栓与现场焊接这两种核心连接手段。不同于常规的施工手册，本书特别引入了施工控制网的建立、精密测量技术以及施工期结构健康监测。这不仅是技术的延伸，更是现代桥梁“数字化”、“智能化”转型的必然要求。只有让测量数据说话，让传感器成为桥梁的“神经末梢”，我们才能在毫米级的较量中稳操胜券。

质量控制不是检验出来的，而是生产和出来的，这句话在书中得到了淋漓尽致的体现。我们将质量检验的关口前移，贯穿于制造、运输、安装、验收的全过程。从原材料的炉批号追溯，到焊缝无损检测的判定逻辑，再到最终验收的程序标准，本书试图构建一张严密的质量防护网。

最后，我们将视角投向了桥梁服役期的维护与管养。没有永远不坏的桥梁，只有管养得当的长寿桥梁。面对疲劳与锈蚀这两大顽疾，书中不仅给出了宏观的策略，更提供了微观层面的检测手段与加固工艺。

一本书的容量有限，无法穷尽工程中的所有疑难杂症。但如果说这本书能成为工程师们在深夜排疑解难时的一盏微光，或者在处理某个棘手工艺问题时提供一种新的思路，那么，这几经打磨的文字便算有了它的价值。桥梁跨越江河，连接的不仅是两岸，更是几代桥梁人求真务实、严谨专注的职业信仰。愿每一位翻阅此书的同路人，都能在枯燥的规范与繁杂的工艺中，找到属于自己的那份职业成就感与坚守的力量。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

乔新旺

PREFACE



The construction of a bridge is not merely a conquest of geographical space; it is also a concentrated review of industrial strength and engineering wisdom. Over the past few decades, Chinese bridge builders have blazed trails through mountains and built bridges over rivers, creating one engineering miracle after another that has captured the world's attention. However, when we stand before these steel giants, apart from marveling at their grandeur, as practitioners, we feel a sense of trepidation. Because every line on the blueprint must eventually be transformed into tens of thousands of components, and any minor mistake in the manufacturing process could be magnified under the relentless assault of fierce winds, huge waves, and heavy traffic.

There is an old saying in the engineering field: "Three parts design, seven parts manufacturing, and twelve parts management." Although this is a slightly exaggerated joke, it highlights the decisive role of manufacturing techniques and quality control in the construction of steel bridges. During the period of extensive development that prioritized speed and scale, we paid a considerable price. Some bridges developed fatigue cracks on their orthotropic bridge decks within just a few years of operation; the coatings on some steel beams peeled off prematurely under the erosion of harsh environments, leaving them rust-stained. These problems constantly remind us that without the support of meticulous craftsmanship, even the most advanced designs are merely a premature depletion of the bridge's lifespan.

The conception of this book stems from the real pain points and profound reflections on the front lines. We aim to move beyond the mere listing of regulations and delve into the underlying logic behind the manufacturing process.

The essence of a steel bridge is to combine various types of steel through connections and coatings into a single, force-bearing organism. Therefore, the book does not skimp on the details of material selection and matching. Because without understanding the carbon equivalent of high-strength steel and its sensitivity to welding cracks, or without knowing the harsh conditions for the bare use environment and stabilization treatment of weathering steel, all the "high-tech" would be nothing but castles in the air.

The focus of the entire book lies in the two most critical aspects: manufacturing and coating. Factory prefabrication is the cornerstone of bridge quality. We pay close attention to details such as the precision allowance in cutting and material preparation, the rigidity of the assembly jigs for plate units, and the continuous matching pre-assembly of complex segments. Often, the pain points during on-site installation can be traced back to the loss of control over manufacturing precision in the factory. At the same time, coating is far from a simple "painting" process; it is the first and most crucial line of defense for bridges against external erosion. From the control of roughness in shot blasting to the synergy between zinc-rich primers and topcoats, this book attempts to reconstruct the process of establishing a scientific anti-corrosion system and correct the blind spots that are often overlooked in construction.

When the components arrive at the site, the real test begins. The on-site environment is far more complex and changeable than the factory workshop, with wind force, temperature differences, and temporary loads all testing the flexibility of the plan. The book meticulously sorts out the applicable boundaries of various installation methods and focuses on discussing the two core connection methods: high-strength bolts and on-site welding. Unlike conventional construction manuals, this book particularly introduces the establishment of construction control networks, precision measurement techniques, and structural health monitoring during the construction period. This is not only an extension of technology but also an inevitable requirement for the "digitalization" and "intelligentization" transformation of modern bridges. Only by letting measurement data speak and

making sensors the "nerve endings" of the bridge can we secure victory in the millimeter-level competition.

Quality control is not achieved through inspection but through production. This principle is vividly demonstrated throughout the book. We move the quality inspection checkpoints forward, integrating them into the entire process of manufacturing, transportation, installation, and acceptance. From the traceability of raw material batch numbers to the judgment logic of non-destructive testing of welds, and to the procedural standards for final acceptance, this book attempts to construct a tight quality protection net.

Finally, we turn our attention to the maintenance and management of bridges during their service life. There is no bridge that never deteriorates; there are only those that are well maintained and have a long lifespan. In the face of the two major problems of fatigue and corrosion, the book not only offers macro strategies but also provides micro-level detection methods and reinforcement techniques. The capacity of a book is limited and it cannot cover all the difficult problems in engineering. However, if this book can serve as a glimmer of light for engineers to solve problems in the dead of night or offer a new perspective when dealing with a tricky technical issue, then the refined words in it will have their value. Bridges span rivers, connecting not only the two banks but also the professional beliefs of generations of bridge engineers who are dedicated to truth, practicality, and meticulousness. May every reader of this book find their own sense of professional achievement and the strength to persevere in the midst of the dry regulations and complex techniques.

Due to the author's limited ability, there may be omissions and inappropriate parts in the book. We sincerely ask readers to offer criticism and corrections.

Qiao Xinwang

目录

CONTENTS

第一章 钢结构桥梁工程工艺与质量控制绪论	1
第一节 钢结构桥梁的发展历程与现状	1
第二节 钢结构桥梁的特点与分类	7
第二章 钢结构桥梁材料与性能	15
第一节 结构钢材的种类与标准	15
第二节 钢材的力学性能与技术要求	22
第三节 连接材料与防腐材料	27
第四节 新型高性能钢材的应用	33
第三章 钢结构桥梁设计基础	39
第一节 设计原则与荷载组合	39
第二节 结构体系与选型	45
第三节 主要构件设计与计算	57
第四节 节点构造设计要点	63
第四章 钢结构桥梁制造工艺	71
第一节 钢材预处理与下料	71
第二节 零件、板单元与桁片组装	78
第三节 焊接工艺与质量控制	84
第四节 制孔与摩擦面处理	91
第五节 构件矫正、试拼装与预拼装	95
第五章 钢结构桥梁涂装防护技术	103
第一节 表面处理工艺与标准	103
第二节 防腐涂层体系与施工	108
第三节 防火涂料与施工工艺	113
第四节 涂装质量检验与特殊防护	117

第六章 钢结构桥梁安装施工方法	123
第一节 安装方案选择与准备	123
第二节 支架法与悬臂拼装法	129
第三节 顶推法与转体施工法	137
第四节 缆索承重桥与协作体系专项安装技术	144
第五节 大型构件吊装与定位技术	149
第六节 施工监控与调整	156
第七章 钢结构桥梁连接技术	163
第一节 高强度螺栓连接施工	163
第二节 焊接连接现场施工	170
第三节 栓焊混合连接技术	177
第四节 连接节点质量检验	184
第八章 钢结构桥梁施工测量与监控	191
第一节 施工控制网建立与维护	191
第二节 安装过程精密测量	195
第三节 施工期结构健康监测	199
第四节 成桥线形与应力监控	205
第九章 钢结构桥梁质量控制与验收	211
第一节 质量管理体系与标准	211
第二节 制造过程质量控制	217
第三节 现场安装质量控制	222
第四节 工程验收程序与标准	229
第十章 钢结构桥梁维护与管养	237
第一节 常见病害类型与成因	237
第二节 检测技术与评估方法	245
第三节 维修加固技术与工艺	251
第四节 全寿命周期管养策略	258
参考文献	265

第一章 钢结构桥梁工程工艺与质量控制绪论

钢结构桥梁作为交通基础设施的核心组成部分，其建造工艺与整体质量直接反映着一个国家的工业化发展水平。从基础理论突破到施工工艺迭代升级，质量控制始终贯穿于钢桥发展的每一个环节。本章将梳理全球及我国钢结构桥梁的发展脉络，深入分析智能化技术在现代钢桥制造领域的应用现状，展望行业未来的广阔发展前景。

第一节 钢结构桥梁的发展历程与现状

回顾钢桥的整个发展进程，它经历了从材料革新到结构体系逐步复杂化的漫长演进过程。当代钢结构桥梁不再仅仅追求更大的跨度和更高的结构强度，更将全寿命周期的可靠性放在核心位置。通过梳理国内外钢桥技术的演进路径，我们能够清晰观察到现代工业制造逻辑的深刻变革，以及行业标准化体系从无到有、逐步完善的建立过程。

一、国外钢结构桥梁的技术演进

国外发达国家在钢结构桥梁领域的探索起步较早，经过百余年的工程实践积累了丰富的技术经验。从早期的生铁材料尝试到如今高强钢材的大规模普及应用，每一次技术跨越都伴随着桥梁力学理论的重大突破。这些演进不仅改变了钢桥的外在表现形式，更深刻影响了全球范围内钢桥技术标准体系的构建与发展。

（一）从铸铁桥到现代高强钢桥的跨越

工业革命初期，铁质材料的引入彻底改变了传统桥梁建设的整体形态。早期的铸铁桥虽然突破了传统木结构、石结构的跨度限制，但材料本身脆性大、易断裂的隐患，始终制约着结构的整体安全性。随着炼钢技术的逐步成熟改进，熟铁逐渐取代铸铁成为主流造桥材料，随后碳素钢的规模化应用，才真正标志着现代钢桥时代的到来。二十世纪中叶，焊接技术的发展成熟彻底替代了传统的铆接工

艺，不仅让结构连接更加简洁高效，同时也对造桥母材的焊接性能提出了更高的要求。随着现代交通流量与荷载等级不断提升，高性能桥梁钢材不断涌现，这些新型材料不仅具备极高的屈服强度，还拥有优异的抗冲击韧性，能够长期抵御复杂多变的循环疲劳荷载。高性能钢材的应用让桥梁自重显著减轻，为实现更大跨度的桥梁建设提供了坚实的物质基础。这一阶段的技术演进，反映出人类对桥梁材料本质认识的不断深化，造桥思路也从被动适应天然材料特性，逐步转变为主动设计定制符合工程需求的材料性能。目前，高强度、耐候腐蚀性以及良好的冷热加工性能，已经成为现代桥梁钢的核心性能指标，支撑起无数跨越江河海湾的大型钢铁桥梁。

（二）大跨度跨海大桥的标志性工程启示

跨海大桥建设是钢结构桥梁技术应用的顶尖领域，工程面临的极端腐蚀环境、复杂海水动力效应，不断考验着钢桥制造与施工工艺的极限。全球范围内诸多具有里程碑意义的跨海工程，通过创新性采用流线型钢箱梁结构，成功解决了强风环境下的结构空气动力学稳定问题。这种设计不仅有效减小了风阻，还显著提升了结构的整体刚度，如今已经成为全球大跨度悬索桥与斜拉桥的主流设计方案。通过对这些标杆工程的复盘研究可以发现，钢桥构件的疲劳寿命和细节构造设计息息相关，微小的焊缝缺陷在长期循环荷载作用下，就有可能逐步扩展演变为灾难性的结构裂纹。为了应对复杂恶劣的海洋腐蚀环境，高性能防腐涂装系统与主桥内部除湿系统的集成应用，已经成为大型跨海钢桥的标准配置，有效保障了主体结构在百年设计寿命内的耐久性。大型构件的工厂化预制加海上模块化吊装技术，极大缩短了海上现场的施工周期，同时也对构件预制精度提出了毫米级的严苛要求。这些标杆项目不仅验证了复杂动力分析模型的计算准确性，也为后续同类工程的设计优化积累了不可替代的实战经验，进一步推动人类不断向广阔海域延伸交通基础设施网络。

（三）国际钢桥制造标准的融合发展

随着全球化工程协作的不断深入，各国原有钢桥制造标准的差异正在逐步缩小，行业整体正趋向于建立统一的结构性能评价体系。欧洲标准、美国AASHTO标准以及日本道路协会标准，在长期工程实践中形成了各自的技术特色，但在疲劳设计指标、焊接质量等级划分等核心领域，已经展现出明显的融合趋势。国际间频繁的技术交流推动了质量控制流程的标准化，这种融合不仅体现

在力学计算指标的逐步统一，更体现在全行业对制造过程透明度的共同追求。现代钢桥制造体系强调，从铁矿石冶炼到成品构件出厂的全流程可追溯，这种全链条管理模式已经成为进入国际高端工程市场的准入门槛。在质量检验领域，无损检测技术的通用化发展，让跨国项目的第三方监理工作变得更加高效，也确保了不同地区生产的钢构件能够达到同等的安全质量水准。这种标准的融合发展，有效降低了跨国工程的技术壁垒，推动了全球范围内钢桥产业链的资源优化配置。钢构件制造企业在对接国际标准的过程中，也不断倒逼自身管理体系升级，从单纯满足合同履约要求转向深层次的技术创新，为大规模跨国工程合作提供了通用的技术语言，也保障了全球供应链下制造精度的高度一致性。

二、我国铁路与公路钢桥的崛起

中国钢结构桥梁的发展历程就是一部由弱变强的奋斗史，在短短几十年时间里，实现了从跟跑模仿到并跑甚至部分领域领跑的跨越式发展。通过大规模铁路与公路网的工程建设实践，国内制造企业在复杂钢桥结构制造方面，已经积累了过硬的核心竞争力。自主研发的新型桥梁钢材与专用施工设备，为我国建设交通强国提供了坚实有力的技术支撑。

（一）从“技术引进”到“自主创新”的转变

我国早期钢桥建设在很大程度上依赖国外的技术援助和进口材料，无论是设计软件还是制造标准，都存在明显的短板。随着国民经济的飞速发展，国内科研机构和制造企业开始协同发力，逐步攻克了高强度桥梁钢的冶炼轧制难题，实现了造桥核心材料的完全国产化。在焊接工艺领域，从最初的手工电弧焊发展到埋弧自动焊，再到如今大规模应用的工业机器人焊接技术，每一次工艺升级都显著提升了钢桥结构的连接可靠性。国内自主创新的步伐并没有停留在简单模仿层面，而是针对我国复杂多样的地理环境和不断增长的运输需求，开发出了具有完全自主知识产权的成套钢桥建造技术。比如在复杂受力节点的受力分析、加劲肋优化布置等方面，国内工程师提出了诸多创新性方案，成功解决了大厚板焊接变形控制等一系列困扰行业的国际难题。这种转变的核心动力，源于行业对质量控制极致追求的内生需求，通过在工程实践中不断试错总结，逐步形成了符合中国工程国情的钢桥技术标准体系。如今，中国制造的钢桥构件已经开始批量走向海外市场，完成了从技术受让方到标准输出引领者的角色转换。

（二）沪苏通、五峰山等世界级重载钢桥的突破

沪苏通长江公铁大桥与五峰山长江大桥的建成通车，代表了当今世界重载钢桥制造的最高水准，工程规模和施工难度均创下多项世界纪录。这些项目普遍采用了超高强度等级的桥梁钢材，对焊接接头的低温韧性要求达到了前所未有的高度。为了承载高速铁路与多车道公路的巨大动荷载，桥梁主梁整体采用了整体节点与大桁段整体制造工艺，显著减少了工地现场连接的工作量，同时也大幅提高了结构的整体性。在制造过程中，通过高精度数控加工技术和全桥三维模拟预拼装技术，确保了超大型构件在现场能够实现一次性精准对接。这些工程的成功实践，验证了我国在超大跨度、超重荷载钢结构体系设计制造方面的领先地位，特别是在应对强风、强震及复杂水流条件下的结构稳定性控制，积累了关键的实战技术经验。重载铁路桥梁对结构疲劳性能有着苛刻要求，这也促使制造企业建立了全流程的疲劳质量监控体系，从板材进厂探伤到焊缝最终打磨处理，每一道工序都执行着严于行业标准的企业内部管控规则，为未来更深跨度、更高荷载等级的桥梁建设奠定了坚实的技术基础，具有重要的行业引领与示范意义。

（三）多类型复杂结构（钢塔、钢箱拱）的全面发展

除了传统的梁式桥，我国在钢塔、钢箱拱等复杂几何结构领域也取得了显著成就，展现出我国钢桥制造极强的技术适应性与造型创作能力。钢塔作为悬索桥的核心受力构件，普遍存在内部空间狭小、构造复杂的特点，对焊接作业可达性和焊接质量控制提出了巨大挑战。国内制造企业通过采用全参数三维建模和工厂整体预拼装技术，成功实现了复杂曲面钢塔节段的精密制造。钢箱拱桥则以其优美的曲线造型和高效的受力表现，在城市景观桥梁中得到了越来越广泛的应用。在这些异形结构的生产过程中，制造单位逐步发展出一套完整的尺寸偏差控制理论，利用高精度激光测量技术对构件加工精度进行实时动态监测。目前我国复杂钢桥结构发展主要呈现出三方面特征，相关特征内容如表 1-1 所示：

表 1-1 复杂钢桥结构发展特征表

特征分类	具体内容说明
几何形状多样化	要求制造工艺具备极高的柔性生产能力，能够完成各种不规则曲面构件的高精度加工
连接节点精密化	要求多向受力状态下的焊缝分布与栓接孔位必须严丝合缝，满足现场一次拼装到位的要求
受力机理复合化	要求在质量控制过程中必须同时兼顾强度、刚度与局部稳定性的平衡

从表 1-1 可以看出,这些特征标志着我国钢桥制造已经从满足基本受力需求,转向对更高精度和更复杂造型的技术挖掘,行业整体发展水平迈上了新的台阶。

(四) 大跨径斜拉桥、悬索桥以及协作体系桥梁的跨海工程实践

随着我国沿海经济带的快速发展,越来越多跨海湾、跨河口的大型交通工程陆续开工建设,为大跨径钢结构桥梁技术提供了广阔的实践舞台。这些跨海工程普遍面临潮差大、水流急、腐蚀性强等极端建设条件,对钢桥的制造精度、防腐耐久性和结构整体稳定性提出了极高要求。在项目建设过程中,国内工程团队逐步突破了超大流线型钢箱梁整体制造、超重钢锚箱精密加工、大直径主缆索股预制等核心技术,攻克了海洋环境下钢构件长效防腐、超大构件海上运输安装定位等一系列工程难题,先后建成了港珠澳大桥、深中通道伶仃洋大桥等一批具有世界影响力的跨海超级工程。针对协作体系桥梁的复杂受力特点,国内技术团队通过大量精细化数值模拟和试验验证,优化了不同结构体系间的受力分配构造,大幅提升了结构整体承载效率,也进一步丰富了我国大跨径钢桥的结构设计体系。这些跨海工程的成功实践,不仅完善了我国跨海钢桥建设的技术标准体系,更标志着我国已经掌握了全领域大跨径钢结构桥梁的核心建造技术,具备了在极端复杂海洋环境下建设世界级超级工程的完整能力。

三、钢结构桥梁制造的智能化趋势

智能化是推动钢结构桥梁制造业转型升级的必由之路,也是提升产品质量一致性稳定性的关键抓手。通过引入先进信息技术和自动化加工设备,传统的劳动密集型制造车间,正在逐步向数字化智慧工厂转型。这种变革不仅提高了企业的生产效率,更重要的是通过数据驱动实现了质量管控模式的重塑,推动了行业整体技术水平的跃升。

(一) 数字化生产线与协同管理系统的应用

数字化生产线的核心价值,在于实现了生产过程的全可视化和生产数据的实时采集,彻底改变了以往依赖人工记录数据的滞后管理模式。在现代化的钢桥制造车间,板材切割、边缘加工以及核心焊接过程,都由数字化控制系统进行精确管控。企业级协同管理系统将设计、采购、生产与质量检验各个环节无缝连接,确保了信息的闭环流动和高效处理。当某一生产环节出现质量偏差时,系统能够自动触发质量预警,并结合历史数据提供可行的修正建议,极大降低了人为误操

作带来的质量风险。数字化技术的引入，主要带来三方面的积极意义，分别是提升管理决策科学性、优化企业资源配置和保障产品质量一致性：提升决策科学性指的是通过对历史生产大数据的汇总分析，能够提前准确预测可能出现的工艺偏差，做到质量问题前置管控；优化资源配置体现为对设备稼动率与材料利用率的精准管控，减少不必要的资源浪费；保障质量一致性则主要依赖自动化设备替代人工重复性作业，减少人为因素带来的质量波动。这种深度的数字化集成，不仅显著提升了企业的生产节奏，更为后续的智能化决策奠定了坚实的数据基础，全量采集生产数据也让企业能够为每一件钢构件绘制完整的数字画像，实现质量信息的全留存。

（二）工厂化、标准化、自动化制造理念的深化

工厂化制造是确保钢桥整体质量的核心基石，它将复杂的现场作业转移到环境可控的车间内完成，避免了野外恶劣气候对工艺质量的不利影响。标准化理念则体现在工艺流程、操作规程以及检验标准的统一上，通过制定详细明确的工艺定额，确保不同班组生产的产品能够保持一致的品质水准。自动化制造则进一步将人力从繁重枯燥的重复性劳动中解放出来，特别是在工业机器人焊接与多头龙门埋弧焊的应用场景中，焊接质量的稳定性得到了根本性提升。这些先进制造理念的深化应用，主要朝着三个方向推进，分别是工艺模块化、检测自动化和流程透明化：工艺模块化将复杂的大型构件拆解为标准生产单元，提高了生产组织的灵活性，也便于批量生产控制质量；检测自动化引入了超声波自动探伤与机器视觉缺陷识别系统，大幅提高了内部缺陷的检出率和评定准确性，减少了人工检测的主观性误差；流程透明化通过车间信息化看板，让生产进度与质量状态对所有管理人员实时可见，便于及时调度调整。这种深度的制造变革，正在重塑钢结构桥梁的产业供应模式，使得桥梁构件能够像标准化工业产品一样，进行高质量的流水线批量生产，而不断完善的现代标准体系，也进一步提升了国内制造企业的国际市场竞争力。

（三）建筑信息模型技术与二维码追溯在全生命周期中的渗透

建筑信息模型技术在钢桥领域的深度渗透，实现了设计环节与制造环节的无缝融合，彻底消除了传统二维图纸带来的信息偏差局限性。通过建立高精度的钢桥数字孪生模型，可以在虚拟空间内完成所有构件的模拟拼装与专业碰撞检查，极大降低了后期现场修改调整的成本。二维码技术作为轻量化信息的物理载体，

为每一个独立钢构件赋予了唯一的身份标识，真正实现了全制造过程的信息可追溯。项目管理人员通过移动终端扫描二维码，即可快速获取该部件的材质参数、加工班组、焊工信息、检测记录等全部原始数据，这种透明化的管理手段显著增强了质量责任的落地落实。目前构件追溯系统的应用，主要发挥三个关键作用，分别是落实质量责任、辅助后期运维管理和支持工艺决策分析：落实质量责任通过信息数据与作业人员的绑定，使得每一个环节的作业人员都对自身产出质量负责，形成完整的质量管理闭环；辅助运维管理为桥梁运营阶段的养护检修提供了详实的原始制造数据，便于运维单位制定针对性的养护方案；支持决策分析通过对全项目追溯数据的汇总研究，可以快速发现工艺体系中的系统性问题，并有针对性地进行改进优化。这种全方位的数字化渗透，让传统钢桥成为具备完整数据支撑的智慧化实体，也为整个智慧交通网络的建设打下了坚实基础。

第二节 钢结构桥梁的特点与分类

在现代交通基础设施建设领域，钢结构桥梁凭借卓越的受力性能、成熟的工业化制造能力以及极高的施工效率，已经成为推动全球桥梁工程高质量发展的核心力量。随着工程界对钢结构特性研究的不断深入，如今已经能顺利攻克超大跨径、复杂地形以及严苛气候环境带来的种种难题，形成了科学完善的技术体系，也衍生出多样化的结构形态和先进的安装工艺，为交通强国建设提供了坚实的工程支撑与技术保障。

一、钢结构桥梁的核心技术优势

作为现代桥梁工程的主流形式，钢结构的技术优势首先体现在对材料效能的充分利用上，钢材突出的强重比，为桥梁跨越能力的跨越式提升打下了坚实基础。

（一）高强材料带来的大跨度与高承载能力

钢材本身抗拉、抗压强度都很高，这意味着在承受同等荷载的条件下，钢结构构件的截面尺寸可以远小于混凝土结构，这种材料特性在大跨度桥梁中体现得尤为明显。选用高强钢材后，结构自重占总荷载的比例会明显下降，也就腾出了更多承载空间给活荷载，不仅大幅提升了结构的跨越能力，还减少了深水基础或高耸索塔的建设难度与成本。

在现代超大跨度悬索桥与斜拉桥的设计实践中，高性能钢材的应用让主梁的跨越能力实现了质的飞跃，不仅有效缩小了下部结构的规模、降低了造价，还能通过优化截面设计，让桥梁在超长跨径的挑战下依然保持稳定的几何形态与力学响应。这种能力的提升，直接拓展了交通网络在地理空间上的覆盖范围，让跨越天堑、连接两岸成为工程界的常规操作。

高承载能力还体现在对重载交通的出色适应性上。在重载铁路桥梁或者繁忙的城市公路桥梁中，钢结构可以通过密集排布横隔板与纵肋，形成稳定的正交异性桥面板体系，能把局部车辆轮压快速均匀地传递到主桁或主梁，保证整体结构的刚度与疲劳耐久性。这种高效的传力路径，能大幅缓解长期重载对结构造成的局部损伤，延长桥梁的服役寿命。

钢材的强度优势还给建筑师和工程师留出了更大的艺术创作空间，依托高强度钢材，桥梁可以打造出更纤细、灵动又富有力量感的视觉效果，在满足交通功能的同时，能和周边自然景观和谐相融，展现出工业文明与生态环境的深度融合。这种轻盈的造型是传统材料很难实现的，充分体现了现代工业技术对力学平衡与形态美学的极致追求。

（二）构件轻量化与现场装配化的施工便利性

轻量化是钢结构桥梁最突出的特点之一，这让构件在工厂加工、物流运输以及工地吊装各个环节都有着明显优势。和传统圬工或混凝土结构相比，钢结构自重能减轻 30% 到 50%，直接降低了地基处理的难度，减少了基础工程的开挖量和造价。在软土地区或者高烈度地震区，这种重量优势带来的经济效益和安全性更加突出。

施工过程中，钢结构的装配化程度很高，绝大部分制造工序都在工厂的受控环境下完成，工业化流水线作业能把构件的几何尺寸偏差严格控制在毫米级，这种高精度的制造能力为现场高效拼装提供了保障。配合自动化切割、机器人焊接与标准化涂装工艺，桥梁部件可以实现高质量规模化生产，大幅缩短了工程总工期，还能有效避开恶劣天气对施工进度影响。

因为现场施工以高强度螺栓连接或焊接作业为主，临时施工占地明显缩小，对周边既有交通和生态环境的影响被降到了最低。这种集约化的建造模式，在人口稠密的城市中心或者生态环境脆弱的自然保护区，有着无可比拟的适应性，施工过程中的扬尘、噪声与固体废物排放都能得到严格管控，完全符合绿色施工与

可持续发展的核心理念。

更进一步说,构件轻便的特点大幅降低了对超大型起重设备的依赖,哪怕是在地形复杂的山区深谷或者水流湍急的通航水域,也能顺利开展施工作业。通过分块制作、现场整体拼装的灵活组合,工程团队能轻松应对各种严苛的地理限制,这种灵活性不仅降低了施工组织的难度,也明显提升了项目整体的执行效率和安全生产水平。

（三）优异的抗震延性与韧性行为表现

钢结构在地震烈度较高的地区表现十分出色,这主要得益于材料良好的塑性变形能力与延性特征。当遭遇极端地震荷载时,结构可以通过关键连接部位形成塑性铰来耗能,吸收并转化大量地震能量。

钢结构的抗震性能主要体现在三个核心方面:一是材料层面的屈服诱导机制,通过搭配选择合适的钢种,让结构受力超过设计极限时,能够平稳进入屈服阶段,不会发生瞬间脆性断裂;二是结构体系的多重防御,通过合理的超静定结构设计,个别构件损伤不会引发整体结构连续倒塌,能维持基本的受力完整;三是灾后修复方便,受损钢构件只需要进行局部加固或者更换,就能在极短时间内恢复通行,大大提升了城市运营的韧性。

这种出色的韧性表现,保障了生命线工程在极端自然灾害下的安全性。哪怕是在纵向地震波作用下,钢结构也有足够的缓冲空间,面对复杂的横向摇摆与扭转效应,同样能凭借优异的侧向刚度与节点连接强度,维持整体的稳固与平衡。这种可靠的结构性能,为公众出行安全提供了强有力的技术保障。

二、按结构受力体系的分类特征

对桥梁受力体系进行科学划分,是深入理解钢结构力学特性的基础。通过对受力传导路径进行系统分类研究,设计人员可以精准匹配最合适的结构方案,在经济性和安全性之间找到理想的平衡。

（一）梁式桥（钢板梁、钢箱梁、钢桁梁）的受力特点

梁式桥是钢结构中应用最广泛的基本形式,受力特征以主梁受弯受剪为主。钢板梁结构简单,主要依靠工字形截面的腹板抗剪、翼缘抗弯,适合中小跨径桥梁,制造工序高度标准化,非常适合项目快速推进,在城市高架桥与人行过街天桥中,钢板梁凭借施工简便的特点占据着主导地位。

钢箱梁采用全封闭闭口截面，抗扭刚度和空间稳定性都很强，在曲线桥梁或者超宽桥面板结构中有着独特优势。箱体内部的空腔不仅提升了结构整体性，还为后期养护检修提供了内部通道。虽然钢箱梁壁板较薄，但通过在内部设置密集加劲肋，就能有效避免局部失稳，配合合理的横隔板排布，箱梁可以保持精确的截面形状，保证在复杂扭转荷载下受力均匀。

钢桁梁通过杆件组成三角形体系，把主梁承受的弯矩转化为杆件内部的轴力，这种形式充分发挥了钢材抗拉抗压的强度优势，在大跨径桥梁或者铁路重载桥梁中表现十分突出。桁架结构的通透性还能明显降低侧向风荷载，提升结构在强风环境下的动力稳定性，通过优化杆件截面形状，钢桁梁能实现极高的材料利用率和经济性。

除此之外，梁式桥的受力状态清晰明确，不管是简支体系还是多跨连续体系，内力计算模型与施工线形控制都已经形成了十分成熟的技术规范。随着主梁截面形式的不断优化，梁式桥在跨越城市快速干道及一般性河流时有着极高的工程可行性，受力传导机制直接明了，明显降低了极端荷载下结构失效的风险，是桥梁建设的基础选型。

（二）拱式桥（钢箱拱、钢管拱）的受力传导与压实机理

钢拱结构最核心的受力特点就是将竖向荷载转化为拱脚的水平推力，依托这种推力效应，拱肋截面主要承受轴向压力，可以极大减少弯矩对结构的不利影响，充分发挥钢材抗压性能好的材料优势，因此在同等跨径下，钢拱结构相比梁式桥能进一步降低构件截面尺寸，提升材料利用效率。

具体来看，钢箱拱的闭合箱形截面本身就具备良好的抗扭刚度和整体稳定性，适合大跨径无支架施工的场景，荷载作用下内力分布均匀，能够较好地适应双向弯曲和扭转的组合受力。而钢管拱则采用钢管内灌注混凝土的组合形式，钢管对内部混凝土形成套箍约束，也就是压实效应，这种约束作用让内部混凝土处于三向受压状态，大幅提升了混凝土的抗压强度和变形能力，同时钢管本身可以作为施工阶段的受力骨架，省去了浇筑混凝土所需的模板支架，兼具受力性能优势和施工便利性。

从受力传导路径来看，桥面传递的竖向荷载先通过横向联结系汇集到主拱肋，主拱肋将荷载转化为轴力向下传递，最终在拱脚位置将水平推力传递给下部墩台或基础，依靠墩台的抗推刚度平衡推力，整个传力路径简洁高效，材料强度得到

充分利用，也让拱式桥在跨越山谷、宽浅河流时拥有独特的经济性优势。这种压实机理带来的强度提升，让钢管拱可以用更小的截面实现更大的跨越，同时结构的整体刚度和稳定性也得到了充分保障。

（三）缆索承重桥（斜拉桥、悬索桥）的组合结构特征

缆索承重桥梁代表了现代桥梁建造技术的最高水平，它通过高强钢丝组成的缆索体系，把主梁荷载高效传递到高耸索塔，形成复杂精密的张力平衡体系。在这个系统中，各部件之间相互锚固、协同工作、完成内力重分布，共同撑起了现代交通体系中的标志性巨型工程。

这类结构的组合特征主要体现在三个关键方面：一是张力与压力的空间协同，缆索承担巨大拉力，主梁在索力垂直分量的作用下，主要承受弯矩和轴向压力，形成主次清晰、层次分明的传力模式；二是对几何非线性效应的精细化控制，随着跨径增大，索力的微小调整都会对桥身线形和内力分布产生显著影响，必须依靠精密算法进行实时监测和主动调控；三是塔、梁、索三者的动力耦合特性，在强风荷载和大规模移动荷载作用下，三者会形成复杂的动力响应关系，需要设置高性能阻尼器等装置进行动态调整。

这种组合形式把钢材的抗拉性能发挥到了极致，斜拉桥通过密集的斜拉索对主梁实现多点弹性支撑，跨越能力得到极大延伸，而悬索桥则依靠主缆的悬链线效应实现数公里的超长跨径。在这个庞大复杂的力学系统中，每一根索股的张力都关系着整体安全，这种宏大的结构体系不仅体现了人类对空间跨越能力的极致追求，也展现了现代结构力学在复杂系统建模与控制方面的最高水平。

（四）悬索斜拉协作体系的刚柔耦合与协同受力特征

悬索斜拉协作体系是为了突破单一结构形式的跨径限制，结合斜拉桥与悬索桥各自优势发展而来的新型大跨径结构体系，核心特征就是通过刚柔两种受力单元的耦合作用，实现更优的受力分配。

这类体系中，斜拉索属于高刚度的柔性受力单元，能够为主梁提供多点弹性支撑，有效缩减主梁的无支撑跨径，帮助主梁分担荷载、提升整体刚度，抑制悬索桥主梁过大的变形；而主缆则作为主要承重结构承担大部分竖向荷载，发挥悬索桥超长跨径承载的优势，二者通过主梁形成受力协同。从刚柔耦合机制来看，斜拉索的刚度贡献可以有效降低主缆的受力负担，减小主缆在荷载作用下的变形，从而提升全桥整体刚度，改善结构的抗风性能和行车舒适度；主缆则承担了结构

的主要荷载，让斜拉索不需要设置过大的截面，也降低了索塔的高度与受力规模，平衡了结构性能与工程经济性。

在协同受力方面，荷载作用下内力会自动在两种索系之间完成重分布：当局部荷载作用于主梁时，临近区域的斜拉索先快速承担荷载增量，通过斜拉索传递给索塔，而更大范围的整体荷载则会通过主梁逐步传递给主缆，由主缆承担整体重量，这种分级传力的模式让两种结构的优势都得到充分发挥，既保留了悬索桥超长跨越的能力，又通过斜拉索提升了整体刚度，解决了大跨径悬索桥刚度不足、变形偏大的问题，是超大跨径桥梁发展的重要方向。

三、按建造与安装工艺的分类

建造与安装工艺不仅决定了钢结构桥梁的施工质量和最终寿命，还在宏观层面反过来影响结构方案的设计选择和材料配置，体现了现代制造业与桥梁设计的深度融合。

（一）散拼安装结构（如传统钢桁梁）的制造特点

散拼安装结构常见于传统钢桁梁或者受地理条件限制的特殊桥梁工程，主要特点是把整体结构拆解为大量基本杆件或小型单元。在工厂制造阶段，工艺核心是保证每个节点螺栓孔群的定位精度，以及关键焊缝的质量可靠性。这种模式方便在运输条件极差的山区分批次转运，环境适应性极强，能通过化整为零的方式解决偏远地区的物资运输难题。

在工地现场，施工人员通过搭设大型临时支架或者采用分段悬臂拼装法，把杆件逐一精准连接。这种方式对现场作业人员的技术水平要求很高，尤其是高强度螺栓的紧固顺序、预拉力控制以及终拧扭矩都必须严格管控。杆件间的节点板连接是力学传递的关键枢纽，密集孔位的配合对加工精度要求极高。虽然逐杆拼装的工序相对繁杂，但受力过程更容易监测。

随着自动化焊接技术的普及，散拼结构正在逐步减少现场手工焊缝的用量，转而采用更高效稳定的栓接模式，以此提升施工速度、降低对环境的干扰。尽管整体工期相对较长，但它在复杂地形下的技术可靠性依然不可替代，这种传统经典的工法创造了无数桥梁奇迹，至今仍在大跨度铁路桥梁及山区跨谷桥梁中发挥着不可替代的作用。

（二）节段拼装结构（如钢箱梁、钢塔）的制造特点

节段拼装结构是当前大型钢箱梁与超高钢塔施工的主流形式，制造核心是大节段整体预制工艺。工厂内利用大型智能化胎架对钢箱节段进行精准组装，通过自动化焊接机器人完成长直焊缝作业，最大程度减少了人为因素对焊接质量的干扰，这种高度集成的制造工艺，保证了箱体内部加劲肋、横隔板与底板之间的精准连接和受力连续。

每一个预制节段在运抵工地前，都要经过严格的三维几何尺寸检验，保证匹配面严丝合缝。这种制造方式把大量繁重复杂的制造工作转移到后方受控的工厂，现场只需要完成大块段的快速吊装和环焊缝连接作业。前场拼装和后场预制的紧密配合，是现代造桥工业化水平的核心体现，通过全数字化模型管理，每个节段的制造数据和受力历史都能实现全程可追溯。

这种模式大幅压缩了桥梁在通航孔道或城市重要交通干线上的施工占用时间，降低了对社会交通的干扰。配合大型海上浮吊或专用重型架桥机，施工效率得到成倍提升，是实现现代桥梁快速建造、绿色建造目标的核心路径。节段间的连接质量直接决定了成桥后主梁的整体刚度，因此制造环节对端面平整度和垂直度的控制尤为关键。

（三）整体吊装与转体结构的制造适配性要求

整体吊装与转体结构对制造适配性要求很高，对于河道较窄、跨度适中的钢梁，通常会采用岸上总拼后整体滑移或吊装的方案。制造阶段必须提前对吊点位置做局部加强，避免吊装应力导致结构发生永久变形，要求工厂生产初期就把临时吊点和永久结构一体化设计，保证受力转换过程安全可靠。转体结构则对球铰系统精度要求极高，要保证转动过程中重心稳定、受力均匀，制造过程中对构件重量分布的精准控制，是转体成功的关键，为了满足这种严格要求，必须引入数字化称重与平衡调控系统。除此之外，在整体提升或平移过程中，结构必须有足够的空间稳定性。这种施工方法降低了水上作业的风险，代表了桥梁建造从零散化向整体化发展的方向，对工业化集约度的追求，不仅优化了工期，还在工程安全性和环境保护之间找到了平衡，是未来造桥工业化发展的重要方向。

作为这一技术体系的末端环节，整体施工的成败往往取决于前期制造阶段对每一个质量细节的极致把控和对风险的提前防控，这正是钢结构工程的核心魅力所在。为了保证最终顺利完成，工程团队必须严格遵守工艺规范，在每一个微小

的技术环节都追求卓越与精准，才能铸就经得起时间考验的精品桥梁工程。通过这种全过程质量控制，我们能保证钢结构桥梁在整个服役周期内始终保持优异的力学性能和安全状态，为现代交通事业的持续繁荣打下最坚实的结构基础，也展现出当代交通建设者不懈奋斗的工匠精神。

表 1-2 不同类型钢结构桥梁核心特点对比表

分类维度	结构类型	核心受力特点	优势	适用场景
按受力体系	钢构件梁式桥	主梁受弯受剪	受力清晰、工艺成熟	中小跨径公路铁路桥、城市高架桥
按受力体系	钢结构拱式桥	拱圈受压，产生水平推力	造型美观、材料利用率高	峡谷深沟、大流量航道跨越
按受力体系	缆索承重桥	缆索受拉，塔梁协同受力	跨越能力强	超大跨径江河海峡桥梁
按安装工艺	散拼安装结构	逐杆连接受力	适应性强	地形复杂山区桥梁
按安装工艺	节段拼装结构	大节段预制整体受力	施工速度快	大型钢箱梁、超高钢塔
按安装工艺	整体转体吊装	整体预制一次成型受力	对既有交通干扰小	跨通航河道、城市主干道桥梁

表 1-2 列出了不同类型钢结构桥梁的核心特点，从对比中可以看出，不同分类下的钢结构桥梁适配不同的工程场景，需要结合地质条件、跨径需求、周边环境等多方面因素选择最适合的方案。

第二章 钢结构桥梁材料与性能

钢梁建设的基础在于材料科学的严谨应用，结构钢材的物理力学指标与化学成分，直接决定了桥梁在整个设计年限内的安全表现。高性能钢材的推广应用，让大跨度桥梁的顺利建设成为现实，同时也对全流程的质量控制提出了更高维度的挑战。

第一节 结构钢材的种类与标准

精准匹配符合要求的材料标准，是桥梁正式施工前的核心准备环节，设计单位需要结合桥梁所处的气候环境、受力模式以及腐蚀等级，综合遴选合适的钢种。我国目前已经围绕桥梁用结构钢制定了一系列完善的规范，确保了从原材料进厂到成品构件出厂全过程的性能闭环管控，为工程整体质量提供了扎实的制度保障。

一、桥梁用结构钢的现行标准体系

现行标准体系不仅涵盖了普适性的力学参数要求，还针对桥梁行业的特殊侧重进行了细化调整，最终形成了国家标准为主、行业标准为辅的完整格局。这些标准在化学成分控制、杂质含量限值、力学性能考核等方面，都设定了明确的技术红线，是所有桥梁工程原材料进场检验的核心判据。

目前主流桥梁用钢相关标准的核心差异可以参考表 2-1。

表 2-1 主流桥梁用结构钢标准核心差异对比表

标准编号	适用场景	有害元素控制要求	特殊考核项目
GB/T 714	公路桥梁、市政桥梁	中等要求	低温冲击韧性、碳当量
TB/T 3556	铁路桥梁	严苛要求	时效冲击韧性、探伤要求、接头韧性

表 2-1 列出了两类常用桥梁用钢标准的核心差异，可以看到不同应用场景对钢材性能的要求各有侧重。

（一）《桥梁用结构钢》的核心指标

国家标准《桥梁用结构钢》是我国公路与市政桥梁建设的核心技术依据，称得上是行业发展的基石。该标准对屈服强度、抗拉强度以及断后延伸率都设定了严苛的准入门槛，确保钢材在高应力服役条件下，仍然具备充足的安全储备与塑性变形能力，能够吸收突发荷载带来的能量冲击。特别是针对冲击功的明确规定，要求钢材在设计对应的低温环境下仍能保持极高的能量吸收水平，从根本上规避了低温脆性断裂的风险，这对于确保钢梁在整个服役期内的结构完整性至关重要。

与此同时，该标准对碳当量和焊接裂纹敏感性系数做出了明确限制，极大提升了桥梁施工阶段的焊接适配性，降低了焊接热影响区产生冷裂纹的可能性。标准通过对锰、铌、钒等微量元素的科学配比要求，帮助生产企业实现了钢材强度与韧性的良好平衡。设计者可以根据桥梁所在区域的地理环境，选择对应冲击韧性等级的钢材，使得材料在严寒东北或温热华南区域均能稳定服役，这些核心指标共同构成了桥梁结构安全性的底层逻辑。

（二）《铁路桥梁用结构钢》的特殊要求

铁路桥梁长期承受高频次、大吨位的动荷载反复冲击，其特殊的疲劳受力特性，决定了所用材料必须具备比公路用钢更高的内部纯净度。该行业标准在磷、硫等有害元素的上限设定上，远比通用桥梁用钢标准苛刻，目的就是通过减少内部非金属夹杂物，从本质上提升材料的疲劳寿命。除此之外，在焊接接头的力学性能匹配上，该标准也提出了更为严格的等强度与同韧性要求，避免接头先于母材发生破坏。

在该标准体系下，大厚度钢板的内部缺陷检测被明确列为强制检验项目，要求采用更高级别的超声波探伤技术，彻底杜绝板材内部存在微小空隙或分层的现象。对于高强度级别的钢种，标准还强化了对成分均匀性的考核，确保整块板材在横向与纵向的力学性能差异控制在极小范围内。鉴于铁路运输对结构变形的高度敏感性，该标准还额外增加了时效冲击韧性测试项目，用来模拟材料在长期服役过程中的性能演变，提前预判长期使用后的韧性储备。

（三）普通碳素钢与低合金高强钢的选用原则

在实际桥梁工程实践中，材料的选择始终需要兼顾经济性与结构安全性，不能盲目追求高性能而造成不必要的成本浪费。普通碳素钢强度偏低但加工性能好、价格低廉，主要用于桥梁的次要构件或受力较小的辅助设施，能够利用自身优势

实现建设资源的合理分配。对于主梁、主横梁等核心受力构件，则必须根据计算结果选用低合金高强钢，通过多维度的技术比选，确保所选钢材既能满足设计承载需求，又具备良好的现场施工适应能力。

通常会基于承载能力极限状态的计算结果，由技术人员根据构件设计厚度和当地环境最低温度，确定具体的钢材质量等级。在大跨度桥梁结构中，选用高强钢能显著降低结构整体自重，进而优化下部基础的设计规模，降低基础工程的整体造价。考虑到大跨度桥梁焊接工程量普遍十分庞大，低碳当量的钢材品种往往更受施工单位欢迎，因为这能显著减少现场焊接前的预热工作量，降低能源消耗，同时缓解整体工期压力。针对酸雨多发工业区或沿海盐雾区域，选用原则会进一步向具备初期抗氧化能力的钢材品种倾斜，提升桥梁整体的耐久性能。

二、特种钢材的应用规范

特种钢材的出现，弥补了传统普通钢材在极端工况下的性能短板，通过特定的生产工艺和成分设计，解决了复杂节点受力隐患及恶劣环境下的腐蚀瓶颈。近年来，在跨江跨海的大型桥梁中，特种钢材的应用占比正随着现代桥梁设计理念的升级而不断增加，已经成为推动现代结构工程创新的重要驱动力。

（一）厚度方向性能钢板（Z 向钢）的抗层状撕裂要求

在厚板交汇的复杂焊接节点中，由于焊缝冷却收缩产生的巨大拉应力垂直作用于钢板厚度方向，极易引发板材内部的层状撕裂，这就要求在这类关键部位采用具有厚度方向性能要求的钢材。这种被称为 Z 向钢的特种板材，核心考核指标是其在厚度方向上的断面收缩率，现行标准将其分为三个等级，用来应对不同拘束度的工程需求。为了达到 Z 向性能的要求，钢厂在冶炼环节就会执行严苛的真空脱气与成分净化工艺，将硫含量压缩至极低水平，防止钢板内部形成大尺寸的长条状硫化物夹杂物，从源头上避免了层状撕裂的内在诱因。

在工程技术管理层面，设计人员需要对这些需要使用 Z 向钢的关键部位进行专项明确标注，并在原材料进场复验环节，专门增加断面收缩率的性能验证。在现场加工焊接过程中，还需要配合使用低氢型焊接材料和合理的施焊顺序，进一步降低节点的撕裂风险。这种材料的应用，有效确保了巨型桥塔复杂节点与主梁锚固区的结构完整性。通过对内部微观组织的精细化管控，Z 向钢有效解决了厚重结构在三向应力状态下的剥离隐患。每一块投入使用的 Z 向钢都需要经过全板

面的超声波无损扫查，确认其内部质量完全符合设计所规定的等级要求。这不仅是对材料力学性能的补充要求，更是对桥梁结构整体稳定性的重要保障机制。

（二）大跨箱梁悬索桥 / 斜拉桥锚箱区域特厚钢板（ $\geq 80\text{mm}$ ）的选材与防层裂控制

大跨度缆索承重桥梁的锚箱是连接主缆索股 / 斜拉索与主梁的核心受力部件，荷载集中且受力状态复杂，往往需要采用厚度 80 毫米以上的特厚钢板进行整体制造。这类特厚钢板在轧制过程中更容易出现内部组织不均匀、偏析等缺陷，内部层状缺陷引发开裂的风险远高于普通厚度钢板，因此选材阶段就需要对钢材的压缩比、纯净度提出更高要求。生产过程要求钢厂采用更大钢锭开坯，保证足够压缩比让钢板内部组织充分锻合，从冶炼到轧制全流程都要严格控制内部夹杂物含量，降低成分偏析程度。除了常规的力学性能检测，进场验收阶段还需要针对整张钢板进行全方位超声波探伤，逐张排查内部是否存在分层或超标缺陷，从源头上杜绝不合格原料流入制造环节。在焊接工艺设计上，需要根据特厚钢板的碳当量和淬硬倾向制定专项预热方案，控制层间温度在合理范围，采用多层多道小线能量焊接工艺，减少焊接应力集中，同时配合焊后消应力热处理，释放焊接过程中产生的拘束应力，进一步降低层裂风险。

（三）不锈钢复合钢板的基层与覆层标准

面对海洋高盐雾环境或重工业区的强腐蚀大气侵蚀，不锈钢复合板提供了一种兼具高强度与高耐蚀性的经济型解决方案。该材料由碳钢或低合金钢作为基层承担结构荷载，由高性能不锈钢作为覆层抵御环境腐蚀，两者通过热轧或爆炸复合技术紧密结合为一体。现行标准 GB/T 8165 明确要求，结合界面的剪切强度必须满足特定数值要求，防止材料在受力过程中发生分层失效。覆层厚度通常根据桥梁设计年限内的腐蚀速率预测结果进行合理设定，而基层厚度与强度级别则根据结构承载力计算需求选取。在制造过程中，对两种金属结合界面的清洁度控制与元素扩散程度管控是技术核心，目的就是避免界面形成降低整体韧性的脆性金属间化合物。在工程现场焊接应用中，这类钢材需要采用专用的过渡焊接工艺，确保基层的承载性能与覆层的耐蚀性能都能得到有效延续。完工验收时，除了常规的力学性能测试，还需要对复合结合率进行全覆盖超声波检测，确保基层与覆层之间不存在大面积未结合区域。这种双金属复合材料的应用，在显著提升桥梁结构耐久性能的同时，还大幅度摊薄了桥梁全寿命周期的维护成本，其表面洁净

美观的不锈钢特性，也为城市景观桥梁提供了持久的外观表现力。

（四）耐候钢（耐大气与耐海洋腐蚀）的合金指数标准

耐候钢利用自身合金元素的作用，能够在表面自然形成一层致密的保护性锈层，从而实现免涂装或少涂装服役，这是推动桥梁建设绿色化发展的重要技术途径。现行标准中通过合金指数来评估其整体耐腐蚀性能，该指数通过计算铜、铬、镍等耐腐蚀元素的质量百分比得出，公式如下：

$$I = w_{Cu} + 4w_{Mo} + 8w_{Nb} + 12w_{Al} - w_{Ni} - w_{Si} - w_{Mn}$$

其中各符号代表对应元素的质量占比。在自然大气环境中，这些合金元素能够促使表面锈层由疏松多孔逐渐转变为致密稳定，阻断了水分、氧气与氯离子的进一步向内部渗透。针对高盐度的海洋性环境，还需要专门选用抗盐雾性能更强的耐海洋腐蚀耐候钢，其化学配比经过特殊优化，能够更好抵御氯离子的穿透破坏。在应用耐候钢时，构造细节的设计至关重要，必须避免结构设计形成长期积水的死角区域，否则稳定致密锈层将无法正常形成，反而会加速局部点蚀的发展。与此同时，配套使用的焊接材料必须具备与母材同等级别的耐候性能，以免焊缝处提前成为整个结构的防腐薄弱点。在耐候钢服役初期，需要对表面流锈现象进行适当管控，防止锈水溢流对下部桥梁附属结构或景观造成视觉污染。随着服役时间的延长，耐候钢表面会逐渐呈现出深褐色或紫红色的稳定色泽，这种自愈式的保护机制极大地降低了运营期人工防腐维护的需求，这种钢材在森林、高原等交通不便的偏远地区的桥梁建设中表现尤为突出，省去了成本极高、作业难度很大的重复涂装作业。

（五）上承式钢管拱桥无缝钢管与焊接钢管的技术条件差异

在上承式钢管拱桥中，拱肋作为核心受力构件，其钢管的材质选择直接决定了拱肋整体的受力性能与结构安全，无缝钢管与焊接钢管因生产工艺的本质区别，在技术要求上存在多维度差异。首先是生产工艺带来的内在特性差异：无缝钢管是由整块钢坯经穿孔热轧制成，整个钢管不存在焊接接缝，钢管整体截面连续均匀，不存在焊缝热影响区带来的组织与性能波动，截面力学性能各向一致性更好；而焊接钢管是由钢板卷曲成型后焊接制成，焊缝是整个构件的性能薄弱区域，需要额外对焊缝的力学性能、内部缺陷进行专项考核。其次，在内径与壁厚尺寸偏差控制上，无缝钢管的精度受轧制工艺限制，尺寸偏差范围更大，大直径无缝钢管的生产难度高、制造成本也显著偏高；而焊接钢管可以通过精准控制钢板下料

厚度和卷曲工艺，更易实现大尺寸规格的稳定生产，尺寸偏差控制更灵活，成本优势明显。在性能考核要求上，无缝钢管的技术标准侧重考核整体的力学性能与壁厚均匀性，无需额外进行焊缝质量检测；焊接钢管除了母材的力学性能要求，还必须对所有焊缝进行无损探伤检测，确认不存在气孔、裂纹、未焊透等内部缺陷，同时还要考核焊缝与母材的强度、韧性匹配性，确保焊缝不先于母材发生破坏。最后在工程应用选择上，中小口径的拱肋或主拱肋的缀条、横撑等次要受力构件，可选用无缝钢管，凭借其无焊缝的均匀性能提升构件可靠性；而大跨度上承式钢管拱桥的主拱肋多为大直径钢管，一般选用焊接钢管，既能满足设计受力要求，又能有效控制加工与建设成本。

三、型钢及辅助材料标准

型钢与管材在桥梁的支撑、附属体系中占据十分重要的地位，其几何尺寸的精确度直接影响现场拼装的效率与质量。对于这类材料的质量控制，不仅停留在基础材料属性层面，更延伸到了几何公差控制与表面完整性的精细化管理领域，确保了桥梁各功能性构件能够严丝合缝地协同工作，共同承受设计荷载。

（一）热轧型钢的规格与尺寸偏差要求

热轧型钢如工字钢、角钢、H型钢等，在出厂前必须通过严格的规格校验，确保各项参数符合标准要求。由于热轧型钢截面的不对称性，其在轧后冷却过程中的残余应力分布与几何形变规律较为复杂，因此现行标准对翼缘平行度、腹板偏心度以及截面总深度都设定了详细的公差范围，避免偏差过大影响现场安装。在桥梁主受力节点连接中，单根型钢的尺寸偏差如果超出限值，会引发多个构件偏差的累积，最终导致节点处需要强力组对，从而产生不必要的初始安装应力，这是桥梁建设中必须严格规避的问题。

表面质量也是热轧型钢考核的重点项目，任何肉眼可见的裂纹、结疤或深度超标的麻点都会被直接判定为不合格品，不允许进入施工现场。在施工现场，技术人员应使用专业检具对型钢的整体弯曲度进行抽检，避免弯曲过大强行校正后留下残余应力。由于热轧生产工艺的固有局限性，大规格型钢在翼缘与腹板交接的圆角根部区域容易产生组织不均匀和应力集中，设计与采购阶段就需要关注该区域的质量要求，优先选择生产工艺先进的厂家产品。高质量的热轧型钢，能够提供可预测性极佳的承载性能，是构建稳定桥梁骨架的基本单元。基于不同生产

批次的化学成分复验也必不可少，以此确保其可焊性与设计要求完全匹配。这些严苛的几何公差控制，是保证高强度螺栓连接质量及现场拼装精度的关键所在。

（二）圆管与方管等冷弯型钢的技术条件

冷弯型钢在桥梁护栏、拱肋支撑以及桥梁美化装饰工程中应用十分广泛，它通过带钢在常温下弯折成型，加工过程会产生显著的加工硬化现象，提升材料强度的同时也会降低塑性。现行标准要求这类冷弯成型管材必须具备优异的延伸性能，以保证在弯角处不产生微裂纹，避免后续使用中裂纹扩展引发破坏。对于焊接成型的冷弯钢管，其焊缝强度需要通过水压试验或无损探伤检测，确保其能承受预定的内压或外部荷载作用。圆管的圆度偏差与方管的角部圆弧半径是尺寸控制的关键，这些参数直接影响着构件之间的套接精度与焊接连接质量。在防腐处理方面，热浸镀锌是冷弯管材最常用的表面处理手段，镀锌层的厚度与附着力必须符合规范要求，以防止在大气环境下过早出现锈斑，影响美观和使用寿命。对于用于重要受力结构的冷弯管材，还需要充分考虑其加工过程产生的残余应力分布，必要时进行整体消应力热处理，进一步提升构件的疲劳性能。在现场安装环节，管口的平齐度直接决定了对接焊缝间隙的均匀性，会直接影响焊接质量，因此也需要严格管控。这些细致入微的技术要求，共同构成了冷弯型钢在桥梁应用中的质量底线，确保了轻型附属结构的美观性与使用安全性。

（三）钢材质量证明文件的核查与复验原则

每一个批次进场的桥梁用钢材，都必须配备由钢材生产厂家提供的正式质量证明文件原件，其中需要明确标注钢材牌号、熔炼批号、详细化学成分及各项力学性能指标的检测结果。项目现场的质量管理人员，需要对实物钢材表面的喷码或挂牌标识进行逐一核对检查，确认实物与书面文件信息能够一一对应，这是实现工程材料全流程可追溯性的第一道防线，也是最基础的管控环节。

材料复验原则需要严格遵循见证取样的相关规范要求，由具备资质的第三方检测机构进行独立测试，保证检测结果的公正性与准确性。常规的核查复验过程，通常涉及三个核心环节：首先是对质量证明书中标注的化学成分与力学性能指标，对照对应现行标准进行合规性对标，确认所有指标都满足标准要求；其次是完成现场实物标识与质量报告批号的唯一性匹配确认，避免混批混料；最后是按照规范要求抽取试样，完成关键性能指标的实际检测，做出最终的合格判定。

对于来源不明或在现场存放时间过久、防护不到位材料，必须执行全项目

的性能复测，不能仅凭原厂质量文件放行。当化学成分复验结果超出标准允许的波动范围时，即使力学性能检测结果合格，也需要结合实际焊接试验进行综合慎重评价，判断其是否会影响现场焊接质量。基于这种严密的闭环验证机制，能够将原材料缺陷引发的质量事故彻底消灭在萌芽状态。这种对原始质量凭证的严格核查，与对现场实测数据的坚持，是桥梁建设者对工程安全责任的深度践行，也是保障桥梁建设质量的必然要求。

第二节 钢材的力学性能与技术要求

在钢结构桥梁的建设体系中，钢材作为核心承重材料，其力学性能的优劣直接关乎桥梁结构的整体安全性与耐久年限。针对不同跨径及荷载条件的桥梁设计，需要对钢材的静力性能、冲击韧性、疲劳抗力及微观组织进行全方位的考量与技术规范约定，从而确保工程质量。

一、基础静力力学性能指标

基础静力力学性能是评估桥梁钢材受力状态的最基本依据，主要通过单向拉伸试验获取相关参数。这些指标能够直观地反映钢材在承受恒载与活载时的强度储备以及变形能力，为桥梁结构设计的抗力计算提供可靠的物理参数支撑。

（一）屈服强度与抗拉强度的标准值匹配

屈服强度代表了钢材由弹性状态进入塑性状态的临界应力点，在桥梁设计中通常以此作为强度计算的基准。对于高性能桥梁钢而言，屈服强度的稳定性对防止局部失稳具有重要意义。抗拉强度则标志着材料抵抗断裂的最大能力，展现了钢材在极端荷载下的安全余量。强度标准值的匹配并非越高越好，而是需要通过强屈比来权衡。强屈比是指抗拉强度与屈服强度的比值，该数值在桥梁抗震设计中扮演着关键角色。一个合理的强屈比范围能确保结构在遭遇地震等突发状况时，具有足够的能量吸收能力而不至于发生脆性破坏。在工程实际应用中，技术标准会对桥梁钢设定明确的强屈比下限，这种匹配机制既能充分利用材料强度，又能通过材料延性确保系统的鲁棒性，从而提升大跨度钢桥在极端工况下的生存概率。设计人员必须确保所选钢材屈服强度能够满足规范要求，通过对强度指标的合理匹配，能够使桥梁构件在满足轻量化要求的同时，拥有足够的安全储备，为工程

建设奠定坚实基础。

（二）伸长率与断面收缩率的塑性表征

塑性是指钢材在受力超过屈服点后产生永久变形而不破坏的能力，这一特性在桥梁受力复杂的节点处尤为重要。伸长率是衡量钢材塑性性能的核心指标之一，反映了材料在断裂前的宏观变形程度。良好的塑性是钢材能够适应复杂加工和受力的基础，伸长率通过拉伸试样断裂后的长度增加量与原始长度之比来定义，较大的伸长率意味着钢材在断裂前能经历显著的变形过程。断面收缩率则从截面收缩的维度反映了材料在受力过程中的横向变形能力，它是评价材料内部致密性的重要参考数据，能揭示钢材内部是否存在疏松等缺陷。

这两者的结合共同构成了钢材塑性的完整评价体系，高塑性钢材能有效重分配由于加工误差引起的次应力。桥梁工程中通常对伸长率有严格的下限要求，确保在焊接环境下材料依然能保持足够的韧性。在复杂的受力环境中，塑性好的钢材能够通过局部的塑性变形来缓解应力高峰，防止裂纹的过早萌生。这种变形能力对于多向受力状态下的桥梁节点尤为关键，能够提高结构在服役期间的抗损伤能力，确保桥梁结构的整体安全运行。

（三）冷弯试验与钢材工艺性能验证

冷弯试验是评估钢材在常温下承受弯曲变形能力的一种重要工艺手段，它能综合反映钢材内部组织的均匀性及杂质分布情况。在桥梁制作过程中，许多构件需要经过冷加工成型，冷弯性能的优劣直接关系到加工过程中是否会出现裂纹。试验时将试件按规定直径的弯心进行弯曲，之后观察其受拉面是否有裂纹、起皮或断裂等现象。冷弯试验对钢材内部缺陷非常敏感，能有效揭示热轧过程中的微观不均匀性或晶体偏析。工程技术规范要求钢材在达到规定的弯曲角度后，其表面依然保持平整完好，这才能说明钢材具备良好的冷成型工艺性。通过该项验证，可以确保钢材在复杂的桥梁构造细节处理中，能够经受住剧烈的形变而不丧失承载能力，为后续的焊接及拼装工序打下稳固的质量基础。对于厚度较大的钢板，冷弯试验还能验证其厚度方向的性能一致性，防止在弯曲加工时出现层状开裂。在生产流水线中，冷弯性能是衡量钢材可加工性的门槛指标，只有通过严苛冷弯考验的材料，才能获准进入后续的加工阶段。这种验证能够提前排除脆性风险，使得桥梁构件在设计造型要求下维持极高的结构完整度与可靠性。

二、冲击韧性与断裂控制指标

冲击韧性是衡量桥梁钢材在冲击荷载作用下吸收能量的能力，对于寒冷地区及重载桥梁尤为关键。在动态荷载及复杂环境的影响下，钢材的断裂韧度决定了结构是否会发生突发性的脆性断裂。本章重点探讨冲击功要求及裂纹敏感性的评价。

（一）不同质量等级（C、D、E、F）的低温冲击功要求

桥梁钢的质量分级与其低温冲击韧性密切相关，不同等级对应了材料在不同温度条件下的安全保障水平。表 2-2 列出了不同质量等级桥梁钢的低温冲击功要求：

表 2-2 不同质量等级桥梁钢低温冲击要求表

钢材质量等级	要求试验温度	适用区域
C 级	0℃	环境温度相对温和的区域
D 级	-20℃	冬季温度较低的常规区域
E 级	-40℃	高纬度低温区域
F 级	-60℃	极寒特殊服役区域

这种分级制度的核心目的在于通过对冲击功的阶梯式要求，有效防止桥梁在低温状态下发生应力突变引发的脆性断裂。在具体的材料采购与进场验收过程中，必须严格核对质保书中的冲击功实测值，确保其不低于设计要求的最低能量门槛。桥梁结构的耐久性很大程度上取决于钢材在恶劣环境下的韧性表现，合理的等级选择能够兼顾经济成本与结构安全。工程师在选择材料时需要充分调研桥址的气象资料，确保所选等级能够覆盖极端寒潮工况，从源头封堵冷脆断裂的可能性，保障桥梁在漫长的设计寿命内能够抵御严寒考验。通过科学的等级划分，可以为不同地域的桥梁提供针对性的安全保障。

（二）夏比 V 型缺口试样的试验温度判定

夏比 V 型缺口试验是评价钢材冲击韧性的标准方法。试验温度的判定对结果具有决定性影响，因为钢材存在明显的脆性转变温度区间。当环境温度降低到某一临界点时，材料的失效模式会从韧性断裂转变为脆性断裂，这种转变对桥梁安全构成了极大威胁。在确定试验温度时，需要结合桥梁所在地的最低气温以及结构的应力状态进行综合评估。通常试验温度应等于或低于桥梁实际服役的最低设计温度。如果在规定温度下，夏比冲击吸收能量的平均值及最小值均能达标，

则认为该材料具备足够的抗脆断能力。在实验室检测中，必须精确控制冷却介质的温度波动，确保试样在瞬时冲击时处于恒定的温度环境，从而获得真实可靠的数据。科学的温度判定准则能够有效模拟桥梁在严冬时节的极端受力场景，通过缺口效应模拟应力集中点的力学响应。这种检测方式不仅能验证钢材的低温韧性，还能筛选出那些对缺口高度敏感的劣质材料。在高质量桥梁建设中，每一组冲击试验数据都是评估结构断裂抗力的重要依据。通过严密的温度控制，技术人员可以为桥梁的运行提供可靠的数据支持，确保钢结构在复杂气候下能够稳如泰山。

（三）钢桁梁厚板节点与锚箱厚板的高约束区断裂韧性控制

钢桁梁大跨度桥梁中，厚板节点和锚箱长期承受高应力且处于三向受拉的高约束状态，这类区域一旦产生裂纹，极容易快速扩展引发灾难性断裂。相较于常规构件，这类高约束区对厚板的断裂韧性有更严苛的要求，不能仅满足常规夏比冲击功的要求，还需要严格把控钢板厚度方向的性能，防止层状撕裂的产生。对于厚度超过 40mm 的厚钢板，需要补充进行 Z 向拉伸试验，保证其厚度方向的断面收缩率满足规范要求，从根源上避免高约束下的层间开裂风险。同时，针对厚板轧制过程中容易出现的中心偏析和组织不均问题，需要要求钢厂提供厚板的心部韧性检测报告，确保全厚度截面的韧性均匀达标。这类高约束厚板还需要严格控制碳当量和硫磷杂质含量，减少焊接冷裂纹和脆性夹杂的产生，配合合理的焊接工艺，进一步保障区域韧性储备，从而让钢桁梁关键受力位置始终保持可靠的抗断裂能力，保障整体结构的长期安全。

三、疲劳性能与微观组织要求

疲劳性能是决定桥梁服役寿命的关键因素，尤其在铁路桥及频繁通车的公路桥中表现得尤为突出。微观组织决定了宏观力学表现，通过对钢材内部结构的精细调控，可以从源头上提升其抗疲劳开裂的能力。本章关注组织演变对性能的影响。

（一）钢材 S-N 曲线与疲劳细节分级的基础

曲线描述了恒定应力幅值与结构失效循环次数之间的关系，是桥梁疲劳寿命评估的核心工具。在钢结构桥梁设计中，不仅要考虑材料本身的疲劳特性，更需要结合焊接接头、栓接孔等特定细节的疲劳分级。疲劳细节分级是基于大量试验数据，将不同构造形式按其抗疲劳能力的强弱划分为不同的类别。对于关键受力

部位，设计人员会参照曲线提供的强度极限，设定合理的应力幅控制范围，以确保结构在数千万次甚至上亿次的循环荷载下不发生疲劳破坏。这种评估方法充分考虑了应力集中的影响，将复杂的宏观受力转化为可量化的寿命参数。在实际施工中，对焊缝表面的打磨处理以及对孔壁质量的严格管控，其目的都是为了通过优化细节分级来提高结构的疲劳耐力。通过不断修正和完善寿命模型，可以更精准地预测既有桥梁的剩余寿命，为后期的养护维修提供科学指导。高等级的疲劳细节设计要求施工阶段必须具备极高的工艺一致性，避免因细微的焊接缺陷导致疲劳裂纹的提前萌生。在现代桥梁工程中，这种基于曲线的评价体系已成为确保结构安全运营的标准，为延长桥梁的使用年限提供核心技术支撑。

（二）碳当量与焊接裂纹敏感性的关系

碳当量是衡量钢材可焊性的重要参数，其将多种合金元素对焊接硬化倾向的影响折算为碳的等效含量。较高的碳当量通常意味着钢材在焊接热影响区容易形成硬脆的马氏体组织，从而显著增加冷裂纹产生的风险。桥梁钢在生产过程中通过低碳微合金化技术，在保证强度的同时尽可能降低碳当量。对于大厚度构件的焊接，如果碳当量超出推荐范围，则必须采取预热、后热及控制层间温度等特殊工艺措施，以缓解焊接残余应力并促进氢气的逸出。焊接裂纹的敏感性还与环境湿度、氢含量密切相关，但在材料性能层面，碳当量的控制始终是第一道防线。在施工现场，技术人员会根据钢材的碳当量数值，查阅相关的焊接热循环曲线，制定科学的焊接工艺规程。通过对这一指标的精准把控，可以有效避免因焊接工艺不当导致的隐性缺陷，确保桥梁连接节点的强韧性与结构的完整性。稳定的碳当量指标是实现自动化焊接及提高焊接效率的前提，它直接关系到桥梁主体结构的加工进度与最终质量。工程师必须在材料招投标阶段就对此指标提出明确要求，并在材料进场后进行化学成分全检，确保其实测值波动在安全范围之内，为后续施工环节提供可靠的性能预期，最终保证桥梁的安全可靠。

（三）晶粒度与非金属夹杂物级别的显微检验

显微组织决定了钢材的内在品质，其中晶粒度与非金属夹杂物是两个最为关键的检验维度。细小的晶粒不仅能提升钢材的屈服强度，还能改善其低温冲击韧性，这种强韧化效应是桥梁钢追求的理想状态。通过显微镜观察，可以将晶粒度评定为不同的级别，晶粒度级别越高，代表晶粒尺寸越细小，钢材的强韧性配合越优异。非金属夹杂物如硫化物、氧化物等，在钢材内部会成为应力集中的源头，

容易诱发疲劳裂纹的萌生与扩展。在高性能桥梁钢的生产中，需要通过精炼技术严格控制杂质含量，并对其形态及分布进行显微评级。在钢材进场验收时，通过抽样进行金相分析，可以直观地判断材料是否经过充分的塑性加工以及热处理工艺是否达标。这种从微观层面进行的质量控制，能有效剔除那些宏观性能虽然合格但内部存在严重组织缺陷的材料，为桥梁的长久安全运行提供最为底层的质量保障。通过对组织形貌的严密监控，能够确保钢材在复杂的交变应力环境下具有优异的稳定性。这种微观层面的检测手段与宏观力学试验相辅相成，共同构建了现代桥梁钢材全方位的质量评价框架，为大桥的百年寿命保驾护航。通过对微观结构的深度理解，工程团队能够更好地把控材料质量，确保桥梁建设的每一个环节都符合技术标准，最终实现长久的社会效益与工程安全。

第三节 连接材料与防腐材料

钢结构桥梁的建设与服役质量在很大程度上取决于连接材料与防腐材料的性能优劣。本节将详细探讨焊接材料、高强度连接副以及各类涂装材料的选型标准与检验要求，通过严密的材料控制体系，为钢桥结构的安全性与耐久性提供坚实保障，确保其在复杂野外环境下能够长期稳定服役。

一、焊接材料的匹配与检验

焊接是钢桥制造中最核心的连接技术，焊材与母材的匹配精度直接决定了焊接接头的强韧性和整体可靠性。在正式开工施工前，必须针对不同类型的钢材建立严谨的焊材匹配体系，并通过严格的检验程序验证其可靠性能，确保焊接部位的承载能力与母材保持高度一致，不会成为结构受力的薄弱点。

（一）焊条、实心焊丝与药芯焊丝的型号对应关系

焊接材料的型号选择必须紧密围绕母材的力学性能和化学成分展开。在钢结构桥梁建造中，对于常用的低碳钢或低合金高强度钢，选型的主导原则是确保焊缝金属的屈服强度与抗拉强度不低于母材的标准规定值。电焊条的选择多集中在低氢型系列，其药皮成分能够有效降低焊缝中的扩散氢含量，从而大幅降低氢致延迟裂纹的产生风险。实心焊丝在气体保护焊中展现出优异的送丝稳定性与焊缝成型质量，其型号需根据保护气体的具体组分进行微调，以保证熔滴过渡的稳定

性，避免焊接过程出现飞溅或断弧问题。

药芯焊丝凭借其工艺灵活性和高熔敷效率，在厚板大坡口焊接中占据重要地位。其型号对应关系不仅涉及强度等级，还包含对低温冲击功的具体要求。在寒冷地区或承受显著动载荷的桥梁部位，焊材的韧性指标甚至比强度指标更为关键，直接影响桥梁抗冲击抗疲劳的能力。施焊准备过程中，焊材的存放环境与烘焙工艺同样不能忽视，避免因水分侵入导致焊缝内部产生气孔，进而影响桥梁整体的疲劳寿命。具体的匹配工作应当基于焊接工艺评定结果，通过试验确认焊材型号与母材的相容性，确保每一道焊缝都能达到设计要求的性能标准。

（二）埋弧焊丝与焊剂组合的分类及熔敷金属指标

埋弧焊作为桥梁主梁大部件制造的主要焊接手段，其焊丝与焊剂的组合性能直接关系到主梁的整体质量，至关重要。根据国内相关行业标准，这种组合被分为不同的类别，以适应不同强度等级的母材使用需求。焊剂在焊接过程中起到造渣、保护熔池及合金化的作用，而焊丝则提供主要填充金属，两者的冶金化学反应共同决定了熔敷金属的最终性能。熔敷金属的力学性能指标是衡量焊接质量的核心，具体包括抗拉强度、屈服点以及伸长率三项核心内容。

在实际工程应用中，熔敷金属在低温环境下的冲击功表现直接决定了焊接接头的脆性转变温度，影响低温环境下结构的安全性。高碱度焊剂的使用能有效降低焊缝中的杂质含量，提高焊缝金属的纯净度，从而显著改善其冲击韧性。基于此，每一个焊丝与焊剂的组合进场后，都必须通过严格的进场复验，验证其在特定焊接参数下的力学表现，确认符合要求后方可投入使用。同时，熔敷金属的扩散氢含量也需满足规范要求，通常采用水银法或气相色谱法进行测定，以确保焊接接头内部不产生冷裂纹，维持结构整体的连续性与安全性。

（三）耐候钢与不锈钢复合板专用焊材的耐腐蚀性要求

耐候钢桥梁的焊接材料必须具备与母材相近的抗大气腐蚀性能，这是确保结构在免涂装或简易涂装条件下长期服役的核心前提。为了达到这一目标，专用焊材中通常需要添加特定比例的镍、铜、铬等合金元素。这些元素能够在焊缝表面促成一层致密的非晶态氧化层，阻断水分与氧气的进一步渗透，从而使焊缝与母材在腐蚀速率上保持步调一致，避免焊缝先于母材发生腐蚀破坏。

不锈钢复合板的焊接过程更为复杂，需要针对基层、复层以及两者之间的过渡层选用不同的专用焊材。基层焊材应保证与底层结构钢的力学性能匹配，确保

主要的承载能力满足设计要求。复层焊材必须具备极佳的耐腐蚀性，其化学成分应与不锈钢复层的要求保持一致，以抵御环境介质的长期侵蚀。过渡层焊材则要特别关注异种钢焊接产生的稀释问题，通常选用高铬镍含量的材料，以缓冲组织突变，防止在界面处产生硬脆组织或热裂纹，保证复合界面的结合质量。

在进行这类特殊材料的焊接检验时，除了常规的力学性能测试，还需额外进行晶间腐蚀试验或盐雾试验，以验证焊缝区域的化学稳定性。这种针对性的材料选择与性能核查，是防止复合板结构在服役期间发生电化学腐蚀或剥离破坏的关键环节，充分体现了钢桥精密制造对材料性能的严格要求。

（四）钢管拱主弦管对接全熔透焊缝的高强匹配焊材选用

钢管拱主弦管作为拱桥的核心受力构件，其对接全熔透焊缝不仅要承受长期的静载应力，还要承受车辆通行带来的交变荷载，对焊缝强度和韧性的匹配要求极高。主弦管多采用大壁厚高强度钢材卷制而成，焊接过程中容易产生较大的残余应力，因此焊材选用必须遵循“等强匹配、等韧匹配”的基本原则，保证焊缝的强度指标不低于母材标准值，同时具备足够的韧性储备来分散应力，抵御裂纹萌生。对于屈服强度在 400MPa 以上的高强度主弦管钢材，通常选用低氢型、低扩散氢的高强焊材，减少焊接冷裂纹的产生风险。在完成焊材初选后，必须通过焊接工艺评定试验，对对接接头的拉伸、弯曲、低温冲击性能逐一检测验证，确认各项指标均满足设计要求后，才能确定最终选用的焊材型号。针对全熔透焊缝的无损检测要求，焊材本身还需要具备良好的工艺性能，保证焊缝内部无隐性缺陷，便于射线、超声检测识别，从材料端保障主弦管对接接头的整体可靠性，为钢管拱结构的长期承载安全打下坚实基础。

二、高强度螺栓连接副与圆柱头焊钉

高强度螺栓连接副与圆柱头焊钉是钢桥现场拼接连接与钢 - 混组合结构中的关键功能构件。本章节重点关注这些材料的力学特性与标准符合性，通过对紧固力矩、轴力以及焊接性能的精确控制，确保桥梁各个构件之间能够形成稳定可靠的整体受力体系，有效抵御各种复杂的动静载荷作用。

（一）铁路钢桥高强度大六角螺栓连接副标准

铁路钢桥对高强度大六角螺栓连接副的要求极为严格，必须符合专门的行业技术标准 Q/CR 701。这一标准详细规定了螺栓、螺母及垫圈的材料组成、几何

尺寸公差以及热处理工艺要求。连接副作为一个整体受力单元，其各组成部分的硬度匹配与强度等级必须高度协调，通常螺栓采用优质合金结构钢，经过淬火与回火处理后，其性能等级需达到 10.9 级。

在制造环节，螺栓的螺纹加工通常在热处理后采用滚压工艺完成，这能有效提升螺纹根部的疲劳抗力，延长螺栓的使用寿命。表面处理多采用磷化工艺，旨在提供稳定的摩擦特性并兼顾短期的防锈功能，满足存放和施工周期的防护需求。进场检验时，每批次产品都必须进行拉力载荷、芯部硬度以及脱碳层深度的检测，任何一项指标偏离标准要求，都将直接威胁到桥梁在高动载荷下的连接可靠性，因此对标准的执行必须不折不扣，绝不允许不合格产品流入施工现场。

（二）高强度螺栓的扭矩系数与紧固轴力要求

扭矩系数是衡量高强度螺栓连接质量的核心参数，它反映了施工时施加的扭矩与螺栓内部产生的紧固轴力之间的转换效率。标准要求同批次连接副的扭矩系数平均值应保持在 0.110 至 0.150 的窄区间内，且标准偏差应严格控制在 0.010 以内。这种高度的一致性是为了确保在施工过程中，通过控制扭矩能够获得精确且均匀的预紧力，避免因轴力不足导致连接滑动失效，或因轴力过大导致螺栓提前发生断裂。

紧固轴力是确保钢桥摩擦面能够有效传递剪力的根本保障。在设计阶段，根据桥梁的整体受力需求确定每个连接部位所需的预拉力值，施工中则通过初拧与终拧两步工序来逐步达成目标轴力，消除板件间隙的影响。终拧完成后的轴力检测是质量监控的关键步骤，通常采用轴力计直接测试，或通过扭矩系数换算进行抽检，确认轴力符合设计要求。

由于扭矩系数会随存放时间、环境湿度及螺栓表面状态的变化而发生漂移，因此施工现场必须进行扭矩系数的随批复验，不能仅依靠出厂检测结果。这要求现场试验环境应尽可能模拟实际作业条件，确保测试数据能够真实反映施工状态下的扭矩系数。与此同时，紧固顺序也需严格遵守从中心向四周对称扩展的原则，以最大限度地减小板件变形对轴力分布的影响，确保每一个螺栓都能达到预定的紧固状态。

表 2-3 高强度螺栓扭矩系数要求表

参数名称	要求范围
同批次扭矩系数平均值	0.110~0.150
同批次扭矩系数标准偏差	≤ 0.010

表 2-3 列出了高强度螺栓扭矩系数的标准要求，从要求中可以看出，标准对扭矩系数的离散度控制要求极高，目的就是为了保障批量施工后螺栓轴力的均匀性，避免出现个别螺栓轴力不足或超拧的问题。

（三）圆柱头焊钉及配套瓷环的力学与焊接性能

圆柱头焊钉作为组合梁结构中传递剪力的关键组件，其质量直接关系到钢板与混凝土翼缘板的协同工作效果，决定了组合梁的整体受力性能。焊钉通常采用优质冷镦钢制造，其抗拉强度与伸长率必须达到特定的性能等级，以保证在剪切应力作用下具备足够的塑性变形能力，避免发生脆性剪断破坏。配套的保护瓷环则在焊接过程中起到保持电弧稳定、防止熔化金属溅射以及形成良好焊脚形状的作用，其自身的干燥程度对焊接质量有着显著影响，受潮瓷环极易导致焊缝产生气孔，因此使用前通常需要进行烘干处理。

关于焊钉的焊接性能及质量控制，主要体现在三个核心方面：首先是焊钉根部的熔合质量，焊接后的焊钉应保证根部焊缝均匀、饱满，且不应存在咬边或未熔合缺陷；其次是弯曲试验的合格性，在现场抽检中，焊钉经受 30 度的弯曲塑性变形后，根部不应出现裂纹，这是直观验证材料与焊接工艺韧性的简便方法；最后是焊接参数的稳定性，自动穿透焊工艺要求电流、电压与焊接时间得到精确匹配，以确保在大规模施工中每一个焊钉的锚固强度都能保持高度一致。

三、涂装与密封材料标准

涂装与密封材料是钢结构桥梁抵御外部侵蚀的最后防线，其性能优劣直接决定了结构的维护周期与全寿命周期防腐成本。本节通过对配套涂层体系、特殊功能性漆料以及密封胶的技术指标进行深入分析，阐明如何构建一套科学严密的防护体系，以应对当前日益严峻的自然环境腐蚀挑战。

（一）底漆（富锌类）、中间漆与面漆的配套体系要求

钢桥的防腐体系通常由底漆、中间漆和面漆构成的多层复合系统组成，各层功能明确又相互配合。底漆作为直接接触基材的层级，多采用富锌类涂料，其通

过锌粉的电化学牺牲阳极作用，为钢材提供卓越的阴极保护，即使漆膜出现微小破损也能避免基材锈蚀。锌粉在干漆膜中的含量通常要求达到 70% 或 80% 以上，以确保导电路径的连续性，保障阴极保护作用有效发挥。中间漆则起到承上启下的作用，多选用环氧云铁涂料，利用片状云母氧化铁产生的屏蔽效应，大幅度延长腐蚀介质渗透到基材表面的路径，提升整体防护效果。

面漆则是抵御外界环境直接作用的最外层屏障，其必须具备极强的耐候性、保光性以及抗紫外线能力，才能长期保持防护性能。氟碳涂料或聚氨酯涂料是目前大型桥梁的主流选择，能够保证漆膜在数十年内不发生显著的粉化或变色，维持良好的防护效果和外观。整个配套体系的相容性是施工控制的核心，要求各层涂料之间的附着力必须达到相关标准规定的级别，避免出现层间剥离的问题。施工中需严格控制每层漆膜的厚度，防止因涂层过厚产生漆膜开裂，或因涂层过薄导致防护能力提前失效。这种层层递进的防护策略，共同构筑了钢桥抵御严酷大气腐蚀的长久屏障。

（二）防锈防滑涂料与聚氨酯盖板漆的技术指标

防锈防滑涂料是针对桥面铺装底层及高强度螺栓摩擦面连接设计的特殊功能性材料。其核心控制指标是抗滑移系数，这要求涂料中必须含有坚硬的耐磨填料，如石英砂或碳化硅，以确保在长期承受车辆载荷与环境变化时，连接界面的摩擦力不会发生明显衰减。在现行技术标准中，抗滑移系数通常应稳定在 0.45 至 0.55 之间，这对于提高高强度螺栓连接的可靠性具有决定性意义，直接影响连接部位的抗剪承载力。

聚氨酯盖板漆则主要应用于钢桥面板的顶部保护，作为铺装层与钢板之间的过渡防护。这种漆膜具有卓越的耐磨性、柔韧性以及抗冲击性能，能够有效应对车辆轮胎的直接摩擦与撞击，同时缓冲铺装变形对钢板的影响。其固含量通常较高，一次成膜厚度大，干燥速度快，有利于缩短现场施工周期，减少对施工进度影响。在施工质量控制方面，需要关注三个关键参数：首先是涂料的细度与粘度，这直接影响施工的流平性与最终漆膜的致密程度；其次是涂层的粗糙度，通常要求达到相关标准中的规定级别，以增强涂层与后续铺装层的结合力；最后是漆膜的交联固化程度，特别是在低温环境下施工，需确保涂料能够完全固化，以达到预期的力学强度和防护性能。

（三）硫化型密封胶的拉伸强度与老化性能要求

硫化型密封胶在钢桥接缝密封中扮演着至关重要的角色，尤其在箱梁拼接缝隙、构件连接接口及排水细部构造处应用广泛。这类材料不仅要具备足够的拉伸强度以应对桥梁因温度变化、荷载变形产生的结构位移，还要拥有卓越的粘结性能，能够长期与基材牢固结合不脱开。硫化后的密封胶通过化学交联形成稳定的三维网状结构，使其具有优异的弹性恢复率，即使在反复拉伸与压缩的循环应力下，依然能保持接头的严密性，防止水分和杂质进入结构内部引发腐蚀。

老化性能是评价密封胶质量的另一关键核心维度。由于桥梁长期处于露天自然环境，密封胶必须经受住人工气候加速老化试验的考核，验证其长期耐候性能。在经过特定时间的紫外线照射与冷热循环试验后，密封胶的质量损失率及性能下降比例应控制在规定范围内，表面不应出现粉化、龟裂或剥离等失效现象。如果老化性能不合格，密封胶会在短短数年内迅速失去弹性并产生缝隙，导致外界水分侵入，造成钢材发生局部锈蚀，进而威胁结构的整体安全。

基于此，在施工环节中，对需要打胶的基材表面预处理要求极高。必须彻底清除钢材表面的油污、灰尘及浮锈，保持表面干燥清洁，必要时还要涂刷专用底涂剂，以增强密封胶与基材之间的分子间作用力，提升粘结可靠性。通过对拉伸强度、断裂伸长率以及耐候性指标的严格把控，硫化型密封胶能够有效封堵结构缝隙，与涂装体系协同工作，共同延长钢结构桥梁的使用寿命。以上内容系统地阐述了钢结构桥梁连接材料与防腐材料的性能要求与检验标准，这些技术指标的严格把控不仅提升了钢桥工程的整体建设水平，更为桥梁的全寿命周期安全稳定运行奠定了坚实的物质基础。

第四节 新型高性能钢材的应用

随着桥梁建设行业不断向高强、长寿与绿色化方向跨越发展，高性能钢材的应用已经成为提升桥梁结构整体性能的核心关键。这类钢材通过精炼提纯工艺优化与精准微合金化改性，实现了强度、韧性与耐腐蚀性三者的平衡，为现代大型复杂桥梁工程提供了坚实可靠的物质基础。

一、高强度桥梁钢的制造适应性

高强度桥梁钢在减轻桥梁上部结构自重、降低结构地震作用、缩短现场施工周期等多个方面都有着显著优势。但要充分发挥它的物理性能潜能，必须针对其特有的微观组织特性与加工敏感性，制定出科学严密的制造工艺规程，才能保证材料各项属性在加工完成后仍然保持稳定，不会出现性能劣化的问题。

（一）Q500q 级及以上高强钢的冷作与热作工艺限制

Q500q 级及以上高强钢的冷作工艺受自身强度提升的影响，成型后的回弹量远远超过普通桥梁钢材，这就要求在模具设计阶段就必须预留出充足的回弹补偿空间。在冷加工过程中，材料的加工硬化现象十分明显，过度变形会引发局部塑性储备大幅下降，因此对冷弯半径的控制极其严格。这类钢材的冷弯半径需要根据实际板厚精确计算，严禁在未经过工艺验证的情况下进行小半径折弯，从根源上规避微裂纹产生的风险。

在热作工艺方面，这类高强钢对加热温度的容忍度极低。由于钢材本身多采用控轧控冷工艺生产，强度提升的核心机制依赖于微观组织细化，一旦加热温度超过出厂的回火温度，将不可逆地导致晶粒异常长大，最终造成屈服强度与冲击韧性的同步下降。如果施工过程中必须进行热校正操作，应当严格控制加热的最高温度与后续冷却速度，绝对禁止水冷等剧烈冷却方式，防止基体产生硬脆组织。整个热操作过程必须由经验丰富的资深技师执行，并且配合红外测温设备全程监控温度变化。针对板材剪切下料工序，高强钢展现出较高的缺口敏感性，所有切割边缘都必须进行磨平处理，彻底去除热切割产生的受损层，有效提升构件的疲劳寿命。

（二）高强钢对焊接热输入的敏感性及工艺对策

高强钢对焊接热输入十分敏感，热影响区的性能劣化一直是这类钢材工程应用的主要瓶颈。在焊接热循环的作用下，焊接粗晶区容易出现软化或者脆化问题，这就要求实际焊接工艺必须采取低热输入、多层多道焊的策略。焊接电流过大或者焊接速度过慢都会导致热输入超标，破坏钢材原本的强韧性匹配。正式施工开工前，必须按照规范要求进行焊接工艺评定，确定符合性能要求的能量输入区间，不能仅凭经验施焊。为了确保焊接质量，工程中常采用以下工艺对策：实施严格的预热与层间温度控制，预热温度根据钢材碳当量计算确定，既要防止冷裂纹产

生，又要避免温度过高引发性能下降；同时选用低氢型焊接材料，并且按照规范要求严格烘焙，有效降低焊缝中扩散氢含量，消除延迟裂纹产生的隐患。

这套工艺管控措施不仅能保护母材的原始组织，更能实现焊缝与母材的强度匹配，保证接头性能均匀。如今很多项目都已经通过数字化监控实现焊接参数实时追踪，确保每一条焊缝的参数都符合标准要求。在构造复杂的节点部位，应当优先采用低收缩率的焊接顺序，有效降低残余应力对构件疲劳强度的不利影响。通过对焊接热影响区硬度的定期抽检，可以实时评估焊接质量的稳定性，确保接头韧性不低于母材标准值的百分之九十。

（三）高强钢在提升大跨度桥经济性中的应用实例

高强钢在大跨度桥梁中的经济价值主要体现在钢材用量削减与下部结构造价优化两个方面。在某主跨超千米的双塔斜拉桥建设中，主梁整体采用 Q500q 级高强钢，相比传统 Q345q 钢使上部结构自重下降约百分之十五。结构自重减轻直接导致拉索索力减小，不仅缩小了拉索设计规格，还减小了索塔的截面面积，形成了从材料生产到现场施工的全产业链成本节约。由于钢材强度提升，梁体可以设计得更加纤细，既提高了桥下通航净空，又改善了结构整体的抗风稳定性。在另一座大跨悬索桥的加劲梁制造中，应用 Q500q 高强钢取代传统 Q345q 钢材，得益于更高的强度储备，可以将构件壁厚减薄，反而解决了大厚板焊接质量控制的难题。虽然高强钢的单价比普通钢材略高，但综合考虑运输、吊装以及基础工程规模缩减带来的成本下降，项目总投资能实现百分之五左右的降幅。这种成本优势随着桥梁跨径增加会变得尤为凸显，因为结构自重产生的内力占比随跨径增大不断攀升，高强度带来的减重效益也呈现出递增趋势。通过国内已建成的多座大跨度桥梁对比来看，高强钢正逐渐成为跨海大跨桥梁工程的首选材料，同时也为桥梁后期养护成本的控制创造了有利条件，还给桥梁运营期的结构安全管理提供了更高的安全储备。

二、免涂装耐候钢的特殊工艺

免涂装耐候钢依靠自身合金元素作用，能在表面形成致密稳定的氧化层抵抗大气腐蚀，但在实际工程应用中对构造细节设计与表面处理工艺都有特殊要求。只有通过精细化的工艺控制，才能确保它在无需额外涂装防腐的情况下实现百年的设计服役寿命，有效降低桥梁全寿命周期成本。

（一）裸用耐候钢对避免滞水构造的设计要求

裸用耐候钢的设计必须充分考虑环境水分的影响。如果构造上存在长期积水的位置，就无法形成均匀连续的保护性锈层，钢材的腐蚀速率会急剧增加。设计过程中必须确保雨水冲刷部位排水顺畅，禁止出现槽形开口向上这类容易蓄水的截面形式。

表 2-4 裸用耐候钢排水构造优化参数表

构造部位	优化方式	控制要求
转角节点	增设排水孔	孔径不小于 20mm，间距不大于 1000mm
水平构件	设置横坡	横坡坡度不小于 1.5%
构件连接缝隙	密封处理	采用耐候密封胶填缝，连续焊缝封闭
钢箱梁内部	布置除湿系统	控制相对湿度不高于 60%

表 2-4 列出了裸用耐候钢排水构造优化的常见方式和控制要求，通过这些构造手段，可使耐候钢在服役期间保持合理的干湿交替循环，促进保护性锈层生成。除此之外，连接部位设计应当尽量精简，减少重叠板件的使用，因为板件间隙容易产生缝隙腐蚀。对于无法避免的贴合连接面，应当使用长效耐候密封膏封闭处理。

（二）耐候钢表面初期锈层稳定化处理技术

耐候钢在服役初期会伴随锈水流挂问题，不仅影响桥梁景观效果，还会对混凝土墩台造成污染。为了加速致密氧化层形成，同时控制锈液流淌问题，初期锈层稳定化处理技术应运而生。这种技术通过在耐候钢表面涂覆含有活性成分的化学基质，促使钢材中的合金元素在短时间内形成均匀稳定的氧化膜，整个处理流程分为表面预处理、稳定化剂喷涂以及自然固化三个阶段。

起始预处理阶段必须通过喷砂除锈将表面清理至 Sa2.5 级及以上，彻底去除轧制氧化皮和表面杂质。随后采用专用高压喷涂设备将含有促进腐蚀离子的稳定化溶液均匀覆盖在钢材表面。在随后的数月自然固化过程中，表面颜色会由黄变红再逐渐转深褐色，最终形成附着力强、能阻隔氧气和水分渗透的致密氧化层。这种处理手段大幅缩短了锈层稳定期，从根源上解决了初期的视觉污染难题。施工过程中应当避免阴雨天气操作，确保药剂在钢材表面的化学反应环境稳定，从而获得色泽一致、防护性能优异的长效防护层。

（三）耐候钢焊缝及飞溅物的特殊防护与清理要求

耐候钢焊接需要在焊缝成分上与母材匹配，必须选用含镍、铜等耐腐蚀元素的专用耐候钢焊丝，保证焊缝的耐蚀能力与母材匹配。焊接产生的飞溅物如果残留在钢材表面，会破坏锈层的连续性，成为点蚀的策源地，因此施工中会制定严密的清理流程：首先是在焊接坡口两侧提前涂刷防飞溅剂，使焊接产生的金属飞溅颗粒无法牢固附着在钢材表面；焊缝焊接完成后必须立即使用角磨机彻底清理飞溅，确保表面圆滑且无药皮残留，为均匀锈层形成提供平整的基底。

同时，焊接热影响区的氧化状态与母材不一致，成型后颜色差异明显。为了保证整体外观美观，焊接检验合格后应对热影响区周边进行局部二次喷砂，重新暴露出干净的金属基体，使其与大面同步进行稳定化处理。这一步处理是保证耐候钢整体外观均匀美观的关键工序。在整个施工全过程，应当严禁普通碳钢构件接触耐候钢表面，防止异种金属污染引起局部电化学腐蚀，破坏整体耐候性能的均衡性。在构件搬运和吊装过程中应当使用包衬耐候钢的专用吊具，避免划伤已经形成的稳定化膜层。

三、钢管混凝土拱桥专用钢材的工艺要求

钢管混凝土拱桥是我国大跨度拱桥的主流结构形式之一，依靠管内混凝土对钢管壁的支撑作用，能充分发挥钢材与混凝土两种材料的力学性能，实现结构承载效率的提升。但专用钢材的加工工艺直接影响构件成型质量与结构长期受力性能，需要针对大直径钢管的加工特点和结构受力要求制定专项管控要求。

（一）大直径钢管（ $\geq 1\text{m}$ ）卷制与冷作硬化控制

大直径钢管多采用厚钢板分段卷制拼接而成，卷制过程中钢板会产生不同程度的冷作硬化，导致屈服强度上升但塑性和韧性下降，如果控制不当会影响钢管的断裂韧性和焊接性能。卷制加工前需要根据钢板厚度、强度等级以及钢管设计直径，预设合理的卷制预弯量，分多次渐进完成滚压成型，避免一次压下量过大引发局部过度变形。每次滚压后都要测量实际弧度，逐步调整压下量，保证钢管椭圆度符合规范公差要求。对于强度级别较高的 Q420q 及以上钢材，卷制完成后需要对钢管直缝拼接部位的冷作硬化区进行性能检测，当检测发现塑性储备下降超出允许范围时，需要通过合理的去应力退火处理消除硬化影响，避免钢管在长期荷载作用下发生脆性开裂。

（二）钢管径厚比限制与局部失稳防范

钢管混凝土拱桥的钢管构件受力以轴压为主，径厚比是控制钢管壁局部失稳的核心参数。根据现行规范要求，在满足结构承载力要求的前提下，钢管径厚比需要控制在规定限值以内，避免钢管壁在达到设计承载力前发生局部屈曲，影响核心混凝土的约束效应。对于大跨径拱桥的主拱肋钢管，当设计径厚比接近限值时，需要通过加工工艺优化提升局部抗失稳能力：卷制过程中严格控制钢管的不圆度，相邻管段对接时保证错边量符合规范要求，避免接头部位产生应力集中；对管节拼接的环焊缝进行无损检测全覆盖，杜绝未焊透、夹渣等缺陷引发的局部应力升高；对于径厚比较大的薄壁大直径钢管，可以在钢管内部增设纵向加劲肋，通过加强钢材局部刚度提升抗屈曲能力，同时加劲肋与钢管内壁要满焊连接，保证共同受力。加工完成后需要对整节段钢管进行尺寸检验，确保管径偏差、直度偏差都控制在允许范围内，为后续管内混凝土灌注以及整体拱肋拼装提供合格的构件基础。

第三章 钢结构桥梁设计基础

钢结构桥梁的设计作为整个工程建设的灵魂所在，其不仅决定了结构在漫长服役期内的安全性与功能完整性，更直接影响到后期施工工艺的选择与工程造价的控制。在当前交通基础设施建设快速发展的环境下，设计理念已实现了由单一强度验算向多目标综合优化的跨越式发展，将材料特性与力学原理深度融合，为打造百年精品工程奠定了坚实基础。

第一节 设计原则与荷载组合

设计原则是指导桥梁从蓝图走向实体的核心纲领，而荷载组合则是评估结构安全度的逻辑基石。通过科学合理的组合分析，能够确保桥梁在面对各种极端复杂的外部环境时，始终保持稳健的力学响应与卓越的运行性能，为现代交通运输的安全提供坚固屏障，同时也为施工阶段的质量控制提供了精准的理论数据支持。

一、极限状态设计法的应用

极限状态设计法通过引入统计学概率模型，将结构失效的各种可能性控制在极低的科学范围之内。这种方法不仅显著提升了结构的整体安全性，更实现了材料利用效率的最大化，是现代大跨度钢桥设计体系中不可或缺的理论支撑。

（一）承载能力极限状态的算式与安全系数

承载能力极限状态的计算重点在于确保结构在遭遇最不利荷载组合时，不会发生整体垮塌、局部失稳或产生过大的塑性变形。具体在算式表达上，通常采用效应设计值小于抗力设计值的基本形式，可写作：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d$$

其中 γ_0 代表结构重要性系数， S_d 代表荷载效应的设计值， R_d 代表结构构件抗力的设计值，公式中还隐含涵盖了荷载分项系数、材料强度分项系数的影响。这些系数的选取基于海量的实验数据与工程可靠度分析，能够有效对冲材料性能

波动及计算模型误差带来的不确定性风险。在实际操作中，工程师需针对受弯、受压及受扭等不同受力构件，分别选取相应的稳定系数进行严密验算。由于钢材本身具有极佳的延性特征，在构件达到强度极限前通常会表现出明显的变形预警信号，这为保障公共安全留出了必要的反应时间。另外，针对跨径巨大的特种结构，还需结合非线性理论进行二阶效应分析，以验证其在极端载荷下是否仍具备足够的抗力储备，从而构筑起多重安全防线。这种基于概率的定量分析方法，不仅强化了结构设计的科学性，也为后续复杂工艺的实施提供了精准的数据导航。通过对抗力分项系数的动态微调，设计者可以在不同安全等级的工程中找到安全与经济的最佳平衡点。

（二）正常使用极限状态的变形与裂缝控制

正常使用极限状态主要聚焦于桥梁在常规运营条件下的适用性与耐久性表现，通过限制位移、转角及振动等指标来提升通行的舒适度。这一阶段的控制目标主要包含几个关键维度：一是限制主梁在活载作用下的竖向挠度，确保轨道或路面的平顺性满足严苛的行车规范；二是对组合梁中的混凝土部分进行严格的裂缝宽度验算，防止水分渗透诱发钢筋锈蚀，从而提升结构的整体耐久性；三是关注结构的自振频率与动力响应，避免在大风或密集车流作用下产生共振现象，优化行车与行人的感官体验。这些控制参数虽不涉及即时的结构垮塌，却直接关系到桥梁的使用寿命与后期维护频率。与之并行的是，对于跨径较大的柔性体系，提升结构刚度往往比增加强度更具挑战性，这需要通过优化截面构型与加强横向联系来实现。通过对变形细节的精细化管控，能够确保桥梁在漫长的服役岁月中始终处于良好的工作状态，避免因局部缺陷的累积而影响整体功能的正常发挥，真正实现设计与使用的完美契合。针对大跨度悬索桥或斜拉桥，还需对索力的松弛与结构的长期变形进行预测，提前通过预设拱度的方式补偿后期变形，以长期维持桥面线形符合设计要求。

（三）全寿命周期成本优化在选材与防腐中的体现

全寿命周期成本优化理念的引入，使得钢结构桥梁的选材与防腐设计从单纯的初建成本比拼转变为对百年寿命内总支出的理性权衡。表 3-1 列出了不同防腐方案在近海环境下的全寿命周期成本对比，可供设计参考。

表 3-1 不同防腐方案近海环境全寿命周期成本对比表

防腐方案	初期投入 (相对值)	每 15 年维护成本 (相对值)	100 年总成本 (相对值)	预期使用寿命 (年)
普通碳素钢 + 常规涂装	100	35	275	20~30
耐候钢 + 无涂装	140	0	140	> 100
普通碳素钢 + 重防腐涂层 + 阴极保护	130	15	205	50~60

从表 3-1 可以清晰看出，不同防腐方案在成本分布与寿命表现上差异明显，初期投入更低的方案长期总成本反而更高，设计时需要结合项目实际需求合理选择。在选材环节，高性能耐候钢的推广应用成为了标志性进步，其利用自身形成的致密稳定锈层保护层抵御大气侵蚀，大幅降低了周期性的涂装维护开销，同时也减少了涂装作业带来的环境污染。同时，防腐体系的选择必须与具体的自然环境深度匹配，尤其在盐雾浓度较高的近海区域，上表中普通碳素钢 + 重防腐涂层辅以阴极保护技术虽增加了前期的资金投入，却能有效规避中后期的结构大修，比传统常规涂装方案更具经济性。设计团队通过构建成本动态演化模型，对不同技术路径进行性价比筛选，从而实现资源配置的最优化。这种长远视角的采纳，不仅推动了高性能防腐材料的研发进程，也倒逼了工厂化预涂装等先进施工工艺的普及。综合来看，全寿命周期理念引导着桥梁设计向低碳、绿色及可持续方向迈进，通过在材料源头的精挑细选与防护细节上的精益求精，最终为社会贡献出更具经济效益的交通基础设施。这种综合考量体现了工程智慧与生态责任的和谐统一。同时，通过对退役拆除后的材料回收成本预估，也进一步体现了循环经济的设计导向。

二、作用荷载的分类与取值

荷载的准确定义与分类是保障桥梁设计精度、降低安全隐患的第一道关口。只有深入剖析各类作用力在时间轴上的持续特性与在空间分布上的随机规律，才能为结构建立起符合真实服役场景的力学计算模型，确保每一处构件受力清晰，设计结果可靠。

（一）永久作用（结构自重与二期恒载）的精确计算

永久作用作为桥梁结构始终承受的固定载荷，其计算精度直接影响到桥梁线形控制与支座选型的准确性，对成桥后的受力状态有着决定性影响。结构自重的

核算不仅要精确统计主梁、加劲肋、连接节点等钢构件的质量，还需将复杂的焊缝金属填充量以及防腐涂层重量一并纳入分析范畴，避免遗漏小分量荷载累积带来的偏差。二期恒载则涉及桥面铺装、人行道、护栏以及排水电力设施等非主体构件，这些荷载虽然在总量上不及主体钢梁，但其分布特征对局部板件的疲劳性能有不可忽视的影响。为了实现更高水平的计算精度，现阶段多采用三维建筑信息模型进行自动化统计，还可以直接模拟施工阶段支架卸落、预拱度调整等工艺流程中的荷载波动，让计算结果更贴合施工实际。对于结合梁体系，必须考虑到混凝土材料随时间产生的收缩与徐变效应，这种物理属性的动态变化会导致钢梁与混凝土板之间的应力重分布，进一步增加了设计的复杂性。通过对永久作用的深度解析，能够为后续施工方案的制定提供稳固的基准数据，确保成桥后的实际状态与设计意图能够精准吻合，最大限度减少施工过程中的误差累积。

（二）可变作用（列车活载、汽车荷载、温度作用）的组合

可变作用因其显著的随机性与时空交织特性，成为桥梁设计中最具不确定性的动力因素，主要涵盖了车流荷载、环境温度变化以及风致效应等。列车与汽车荷载的取值需严格遵循动力系数折减与包络分析原则，特别是在高速运行状态下，必须考虑车桥耦合带来的冲击力放大效应，确保局部构件不会因动力冲击提前出现损伤。温度作用的影响同样不容小觑，日照形成的非线性温差梯度以及整体气温的季节性升降，会在超静定钢梁内部激发出巨大的温度次内力，甚至引发支座脱空或局部构件的屈服，这一点在大跨度连续钢构桥中表现得尤为明显。在荷载组合过程中，工程师需利用概率统计手段，针对不同可变作用同时发生的可能性进行权衡，通过组合值系数对各项荷载进行合理的强化或削减，得到符合可靠度要求的最不利组合。这种多工况的协同演化计算，旨在模拟桥梁在数十年运营中可能遭遇的最极端通行环境，为结构的弹塑性裕度提供充足的数据支撑。另外，随着大数据技术在交通领域的普及，基于实测交通流的荷载模型正逐渐取代传统的经验模型，使得设计取值能够更加贴合特定地域的运输实况，进一步提升了设计的针对性。通过对不同活载工况的全面模拟，可以有效预防局部板件的过早失效，延长桥梁的整体使用寿命。

（三）偶然作用（地震、船舶撞击）的验算工况

偶然作用虽然在桥梁服役期内发生的概率微乎其微，但其巨大的破坏能量要求设计必须设立专门的加固与验算工况，以防范系统性坍塌风险，最大限度保障

人员生命安全。在抗震设计方面,需要通过动力时程分析确定结构在地震波作用下的响应特征,通过设置消能减震支座或耗能剪切键,消耗地震输入能量,确保桥墩等关键部位不发生脆性损毁。针对跨越通航水域的桥梁,船舶撞击力的计算则更为具体,通常有几种核心防御策略:一是通过科学的孔跨布置将桥墩设置于浅水区或航道之外,从源头消解碰撞发生的空间概率;二是在墩身周边增设柔性防撞系统或防撞浮箱,利用构件的大变形来吸纳撞击动能,保护主体结构免受冲击;三是对桥墩底部进行刚度与强度的冗余强化,确保在遭遇中等规模撞击后依然能维持桥梁的基本通行功能,为后续抢修留出时间。这类验算工况体现了对极端环境的敬畏与主动防范,通过建立精细的非线性接触模型,能够定量评估碰撞过程中的能量传递机制与结构损伤程度。这些防线共同构成了桥梁的生存保障体系,使其即使在极端突发事件面前,依然能展现出强大的结构韧性,避免出现一撞就垮的灾难性后果。同时,对于这种偶发事件的精细化模拟,也极大提升了我们对复杂结构安全边际的认识,推动设计方法不断迭代完善。

三、疲劳设计的专门要求

疲劳损伤是钢桥结构中最具威胁的病害之一,往往在毫不知觉的情况下诱发突发性的断裂破坏,是影响钢桥长期服役寿命的头号杀手。深入探究循环载荷下的微观裂缝演化规律,并制定针对性的设计标准,是保障现代大跨度钢桥在多轮次重载作用下长期安全运营的关键技术环节。

(一) 铁路钢桥疲劳荷载谱的编制原则

铁路钢桥由于承载量大、车型集中且往返频率高,其疲劳荷载谱的编制显得尤为严苛,直接决定了疲劳设计结果的可靠性。这一编制过程的核心在于根据线路的运输规划与实测流量,构建出一套能够等效反映实际损伤的简化模型,方便工程设计使用。编制原则有三个主要方向,分别是:一是基于长期运营监测数据确立典型车型轴重分布,将成千上万次的随机通行转化为标准化的等效疲劳车模型;二是结合路网未来的运力增长预期,利用迈因纳累积损伤理论计算结构在百年周期内的总受力频次;三是针对不同类型的受力节点,确立应力幅值与损伤循环次数之间的关联曲线,为构件的寿命预测提供基础依据。编制过程中需充分考虑到列车加速、制动以及动力冲击带来的附加应力循环,确保荷载谱不仅能覆盖常规工况,更能模拟重载列车频繁通过时的极端压力。这种科学的谱系化管理,

为钢梁的构造细节优化提供了直接的数值依据。通过对应力循环的精确计数与能量叠加,能够有效评估各个关键焊缝的剩余服役时长,为后续的养护计划制定提供科学指导。这套体系的应用,也使得铁路钢桥的维护工作从传统的被动修补转向了主动预判预防,大幅提升了养护效率,降低了养护成本。

(二) 正交异性桥面板疲劳细节的应力分析

正交异性桥面板由于焊缝密集且受力形态复杂,是疲劳裂缝最易滋生的敏感区域,其细节部位的应力分析必须达到微观级别才能准确反映真实受力状态。在进行有限元模拟时,需重点剖析纵肋与顶板、纵肋与横隔板交汇处的几何不连续点,这些位置在车轮局部高压下会产生严重的应力集中现象,是疲劳裂缝最常见的起源点。采用热点应力法或结构应变法,可以绕开传统计算对网格尺寸的过度依赖,获得更为真实的焊缝根部受力状态,提升计算结果的准确性。与此同时,焊接工艺带来的残余应力也是不可忽视的干扰因素,其与外部荷载应力交织后,往往会加速裂缝的萌生与扩展,大幅缩短构件的疲劳寿命。为了优化这一细节,设计者经常尝试改进肋形断面或采用全熔透焊接技术,以求降低局部的应变幅值,改善应力分布状态。另外,桥面铺装层与钢板的复合工作性能在此时也显现出重要作用,优良的铺装材料能够有效分散集中的轮压负荷,起到缓解钢结构疲劳的作用,是控制正交异性板疲劳的重要辅助手段。通过对这些微观细节的反复仿真与试验验证,可以从设计源头切断疲劳裂缝的演变路径,提升桥面系的整体疲劳性能。这些对局部构造的精雕细琢,直接决定了整个桥面系的维护周期与使用寿命。通过对这些焊缝应力的深度解析,设计者能够针对性地提出制造工艺要求,从而从加工环节提升整体制造质量,减少先天缺陷带来的疲劳隐患。

(三) 大跨悬索桥 / 斜拉桥缆索锚固区的疲劳应力幅与细节分级

大跨悬索桥与斜拉桥的缆索锚固区是连接主缆 / 拉索与加劲梁或桥塔的关键受力枢纽,集中承受着反复变化的活载拉力,局部应力分布复杂,同样是疲劳失效的高风险区域。首先需要精准计算不同活载组合下锚固区各传力构件的应力变化历程,提取出控制设计的有效疲劳应力幅,明确应力集中最显著的关键细节部位。由于缆索拉力会随着通行车流不断产生周期性波动,锚垫板承压面、锚管与主梁壁板的连接焊缝、散索鞍处的索股支承面等部位,都会长期承受交变应力作用,必须针对每个典型细节开展独立的应力分析。之后需要根据计算得到的应力幅值水平,结合对应细节的构造形式、焊接工艺与应力集中程度,完成细节抗疲

劳性能分级，对应不同等级匹配相应的容许应力幅要求，对高应力区域采取增厚板件、优化过渡圆角、增加加强构造、改进焊接顺序等措施，降低局部应力集中程度，提升整体抗疲劳性能，保障锚固区在长期交变荷载作用下的结构安全。

（四）双线铁路及公铁两用桥的疲劳荷载折减

对于多线铁路或公铁两用桥，由于多个车道或轨道同时满载并经过同一关键截面的概率较小，必须科学地引入荷载折减系数，平衡安全与经济性之间的关系。这种折减并非盲目降低安全标准，而是基于概率统计理论对结构真实受力状态的科学拟合，符合结构实际的服役特征。在计算疲劳累积损伤时，需根据线路数量与交通流量分布，设定合理的组合系数，避免因过分保守的设计导致结构自重的无谓增加，反而给结构带来不必要的额外负担。特别是对于公铁两用桥，公路车辆活载的随机性与铁路列车活载的规律性交织在一起，产生了极其复杂的应力谱线，很难通过简单叠加得到真实结果。在处理此类问题时，通常采用多通道并行分析的方法，分别统计铁路与公路荷载对关键构件的损伤贡献度，并根据两种荷载同时作用的时间重叠概率进行非线性叠加，得到符合实际的总损伤量。这种折减机制的精妙之处在于，它在保障单线运营极端工况安全的同时，优化了多线同时加载下的结构经济性，不会造成材料的不必要浪费。通过合理的折减，可以平衡各构件之间的抗疲劳裕度，实现结构整体疲劳寿命的协调一致，避免出现某一构件寿命远高于其他构件的浪费情况。这种方法在现代特大型公铁两用桥设计中得到了广泛验证，显著提升了工程的综合竞争力，使其在满足繁重运输需求的同时，依然能保持极佳的结构经济性与长期的运行稳定性。通过对多线布载模式的深入探讨，我们能够更清晰地掌握复杂荷载作用下大型钢桥的服役状态，为未来的智慧化运维提供详实可靠的数据支撑。

第二节 结构体系与选型

钢结构桥梁的体系选型，直接决定了工程的安全性、经济性以及后期维护难度。在复杂地质与严苛通航环境下，通过科学选型实现结构受力与建设环境的平衡，是现代桥梁设计的核心内容。本节将深入探讨各类约束条件对钢结构桥梁结构形式的影响，剖析主流钢结构体系的受力机理与工艺特性。

一、结构体系选择的决定性因素

体系选择受多种外部环境与技术指标的共同约束，设计师必须综合权衡自然地理环境、行车动力响应以及城市审美需求，确定最合适的结构形式。这一过程覆盖了从宏观跨径确定到微观刚度控制的全维度技术考量，最终目标是保障桥梁全寿命周期的稳定性能与功能实现。

（一）桥位地形地质与通航跨径的约束

桥位所在地的自然环境，是决定桥梁形式的先天基础。在深水大跨度河流或峡谷区域，基础工程造价往往占总投资的比例很高，此时通过增加主跨跨径避开复杂地质、减少水中墩数量就成了首选方案。而大跨径需求也让钢结构凭借高强度、轻自重的优势，在选型中脱颖而出。地质条件的稳定性直接影响下部结构的承载力，在地质条件较差的区域，设计更倾向于采用对不均匀沉降敏感度较低的结构体系。

通航标准对主跨净空和跨度有硬性要求，不仅要求水面以上净空高度满足通航需求，还要求主墩位置不能干扰航道，这种约束往往推动设计向大跨度斜拉桥或悬索桥方向发展。在内河繁忙航道，钢结构施工周期短，可采用工厂化预制、现场大节段吊装的工艺，能最大程度缩短航道封航时间，降低对航运的影响。如果可以通过精细测量地形高程差，利用自然山体设置锚碇，悬索桥就是峡谷地带大跨度跨越的优选方案。在这种地理条件与航运要求交织的复杂背景下，结构体系的环境适应性，是解决跨径矛盾的核心关键。

地形地貌的变化还会直接制约施工装备进场，山区桥梁受道路限界限制，大型吊装设备难以抵达，这就要求钢结构设计必须采用小节段运输安装的形式。地质断裂带的分布也会迫使桥台位置调整，设计人员会根据地质勘探成果动态调整桩基础深度，确保主梁支承点稳固，这套设计逻辑也最终决定了桥梁的整体几何轮廓。

（二）铁路重载与高速行车对结构刚度的要求

铁路桥梁承受巨大动荷载，对结构的竖向刚度、横向刚度以及抗扭刚度都有严苛要求。高速列车的平稳运行依赖极小的轨道变形，这对钢结构体系的刚度提出了极高挑战，重载铁路则更侧重承载能力的持久性与疲劳寿命。大跨度铁路桥梁通常更倾向于选用钢桁梁体系，足够的桁架高度可以有效提升截面惯性矩，显

著降低活载作用下的挠度。如果对跨越能力有更高要求,桁式组合拱桥或斜拉桥凭借独特的空间受力形式,能提供更强的结构冗余度,确保重载列车经过时振幅始终处于安全范围。

行车品质提升要求结构具备良好的动力特性,需要避开列车的共振频率区间。在体系选型阶段,通常会通过有限元模拟分析不同跨度下的结构自振频率,通过调整截面尺寸或增加横向联结系增强空间整体刚度。钢结构的节点连接形式对刚度贡献十分明显,全焊连接相比螺栓连接能提供更高的节点刚度,减少局部变形。为了应对高速铁路的离心力及风载荷,主梁通常设计成横向宽度较大的箱形或多片桁架结构,依靠强大的空间受力网络抵御侧向位移,保障行车安全。

轨道平顺性对沉降极其敏感,结构选型中必须考虑钢结构随温度变化的胀缩特性,设置具备温度调节性能的支座系统是常用的处理手段。为了进一步提升重载线路的抗冲击能力,桥面系通常会采用密集的纵横梁布置,让活载可以均匀分布到主桁节点,形成针对动态载荷的深度定制方案。

（三）景观协同与城市空间融合的设计导向

现代城市桥梁已经超越了单纯的交通功能,成为展现城市风貌的艺术品。景观协同设计要求桥梁形态与周边环境相协调,体系选型时需要兼顾线条的流动感与空间比例的均衡。在城市中心区域,周边建筑密集、空间有限,紧凑型钢箱梁或矮塔斜拉桥往往能更好融入城市天际线,不会对整体景观造成压迫感。钢材的造型塑造能力极强,配合曲线造型与涂装色彩,能够打造出独具特色的城市地标。

空间融合导向下的桥梁设计,强调桥梁与慢行系统、公共绿地的交互利用。对下层空间的高度利用,促使设计者选择梁高更纤薄的结构或是特殊形式的异形拱桥。钢混组合结构常用来提升桥面的亲和感与降噪性能,通过材料对比结合灯光设计,能提升市民的使用体验。这种以人为本的设计理念,要求在确定结构体系之初,就将景观视点、光影效果以及城市尺度感融入设计计算。

桥梁的色彩与材质选择还需要和城市历史文脉相契合,在古城区可能会采用拱式结构呼应传统美学,在科技新区则多采用充满力量感的斜拉结构。这种文化属性的注入,让桥梁选型不再仅仅是力学计算的产物,更是社会价值的延伸。通过优化主塔造型和拉索排布,可以营造出轻盈或庄重的不同视觉效果,这种设计导向不仅美化了城市空间,还能通过多功能集成设计,比如增设观景平台,实现基础设施与公共服务的融合。

二、钢桁梁桥的结构布置与细节优化

钢桁梁桥凭借受力明确、制造工业化程度高、跨越能力强等特点，在交通建设中占据核心地位。其结构布置涉及主桁形式选择、节点构造优化及多主桁体系应用等多个维度，合理的布置不仅能提升材料利用率，还能简化施工工艺，为工程质量提供根本保障。

（一）主桁图式（三角形、华伦式、K 式）的受力比较

钢桁梁的主桁图式直接决定传力路径效率与材料用量分布。三角形桁架去除了冗余竖杆，内力分布均匀，结构自重较轻，但桥面系荷载传递至节点时，因为缺乏中间支撑，斜杆的局部弯矩会增大，设计中通常会对节点做局部加强处理平衡这一影响。这种图式凭借简洁的视觉效果，多用于中小跨径桥梁，追求结构轻量化。

华伦式桁架是十分常见的选择，优点在于腹杆倾角均衡，承受不对称荷载时能表现出良好的稳定性，带竖杆的布置可以有效减小弦杆的自由长度，提升抗压稳定性。K 式桁架的受力特点是腹杆交汇于竖杆中心，这种构造极大降低了斜杆的计算长度，尤其适用于桁深较大的重载铁路桥，能显著减小杆件截面尺寸，方便在受力复杂区段进行强度优化。

各类图式在应对剪力传递上存在明显差异：三角形桁架承受横向风载时几何稳定性极高，但做变截面设计时难度较大；华伦式结构在连续梁体系中表现出色，受力包络线相对圆滑；K 式桁架的斜杆角度通常较大，能够更有效地分配轴向压力，减小杆件因柔度过大产生的振动。在大型多层功能桥梁中，设计者往往会根据受力大小，在跨中和支点位置采用不同桁架图式的组合方案。

（二）整体节点与散拼节点对制造工艺的影响

节点是钢桁梁的受力枢纽，其制造工艺的复杂程度直接关系到整桥的建造质量。整体节点采用工厂预制生产模式，将弦杆与节点板在工厂焊接成一体，这种工艺可以缩短现场安装时间，提升连接质量的可靠性。由于整体节点在工厂制作，可以利用数控机床和自动焊接机器人完成精确加工，将复杂几何尺寸的偏差控制在要求范围内。不过这种工艺对运输条件要求较高，对工厂内部拼装胎架的精度控制也有极高的技术要求。

散拼节点则更依赖现场拼装精度，施工逻辑是将弦杆与腹杆分别运抵施工现

场，通过高强度螺栓在连接板上完成组合。这种方式构件通用性强，运输便捷，更适合受运输限界影响大的山区项目。但散拼节点的连接螺栓数量庞大，现场定位与紧固质量控制的难度显著提升，且节点板往往因为要考虑多向受力，厚度和尺寸都更大，整体更笨重。

制造工艺的选择还需要兼顾防腐要求，整体节点的焊缝大多在工厂内完成，可以进行更彻底的自动化喷砂除锈与高性能涂装。散拼节点现场组装过程中，大量暴露的螺栓头与板缝会成为后期维护的薄弱环节，因此在制造阶段，散拼件必须做精细的端面铣磨，保障传力界面紧密接触。随着工厂自动化水平的提升，整体节点正成为追求工程寿命与可靠性的核心工艺选择，也极大降低了螺栓松动的风险。

（三）三主桁空间结构与铁路重载钢桁梁的横联刚度设计

传统大跨度铁路钢桁梁多采用双主桁布置，横向刚度主要依靠上下平纵联与横联共同提供，在双线重载同时加载的工况下，容易出现横向刚度不足、偏载受力不均的问题。三主桁结构通过在双主桁中间增设一道主桁，将桥面荷载均匀分配到三个受力支点，能够显著提升整体横向刚度，有效减小偏载作用下的横向位移，更好适配双线乃至多线重载铁路的受力需求。

为充分发挥三主桁的空间受力优势，横联体系的设计需要与主桁形式协同优化，横联需要将三个主桁连成整体共同受力，通常采用交叉式或空腹式横向联结系，将横向荷载均匀传递到各个主桁，同时保证各主桁的变形协调，避免出现偏载下受力不均的问题。横联的杆件截面需要根据整体空间计算结果确定，对于受力较大的节点位置，通常需要设置加强弦杆或节点板，提升局部连接刚度，避免横联构件成为结构受力的薄弱环节。

横联刚度的设计还直接影响结构的整体动力特性，足够的横联刚度能够提高结构的横向自振频率，避开列车运行引发的共振区间，提升行车的安全性与平稳性。设计过程中需要通过空间有限元模型，分析不同横联布置方案下的结构横向变形、自振频率与应力分布，在满足刚度要求的前提下优化杆件截面，避免过度设计增加不必要的结构自重，最终实现承载能力、结构刚度与工程经济性的平衡。

三、钢箱梁与组合结构体系

钢箱梁与组合结构是应对现代化交通需求的主流结构形式，通过截面形式创

新与异种材料的性能互补，实现了卓越的跨越能力与承载效率。本节重点分析钢箱梁的构造特性、钢混结合梁的界面受力机制以及索塔锚固区的关键选型，这些技术代表了当前工程界的主流应用水平。

（一）单室与多室扁平钢箱梁的受力特性

扁平钢箱梁凭借卓越的抗扭刚度与良好的流体动力特性，成为大跨度桥梁的首选截面形式。单室钢箱梁构造简洁，内部空间开阔，方便涂装维护。受力表现上，其整体抗扭性能主要依靠闭口截面的剪流维持，适合横向宽度较小的桥梁。单室结构顶底板的受压稳定性，依赖密集的纵向加劲肋，防止弯矩作用下发生局部失稳。这种截面因为焊缝数量少，在工厂化生产中具备很高的生产效率。

随着桥面宽度不断增加，为了控制板件局部变形并提升横向分布刚度，多室扁平钢箱梁得到了广泛应用。多室结构通过增加纵隔板，将宽大的箱室分割成多个闭口单元，极大提高了截面的横向抗弯能力，能有效抑制重载偏载作用下顶板的局部挠度。多室箱梁的内力分布更加精细化，尽管增加了制造难度，但带来了结构稳定性的提升，为宽幅超长跨度桥梁的安全性提供了更坚实的保障。

多室结构的优势还体现在抗风性能的优化上，通过调整箱室之间的间距与隔板厚度，可以显著改变主梁的空气动力中心位置，提升结构的驰振稳定性。制造过程中，多室钢箱梁对焊接变形控制的精度要求更高，因为内部空间分割后焊接可达性变差，通常需要采用特殊的焊接工艺顺序。这种截面形式通过增加结构冗余度，提升了整体在极端载荷下的抗灾能力，保障了交通大动脉的长期通畅。

（二）钢混结合梁的剪力键布置与滑移效应

钢混结合梁充分发挥了混凝土抗压与钢材抗拉的性能优势，剪力键作为连接两种材料的纽带，其布置方案直接决定界面的传力效率。栓钉连接件是目前应用最广泛的形式，通过在钢梁顶翼缘焊接栓钉，嵌入混凝土板内实现两种材料的协同受力。剪力键布置不仅需要考虑纵向剪力传递，还要兼顾横向荷载引起的界面剥离力，在弯矩较大的支撑点附近，通常会根据需求增加剪力键的布置密度。

钢混结合梁的设计主要遵循三方面原则，具体可参见表 3-2：

表 3-2 钢混结合梁剪力键设计原则表

设计原则	具体要求
根据受力分布加密	按照剪力包络线分布，在支座附近对剪力键做加密处理，确保界面不发生剪切破坏
抵消收缩应力	考虑混凝土板的收缩应力，在梁端区域设置特殊锚固件抵消轴向拉力
避免附加扭矩	横向方向上，剪力键需要对称分布，防止截面产生附加扭矩

滑移效应是钢混结合梁中普遍存在的物理现象，表现为钢梁与混凝土板在界面处产生相对位移，这种滑移会削弱结构的整体刚度。设计中通过设置抗剪连接件限制这种滑移，但无法完全消除，滑移效应对挠度的贡献需要在计算中加以修正。为了减少收缩徐变引起的界面次生应力，设计者有时会采用柔性连接方案。研究表明，合理控制滑移量不仅能防止混凝土板开裂，还能延缓钢梁进入塑性状态。这种对微观界面的精确控制，体现了组合结构设计的核心逻辑，即通过协调不同材料的应变分布，实现整体结构的最优力学性能。

（三）大跨斜拉桥扁平钢箱梁的约束扭转与正交异性板设计

大跨斜拉桥的主梁主要承受拉索的局部集中力和整体的弯扭组合作用，约束扭转效应是影响结构安全性的关键因素。和纯扭转不同，约束扭转会在截面产生额外的正应力与剪应力，当斜拉桥发生偏载或承受不对称风荷载时，这种附加应力的占比会显著提升，设计时必须准确计入其影响，避免常规自由扭转计算方法带来的应力低估问题。扁平钢箱梁因为截面高度小、宽度大，约束扭转产生的翘曲正应力占比要比常规箱梁更高，需要通过设置合理的横隔板间距来控制翘曲变形，横隔板不仅可以提升箱梁的抗扭刚度，还能有效支撑顶底板的纵向加劲肋，防止板件发生局部失稳，横隔板间距通常需要结合箱梁尺寸、荷载工况通过空间有限元分析确定，在拉索锚点位置还需要设置加厚的锚点横隔板，分散局部集中力。

正交异性板作为扁平钢箱梁的桥面结构，由钢板与纵向加劲肋、横向隔板组合而成，两个方向的刚度存在明显差异因此得名，其设计直接关系到桥面的抗疲劳性能与铺装层的使用寿命。纵向加劲肋分为开口肋和闭口肋两类，闭口 U 肋凭借更高的抗扭刚度和更好的稳定性能，已经成为当前大跨钢箱梁的主流选择，能有效减小顶板的局部变形，降低桥面铺装的开裂风险。设计正交异性板时，需要重点关注轮压荷载作用下的局部应力分布，尤其是顶板与 U 肋、横隔板的连接位置，这些位置应力集中现象明显，是疲劳破坏的高发区，需要通过优化焊接

工艺、调整构造细节来降低应力集中程度，提升结构的疲劳寿命。此外，正交异性板的局部变形还会直接影响桥面平整度，进而影响行车舒适度，设计中需要严格控制顶板在活载作用下的局部挠度，通过调整加劲肋的尺寸与间距，平衡结构性能与材料用量，实现设计的经济性与可靠性统一。

四、缆索承重与协作体系桥梁的特殊构造

这类桥梁作为超大跨径交通工程的核心形式，其构造设计需要兼顾超大跨径下的力学性能、施工可行性与长期运营安全，不少构造细节直接决定了整桥的服务表现，需要结合结构体系选型做针对性设计。

（一）悬索桥钢箱梁与钢桁梁的加劲梁选型比较

悬索桥的加劲梁是维持主梁整体刚度、分散活载与控制变形的核心构件，其选型主要取决于桥梁的跨径规模、通行荷载类型、抗风设计要求以及工程经济性，两种结构形式有着完全不同的适用场景。

首先从受力特性与适用场景来看，钢箱梁凭借闭口截面带来的高抗扭刚度，对控制悬索桥主梁的扭转变形优势明显，整体结构自重较轻，能够显著降低主缆与锚碇的受力负荷，更适合大跨度公路悬索桥，尤其是通行量较大的高速公路桥梁。钢桁梁属于开口桁架结构，整体抗扭刚度弱于钢箱梁，但杆件受拉压受力明确，便于制作大截面构件满足重载需求，更适合大跨度铁路悬索桥或者公铁两用悬索桥，能够适应重载列车带来的大幅活载变化。

其次在抗风性能方面，扁平钢箱梁的流线型截面风阻系数小，空气动力稳定性更优，能够通过钝化边缘、优化截面高度进一步提升抗风性能，降低大风作用下的涡振、颤振风险，在强风区域的大跨悬索桥中优势突出。钢桁梁的透风截面虽然风阻较小，但截面钝体效应明显，更容易发生涡振，通常需要通过调整杆件间距、增设导流结构来优化空气动力性能。

在施工与经济性方面，钢箱梁节段整体预制，运输和现场吊装速度更快，施工周期更短，后期维护工作量小，但大宽度钢箱梁对运输限界要求高，造价相对偏高。钢桁梁单件构件尺寸小，运输便捷，受场地限制少，适合山区等运输条件不佳的项目，且杆件可以分散预制，对预制厂的规模要求更低，但现场拼装工作量大，焊接与螺栓连接的质量控制难度高，后期防腐维护的工作量也更大。

选型过程中需要结合项目的荷载特点、建设条件、抗风要求做综合比选，不

能简单以跨径大小作为判断标准，最终实现结构性能与工程经济性的平衡。

（二）斜拉桥空间索面与钢锚箱 / 钢锚梁的选型匹配

斜拉桥的索面布置从传统的平面索面发展到空间索面，核心目标是提升结构的整体抗扭性能，改善主梁受力状态，更好适配宽幅主梁与大跨度工程的需求。平面索面多为双索面平行布置在主梁两侧，构造简单，索力计算与施工定位难度低，但对宽幅主梁的横向支撑不足，抗扭能力偏弱。空间索面通过将两侧拉索向主梁中心收束或者采用多索面倾斜布置，能够为主梁提供更强的横向约束，显著提升整体抗扭刚度，有效抑制偏载作用下的主梁扭转变形，同时还能提升结构的整体抗风稳定性，降低涡振共振的发生概率，因此成为当前大跨度宽幅斜拉桥的主流布置形式。

索塔锚固区是将拉索索力传递给索塔的核心受力部位，钢锚箱与钢锚梁是两种应用最广泛的锚固构造，需要结合索塔结构形式、索力大小与空间索面的布置特点匹配选型。钢锚箱通常锚固在混凝土索塔的侧壁，由多块钢构件拼接形成箱型受力结构，拉索的索力通过锚箱的连接板、承压板逐步传递给索塔混凝土，这种构造的受力路径直接，整体刚度大，能够承受较大的索力，而且工厂预制精度高，现场安装便捷，对于采用竖直平行空间索面的斜拉桥，钢锚箱可以贴合索塔侧壁布置，适配性较好。但钢锚箱与混凝土结合面容易产生应力集中，需要通过合理布置剪力钉优化传力，避免结合面出现开裂剥离的问题。

钢锚梁则一般布置在索塔的锚固区空腔内，通过两端支撑在索塔的牛腿上承接拉索索力，传力逻辑是拉索的水平分力由钢锚梁自身承受，竖向分力通过牛腿传递给索塔，这种构造对索塔混凝土的扰动更小，受力更加均匀，而且自重较轻，用钢量比钢锚箱更低，适合大跨度斜拉桥中大吨位索力的锚固需求，对于倾斜布置的空间索面，钢锚梁可以通过调整牛腿的角度、锚垫板的位置，灵活适配不同倾斜角度的拉索，适配性更强。但钢锚梁对牛腿的施工精度要求较高，牛腿位置容易产生应力集中，需要对索塔该区域做局部加强设计，避免混凝土压溃破坏。

选型匹配的核心原则是结合空间索面的布置形式、索力大小以及索塔结构特点确定：对于索面倾角变化小、索塔为薄壁结构的斜拉桥，选择钢锚箱更能发挥其刚度大、安装便捷的优势；对于大跨径斜拉桥，索力吨位大、索面倾斜角度变化多，则更适合采用钢锚梁构造，在满足受力要求的同时降低工程用钢量，实现结构性能与经济性的平衡。

（三）悬索斜拉协作体系结合部的刚度和索力过渡构造设计

悬索斜拉协作体系结合了悬索桥超大跨径适应性与斜拉桥整体刚度大的优势，能够在更大跨径范围内平衡结构变形控制与工程经济性，而结合部作为两种体系受力传递的核心区域，其刚度突变与索力过渡的处理直接决定整桥的受力合理性，是该体系设计的关键控制环节。

首先需要处理结合部的刚度协调问题：悬索桥加劲梁整体刚度偏低，主要依靠主缆承担荷载，斜拉桥加劲梁刚度相对更大，斜拉索直接提供多点弹性支撑，两种体系的主梁在结合部衔接，容易产生刚度突变，引发局部应力集中与内力重分布。因此设计中通常需要对结合部区段的主梁做局部加强处理，通过增加主梁板件厚度、增设纵横向加劲肋、设置辅助横隔板或者局部采用钢箱叠合构造，逐步实现刚度的平缓过渡，避免刚度突变引发的附加内力。同时，结合部往往需要设置与主塔或辅助墩的连接构造，通过支撑刚度的匹配调整，进一步优化整体刚度分布，抑制结合部的过大转角与位移。

其次是索力过渡构造的设计，悬索体系的主缆吊索索力与斜拉体系的斜拉索索力在结合部交汇，需要通过合理的构造设计实现索力的均匀传递，避免局部荷载过大引发结构破坏。对于结合部设置在边跨侧的协作体系，通常会将吊索与斜拉索的锚点错开布置，通过在主梁内部设置整体传力构造，比如贯通式的承力隔板或整体式锚定梁，将两种索力逐步扩散传递到主梁截面，避免锚点集中布置产生的应力叠加。若结合部设置在跨中区域，则需要重点控制活载作用下两种体系的索力动态分配，构造上需要保证结合部主梁有足够的强度储备，适应不同荷载工况下的索力变化。

设计过程中需要通过全桥整体分析与结合部局部有限元模型相结合，计算不同工况下结合部的位移、应力分布，优化加强构造的尺寸与传力路径，既避免过度加强造成材料浪费，又保证刚度与索力过渡平缓，实现两种体系的受力协同，充分发挥协作体系的跨径优势与性能优势。

五、上承式钢管拱桥的结构体系

上承式钢管拱桥凭借结构受力合理、跨越能力强、材料利用充分、造型轻盈美观的特点，在山区峡谷地形的桥梁工程中得到广泛应用，其结构体系的各部分构造设计，需要结合跨径、荷载、建设条件做针对性设计，核心受力构件的选型

与构造细节直接决定整桥的安全性能与经济性。

（一）钢管桁架拱肋的哑铃型与四肢 / 六肢格构型布置

上承式钢管拱桥的拱肋是承受整体荷载的核心受压构件，截面选型与布置直接决定拱肋的整体承载能力与稳定性能，哑铃型与四肢、六肢格构型是目前大跨径上承式钢管拱常用的两类布置形式，有着不同的适用场景。

哑铃型截面由两根平行的主弦管通过中间腹板连接而成，整体构造简单，加工和拼装工艺便捷，横向刚度相对均匀，用钢量较低，通常适用于跨径在 [XXm] 以内的中等跨径上承式钢管拱桥。哑铃型截面的受力特性为，两根主弦管分别承担拱截面的上下边缘压应力，腹板负责承担截面剪力，整体受力清晰，对于常规公路桥梁的荷载工况适配性较好，施工阶段的吊装难度也更低。

四肢格构型与六肢格构型截面，由多根独立主弦管通过腹杆连接形成空间桁架结构，整体惯性矩大，抗弯、抗扭刚度和稳定性能远优于哑铃型截面，能够适应更大跨径与更大荷载的受力需求，多用于跨径 [XXm] 以上的大跨径上承式钢管拱桥，尤其是重载铁路或公铁两用的上承式钢管拱桥。其中四肢格构型一般采用四根主弦管分上下左右对称布置，整体构造复杂度适中，能满足多数大跨径工程的需求；六肢格构型则通过增加主弦管数量进一步扩大截面尺寸、提升整体刚度，适配超大跨径钢管拱的高荷载、高稳定要求，但加工、拼装的工艺复杂度与用钢量也会相应提升。

布置过程中需要结合跨径、设计荷载、施工条件进行选择，在满足拱肋整体强度、稳定要求的前提下，平衡结构性能与工程经济性，避免盲目增大截面尺寸造成材料浪费。

（二）腹杆（平联）与主弦管的相贯线节点构造设计

作为连接主弦管与腹杆、平联的核心受力部位，相贯线节点的构造处理直接影响拱肋的整体受力性能与结构安全，是钢管桁架拱肋设计的关键控制环节。腹杆与主弦管通过相贯焊接连接，腹杆的端部直接切割成与主弦管外曲面匹配的相贯口，直接焊接在主弦管管壁上，这种构造形式不需要额外的节点板，整体构造简洁，传力路径直接，还能减小节点区域的风阻，因此成为目前的主流形式。设计相贯线节点时，首先需要保证相贯口的切割精度，让腹杆端部与主弦管管壁完全贴合，保证焊接质量，避免因间隙过大引发焊接缺陷，降低节点强度。同时需要根据腹杆的受力大小，合理设计焊缝形式与焊脚尺寸，对于承受较大轴力的腹

杆，通常需要采用全熔透坡口焊缝，保证焊缝强度与腹杆杆件匹配，避免焊缝先于杆件发生破坏。

对于大跨径钢管拱桥中受力较大的相贯节点，当节点应力水平较高时，通常需要对主弦管在节点区域做局部加强，常用的加强方式包括在主弦管内部设置加劲环或增设内衬套管，提升主弦管管壁的局部承压能力，避免腹杆端部压力造成主弦管管壁发生局部凹陷破坏。设计过程中需要通过局部有限元模型，精准计算节点区域的应力分布，验证节点强度，优化加强构造，保证节点受力安全，同时避免不必要的加强造成材料浪费。

（三）拱上立柱与桥面系的设计匹配

上承式钢管拱桥的拱上立柱是连接拱肋与桥面系的传力构件，需要将桥面系承受的所有荷载均匀传递给拱肋，其选型、刚度与构造设计需要同时适配拱肋受力与桥面系变形要求，实现二者的受力协同。

从立柱形式来看，对于跨径不大、桥面宽度较小的桥梁，多采用排架式空心矩形混凝土立柱，这种构造工艺简单、造价低，整体刚度适中，能够满足常规荷载的传力需求；对于大跨径上承式钢管拱桥，或者重载交通桥梁，为了降低立柱自重、提升立柱自身的承载能力，多采用钢管混凝土格构柱，这种立柱依靠钢管与核心混凝土的协同受力，强度高、自重轻、抗推刚度大，能够适应更大的竖向荷载与水平荷载作用。

在立柱与拱肋、桥面系的连接设计上，需要兼顾受力可靠性与允许的变形需求：底端与拱肋的连接通常采用预埋钢构件与立柱端板焊接或栓接的形式，对于格构式钢管混凝土立柱，会在拱肋顶设置专门的连接承台或钢支座，将多根分肢的作用力整合后传递给拱肋，避免拱肋顶面出现局部应力集中；顶端与桥面系的连接，根据桥面系的构造形式选择，若采用简支桥面系，一般设置支座来适应温度变化引发的伸缩变形，降低附加内力；若采用连续整体式桥面系，则通常需要根据受力需求设计刚性连接或者铰接构造，平衡整体刚度与变形需求。

设计匹配的核心在于控制立柱的刚度适配性：立柱刚度过小，会增大桥面系的变形，影响行车舒适度；刚度过大，则会导致拱肋的附加内力增大，甚至改变拱肋的原有力学分布。设计中需要结合拱肋的受力特点，通过整体计算调整立柱的截面尺寸与刚度，保证桥面荷载均匀传递，同时避免刚度不当引发的附加内力，最终实现拱肋、立柱与桥面系的整体受力协调。

第三节 主要构件设计与计算

在钢结构桥梁的整体框架内，构件的设计与计算是确保工程安全性与耐久性的核心环节。对不同受力状态下的构件做深入分析，就能建立起科学的计算模型，为后续的工艺加工与质量控制提供精准的理论指导和数据支撑。

一、受弯与压弯构件的验算

受弯以及压弯构件在桥梁的主梁及关键支撑体系中应用十分广泛。这类构件的力学行为复杂，不仅要充分考虑材料强度的利用，还需要做复杂的稳定性校核与截面构造优化，是桥梁结构安全验算的核心内容。

（一）强度验算与截面有效宽度的计算

对受弯以及压弯构件做强度验算时，核心目标是保证构件在极端荷载工况下不会发生材料屈服或过度塑性变形。验算过程需要全面考虑正应力、剪应力，以及二者组合受力下的折算应力。不管是开口截面还是箱形截面，都必须严格按照现行设计规范核定截面特性。结合材料的弹塑性特征来看，强度计算不只是简单校核截面最不利点的应力，更需要全面分析整体截面的应力分布规律。尤其是在组合受力的情况下，必须通过精准的相互作用公式，耦合计算弯矩与轴力产生的效应，进而判断构件的综合强度储备是否满足安全限值要求。

由于钢桥构件大多采用宽大薄壁板件，剪力滞效应会让正应力在板件宽度方向的分布非常不均匀。为了简化计算同时保证安全，工程中引入了截面有效宽度的概念。有效宽度的计算需要根据板件的受力边界条件、长宽比以及应力梯度做修正，通过折减实际宽度，将其转换为可以均匀承受峰值应力的假想宽度。这一过程必须考虑板件受压状态下的局部失稳倾向，对于非均匀受压的腹板或翼缘板，需要根据应力分布系数提取精细化的有效截面属性，保证计算结果能真实反映构件的实际承载能力。

（二）整体稳定与局部加劲肋的布置准则

整体稳定是受弯构件设计的一大难点，尤其是缺少侧向支撑的大跨度梁体，侧倾失稳往往会比强度破坏更早发生。验算时需要计算构件的整体稳定系数，这个系数由构件的侧向计算长度、截面抗弯刚度以及抗扭刚度共同决定。如果整体稳定不满足要求，必须通过增设横向支撑或优化截面形状来提升抗扭转能力。这

种整体稳定性分析需要覆盖施工阶段和运营阶段，保证不同荷载组合下，构件都能维持原有的空间几何形态。

布置局部加劲肋是为了避免薄壁板件在局部集中力或大剪力作用下发生失稳，布置准则需要同时兼顾受力需求和工艺可行性，通常遵循以下要求：纵向加劲肋主要设置在截面的受压区，作用是提高板件的临界屈曲应力，必须保证其连续性，避免应力发生突变；横向加劲肋应布置在支座位置、集中力作用点以及剪力较大的区域，起到支撑板件、分配集中荷载的作用；当腹板的高厚比较大时，需要通过纵横向加劲肋构成的井字形体系增强板件刚度，保证板件在屈曲前可以承受预期的剪应力。

在实际施工中，加劲肋的尺寸与焊接方式也需要符合疲劳验算要求。横向加劲肋不宜直接焊死在受拉翼缘上，应当预留一定空隙，避免产生影响结构寿命的疲劳裂纹。加劲肋的间距需要根据板件的稳定计算结果动态调整，既能够提供足够的刚度支撑，又不会因为焊缝过多产生过大的焊接残余应力和变形，实现力学性能与加工成本的平衡。

（三）薄壁板件屈曲后强度的利用与限制

随着现代桥梁设计理论的发展，适度利用薄壁板件屈曲后的强度已经成为减轻结构自重的有效方法。当板件发生局部屈曲后，应力会向板件边缘刚度更大的部位重新分布，在腹板中形成张力场，这种张力场和桁架中的斜拉杆类似，可以继续承担新增的剪力荷载。利用屈曲后强度能够显著提升材料利用率，让截面设计更轻盈经济，但这种利用必须建立在严谨的计算模型基础之上。

不过，屈曲后强度的利用不能毫无节制，必须受到严格限制。对于直接承受动力荷载或大型疲劳荷载的关键部位，一般不建议利用屈曲后强度，因为频繁的屈曲变形会导致板件产生严重的疲劳损伤。另外，利用屈曲后强度计算时，必须复核构件的整体变形，保证屈曲引起的局部波浪变形不会影响构件的正常使用功能。编制施工方案时，也需要针对这类构件制定专门的防变形工艺，避免初始缺陷过大导致理论计算失效。

二、轴心受压构件的计算

轴心受压构件在桁架桥、拱桥及斜拉桥的塔柱中应用十分广泛，设计重点在于解决失稳问题，通过合理的截面选择与参数选取，平衡材料用量与结构刚度的

矛盾，进而保证高耸或大压杆的力学性能稳定。

（一）长细比与稳定系数的查表选取

长细比是衡量轴心受压构件稳定性的核心参数，它的数值直接决定构件属于短柱、中长柱还是长柱。设计过程中，必须先根据构件的端部约束条件确定计算长度系数，再通过计算长度与截面回转半径的比值得到长细比。为了避免构件刚度过小产生过大附加挠度，或是在施工中发生磕碰变形，规范对不同用途的受压构件规定了长细比的最大容许值，设计者必须保证初选截面满足这些硬性要求。

稳定系数的选取取决于构件的截面类别与初始缺陷情况。基于大量试验数据和数值模拟结果，设计规范给出了多条稳定曲线，分别对应焊接、热轧或冷弯等不同制造工艺产生的残余应力分布。实际计算时，需要根据构件截面的形状和加工方式，在对应的表格中查找和长细比匹配的系数，这个系数体现了构件实际承载能力相对于屈服强度的折减程度。准确查表并做线性插值，是保证轴心受压构件验算准确的基础。表 3-3 列出了不同截面类别的稳定系数对应关系示例。

表 3-3 轴心受压构件稳定系数对应关系示例表

截面类别	加工方式	长细比范围	稳定系数大致区间
a 类	热轧无缝圆管	0-100	0.65-1.00
b 类	普通热轧工字钢	0-100	0.55-1.00
c 类	焊接工字形截面	0-100	0.45-1.00
d 类	厚板焊接截面	0-100	0.38-1.00

从表 3-3 可以看出，不同截面类别的初始缺陷程度不同，对应相同长细比下的稳定系数也存在明显差异。对于存在初弯曲或初偏心的构件，稳定系数的选取还需要适当保守。随着长细比增大，稳定系数会急剧减小，这意味着材料强度无法得到充分发挥，此时单纯通过提高钢材等级提升承载力的做法往往效果很差。反之，优化截面形式、增加回转半径或增设中间支撑，才是提高轴心受压构件承载效率的最有效方法。质量控制过程中，也要严格监测构件的直线度，保证初始几何偏差在稳定系数计算涵盖的容许范围之内。

（二）实腹式与格构式构件的等稳性设计

实腹式构件构造简单、加工方便且防腐性能好，在中小跨径桥梁中应用非常普遍。但当构件长度很大、轴力相对较小时，实腹截面往往无法满足长细比要求，这时格构式构件就能体现出优势：通过将分肢布置在远离形心的位置，可以用较

少材料获得很大的整体刚度。设计中，实腹式构件通常追求截面主轴方向的抗弯刚度匹配，而格构式构件则需要对缀条或缀板体系做专门设计。

等稳性设计的实现依赖于对惯性矩与间距的精准调整，核心要点为：确定构件在两个主轴方向的计算长度，根据受力需求让不同平面内的长细比趋于一致；依据分肢间距调整格构构件的换算长细比，必须把缀材剪切变形的影响考虑进去，保证构件不会在弱轴方向提前失稳。

格构式构件的设计难点在于缀件的布置。缀条或缀板必须有足够的强度和刚度传递分肢间的剪力，让各个分肢可以协同工作。如果缀材设计过弱，构件会发生分肢局部失稳；如果缀材刚度过大，又会增加焊接工作量和残余应力。等稳性设计的原则要求两个主轴方向的承载能力相等，以此实现材料的最优分配。制造过程中，格构式构件的组装精度直接影响等稳性的实现，必须通过严格的工装胎架控制分肢间的平行度。

（三）钢管混凝土拱肋的套箍效应系数与极限承载力计算

钢管混凝土依靠钢管对核心混凝土的套箍约束作用，让核心混凝土处于三向受压状态，大幅提升了混凝土的抗压强度，同时核心混凝土也可以避免钢管发生局部屈曲，二者协同受力的承载效率远高于单一构件。套箍效应系数是衡量这种约束作用强弱的核心参数，其数值等于钢管截面积乘以钢材抗压强度设计值，再除以核心混凝土截面积乘以混凝土抗压强度设计值，系数越大，说明套箍约束作用越强，构件极限承载力的提升幅度也就越大。

在计算拱肋的极限承载力时，需要结合套箍效应系数对核心混凝土的强度进行修正，再代入轴压构件的承载力公式进行计算。对于偏心受压的钢管混凝土拱肋，除了轴力的影响，还需要考虑弯矩对截面承载力的影响，根据偏心距大小调整承载力计算系数，考虑套箍效应对不同偏心状态下的承载贡献。设计过程中需要按照现行规范，根据拱肋的受力最不利工况进行验算，保证拱肋在成桥运营、施工吊装等不同阶段都有足够的安全储备，同时也能充分发挥钢管与混凝土的套箍协同作用，避免材料浪费。

三、连接接头的承载力计算

桥梁结构的整体性依赖于成千上万个连接节点的可靠性。连接接头的承载力计算需要综合考虑紧固件性能、焊缝冶金特性以及复杂的应力重分布现象，是质量控制的核心内容，直接关系到结构的安全底线。

（一）高强度螺栓抗滑移与承压型连接的计算差异

高强度螺栓连接是钢桥工地拼接的主要形式。抗滑移连接主要依靠螺栓拧紧后产生的巨大预紧力，让连接件接触面产生摩擦力传递剪力。验算时，核心参数是抗滑移系数，这个系数和接触面的处理工艺密切相关。如果接触面存在油污、锈迹或加工平整度不达标，摩擦力会明显下降，导致连接在远低于设计荷载时就发生滑移。这种连接方式变形小、刚度大，非常适合承受动力荷载或对变形要求严格的桥梁部位。

与之不同，承压型连接允许极端荷载下发生微量滑移，剪力传递由螺栓杆的抗剪和孔壁的承压共同承担。承压型连接的极限承载力通常高于抗滑移连接，因为它充分发挥了螺栓材料的强度。但在桥梁工程中，考虑到反复荷载下的松动和疲劳问题，承压型连接的使用受到一定限制。计算时需要分别核定螺栓杆剪切面上的剪应力以及钢板在孔位处的局部挤压应力，保证二者都处于安全范围。

二者的计算差异还体现在安全储备的侧重点上。抗滑移连接关注摩擦力的可靠性，设计准则通常是不允许出现相对滑动；而承压型连接更关注结构在极限状态下的强度，允许构件进入一定的弹塑性阶段。工艺操作中，抗滑移连接必须严格控制扭矩或转角，保证预紧力的准确性。同时，它对连接件的孔位精度要求极高，任何超差都可能导致受力不均，进而在群栓连接中出现部分螺栓超载的风险。

（二）对接焊缝与角焊缝的强度折减与应力集中

焊接连接是工厂制作中应用最广的技术。对接焊缝理论上可以实现与母材等强，但实际工程中，由于不可避免的焊接缺陷和工艺限制，往往需要根据焊缝等级进行强度折减。一、二级焊缝经过全面的无损检测，强度可视为与母材一致；而对于检测要求较低的三级焊缝，则必须引入折减系数。计算时需要注意焊缝金属的受力方向，受拉焊缝对缺陷的敏感度远高于受压焊缝，因此设计受拉拼接时必须采用高等级焊缝。

角焊缝的承载力计算基于其有效厚度。由于角焊缝的几何形状存在突变，内部应力分布非常复杂，应力集中现象十分突出，针对不同类型的角焊缝，设计时必须考虑以下关键的削弱与影响因素：针对三级对接焊缝或部分熔透焊缝，必须根据规范要求计入强度折减系数，覆盖夹渣、气孔等内部缺陷对截面的削弱影响；角焊缝的长度不宜过短也不宜过长，过短会导致应力分布极不均匀，过长则可能因为剪应力分布不均匀导致端部先行破坏，因此需要引入长度折减系数。

应力集中是导致焊接接头疲劳破坏的主要原因。在焊缝转角、起弧处和收弧处，应力往往是名义应力的数倍。为了缓解这一问题，工艺上要求采用引弧板和引出板，并在构造上通过平滑过渡加工降低应力集中程度。计算时需要的关键节点的疲劳强度做验算，考虑循环荷载下应力幅的影响。焊接残余应力的存在会降低构件的有效稳定性，在复杂节点的承载力计算中，应适当考虑残余应力场对整体力学性能的影响。

（三）栓焊混用节点的承载力分配理论

在大型钢桥的节点设计中，栓焊混用连接的应用逐渐增多，通常表现为腹板采用螺栓连接而翼缘采用焊接连接。这种混合连接的承载力分配不是二者承载力的简单相加，而是取决于二者的相对刚度和施工先后顺序。如果焊接在螺栓拧紧后进行，焊接热过程会导致邻近螺栓的预紧力发生松弛，同时焊接热应力也会改变连接件的初始应力状态。因此，计算时必须根据施工步骤科学界定各自分担的荷载比例。

基于应变协调原则，栓焊混用节点的承载力分配理论认为，刚度更大的连接形式会优先承担荷载。通常焊接接头的刚度远大于螺栓接头，在荷载加载初期，大部分剪力由焊缝承担。如果焊缝设计不足，很可能在螺栓发挥作用前就提前失效。因此，现代设计往往要求焊缝承担全部或大部分荷载，或是通过特殊构造措施保证二者能够协同工作，这种设计理念要求设计者对节点的受力路径有非常清晰的认识。

从工艺角度看，栓焊混用的施工顺序对质量控制影响很大。一般建议先进行螺栓定位和初拧，待焊接完成冷却至常温后再进行螺栓终拧，这样可以利用螺栓的定位作用减小焊接变形，同时通过终拧补偿热膨胀引起的预紧力损失。计算承载力时，必须针对这种特定工艺流程设置修正系数。另外，考虑到焊缝的热影响区可能延伸至螺栓孔边缘，设计中应保证足够间距，避免材料硬化加剧应力集中。

栓焊混用节点的疲劳性能也是当前研究的热点。由于两种连接方式的应力传递机制不同，在结合部可能出现复杂的应力叠加。计算时需要采用有限元模型做精细化模拟，提取结合面处的最大主应力。通过对螺栓预紧力产生的压应力场与焊接残余应力场的叠加分析，评定节点在长期荷载下的可靠性。这种跨领域的计算分析方法，为复杂节点的工艺制定提供了数据支撑，保证了桥梁关键部位在全寿命周期内的稳定性。

钢结构桥梁的构件设计与计算是一个严密的逻辑闭环，从基础的材料强度验算到复杂的节点承载力分配，每一步都直接影响施工现场的工艺实施。通过对受弯、压弯、轴压以及连接件的精准计算，可以从源头上消除安全隐患。实际工作中，必须时刻关注计算模型与实际工艺的符合程度，通过不断的实测反馈修正设计参数，保证每一座钢桥都能经受住时间和环境的考验，成为坚固耐久的交通咽喉。随着数字化技术的普及，三维计算模型与自动化加工工艺的深度融合，将进一步提升主要构件设计与计算的精度，推动钢结构桥梁工程迈向更高水平。

第四节 节点构造设计要点

节点作为钢结构桥梁动力传递与变形协调的枢纽，其构造设计的合理性直接关系到整座桥梁的安全性及耐久性。在设计过程中，必须综合考虑结构受力需求、制造工艺可行性以及后期维护的便利性，节点细节的处理往往决定了工程的质量上限。

一、节点设计的一般原则

节点设计需要立足于整体结构的安全评价，在遵循力学规律的同时，兼顾制造工艺的容错度。制定一般原则的目的是规范设计行为，确保每一个连接点都能在复杂的外部环境下保持长久的承载力。通过对传力路径的科学规划，可以大幅降低不必要的次生应力影响。

（一）传力路径明确与避免应力集中

传力路径简洁直接是节点设计的基础，应力流在节点处的分配应尽量均匀，避免出现突发的截面变化。设计中通过合理排布板件让力流平顺通过，增加圆弧过渡等手段消除几何不连续产生的应力集中。设计人员必须深入分析力流的流向，确保各主受力板件的轴线尽量汇交于一点，降低偏心弯矩对节点整体性能的影响。在高应力区域，可以通过增设加劲肋、设置厚板过渡段或局部增厚板件，把高度集中的应力分散到更大的板件面积上，提高结构的整体承载效率。

为了减小疲劳损伤风险，节点构造应尽量采用对称形式，减少不对称焊接产生的附加残余应力。同时，应尽量避免焊缝在同一局部过分集中，防止焊接热输入过大导致材料金相组织脆化。工程实践中，往往需要通过高精度的有限元模拟

校验关键节点的应变分布，再根据分析结果不断优化几何边界形态，让受力特征更符合理想化的连续体模型。

节点的设计寿命应与主桥结构完全匹配，具体实施阶段，需要对节点受力最集中的边缘位置做圆滑倒角处理，并保证焊接后的打磨质量，从而消除潜在的微裂纹源，这对提升结构的服役安全等级至关重要。这种构造上的细致考量，是结构长期安全运行的核心保障。

（二）便于制造加工与现场施焊的空间预留

考虑到钢结构桥梁大多采用工厂预制、现场拼装的施工模式，必须在设计阶段就充分考量制造加工的便利性。节点区域往往空间狭窄，如果构造过于复杂，会导致焊工无法获得良好的观察视角，甚至没法把焊枪伸入预定位置。因此，构造设计中必须预留出充足的施焊空间和检修通道，避免出现设计无法落地的尴尬情况。

施焊空间的设计通常需要遵循三个维度的工艺标准，具体如下：

1. 必须保证焊枪角度与焊缝表面的夹角符合施工规范，避免因角度受限产生严重的夹渣或未熔合缺陷。
2. 对于需要进行超声波或磁粉探伤检测的焊缝，必须留出探头滑动的作业范围，确保质量检测能够全覆盖。
3. 对于螺栓连接节点，应确保扭矩扳手有足够的旋转摆动空间，防止紧固力矩不足导致螺栓连接失效。

连接处的细节设计上，应优先选择便于自动焊机操作的平直焊道。对于必须现场施焊的部位，应尽量设计成平焊或立焊位置，避开仰焊这类操作难度极高的位置。通过合理的预留空间设计，不仅能显著保证焊接质量，还能缩短现场组装的工期，这种以工艺为导向的设计思路能有效降低高空作业带来的安全风险，同时提升工程的综合经济效益。

（三）防腐涂层与排水构造的精细化设计

钢结构极易受到大气环境的侵蚀，节点作为构件交汇点，最容易形成积水死角，因此排水构造的精细化设计是防腐工作的核心。设计者应当在易积水部位设置合理的排水孔或泄水槽，确保雨水能够顺畅排出。对于全封闭的箱形节点，则应保证良好的气密性，或者在内部填充适量干燥剂，维持内部环境干燥稳定。

涂层的施工质量同样受构造形式制约，尖锐边缘往往会导致漆膜厚度不足，

过早产生锈蚀点，因此所有外露节点的边角都应做圆角打磨。在杆件连接的狭缝处，如果无法开展涂装作业，则应在焊接前采取有效防腐措施，或者在焊接完成后用高性能灌胶封堵。

设计过程中还需要考虑后期涂装维护的可达性，对于规模较大的钢桥，应当在节点周围设置必要的检修步道，让养护人员能够安全接触到每一处连接表面。通过对细部的精心雕琢，可以极大延缓钢材的腐蚀进程，对延长结构寿命具有显著的工程实用价值。

与此同时，材料的选择也应与环境相适应。在高盐雾环境下，应优先选用耐候钢或提高防腐涂层的厚度标准。细部构造如密封圈、不锈钢垫片等，也应在设计图纸中明确标注安装工艺，确保防腐体系的整体连续性。通过系统性的排水设计，可以让节点长期处于干燥且受保护的受力状态。

二、钢桁梁整体节点与空间节点构造

整体节点是现代钢桁梁桥最具代表性的构造形式，它将弦杆、斜杆、竖杆的连接部位整合在同一节点板范围内，取消了传统的拼接角钢或拼接板，大幅简化了构造、降低了组装难度，同时也有效改善了节点的受力性能。空间节点则多用于大跨度钢桁梁的变宽段、曲线段或交叉口位置，杆件在三维空间内交汇，受力更为复杂，对构造设计的精度要求更高。

（一）整体节点板厚度过渡与圆弧平滑处理

在整体节点的设计中，板件厚度变化不可避免，但剧烈的厚度跳变会诱发严重的局部应力集中。为了让应力平稳传递，必须在厚度不同的板件之间设置科学的过渡区域，这种过渡通常采用斜坡形式，坡度通常不应陡于，在承受重载或疲劳敏感区域，这一比例甚至应放宽至。与此同时，节点板的外部轮廓应尽可能采用圆弧形状而非直角折线，引导力流自然转向。

圆弧半径需经过精确的力学计算，保证力的偏转路径上不会产生过大的局部峰值。通过对节点板边缘做深度打磨和抛光处理，可以进一步优化边缘受力状态，减少切割热影响区带来的疲劳抗力下降。这种平滑处理不仅是美学上的追求，更是结构安全性的核心保障，能显著提升节点长期服役期间的韧性水平，重载作用下，平顺的过渡区域能有效抑制塑性区的发展。

厚度过渡段的设计还需要结合车间加工能力。在厚板连接处，除了设置斜坡

外,还应保证过渡段长度足以消除焊接产生的复杂应力场耦合。对于承受复杂交变载荷的整体节点,边缘圆弧的完整性必须在加工图纸中严格限定。通过这些细部构造的优化,可以将几何形状改变引起的应力集中系数降至最低,这种设计方案在大型铁路桥梁及大跨度公路钢桥的建设中已经得到了广泛验证。

(二) 节点板与弦杆焊缝的坡口形式与焊接空间避让

节点板与弦杆的连接焊缝通常承受弦杆的全部轴力,属于桥梁的主要受力焊缝,应优先选用全熔透一级对接坡口焊缝,保证焊缝与母材等强;当设计允许采用部分熔透焊缝时,需要根据剩余板厚的有效承载力确定熔透深度,并按照规范要求对焊缝强度进行折减验算。

坡口形式的选择需要兼顾焊接变形控制和焊透质量要求,对于单面焊无法实现背面成型的连接构造,需要设计成双面坡口,分层对称施焊以减小焊接残余应力;若受构造限制只能单面施焊,应当在坡口背面设置垫板,并保证垫板与母材之间贴合严密,避免形成未焊透缺陷。

在构造布置阶段,需要提前为施焊作业预留操作空间,避免相邻杆件遮挡焊枪与探伤探头的作业路径,保证每一道焊缝都可以实现全程焊接和全范围质量检测,从构造设计层面避免出现无法施焊、无法检测的盲区,从源头上保障焊接质量符合设计要求。

(三) 向交叉杆件相贯焊缝的避让与最小间距

多向交叉杆件在节点区域交汇时,相贯焊缝彼此距离过近会导致焊接热影响区重叠,使局部材料韧性大幅下降,还会引发多向残余应力耦合,显著增大节点的疲劳开裂风险。设计时需要根据杆件截面尺寸和焊接工艺要求,确定不同相贯焊缝之间的最小安全间距,该间距一般不应小于较厚杆件板厚的3倍,且最小不得小于[规范要求数值],为焊接作业和后续检测留出足够的缓冲区域。

当杆件空间位置紧凑,无法满足最小间距要求时,需要调整焊缝位置,将其中一道焊缝向杆件跨中方向平移,避免热影响区相互叠加;也可以通过优化杆件端部连接形式,将部分相贯焊接改为螺栓连接,从构造上分散焊缝布置,避免焊缝过度集中。同时,需要通过精细化有限元分析,模拟重叠区域的应力分布状态,评估应力集中对节点承载力和疲劳性能的影响,必要时通过局部增厚板件、调整焊缝坡口形式等措施,补偿应力集中带来的承载力损失,确保节点整体受力安全。

三、缆索系统锚固与结合部构造

缆索系统是大跨度缆索承重桥梁的核心受力构件，锚固与结合部构造则是将缆索的拉力均匀传递给主梁或桥塔的关键部位，其构造设计的合理性直接决定了桥梁整体的安全性与可靠性。相比于普通钢结构连接节点，缆索锚固区长期承受大幅变化的活载拉力，往往存在多向应力耦合的复杂受力状态，对构造细节的承载性能、抗疲劳性能都提出了更高的要求。需要在明确传力机理的基础上，结合受力分配特点设计连接构造，保证力流传递顺畅，避免出现严重的应力集中，同时兼顾制造与安装的工艺可行性，满足全寿命周期的服役要求。

（一）悬索桥钢箱梁锚箱拉板的传力机理与销接构造

悬索桥的主缆荷载通过吊索传递到钢箱梁顶面的锚箱结构，再由锚箱通过拉板将力均匀分散到整个箱梁截面上，传力路径清晰但应力分布复杂，精准把握不同构件之间的力分配规律，是锚箱拉板设计的核心前提。主缆拉力经过吊索作用于锚箱拉板时，拉力会在拉板厚度方向和高度方向逐步扩散，最终通过锚箱腹板与钢箱梁主体的连接焊缝、加劲肋传递给整个梁体，设计过程中需要重点关注拉板与锚箱腹板连接处的应力集中，以及拉板本身在销孔位置的挤压应力分布。

对于采用销接连接的拉板与吊索节点，销轴与销孔之间的接触应力是控制设计的关键指标，由于接触区域存在局部高应力，需要通过有限元精细化计算提取接触应力分布，同时验算销孔周边的撕裂承载力，设计中可通过在销孔边缘增设补强衬管、局部增厚拉板的方式提升局部承载能力，避免应力集中引发疲劳开裂。

此外，销接构造需要考虑长期荷载作用下销轴与销孔的磨损以及温度变形胀缩引起的预紧力损失，针对这种特殊的受力特点，需要在设计阶段明确加工与装配的工艺要求，选择合适的间隙配合参数，同时选用耐磨性能优良的销轴材料，必要时可在销轴表面进行硬化处理，保障销接构造在全寿命周期内的受力性能稳定。

（二）斜拉桥塔端钢锚梁与牛腿的受力分配与连接

斜拉桥的斜拉索索力最终需要通过塔端锚固构造传递给桥塔，钢锚梁 - 牛腿组合构造是当前大跨度斜拉桥最常用的塔端锚固形式，钢锚梁主要承受斜拉索的水平分力，牛腿则承担大部分竖向分力，二者分工明确又协同受力，精准梳理二者之间的受力分配规律，是该类构造设计的核心。

首先需要明确整体受力的分配逻辑：斜拉索的两张方向相反的水平分力在钢锚梁内相互平衡抵消，仅将差值传递给两侧牛腿，大幅降低了桥塔塔壁承受的局部拉应力，充分发挥了钢锚梁受拉性能优异的特点，同时减少了桥塔混凝土开裂的风险。竖向分力则全部通过钢锚梁与牛腿之间的连接面，由牛腿传递给桥塔塔壁，设计时需要根据不同索力的大小，分阶段验算不同施工运营阶段，钢锚梁自身的轴力、弯矩以及牛腿的剪力与局部承压承载力。

钢锚梁与牛腿的连接通常采用栓焊结合的形式：工厂阶段将牛腿与钢锚梁本体焊接成型，整体加工完成后运输至现场，再通过高强螺栓与塔壁内的预埋连接件完成连接，这种连接形式既保证了整体受力的整体性，又方便现场安装定位。设计连接构造时，需要重点验算接触面的抗滑承载力，合理确定高强螺栓的数量与布置间距，同时对牛腿与塔壁接触区域的混凝土进行局部承压验算，必要时可增设多层钢筋网或采用纤维混凝土提升局部抗压能力，避免混凝土被压溃。

对于钢锚梁自身构造，需要在斜拉索锚固区域设置锚固垫板与加劲肋，分散索力对锚梁的局部作用，避免锚固位置出现局部屈曲；同时需要在钢锚梁内部设置横纵加劲，保证整体结构的刚度，控制钢锚梁在索力作用下的变形量，避免因变形过大引发索力重分布。此外，还需要考虑温度变形对连接构造的影响，在连接部位预留合理的调整间隙，释放温度应力，避免附加应力对连接节点造成损伤。

（三）协作体系桥梁中斜拉索与悬索吊索交汇区的受力缓冲与锚固构造

协作体系桥梁结合了斜拉桥与悬索桥的受力优势，跨越能力更强、整体刚度更优，但斜拉索与悬索吊索的交汇锚固区域，同时承受斜拉索的张拉力与吊索的向下牵拉力，两种不同方向、不同频次的活载在此叠加，受力状态比单一体系桥梁更为复杂，如何合理设置受力缓冲构造、保证两种索力平顺传递到主梁，是该类节点设计的核心问题。

设计的首要原则是对锚固位置进行空间分层错布置，避免斜拉索锚点与吊索锚点在同一断面叠加，防止主梁截面应力集中。当必须布置在相近区域时，需要在两个锚固构造之间设置整体刚度连续的过渡加劲区，通过多层纵横向加劲肋将两种索力逐步扩散传递，避免力流在局部叠加。

对于同时设置两种锚固构造的锚箱，需要对锚箱壁板进行局部增厚，并在锚管周边设置环向补强加劲，分别验算两种索力单独作用以及组合作用下的局部应力，通过精细化有限元分析确认高应力区的分布范围，必要时设置弹性缓冲垫块，

分散活载交变产生的冲击效应，降低疲劳开裂风险。此外，同样需要预留充足的检测与养护空间，方便后期对锚固构件进行状态检测与维护，保障节点长期服役安全。

四、支座与拱脚节点构造

（一）球型与盆式支座垫板的局部承压验算

支座垫板在承担全桥荷载的同时，还必须适应温度变化引起的水平位移，其局部承压验算是设计的核心环节。垫板不仅要承接支座传来的集中力，还要将其分散传递至下部墩台。计算过程中，必须考虑力的扩散效应，确保垫板下部混凝土的局部受压承载力满足规范要求。具体构造处理上，垫板应具备足够厚度，防止传递巨大荷载时产生不可逆的翘曲变形。

支座垫板的设计通常关注四个方面的构造细节，具体如下：

- 1. 垫板表面平整度应控制在极小偏差范围内，保证支座与垫板完全贴合，避免受力不均。
- 2. 灌浆孔与排气孔的位置必须合理设置，确保后期灌浆料能够完全填满所有间隙而不留空鼓。
- 3. 对于处于大坡度桥梁上的支座，垫板应采取调坡设计，保证支座始终处于水平工作状态。
- 4. 支座周围应预留必要空间，方便运营维护期内对支座进行快速更换或顶升作业。

表 3-4 列出了不同使用场景下支座垫板设计的重点注意事项：

表 3-4 支座垫板设计注意事项表

使用场景	设计关注点	常规控制要求
大跨度桥梁主支座	承载能力、可维护性	厚度不小于 30mm，平整度偏差 $\leq 1\text{mm}$
严寒高海拔地区	温度应力匹配	界面增设缓冲层，预留热胀变形空间
大坡度斜桥	支座调平	调坡坡度与桥梁纵坡一致，误差 $\leq 0.1^\circ$
高盐雾沿海区域	防腐耐久性	采用不锈钢复合板，周边预留防腐涂装空间

结合表 3-4 内容可以看出，通过严密的承压验算与细致的构造设计，可以有效防止垫板区域出现微细裂缝。尤其是在严寒地区，还需考虑钢垫板与混凝土之间热膨胀系数差异导致的局部应力，通过在界面层设置缓冲材料或优化锚固形式，

可以提升支座节点的抗疲劳能力与耐久性。最终，支座垫板会成为连接桥梁上下部结构的坚实纽带。支座节点构造的每一个细节都关乎桥梁整体的振动特性与使用寿命，这些精细化的构造方案是钢结构桥梁工程质量控制最后一道防线。

（二）上承式钢管拱桥铰支座与刚接拱脚的构造差异

对于上承式钢管拱桥而言，拱脚是将拱肋荷载传递至下部墩台的核心受力部位，采用铰支座还是刚接拱脚，直接决定了拱肋整体的受力体系与节点构造形式，二者在受力特点、构造设计、适用场景上均存在显著差异。

从受力特点来看，铰支座拱脚允许拱脚产生一定的转动，能够释放拱脚截面的弯矩，仅承受拱肋传来的轴力与剪力，可大幅降低墩台承受的弯矩作用，因此对下部基础的抗弯承载力要求更低，在基础承载力相对有限的桥位条件下优势明显。而刚接拱脚将拱肋与墩台固结为整体，需要同时承受拱肋的轴力、剪力与弯矩，将所有内力直接传递给下部墩台与基础，结构整体刚度更大，有利于控制拱肋在活载作用下的变形，更适用于对整体刚度要求较高的大跨度上承式钢管拱桥。

从具体构造形式来看，采用铰支座的拱脚，需要在拱肋端部与墩台预留的拱座之间设置铰结构，常用的有平面铰与球面铰两种形式，铰结构需要配套设置对应的垫板与耐磨面板，保证转动过程中受力均匀，同时需要设置密封防护构造，避免雨水、杂质进入铰缝影响转动性能，后期也需要预留养护空间，方便对铰支座进行定期养护与更换。刚接拱脚则需要将拱肋的钢管深入插入拱座混凝土内，通过在钢管端部设置锚板、加劲肋以及连接钢筋，将拱肋的内力逐步传递给拱座混凝土，为了避免拱脚位置出现应力集中，还需要在拱肋插入段周边设置多层螺旋箍筋或网状钢筋，提升混凝土的抗裂性能，同时保证拱肋与拱座之间结合牢固，不会出现脱开开裂的问题。

第四章 钢结构桥梁制造工艺

钢结构桥梁制造工艺是决定工程整体品质的核心关键，直接关系到桥梁建成后的承载能力与服役寿命。随着现代工程技术的快速进步，行业对钢结构制造过程的精细化、标准化和自动化要求日益提高。本章将详细探讨钢材从进入生产车间到最终加工形成成品构件的各道关键工序，重点梳理并分析材料预处理、精密下料环节的操作要点及对应的质量判定标准。

第一节 钢材预处理与下料

作为整个钢结构制造流程的起始点，钢材的预处理与下料工艺水平，直接影响后续焊接质量和结构的整体几何精度。通过高标准的表面清理和科学的排版下料，不仅能够显著降低材料损耗，还能有效提升防腐涂层的附着力，为后续的构件组拼提供稳定合格的基础条件。

一、钢材进场检验与预处理

进场钢材的质量控制是整个制造环节的第一道关口，也是保障最终产品质量的源头。在进入正式生产线前，必须通过感官检查与专业仪器检测相结合的方式，对钢材的各项质量指标进行全面评估。这一过程大多通过集成化的机械设备完成，核心目的是消除材料自带的原始缺陷，赋予钢材良好的工艺适应性，为后续加工创造条件。

（一）钢板表面质量缺陷的检查与边缘修磨

钢板进场后首先需要接受全方位的几何尺寸和外观质量核查。检测人员会结合超声波探伤仪检测与肉眼观察，识别钢板表面是否存在重皮、气泡、夹渣或深度超标的锈蚀坑。对于厚度较大的钢板，其板材平整度的偏差也必须严格控制在行业允许范围内。针对钢板边缘在热轧过程中产生的粗糙毛刺或硬化层，必须利用手提式砂轮机或自动修磨机进行精细化处理。边缘修磨的主要目的是确保后续

切削加工或焊接区的金属基体完全暴露,避免微裂纹在后续加工过程中逐步扩展,留下质量隐患。

对于板材表面的局部缺陷,若缺陷深度未超过钢板厚度负公差的一半,且不影响构件的最小设计厚度,可以采取打磨平滑的方式进行修复。打磨后的区域应与周围母材平滑过渡,不应留有明显的机械划痕或阶梯状落差。在边缘处理环节,对后续需要进行熔透焊接的部位来说,边缘的平整度将直接关系到坡口加工的精度和组装间隙的均匀性。高质量的边缘处理能有效减少电弧焊接时的咬边风险,进一步提升构件的整体疲劳强度。通过规范处理后,也能为后续数控切割提供平整的加工基面,保证下料精度。

(二) 辊平、抛丸除锈与喷涂车间底漆的一体化作业

为了提升生产效率并保证工艺处理的一致性,现代化的钢结构加工厂普遍采用预处理流水线进行集成化作业。该流水线将校平、除锈、涂装三道关键工序整合为一体,实现了钢板在连续运动状态下的全自动化处理。校平机利用多辊交错压制的原理,消除钢板内部的残余轧制应力以及运输堆放过程中产生的翘曲变形,使板面平整度能够满足后续高精度数控切割的要求。

抛丸工艺是该预处理流水线的核心环节。它利用离心式抛丸器将高速运动的钢丸射向钢材表面,依靠钢丸的冲击力剥离附着在表面的氧化皮及锈迹,获得干净均匀的金属表面。紧随抛丸工位之后的自动喷漆系统,会根据传感器反馈的钢板位置与行进速度,在刚清理完成的金属表面均匀喷涂一层临时性的车间底漆。这种底漆具备优异的抗焊接飞溅性及短期防锈保护功能,能够有效防止钢材在长达数月的制造周期内发生二次锈蚀,同时也为后期的正式涂装施工提供良好的界面条件。

通过一体化集成作业,可以最大程度减少物料在车间中转过程中的二次污染和表面划伤。自动化系统能精确控制钢板输送速度、抛丸力度以及漆膜厚度,确保每一块进厂钢板的预处理质量都保持在高度均一的稳定状态。这种高效的生产模式,不仅是大型桥梁工程能够保质保量按期完成的重要物质保障,还减少了人工露天操作产生的粉尘污染,降低了一线工人的健康风险,让绿色制造的理念落到实处。

(三) 预处理表面清洁度 (Sa2.5 级) 与粗糙度控制

预处理的最终效果,主要通过清洁度与粗糙度这两个核心指标来衡量。根据

国内桥梁钢结构行业的现行规范，钢结构桥梁的主要受力构件表面预处理清洁度必须达到 Sa2.5 级的要求。这意味着钢材表面应无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈及原有油漆涂层等附着物，仅允许留下非常轻微的点状或条纹状痕迹，不会对后续涂装质量产生影响。粗糙度的控制同样关键，行业内通常将其指标设定在 40 至 75 微米之间。适度的粗糙度能显著增大涂层与金属表面的机械啮合力，从而有效提升整个防腐系统的使用寿命。如果粗糙度过大，会导致波峰位置的漆膜厚度不足，容易提前诱发点蚀腐蚀；如果粗糙度过小，漆膜与基体的结合力不足，后续使用过程中则容易发生涂层剥离脱落。技术人员会定期使用表面粗糙度比较样板或针式测量仪进行抽检，根据检测结果动态调整抛丸机的丸料配比与投射角度，确保表面质量指标始终处于受控范围。在湿度较大的梅雨或夏季，还需开启预热风机提升钢材表面温度，防止空气中的水分在钢板表面冷凝影响除锈效果，确保涂装工艺在最佳的环境条件下进行，从而夯实钢结构长效防腐的技术基础。

二、放样、作样与号料

放样与号料是将设计图纸的设计语言转化为生产实物的关键纽带。在数字化制造的行业背景下，该环节不仅要求具备极高的几何精度，更需要通过先进的软件平台实现材料的最优分配，减少不必要的浪费。通过对三维设计模型的拆解与加工余量补偿，能够为后续的精密切割提供精确的控制指令，保障下料环节的准确性。

（一）施工详图的工艺性审查与余量预留

在正式启动放样工作之前，工厂技术团队必须对设计单位提供的施工详图进行全面深度的工艺性审查。这种审查旨在发现原设计中可能存在的装配冲突、焊接操作空间不足或加工难度过大的特殊部位。工艺人员需要结合工厂的实际设备加工能力，在原设计详图的基础上进行深化设计，增设必要的吊装工艺孔及临时定位支座，确保整个制造过程具备良好的可操作性，避免临时变更影响生产进度。

余量预留是放样环节中的核心参数设定内容。由于钢材在切割、焊接过程中不可避免地会产生热收缩变形，且在后续总拼完工后需要进行端面铣平处理，因此必须预先预留合理的工艺余量。这些余量具体涵盖了切割缝宽度、焊接收缩补偿量以及由于冷热加工引起的整体长度收缩量。经验丰富的工艺员会根据构件的类型、板厚及计划采用的焊接方法，制定差异化的收缩补偿系数。对于主梁顶板

这类大尺寸零件，长度方向的预留量往往需要通过工厂预先制作的小比例试验样件的实测数据进行动态修正，保证预留量符合实际加工情况。通过科学分配焊接收缩量与拼装预留量，可以极大程度规避后期为了对齐尺寸进行强力组对产生的附加应力，从源头确保主梁线形符合设计的线控要求。

（二）数控样板的制作与号料标识的可追溯性

数控放样凭借精度高、效率高的优势，已经取代了传统的手工放样，成为现代桥梁制造领域的主流生产模式。技术人员利用专业钢结构建模软件建立构件的三维几何模型，随后将其按照加工需求投影为二维平面图形，生成数控切割设备可以直接识别的加工代码。这些数字化样板包含了所有零件的几何信息、开孔位置以及焊接坡口加工要求，能够直接驱动切割机的执行机构完成切割作业。

在号料过程中，每个下料完成的零件都会被赋予唯一的身份标识。标识内容涵盖了工程项目名称、构件编号、钢材材质批次及后续流转流向等关键信息。为了确保生产全流程的可追溯性，这些信息不仅通过喷码机直接打印在零件表面的非受力区域，还会通过激光打标机在不影响构件应力分布的边缘位置刻制永久性的钢印，避免喷码在流转过程中磨损消失。

现代化生产的标识与号料管理包含四个核心环节，表 4-1 列出了各环节的具体内容与作用：

表 4-1 现代化号料管理核心环节表

环节名称	具体内容	核心作用
数字化编码管理	建立专属信息数据库，将每个零件与原材料信息绑定	实现从原材料进场到成品交付的全过程质量追溯
二维码标签贴附	在关键零件的指定位置粘贴耐高温二维码	扫码即可获取对应零件的加工工艺规程和各环节检验记录
逻辑化分区号料	根据构件在整体结构中的受力性质进行分区标记	严禁在构件受拉边缘产生机械划伤，避免影响构件强度
自动识别验证	切割设备自带识码功能，可自动匹配对应加工程序	从源头避免下料错误，降低质量问题发生的风险

通过表 4-1 可以看出，这种严密的数字化管控体系，不仅大幅提升了车间内构件的流转效率，也为后续的质量异议处理和工程终身责任制落实，提供了详实完整的原始数据依据。

（三）材料利用率优化与套料软件的应用

在大型桥梁工程中，钢材成本占工程总造价的比重很大，提升材料利用率具有十分显著的经济效益。专业套料软件通过强大的优化算法，能够在原材料的矩形区域内完成所有零件的最优化排布。这种软件能够自动识别不同零件的几何形状，利用嵌套排布、零件翻转及共享边缘切割等技术手段，将边角余料的占比压缩到最低限度。套料过程中需要兼顾钢板的轧制纤维方向，考虑到轧制钢板在不同方向上的力学性能存在一定差异，主受力构件的长度方向必须与钢板的轧制方向保持一致，保证构件强度符合设计要求。套料软件在排列零件时会自动锁定方向约束，不会为了盲目追求利用率而牺牲构件的力学性能。同时，软件还能自动生成详细的余料清单，对可以二次利用的不同规格废料进行分类登记，方便后续小型零件加工时取用。与此同时，套料结果还可以直接转化为工厂的领料计划，与工厂的库存管理系统实时联动，实现从物料需求计算到余料分类入库的闭环化精准管理，从而在保证工程质量的前提下实现资源利用的最优化。

（四）钢管拱主弦管相贯线展开的数控放样与母管定尺要求

钢管拱主弦管之间的交汇节点属于典型的相贯结构，接口切割面的精度直接决定了现场组拼的对接间隙，对节点焊接质量和整体受力性能影响显著。传统手工放样展开的相贯线误差大，很难满足高精度的装配要求，而利用专业三维建模软件完成相贯线展开的数控放样，可以直接生成带坡口参数的切割程序，精度可控制在 1 毫米以内。

技术人员首先在软件中建立主弦管与腹杆的整体三维装配模型，通过布尔运算提取两者的相贯线轮廓，再根据预设的焊接坡口角度，对相贯面进行切割余量补偿，最终生成适配数控相贯线切割机的加工代码。放样过程中需要同时考虑主弦管的壁厚对相贯线轮廓的影响，针对大直径厚壁主弦管，必须区分外相贯线和内相贯线的参数差异，保证坡口加工后接口贴合度满足装配要求。

母管的定尺下料需要同时兼顾设计长度要求和材料利用率，定尺过程中需要预留相贯线切割余量和后续端面精加工余量。为了减少现场拼接焊缝，应优先选用长度更大的定尺母管，减少主弦管的接头数量，提升结构整体受力性能。同时定尺下料需要结合相贯节点的位置合理排布切口，避免将相贯接口设置在母管原有焊缝位置，保证节点区域的管材强度满足设计要求，最终定尺的长度偏差需要严格控制在规范允许范围内，为后续的切割和组拼提供合格的半成品构件。

三、切割工艺与评定

切割工艺是钢结构加工过程中能量输入最为集中的环节之一。选用合理的切割方式及匹配的工艺参数，对于控制热影响区性能、减少热变形以及保证切割断面的平整度具有决定性意义，是整个下料环节质量管控的重中之重。

（一）精密切割（数控火焰、等离子、激光）的参数选择

钢结构桥梁加工中常用的精密切割方式主要有数控火焰切割、等离子切割及激光切割三种，各自适用于不同的加工场景。火焰切割主要用于中厚板的批量加工，其核心在于控制氧气纯度、燃气流量以及预热时间三个参数。在进行数控火焰切割时，切割行走速度与切割压力的匹配至关重要，直接影响切口质量。对于厚度适中的碳钢板材，等离子切割凭借其更小的热影响区和极快的切割速度得到了广泛应用，参数调节主要集中在弧电压、切割电流及保护气体成分三个方面。激光切割则代表了当前精密切割的最高精度水平，适用于对尺寸精度要求极高的连接板类小型零件，激光切割的焦点位置、辅助气体压力和脉冲频率都需要根据实际加工板厚进行精细微调，保证切割精度。

正确的参数设定能够有效抑制切口挂渣和边缘塌角等常见缺陷。在实际批量操作开始前，操作手会先切割试切样，根据试切样的断面情况，微调切割喷嘴的高度和角度，直到获得合格的切割断面。针对长条形的细长构件，工厂通常采取同步对称切割的策略，通过平衡构件两侧的热输入量，防止由于热膨胀不均导致的构件弯曲变形。与此同时，为了确保复杂曲线轮廓的切割平滑度，数控系统中的圆弧插补逻辑必须提前进行优化，防止在转角位置因切割速度剧减而造成局部过度烧灼，影响断面质量。

（二）钢板切割工艺评定试验的硬度与外观要求

在正式批量生产前开展切割工艺评定，是行业内质量控制的强制性要求。评定试验的核心目的，是验证选定的切割参数是否会对钢材的原有性能造成不利影响。外观检查是评定的首要标准，要求切口整体平整，且无肉眼可见的裂纹、气孔缺陷。切断面上不应存在明显的缺口或深度过深的波纹，以免这些缺陷成为后续受力过程中应力集中的诱因。硬度检测是评估热影响区性能劣化的关键指标，由于热切割会导致切割边缘的钢材组织发生相变，容易产生局部硬化现象。评定过程中需要对切割断面的热影响区进行多点硬度测试，要求其最高硬度不超过母

材硬度的规定倍数，也不能超过行业标准给出的上限值。若检测发现硬度超标，则意味着该切割边缘在后续弯曲加工或承受交变疲劳载荷时容易发生脆断，此时必须通过降低切割速度或提前预热母材的方式调整工艺参数，再次进行评定，直至硬度梯度趋于平缓符合要求。这种严苛的物理性能评定，是防止桥梁构件在长期运营期内发生脆性损伤的有效防火墙，也是验证生产线新工艺成熟度的核心必要手段。

（三）切割面质量（粗糙度、熔渣、硬化层）的检验标准

下料完成后的每个零件都必须接受严格的质量验收，检验标准主要关注断面的几何形态与物理状态，具体要求如下：

一是粗糙度限制：切割面的粗糙度数值需要控制在规定的微米级范围内，火焰切割通常要求粗糙度在 50 微米以内，而激光切割则要求更低的粗糙度数值，过大的纹路深度会大幅降低焊接结构的整体疲劳寿命。

二是熔渣清除要求：切割边缘附着的氧化物及熔融金属渣必须彻底清除干净，残留的熔渣不仅会影响后续组装精度，在焊接过程中还会混入熔池，产生夹渣等焊接质量缺陷。

三是硬化层处理：针对承受动力荷载的关键零件，其切割边缘的硬化层厚度需要进行抽样检测，若硬化层厚度超过标准要求，应采用机械铣削的方法将其完全去除，保证切割边缘的韧性符合要求。

四是垂直度公差：切割面与母材表面的垂直度偏差应控制在允许范围内，通常不得超过板厚的百分之二，以此保证对接焊缝的间隙均匀性和受力传导的顺畅性。

质量检验人员会使用专用测量量具对切割面的缺陷深度进行量化检测，对于深度超过标准限制的缺口，严禁直接投入使用，需要按照规定的工艺进行补焊并打磨平整，符合要求后方可流转。工厂定期开展切割工艺核查，能够确保切割设备始终处于最佳工况，为大批量制造提供稳定合格的零件来源。所有检验结果都应归入对应项目的质量档案，形成完整的闭环管理，确保流入下一道工序的零件全部合格，从整体上提升钢结构桥梁的加工安全性。

第二节 零件、板单元与桁片组装

在钢结构桥梁制造体系中，零件、板单元与桁片的组装是构筑整体结构的坚实基础。本节主要聚焦于如何通过精密的加工工艺与严格的偏差控制，确保每一个基本单元在进入总装阶段前达到理想的几何尺寸要求，并具备合格的力学性能，从而为桥梁的高精度合龙提供可靠的工艺保障。

一、零件的矫正与弯曲成型

钢材在轧制、运输与切割过程中不可避免会产生残余应力与形态变形，通过科学矫正手段恢复其平整度，并结合弯曲成型工艺实现设计线形，是后续高精度组装的先决条件。这一过程必须对加工环境温度与机械施加压力进行严密监控，确保材料在变形恢复过程中不受到损伤。

（一）冷矫环境温度限制与缓慢加力操作规范

冷矫正工艺依靠机械外力产生的塑性变形来消除材料缺陷，操作过程对环境温度变化异常敏感。当施工作业区的环境温度低于时，钢材的冲击韧性会显著降低，材料内部冷脆性风险急剧增加，此时应严格禁止任何形式的冷矫正操作，以防构件表面产生肉眼难以察觉的微观裂纹。在适宜的常温环境下进行机械矫正时，加力过程必须保持平稳，严禁用大锤野蛮敲击或施加突发性冲击荷载，确保材料内部纤维组织在缓慢的应力释放过程中实现平顺过渡。

对于厚度超过的板材，应当根据材质特性设定科学的加力级差，通过多道次、小幅度的渐进式调整达到最终的平整度要求。操作人员要全程实时观测材料表面变化，如果发现加工硬化、裂纹迹象或表面损伤，应立即停止操作查明原因。这种循序渐进的受控加力方式，可以最大程度保留钢材原有的优良力学性能，显著减少矫正过程引发的二次残余应力集中，为后续的组装、对拼与焊接提供一个物理性质稳定的作业基础。

（二）热矫加热温度控制（按 Q370/Q420/Q500 分级）及严禁水冷

热矫正是处理大变形量或复杂形变的有效手段，核心技术难点在于精准掌控加热最高温度，尤其是目前广泛应用的不同强度等级桥梁钢，各自有不可逾越的加热温度上限。具体工艺分级管控要求如下：不同强度钢材热矫最高加热温度见表 4-2。

表 4-2 不同强度钢材热矫最高加热温度表

钢材强度等级	最高加热温度要求
Q370	$700^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$
Q420	不超过 750°C
Q500 及以上	$600^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$

从表 4-2 可以看出，钢材强度等级越高，热矫允许的最高加热温度越低，这是为了避免高温引发晶粒粗化，影响钢材力学性能。

热矫正作业中，要尽量避免加热区域过大或受热不均引发结构扭曲，通常建议采用点状、线状或三角形加热模式做局部调整。更为严苛的要求是，热矫正完成后的降温过程必须在自然空气中进行，绝对禁止使用喷水降温、强力通风等人工干预手段。强制性冷水降温会让构件内外产生剧烈温差应力，极易生成淬硬组织并产生微裂纹，对钢材的延展性与疲劳寿命都会造成致命影响，只有让材料自然降温实现微观组织的缓慢重组，才能保障构件性能符合要求。

（三）大直径钢管卷制回弹控制与椭圆度 / 直度矫正工艺

大直径钢管卷制完成后，由于钢材自身存在弹性回弹特性，容易出现卷制后管径尺寸偏差以及椭圆度超标的问题，需要通过针对性的矫正工艺调整精度。在卷制预压阶段，就需要根据钢管材质、壁厚和目标管径提前计算回弹量，一般来说，钢材强度越高、壁厚越大，需要预留的回弹补偿量也越大，卷制时通过过度预弯抵消回弹影响，从源头上减少后续矫正工作量。

对于卷制完成后出现的椭圆度偏差，通常采用机械点压法进行矫正：将钢管架设在专用滚轮支架上，使椭圆度超标的部位对准压力机头，通过缓慢施加局部压力调整管径，每点加压后停留 3-5 分钟保压，消除应力后再检测尺寸，反复调整直至椭圆度偏差满足规范要求。而针对钢管轴向的直度偏差，则需要通过全长多点弯曲矫正处理，先通过拉线法标记出弯曲超标的位置和弯曲方向，再采用分段渐进加压的方式调整直度，矫正过程中全程检测弯曲挠度，避免矫枉过正。

矫正完成后需要对整根钢管的椭圆度和直度进行全点位检测，椭圆度偏差不得超过管径的允许比例，直度偏差每米不得超过规范限值，全长总偏差也需要控制在设计要求范围内，确保后续相贯线切割和现场组拼的精度符合要求。

二、板单元与杆件的组装

板单元与杆件是构成桥梁主体的最小功能性结构单元，其组装精度是现代化工厂化生产的核心保障。通过科学运用自动化定位胎架与精密孔位对齐技术，能够有效将制造环节产生的误差消纳在单一单元内部，保障后续大节段拼装的线形流畅，让整体结构在后续拼装中精准就位。

（一）U形肋与板肋自动定位组装胎的应用

在现代钢箱梁自动化生产流水线中，U形肋与板肋的组装已经全面采用高精度自动化胎架技术。这种专用胎架通过液压系统驱动的侧向定位挡块与顶部重型压梁，把加强肋牢固精准地锁定在面板的预定坐标位置。胎架结构设计必须具备足够的整体刚度，抵抗加压锁定过程中的微量弹性形变，确保每一条加强肋的中心线位置偏差控制在以内。通过自动化控制系统的多头联动，可以实现多个肋位的同步精准定位，大幅减少传统人工测量划线带来的累积误差。

为了应对焊接作业后可能出现的角变形，组装胎架通常会根据工艺模拟预设合理的反变形量，通过底部液压微量顶升让面板在组装初始就呈现特定的反向预弯弧度。在保持强力加紧的状态下完成定位点焊，能够显著提升肋板间的接触贴紧度，确保两者缝隙宽度稳定在以下。这种先进的工业化工艺不仅大幅提升了生产效率，更重要的是通过恒定的机械压力消除了板材加工初期的初始不平整度，为后续大规模机器人焊接创造了优良的几何条件，保障了桥面板单元产出质量的高度一致性，为后续大节段组装提供了精度支撑。

（二）先孔法组装中冲钉定位的布置要求

钢桁梁构件的节点板连接结构复杂，行业内通常采用先孔法进行精密加工，也就是在构件正式组装前就完成全部或大部分螺栓孔的钻制工作。在这种工艺下，高强度冲钉是维持整体几何形态、对齐孔位空间的核心定位工具。冲钉的材质与直径要和设计孔径严密匹配，通常选用比理论孔径小左右的高硬度合金冲钉，依靠精准的楔入作用让多层厚钢板的孔位中心完全重合。冲钉布置必须遵循分布均匀、位置关键的原则，尤其是大型节点板的四个角部和中心受力区域，必须优先设置定位冲钉锁定空间姿态。

具体数量要求上，每一组连接副使用的冲钉数量不能少于该节点孔群总数的10%，还要搭配相同比例的临时高强螺栓进行紧固。临时螺栓的主要作用是提供

足够的板间正压力，防止构件在吊运、翻身或焊接热效应下发生细微相对错动。冲钉打入预定孔位后，严禁再次进行剧烈机械冲击，避免造成孔壁损伤或冲钉卡死。通过这种精密的钉栓组合定位流程，可以确保后续正式螺栓安装环节孔位重合率达到 100%，彻底消除工地现场扩孔或拉孔带来的质量隐患，保障连接节点具备良好的承载性能与疲劳寿命。

（三）钢桁梁整体节点杆件的组装胎架与精度控制体系

钢桁梁整体节点是集成了多根杆件交汇、大尺寸板件叠合的复杂结构，其组装精度直接决定了整桥架设时节点的贴合度与受力性能，必须依靠专用组装胎架配合完整的精度控制体系实现精准成型。

组装胎架需要根据整体节点的三维坐标进行定制化设计，胎架的基准平台必须具备足够的刚度和稳定性，基础设置完成后需要对平台平面度进行整体检测，整体平面偏差需控制在 2mm 以内，同时在平台上预设精准的定位基准线与定位挡块，对节点的核心定位基准面进行刚性约束，避免组装过程中发生整体位移。胎架设计时还要预留出焊接作业空间与变形观测点，方便组装过程中实时调整精度。

完整的精度控制体系需要覆盖组装全过程：首先是定位基准控制，所有杆件必须以节点的核心设计轴线为定位基准，调整杆件的空间角度与端部位置，端部轴线偏差需控制在设计允许范围内；其次是板件间隙控制，多板叠合区域的板间间隙必须符合规范要求，局部间隙不得超过允许限值，避免影响后续螺栓连接的受力性能；最后是过程检测控制，每完成一个杆件的定位组装，就需要立即检测其相对位置偏差、空间角度偏差，确认合格后再进行定位固定，避免完成全部组装后再调整，减少累积误差。

组装完成后，需要对整体节点的整体外形尺寸、各杆件的相对位置、轴线偏角等参数进行全面检测，所有偏差都必须控制在行业标准与设计要求范围内，合格后才能转入焊接与后续加工工序，从源头上保障钢桁梁整体节点的制造精度。

（四）斜拉桥 / 悬索桥扁平钢箱梁 U 肋顶板单元的反变形组装技术

斜拉桥与悬索桥采用的扁平钢箱梁，通常要求 U 肋与顶板保持严密贴合，焊接过程中极易产生角变形，进而影响桥面板的整体平整度，采用反变形组装技术可以提前抵消焊接变形，保障成型精度。

在专用的组装胎架上，会根据 U 肋的焊缝尺寸、板厚以及焊接工艺参数，

提前通过有限元模拟计算出焊接完成后的变形量,以此为依据确定预设反变形量。组装时通过胎架底部的顶升装置,将顶板待焊接区域预先调整为反向拱度,使U肋与顶板定位夹紧后保持预设的反向倾斜角度,待焊接完成释放夹紧力后,收缩变形刚好抵消预设反变形,最终得到平整的桥面板单元。

该工艺要求胎架的顶升精度控制在0.5mm以内,反变形量设置要结合实际生产的工艺经验进行微调,针对不同板厚、不同间距的U肋匹配对应参数,确保焊接后桥面板的平面度偏差满足规范要求,减少后续整平打磨的工作量,同时保障U肋与顶板的焊接间隙均匀,提升焊接质量的稳定性。

三、桁片与桥面板块的立体组装

立体组装是把零散的平面板单元与线性杆件通过专用立体胎架加工成具备复杂空间形态的大型结构节段。这一过程涵盖了复杂空间几何定位、预设拱度的精准实现以及多节段间的协调匹配,是决定整座桥梁最终成桥线形美观与接口连接质量的关键环节,需要实施严格的工序报验制度。

(一) 钢桁梁主桁桁片与横联桁片的专用胎架组装

钢桁梁的立体组装高度依赖大刚度的专用定位胎架,通过在胎架系统预先设置高精度基准测量线与标高控制点,实现桁片空间位置的物理锁定。主桁桁片组装通常遵循科学的工艺顺序:先定位下弦杆基准,再依次安装腹杆构件与上弦杆,确保每一道受力焊缝都在胎架的刚性约束下完成施焊。胎架的支撑基础必须坐落在经过硬化处理的坚实地基上,还要做好严密的防沉降观测,避免地基微量变形导致桁片组装产生意外初始扭矩。横联桁片是主桁之间的关键连接纽带,其几何形状直接决定横向受力的构建质量。

组装横联桁片时,要特别关注和主桁接口处的空间角度偏差,目前通常采用数字化实时测量系统进行在线监测与动态纠偏。通过胎架上预设的精密调节螺栓,可以微调构件的空间姿态,直到坐标数据完全符合设计理论参数。焊接作业要严格采用对称、分段、跳焊的工艺,尽量减少热量在局部区域过度累积。全部焊缝冷却至环境常温后,要复核整片桁片的几何尺寸,重点检查各个节点的中心坐标精度与对角线差值。这种依托高精度立体胎架的工业化组装模式,确保复杂桁架结构在海量构件拼接后依然能保持良好的整体刚度与几何稳定性,为成桥质量打下坚实基础。

（二）桥面板块工艺拱度与焊收缩余量的动态设置

桥面板块组装过程中，必须提前科学考虑后期服役阶段的结构下挠，以及制造过程中不可避免的热收缩效应。工艺拱度设置需要依据设计给出的理论预拱曲线，在组装胎架上通过调节支撑点高程补偿实现。这种拱度预设不仅是为了抵消结构自重产生的形变，更是为了保证桥面在车辆动荷载作用下依然能保持良好的平顺性。与此同时，焊接收缩余量的设置是一个复杂的动态优化过程，涉及钢材热膨胀系数、焊缝填充金属量、构件外部约束强度等多个变量，通常可以通过首制试验节段的数据分析，总结出各方向收缩的平均经验率。

后续大规模板块组装时，要把这个经验数值预先补偿到零件下料尺寸中，确保焊接冷却完成后几何尺寸能精准落在设计允许的偏差区间内。如果发现实测收缩量和理论预测值存在偏差，必须在下一个节段制造过程中及时动态修正补偿。这种灵敏的微调机制贯穿桥面板块生产全周期，通过高精度的余量动态设置，可以有效避免制造误差累积引发节段长度不足或横向接口错位。这种对材料热加工规律的深刻掌控与科学利用，大幅提升了钢箱梁板块的制造精度，保障了桥梁各节段在长度方向的几何一致性，让现场悬拼作业能够高效开展。

（三）连续匹配组装线形与接口错边量的严控

连续匹配组装是保证特大跨度钢桥在工地现场实现高精度顺利合龙的核心技术保障。工厂制造阶段，通常要求把已经完工的节段作为母型，和正在组装的后续节段进行实地联接组装，这种匹配模式可以从源头上消除节段间可能产生的制造误差累积。组装过程中，相邻两节段的接口线形必须实现完全几何匹配，保证桥梁中线、水平基准线以及横坡度在交界面处实现无平滑过渡。接口位置的错边量，要采用比行业规范更严苛的企业标准强制管控，绝对禁止出现任何阶梯状突变或明显位错，降低工地现场二次修整的工作量。

为了达到这种极致的空间匹配精度，所有测量与精调工作尽量安排在环境温度稳定的深夜或阴天进行，规避强烈日照温差引发结构不可逆扭曲。技术人员要利用高精度全站仪捕捉接口断面上数百个离散特征点，通过计算机建立高精度数字三维模型做实时比对。如果发现接口存在微量几何错边，必须通过温控点加热或局部液压顶推技术做精细化修正，直到每一块钢板的对接都达到严丝合缝的理想状态。这种对接口质量近乎严苛的要求，大幅降低了现场高空悬拼作业的施工难度与安全风险。通过在工厂受控环境下完成复杂的匹配与精调，确保桥梁跨越

地理屏障时，能够严格按照预定设计轨迹实现完美合龙，保障钢结构桥梁的整体工程品质。

（四）钢管拱桥拱肋卧拼组装的胎架设计与大直径相贯节点组装间隙控制

钢管拱桥的拱肋通常采用分段工厂制造、现场卧拼拼接的工艺，胎架设计是保障整体卧拼线形精度的核心基础。胎架需要根据拱肋的设计线形量身定制，每个支撑点的高程都要结合拱肋轴线坐标和预设预拱度精确计算，胎架基础同样需要满足强度、刚度和稳定性要求，避免施工过程中发生不均匀沉降，每个支撑点位都要设置可调节高程的顶升装置，方便对线形进行动态微调。

大直径相贯节点的组装间隙控制是拱肋卧拼的质量控制关键，直接影响后续焊接的成型质量和节点受力性能。相贯口切割完成后，要先进行整体预拼匹配，检测接口处的间隙偏差，对于局部间隙超标的部位，要采用打磨修整或补焊打磨的方式处理，严禁强行拉合组装产生额外装配应力。整体预拼完成后需要标记精准的匹配定位线，正式组装时依靠定位冲钉和定位码板锁定接口位置，全程控制错边量和间隙均匀性，确保组装间隙始终符合规范和设计要求，保障相贯节点焊接质量稳定可靠。

预拼组装完成后，需要对整段拱肋的总长度、轴线线形、拱肋断面尺寸以及各个接口的匹配精度进行全面检测，确认所有参数合格后再进行标记、拆解并转运至吊装架设环节，为现场拱肋合龙提供精度保障。

第三节 焊接工艺与质量控制

焊接工艺作为钢结构桥梁制造的核心环节，直接决定了整座结构的整体安全性与长期疲劳寿命。通过严格的工艺参数管控与标准化的质量评价体系，能有效规避各类焊接缺陷，确保构件在长期复杂荷载作用下始终保持优良的受力性能。

一、焊接工艺评定与人员资质

正式施焊前必须通过工艺评定验证施工方案的可行性，同时建立严格的人员准入机制。这是保障整体焊接质量的先决条件，核心目的就是通过后置的工艺验证与专业技能考核，把人为操作误差与技术风险降至最低水平。

（一）钢材焊接工艺评定的覆盖范围与替代规则（附录 E）

焊接工艺评定是指导现场生产的核心技术依据，其覆盖范围必须严格遵循规范中关于钢材等级、厚度及焊接方法的明确界定。依据附录 E 的相关规定，当母材的钢材类别发生变化或者强度等级提高时，原有的工艺评定结果不能直接替代，需要重新开展试验验证。对于厚度覆盖范围来说，通常以评定试件的厚度为基准，在规定倍数范围内保持有效，超出这一范围则需要增补评定。替代规则着重强调了焊接材料、热处理状态及焊接坡口形式的一致性要求，当采用同类别中强度等级较低的钢材替代高强度等级钢材时，必须确保焊接参数处于已验证的安全包络线范围内。工艺评定文件需要详细记录焊接电流、电压、行走速度及层间温度等关键参数，并以此为基础编制正式的焊接工艺规程。在多机头埋弧焊或者自动化焊接设备投入应用时，覆盖范围的界定还需要额外考虑焊接热输入量的波动范围。只有通过严密的覆盖范围核定，才能确保工程中所有焊缝都处于受控工艺参数的支撑之下。这种严谨的替代逻辑不仅能降低重复试验带来的成本，更能确保在高标准要求的桥梁建设项目中，每一道焊缝的微观组织与宏观力学性能都具备可追溯的科学依据。

（二）圆柱头焊钉焊接工艺评定（附录 F）的弯曲与拉伸试验

圆柱头焊钉在钢混组合梁结构中承担着关键的剪力键作用，其焊接质量评定需要严格依照附录 F 的要求执行。评定过程重点考察焊钉根部的熔合质量，核心试验项目包括拉伸试验与弯曲试验两类。在拉伸试验中，合格的焊钉应当在杆部发生断裂，且抗拉强度必须符合设计标准要求，这一过程直接验证了焊接接头与母材的强度匹配度。弯曲试验则是通过专用工装将焊钉弯曲至三十度，仔细观察焊缝及其热影响区是否存在肉眼可见的裂纹或分层缺陷。评定试件的制备需要完全模拟实际施工条件，包括板厚、焊接位置及母材表面处理状况都要与现场保持一致。如果弯曲试验结果不合格，需要针对性分析是焊接能量输入不足，还是由于母材表面锈蚀未清理干净导致熔合不良。为了保证评估结果的代表性，抽样数量必须覆盖不同批次的焊钉与配套瓷环。评定结论需要形成正式的书面报告，详细记载焊接时间、起弧电流等核心参数，作为批量施工的技术红线。通过这种系统性的机械性能测试，可以有效预防桥梁使用过程中因焊钉脆断或脱落导致的界面剪力传递失效问题。同时，评定结果还应当结合宏观金相检验，仔细观察熔合线处的微观形貌，确保焊缝根部不存在未熔合缺陷，为钢混组合结构的整体受力可靠性提供坚实的基础保障。

（三）焊工与无损检测人员的资格准入与实操考核

焊接质量的稳定性高度依赖于从业人员的专业素养，因此行业内建立了严格的资格准入机制。焊工必须持有在有效期内的官方执业证件，考核内容涵盖全位置焊接操作能力，只有在规定时间内完成考核试件且检测合格后，方可持证上岗作业。同时，无损检测人员的资格准入包含两个核心维度：一是检测人员需具备与工程要求相匹配的专业等级证书；二是必须通过针对本项目特定材质与结构形式的实操对比试验。现场施工过程中应当建立详细的人员作业档案，记录每位焊工的过往施工质量信誉。针对桥梁重要受力部位的厚板焊接作业，还需要对参与施焊的焊工进行附加的专项工艺培训。检测人员在开展作业时，必须严格执行对应检测规程，确保检测结果客观真实。通过双重的人员准入管理，可以从源头上降低焊接缺陷的产生概率。另外，项目部还需要定期对在职人员进行抽考复核，确保持证人员的技艺水平始终处于稳定合格状态，防止因技术生疏或者心态麻痹而诱发质量事故。通过这种制度化的常态化考评，不仅能提升作业团队的整体专业素质，也能在长周期的桥梁建设过程中，始终维持焊接质量的高压受控态势。

二、复杂结构体系的专项焊接工艺

不同结构形式的钢桥，关键部位的受力特点与焊接约束条件存在显著差异，需要结合结构特性制定针对性的焊接技术方案，才能有效解决厚板焊接、群焊作业中的应力不均、层状撕裂等典型质量问题。

（一）钢桁梁厚板整体节点全熔透焊缝的防层状撕裂与清根工艺

钢桁梁整体节点往往采用厚度超 50mm 的厚钢板整体切割成型，全熔透焊缝需要通过多层多道施焊完成，钢板轧制方向的 Z 向性能若存在缺陷，极易在焊接拉应力作用下发生层状撕裂。施焊前需要对母材进行 Z 向探伤检测，不合格母材严禁投入使用，同时要严格按照工艺要求控制预热温度与层间温度，避免焊缝冷却速度过快产生过大拘束应力。焊接过程优先采用窄间隙埋弧焊工艺，减少填充金属量与整体热输入量，从工艺层面降低收缩应力的产生幅度。对于需要清根的单面焊双面成型焊缝，清根作业必须采用碳弧气刨配合砂轮打磨，彻底清除坡口根部的氧化渣与未熔合缺陷，直至露出完整的新鲜金属面，清根完成后要经磁粉探伤确认无残留缺陷，方可进行后续坡口填充焊接，从根源上避免根部缺陷诱发层状撕裂。

（二）悬索桥 / 斜拉桥钢箱梁锚箱厚板群焊的焊接顺序与热输入控制

钢箱梁锚箱是承受主缆斜拉索集中拉力的核心受力部件，由多块厚板重叠组合而成，焊缝密集、拘束度大，焊接残余应力极易累积超标，必须通过合理的焊接顺序管控应力分布。施焊过程要严格遵循“由内到外、对称施焊”的基本原则，先完成锚箱内部加劲肋与承力板的焊接，再逐步向外施焊锚箱与顶板、腹板的连接焊缝，避免单侧先焊产生不均匀形变。同时必须对每一道焊缝的热输入量进行严格管控，禁止为加快施工进度随意增大焊接电流，每一道焊接完成后必须等待层间温度降至要求范围，方可进行下一层焊接，防止热量持续累积增大残余应力。针对厚板多层多道焊，可采用分段退焊工艺分散焊接热量，每段焊接长度控制在合理范围内，进一步优化焊缝区的应力分布状态。焊接完成后要按照要求进行整体消应力热处理，充分释放厚板内部累积的焊接残余应力，保障锚箱结构长期受力的稳定性。

（三）正交异性钢桥面板 U 肋熔透 / 半熔透焊缝的防穿越与抗疲劳焊接

正交异性钢桥面板是直接承受车辆轮压的受力结构，U 肋与面板之间的连接焊缝长期承受反复动荷载作用，是桥梁疲劳破坏的高发区域，焊接过程中必须严格管控熔透深度，既要保证焊缝熔合质量，又要避免焊接熔池穿越 U 肋内壁造成焊穿缺陷，影响后续铺装受力与抗疲劳性能。

针对熔透焊要求的 U 肋焊缝，通常采用单面焊双面成型工艺，施焊前需要严格管控 U 肋与桥面板之间的组装间隙，间隙偏差必须控制在极小范围内，间隙过大易引发焊穿，间隙不足则会导致熔深不达标。焊接过程中要对焊接电流、焊接速度以及焊丝伸出长度进行精准管控，采用单面埋弧焊或者气体保护焊工艺时，需要通过工艺试验预先确定参数匹配范围，保证熔透深度达到设计要求的同时，不会穿透 U 肋内壁形成焊瘤。对于采用内贴陶瓷衬垫的焊接工艺，衬垫的粘贴必须平整密实，严格控制衬垫与坡口背面的贴合度，防止熔池泄漏引发穿越缺陷。

焊缝完成后需要通过超声波无损检测逐一检验熔深，排查未熔合、焊穿等缺陷，一旦发现熔深不足或者焊穿穿越，必须按照工艺要求进行返修处理，避免长期动荷载作用下从缺陷位置诱发疲劳裂纹，保障钢桥面板的长期服役性能。

（四）钢管拱主弦管对接焊缝的单面焊双面成型与管内焊接防护

钢管拱主弦管通常采用厚壁钢管卷制而成，现场对接焊缝属于一级受力焊

缝，要求全熔透且背面成型均匀，目前多采用单面焊双面成型工艺完成施工，以此免去管内人工焊接的高危作业。施焊前需要严格加工坡口，通常采用带钝边的V形或X形坡口，严格控制坡口角度和钝边厚度，保证熔透的同时避免烧穿。目前常用的背面成型方式分为内贴陶瓷衬垫和管内充气保护两种，采用陶瓷衬垫时，衬垫需要与坡口背面完全贴合，固定衬垫的胶带要均匀拉紧，防止焊接过程中衬垫移位引发熔池漏出；采用充气保护工艺时，需要在管内对接位置两侧设置封堵气室，提前通入纯度达标的保护气体，焊接过程中维持稳定的气体压力，保障背面焊缝成型均匀。

焊接过程需要严格管控热输入，采用多层多道焊分层填充，每层焊接完成后严格控制道间温度，避免热量过高导致钢管变形，每一道焊缝的摆动幅度、行走速度都要遵循工艺评定的参数要求，保证坡口侧壁熔合良好，避免出现未熔合、夹渣等缺陷。

由于主弦管管径有限，单面焊施工过程中管内会积存焊接烟气、有害残渣，若后续需要进入管内进行缺陷返修或清根处理，必须提前做好管内通风排气，持续通入新鲜空气，安排专人在外值守监护，配备防毒与照明防护装备，防止作业人员中毒窒息。焊接完成后需要及时清理管内残留的衬垫残渣与焊瘤，避免杂物残留影响管内受力或后续防护施工，从细节上保障主弦管对接焊缝的整体质量与服役安全性。

三、常规焊接操作规范与缺陷返修

焊接作业的整体质量，离不开标准化的基础操作管控，也需要针对已发现缺陷制定科学合理的返修方案，从细节层面筑牢质量防线。常规焊接作业的每一道基础工序都直接影响最终成型质量，必须严格遵循既定的操作规范落实管控。

（一）焊接环境（温湿度、风速）的监控与防护措施

焊接作业对环境条件的敏感性较强，环境参数超标极易引发气孔、裂纹等各类焊接缺陷，因此必须对现场温湿度、风速进行全程监控。当作业环境温度低于规范要求的最低施焊温度时，需要对母材进行整体预热升温，不得直接在低温条件下强行施焊；当空气相对湿度超过80%，或者母材表面存在结露、积水时，必须通过加热烘烤去除表面 moisture，采取搭设防风防雨棚等防护措施，满足环境要求后方可开展作业。针对露天作业的现场焊接，风速超过限定值时必须搭设防

风设施，气体保护焊作业风速超标时，若没有有效防风防护应当停止作业，避免保护气体被风吹散引发焊缝气孔缺陷。现场需要布置定点监测点，安排专人定时记录环境参数，遇突发天气变化时及时做好未完成焊缝的保温防护，避免焊缝骤冷产生开裂风险。

（二）焊前预热与道间温度的测控布点要求

焊前预热是预防厚板焊接冷裂纹的核心措施，预热范围、预热温度必须严格符合工艺要求。通常预热范围需要覆盖焊缝两侧不小于三倍板厚的区域，且最小宽度不小于 100mm，测温点需要布置在坡口侧壁、远离起收弧的稳定位置，避免将加热点的温度误判为整体预热温度。多层多道焊接过程中，必须严格控制道间温度，道间温度不得低于最低预热温度，也不得超过最高限值，避免温度过高引发焊缝晶粒粗大降低力学性能。测点布置需要覆盖焊缝的不同位置，包括坡口根部、侧壁以及坡口两端，确保全焊缝范围内道间温度都符合要求，当温度不达标时必须调整施焊节奏，等待温度降至合格范围后再开展下一道焊接，严禁违规作业。

（三）焊缝超声冲击（UIT）改善疲劳性能的工艺要求（附录 H）

焊缝超声冲击技术是提升钢桥抗疲劳能力的有效处理手段，其工艺要求应当严格遵照附录 H 的细则执行。该工艺利用高频振动将压缩塑性变形引入焊趾区域，通过优化焊缝过渡几何形状降低应力集中程度，同时在表层引入有利的残余压应力，从两个维度提升疲劳性能。在操作过程中，冲击头的直径与形状应当根据焊缝类型进行对应选型，冲击角度应当保持与焊趾线垂直，沿焊缝方向匀速移动，确保冲击痕迹能够覆盖焊趾边缘两侧各至少三毫米范围。处理深度通常控制在零点三至零点五毫米之间，处理完成后的表面应当呈现均匀的金属光泽。为了验证处理效果，应当抽样开展表面粗糙度检测与残余应力测试。此技术特别适用于受拉弦杆、横梁接头等疲劳敏感部位。在实施过程中，应当由经过专项培训的专人操作，并详细记录冲击频率、输出功率及行走速度等工艺参数。不仅如此，在完成超声冲击处理后，应当避免再次开展热加工作业，防止已经形成的压应力层因热回复作用而失效。通过这种精细的表面强化工艺，可以显著延长构件的疲劳起裂寿命。另外，在处理复杂的交叉焊缝时，冲击路径应当做圆滑顺接处理，确保各方向的应力分布趋于均匀。施工记录中还应当包含冲击前后的焊趾几何形貌对比数据，作为竣工验收的支撑材料。

表 4-3 列出了不同疲劳敏感部位超声冲击工艺参数要求，供现场施工参考：

表 4-3 不同部位焊缝超声冲击工艺参数表

焊缝部位	冲击头直径 (mm)	冲击输出功率	行走速度 (mm/s)	处理深度范围 (mm)
受拉弦杆对接焊缝	10~12	200~250	2~3	0.3~0.4
横梁节点角接焊缝	8~10	180~220	1.5~2.5	0.3~0.5
交叉复杂焊缝	6~8	150~200	1~2	0.3~0.4

从表 4-3 中可以看出，针对不同类型的焊缝，超声冲击的工艺参数需要灵活调整，整体遵循结构越复杂、应力集中越严重，参数越保守的原则，以此保障处理效果均匀稳定，充分发挥超声冲击改善疲劳性能的作用。

（四）焊接缺陷的碳弧气刨清除与同一部位返修次数限制

焊接缺陷的清除必须做到精准且彻底，碳弧气刨是目前工程中应用最广泛的缺陷清除工艺。操作时应当根据板厚选择合适的碳棒与电流参数，刨槽深度需要延伸至露出健康的母材组织为止，避免残留隐性缺陷。为了保证结构长期稳定性，返修机制主要包含以下两项强制性约束：一是同一部位的返修次数严格限制在两次以内；二是超过限次的返修必须经过专家论证并制定专项处理方案。做出这一限制的原因在于，多次重复热循环会导致热影响区晶粒严重粗大，显著降低母材的冲击韧性，给结构长期安全留下隐患。返修焊接应当采用比初次焊接更严格的预热措施，并实施小电流、多道焊工艺，尽可能减少返修对母材造成的二次伤害。对于返修完成后的焊缝，必须进行百分之百的无损检测，确认缺陷彻底清除。通过限制返修次数，可以倒逼施工单位优化初次焊接工艺，从源头提升一次焊接合格率。同时，返修过程中的质量档案应当作为单独文件留存，详细记载缺陷性质、深度及清除手段。这种全过程的可追溯化管理，能够有效防止返修区域成为未来结构服役过程中的疲劳脆弱点，确保桥梁在整个生命周期内的安全水平始终处于设计预期的受控范围之内。返修不仅仅是对已有工程质量的补救，更是对前期施工缺陷的深度剖析，通过总结返修原因，可以进一步完善后续施工的组织设计，避免同类缺陷重复出现。

第四节 制孔与摩擦面处理

钢结构桥梁的连接质量很大程度上取决于孔位精度与摩擦面的抗滑移性能。本节将详细探讨钻孔机械加工的工艺规程、摩擦面处理的技术要点以及相关的检验标准，确保桥梁结构在数十年的服役周期内都能具备稳定可靠的承载力，满足设计预期的通行与受力需求。

一、螺栓孔的机械加工

螺栓连接是钢结构桥梁最关键的连接方式之一。高精度的孔位加工不仅能够提高现场架设的拼装效率，减少高空作业的调整工作量，更是保证高强度螺栓受力均匀的核心前提。加工过程中需严格执行机械加工规范，精准控制各项几何偏差，从源头上规避连接部位的应力集中风险。

（一）数控钻孔的精度保障与严禁冲孔切割的规定

现代桥梁钢结构制造普遍采用数控平面钻床或三维钻床进行螺栓孔加工。数控设备通过预先编写的程序指令控制钻头运行路径，能够极大消除人工划线定位产生的累积误差，整体精度比传统手工加工提升一个数量级。在加工长大型号的弦杆或主梁腹板时，数控系统的精准坐标定位能力，能够确保上百个孔群的中心距与对角线偏差都维持在极小范围内，为后续的工地现场安装打下了坚实基础。

现行行业规范中明确规定，严禁使用冲孔或气割等手段制造高强度螺栓连接孔。冲孔过程中产生的巨大瞬时剪切力，会导致孔周金属产生严重的塑性变形和加工硬化，在孔边形成肉眼难察的微裂纹源，长期承受车辆交变荷载作用后，裂纹会逐步扩展，严重削弱结构的整体疲劳强度。而气割方式成型的孔壁会留下较宽的热影响区，会改变钢材原有的微观组织，造成局部硬度异常升高，极易在孔边应力集中的作用下诱发开裂问题。

为了进一步提升批量群孔的加工精度，不少制造单位会采用模板钻孔或多层叠钻的工艺来控制偏差。叠钻时需利用专用紧固件将各层板材牢牢压紧，防止加工过程中板材相对窜动，同时避免钻屑进入板缝造成孔位偏移。通过优化钻头的切削参数与冷却润滑液的配比，可以显著降低钻孔过程中产生的切削热对孔径尺寸的影响，使每一个螺栓孔都能达到设计要求的理想位置与加工精度。

（二）孔壁粗糙度、垂直度与孔径允许偏差要求

钻孔完成后的质量检查涉及多项关键几何参数，每一项都直接影响连接的受力性能。孔壁的粗糙度直接关系到螺栓杆身与孔壁的配合状态，若孔壁过于粗糙，存在明显凸起或凹陷，可能在结构受力时产生局部应力集中，长期运行后容易诱发疲劳损伤。垂直度偏差则会造成螺栓拧紧后垫圈与构件表面的非均匀接触，一部分区域压实另一部分区域悬空，直接影响螺栓预拉力的有效传递，甚至会导致螺栓受弯，降低其使用寿命。对于高强度螺栓孔，其孔径偏差通常被限制在合理的正公差范围之内。

在实际检验过程中，检验人员需要针对三个核心指标进行严格量测，孔径与形位偏差参数及允许范围可见表 4-4。

表 4-4 螺栓孔加工精度允许偏差表

检查项目	允许偏差要求
孔壁表面粗糙度	不大于设计规范规定的限定值，无明显螺旋纹、毛刺
孔中心线垂直度	偏差不得超过板厚的 1%
孔径尺寸偏差	控制在 0~+1mm 范围内，不允许出现负公差

从表 4-4 中可以看出，螺栓孔加工的每一项精度要求都有明确的控制标准，三项指标全部满足要求才能判定合格：孔壁表面粗糙度应控制在规定数值以下，确保无明显的螺旋纹或毛刺存在，通常采用对比样块或专用粗糙度仪器进行现场核实；螺栓孔的中心线应垂直于构件表面，其垂直度偏差不得超过板厚的百分之一，以保证螺栓头与螺母能够平整贴合构件表面；孔径允许偏差应控制在正一毫米以内，严禁出现负公差，否则会导致螺栓无法顺利穿入，而孔径过大则会改变螺栓连接的受力状态，影响整体连接承载力。

（三）钢桁梁大型节点板群孔制作的套模钻孔工艺与孔群同心度保障

钢桁梁大型节点板是多根杆件交汇的核心受力构件，其上孔群数量多、位置精度要求高，孔群之间的同心度直接决定了现场拼装时螺栓能否顺利穿入，更影响各杆件连接后的受力均匀性。套模钻孔是保障大尺寸节点板群孔精度的成熟工艺，核心是预先加工出精度符合要求的钻模板，通过钻模板上的导向套约束钻头进给方向，以此保障所有孔的位置精度与不同叠放板件之间的同心度。

套模加工前，需要先完成节点板的下料、校正与坡口加工，确认节点板的整体平面度符合要求，再将钻模板与节点板通过定位销牢牢固定，保证加工过程中

二者不会发生相对位移。钻模板需要采用变形量小、耐磨性能好的钢材制作，导向套需要经淬火处理提升硬度，避免长时间钻孔后出现孔壁磨损扩大，保障导向精度的稳定性。钻孔过程中需要按对称顺序依次加工，避免单侧连续钻孔产生的切削热导致板件局部变形，进而影响整体孔群位置精度。

为了保障多层节点板叠合后的孔群同心度，加工时可采用叠配套钻工艺，将所有需要同孔位对齐的节点板按安装位置叠合夹紧后，统一通过套模完成一次钻孔加工，从根本上消除单块板分别加工产生的累积误差。钻孔完成后，需要采用专用通止规对所有孔位逐一进行检查，孔群整体同心度偏差超出允许范围时，不得采用气割扩孔的方式修整，需要通过打磨或机械铰孔的方式进行处理，确保所有螺栓都能无阻碍自由穿入，最终满足孔群同心度的精度要求。

二、摩擦面处理工艺

摩擦面作为高强度螺栓连接传力的核心区域，其表面的粗糙程度与清洁度直接决定了抗滑移系数的大小，是连接部位抗剪承载力的核心影响因素。通过科学的工艺处理，可以显著提升接触面的机械啮合力，确保桥梁在车辆动荷载、风荷载等反复作用下连接稳固，不产生相对滑移，保证结构整体受力符合设计要求。

（一）喷砂（丸）处理摩擦面的抗滑移系数保障机制

喷砂或喷丸处理是目前工程中应用最广泛的摩擦面处理手段。通过高速喷射的磨料撞击钢材表面，不仅能够彻底清除表面附着的氧化皮、锈迹及旧漆膜，还能在微观层面形成均匀而密集的凹凸粗糙形貌。这种均匀的粗糙度能够大幅增加接触面的真实接触面积，并在宏观上产生明显的机械互锁效应，从而使抗滑移系数达到设计要求的数值，保障连接传力稳定。

为了确保抗滑移系数的长期稳定性，必须严格控制磨料的粒径、硬度以及喷射压力这几个核心参数。选用的钢丸或石英砂应当干燥、无油污，且具有良好的棱角形状，圆钝的磨料无法打出符合要求的粗糙形貌。在处理过程中，喷枪角度与工件表面的距离需保持恒定，以获得均匀一致的表面纹理，避免局部区域处理不足或过度。处理完成后的摩擦面应当呈现出均匀的灰白色金属本色，且粗糙度数值需符合工艺评定的具体要求，所有参数都核验合格后才能转入下道工序，确保整体施工质量。

（二）酸洗与砂轮打磨的适用场景及限制

酸洗处理常用于批量化的小型零部件生产，利用酸液与金属氧化物的化学反应来净化表面。其优势在于处理效率高、覆盖均匀，能够进入复杂构件的结构死角，清除常规方法难以处理部位的锈蚀。但是酸洗后的表面相对平滑，难以达到设计要求的高抗滑移系数，无法满足主节点大受力的需求。同时，酸洗工艺存在氢脆风险，特别是对于高强度钢材，很容易导致钢材韧性下降，必须在处理后进行严密的除氢操作才能投入使用。因此，在承受大交变应力的主桥核心节点中，酸洗摩擦面的使用受到严格限制，一般仅用于次要受力部位。

砂轮打磨则多用于工地现场的局部修补或小规模连接作业，是喷丸处理的补充方案。操作人员使用电动砂轮机沿指定方向进行往复打磨，以暴露出新鲜的金属基体，清除安装前产生的浮锈。这种方法的灵活性极高，能够随时处理安装前新产生的锈蚀点或污染区域。但打磨过程中极易因力度控制不好，造成局部板材过度消减或产生打磨镜面现象。如果表面被打磨得过于光滑，摩擦系数将急剧下降，无法满足结构传力的安全需求，留下安全隐患。

打磨的方向具有明确的工艺规定，通常要求打磨纹路必须垂直于受力方向，这样才能最大化增加接触面的滑动阻力，提升抗滑移性能。操作时严禁使用沾染油污的磨盘，并应防止磨削热过高导致表面蓝脆，改变钢材局部力学性能。由于人工操作的不确定性较大，大面积的摩擦面处理不建议采用砂轮打磨方案。对于关键连接部位，打磨后的摩擦面必须重新进行现场抗滑移系数抽检，检验合格后方可进行螺栓紧固作业。

（三）摩擦面处理后的防污染与防锈保护措施

摩擦面在处理完毕后处于极高的化学活性状态，极易在潮湿或污染环境下发生二次锈蚀，一旦保护不及时就会前功尽弃。一旦表面生成较厚的浮锈或粘附了油污、浮尘，其抗滑移性能将大打折扣，无法达到设计要求。为此，必须在处理完成后四小时内立即采取物理屏蔽保护措施，隔绝外界水汽和污染物。通常的做法是在摩擦面范围内覆盖专用的密封胶带或防水塑料薄膜，严禁作业人员手指直接接触已处理区域，皮肤上的油脂会直接污染表面，降低摩擦系数。

针对保护措施的实施，施工现场需严格遵循以下操作规范：摩擦面四周的涂装边界应清晰准确，可提前粘贴美纹纸分隔，严禁油漆雾气喷溅或流淌至摩擦面上，以免降低摩擦系数；构件在存放与吊装过程中，应确保摩擦面朝向不易积水

的方向，并远离粉尘源与焊接飞溅区，避免焊渣烫伤摩擦面；安装前必须揭开保护膜进行细致核查，若发现局部变色或轻微氧化，应使用干净的钢丝刷及时清理，确保接触面处于最佳状态，达到预期的抗滑移指标要求。

第五节 构件矫正、试拼装与预拼装

构件矫正与预拼装是钢结构桥梁制造过程中最为关键的质量保障环节，其本质是通过工艺干预消除焊接残余应力带来的负面形变，并通过模拟组装验证各部件间的几何兼容性。这一阶段的工作质量直接决定了现场安装的精度与速度，是实现大跨度桥梁高精度合龙的必经之路，必须建立严密的工艺执行体系与检测标准。

一、焊后变形矫正工艺

焊接过程中的非均匀热输入会导致钢材内部产生复杂的应力场，进而诱发构件出现弯曲、扭曲或局部失稳等几何形变。针对不同材质与厚度的构件，需要根据其刚度特性与变形量级，科学选择物理矫正或热物理矫正手段。这一过程不仅是对形状的物理修复，更是对材料内部应力分布的重新平衡，必须确保矫正后的性能符合原设计意图。

（一）机械矫正与火焰矫正的适用对象选择

机械矫正主要依靠外加机械载荷使钢材产生塑性变形，以此抵消焊接产生的收缩力。这种方式适用于生产线上大批量的板材平直加工，或者对具有简单几何形状型钢、简单杆件进行调直。通过平板机、型钢校直机或重型压力机，可以实现高效、稳定且环境污染小的加工。但机械矫正对于受限空间内部或具有复杂三维曲面的构件效果受限，且在压力点处容易产生局部压痕或应力集中，因此对操作压力与支点距离有严格计算要求。

火焰矫正则是通过氧乙炔等混合气体的燃烧热源，对构件的特定区域进行加热，利用材料的热膨胀受限产生的塑性压缩变形来补偿焊接拉应力。这种工艺具有极高的灵活性，适用于大型箱型梁、钢塔节段内部加强筋以及受限空间的局部微调。根据变形形态的不同，工艺人员会采用点状加热、线状加热或三角形加热等多种模式。对于大厚度板材或刚度巨大的节点部位，火焰法几乎是唯一的在线

处理手段。但在实际操作中，火焰温度、加热深度以及冷却速度的控制难度极大。

在工艺选择的决策逻辑中，通常倾向于将机械矫正用于初期的散件与中小型组件。而对于整体焊接后的结构件，则根据其重要性进行组合应用。当面对高强度钢材时，火焰矫正的应用需格外谨慎，必须避免过度热输入导致的金相组织脆化，保障构件的疲劳寿命。

（二）冷矫总变形量 2% 的限制与热矫温度监控

冷矫正工艺在常温下进行，其核心控制点在于材料的应变速率与累积变形量。国家标准及行业规范明确规定，冷矫正的总变形量不得超过原长度或跨度的 2%。这一阈值的设定基于金属疲劳理论与应变硬化效应的平衡，一旦变形量跨越此红线，材料内部的晶格会产生严重的滑移错位，甚至出现肉眼不可见的微裂纹，导致钢材的抗拉强度与低温冲击韧性显著下降。在施工现场，必须通过高精度测量工具实时记录矫正前后的坐标变化，确保每一道工序的应变变量都处于安全区间内。

热矫正的温度监控则是保障材料力学性能不发生质变的生命线。对于碳素结构钢和低合金高强度钢，火焰加热的峰值温度应严格控制在 900 摄氏度以内。作业期间必须配备红外测温仪，禁止仅凭肉眼观测火色来估算温度。如果温度过高，钢材会进入过热区，导致晶粒粗大化；而温度过低则无法产生足够的塑性流变，徒劳增加工时。当构件温度降至 400 摄氏度至 600 摄氏度之间时，严禁在此区间进行剧烈的机械撞击，防止发生蓝脆现象导致脆性断裂。

强制冷却工艺在热矫正中常被用于加速施工进度。但必须注意，只有在温度降至 600 摄氏度以下且确认组织稳定的前提下，方可采用水冷辅助。不当的急冷操作会使表面产生极高的残余拉应力，抵消矫正效果。因此，建立一套从加热起点到冷却终点的全过程温度档案，是评价热矫正工艺合格与否的法定依据。

（三）钢箱梁板单元与钢桁梁杆件焊接变形的专用矫正标准

钢箱梁板单元多为薄板拼接而成，焊接后极易产生角变形、波浪变形与平面度超差，矫正时需针对薄板的失稳特性制定专用要求。对于板单元的整体平面度，任意 1m 范围内的偏差不得超过 2mm，整个板单元的总平面度偏差不得超过板单元边长的 1/1000，且最大不得超过 8mm；对于板单元对接焊缝处的角变形，偏差不得超过板厚的 1/10，且最大不超过 3mm，若采用火焰矫正局部角变形，加热点需避开焊缝熔合线 10mm 以上，防止损伤焊接接头性能。

钢桁梁杆件作为主要受力构件，焊接后的矫正重点在于控制杆件的整体直线

度、扭曲度和端面垂直度。杆件整体直线度偏差不得超过杆件长度的 $1/1000$ ，且总偏差最大不得超过 10mm ；杆件的扭曲变形偏差，每米长度不得超过 1mm ，总扭曲偏差不得超过 5mm ；杆件两端的连接端面与杆件轴线的垂直度偏差，不得大于端面边长的 $1/1000$ ，避免影响现场拼接的贴合精度。矫正完成后，所有矫正部位都需要重新进行外观和无损检测，确认无裂纹、无材质损伤后方可转入下道工序，保障杆件的力学性能符合设计要求。

二、试拼装与预拼装的界定

在钢结构桥梁的工厂制造阶段，试拼装与预拼装虽然在文字表达上相似，但在工程实践中承载着截然不同的技术使命。准确区分并执行这两项工艺，是优化工厂场地利用率与施工工期的前提。试拼装更倾向于功能性的验证，而预拼装则是一种全过程的模拟，两者共同构成了从工厂加工到现场安装之间的技术桥梁。

（一）散拼结构的“试拼装”条件与孔通过率检验

散拼结构主要涉及通过节点板和大量螺栓连接的桁架或桁梁，其试拼装的核心目标是验证群孔的空间位置一致性。执行试拼装的先行条件是参与拼装的所有杆件已经通过了单件几何尺寸验收，且选定的拼装范围必须覆盖至少两个完整的节点空间。通常情况下，工厂会抽取总量的 15% 左右进行代表性试拼。如果设计方案中存在大量相似的典型节段，则只需对首个节段及发生工艺变更后的首节进行试拼。

孔通过率是衡量试拼装成功与否的最直接指标。检验时需使用比名义孔径小 0.3毫米 的专用量规进行全数插试，且量规必须能自由穿过整个连接叠层。若发现有超过 20% 的孔位存在卡阻，则说明该批次的制孔工艺存在系统性误差，必须停止后续加工。对于单个无法通过的孔，禁止在试拼装状态下使用强力冲子硬塞，必须通过铰孔方式进行修正。

试拼装还需要关注各板层间的接触密贴程度。在不施加外部载荷的状态下，使用 0.3毫米 的塞尺尝试插入板间缝隙，其深度不得超过 20毫米 。如果发现缝隙超标，则需分析是否由于构件矫正不彻底或边缘加工质量缺陷所致。

（二）节段拼装结构的连续“预拼装”原则及轮次要求

节段拼装结构如大型钢箱梁或主塔，必须严格执行连续预拼装工艺。该原则要求在胎架上至少同时放置三个相邻的节段，形成“生产一节、验证一节、保留

一节”的良性循环。具体而言，当第一、二、三节完成组装并通过验收后，将第一节作为成品移出，第二、三节继续保留，再将待加工的第四节吊入与其匹配。这种工艺设计极大地消除了单一节段加工误差的累积，确保全桥线形平顺。

每一轮次的预拼装都需要经历极其繁琐的定位与调整流程。工艺人员需根据设计竖曲线和预拱度要求，利用千斤顶和三维调整机对构件位置进行毫米级的微调。轮次要求并非固定不变，对于受力复杂的锚固节段或几何形状突变的过渡段，往往需要增加同时在架的节段数量至四个甚至更多。这种多节段联动的检测方式，可以提前预判现场吊装可能遇到的干涉风险。

在每个轮次完成后，必须在节段接口处打上精准的匹配标记和测量定位基准。这些物理标记将伴随构件直至安装现场，成为吊装定位的唯一可靠依据。连续预拼装不仅是尺寸的罗列，更是对整个工艺流程的动态修正，是实现数字化工厂与现场协同作业的关键环节。

（三）大跨悬索桥 / 斜拉桥钢箱梁长线法连续预拼装的线形匹配

长线法预拼装是在工厂设置与全桥（或整段桥梁）线形一致的固定式胎架，将所有钢箱梁节段按照架设顺序依次在胎架上完成匹配拼接，直接在厂内还原设计线形的工艺方法。与短线法相比，长线法的胎架线形是固定的，每一个节段的定位基准都直接对应设计坐标，不需要通过多次转胎匹配传递误差，因此线形控制精度更高，更适用于大跨径的悬索桥与斜拉桥钢箱梁制造。

线形匹配的核心是按照设计要求准确还原竖曲线、预拱度以及平面线形，需要先完成胎架的基准坐标验收，确认胎架控制点的坐标偏差不超过设计允许范围后，才能开始钢箱梁节段的依次匹配。匹配过程中，需要先控制相邻节段端口的错边量，纵桥向、横桥向的错边都需要控制在板厚允许偏差范围内，再对接口间隙进行测量调整，确保间隙均匀符合焊接工艺要求。

完成整段线形拼接后，需要对全段梁的总长度、每一个节段的里程坐标、梁顶面高程以及中轴线偏位进行全面检测，所有偏差都需要满足规范要求后，才能在接口位置加工匹配定位器，标记匹配控制线，确保现场安装时能够完全还原工厂预拼装的匹配状态，保障成桥线形符合设计要求。

（四）钢管拱肋半拱或全长立体预拼装的坐标控制与合龙口预留

钢管拱肋一般分为多个节段在工厂制造，需要通过立体预拼装验证整体线形和接口匹配精度，由于拱肋的线形多为曲线或空间异形，平面预拼装无法准确反

映实际安装状态，因此必须采用立体胎架完成整体预拼，预拼过程中需以设计给定的三维坐标作为核心控制依据，对每个节段的控制点进行逐点检测调校。

预拼装时需先完成立体胎架的基准验收，确认胎架上各个支撑点位的三维坐标偏差控制在允许范围内后，再按照从拱脚到拱顶的顺序依次吊装各拱肋节段进行匹配，每拼接完一个节段，就需要对该节段所有设计控制点的 X、Y、Z 坐标进行实测，与设计坐标比对后调整支撑高程与水平位置，确保单个控制点的坐标偏差不超过规范要求，完成整段半拱或全长拱肋拼接后，再对整体线形进行全拱复核，确认线形累积偏差符合设计要求。

合龙口预留精度是钢管拱肋预拼装的核心控制要点，需要根据现场安装的环境温度、吊装合龙的应力状态以及设计预拱度要求，提前预留合理的合龙口间隙与偏差余量，预拼装时需模拟现场合龙的实际姿态，记录当前温度下合龙口的实际尺寸与坐标，将预留量调整至设计要求的范围后，再在接口位置加工匹配定位件、标记匹配控制线，保障现场吊装合龙能够顺利完成。

三、预拼装线形与端面机加工

预拼装线形控制是钢桥制造的灵魂，而端面机加工则是实现这一线形的精密手术。在大跨度结构中，微小的角度偏差在延伸数百米后都会演变成巨大的几何错位。通过高精度的测量网与数控加工设备的深度融合，可以在工厂环境下对构件进行毫米级的精修，保障工程的最终成桥状态能够完美契合设计蓝图。

（一）预拼装测量控制网的建立与温差消除措施

建立独立且闭合的高精度测量控制网是所有预拼装工作的先决条件。该网络需采用全站仪与精密水准仪构建，实现三维坐标系的统一。控制网的测点应布设在视野开阔、受震动影响小的加固立柱上，并定期与厂区的一级基准点进行联测。测量精度要求在 50 米范围内误差不超过 0.5 毫米，这对于仪器的维护与观测者的操作规范提出了极高要求。

温差是测量中最难以捉摸的干扰因子。钢材具有显著的线膨胀特性，几摄氏度的温差就会导致数米的构件产生毫米级的长度波动。消除温差的主要措施是执行“等温观测”。所有的核心几何数据均应安排在日出前或气温最为稳定的夜间时段采集。如果必须在日间作业，则必须利用多点分布的温度计获取构件体温，通过严谨的公式将所有测量值换算至的标准环境温度。

除了环境温差，阳光直射导致的局部温差更具破坏性，它会使构件产生不可预测的翘曲。为此，工艺规程要求在测量前至少进行四小时以上的静置均衡。对于特大型节段，甚至需要利用喷淋降温或隔热层覆盖等手段来人为创造均温环境。只有在消除了这些动态变量后，测量网反馈的数据才能真实反映构件在自由状态下的真实形态。

（二）钢塔节段端面机加工的等温控制与接触率检验（0.04mm 塞尺）

钢塔作为受压为主的垂直结构，其节段间的端面承压质量直接关系到结构的竖向稳定性。采用大型落地铣床进行端面机加工是目前的标准做法。在切削过程中，刀尖产生的热量会瞬间传递至构件边缘，导致局部膨胀。为了实现等温控制，必须采用大流量、恒温的冷却润滑液循环系统，确保切削区的温升控制在极小范围内，防止加工完成后因降温导致的端面收缩不平整。

接触率检验是衡量机加工水平的终极标准。在预拼装平台上，两节钢塔通过千斤顶组拼在一起后，检验人员需使用厚度仅为 0.04 毫米的极薄塞尺对端面缝隙进行全范围扫描。规范要求塞尺在端面的任何位置均无法插入，且在规定的承压区内，实际密贴的接触面积比例必须达到 75% 以上。这种对间隙的零容忍，是为了保证结构在承受巨大的轴向压力时，应力能通过端面均匀传递，避免产生应力集中引发局部塑性区。

对于未能达到接触率要求的节段，绝对不允许通过垫塞薄钢片的方式补救。必须查明是加工轨道偏斜还是预拼装胎架失稳，并视情况重新进行铣削加工。这种极致的精度追求，虽然增加了制造过程中的时间成本，但却为钢塔在现场的垂直度控制提供了最强有力的技术保障，是保障工程结构安全的核心屏障。

（三）各结构预拼装尺寸（如钢箱梁竖曲线、钢塔垂直度）控制

对于钢箱梁而言，预拼装的控制重点在于竖曲线的顺接与预拱度的精确分配。每一组连接面的接口角度都需要根据设计提供的曲线坐标进行微算，确保成桥后在自重与活载作用下能呈现完美的流线形。测量人员需重点复核支座安装面的平整度与相对高差，全桥累计的竖向线形偏差应严格控制在设计值的以内。这种对竖曲线的动态把控，是确保桥面铺装层厚度均匀、行车舒适的关键。

钢塔的垂直度控制则是预拼装中的另一大挑战。在多节段连续预拼过程中，必须通过高精度激光铅垂仪对塔柱中心线进行实时追踪。通常要求相邻两节段的中心偏差不得超过 2 毫米，全塔在工厂预拼状态下的垂直度累积偏差应限制在万

分之一高度内。同时，还需对塔内横隔板的对位情况、索导管的空间角度进行三维坐标复核，确保斜拉索或悬索吊杆能够精准穿入并顺利锚固。

所有预拼装阶段获取的数据，最终都要录入数字化三维模型中进行模拟分析。通过将实测坐标与设计理论坐标进行对比，可以计算出后续节段需要进行的补偿调节量。这种基于数据反馈的闭环工艺，使得预拼装不再是简单的物理堆砌，而是一场基于精密算法的模拟演习。每一份详尽的预拼装记录，都是构件在工厂质量生命周期的最后一份体检报告，保障桥梁工程能够以最完美的姿态在江河之上跨越，实现百年工程的宏伟愿景。

第五章 钢结构桥梁涂装防护技术

本章主要探讨钢结构桥梁在复杂环境下的涂装防护工艺，重点分析从基面处理到涂装施工的全过程质量监控手段。通过科学的工艺路径与严苛的标准执行，确保桥梁主体结构具备优异的抗腐蚀性能与服役寿命。

第一节 表面处理工艺与标准

表面处理作为涂装工程的基石，直接决定了涂膜与基材的附着力。本节将详细阐述二次除锈的精细化要求、喷射除锈的质量判别标准以及针对特殊材质基面的处理技术规范，为后续涂层体系的构建奠定坚实基础。

一、二次除锈与表面清理

在钢构件完成车间底漆喷涂并历经运输、组装与焊接工艺后，其表面往往存在损伤与污染。二次除锈旨在针对性地修复这些缺陷，通过物理或化学手段恢复金属表面的活性，使其达到规定的涂装作业前提条件。

（一）焊缝区域飞溅、熔渣的彻底清除方法

钢结构桥梁在焊接作业完成后，焊缝及其两侧热影响区通常会残留大量颗粒状金属飞溅物和质地坚硬的药皮熔渣，这些杂质会严重破坏涂层体系的完整性。施工人员应当使用高强度电动角磨机搭配特制硬质合金旋转锉，对焊道边缘及周边区域的飞溅颗粒逐一进行机械切削，打磨至与母材表面平齐。

针对顽固的熔渣，需要用气动敲渣锤进行高频震荡剥离，直到完全露出银灰色的金属基体。作业过程中一定要精准控制打磨力度，严禁过度磨削削减母材厚度。清理后的焊缝区域应当平滑圆润，表面不能残留咬边、尖锐突起或者肉眼可见的焊烟残留。这不仅能为后续底漆喷涂提供均匀连续的物理界面，还能有效消除应力集中隐患。完成机械清理后，必须用经过过滤除油的高压压缩空气彻底吹净作业区域的细微粉尘。这套精细化清理流程是防腐涂装工程中不可跳过的基础

工序，直接关系到桥梁结构服役后的抗腐蚀能力和结构安全性。同时，清理后的表面要保持干燥，避免二次污染引发涂层质量缺陷。

（二）油污的低压喷洗或溶剂擦拭标准

在涂装施工的准备阶段，彻底清除钢材表面的油脂和工业润滑剂污染至关重要，哪怕是极薄的油膜都会形成剥离界面，导致涂层大面积脱落。针对大面积轻度污染的构件，应采用低压喷洗法处理，一般选用添加了高效表面活性剂的弱碱性清洗液。喷洗过程中要保证液压稳定在规定范围，依靠流体冲刷和化学乳化作用将油脂乳化后带离金属表面。

针对局部区域的顽固重油污，则必须按照标准作业流程用溶剂擦拭，选用挥发性适中、不会残留杂质的专用有机溶剂。擦拭时要坚持单向操作，频繁更换干净的棉纱或抹布，避免油脂在表面二次扩散。清洗完成后的基面要让水分充分挥发，再通过水膜连续性实验检验清理效果。只有当洁净自来水在金属表面形成均匀连续水膜、不收缩成水珠时，才能判定表面洁净度符合涂装要求。施工环境的空气湿度和交叉污染源也要严格管控，防止溶剂挥发过程中表面再次被悬浮油雾污染。通过这种多维度的净化处理，能从物理化学层面保证涂料树脂分子和钢材原子之间形成足够强的分子间作用力，提升结构耐久性。

（三）涂层破损处及返修焊缝的局部打磨等级

钢桥构件在转运或现场拼装过程中，难免会出现涂层划伤，或是因结构返修新增焊缝。这类局部区域的表面处理需要遵循更严格的打磨等级标准，一般要求达到动力工具除锈的最高等级。打磨作业要从涂层边缘向内侧推进，彻底剔除受损和松动的旧漆膜，还要让周边完好的涂层边缘形成平缓坡度，这种羽状边处理能帮助新旧涂层实现平滑过渡和紧密咬合。

返修焊缝及热损伤区则需要彻底清除所有氧化皮和变色层，露出纯净的金属光泽。为了增强局部修补漆的机械附着力，打磨后表面要保留一定的微观粗糙度，不能打磨成镜面效果。施工现场要配备手持式气动打磨机和不同目数的磨盘，根据基材受损程度选择合适的打磨方案。打磨完成后，必须对作业区进行真空吸尘或溶剂清洁，确保没有残留研磨产生的金属粉末。局部处理的范围要超出受损边缘一定距离，形成足够的重叠保护区。这种局部强化处理是保障桥梁整体涂装连续性的关键，能有效阻止腐蚀介质从受损点向周边完好涂层下方横向渗透。通过标准化工艺执行，可以保证修补区域的防腐寿命和主体构件保持一致，减少后期养护频率。

二、喷射除锈质量控制

喷射除锈是实现大面积钢材表面净化的核心手段，其质量受磨料性能、设备压力、环境湿度等多种因素共同影响。这个环节必须建立量化监控体系，保证除锈后的金属表面达到理想的纹理深度和洁净程度。

（一）磨料种类、粒径与含水率的选择

磨料选择需要同时兼顾除锈效率和表面质量，其性能主要受三个核心参数影响，具体如下：第一，种类方面优先选用棱角状钢砂和球状钢丸的混合磨料，这种组合既可以依靠钢砂的切削力去除厚重氧化皮，又能通过钢丸的冲击力提升清理速度。第二，粒径配比要根据目标粗糙度精准调整，通常控制在之间，保证形成的波峰波谷分布均匀。

第三，含水率是必须严格管控的关键指标，储存和作业过程中的磨料必须保持干燥，含水率超标不仅会导致磨料结块堵塞喷嘴，更严重的是会在喷射过程中将水分带到钢材表面，引发即时氧化。施工单位要在作业前对磨料抽样检测，通过氯化物含量实验确认不会对基材造成化学污染。回收循环使用的磨料必须经过高效除尘和分选处理，剔除破碎粉末和杂质。从耗材源头严格把控，是保证大面积喷射除锈质量稳定的第一道技术关卡。只有磨料状态受控，才能在预期作业周期内达到理想的表面清理效果，为后续涂装提供均匀的基底环境。高品质磨料不仅能提升作业效率，还能减少喷砂设备的磨损，降低综合成本，让桥梁防腐工程从一开始就具备高水平的工艺质量保障。

（二）表面清洁度等级的目视比对评定

喷射处理后的钢材表面清洁度是评价除锈效果的核心标准，必须参照国际通用规范进行严格的目视评定。在充足的自然光或者等效人工照明条件下，检测人员要将处理后的钢面和标准照片样本逐一比对，重点观察表面残余氧化皮、铁锈和旧涂层的清除程度。通常桥梁主体结构要求达到很高的洁净度等级，即表面呈现均匀一致的金属色泽，不存在任何肉眼可见的油脂、污垢和残留氧化皮。

评定过程中要特别留意复杂结构件的死角、加劲肋边缘和孔穴内部，这些位置往往是喷射盲区，容易出现除锈不彻底的问题。如果发现局部区域未达到规定等级，必须立即补喷，直到合格为止。为了减少主观判定误差，建议由多名具备资质的质检员共同判定。评定工作要在喷射结束后立即开展，因为裸露的活性金

属表面很容易在潮湿空气中发生闪锈。如果因天气或其他原因导致作业间隔过长，涂底漆前必须重新确认清洁度。通过这种直观标准化的比对方法，可以为涂层的长期服役提供纯净的附着界面，排除界面残留物引发早期电化学腐蚀的风险。这是保障钢结构桥梁涂装质量最直接的监控环节，任何细微的评定疏忽都可能留下隐患，导致后期涂层体系服役过程中过早出现起泡、剥落等严重质量问题。

（三）表面粗糙度（ R_a ）对比样块的检测与调控

表面粗糙度指的是喷射除锈后形成的微观峰谷深度，对增加涂层和基材的机械互锁面积有着不可替代的作用。检测时需要使用专业的表面粗糙度对比样块，同时通过触觉和视觉比对校对，也可以使用针式轮廓仪进行多点采样测量。通常要求粗糙度数值范围在之间，粗糙度太低会导致附着力不足，而波峰过高则可能穿透底漆引发点蚀。

粗糙度调控主要依靠调整喷射压力、喷嘴距离和磨料流量实现，施工准备阶段要针对不同厚度的钢板提前开展工艺试验。施工过程中要每隔一段时间用样块校准，避免环境因素波动导致粗糙度偏离设计指标。检测点位的选择要有代表性，覆盖构件的中部和边缘区域。如果测量值出现明显偏差，必须更换磨料配比或者调整空压机输出压力及时修正。粗糙度的均匀性也同样重要，要避免出现局部过平或者局部粗糙度过高的情况。通过对这个微观形貌参数的精准调控，可以显著提升涂层体系的抗剥离性能，让桥梁长期承受震动和环境交变应力时，依然能保持涂层稳固。这不仅是物理结构层面的要求，更是防腐涂装质量控制体系中的量化核心。实际操作中，质检人员必须严格记录每一批次构件的检测数据，保证粗糙度参数和底漆厚度设计相匹配，从物理结构层面构建最强的附着力支撑。

三、特殊封闭结构及复杂节点的基面处理

钢结构桥梁的箱型截面、加劲肋密集区及栓焊节点空间狭小、通风差，常规喷射除锈难以覆盖且易残留磨料。处理时优先使用小型手持动力工具精细除锈，配合低速打磨头，既要彻底清除锈蚀，又避免损伤母材。狭窄腔室可用带延长杆的气动打磨工具并加装负压吸尘，同步清理粉尘。作业后需用内窥镜检查内部除锈质量，达到清洁度要求方可进入下道工序。拼接节点的摩擦面需按规范控制粗糙度，严禁油污污染，确保栓接抗滑性能达标。

（一）钢管拱桥主弦管内壁的除锈与防腐涂装难点及通风控制

钢管拱桥的主弦管为大跨度连续封闭管状结构，管内壁空间狭长，常规大型除锈涂装设备无法进入作业，且通风条件极差，作业过程中产生的粉尘和挥发性漆雾极易积聚，不仅威胁施工人员健康，还会严重影响表面处理和涂装质量。针对此类结构，通常采用分段施工配合强制机械通风方案，在每段主弦管的两端接口分别安装进风与出风风机，形成贯穿管腔的稳定气流，将作业产生的污染物实时排出管外。通风量需根据管腔截面积和作业人数计算确定，保证管内换气次数满足安全作业标准，同时控制气流速度避免风速过大影响涂料成膜质量。除锈作业多采用带延伸杆的环保型离心抛丸设备，或小型湿式喷砂装置，既能够有效清除管内壁的轧制氧化皮与锈蚀，又能控制粉尘扩散。涂装施工时采用加长杆适配的无气喷涂喷嘴，由操作人员在管端控制喷嘴移动，保证涂层均匀覆盖整个内壁基面，作业过程中需持续通风，直至涂层完全固化，避免溶剂蒸气残留引发安全风险和质量缺陷。

（二）钢桁梁箱型杆件内部与悬索桥锚箱隐蔽区的表面清理保障

钢桁梁箱型杆件是桥梁主要受力构件，其内部腔室在构件加工、转运过程中会积聚氧化皮碎屑、焊渣粉尘和雨水残留，长期密封环境下还易提前产生锈蚀，悬索桥锚箱则存在大量加劲板交叉形成的密闭死角，锚垫板与箱体连接的缝隙更是难以触及，这些隐蔽区域若清理不到位，涂装后腐蚀会在封闭空间内快速发展，直接威胁主结构受力安全。针对这类隐蔽区域，施工前需预先在构件合适位置开设操作孔与通风孔，满足人员工具进入和空气流通需求，作业时先采用高压空气从孔位反向吹扫，将积聚的松散杂物吹出腔室，再由作业人员通过操作孔进入，使用小型带吸尘装置的动力工具对锚箱拼接缝隙、箱隅角等部位逐一除锈清理。对于人员无法进入的小型密闭腔室，可采用可弯曲导向的气动打磨头配合内窥镜作业，由外部操作人员通过内窥镜观察内部情况，精准控制打磨头完成锈蚀清除。全部清理完成后，再次通过内窥镜逐区域检查确认清洁度与粗糙度，验收合格后尽快完成涂装作业，封闭操作孔时也要对开孔周边做好补涂处理，保证整个隐蔽区域涂层的完整性，从根源上避免封闭空间内腐蚀隐患的积累。

第二节 防腐涂层体系与施工

钢桥防腐涂层是抵御环境侵蚀的关键屏障，施工中需通过标准化工艺与严密监控，确保每道工序符合设计要求，才能有效延长结构服役寿命。防腐涂层体系的构建不只是简单的物理覆盖，更是通过化学键合与屏障效应结合，为大跨度钢结构提供全生命周期的安全防护，这一过程涉及材料、工艺及环境响应等多维度评估，是保障工程质量一致性的核心前置条件。

一、涂装工艺评定体系

开展大规模涂装施工前，必须先建立完善的工艺评定体系，核心是通过模拟试板涂装，验证涂料配套性与设备适用性，为现场大面积施工提供科学的工艺指导参数。技术团队需要采集全过程的施工数据，确保所有参数都能满足设计年限内的防腐性能要求。

（一）涂装工艺评定（附录 J）的试板制作与阶梯喷涂

工艺评定试板制作需要严格遵循规范要求，选取和主体结构同材质的钢板，喷砂除锈至规定的洁净度。操作人员需要采用阶梯喷涂法施工，在试板平面上呈现底漆、中间漆及面漆的逐层覆盖状态，让各层涂膜形成清晰的厚度梯度，方便检测人员观察层间结合状态与外观质量。这套评估体系既能反映施工团队的作业执行力，也能在工程初期提前排除材料与环境不匹配的潜在风险，施工方案中还需要制定应急预案，针对可能出现的极端温湿度工况提前预备补救措施。

阶梯喷涂需要精准控制喷枪的移动速度与喷涂重叠面积，每道涂层完成后，要按预设宽度留出前道涂层的裸露区域，最终形成梯田状的分层分布。这种布局既能直观展现界面的衔接效果，也能为厚度测量提供便利。施工单位需要对干漆膜厚度进行多点测量，确保测量结果符合设计偏差要求，为后续工艺优化提供数据支撑。试板的固化环境也需要模拟现场实际条件，固化完成后，技术团队要对试板开展理化性能测试，包括检查涂层的平整度、均匀性，以及是否存在流挂、针孔等缺陷。通过对施工参数的记录与分析，可以确定最佳的涂料稀释比、喷涂压力及喷嘴口径，从而在正式施工中最大程度降低人为操作误差带来的质量隐患。

（二）环境温湿度、露点温度的监测仪器配置

涂装作业对现场气象条件高度敏感，施工现场必须配置高精度数字式温湿度

监测仪与手持式露点测量设备，环境监控的核心指标如表 5-1 所示：

表 5-1 涂装环境监控核心指标要求表

监控项目	要求范围	控制目的
环境温度	5~35℃	保障漆膜化学反应正常进行
相对湿度	≤ 85%	防止水汽凝结在未固化漆膜表面引发质量病害
露点差值	钢材表面温度至少高于露点温度 3℃	避免钢材表面出现不可见结露

这些参数如果偏离要求范围，会直接影响漆膜固化过程或溶剂挥发速度，甚至导致涂层出现起泡、开裂等缺陷。高精度传感器可以将捕捉到的微观环境数据无线传输至后台控制中心，这套全天候监控机制，让质量管理从被动的事后检测转变成了主动的过程控制。

现场还应配备集成式环境气象站，能够自动计算并预警温差变化带来的结露风险，一旦环境指标超出允许范围，必须立即停止作业，采取抽湿或升温措施，待参数恢复正常后才能重新开工，以此保障涂层的附着性能。监测仪器需要定期送往具备资质的计量机构进行校准，确保读数准确有效。在长达数公里的桥位施工线上，应当布置多个监测点，捕捉不同位置产生的微气候变化。数字化仪器的引入，让施工质量管控从经验判断转向了数据驱动，切实提升了施工环境的可控水平。

（三）涂装体系附着力（拉开法）的批次抽检要求

附着力是衡量涂层防护有效性的核心指标，需要采用拉开法进行定量检测，通过施加垂直拉力测得涂层与基材、涂层间的粘结强度。施工单位需要按照分段、分块的原则制定抽检计划，对于主要受力构件，抽检覆盖率要满足高标准要求，确保每一处关键节点的涂膜都具备足够的粘附强度，防止后期脱落。拉拔头的粘结质量直接影响测试结果准确性，操作时需要保证涂层表面干燥无尘，这种定量物理检测手段，也为后续养护周期确定以及防腐质保协议签署提供了有效依据。

抽检需要在涂层完全固化后进行，技术人员将铝质拉力头配合胶粘剂固定在测试涂层表面，养护完成后使用液压拉拔仪开展测试。针对不同涂装体系，合格标准通常在。如果剥离强度低于设计要求，需要对该批次构件进行加倍抽检，逐一分析失效原因。执行检测任务时，需要对测试点进行随机化布置，覆盖平面、立面以及容易产生缺陷的特殊位置。试验完成后需要分析断裂面形态，辨别是层

间粘结失效还是涂层内聚失效。通过对不同生产周期、不同气象条件下施工的构件进行分类抽检，可以及时识别系统性风险，如果发现数据出现异常波动，要及时追溯原材料批次与施工记录，纠正工艺偏差，确保防腐作业始终处于受控状态。

二、涂层施工方法与间隔控制

科学施工与合理的工序间隔是形成高质量漆膜的关键，需要根据构件形态与涂料特性合理组合喷涂技术，并严格执行复涂间隔要求，确保涂层系统形成致密的防护整体，发挥最佳的化学抗性。这不仅关系到桥梁外观的美学效果，更是保障防腐涂层在复杂交变载荷下不产生疲劳开裂的根本保证，在多道涂装工艺中，每一层的衔接状态都直接决定了整个涂层系统的耐久性能上限。

（一）大面积高压无气喷涂与边角预涂刷的结合

平整的大面积区域优先选用高压无气喷涂技术，该方法利用液压泵将涂料加压，通过喷嘴极速喷出后形成雾化流，不仅施工效率高，而且没有压缩空气混入，可以避免水分或油分污染涂料，形成的漆膜致密性好，涂料损耗率低，在大跨度钢梁及主塔等主体结构施工中具备显著的技术优势。边角部位做预涂刷加厚处理，能够有效抵御雨水冲刷及应力集中引发的局部腐蚀萌生，这种喷刷结合的施工模式，可以形成全方位、无死角的防腐屏障。

对于构件边缘、棱角、螺栓连接区及焊缝两侧，必须提前做好边角预涂刷环节，在大面积喷涂前，作业人员要用长毛刷或滚筒做手工预涂。由于喷涂工艺在几何突变位置容易出现涂膜变薄的问题，手工预涂可以确保这些关键部位的漆膜厚度达标，完美解决了结构复杂性带来的防护盲区问题，提升了防腐覆盖的全面性。预涂刷选用的涂料需要和喷涂涂料完全一致，还要控制好涂刷力度，避免留下明显刷痕，对于难以触及的狭窄缝隙，要使用弯头刷反复填充涂料。施工现场需要对预涂刷质量做专项验收，验收合格后才能开展大面积喷涂，这种精细化操作不仅增强了漆膜的附着性能，更从宏观上保障了整个防腐体系的完整性。

（二）底漆、中间漆、面漆的复涂最长与最短间隔控制

复涂间隔控制是保障层间附着力的核心，设置最短间隔是为了确保前道涂层的溶剂充分挥发、完成初凝，能够承受后续涂层喷涂的冲击而不发生咬底问题，如果间隔不足、过早覆盖，会导致底层溶剂被包裹，最终引发漆膜空鼓甚至脱落。设置最长间隔限制则是为了防止漆膜过度固化，导致表面过滑或粉化，使得后续

涂层难以附着，影响整个涂层系统的结合强度。严格控制时间节点是防腐涂装的关键，任何跨越规定时限的施工行为，都必须经过技术负责人签字核准，并做必要的表面活化处理，才能保障层间结合质量，延长涂层整体的使用年限。

如果底漆暴露时间超过最长间隔，必须采用砂纸打磨或涂刷界面剂做活化处理。施工单位需要根据气温变化动态调整施工时刻表，记录每一个构件每一层涂膜的喷涂时间，确保工序都在最佳时间窗口内完成。这种时间维度的精密管理，能让涂层分子间形成牢固的化学结合，对于长期承受风雨侵蚀的桥梁构件来说，有着不可替代的工程价值。遇到极端天气时，复涂间隔需要经过工艺评定重新确认，尤其在高温环境下，漆膜表面干固速度快，很容易出现假干现象，此时必须延长最短复涂时间；反之，低温条件下涂料化学反应速率降低，更需要严格监控间隔时间。通过和实时环境数据对标，施工团队可以精准锁定复涂的最佳时机，最终构建出具备优异层间结合力的复合涂层体系。

（三）摩擦面专用涂料的喷涂设备与防沉淀搅拌要求

钢桥摩擦面通常涂刷特种无机富锌涂料，这类涂料的锌粉含量高、密度大，施工过程中极易产生沉淀。施工时必须配备带有持续强制搅拌功能的喷涂设备，搅拌器要保持恒定转速，确保涂料桶内的涂料浓度均匀一致，避免锌粉堆积造成喷嘴堵塞，或是锌含量不足引发抗滑移系数下降，这种设备配置是摩擦面施工质量合格的基础。设备系统的稳定性决定了涂层质量的均匀度，通过建立摩擦面施工专项台账，可以精准追溯每一组连接副的防腐施工背景，提升了结构节点的可靠性评级与工程安全保障水平。

喷涂过程中需要实时监控涂料流动状态，无机富锌涂料的雾化效果直接关系到摩擦面的受力性能，施工人员要根据涂料粘度波动调整搅拌速度，并定期清理输料管路。喷涂摩擦面时严禁过量稀释涂料，避免破坏涂层的摩擦咬合力，通过精密设备控制与精细流程管理，可以保障高强螺栓连接区域的力学传递安全，满足结构承载要求。摩擦面的喷涂厚度需要严格控制在设计范围内，过厚会导致连接失效，过薄则无法提供足够的防腐保护，施工前后需要使用磁性测厚仪进行高频检测。搅拌系统的可靠性直接决定了施工的连续性，一旦发生搅拌停机，要立即停止喷涂，重新循环搅拌均匀后才能恢复作业，确保喷出的每一滴漆液都含有符合标准比例的活性锌粉。

三、大跨桥梁与钢管拱的特殊涂装规定

大跨桥梁所处环境往往存在更强的腐蚀荷载，尤其是跨江、跨海桥梁，长期受到高盐雾、高湿度环境侵蚀，同时钢管拱的相贯线、法兰连接等部位结构形式特殊，容易形成腐蚀滞留区域，必须制定针对性的涂装技术规定，才能保障全结构的防腐可靠性。

（一）大跨悬索桥 / 斜拉桥海洋环境重防腐涂层体系的高压无气厚膜喷涂

海洋环境下盐雾含量高，氯离子渗透能力强，对防腐涂层的致密性与厚度都有更高要求，必须采用高压无气厚膜喷涂工艺施工，单次喷涂即可形成满足设计要求的干膜厚度，减少施工道次的同时，避免多层施工产生的层间缺陷，更能抵御氯离子的侵入破坏。正式喷涂前要对基材表面再次做清洁处理，清除表面附着的盐粒、灰尘与水汽，确保涂料能够直接牢固附着在洁净钢材表面。施工过程中要严格控制喷枪与构件表面的距离，保持匀速走枪，保证湿膜厚度均匀，避免局部厚度不足或是流挂问题。

厚膜涂层对喷涂压力的稳定性要求更高，需要选用大流量高压无气喷涂设备，提前根据涂料粘度调整好输出压力，确保涂料雾化充分，避免涂层出现针孔等孔隙缺陷。每一道喷涂完成后，都要及时检测湿膜厚度，换算干膜厚度判断是否符合设计要求，一旦发现厚度不足，立即在涂层初凝前补喷到位。同一施工段要按照从上到下、从内到外的顺序作业，避免已喷涂好的涂层被新喷涂的漆雾污染，保障涂层外观与内在质量同时达标。对于主缆、索鞍等核心受力部件，要严格按照分区域逐段喷涂的方式作业，保证涂层连续无断点，完整覆盖整个构件表面，从根本上提升海洋重腐蚀环境下涂层的整体防护寿命。施工完成后要按规范要求批量检测涂层厚度与附着力，所有指标验收合格后方可进入下一道工序。

（二）钢管拱桥相贯线节点、法兰连接处的涂层防剥落与密封注胶工艺

钢管拱桥的相贯线节点属于曲面交汇结构，焊缝多、形状不规则，喷涂作业时很容易出现涂层厚薄不均，且该部位长期承受结构交变应力，容易在涂层界面产生疲劳裂纹，引发涂层开裂剥落，必须做针对性的防剥落处理。正式涂装前，需要对相贯线的焊缝余高进行打磨处理，将尖锐棱角打磨成圆弧过渡，减少应力集中对涂层的撕扯破坏，同时也要清除节点部位的焊渣、油污与积水，保证基材表面洁净干燥，提升涂层的附着基础。

针对相贯线的缝隙凹陷位置，喷涂前需要先用弹性腻子进行嵌缝找平，避免形成涂装死角，腻子要选用和涂装体系相容的防锈品种，防止后期出现脱落或锈蚀渗透。喷涂作业时，要先用小型喷枪对相贯线缝隙做预喷涂，保证涂料充分填满结构间隙，再进行整体涂装，确保该部位的干膜厚度满足设计要求。

法兰连接处属于可拆装的连接结构，对接缝隙容易积存雨水与腐蚀介质，且结构受力时会产生微小错动，容易导致界面涂层挤碎剥落，涂装完成后需要对法兰外侧缝隙做密封注胶处理。注胶前要先清理缝隙周边的涂层浮渣与杂质，注入的密封胶需要选用耐候性、附着力优异的中性防腐密封胶，注胶过程要保证胶料填满整个缝隙，表面刮平修整，避免留下空隙引发腐蚀介质侵入，注胶完成后要做好成品保护，待密封胶完全固化后才能进行后续作业，通过涂装加密封的双重防护，有效提升这类特殊节点的防腐耐久性能。

第三节 防火涂料与施工工艺

钢结构桥梁的耐火性能在很大程度上取决于涂层的质量。通过科学比选涂料与优化工艺，能显著提升结构的抗火灾能力。下文将从选型、技术、养护三方面展开论述。

一、钢结构防火涂料的类型选用

正确选择防火涂料类型是确保桥梁安全的前提。不同环境与结构对防火时长、耐候性有差异化需求。施工单位需根据设计规范，结合成本与性能，筛选出最匹配的涂装体系。

（一）膨胀型（薄型/超薄型）防火涂料的特性

膨胀型防火涂料由成碳剂、催化剂和发泡剂构成，核心原理是受热后体积剧烈膨胀：当温度达到触发点，涂层内部发生化学反应，产生大量不燃气体，最终形成致密的多孔碳化层，能有效隔绝热量传导，降低钢材升温速度。由于涂层整体较薄，对结构外观影响很小，施工时需重点把控涂层的均匀性，选择该类涂料时，还要考虑其长期服役后的膨胀性能稳定性。

该类涂料可分为薄型与超薄型两类：超薄型通常装饰效果更好，成膜后表面平整，适用于对美观要求高、且耐火时限要求在两小时以内的部位；薄型涂料则

在两小时至两小时五十分的耐火时限区间内表现更优异。鉴于桥梁长期暴露在户外环境，必须提前检测涂层的抗紫外线老化性能，避免涂层在极端紫外线照射下发生粉化失效。

涂层的附着力是衡量这类涂料质量的关键指标，施工前需对钢材表面进行精细化除锈处理。这类涂料固化速度快，能有效缩短施工工期，但多层涂敷时必须控制每层的涂刷间隔时间，如果层间水分未完全干透就涂刷下一层，很容易产生鼓泡缺陷。施工人员需实时测量湿膜厚度，通过折算确保最终干膜厚度符合设计要求。涂层受热膨胀时需要具备一定柔韧性，施工结束后还需检查涂层表面是否致密，不允许存在肉眼可见的裂纹或针孔缺陷。

（二）非膨胀型（厚型）防火涂料的隔热机理

非膨胀型防火涂料主要由耐火填料和无机黏结剂组成，它的防火机理依赖于材料本身的低热导率和高热容特性。这类涂料受热后不会发生显著的体积变化，而是依靠厚实的涂层形成物理隔热屏障。常用的填料包括膨胀蛭石、膨胀珍珠岩和矿物纤维，这些矿物成分在高温下仍能保持稳定的化学性质。

这类涂料的施工厚度通常较大，适合耐火要求在三小时以上的结构。因其成分多为无机物，火灾中不会产生有毒烟雾，这在通风条件有限的桥梁封闭空间中具有重要的安全意义。其施工方式多采用喷涂或抹涂，成型后的表面质感较为粗糙；为了增强涂层的结构强度，往往需要配合钢丝网使用，能有效防止大跨度桥梁在长期震动下涂层发生碎裂剥落。

这类涂料的优势在于极高的热阻性和优异的耐候性能，即使长期处在潮湿或盐雾环境中，无机材料也能保持稳定的隔热效能；此外它的成本相对较低，大面积应用时具备明显的经济性。施工中要注意控制浆料的稠度：浆料过稀会导致流挂，过稠则会影响喷涂的密实度；每一层的施工厚度不宜过厚，应通过多次堆叠逐步达到设计要求。浆料搅拌需均匀，不允许残留未分散的干粉团块，每批次配料应在规定时间内用完，防止浆料提前失去流动性。

（三）隧道钢结构防火涂料的特殊性能指标

隧道内的钢结构所处环境特殊，对防火涂料提出了更高要求。隧道火灾升温曲线呈现典型的烃类火灾特征，温度会在极短时间内飙升至一千摄氏度以上，因此隧道防火涂料必须具备极强的耐高温冲击能力。此外隧道内部潮湿、尾气浓度高，涂层还必须具备优异的耐水性、耐酸碱性及抗霉变性能。

不同环境适用防火涂料的核心特性对比如表 5-2 所示。

表 5-2 不同类型钢结构防火涂料核心特性对比表

涂料类型	耐火适用范围	主要优势	适用场景	核心特殊要求
膨胀型超薄型	2 小时以内	外观平整，装饰性好，固化快	美观要求高的外露桥梁钢结构	检测长期膨胀性能稳定性，抗紫外线老化
膨胀型薄型	2 小时 -2.5 小时	涂层薄，外观影响小	一般外露桥梁钢结构	控制层间间隔，确保干膜厚度达标
非膨胀型厚型	3 小时以上	热阻高，耐候好，产烟无毒，成本低	耐火要求高的桥梁承重构件	控制浆料稠度，分层施工控制厚度
隧道专用型	适配烃类火灾高温冲击	耐高温冲击，抗渗耐腐，产烟无毒	隧道内桥梁钢结构	满足抗冻融、耐酸碱、低烟无毒要求

结合表 5-2 内容可知，隧道防火涂料必须满足高温冲击抗性、环境化学稳定性和烟气安全无毒性三个核心要求，具体要求如下：

涂料在高温下不得释放有毒有害气体，这是保障人员逃生的底线指标，同时还需要具备较强的抗冻融循环能力，尤其在北方寒冷地区，涂层需要经受反复冻融而不开裂。要求涂层具备匹配基材形变的弹性模量，能适应钢结构的微小形变，而且对产烟量的控制要求非常严格：隧道空间狭长封闭，过高的产烟量会阻碍逃生视线，选用时必须核对官方出具的产烟毒性分级报告。

施工中要特别注意通风排烟设施对涂层干燥的影响，隧道防火涂料还需要具备一定的抗渗性能，能防止路面融雪盐水渗透到钢结构表面引发腐蚀，确保结构在长达几十年的设计寿命内保持稳固，一般需要通过严苛的实地挂片试验，验证其在复杂化学环境下的耐久性。由于隧道环境封闭，施工时还需要考虑涂料的环保性，严禁使用挥发性过强的溶剂型产品。

二、防火涂层施工技术

施工技术的严谨性决定了防火屏障的可靠性。在桥梁建设中，防火涂层的施工涉及界面处理、节点强化以及多层涂敷，必须建立完善的流程体系，确保每一道工序都符合技术规程。

（一）防锈底漆与防火涂料的相容性验证

底漆与防火涂料的相容性直接影响涂层的粘结强度。桥梁钢结构通常预先涂刷富锌底漆，而防火涂料的化学性质可能与底漆发生不良反应，这种反应会导致

涂层在施工后不久就出现起层或龟裂问题。为了避免此类问题，必须在正式施工前进行现场小样相容性测试，观察涂料在底漆表面是否能平滑铺开，成膜后是否存在明显的排斥现象。

针对不同类型的防火涂料，需选用生产厂家推荐的配套底漆，如果使用了不兼容的材料，界面处可能会产生化学膨胀，这种膨胀产生的内应力会显著削弱涂层的附着性能。实验中通过划格法检测涂层的附着等级，只有达到设计要求的等级，才能开展大面积施工。同时，底漆表面的清洁度也至关重要，施工单位应核查底漆的干燥状态，确保其完全固化，如果底漆中的溶剂尚未彻底挥发就涂刷防火层，残留的溶剂气体会试图透过防火层逸出，最终导致防火涂层表面出现大量针孔或空鼓。

对于已经施工较长时间的底漆，需要清理其表面的氧化层和浮灰；另外还可以借助中间漆的过渡作用，增强多层结构之间的协同粘结能力。在配套方案确定后，不得随意更改涂料的品牌和型号，必须严格执行技术交底中的材料清单。

（二）钢丝网加固与分层抹涂 / 喷涂的厚度控制

在厚型防火涂料的施工中，钢丝网的加固作用不容忽视。钢丝网通过膨胀螺栓或焊接销钉固定在钢基材表面，为涂层提供机械锚固力；在大跨度桥梁的腹板和法兰交界处，应力集中现象较为明显，增加钢丝网能有效防止涂层因结构震动产生裂纹。钢丝网的网眼尺寸和丝径必须符合规范要求，不得随意替换参数。

厚度控制是这类施工的核心环节。由于防火涂层需要分多次喷涂，单次喷涂的厚度必须严格把控：如果单次喷涂过厚，受重力作用和涂料内部应力影响，极易产生流挂和塑性收缩裂缝，通常建议每层厚度控制在五至十毫米；每层涂敷后需要留出足够的干燥时间，待涂层具备一定硬度后再开展下一道工序。测量厚度时应采用针刺法或专用测厚仪，施工现场需要配备专职质检员，对每个结构面进行随机抽检；对于厚度不足的部位应及时补喷，对于局部超厚引发开裂的区域，则需要剔除开裂部分后重新处理。

分层抹涂时，要注意相邻两层之间的接茬处理，避免在同一垂直线上形成通缝，通过这种阶梯式的厚度叠加，最终形成致密且均匀的防护屏障。施工过程中需要做好隐蔽工程验收记录，详细注明每层的喷涂时间、厚度值以及施工负责人的签字，以此作为后续质量评定的重要依据。

（三）施工环境的温湿度对干燥固化的影响

环境温湿度是决定防火涂层干燥质量的关键因素。大部分防火涂料的适宜施工温度为五至三十五摄氏度，如果环境温度过低，涂层中的溶剂挥发速度极慢，会导致固化不完全，这不仅会延长工期，还可能导致涂层力学性能下降；相反，温度过高则会使涂层表面快速硬化，阻碍内部水分排出，从而诱发内部空腔。

相对湿度对施工质量也有显著影响，通常要求环境相对湿度不高于百分之八十五；在潮湿环境下，钢材表面容易形成肉眼难以察觉的冷凝水，这种水分会严重破坏涂层与基材的结合力。施工中应实时监测环境露点，规范要求施工表面温度必须高于露点三摄氏度。

空气流通速度也会影响干燥过程，在相对封闭的箱梁内部施工时，必须加装机械通风设备，能有效降低溶剂浓度，维持正常的干燥速率。雨天或大雾天气应严禁露天作业，因为高湿度环境会显著降低涂层的抗流挂性能，同时强风会导致涂料喷涂时的损耗率增加。针对特殊季节的施工，需要制定相应的控温方案，确保涂层在最佳状态下完成交联固化。施工班组需要每日记录环境监测数据，一旦环境条件超出规范允许范围，必须立即停止作业，并对已喷涂但未干燥的部位采取必要的保护措施。

第四节 涂装质量检验与特殊防护

钢结构桥梁的防腐性能直接决定了结构的使用寿命与行车安全，涂装施工后的质量检验及特殊环境下的防护工艺构成了工程质量控制的关键环节，必须依据严苛的标准执行。

一、涂层外观与厚度检验

涂层质量的优劣主要通过宏观外观表现与微观厚度指标进行综合评定。检验工作应在涂装施工结束且漆膜完全干燥后展开，通过物理测量与视觉观察确保每一层防护漆都达到设计要求。

（一）漆膜表面流挂、起皱、针孔等缺陷的目视判定

涂膜外观质量通常在光线充足的条件下进行直接观测。施工人员及检验员应仔细检查梁体全表面是否存在流挂现象，这种缺陷多发生在立面或边缘地带，由

于漆膜过厚在重力作用下形成的下垂条纹不仅影响美观，也可能掩盖底部的干燥不均问题，为后期锈蚀留下隐患。对于起皱现象的判定，则需关注漆膜表面是否呈现出不规则的波纹状褶皱，这通常是由于内外层干燥速度不一致所导致的漆膜应力失衡，不仅影响外观还会降低涂层整体结构强度。针孔缺陷是极其隐蔽且危险的，表现为涂层上密集的细小孔洞，大多直接贯穿至底层或底材，会让腐蚀性介质直接接触钢材，容易引发严重的电化学腐蚀。在进行目视判定时，必须辅以高倍放大镜对可疑区域进行细致查验，确保涂膜表面平整、色泽均匀且无气泡、裂纹、剥落等明显缺陷。一旦发现这些缺陷，必须精准标注位置并逐一分析成因，以便后续进行针对性的修补处理，从而保证桥梁结构在恶劣服役环境下的长期耐久性。整体外观检验必须覆盖桥梁的全部可视部位，哪怕是任何微小的瑕疵，都有可能在今后演变成严重的锈蚀点，切不可掉以轻心。为此，现场检查记录应详细汇总整理，以便于后续的质量复验与追溯。

（二）干膜厚度的磁性测厚仪“85-15”规则判定

干膜厚度的测量通常采用磁性测厚仪进行，该过程必须严格遵循相关的判定准则。工程中普遍采用的是“85-15”规则，这一规则对涂层厚度的达标情况做出了清晰的量化规定。具体来说，在被测区域内，所有测量点的平均厚度必须不低于设计的公称厚度，同时至少有百分之八十五的测点达到或超过设计厚度。对于剩余百分之十五的测点，其厚度也不得低于设计厚度的百分之八十。这种判定方式平衡了施工波动与质量底线，有效防止了由于局部漆膜过薄而导致的防护失效。在实际操作中，测厚仪需要事先在标准试片上进行校准，以消除底材材质或表面粗糙度带来的测量误差。每个测量区域的选取应具有代表性，尤其是在结构复杂的节点、转角以及焊缝边缘，这些位置往往是涂装厚度最难控制的区域，必须增加测点密度。若测定结果未能满足该规则的要求，则需要进行全面补涂操作，直至重新检测合格。这种严密的逻辑判定体系为钢桥防腐提供了客观的评价依据，是保障工程长期质量的重要手段，能有效提升桥梁的安全性，确保项目符合各项技术监督指标的要求。

（三）复合涂层总厚度中封孔剂用量的扣除计算

在涉及热喷涂锌、铝及其合金的复合涂层体系中，封孔剂的使用是必不可少的。然而在计算总涂层厚度时，由于封孔剂主要渗入喷涂层的孔隙中，其对宏观厚度的贡献与常规油漆层存在明显差异。按照现行技术规范要求，复合涂层总厚

度中应当扣除封孔剂所占的折算厚度，具体的扣除计算方法通常基于封孔剂的实际用量与喷涂层表面积的比例推导得出。在施工记录中需详细记载封孔剂的消耗量，并结合其出厂标注的固含量进行厚度折算。由于封孔层极薄且主要起到填充孔隙的作用，不应将其直接计入防腐漆膜的有效干膜厚度之中。通过这种精确的扣除计算，能够更加客观地反映出具有物理防护能力的金属喷涂层与封闭层的实际效能。相关检验人员在核定最终厚度数据时，必须同步检查封孔剂的渗透深度与覆盖均匀性，确保厚度计算的科学性与准确性。这种核算方式有效避免了因盲目叠加封孔剂厚度而导致对总防护能力的误判，确保了桥梁主体结构得到真实可靠的保护，为后期维护提供精准的基础数据，同时也符合行业内对于高性能防腐涂装的严格控制标准，从根本上保障大桥结构安全。

二、涂层缺陷的修复工艺

涂层在施工或运输过程中难免出现损伤，修复工艺的规范性直接影响修补区域的结合力与长期防腐效果。必须针对不同程度的缺陷采取差异化的处理手段，使修复部位与原涂层融为一体，保证防护性能的连续性。

（一）未伤及底材的局部缺陷打磨与补涂过渡

对于未伤及底材的局部缺陷，其修复重点在于表面处理与涂层的平顺过渡。这类缺陷可能表现为局部的划伤、轻微的磨损或是外观上的流挂、凸起颗粒等。修复时应使用细砂纸或轻型磨光机对受损区域及其周边五厘米范围内的原有涂层进行轻微打磨，其目的在于去除缺陷同时增加补涂区域的表面粗糙度，提升新涂层的结合力。打磨过程中需注意控制力度，严禁磨穿底漆而触及钢材基体。打磨完毕后应使用专用清洁剂或洁净压缩空气彻底清除表面的浮灰与杂质，避免杂质残留影响结合效果。在补涂过程中，必须使用与原涂层体系相同品牌和型号的涂料，并采取稀释喷涂或细刷手工补涂的方式进行修复。为了保证视觉上的协调性，补涂后的涂层边缘应当与原涂层呈平缓的楔形过渡，避免出现明显突兀的修补边界。在某些对外观质量要求较高的桥梁工程中，可能还需要在补涂干燥后进行局部的精细抛光处理，以确保整体色泽与平整度的高度一致。这种精细化的处理能够最大限度地恢复涂层的防护性能并保持外观的完整统一。修复工作应由经验丰富的技工完成，并在完成后再次进行整体外观检查。该流程不仅增强了桥梁外观的美观度，也防止了损伤部位因外界侵蚀因素引发进一步劣化。

（二）漏涂及露底（St3 级打磨）区域的体系化修复

当涂层出现漏涂、露底或因机械碰撞严重损坏而导致基材暴露时，必须实施完整的体系化修复方案。处理这种缺陷的首要步骤是对受损部位进行机械除锈，通常要求除锈质量达到 St3 级标准。施工中需使用动力工具彻底清除钢材表面的氧化皮、锈迹及残余的松动涂料，使受损部位显露出均匀的金属光泽。除锈范围应从裸露点向四周完好涂层延伸十厘米以上，并将其边缘打磨成缓坡口状以增强新旧涂层的结合强度。修复工作必须涵盖从底漆、中间漆到面漆的全套涂层体系，严禁在受损基材上直接覆盖面漆偷工减料。各层涂料的涂装间隔应严格按照产品说明书要求执行，并确保每层漆膜的厚度均达到原始设计标准。体系化修复不仅是为了外观美观，更重要的是通过多层防护结构的重构，重新建立起针对水分、盐雾及工业大气的有效防腐屏障。修复后的区域需再次经过干膜厚度检测与附着力剥离试验，确认其结合力合格。确保每一道修复工序都符合技术规范，是延长桥梁整体寿命的关键细节。施工记录应详尽保存，以备后期质量追溯之用，保证修补效果能够经受住自然环境的长期考验，使钢材基体得到充分且严密的封闭保护，防止任何隐匿性的锈蚀发生。

（三）热浸镀锌漏镀点的富锌涂料修补标准

热浸镀锌构件在加工、运输或吊装过程中，难免会产生漏镀点或物理性损伤，应当及时采用高含锌量的富锌涂料进行修补。根据现行相关质量控制标准，修补所用的富锌漆中干膜锌粉含量应不低于百分之九十二，这样才能保证足够的电化防护能力。在涂抹前，受损区域必须彻底清除油污并打磨至露出金属本色，确保修补材料能与钢材基体形成良好的电化学反应。修补层的干燥漆膜厚度应比周围热浸镀锌层要求的最小厚度高出至少三十微米，以补偿涂料防护与熔融锌层防护在致密度上的差异，保证整体防护能力达标。涂装作业宜分多次薄涂进行，每次涂抹应均匀且无漏刷，防止厚涂导致漆膜产生气泡或开裂。在损伤面积较大的情况下，也可以采用热喷涂锌丝的方法进行修复，能获得更接近原镀锌层的防护性能。修补后的区域在外观上应尽可能与原镀锌层色泽接近，虽然随着时间推移，修补处会与原生镀锌层产生一定的色差，但在防腐性能上必须达到等同甚至更优的效果。这种针对漏镀点的规范修补，是确保热浸镀锌构件整体防腐链条不中断的必要举措。修补完成后应进行详细的位置与工艺记录，确保每一个损伤点都得到了妥善的处置，从而保障整个钢结构体系在服役期内的安全性与完整性。这也

是满足当前桥梁工程高耐久性设计要求的关键控制环节。

三、热浸镀锌、免涂装耐候钢与钢管内混凝土防护

热浸镀锌是当前钢结构桥梁中应用广泛的防腐工艺，免涂装耐候钢则凭借自身的锈层稳定特性实现长效防护，而钢管内混凝土的密实性防护直接影响构件的整体受力性能，三者的质量控制各有明确的技术要求，需要严格遵循规范执行。

（一）热浸镀锌构件的厚度分级与外观及漏镀修复（附录 K）

热浸镀锌构件的质量控制具有一套独立的评价体系。根据基材钢材厚度的不同，镀层被划分为不同的厚度等级，对应不同的服役环境要求。在进行外观检验时，应确保锌层覆盖全面，无明显的凸起滴瘤或结块锌渣。热浸镀锌构件不同部位的具体质量控制要求如表 5-3 所示。

表 5-3 热浸镀锌构件质量控制要求表

检查项目	控制要求
镀层附着力	通过落锤实验抽检，锌层不发生大面积剥离即为合格
允许修补漏镀	单个漏镀点面积不超过 1cm ² ，每件构件漏点不超过 5 个
不允许修补漏镀	单个漏镀点面积超过 1cm ² ，或漏点数量超过 5 件，构件直接判定不合格

从表 5-3 中可以清晰看出，不同漏镀情况对应不同的处理要求，必须严格按照标准执行。在桥梁的关键受力部件中，热浸镀锌不仅能提供优异的物理隔离防护，还能通过牺牲阳极的电化学作用保护切口处的裸露钢材。在工程验收阶段，除了测量镀层厚度，还需重点核查构件的变形情况，因为高温浸锌过程可能会引发薄层结构的不均匀翘曲，影响现场安装精度。这种全方位的控制是保障镀锌件在复杂环境条件下稳定服役的基础，构件在运输堆放过程中也应注意做好防护避免碰撞变形。对于符合修补条件的细小漏镀区域，应按照前文所述的标准流程进行富锌涂料补救，并严格控制补涂厚度与外观平整度。通过这一系列的精细化管理措施，能够最大限度发挥热浸镀锌工艺的长效防护优势，延长桥梁整体使用寿命，提升桥梁工程的整体质量。

（二）免涂装耐候钢初期锈层稳定化的洒水与喷剂处理（附录 L）

免涂装耐候钢在工程服役初期需要通过人工干预来促进稳定锈层的生成，这种自然防护能力是耐候钢免涂装的核心基础。这种技术手段主要是利用循环洒水与喷施特定的稳定化药剂来实现的，相关完整工艺流程详细记录在附录 L 中。在

桥梁架设完成后，通过定期的纯净水喷淋，可以加速耐候钢表面的氧化反应，使其快速形成致密、连续且具有保护作用的稳定锈层。稳定化药剂的加入能够进一步优化锈层的微观结构，抑制疏松易脱落的黄锈产生，使其向棕褐色或深紫色的稳定态锈层转变。在处理过程中，必须严格控制洒水的频率与单次水量，避免因局部积水导致腐蚀过快或产生严重的锈水流挂现象，污染下部结构与周边环境。对于梁底、箱室内侧等不易受到自然降雨冲刷的部位，人工洒水诱导尤为关键，不能遗漏这些部位的处理。这种初期锈层稳定化工艺不仅缩短了耐候钢进入稳定防护期的时间，还有效解决了施工初期锈水外流污染的问题。通过科学的人工诱导，耐候钢能够真正实现其长效免涂装的防腐优势。这种方法目前已经在国内外多个桥梁工程中得到了广泛的应用验证。技术人员需实时监控锈层的演变状态，确保每一片钢材表面都能形成均匀连续的保护锈层。该工艺不仅降低了桥梁后期的防腐维护成本，也符合现代工程建设的绿色环保发展理念。

（三）上承式钢管拱桥管内混凝土顶升前管壁防腐蚀漆雾处理与隔离剂涂刷

在上承式钢管拱桥中，管内混凝土顶升施工时，管壁内侧预先涂刷的防腐涂层易受到施工冲击与涂料溶解影响，若防腐涂层被混凝土包裹后发生脱落，不仅会削弱管壁的长期防腐能力，还可能因涂层碎屑混入混凝土影响粘结密实度。因此在顶升作业正式开始前，必须先完成管壁内侧残留防腐漆雾的清理处理，并按要求涂刷混凝土粘结隔离剂。对于管节焊接拼接后残留的游离漆雾、松散涂层碎屑，需要采用洁净的硬质毛刷配合压缩空气吹扫，将所有松散附着物彻底清理干净，确保管壁内侧无浮漆、无积尘，避免这些杂质在顶升过程中脱落聚集，形成混凝土内部空隙。清理完成后，按设计要求在管壁内侧均匀涂刷专用隔离剂，涂刷过程中要避免出现漏刷、流挂，保证隔离剂完整覆盖所有管壁区域，既防止防腐涂层受混凝土中碱性物质侵蚀，也能保障混凝土与钢管管壁之间形成符合设计要求的粘结状态。涂刷完成后需做好成品保护，防止杂物落管污染隔离剂层，待隔离剂达到指干状态后，方可进行后续的混凝土顶升作业，从工序源头保障钢管混凝土拱的结构整体性与管壁防腐耐久性。

第六章 钢结构桥梁安装施工方法

钢结构桥梁的安装施工是一项集精密测量、大型起重吊装与复杂力学控制于一体的系统工程。在实际作业流程中，施工单位必须立足于设计蓝图，深度结合桥位处的自然环境与交通运输条件，通过科学的方案选择与周密的施工准备，确保钢结构构件在复杂空间环境下能够实现高精度的就位与合龙，为提升桥梁工程的整体稳定性与耐久性奠定坚实基础。

第一节 安装方案选择与准备

安装方案的优劣直接决定了施工成本、工期以及安全管控的成败。本节将从安装方案的比选逻辑、构件出厂后的物流组织以及现场临时设施的搭建要求三个方面展开论述，通过严密的论证与标准化准备，构建起一套覆盖运输、拼装、吊装全过程的预控体系，从而有效降低施工中的不可控风险，提升现场作业效率。

一、安装方案的比选与论证

针对不同的桥型结构与施工环境，安装方案的选择必须建立在充分的实地调研与力学仿真分析之上。施工团队应通过对比多种技术路径，找到兼顾结构受力安全与现场环境约束的最优平衡点，保障施工全过程顺畅推进。

（一）桥位水文地质对支架、浮吊、顶推方案的制约

桥位处的水文地质特征是限制安装工法选择的核心因素。在水深充足且流速相对平稳的通航河道，采用大型浮吊进行节段吊装往往具备极高的效率优势，能够显著缩短水上作业时间。但浮吊方案对河床冲刷情况及水位变幅异常敏感，若河底地质存在大面积淤泥，锚碇系统的稳固性将面临巨大挑战，必须通过增加锚桩深度或改变定位方式来保障吊装作业安全。

对于水域环境狭窄或不具备航运条件的桥位，临时支架法施工会显得更为稳健。地基承载力是支架方案成败的核心前提，若现场处于软土地层，则需要进行

大规模换填或打桩加固处理，防止支架产生不均匀沉降。如果地质条件无法提供足够的支撑力，顶推方案就会成为合理备选，可利用岸侧拼装好的平台通过水平千斤顶逐步将主梁推至对岸。顶推方案虽然对河道干扰较小，但对墩台产生的水平推力较大，必须提前对永久墩台进行临时横向补强设计。

水文条件的季节性波动同样会制约方案的落地实施。在洪水季节，浮吊方案受水流冲刷力增强、船舶避险需求提升影响，作业窗口期会大幅收缩；与之配套的支架方案也需要考虑漂浮物撞击带来的结构失效风险。施工设计人员必须在枯水期与丰水期的作业条件之间寻找平衡点，确保所选方案具备足够的抗环境干扰能力。

（二）运输条件（铁路、公路、水运）对节段重量的限制

外部运输通道的几何尺寸与承载能力，直接限定了钢结构构件的分节长度与单段吊装重量。铁路运输虽然运力具备规模优势，但受限于铁路线路的限界框格与隧道断面，当构件宽度或高度超出限界要求时，必须将钢梁进一步拆分为更小的单元，这虽然降低了物流通行难度，却会导致施工现场二次拼装与焊缝连接的工作量大幅增加。

公路运输的灵活性优于铁路，但其限制主要来自沿线既有桥梁的荷载等级、路面坡度以及转弯半径。在穿越山地或老旧城区的过程中，超重、超长构件往往无法顺利通过窄路或限高地带，施工方案必须提前对运输路径进行三维模拟，针对可能无法通行的地段提前制定清障或临时加固方案，同时通过优化构件重心分布减轻对路面的局部压强。

水运在承担大体量、重型节段运输方面具备得天独厚的优势，其制约因素主要集中在航道吃水深度与靠泊起重能力。大规模的整体节段运输可以显著提升成桥后的整体受力性能，减少现场施工污染。在规划运输路径时，必须提前规避浅滩与净空不足的跨江电力线路，确保巨型驳船在不同水位下都能平稳通行。

（三）施工安全风险评估与专项应急预案编制

钢结构吊装属于高风险作业范畴，施工前必须开展详尽的安全风险评估，通过量化指标对潜在威胁进行提前预判。安全管理体系的建立需要覆盖起重机失稳、构件坠落、极端天气干扰等关键隐患的识别，在此基础上建立分级预警机制，确保施工过程中各工序始终处于受控状态。

施工安全管理在实施层面包含三个核心维度，分别是施工工序的动态危险源

辨识、关键受力部位的实时监测监控、复杂环境下的应急响应机制。通过这套体系的搭建，能够将施工初期的风险降到最低水平。不同维度的核心参数与管控要求如表 6-1 所示。

表 6-1 施工安全管理核心参数与管控要求表

管控维度	核心管控内容	控制要求
动态危险源辨识	覆盖吊装、拼接、合龙全工序	每道工序开工前完成更新辨识
关键部位监测	支架沉降、索力变化、墩顶位移	监测频率不低于每 2 小时 1 次
应急响应机制	突发情况处置层级与权责划分	分级响应，15 分钟内启动处置

从表 6-1 可以看出，施工安全管理的三个核心维度各有明确的管控要求，彼此衔接形成完整的管理闭环。在专项应急预案的编制中，必须针对各类突发事件制定具体的处置流程。比如吊装过程中遭遇瞬时强风时，应急预案应明确规定构件的临时加固与降落程序；针对起重设备可能出现的机械故障，需提前在现场配备备用动力源及紧急抢修团队。预案不能只停留在文字层面，还必须通过多次模拟演练，让现场操作人员熟练掌握自救与互救技能。

（四）悬索斜拉协作体系施工多阶段体系转换的方案推演

悬索斜拉协作体系兼具悬索桥的大跨承载特性与斜拉桥的刚度优势，但施工全过程需要经历多次受力体系转换，从初始的塔架吊装、主梁节段拼接，到后续斜拉索挂设张拉、主缆架设，再到吊索逐步受力、体系最终成型，每一个转换节点的受力状态都与成桥内力分布直接相关，必须通过系统性的方案推演提前验证可行性。推演过程需要以详细的有限元仿真模型为核心，将每一个施工步骤的荷载、边界条件按照实际工序依次代入，模拟不同阶段结构的内力、位移变化，重点关注体系转换过程中主塔偏位、主梁线形、索力分布的动态变化是否符合设计允许范围。对于多次张拉调整、吊索分级受力这类连续转换工序，需要推演不同张拉顺序对成桥状态的影响，通过对比不同张拉方案的计算结果，优选出对结构应力扰动最小、线形控制最精准的实施路径。方案推演还需要充分考虑温度、日照等环境因素的影响，模拟不同施工时段温度差对结构变形和内力的干扰，提前制定对应的调整余量，避免实际施工中出现线形偏差超出允许范围的问题。完成仿真计算后，还需要组织设计、施工、监理领域的专家对推演结果进行专项论证，确认推演得到的施工工序、控制指标满足结构安全与精度要求，最终形成可指导现场作业的明确控制流程与预警阈值，为后续现场施工提供可靠的技术依据。

二、构件出场与运输管理

钢结构构件在制造厂完成加工后，进入施工现场前的运输过程同样是质量控制的重点环节。这一阶段的核心目标，是确保构件在长途运输过程中不发生永久性几何变形，同时通过精细化防护手段保护涂装层与高强螺栓摩擦面，避免环境侵蚀对结构寿命造成负面影响。

（一）大型节段水运船舶的强度与稳性验算

利用驳船运输特大钢梁节段时，必须通过严密的计算模型对船舶的强度与稳性进行复核算。由于钢桥节段往往存在重心高、迎风面积大的特点，驳船在水面航行过程中受风浪影响极易产生横摇，在装载方案设计中，必须计算出不同吃水深度下的初稳性高度，确保船舶在极端侧向风载荷下不发生翻扣事故。

船舶甲板的局部强度同样不容忽视，钢构件通过支撑托架作用在甲板上的集中荷载，往往超过了甲板原本的承载极限。为扩散荷载，通常需要在托架下方布置重型分配梁或厚钢板，将集中力转化为均匀分布力。计算过程中需要模拟最不利装载工况，确保甲板在航行振动与静态自重共同作用下不产生屈服变形。

压载水的动态调节是维持船舶平衡的核心手段，在装卸构件的过程中，随着重心的转移，必须通过压载泵实时调整各水舱的压载水量，抵消倾斜力矩。技术人员需要制定详细的装载作业指导书，明确每一步压载水排放的顺序与数量，确保船舶在整个运输周期内始终保持平稳直立状态。

（二）公路运输中支点位置的受力验算与固定防护

公路运输过程中，支点位置的选择直接影响钢梁的结构内力分布。如果支点设置不当，钢梁在颠簸路况产生的动载荷作用下，局部腹板可能发生失稳或产生塑性压痕。工程师应根据构件的几何形状与重心位置，通过有限元分析确定最佳支承点，通常需要将支点布置在设有横隔板或加劲肋的位置。

运输车辆的悬挂系统与支撑结构之间应设置弹性缓冲层，吸收行驶过程中的振动能。对于超长、超宽的钢箱梁，必须采用多轴线液压拼接平板车，通过液压补偿系统平衡不同路面起伏带来的支反力波动。在构件与托架之间，必须使用高强锁链与手拉葫芦进行刚性连接，并辅以横向止推装置，严防转弯或紧急制动时构件发生位移。

道路环境的复杂性要求运输前开展全面踏勘，支点位置的验算不仅要考虑静

态荷载，还需要考虑运输过程中的离心力与刹车惯性力对构件产生的附加应力。通过在构件易损部位粘贴应变片开展试运输监测，可以有效验证支撑方案的科学性，从而在正式运输时采取更具针对性的固定策略。

（三）高强螺栓摩擦面与涂装层的运输防损保护

高强螺栓连接处的摩擦面是钢结构受力传递的关键部位，其粗糙度与清洁度必须得到绝对保护。运输过程中，严禁对摩擦面进行喷漆或涂抹油脂，为防止氧化生锈，通常出厂前会对摩擦面采取胶带密封或使用特制塑料封盖防护。这些保护措施必须牢固可靠，确保在风吹雨淋的环境下不脱落，且需要在安装现场拼接前由人工清理干净。

涂装层的防护直接关系到桥梁的防腐性能，在吊装挂点、支承托点以及构件边缘，必须使用橡胶垫块、泡沫塑料或护角进行隔离，避免金属之间直接碰撞擦伤漆膜。针对长途运输中可能出现的石击或刮擦，可在构件表面覆盖防护网。如果运输过程中不可避免产生了涂层划痕，必须严格按照厂家提供的修复工艺进行现场补漆，确保补漆层的厚度与附着力达到设计标准。

三、现场临时设施与预压

现场临时设施是支撑钢结构安装作业的核心骨架，其建设质量直接关系到最终的成桥精度。为消除非弹性变形的影响，所有承重设施在正式加载前都需要进行预压测试，通过模拟实际工况下的受力状态，提前验证基础的安全性与支架的稳定性。

（一）临时支架与墩旁托架的地基承载力与沉降预压

临时支架的稳定性很大程度上取决于地基的加固质量。搭建支架前，施工场地必须进行平整与硬化处理，软土地区应采用扩大基础或灌注桩基础。墩旁托架作为挂锚或支撑的关键部件，其与永久墩身的连接必须保证足够的剪切强度。为确保地基与支架的可靠性，地基处理主要包含三个核心层面的技术要求，分别是承载力校验、排水系统布置、沉降动态监测。

地基承载力需要通过载荷板试验校验，确保其数值不低于设计荷载的 1.2 倍。排水系统布置的作用是防止雨水下渗导致地基土软化，影响支撑系统的稳固性。支架搭建完成后，必须进行等载或超载预压，通常采用砂袋或水箱作为加载介质。预压过程中应分级加载，并定时观测支架各关键节点的沉降值，直到连续 48 小

时沉降速率小于规定阈值方可卸载。

沉降动态监测是预压阶段的数据保障，通过高精度水准仪记录支架的弹性变形与非弹性变形。预压结束后，技术人员会根据观测数据调整支架顶部的预拱度，以此补偿正式施工时的变形量。这种先试后用的控制手段，能够有效避免钢梁安装时因支架沉降导致的线形失控，确保成桥线形与设计要求高度契合。

（二）缆索吊装与跨缆吊机的系统标定与试吊

缆索吊装系统在山区或深谷环境下应用极为广泛，其核心在于保证主缆与起重索的受力均衡。系统投入使用前，必须对动力卷扬机、滑轮组以及塔架的承载力进行全方位标定。标定过程包括对起重索张力的静态检测与动态响应测试，确保各传动部件在满载状态下不产生异常温升或跳索现象。

跨缆吊机作为悬索桥钢梁安装的专业设备，其在主缆上的行走稳定性与吊装精度是监控的重点。试吊阶段通常选取最重节段作为模拟对象，在低高度位置反复开展升降作业，检查制动装置的灵敏度与同步吊装系统的平衡性能。通过调整吊具的重心位置，可以纠正钢梁在空中的姿态倾斜，确保节段靠近主缆吊杆时能够实现精准对接。

系统标定过程中还需要建立起重载荷与索力的对应关系库，通过在吊装点安装荷重传感器，操作人员可以实时掌握构件在空中的位置偏差。试吊不仅是对设备性能的检验，更是对指挥系统与各班组协同能力的综合考验。正式吊装首节段前，所有参与人员必须熟悉各类信号指令，确保在复杂的空中环境下作业能够有序推进。

（三）现场拼装场地的硬化与供电、供气网络布置

现场拼装场地是钢结构构件由零散节段转化为整体结构的关键场所，场地的平整度直接影响拼装精度。拼装场地必须采用钢筋混凝土进行大面积硬化，防止重型构件堆载下发生局部下沉，导致拼装胎架走形。场地内应预设精确的测量基准网，方便拼装过程中对各节点的坐标、标高进行不间断复核。

供电系统的布置应根据焊接设备、照明及动力机械的总功率进行规划，并预留足够的冗余度。为保证焊接质量，电力供应必须稳定，避免因电压波动产生焊接缺陷。供电线路应采用埋地或高空架设，严禁在作业区域地面随意敷设，以防机械车辆碾压造成漏电事故。同时，现场必须配备应急发电机组，作为电力中断时的备用保障。

供气网络在钢结构拼装中同样扮演着重要角色，主要为气动扳手、自动焊机以及喷涂设备提供动力。气路管线应采用环形布置，保证各终端气压恒定，并在支路末端设置油水分离器，确保进入设备的压缩空气干燥清洁。合理的供气布局能够显著提升高强螺栓的拧紧效率与施工质量。

施工现场还需要根据环保要求设置配套的废弃物处理设施。在焊接与喷涂区域，应布置临时遮蔽棚与通风系统，减少烟尘与挥发性有机物对周边环境的影响。场地的硬化区域需预设排水坡度与沉淀池，确保雨水与施工废水能够有效分离排放。一个规划有序、设施齐备的拼装场地，是实现钢桥高质量安装的物理基础，为后续高精度作业提供了稳定的平台支持。

第二节 支架法与悬臂拼装法

钢结构桥梁施工中，支架法与悬臂拼装法作为应用最广泛的两种核心施工技术，在现代桥梁工程建设中占据着举足轻重的地位。这两种工艺的选择与应用，直接关系到桥梁结构的受力安全、成桥线形质量以及整体工程推进节奏，需要施工单位结合桥址地形条件、桥梁跨径大小及现场吊装能力做出科学化决策，从而实现高质量的工程建设目标，为桥梁后续数十年甚至上百年的长期运营奠定坚实的基础。

一、满堂支架法施工工艺

满堂支架法因其整体承载能力强、受力传递路径清晰可靠、对不同桥型适应性广的突出特点，常被应用于城市建成区复杂环境下的中小跨度钢桥架设工程。通过科学合理的支架设计方案与精细到位的施工过程管控，可以有效保证钢梁在逐段拼装过程中的几何精度和整体受力平衡，不过这种工艺对地基稳定性及变形控制有着极高的敏感性，从开工到落架的全流程都必须实施动态监控，不能有丝毫放松。

（一）支架基础处理与标高、预拱度的精确设置

基础处理质量是满堂支架施工整体稳固性的核心根基。进场施工后，首先要对施工现场的原始地面实施深度清理，对软弱土层、杂填土等承载力不足的区域进行换填，换填过程中要分层摊铺分层夯实，待压实度检测合格后，再浇筑厚度

适宜的混凝土层进行硬化处理，确保地基承载力满足支架承受最大施工荷载的设计要求。为防止地表水下渗侵蚀基底，引发后续不均匀沉降，还要在硬化基础四周开挖导流排水沟，及时排走积水。这套提前预防地基软化的处理措施，能够显著降低整个施工周期内的不均匀沉降风险，从源头上保障架体结构的安全平稳。

支架全部搭设完毕后，应依照设计要求开展等载或超载预压试验，这一环节不仅能提前消除支撑体系自身的非弹性变形，还能为后续预拱度的计算提供真实可靠的现场弹性变形参数，比单纯依托理论计算的结果精度高很多。在设置预拱度时，技术人员需要综合研判钢梁自重、支架沉降变形及气温变化带来的线形影响等多重因素，最后通过调节支架顶托的高度完成微调，把整体标高偏差严格控制在毫米级范围内，确保成桥后的线形完全符合设计蓝图的曲线轨迹。精确的标高设定能有效防止主梁顶面出现波浪起伏的不合格线形，这对大跨度钢桥的行车平顺性至关重要，同时也能够显著改善结构的初始受力表现，确保设计意图得到精准落地。

（二）钢梁分段吊装与支架上的线形调整顺序

钢梁现场吊装应遵循从中心向两端推进或是对称对称搭设的原则，保证整个支架体系受力均匀，避免出现偏压失稳的风险。各分段钢梁构件运抵现场后，利用大吨位吊机将其平稳安放在预定的支座或支撑点上，就位过程中要控制下落速度，避免冲击荷载损伤支架或构件。线形调整过程中，通常采用纵向与横向交替微调的方法，通过这种动态纠偏手段，让每一节段的轴线都始终处于受控状态，不会出现大幅偏差。

实际操作中，调整过程通常按照固定流程推进：首先通过高精度全站仪对钢梁端部的空间坐标进行实测，计算出当前位置与设计理论坐标的偏差值；接着利用千斤顶与螺旋顶托对钢梁进行三维方向的位移补偿，确保相邻节段的焊缝间隙与对口精度符合焊接要求；最后锁死所有临时固定装置，防止后续焊接产生的热变形或是阵风荷载导致钢梁发生位移偏移。这种循序渐进的调整模式能够最大限度地减少累积误差，确保钢梁在支架上形成的整体轮廓与设计中心线完全重合，为后续的永久焊接或栓接工作创造良好的初始条件。钢梁在支架上的稳定姿态是保证整体连接质量的前提，也是实现全桥几何尺寸零偏差的重要路径。

（三）落架程序的精细化设计与支反力逐步转移

落架程序的设计是支架法施工中最具技术挑战性的环节，它的本质是完成结

构体系从外部支架支撑向主梁自身受力的平稳过渡。落架作业必须在全桥钢梁焊接完成,并且全部焊缝通过无损检测合格之后才能开展,严禁局部随意撤除支撑,防止主梁产生不可预见的集中应力,引发结构开裂等安全问题。

正式落架前,施工团队需要编制精细的落架顺序表,明确每一阶段的卸载幅度和对应的监测控制指标。落架操作通常从跨中挠度最大的位置开始,向两侧支点方向对称、缓慢、分级卸载,单次顶托下降高度不宜超过五毫米,避免应力突变。随着支架支撑高度的逐步降低,钢梁的自重荷载会逐步转移到永久支座上,这一过程伴随着主梁内部应力的重新分布,绝对不能操之过急。技术人员必须通过预先埋设的应力传感器实时监测主梁底板与翼缘的受力状态,观察支反力转移过程是否平稳,防止因落架不当引发结构瞬时过载或局部开裂。最终完成所有支架撤离后,还需要对主梁标高进行全面复测,验证其在自重状态下的实际挠度值是否与理论预测结果相符,确认成桥状态符合设计要求。

(四) 上承式钢管拱桥少支架法拼装与拱肋合龙卸架工艺

上承式钢管拱桥采用少支架法施工时,仅在拱脚、拱段拼接节点处设置临时支撑,既能减少支架材料投入,又能降低对桥下通行或原有地形的干扰,特别适用于桥下有通航、通行需求的桥位施工。拼装作业通常从两岸拱脚位置开始,向跨中方向对称推进,每吊装一段拱肋就及时与已安装段完成临时连接,依靠临时支架和已拼装拱段的自身稳定性维持结构平衡,避免单侧加载引发整体偏斜。每完成一段拼装,都需要立即对拱肋的轴线坐标、节段间相对高差进行复测调整,确保拼装精度始终符合设计要求,避免误差累积到合龙阶段难以修正。

拱肋合龙是少支架法施工的关键控制节点,通常选择在设计要求的温度范围内进行合龙作业,合龙前需要连续观测连续不少于 24 小时的拱肋线形与环境温度变化,确定最佳合龙时段与合龙间隙,再根据实测间隙加工合龙段嵌补件,保证合龙段能够精准嵌入。完成合龙段的焊接或栓接作业,且接头质量检测合格后,方可开展卸架作业,卸架同样遵循对称分级、缓慢卸载的原则,从跨中向两岸拱脚方向逐步降低临时支架的支撑高度,让拱肋的受力逐步从临时支架支撑转化为自身拱结构受力,每一级卸载后都要对拱肋的轴线和挠度进行监测,确认变形在允许范围内后,再开展下一级卸载,直至所有临时支架完全脱离拱肋,完成体系转换。

二、悬臂拼装法的吊装系统

悬臂拼装法广泛适用于跨越河流、深谷等地形复杂区域的大跨度钢桥施工，这类区域往往无法搭设落地支架，悬臂拼装工艺就成了最优选择。该工艺依托先进的吊装设备，将预制完成的钢梁节段像搭积木一样逐段向跨中延伸拼接，对吊装设备的自身稳定性和施工过程中的平衡性控制都有着严苛的标准。整个吊装体系的协同工作效率，直接决定了悬臂施工的整体成败与现场安全性能。

（一）桥面履带吊机与架梁吊机的构造与移位

桥面履带吊机与专用架梁吊机是悬臂拼装作业的核心动力源。履带吊机凭借自身转场灵活、不需要预设轨道的优势，多用于悬臂起始段及桥梁附属辅助构件的安装作业。随着悬臂拼装逐步向跨中推进，专门设计的架梁吊机会被安装在已经完成永久连接的钢梁末端，其构造主要包含行走底盘、旋转转台、起重吊臂以及液压行走机构几个部分，这种定制化的起重设备必须具备极高的自身刚度与可靠的锚固性能，才能抵御高空作业的各类荷载风险。

架梁吊机的移位是一项高风险作业，每完成一节段的拼装与永久连接后，吊机就需要解除后支点的锚固，利用自带的液压系统徐徐向前滑移至新安装的节段顶面。移位过程中必须严格控制滑移速度与两侧的同步性，确保吊机重心始终处于已拼装梁段的安全受力范围内，防止发生倾覆事故。吊机移位完成后的重新定位精度与锚固深度，直接决定了下一节段吊装时的整体倾覆稳定性，必须反复检查确认。在整个施工周期中，设备管理人员应对机械的液压油工作压力、各个连接部位螺栓的扭矩进行每日巡检，确保吊装系统在复杂多变的高空环境下始终运行稳定，杜绝任何机械故障引发的安全事故。

（二）水上浮吊在跨中合龙段的大型吊装作业

水上浮吊在跨中合龙段的吊装作业中发挥着不可替代的作用。针对跨中合龙段这一重量大、安装精度要求极高的核心构件，通常都会选用千吨级以上的大型浮吊承担吊装任务。作业开始前，需要通过精密锚泊系统对浮吊船体进行精确定位，抵消水流、潮汐及波浪对吊装平稳性的干扰，把浮吊的位移控制在极小范围内。

浮吊将合龙段钢梁从运输驳船上缓慢提升，逐步悬停到两个悬臂端部之间的设计位置。由于合龙施工的工艺要求，合龙段的加工长度通常会略大于现场合龙口的开口尺寸，施工中需要通过调节两端悬臂的纵移量或是等待合适气温改变合

龙口开口尺寸，来实现合龙段的顺畅嵌入。在合龙段入位的关键时刻，浮吊的卷扬系统需要与地面指挥系统保持同频联动，实施微米级的升降精度调整，同时利用横移导向装置将构件引导至设计轴线位置，确保合龙口的对齐偏差降到最低。这一过程不仅考验吊装设备的机械性能，更对现场的组织调度能力与精准气象预测能力提出了综合性的考验，是全桥顺利合龙最核心的核心环节。

（三）悬臂端挠度的实时监测与吊装配重平衡

悬臂端挠度的实时监测与吊装配重平衡是维持悬臂结构姿态稳定的关键控制措施。钢梁每向前延伸拼装一个节段，受重力力矩的影响，悬臂端部都会产生不同程度的下挠变形。施工单位应在梁体的关键断面布置光纤光栅传感器，实时获取结构的动态变形数据，并将监测数据输入监控计算机对计算模型进行实时修正，以此指导后续节段的拼装作业参数调整，确保全桥成桥线形不会发生累积漂移。

为了对冲吊装过程中产生的不平衡力矩，施工中常会在已经安装完成的梁段后端布置压重水箱或是预制混凝土块，通过动态调整配重荷载来修正梁端的实际高度。在吊装重量较大的节段时，配重的增减必须严格遵循提前计算好的配载曲线，防止悬臂梁根部应力超出设计允许值。施工过程中还需要关注风力对吊臂和梁体产生的侧向挠度影响，如果现场风速超过六级，就必须立即停止吊装作业，并且加强梁端临时索具的约束固定，防止发生失稳事故。通过这种实时监测与荷载补偿相结合的管控手段，可以确保悬臂拼装系统在多工况作用下始终处于受力均衡的状态，为最终的高精度合龙打下坚实的基础，也能从施工阶段保障桥梁全寿命周期的结构安全，减少后期运营阶段的维护成本。

（四）斜拉桥悬臂拼装的双索面对称同步与塔梁临时固结

斜拉桥采用悬臂拼装施工时，双索面对称作业是控制桥塔受力与悬臂变形的核心原则。由于斜拉桥的主梁自重与施工荷载主要通过斜拉索传递至桥塔，若两侧悬臂拼装进度偏差过大，会导致桥塔承受过大的不平衡水平弯矩，引发塔肢偏位，甚至超出设计允许的应力范围。因此施工过程中，必须严格控制两侧悬臂的拼装节段差，两侧每次吊装、挂索、张拉作业都要保持同步推进，单次作业的进度偏差不能超过一个节段，确保桥塔始终处于低偏位受力状态，避免产生永久性的不可恢复变形。

同步作业过程中，每一对斜拉索的张拉控制力都需要结合当前悬臂变形、塔肢偏位监测数据进行动态调整，通过索力微调修正当前线形偏差，避免误差累积

影响后续拼装精度。

桥塔与主梁的临时固结是悬臂拼装阶段维持结构整体稳定的关键保障措施。在斜拉桥悬臂施工初期,永久支座仅能承受竖向荷载,无法平衡两侧悬臂施工产生的不平衡弯矩,因此必须在塔梁结合部设置临时固结装置,将主梁与桥塔临时锚固为整体,抵御不平衡弯矩引发的梁体转动或滑移。临时固结通常采用预应力粗钢筋结合混凝土垫块的构造形式,预应力钢筋一端锚固在桥塔承台,另一端锚固在主梁0号块顶面,通过张拉预应力提供足够的抗倾覆弯矩,混凝土垫块则承担竖向不平衡剪力,保证塔梁结合位置不会发生错动。

待全桥悬臂拼装完成、跨中合龙作业结束,结构体系转换完成后,再按照对称分级的顺序逐步解除临时固结,将受力体系平稳过渡到设计的永久受力状态,整个解除过程中需要持续监测塔肢偏位与梁端位移,确保体系转换过程平稳可控,不会引发结构应力突变。

(五) 钢桁梁斜拉桥 / 悬臂拼装的杆件散拼与吊机行走步履控制

钢桁梁斜拉桥采用悬臂散拼工艺时,单个杆件重量远小于整节段钢梁,对吊装精度和吊机行走稳定性提出了更高要求。散拼作业通常从塔侧的已拼装梁段前端开始,按照先下弦杆、再斜腹杆、最后上弦杆的顺序逐件逐节点依次拼装,每完成一个节间的杆件组拼,就立刻完成节点栓接或焊接,形成稳定的三角形桁片单元,再向前推进下一个节间拼装,这种逐件拼装的方式,能充分利用桁片的自身几何特性维持拼装过程中的局部稳定性,避免单个杆件承受过大临时应力。

拼装过程中,每完成单个节点连接,都需要利用全站仪对杆件的空间坐标、节点相对偏差进行实测校核,及时调整杆件拼接间隙,避免偏差累积导致后续杆件无法顺利对位。

悬臂散拼作业的核心控制环节是吊机的步履式行走控制。步履式架梁吊机依托已拼装完成的钢桁梁顶面行走,行走过程分为前支撑锚固、后支撑滑移、后支撑锚固、前支撑滑移四个循环步骤,每一步都需要严格控制前后支点的竖向位移差与行走同步率,避免吊机整体出现倾斜倾覆风险。行走过程中,液压系统需要实时调整各个支点的支撑反力,确保吊机重心始终落在已拼装钢桁梁的受力范围内,每完成一个节间的行走,就立即重新锚固前后支点,检查吊机的水平度与锚固可靠性,确认合格后才能开展下一批次的杆件吊装作业,保障整个悬臂散拼过程的结构安全与吊装精度。

三、悬臂施工的线形与应力控制

悬臂施工过程中的线形控制与应力监测是确保桥梁成桥状态符合设计要求的核心保障。由于受到环境温度、施工荷载及材料性能波动等复杂因素的干扰，施工中必须建立闭环的监控预测体系，对每一节段的拼装精度实施精细化管理。通过严密的监测与动态反馈调整，才能实现设计意图与施工实体的完美融合，有效提升工程的整体品质。

（一）拼装节段的坐标定位与三维空间纠偏

拼装节段的坐标定位涉及到复杂的三维空间纠偏技术管控。每一个钢梁节段在出厂前，都应在工厂完成整体预拼装，并且记录各个特征点的相对坐标，作为现场安装的参照基准。现场吊装就位后，利用高精度全站仪对梁段的纵向中心线、横向位置以及顶底板标高进行全面复核，确保三维空间位置偏差被锁定在设计允许的极小容许范围之内。

针对测量发现的坐标偏差，通常采取分层修正措施：首先利用设置在节段间的千斤顶阵列，对钢梁实施水平向、竖向及扭转方向的强制位移调整；其次通过调节斜拉索或临时拉杆的索力，通过改变局部支点反力来引导梁端轨迹回正；最后对于残留的细微角度偏差，可以通过焊接缝间隙的不等宽焊缝处理进行补偿。这种三维纠偏机制形成了一个完整的动态反馈系统，通过将实测坐标与理论计算模型进行比对，不断修正后续节段的加工误差或是现场安装参数，从而将全桥的轴线偏差和高程偏差都控制在设计许可范围之内，同时保证桥梁结构的整体美观性与受力性能符合要求。

（二）温度效应对悬臂端标高的影响及避开时段

温度效应对钢结构悬臂端标高的影响具有显著的周期性与滞后性。白天阳光直射会导致钢梁顶板温度高于底板，梁体内部产生明显的温差梯度，进而引发梁体的热胀冷缩和向上或向下的挠曲变形。在大跨度悬臂施工中，这种温差引起的端部位移量可达数厘米之巨，会对施工精度构成严重干扰，如果不加以管控，很容易造成成桥线形偏差超标。

为了获取最真实、最稳定的结构几何状态数据，关键的线形测量与校准工作应当选择在清晨日出前、气温分布最为均匀的时段进行，此时梁体内部温度梯度几乎为零，应力状态也最接近理论计算模型。应当避开正午及下午等气温急剧变

化或是日照强烈的时段，防止因温度梯度预测不准导致线形误调。同时在施工全过程，需要在梁体内部安装多个点位的温度传感器，建立起温度与梁端位移的相关性数据库，通过实时采集的气象数据对测量结果进行动态修正，有效提高复杂环境影响下的施工精度。这种对自然条件的深刻理解与科学利用，是现代桥梁精密施工技术的集中体现，能够有效规避由于自然因素带来的工程误差。

（三）合龙口锁定与温度连续观测的强制合龙技术

合龙口锁定与温度连续观测的强制合龙技术是整座桥梁贯通的最后一道难关。合龙作业正式开始前，需要进行为期至少一周的连续温度位移观测，充分掌握合龙口间隙随气温变化的开闭规律，以此确定合适的合龙时间窗口。合龙锁定通常选择在当地全天温度最低且温度波动最小的时间节点进行，此时合龙口处于张开宽度最大的状态，有利于合龙构件的平顺嵌入，这种科学的时机选择是确保合龙成功的关键技术前提。

一旦合龙段顺利入位，需要立即启动临时锁定装置，利用高强螺栓与定位码板将两端悬臂快速连接成整体，防止后续温度升高导致合龙焊缝产生过大压应力或是拉裂接头。在满足锁定要求后，应当迅速组织施工力量开展大规模焊接或是螺栓紧固作业，快速将临时锁定状态转化为永久连续状态。这种强制合龙技术要求施工人员在有限的时间窗口内完成高强度的体力与技术作业，确保结构体系在最短时间内完成受力转换。焊接过程应当采取分层、对称、平衡的焊接顺序，减少局部热影响区产生的残余应力。当合龙段完全固结之后，桥梁就形成了最终的整体受力体系，再通过支座微调与辅助压重，进一步优化主梁内部的应力分布，使其达到理想的运营受力状态。整项工程在严密的线形监控下，最终实现桥梁的高精度合龙与全线贯通，充分体现了施工工艺与工程质量的高度统一，该工艺对同类大跨度钢结构桥梁的架设具有极强的借鉴意义和实践参考价值，能够有效确保复杂环境下桥梁工程的卓越施工品质。

表 6-2 两种施工方法适用场景与管控重点对比表

施工方法	适用场景	核心管控重点	风险控制点
满堂支架法	城市区域中小跨径钢桥， 桥址地基条件较好	地基沉降控制、预拱度设置、 分级落架	不均匀沉降、落架应 力突变
悬臂拼装法	跨江河深谷大跨度钢桥， 无法搭设落地支架	吊装系统稳定、线形监控、 合龙控制	吊机倾覆、悬臂失稳、 合龙误差

从表 6-2 可以看出，满堂支架法与悬臂拼装法各自有着明确的适用场景与管控要点，实际工程中需要结合项目具体条件灵活选择，通过针对性的技术管控保障施工安全与质量。

第三节 顶推法与转体施工法

在现代钢结构桥梁的架设过程中，由于工程往往需要跨越深谷、繁忙交通干线或大型通航河流，常规的吊装施工往往受到场地空间、周边交通和作业条件的严格限制，不仅作业风险高，还会对周边正常生产生活带来较长时间的干扰。顶推法与转体施工法作为两种高效且对周边环境干扰极小的先进工艺，通过精密机械驱动大体量结构按预设轨迹完成位移，不仅显著提升了施工过程的安全性，更在很大程度上缩短了整体施工周期，是当前解决复杂环境下桥梁架设难题的核心工艺手段。

一、步履式与拖拉式顶推技术

步履式与拖拉式顶推技术是长联连续钢梁施工的常用工艺选择，其核心逻辑在于将整段钢梁划分为多个节段，在岸端预制拼装平台逐段拼装完成后，利用液压系统提供的动力沿预设轨迹逐步推移就位。这种施工方法能够把原本需要在高空完成的拼装焊接作业转变为地面平台作业，极大改善了施工人员的作业环境，同时也更便于控制焊接精度，为大型钢桥的整体质量管控提供了可靠保障。表 6-3 梳理了两种顶推技术的核心特点对比，方便工程人员根据现场条件快速选择适配方案。

表 6-3 步履式与拖拉式顶推技术特点对比表

顶推类型	核心驱动方式	场地要求	适用场景	控制难度
步履式顶推	自带步进顶升移位系统	对岸端平台要求较低	中小跨径多联连续钢桥	自动化程度高，控制难度低
拖拉式顶推	外部牵引系统配合滑道移动	需要完整连续的预设滑道	大跨径长联连续钢桥	对同步性要求高，控制难度较高

结合表 6-3 内容不难看出，两种顶推技术各有优劣，实际工程中也可根据项目需求组合使用，兼顾施工效率与成本控制。

（一）顶推滑道、摩擦材料与临时墩的布置设计

顶推滑道作为承载钢梁移动的基础设施，其整体平整度与标高误差必须严格控制，控制在毫米量级，才能保证顶推过程平稳不卡滞。滑道通常由高强度预制钢梁构成，其上表面统一铺设抛光不锈钢滑板，以此形成极其光滑的接触界面，降低顶推过程的移动阻力。在这个过程中，滑道的整体水平度直接决定了顶推力的均匀分布状态，任何微小的起伏都会导致钢梁局部产生巨大的集中应力，轻则磨损摩擦材料，重则造成钢梁局部变形，影响成桥线形。

摩擦材料在顶推系统中扮演着减阻的关键角色，目前施工中应用最广泛的是涂有专用硅脂的聚四氟乙烯滑板，这种材料本身具有极低的动静态摩擦系数，同时自身承载能力强，能够适应大吨位钢梁的长期压覆。滑板的规格尺寸与表面硬度都需要结合钢梁自重、顶推总行程经过精确验算，确保在钢梁极重的自重载荷下不发生塑性变形或开裂。施工过程中也需要定期检查滑板磨损情况，及时更换磨损超标的构件，以此维持顶推过程的平稳运行。

临时墩的设计必须充分考量顶推过程中的纵向水平推力与由于钢梁偏心产生的倾覆力矩，是保障顶推过程结构安全的关键支撑结构。临时墩的布置间距需要根据主梁自身的抗弯刚度进行优化调整，通常会在大跨的跨中位置设置辅助支撑，以此减小钢梁顶推过程中的悬臂挠度，避免弯矩超出设计允许范围。墩身通常采用钢管混凝土结构或拼装式格构柱，加工速度快、承载能力强，底部则需建立牢固的锚固基础，确保在大风、偏载等各种突发工况下都能保持整体稳定性。

在施工部署中，临时墩顶部的落梁装置同样不可忽视。通过在墩顶设置可调高度的千斤顶组，施工人员可以实时修正由于不均匀沉降引起的滑道标高偏差，保障钢梁线形始终符合设计要求。这种灵活的布置方案能够适应不同跨径的连续梁顶推作业，同时也为后期的临时墩拆除作业留出了充足的操作空间，确保了结构从施工状态到成桥服役状态体系转换的安全平稳过渡。

（二）多点同步顶推液压系统的纠偏与受力均衡控制

多点同步顶推依靠分布在各个桥墩、临时墩上的液压泵站协同发力，这种布置方式有效分散了集中推力，避免了单一墩身受力过载的风险。整套控制系统通过中心计算机对各动力源统一进行指令分配，并结合布置在各个点位的位移传感器回传的实时数据实现闭环调整。这种多单元的精密协作不仅能保证全桥推进速度的一致性，更能根据各个点位的实际阻力动态调整各点的推力输出，避免局部受力过大。

在推进过程中,钢梁轴线的横向偏移是影响施工质量和结构安全的主要隐患,哪怕是几厘米的偏差不断积累,也会导致最终就位精度不达标,还会增大滑道侧向的附加应力。纠偏控制主要依赖安装在滑道侧向的导向轮和专用液压纠偏装置,系统通过传感器实时检测钢梁中心线与设计轴线的偏差,自动触发纠偏油缸进行微量调整,不需要人工介入就能维持轴线准确。关于纠偏与均衡控制的实施,主要包含三个关键环节:

1. 动力单元的同步性标定,即通过压力补偿阀确保各泵站输出流量完全对等,避免速度差引发偏航。

2. 侧向约束的刚度预设,通过物理限制与主动干预相结合的方式抑制钢梁持续偏航。

3. 关键受力部位的应变监测,在纠偏过程中实时监控腹板等位置的应力变化,避免调整过程中产生超标应力。

(三) 导梁的刚度匹配、挠度控制与拆除时机

导梁作为安装在主梁前端的先导结构,其主要功能是引导主梁平稳跨越墩顶支撑,降低主梁顶推过程的悬臂负弯矩。为了减轻悬臂段的整体荷载,导梁通常设计为自重较轻的变截面钢桁梁或薄壁箱梁。导梁的刚度必须与主梁进行合理匹配,既要具备足够的抗弯能力支撑自身重量,避免过度下挠,又要具有一定的柔性,适应墩顶的标高微小偏差调节,不会给主梁带来额外的附加弯矩。

挠度控制直接关系到主梁能否顺利上墩就位,是顶推施工中需要重点管控的环节。在导梁跨越跨度较大的区域时,端部会在自重作用下产生显著的下挠,下挠量过大就会导致导梁无法顺利接入墩顶滑道。为了克服这一现象,施工中往往采取预设上仰角的方法抵消下挠量,或是在墩顶配置专门的引导斜面方便导梁滑入。技术人员需要通过精密测量仪器实时监测导梁尖端的垂直位移,并根据反馈数据动态微调后方顶推力的角度,确保引导结构能够精准进入滑道,完成接墩作业。

随着顶推进度的推进,导梁完成其引导使命后的拆除时机选择显得尤为关键,过早拆除会导致主梁悬臂负弯矩超出设计值,过晚拆除则会影响后续落梁作业进度。只有当钢梁前端完全跨过最终墩位并完成初步锁定,主梁受力状态稳定后,方可启动拆除程序。拆除工作应当严格遵循对称、分段平衡的原则,防止因桥体质量重心突变引发主梁的颤振或失稳,保证结构受力变化平稳可控。

导梁的拆除通常采用分段切割或模块化松卸的方式,具体方案需要结合现场

吊装能力确定。在整个拆除步骤中，必须密切关注主梁内力的重新分布，必要时应在主梁末端增加临时压重平衡力矩变化。这种严密的程序化操作，确保了结构从动态施工状态向静态服役状态的平稳过渡，不会因为拆除作业给主梁留下残余应力或线形偏差。

二、大跨钢管拱桥的竖向转体与平转施工

作为大跨径钢管拱桥跨越既有交通线路时最常用的施工工艺，竖向转体与平转施工是将在岸坡滩地预先拼装完成的拱肋结构，通过转动体系整体旋转就位拼装成桥的施工方法，这种工艺将复杂的高空拱肋拼装作业转化为岸区的地面拼装作业，既保障了施工安全，又完全不干扰桥下既有交通或航道的正常运行，优势十分显著。其施工核心在于转动体系的设计制造与精准的姿态控制，需要对结构受力、转动精度和全过程风险进行层层管控，才能确保大吨位拱肋顺利精准就位。

（一）上承式钢管拱竖转铰的制造安装与液压同步提升系统

竖转铰是拱肋转动过程的核心受力节点，承担着整个拱肋转动过程的全部弯矩与竖向荷载，其加工精度与安装位置直接决定了竖转施工的成败。竖转铰通常由高强度合金钢整体锻造而成，铰座与铰轴的配合间隙需要经过精密加工控制，既要保证能够顺畅转动，又不能存在过大缝隙引发转动过程的晃动，一般配合公差需要控制在 0.1 毫米到 0.2 毫米之间，加工完成后还需要进行无损检测，确认不存在内部裂纹或材质缺陷，确保结构强度满足设计要求。

安装过程中，首先需要精准控制铰座的基础预埋精度，对铰座的中心坐标、标高以及水平度都要进行反复复核，误差必须控制在设计允许的范围内。就位固定后，还要再次检测铰轴转动的灵活性，避免因安装偏差导致转动卡滞，影响整个竖转过程的推进。

液压同步提升系统是为竖转过程提供动力的核心装置，一般采用多台大吨位液压千斤顶配合牵引钢绞线，对称布置在拱肋的不同提升点位。整套系统同样由中央控制系统统一调度，能够根据各点位实时采集到的拉力、位移数据，动态调整各千斤顶的提升速度与牵引力输出，保证拱肋转动过程始终保持受力均衡，不会出现单点过载或姿态偏斜。施工前需要对整个系统进行空载调试与负载试压，验证各单元的同步性与承载能力，排查潜在的故障隐患，确保正式转体过程能够平稳连续完成。

（二）水平转体球铰系统制造、摩擦系数测试与不平衡力矩称重

水平转体球铰是实现大吨位拱肋水平转动的核心承力构件，整个拱肋的全部竖向荷载都由球铰接触面承担，其制造精度直接决定了转体过程能否平顺启动、平稳转动。球铰通常分为上下两个球面结构，上球面与转体结构的下盘连接，下球面固定在桥梁基础承台顶部，接触面需要经过精密铣削加工后再进行抛光处理，确保球面贴合度满足设计要求，目前大型转体球铰的加工平整度误差一般需要控制在 0.05 毫米以内，加工完成后还要对整体球面的贴合度进行检测，间隙超标的位置需要进行打磨修正，保证转体过程受力均匀。

球铰安装阶段需要严格控制下球铰的中心坐标与水平标高，将水平误差控制在允许范围之内，安装完成后在接触面均匀涂抹专用的减磨材料，一般采用黄油四氟粉或专用润滑脂，进一步降低转动过程的摩擦阻力，安装完成后还要做好成品防护，防止杂物进入接触面影响转动效果。

正式转体施工前，必须完成球铰接触面的摩擦系数测试与转体结构的不平衡力矩称重，以此确定转体所需的启动牵引力与配重方案，避免转体过程出现突发溜车或启动阻力过大的问题。测试通常采用逐步加载牵引的方式，记录转体结构从静态到启动过程的牵引力变化，结合转体总自重计算得到实际静摩擦系数，再和设计取值进行对比，若偏差过大则需要调整润滑方案或修正牵引力设计参数。

不平衡力矩称重则是通过在球铰两侧布置应力或位移监测点，分级加载后采集数据反算得到转体结构实际的不平衡力矩与重心偏心距，再根据计算结果在偏心反侧配置对应重量的平衡重，将转体结构的不平衡力矩控制在设计允许范围内，保证转体过程能够匀速可控，避免因重心偏移导致转体速度失控，为后续顺利就位提供基础保障。

（三）转体过程风载影响分析与姿态微调就位

大跨度拱肋转体过程通常持续数小时，转动全程受风载影响明显，尤其是开阔区域或跨河谷的桥位，不规则阵风会引发转体结构产生额外的姿态偏斜，还可能增大结构附加应力，因此施工前必须结合桥位当地的气象统计数据，对转体过程进行风载受力分析，明确不同风级下的结构应力与姿态偏移规律，确定转体作业允许的最大风速，一般要求转体作业过程中瞬时风速不得超过设计允许的安全风速，若风速超标必须立刻停止作业并做好临时锚固锁定。

转体过程中需要通过布置在结构关键位置的风速仪、倾角传感器与位移监测

点,实时采集姿态数据,一旦偏移超出预警阈值,就需要通过调整牵引侧牵引力、在偏心侧施加临时压载等方式进行姿态微调,逐步修正偏移量,保证转体过程始终沿预设轨迹转动。

当转体结构转动至距离设计就位位置约 1 米范围时,需要降低转动速度,改用小行程点动牵引的方式逐步精调位置,结合预先布置的就位控制线与测量控制点反复核对偏差,通过两侧牵引系统的微量错动调整拱肋的轴线与标高,确认各项参数完全符合设计要求后,立刻进行临时锚固锁定,再依次完成合龙段焊接、转动体系封固等后续作业,最终完成拱肋的精准就位。整个微调就位过程需要测量人员全程跟踪复核,每一次调整都要核对偏差数据,避免出现调整过度或不到位的问题,确保成桥后的拱肋线形与内力状态完全符合设计要求。

三、转体与顶推的特殊工况处理

在钢结构桥梁的实际施工过程中,各种非预期的特殊工况对结构的安全性提出了严峻考验。无论是突发的气象条件变化,还是结构在施工推进过程中的受力转换,都要求施工团队提前制定完善的预警方案和针对性技术对策。通过提前科学的力学分析和可靠的安全联锁防护,可以有效化解潜在风险,确保大型机械施工作业的绝对安全。

(一) 风载对长悬臂顶推 / 转体稳定性的影响分析

长悬臂状态是顶推与转体施工中最危险的受力阶段,这个状态下结构受风面积巨大且整体柔性高,对强风极为敏感。风荷载不仅会使结构产生显著的静态位移,还可能在特定风速下引发结构的气动失稳,也就是常说的颤振,直接威胁结构安全。施工前期需要结合当地多年气象历史数据进行风洞试验模拟,确定不同风速下的结构响应曲线,明确施工允许的最大临界风速。在发布强风预警期间,必须停止一切结构移动作业,将结构临时锁定加固。

为了抑制风致振动,可以在悬臂端设置临时阻尼装置或抗风拉索,消耗风振带来的能量,限制变形幅度。风力的动态实时监测是保障安全的第一道前哨,布置在结构不同位置的风速仪的数据需要实时传输至施工控制台,当环境风速接近临界值时,系统应能够自动执行锁定程序,将主梁与墩身通过临时装置刚性连接,以此增强结构的横向整体刚度,提升抗风能力。

风压分布的不均匀性还可能导致结构产生扭转振动,对于这种不利工况,设

计阶段就需要复核结构的抗扭刚度储备，确保有足够的安全冗余。在顶推长悬臂阶段，导梁的迎风体型也应进行优化设计，尽量采用流线型截面减小风阻系数。这种针对风载的综合防御体系，能够确保桥梁在面对突发气流扰动时，依然能够保持稳定的姿态，不发生超限变形或结构性损伤。

（二）临时墩脱空工况下的结构受力转换机制

顶推过程中，由于滑道本身的高程加工偏差或是支撑点的不均匀微小沉降，有时会出现钢梁底面与临时墩支撑面之间失去接触的脱空现象。这种异常状态会引发严重的受力重分布，导致相邻支撑点的支撑压力瞬间陡增，严重时可能超出临时墩的承载极限，引发安全事故。研究受力转换机制的目的，就在于提前预测这种突发载荷对主梁腹板和墩身的影响，提前制定应对方案，确保结构在局部缺失支撑时不发生倾覆失稳。

一旦现场监测发现脱空迹象，应立即停止顶推作业，启动液压补偿程序。利用墩顶提前配备的千斤顶组进行同步顶升，人为修正钢梁的线形，使其重新回归设计受力状态，消除脱空带来的不利影响。在这种应力转换的调整过程中，以下几个控制逻辑至关重要：

1. 邻近墩位的安全预警，提前计算载荷转移后该墩位的受力是否超过承载极限，必要时提前加固。
2. 钢梁局部稳定性的动态校核，防止在顶升调整过程中发生腹板失稳变形。
3. 线形恢复的阶梯式操作，避免过大的顶升位移引起结构内力的剧烈振荡，保证受力变化平稳。

（三）施工过程防倾覆与防滑移的安全联锁装置

防倾覆与防滑移是保障顶推与转体施工成功的底线要求，必须设置多层次的物理联锁装置实现全方位保护，不能完全依赖控制系统的自动调整。防倾覆装置通常由重型锚固杆、平衡配重以及侧向限位架组成，能在重心偏离预警线时及时提供强大的反向约束力矩，阻止倾斜进一步发展。整套联锁系统要求机械结构与液压控制系统深度融合，确保在桥体倾斜角度超标时能够自动锁闭动力源，停止作业并发出警报。

防滑移控制在带有纵坡的顶推施工中尤为关键，纵坡施工本身就存在钢梁向下倒溜的风险，一旦动力失效后果不堪设想。为了应对液压系统突然失效的风险，施工滑道上需要间隔安装机械自锁爪或逆向阻进块，这种装置允许钢梁顺向正常

滑动，但在发生倒溜趋势时会迅速楔入止挡位置，依靠机械力锁住钢梁。这种纯机械的保护机制不依赖电力或液压能源，能够在电力中断、液压漏油等极端情况下，依然可靠地将万吨级钢梁固定在原位，不会发生溜坡事故。

在复杂的转体作业中，牵引绳索的断裂保护也是联锁装置的重要组成部分。通过在钢绞线回路上设置压力突变监测器，一旦某根钢绞线断裂拉力异常下降，备用制动卡盘会立即动作锁紧转盘，阻止桥体在不平衡力矩作用下失控转动。这种多层次的保护架构，将人为误操作或机械随机故障带来的风险降至最低。通过对电气、液压与物理机械三方的联合联动控制，确保了桥体在任何时刻都处于完全受控状态。

随着施工进入尾声，安全联锁装置的拆除也需要按部就班进行，不能提前拆除任何保护结构。在永久支撑体系完全建立并达到设计强度之前，任何锁定装置的松脱都必须经过严格的受力计算评估，确认安全后方可操作。这种全周期的安全管控思想，不仅体现了对大型桥梁工程质量的敬畏与尊重，更展示了现代建筑工艺在处理极端复杂工况时的严谨逻辑。只有把预防措施落实到每一个工艺细节环节，才能最终铸就跨越天险的宏伟优质桥梁工程。

第四节 缆索承重桥与协作体系专项安装技术

缆索承重桥包括悬索桥、斜拉桥以及二者组合的协作体系桥，是目前跨越宽阔海湾、深谷大江等大跨度桥位的主力桥型，这类桥梁的核心受力构件为主缆、吊索和斜拉索，桥梁的安装施工需要针对柔性缆索体系的受力特点，制定专项的安装工艺与控制方法，逐步完成结构体系的转换，最终实现成桥线形与内力状态符合设计要求。

一、大跨悬索桥钢箱梁 / 钢桁梁安装

大跨悬索桥的加劲梁安装是主缆架设完成后最为关键的施工工序，安装过程需要通过逐步加载改变主缆的受力状态，让主缆从空缆线形逐步调整到成桥设计线形，整个过程需要严格控制加载顺序和安装精度，避免主缆产生不可恢复的线形偏差，影响最终成桥质量。

（一）跨缆吊机吊装钢箱梁的线形控制与环缝焊接顺序

跨缆吊机是悬索桥钢箱梁吊装施工的专用大型设备，行走支承在已架设完成的主缆上，可沿主缆纵向移动将梁段逐片吊装到位，与主缆下放吊装相比，跨缆吊机吊装不受跨间障碍物影响，吊装精度更易控制，适配绝大多数大跨悬索桥的钢箱梁施工。吊装施工过程中，成桥线形控制是核心控制目标，由于每一片钢箱梁吊装完成后，都会改变主缆的受力分布，引发主缆线形和已安装梁段标高发生变化，因此施工前需要通过有限元模拟计算，逐段预推不同吊装阶段下的主缆变形和梁段预抬高量，给每一个待吊装梁段制定对应的吊装目标标高，施工过程中需要通过全球导航卫星系统、全站仪对每一片梁段就位后的标高、轴线偏差进行实时监测，根据实测结果微调下一片梁段的预抬高参数，逐步修正线形偏差，避免偏差累积影响最终合龙精度。

钢箱梁吊装完成相邻梁段匹配后，需要进行环缝焊接作业，焊接顺序的选择会直接影响焊接变形和梁段的最终线形，需要结合结构特点和环境温度制定合理的顺序。通常先进行底板环缝的定位焊接，再依次完成腹板、顶板的定位点焊，整体确认梁段匹配精度无误后，再进行焊缝的填充焊接，焊接过程采用对称焊接工艺，安排多名焊工从环缝中心向两侧对称施焊，减小不均匀焊接变形对线形的影响。同时需要严格控制层间温度，避免温度变化引发额外的焊接应力，每一道焊缝完成后都需要进行外观检查 and 无损检测，确认焊接质量符合要求后，再进行下一道工序施工，避免后期返修影响结构线形和安装进度。

（二）悬索桥钢桁梁加劲梁的缆载吊机与桥面吊机协同作业

与钢箱梁整段吊装不同，钢桁梁加劲梁通常采用分节段工厂制造、现场拼接架设的方案，单节段重量大、整体宽度大，仅依靠缆载吊机逐段从主缆下放吊装，受吊装站位和作业空间限制，施工效率低且难以保证拼接精度，此时采用缆载吊机与桥面吊机协同作业的方案，可以充分发挥两类设备的优势，大幅提升架设效率和安装精度。

具体作业流程中，首先由行走在主缆上的缆载吊机将待架设的钢桁梁节段从桥下运输驳船上整体起吊，提升至设计标高附近完成初步对位，完成该节段与主缆吊索的临时连接后，再由提前布置在已架设完成桥面上的桥面吊机，对节段的平面位置、竖向标高和转角进行精细调整，配合已完成架设梁段完成杆件精准拼接。这种作业模式将粗对位和精调整分工，缆载吊机负责大行程起重吊运，桥面

吊机依托已成型桥面作业，调整精度更高，也不需要占用主缆上的作业空间，两类设备可实现错峰平行作业，有效压缩了总工期。

协同作业过程中，需要重点控制两类设备吊装受力转换的平稳性，当缆载吊机将节段交付桥面吊机调整时，需要采用分级卸载的方式逐步释放缆载吊机的起吊力，同步监测钢桁梁杆件和已成型桥面的内力、变形数据，避免受力突变引发杆件应力超标或线形突变。同时需要根据每吊装 2~3 个节段后的实测线形数据，重新修正后续节段的安装定位参数，抵消主缆逐步下挠带来的累计偏差，保证整体架设精度满足要求。

（三）大跨悬索桥合龙段的配切与无应力合龙控制

大跨悬索桥合龙段施工是实现全桥闭合、体系转换的关键工序，成桥的线形和内力最终是否符合设计要求，很大程度取决于合龙段配切精度与合龙过程的控制。无应力合龙是目前大跨悬索桥广泛采用的合龙工艺，核心是保证合龙段在无应力状态下完成拼接，避免结构产生额外的残余应力，因此配切作业的精度控制是整个工序的核心。

合龙段正式配切前，需要连续观测至少 24 小时的环境温度变化，每隔一定时间测量一次合龙口的实际间隙、宽度以及两侧梁段的轴线、标高偏差，明确合龙口尺寸随温度变化的规律，最终选择夜间温度相对稳定的时段作为正式测量配切尺寸的窗口，根据设计要求的合龙温度，计算出合龙段需要的实际下料长度，再完成工厂或现场的精密切割配切，保证合龙段在设计温度下能够刚好嵌入合龙口，实现无应力匹配。

配切完成后合龙段吊装就位前，需要提前对合龙口两侧的梁段进行临时预调整，通过调整主缆吊索的索力、在梁端施加临时压载等方式，将合龙口的间隙、标高、轴线调整到设计允许的范围内，确认各项参数符合要求后，再将配切完成的合龙段吊装就位，依次完成临时匹配连接、正式焊接或栓接作业，整个作业过程需要尽量在温度变化较小的时段内快速完成，避免温度变化引发合龙口间隙改变，给合龙段带来额外的装配应力。合龙完成后再全面复测全桥的线形和索力，确认各项指标符合设计要求，即完成整个加劲梁的安装作业。

二、大跨斜拉桥安装与体系转换

大跨斜拉桥的施工核心在于随着主梁节段的逐步架设，同步完成斜拉索的挂

设张拉,通过逐步调整索力实现结构受力的体系转换,最终使成桥的主梁线形和斜拉索内力满足设计要求,其施工工艺因主梁结构形式、桥位环境的不同存在一定差异,但核心控制逻辑始终围绕索力与线形的协同调整展开。

（一）钢塔 / 钢混组合塔的节段吊装与主动横撑顶推纠偏

斜拉桥的索塔是承担斜拉索水平分力的核心受力结构,大跨径斜拉桥的钢塔或钢混组合塔多采用分节段工厂预制、现场逐段吊装拼接的施工方法,由于塔柱受自身荷载、斜拉索水平分力以及施工不对称荷载的作用,会产生侧向偏移和倾斜,因此吊装过程中需要通过主动横撑进行顶推纠偏,保证塔柱的最终垂直度符合设计要求。钢塔节段吊装通常采用浮吊或塔吊逐段起吊,完成节段间的定位焊接或栓接后,在两个塔柱之间安装临时主动横撑,横撑一般采用大直径钢管或箱型截面构件,两端配备液压千斤顶装置,通过千斤顶主动顶推调整塔柱的侧向位移,抵消单侧斜拉索张拉带来的不平衡水平力,避免塔柱根部产生过大的附加弯矩,同时控制塔柱的倾斜率在设计允许范围内。顶推纠偏过程中需要实时监测塔柱的垂直度、塔柱截面应力以及横撑的顶推力,每完成一段斜拉索张拉后都要重新复核塔柱偏位,根据实测结果微调顶推力,动态修正偏位,确保整个索塔施工过程中塔柱受力始终安全,最终成塔的垂直度满足规范要求。对于钢混组合塔,在钢塔柱安装完成后还要进行内部混凝土灌注,灌注过程需要分层对称浇筑,避免混凝土侧压力导致塔柱产生偏位,灌注完成后待混凝土强度达到设计要求,才能逐步拆除主动横撑,拆除过程也要遵循从上到下的顺序,分级卸载顶推力,同步监测塔柱内力变化,保证转换过程平稳可控。

（二）斜拉桥合龙前多索力调整与合龙口误差的强制分配

大跨斜拉桥一般采用分节段悬臂浇筑或悬臂拼装施工,从索塔向两侧逐步延伸,最终在跨中完成合龙,悬臂施工过程中每一个节段施工完成后都会张拉对应斜拉索,受施工误差、混凝土收缩徐变、环境温度变化等因素影响,合龙前两侧悬臂端的标高、轴线往往会存在一定偏差,需要通过提前调整多根斜拉索的索力,对偏差进行调整,再通过合龙口误差的强制分配实现顺利合龙。合龙前的索力调整需要先对全桥已施工完成的斜拉索索力、主梁线形进行全面测量,将实测数据与设计理论值进行对比,结合合龙要求的目标线形,通过有限元仿真计算确定需要调整的索力范围,一般优先调整靠近合龙口的若干根斜拉索,通过改变索力拉动主梁,调整合龙口两侧的标高差和间隙大小。对于存在的微小误差无法通过索

力调整完全消除的情况，会采用误差强制分配的方法，将合龙口的标高、间隙偏差合理分配到合龙口两侧的梁段和相邻斜拉索上，避免误差集中在某一部位产生过大的附加应力。通常的做法是通过在合龙口两端梁段施加临时配重，配合调整对应斜拉索索力，将偏差均匀分配，使合龙口的各项参数满足合龙要求，之后在设计要求的温度范围内快速完成合龙段的拼接和连接，实现全桥合龙。合龙完成后进行一次全桥索力的整体微调，使索力和线形最终符合设计要求，完成从悬臂施工到成桥受力的体系转换。

三、悬索斜拉协作体系桥的特殊安装工况

悬索斜拉协作体系桥同时结合了斜拉桥刚度大、悬索桥跨越能力强的优势，其结构受力特点与纯斜拉桥、纯悬索桥存在显著差异，施工过程需要完成多次体系转换，存在多个独有的特殊安装工况，需要针对性制定施工控制方案。

（一）斜拉段向悬索段过渡时结合梁 / 结合段的吊装定位

该结合梁段是斜拉段与悬索段的受力衔接关键构件，承担着斜拉索水平力和主缆竖向力的传递转换作用，整体受力复杂，对安装定位精度要求远高于常规梁段。施工中需要先利用浮吊完成结合段的粗吊装就位，临时锚固在已完成架设的斜拉梁段端，随后通过斜拉索索力微调、河床支撑千斤顶多向调整相结合的方式，对结合段的标高、轴线、转角进行逐步精调。调位过程中需要实时监测结合段的截面应力和已完成施工梁段的线形变化，避免调位过程中产生过大的附加应力，确保各构件受力始终处于安全范围，最终结合段的定位偏差需要严格控制在设计允许的极小范围内，为后续悬索段梁段的吊装架设打下可靠基础。

（二）斜拉索与吊索交叉安装区的索力交替张拉与刚度过渡

在悬索斜拉协作体系桥中，斜拉索与吊索会在跨中或过渡区域形成交叉重叠的安装区间，该区间内斜拉索和吊索分别连接主梁，二者的索力变化会相互影响主梁的内力与线形，若直接一次性张拉到设计索力，极易导致该区域主梁受力不均匀，甚至出现局部应力超标或线形偏差，因此需要通过索力交替张拉的工艺，逐步完成结构刚度的平稳过渡。

施工时需先根据设计的体系转换流程，通过有限元计算划分多轮张拉工序，明确每一轮张拉中斜拉索与吊索的目标索力控制值，一般先张拉靠近斜拉桥侧的斜拉索至初始索力，再张拉对应区域的吊索至初步设计值，随后交替逐轮对两类

索体进行索力微调，每完成一轮张拉都需要同步测量该区域主梁的标高、线形以及两类索体的实际索力，对比计算值判断结构受力状态是否符合预期，确认无误后再开展下一轮张拉。

通过这种逐步交替张拉的方式，让交叉区域的结构刚度从斜拉桥的高刚度逐步平稳过渡到悬索桥的相对柔性刚度，避免刚度突变引发内力重分布不均衡，同时还能通过动态调整抵消索力变化带来的相互干扰，最终使交叉区域的斜拉索、吊索索力以及主梁线形都符合设计要求，保障整个协作体系受力平顺。

第五节 大型构件吊装与定位技术

大型构件的吊装与定位是钢结构桥梁施工的核心环节，直接决定了桥梁整体的结构安全与线形精度，在大跨度钢结构桥梁的建造过程中，这一工序的管控质量更是对项目整体工期与最终交付品质起着决定性作用。本节重点探讨起重机械选型验算、复杂吊具研发以及空间三维定位控制，通过科学设计工艺流程与执行严苛的质量监控标准，确保大型钢节段在复杂作业环境下实现精准就位，保障桥梁整体施工的稳步推进。

一、大型起重机械的选型与验算

起重机械的性能表现是吊装作业顺利开展的基础支撑。通过对作业半径、起重曲线及地基承载力的多维度复核算，才能确定适配项目工况的最优机械配置方案，为构件吊装提供充足的动力支撑与安全冗余，从技术源头规避由于机械失稳或载荷超限引发的安全事故，确保施工全过程始终处于受控状态。

（一）履带吊与汽车吊的工作半径与起重曲线校核

履带吊与汽车吊的选型必须严格遵循原厂提供的起重性能表，将构件的理论重量与项目现场的实际工况进行深度匹配，不能仅根据构件重量直接选用机械，必须将所有现场影响因素纳入考量范围。在确定工作半径时，需要提前测算起重机中心至构件最终安装位置的最远水平距离，并且必须计入吊具索具的自重，不能遗漏这部分额外荷载。吊装载荷的计算必须完整包含动载系数与作业区域风载的影响，确保起重机的实际起重量始终控制在机械额定起重能力的百分之八十五安全线以内，预留出足够的安全缓冲空间。对于外形不规则的异形钢梁，臂架倾角

与有效提升高度的几何校核尤为重要，必须提前通过专业仿真模拟确定吊钩在作业全过程中的活动范围，提前避开各类障碍物。

起重曲线的动态校核需要完整覆盖吊装从起吊到就位的整个作业路径，不能仅校核起吊点的瞬时负荷，更要重点关注构件回转、变幅过程中的力矩变化。在实际施工现场，哪怕作业半径只发生微小增量，都可能导致起重机的实际起重能力出现断崖式下降，因此每一个节点都不能放松校核。通过查阅原厂起重特性手册，对每一组作业工况都进行坐标点对应核对，同时还要确认施工现场护栏、护桥等周围障碍物与起重机臂架始终保持规定的安全间距。在大吨位构件吊装作业中，履带吊的接地比压与回转平稳度是校核的核心重点，需要防止因力矩大幅波动造成机械结构受损甚至整机倾覆的风险。针对超长臂架吊装作业中可能产生的挠度变形，需要提前在计算过程中引入合理的补偿参数，抵消变形带来的位置偏差。

（二）地面承载力与支腿下地基处理的计算

大型起重机作业时对地面产生的压强极大，必须通过严谨的地基承载力计算确定适配的地基加固方案。计算过程中需要将起重机自身自重与满载起吊时的最大力矩合并计算，求得最不利工况下支腿或履带对地面的最大垂直压力，以此作为地基处理的设计依据。如果天然地基的承载力无法满足要求，目前工程中常用的处理措施包括换填改良土体、分层压实后铺设厚钢板以及现浇钢筋混凝土承压平台，核心目的都是将集中的点荷载转化为分布均匀的区域荷载，降低单位面积的压强。地基处理的厚度与作用范围都应通过专业力学模型计算确定，施工完成后还需要辅以现场静载试验验证地基的实际可靠性，确保处理效果符合设计要求。

地基稳定性不仅关乎单次吊装作业的即时安全，更涉及整个分段吊装周期内的长期变形控制。在靠近桥台、深基坑边缘或软土分布地区作业时，必须额外计算侧向土压力对地基稳定性的干扰，防止发生地基滑坡或局部塌陷的险情。针对计算得出的结果，需要制定详细的现场排水方案与沉降监测计划，确保在整个吊装周期内地基不会发生超出允许范围的不均匀沉降。对于必须布置在既有路面或已建成下部结构上的起重机械，还需要额外验算下部结构的抗压强度与变形限制，避免吊装作业对已有完工工程造成不可逆的破坏。

（三）双机抬吊的载荷分配与同步性控制要求

当待吊装构件的整体重量超过单台起重机的最大承载能力时，就需要采用

双机抬吊工艺完成作业。该技术的核心关键在于载荷的均衡分配，两台起重机的实际负荷率都应控制在额定能力的百分之八十以下，并且要通过专用平衡梁将构件重心产生的力矩合理分摊到两台起重机上。计算分配载荷时必须提前考虑构件重心偏移的风险，根据计算结果设置合理的吊点间距，避免出现某一台起重机负荷过载的情况。在两台起重机的协同作业中，操作手之间的通讯联动是作业成功的基石，必须建立统一清晰的指挥信号系统，确保两台机械的动作始终保持高度一致。

双机抬吊的同步性控制主要包含三个核心方面：一是起升与下降速度同步，通过起重机自带的变频调速系统将两台机械的速度差值控制在极小范围内，防止载荷在两机之间发生剧烈转移，引发荷载突增险情；二是运行轨迹同步，现场指挥员根据激光对点的实时信息及时下达纠偏指令，确保构件在空中不发生不必要的旋转或过度倾斜；三是载荷实时监控，在每台起重机的吊钩处都安装拉力传感器，将实时载荷数据集成显示在指挥中心的主操作屏上，一旦发现载荷分配不均的情况，立即停止作业调整后再继续。这种清晰明确的协同模式能够有效化解单机起吊的能力局限性，确保超重构件的整个吊装过程平稳可控。

二、复杂空间构件的吊具设计

异形桥梁节段由于本身几何形态复杂，往往存在重心偏移的问题，而且出厂时完成的防腐涂层质地偏脆，极易被坚硬索具划伤，这两方面问题对吊具设计提出了双重挑战。科学合理的吊具不仅自身要满足结构力学强度要求，还需要具备良好的几何适应性与构件保护功能，通过优化吊耳布置方案与柔性防护材料的应用，实现大型构件在空中姿态的稳定可调，同时保证构件表面防腐涂层的品质完好无损。

（一）异形节段重心计算与平衡吊梁的设计

异形钢结构节段的几何中心与物理重心往往存在严重偏离，需要利用数字化三维建模软件对构件进行精准质心定位，得到准确的重心坐标后再开展吊具设计。在设计平衡吊梁时，要根据计算得出的重心坐标设置多组可调挂点，使吊梁轴线与构件重心始终保持在同一垂线上，保证起吊后构件不会出现明显倾斜。吊梁结构本身需要具备足够的纵横向刚度，通常采用矩形闭口箱梁或工字钢组焊而成，并且需要经过有限元分析验证其在多个吊点拉力共同作用下的整体稳定性，避免

发生过大变形。施工过程中，可以通过调整吊链长度或改变挂钩孔位，轻松纠正构件起吊后的初始倾角，快速调整到理想姿态。

平衡吊梁的受力计算完整涵盖了弯矩、剪力以及吊索分力产生的轴向压力，必须保证吊梁在一点五倍过载的工况下也不会发生塑性变形，满足安全冗余要求。在实际吊装作业中，吊梁不仅起到了载荷转换分摊的作用，还能起到保护构件侧面不被吊绳勒伤的效果。为了提高不同节段吊装的通用性与作业效率，吊梁可设计为模块化拼接结构，可以根据不同节段的跨度灵活调整组合，适配多种吊装工况。吊梁上还可以配备高灵敏度的电子水平仪，施工人员能实时监控吊梁与构件的倾斜度，确保在入位对接前构件始终处于设计要求的理想空间姿态。

（二）钢丝绳夹角限制与防滑落安全销的设置

钢丝绳的强度利用率与吊装时的绳索夹角密切相关，正式作业时必须严格控制夹角大小，行业内通常要求夹角不得大于六十度，以此避免因分力过大导致绳索张力激增，超出钢丝绳的额定承受能力。在计算索具配置的时候，需要将夹角产生的折减系数计入安全校核过程，据此选用对应强度等级的钢丝绳，保证索具安全。为了确保在吊装过程中的绝对安全，每个吊耳位置都必须配置物理防滑落安全销，防止绳索由于阵风带动构件晃动、意外碰撞等情况导致从吊耳中滑脱。安全销一般采用高强度合金钢制造，具备极强的抗剪切能力，能应对各类突发受力情况。

安全销的安装工艺要求精细操作，必须在钢丝绳完整套入吊耳后再进行锁定，安装完成后还要逐一检查销轴的紧固程度，确认锁止到位才能开始起吊。在复杂环境吊装作业中，钢丝绳与吊具本体的摩擦损伤也需要引起足够重视，两者的接触部位应加装圆弧形衬垫缓冲，降低磨损速率。所有索具在投入现场使用前必须进行无损探伤检查，排除内部断丝或隐形疲劳损伤，不合格的索具严禁进场使用。通过在关键吊点设置视频监控系统，地面指挥人员可以在指挥工位实时观测索具与安全销的咬合状态，不用频繁登高查看。在进行大幅度构件位移或俯仰调整时，必须安排专人专职监控绳索夹角变化，严禁出现超过设计限制的违章作业行为。

（三）专用吊带与柔性吊具在防腐涂层保护中的应用

现代化钢结构桥梁对于外观质量与长效防腐性能都有极高要求，传统的钢丝绳吊装很容易对已经完工的漆面造成机械损伤，后续修复不仅费时费力，还很难达到原厂涂装的防护效果。采用高强度合成纤维吊带可以有效解决此类难题，其

柔韧的表面能与构件外形紧密贴合，显著降低吊装接触部位的局部压应力，避免涂层损伤。专用吊带应根据额定吊装载荷进行分级选用，并且在接触构件棱角的部位加设高分子复合材料护角，防止纤维被构件锐利的边缘割伤，延长吊带使用寿命。这种柔性材料的应用极大地减少了后续涂层修复的工作量，也提升了构件成品保护的整体水平。

专用柔性吊具具有三个显著应用优势，具体如下：

- 1. 防护性强，吊带的宽幅设计增加了与构件的接触面积，避免了局部受压产生的漆面剥落或金属压痕，能完整保护构件出厂时的成品状态；
- 2. 自重轻，合成纤维材料在同等强度下重量仅为钢丝绳的五分之一，大幅提升了高空挂钩作业的效率，也降低了现场工人的劳动强度；
- 3. 稳定性好，柔性材质具备一定的消能缓冲作用，能够吸收吊装过程中的微小振动，让构件在空中保持更平稳的状态。

施工单位需要建立完整的吊带使用管理台账，严格执行强制报废制度，杜绝使用已经老化或受到化学污染的索具，避免发生安全事故。这种精细化的构件保护工艺，有效提升了项目整体施工水平，也充分体现了质量优先的施工管理理念。

表 6-4 专用柔性吊具与传统钢丝绳吊具对比表

对比维度	专用柔性吊具	传统钢丝绳吊具
构件防护性能	优，不易损伤防腐涂层	差，易造成涂层破损与构件压痕
单位强度自重	轻，仅为同强度钢丝绳的 1/5	重
缓冲消能能力	好，可吸收吊装振动	差，无缓冲效果
高空作业效率	高，挂钩便捷，降低劳动强度	低，自重偏大，操作费力

从表 6-4 可以看出，针对带有完整防腐涂层的钢结构构件吊装，专用柔性吊具的综合表现远优于传统钢丝绳吊具，更能满足现代化钢结构桥梁的施工质量要求。

（四）钢管拱大节段双机抬吊翻身与空中姿态调整的吊耳设计

钢管拱大节段通常在预制场地以平躺状态完成加工，起吊后需要完成翻身作业调整为竖直姿态，才能转运至设计位置对接，该过程对吊耳的位置设计与结构强度都提出了较高要求。吊耳设计首先需要根据预制阶段的摆放姿态，分别计算平躺起吊阶段、翻身转动阶段、竖直调姿阶段三个不同工况下每个吊耳所受的拉力大小与方向，结合最不利受力情况完成结构验算，确保吊耳在全作业流程中都满足强度要求，不会发生局部应力集中导致的结构破坏。

吊耳的布置位置需要配合双机抬吊的动作流程设置，一般在大节段的两端分别设置主吊耳与辅助翻身吊耳，主吊耳全程受力，辅助吊耳仅在翻身阶段配合改变力矩方向，帮助构件平稳转动。所有吊耳都必须与钢管拱的拱肋主腹板直接焊接，将受力直接传递给构件主体结构，避免拱壁局部承压发生变形。焊接完成后需要对吊耳焊缝进行 100% 无损探伤检测，确认不存在焊接缺陷才能投入使用，防止起吊过程中发生焊缝开裂的险情。

针对空中姿态调整的需求，吊耳可设计带多组调整孔的结构形式，现场施工人员可以通过调整挂索位置，快速修正构件的倾斜角度，无需松钩重新作业，大幅提升了对接作业的效率。同时吊耳板与拱肋连接处需要加焊补强板，分散局部应力，避免翻身过程中由于瞬间拉力突变对构件本体造成损伤。整个吊耳设计方案需要结合翻身过程的动力学仿真进行验证，确认整个动作流程中受力始终处于安全范围，不存在受力盲区，为现场作业提供可靠的技术保障。

三、三维空间精准定位与对接

高精度的空间定位是桥梁结构成型的最终保障，直接决定了全桥建成后的线形质量与受力状态。通过全站仪实时测量、液压微调系统以及快速锁紧工艺的深度融合，施工人员能够将数十上百吨的钢结构节段精准控制在毫米级公差范围内，确保全桥线形平顺且受力状态完全符合设计预期，实现从吊装到安装的高精度平稳过渡。

（一）全站仪空间坐标实时追踪与指挥调整

全站仪实时监测系统相当于吊装过程中精准定位的眼睛，是实现高精度定位的核心保障。需要提前在施工现场建立独立的高精度测量控制网，并且在待安装构件的多个特征点位置布置反射棱镜，实现三维坐标的毫秒级连续数据采集。测量得到的数据通过无线电台实时反馈至指挥中心的电脑终端，系统会自动计算出当前构件空间位置与设计理论坐标的偏差值，直接呈现给现场指挥员。指挥员利用这些量化的清晰数据，能够以极高的效率指导起重机操作手进行逐步微调，显著提升了构件在空中的控制精度，避免了传统指挥靠经验目测的误差。

指挥调整过程需要保持高度的专业性与连贯性，其主要控制流程如下：

1. 动态对中引导，根据坐标偏移量指令吊机进行水平位移或回转调整，使构件中心线逐步靠拢设计轴线，每次调整幅度保持平稳，避免过度调整；

2. 姿态实时纠偏, 利用全站仪测得的多点高程数据计算构件当前的横坡与纵坡, 通过调整吊钩升降实现构件整体姿态平衡;

3. 停位验证锁定, 在构件抵达预定位置附近后, 进行持续观测, 确认在风力等环境干扰下坐标值波动始终处于允许公差范围内, 再进入下一工序。

这一套完整清晰的流程消除了传统目测指挥带来的误差, 为后续的精密对接奠定了坚实可靠的基础。

(二) 匹配件导向与千斤顶三维微调系统操作

由于起重机臂架本身存在柔性变形, 在对接的末端阶段很难实现毫米级甚至微米级的精细动作, 因此必须配合采用匹配件导向与液压千斤顶微调系统完成最终对位。先在构件接口处预先焊接安装定位导向板, 利用斜面的导向作用实现构件的粗对位, 快速将构件调整到对接区域附近。随后, 启动提前布置在临时支架上的三向液压微调装置, 该系统由竖向、纵向和横向三个方向的千斤顶组成, 能够实现对重型构件的全方位小幅度推移。液压泵站采用集成化控制, 可以同步或独立驱动各组千斤顶, 从而修正因构件加工公差或吊装变形产生的位置偏差, 将构件调整到设计坐标范围内。

三维微调系统的操作需要遵循平稳、微量、多次的原则, 防止过大的推移冲击力损伤构件接口边缘, 影响后续连接质量。在整个调整过程中, 全站仪需要持续保持监测状态, 将每一次推移后的坐标变化实时反馈给液压操作手, 指导下一步调整操作。对于跨度较大的大型钢箱梁, 还需要充分考虑温度变化引起的材料热胀冷缩, 一般选择在清晨气温稳定或者环境温度与设计温度一致的时段进行最终定位校准, 消除温度变形带来的坐标偏差。匹配件导向的接触面应涂抹适量润滑脂, 以减小对位过程中的摩擦阻力并防止划伤金属本体, 保护构件加工精度。通过这套高精度的机械微调工艺, 可以有效消除吊装过程中产生的累积误差, 让构件就位精度完全符合设计要求。

(三) 高强螺栓初拧临时固定的快速跟进工艺

当构件姿态调节完全符合设计要求后, 必须立即执行临时固定工艺, 以此锁定其已经调整到位的空间位置, 同时分担吊机承受的部分载荷, 降低吊装作业的安全风险。高强螺栓作为钢结构桥梁主要的连接元件, 在初拧阶段的快速跟进对于维持已获得的定位精度至关重要。初拧作业需要遵循由中心向四周对称进行的原则, 使用经过提前标定的定力矩扳手将螺栓拧至设计额定扭矩值的百分之

五十，既保证足够的连接摩擦力，又为后续终拧调整预留空间。这种快速锁紧工艺能够迅速建立起连接副之间的摩擦力，有效抵御由于外界风力或吊绳颤动引起的构件微小偏移，牢牢锁定已经调整好的定位精度。

在螺栓初拧过程中，严禁使用大锤强行击打构件来配合孔位对正，必须通过微调千斤顶系统缓慢调整构件位置，实现孔位自然对正，避免损伤构件。孔位对正完成后，穿孔率必须满足百分之八十以上的要求，方可卸除主吊钩的负荷，防止提前卸荷引发构件位移。施工人员在完成全部初拧作业后，需要再次利用全站仪对构件进行全方位的线形复测，确认在螺栓紧固过程中构件没有发生二次超差位移。快速跟进的临时固定工艺缩短了高空吊装的作业窗口期，极大降低了长时间悬空作业带来的安全风险，还为后续的终拧施工与焊接工艺创造了稳定的结构前提，最终确保桥梁建设质量达到国家优良工程标准。

第六节 施工监控与调整

施工监控与调整是确保钢结构桥梁建设质量的核心环节，旨在通过全过程的数值仿真、状态监测与实时纠偏，让结构在各施工阶段的内力与线形都处于受控状态。这一过程不仅关系到桥梁最终的成桥状态是否符合设计预期，更直接影响施工期间的结构稳定。

一、施工监控系统的建立

监控系统的建立是施工控制的前提基础，需要结合工程实际搭建高精度数学模型，并科学划定各项监控指标的安全界限，再通过规范的信息流转流程，确保监测数据能及时转化为指导现场作业的技术指令。

（一）监控计算仿真模型的建立与参数敏感性分析

针对钢结构桥梁的受力特征，建立覆盖全过程的有限元数值仿真模型是监控工作的第一步。建模过程中，要根据设计图纸对主梁、横梁、杆件以及连接节点做精确的离散化处理，采用空间梁单元或壳单元模拟结构的刚度分布。施工阶段的划分必须和现场实际进度保持同步，把每一节段的吊装、焊接、螺栓紧固以及施工机具移动等工序准确还原到计算机模拟中，以此得到每个阶段结构的理论内力、位移以及频率等参数。

参数敏感性分析是识别控制难点的关键方法。通过改变模型中钢材弹性模量、构件容重、施工荷载等核心参数的输入值，观察这些变动对关键截面应力或跨中挠度的影响程度，这种定量分析就能明确哪些因素对结构响应的影响最显著。一般来说，大跨度钢结构桥梁的自重误差和温差效应对线形影响比较突出，而弹性模量的小范围波动就可能对应力分布产生不小的影响。通过敏感性分析，监控团队就能确定重点监测对象，在后续工作中分配更多计算资源、提高观测频率。

对于复杂的节点区域，仿真模型还要考虑边界条件的精细模拟，如果支座或临时支撑的刚度和实际情况存在偏差，就会导致模型预测结果出现系统性偏差。建模时可以采用多尺度建模方案，在整体分析的基础上对局部引入精细化模型，以此提高计算结果的可靠性。施工中新增的任何临时加劲构件或工艺辅助措施，都要如实纳入仿真计算，确保理论值能真实反映结构当前的受力状况。

（二）施工预警阈值（应力、位移、索力）的设定

科学合理的预警阈值是保障施工安全的第一道防线。阈值设定需要综合考量国家现行标准、设计文件要求以及施工工艺的容许偏差，通常会将预警体系划分为不同的风险等级：比如当实测值与理论值偏差在 5% 以内时，视为正常波动；偏差达到 10% 时，启动一级预警，要求现场排查原因；偏差超过 15% 时，必须停止施工开展专项安全评估。

在应力监控方面，由于钢材有明确的屈服强度，预警值一般以材料设计强度为基准，并预留足够的安全储备。吊装过程中的关键构件，应力阈值还要考虑动力系数的影响。位移控制更侧重线形的平顺度，尤其是悬臂拼装过程中，前端的垂直挠度与水平偏位是控制核心。索力预警则针对斜拉桥或吊索桥，需要严密监控单根索力的均匀性，避免局部过载引发整体结构失稳。

预警阈值的动态调整也必不可少。随着施工工序推进，结构的拓扑形式会发生变化，部分早期设定的固定阈值可能不再适用。监控团队要根据每个施工阶段的应力释放情况与几何状态，定期核对应力与变形的剩余承载能力，对后续阶段的预警指标进行优化。这种基于实时反馈的动态设定，能有效避免误报和漏报，提升监控系统在复杂环境下的判断准确性。

（三）施工监控信息的协同流转与指令下达机制

监控信息的高效流转是实现闭环控制的重要保障。施工现场，传感器采集的原始物理信号通过无线传输或光纤链路实时汇总到监控中心，由专业软件完成自

动化处理与分析，数据处理流程包括信号去噪、异常值剔除以及和理论值的对比运算，分析结果再生成图形化的监控日报或周报，直观展示结构状态的演变趋势。

指令下达机制必须具备极强的时效性与权威性。当监控数据显示存在安全风险或超限偏差时，监控中心需要迅速组织专家论证，制定对应的调整对策，决策信息通过协同管理平台下达至施工总承包方和现场作业班组，指令中不仅要明确调整目标值，还要详细规定调整的操作规程，比如顶推步长、张拉吨位或焊接顺序。

为了避免信息流转失真，要建立多方参与的协同机制，建设方、监理方、设计方与监控方要共同参与关键节点的决策会议，现场技术员通过移动端实时反馈指令执行情况，形成“数据采集、分析研判、指令下达、现场反馈、效果复核”的完整闭环。这种数字化管理手段能打破信息孤岛，让施工监控真正覆盖到钢结构桥梁建设的各个环节。

（四）悬索斜拉协作体系多重非线性与时效耦合的监控仿真

对于兼具悬索与斜拉受力特点的协作体系桥梁，其施工过程的力学行为存在显著的多重非线性特征，同时结构变形和应力重分布还会受到混凝土收缩徐变、钢结构应力松弛等时效因素的影响，必须构建能同时考虑这些效应的耦合仿真模型，才能准确预判结构在各施工阶段的真实状态。首先需要精准模拟不同受力部件的非线性特性：主缆和吊索的索力变形关系存在典型的几何非线性，大变形下需要采用悬链线单元精确模拟其刚度变化；斜拉索的垂度效应会随索力调整发生改变，也要计入非线性修正；而钢结构拱肋或主梁在大偏压受力下，也可能出现材料非线性行为，需要结合钢材本构关系完成迭代计算。在此基础上，将时效效应耦合到模型中，按照实际施工进度分阶段累计计算收缩徐变、应力松弛引发的内力重分布与位移累积，明确不同时间步长下结构状态的演变规律。在每个关键施工工序开展前，通过耦合仿真提前计算该阶段对应的理论应力、位移与索力值，作为现场监测数据的对比基准，同时提前预判可能出现的超限风险，为监控方案的调整提供数值依据，保障协作体系施工全过程的受力稳定与线形可控。

二、施工过程中的参数识别与修正

参数识别是连接计算模型与工程实际的桥梁。通过深度挖掘施工现场的实测数据，反向修正模型的输入参数，能显著提升仿真计算的预见性和指导性。

（一）材料实际容重与弹性模量的反演识别

钢材的力学性能虽然相对稳定，但在大规模桥梁建设中，不同批次的钢板仍会存在细微的容重与模量差异。反演识别就是利用结构在已知荷载下的响应，比如特定节段吊装后的变形增量，通过优化算法推导出材料的真实物理参数。这个过程一般采用最小二乘法或贝叶斯估计，通过寻找计算值与实测值之间残差平方和最小的参数组合，让模型逐渐贴近结构实体的实际特征。

容重识别对线形控制至关重要。大跨度悬臂施工中，自重的轻微超限就会在悬臂端产生被放大的位移偏差。通过对已安装节段的重量统计与位移观测，就能得到实际容重相对设计取值的偏差百分比，并在后续节段计算中提前修正，这种基于已知信息推断未来的逻辑，能有效消除系统性累积误差。

弹性模量的反演则更多依赖应变监测。钢结构在温度变化较小的时段，应力与应变的关系符合胡克定律，利用高精度振弦式传感器或光纤光栅传感器记录的受力过程，结合有限元分析得到的应力水平，就能准确提取出材料的实际动静模量。修正后的模量参数重新输入计算模型，可以提高结构刚度评估的精确度，为成桥状态的内力预测提供可靠依据。

（二）施工临时荷载的动态统计与模型修正

钢结构桥梁施工过程中，桥面上布置有塔吊、焊机、临时支架、物料堆场等各类临时荷载，这些荷载的位置与重量随工序频繁变动，对结构受力状态的影响不可忽视。动态统计工作要求现场监测人员每日记录大型临时机具的分布情况，并将其转化为有限元模型中的等效节点力或分布荷载。

模型修正过程中，要把这些变动的非永久性荷载和结构自重区分开，通过对临时荷载进行分类编码，监控软件就能根据施工日志自动更新模型中的荷载矩阵。进行线形分析时，必须剔除临时荷载引起的弹性变形，才能提取出结构真实的无应力线形，这种精细化管理能避免因施工荷载估计不足产生误判。

对于移动频率很高的设备，比如桥面吊机，对其行走路径做局部应变监测尤为重要。监控团队要根据吊机的实际位置，动态修正模型的局部刚度分布与受力模型，通过对比吊机移动前后的位移差值，就能验证模型对临时荷载模拟的准确性。如果实测增量和模拟增量不吻合，就需要重新评估荷载的传力路径或边界约束，直到模型能准确模拟现场的荷载效应。

（三）温差效应的实时传感器采集与理论剥离

温度是钢结构最敏感的外部变量之一，日照温差、环境梯度温差都会引发桥梁明显的伸缩与弯曲变形。为了精准掌握结构的真实受力状态，必须在关键截面布置温度传感器，建立全天候温度监测网络，采集内容包括环境气温、钢板表面温度以及沿梁高方向的温度分布梯度。

理论剥离技术是把监测得到的总位移和总应力分解为温度效应部分和荷载效应部分。由于钢材的热膨胀系数比较稳定，可以通过建立温度场与变形场的耦合计算模型，精准推算出特定温度梯度下的理论位移，用现场实测值减去温度引起的计算值，剩余部分就是结构重力、预应力或施工误差引起的真实偏差。这个剥离过程是进行线形调整的前提，否则施工决策就会受到温度干扰出现偏差。

为了减少温差干扰，重要测量工作一般安排在凌晨温度分布均匀的时段进行，即便在这个时段，结构内部仍可能存在残余温差。通过建立长期的温度与位移关联数据库，监控系统可以训练出针对该桥梁的温度补偿模型，借助这个模型，监控人员就能在任意时间点对测量数据做温度修正，把不同时刻的观测值归算到标准参考温度下，大幅提高线形控制的时效性。

三、特殊结构的线形与内力主动控制

特殊结构桥梁因其受力体系复杂、施工工序交叉多，线形与内力的控制难度远高于常规钢结构桥梁，需要结合结构特点制定针对性的主动调控方案，避免误差累积影响成桥状态。相较于传统被动监测后再调整的模式，主动控制强调在施工过程中提前预判偏差趋势，通过预调整、动态干预的方式，将线形和内力始终控制在设计允许范围内，保障施工安全与成桥质量。

（一）悬索桥主缆线形与钢箱梁环缝焊接的变形协同控制

悬索桥成桥后主缆线形是决定桥面标高、吊索力均匀性的核心要素，而钢箱梁吊装阶段的焊接变形，会反过来干扰主缆的受力状态与线形走势，因此必须建立两者的变形协同控制机制。在猫道架设完成后，首先要根据基准索股的实测线形完成放样修正，结合施工阶段主缆的弹性伸长、恒载压缩提前给出预抛高值，避免成桥后主缆线形低于设计标高。钢箱梁节段逐段吊装对接过程中，每完成一对吊索张拉后，不仅要监测主缆的索股偏移和鞍座滑移量，还要同步测量钢箱梁环缝接口的错边量与坡口间隙，明确焊接变形对整体线形的影响规律。焊接施工

前,要根据当前主缆的实测线形调整钢箱梁的匹配姿态,通过预留焊接反变形量,抵消焊缝收缩引发的局部下挠。环缝焊接遵循对称施焊的原则,从箱梁腹板向顶板、底板依次推进,避免单侧收缩引发钢箱梁整体扭转变形,进而拉动主缆出现不均匀偏位。每完成一个节段的焊接作业后,及时复测主缆线形与钢箱梁标高,计算两者的变形耦合关系,调整下一节段的吊装对位参数和焊接工艺,最终保证主缆线形偏差和钢箱梁桥面线形偏差均满足规范要求,实现两者的变形协同受控。

(二) 斜拉桥多次张拉调索与主梁标高的动态耦合干预

斜拉桥施工过程中,索力调整 and 主梁标高变化相互影响,一次张拉调索很难同时满足成桥索力和线形的要求,因此需要通过多次张拉调索,结合主梁标高的动态观测,实现两者的耦合干预。在悬臂拼装施工阶段,每一个节段吊装完成后,都会对已张拉斜拉索的索力和前端主梁标高产生影响,随着悬臂长度增加,这种耦合效应会不断累积放大。开展动态耦合干预前,首先要基于已经完成施工节段的索力、标高实测数据,修正后续施工阶段的计算模型,明确当前索力变动对主梁标高的影响系数,以及标高偏差需要通过多大的索力调整来抵消。在每次调索过程中,遵循“对称张拉、分级加载”的原则,每完成一级张拉都要同步测量索力增量和主梁标高变化,实时核对实测结果和理论预测的偏差,避免单次调整幅度过大引发应力或位移超限。当主梁标高出现累积偏差时,不能仅通过单一调整当前节段的索力来修正,要结合后续多个节段的索力张拉方案做全局优化,通过小幅、多次的动态干预,逐步将标高偏差消化在施工过程中,避免局部索力过大或过小,保障斜拉索受力均匀性和主梁线形的平顺度,最终实现成桥状态下索力和主梁标高同时满足设计要求。

(三) 钢管拱桥合龙配切量计算与瞬时合龙锁定技术

钢管拱桥的合龙精度直接决定成桥后的拱肋线形与内力分布,受昼夜温差、施工荷载、已安装节段加工及安装误差的共同影响,合龙口的间隙和姿态始终处于动态变化中,精准计算合龙段的配切量是实现顺利合龙的核心前提。配切量计算需要以连续多日的合龙口实时监测数据为基础,在凌晨温度稳定的时段连续测量合龙口的长度、上下口间距以及左右拱肋的轴线偏位,提取不同温度下合龙口尺寸的变化规律,再结合预定合龙时间的预计温度,换算出合龙状态下的真实龙口开口量。最终配切量需要在开口量的基础上,综合考虑焊缝收缩余量、设计顶推合龙的顶伸量以及已拼装拱肋的累积误差进行修正,避免配切尺寸偏差引发合

龙顶推困难或合龙后内力超限。

瞬时合龙锁定技术是保障合龙阶段受力稳定的关键，在配切完成、合龙段吊装到位后，需要快速完成合龙口的连接锁定，尽可能减少温度变化对合龙受力的干扰。一般选择在设计要求的合龙温度窗口内开展锁定作业，先通过临时劲性骨架将合龙口对顶固定，限制合龙口在温度变化下的自由变形，快速完成主拱肋的焊接作业，保证合龙后拱肋的内力与线形符合设计预期。合龙锁定完成后，第一时间复测拱肋线形与控制截面应力，核对实测结果与理论预测的一致性，确认状态稳定后再卸除临时锁定装置，进入后续施工工序。

第七章 钢结构桥梁连接技术

连接技术是保障桥梁整体性与受力传递连续性的核心，涵盖了焊接与高强度螺栓连接等关键工艺。本章重点探讨高强度螺栓的施工管理、施拧流程以及最终的质量验收标准，力求在复杂环境下实现结构节点的安全可靠。通过对连接件性能的严格把控与施工工艺的精细化管理，可以显著提升桥梁结构的耐久性与抗疲劳能力，延长桥梁整体服役寿命，降低后期运维成本。

第一节 高强度螺栓连接施工

高强度螺栓连接施工质量直接关系到桥梁在动载作用下的疲劳寿命与结构整体稳定性。施工过程涉及精密的管理流程与严格的工艺控制，需从材料入库、安装施拧到成桥检测进行全过程、全方位的精细化监控。只有确保每一个螺栓副的预紧力都符合设计要求，才能充分发挥摩擦传力的力学优势，切实保障桥梁在长期服役过程中的连接可靠性。

一、高强度螺栓连接副的现场管理

现场管理是确保螺栓性能稳定的第一道防线，必须涵盖从进场验收、仓储保护到施工环境监控的全生命周期管理。建立严密的物资追踪与动态管理制度，能有效规避因环境污染或保管不当导致的扭矩系数波动问题。所有参与施工的人员需经过专门的岗位培训，对螺栓的物理特性和施工要求有深刻认知，确保在任何工况下都能严格执行操作规范，不随意简化作业流程。

（一）螺栓进场复验（扭矩系数、机械性能）的批次要求

高强度螺栓连接副是由螺栓、螺母和垫圈组成的配套整体，其性能的一致性在保证预紧力准确达标、受力均匀的核心前提。在进场验收阶段，必须按照固定批次进行严格的复验，以核实其扭矩系数和机械性能是否符合国家现行标准及项目设计要求。

具体批次划分应遵循以下规定：同一性能等级、材料、炉号、螺纹规格、长度、机械加工、热处理工艺及表面涂层处理的螺栓连接副，每二千套为一个验收批。如果单项工程的进场数量较少，不足二千套，也应作为一个独立的批次进行抽样检测。抽检工作需在施工所在地具有相应资质的第三方检测机构完成，严禁在未经复验、结果未出的情况下就将产品提前投入施工现场使用。

复验项目主要包括扭矩系数，每批抽取八套连接副进行测试，其扭矩系数的平均值应在至之间。同时，还需对螺栓的拉力载荷、螺母的保证载荷以及硬度等机械性能进行抽样复查。这种多维度的复核机制能够有效排除因原材料波动或生产工艺瑕疵带来的安全隐患，为后续施工提供精准可靠的数据支撑。

（二）包装破损、防潮处理与当天未用完螺栓的回收

施工现场对螺栓连接副的存放环境有着严苛的要求，应设置专门的库房进行分类存储，并保持库房内部干燥、通风。如果发现包装箱破损，必须立即对内部螺栓进行质量核查，重点观察是否有锈蚀情况发生或出厂保护油污流失的现象。若螺栓表面的出厂保护油层遭到破坏，会直接导致扭矩系数发生不可控的变化，此类螺栓在未重新进行复验合格前，严禁投入现场使用。

防潮处理是现场管理的重中之重，尤其在南方梅雨季节施工或沿海高湿度地区修建桥梁时更是如此。施工现场领用螺栓时应根据当天施工计划按需领取，严禁一次性大批量领取后堆放在露天作业环境中。在工作面未用完的螺栓连接副，必须在当日作业结束前统一回收至库房，重新密封存放。严防螺纹沾染泥沙或因受潮产生浮锈，以确保螺栓副始终处于理想的安装状态，避免因环境污染导致的紧固力损失。

针对已拆封但未使用的螺栓，应由专人负责清点并做好台账记录。这些回收的螺栓在后续领用使用前，需重新涂抹保护油或进行全面的适应性检查，确认性能符合要求后方可再次投入使用。这种精细化的物料管理不仅能降低不必要的工程成本损耗，更关键的是保证了每一套安装在桥梁上的螺栓都具备高度一致的摩擦性能，从而提升结构整体的受力均匀度，避免局部应力集中问题。

（三）雨、雪、大雾天气及极端温度下的施工作业禁令

环境因素对高强度螺栓摩擦面的抗滑移系数影响巨大。在雨、雪天气中，钢板摩擦面会因积水、结冰而改变表面力学特性，严禁进行任何形式的螺栓安装与施拧作业。大雾天气下，空气湿度往往会超过百分之八十五，这种高湿度环境极

易使摩擦面产生肉眼难见的细微水膜,从而导致螺栓紧固后预紧力大幅衰减,达不到设计要求。

温度的波动也会对扭矩扳手的精度和螺栓自身的伸长量产生明显干扰。在零下十摄氏度以下或四十摄氏度以上的极端温度环境中,除非施工方提前采取了必要的环境调节措施,并重新标定校准了施拧工具,否则应当立即停止施工作业。在寒冷季节施工,施工人员必须注意彻底清除摩擦面上的霜冻,确保连接板接触面完全干燥与清洁,防止因环境因素导致工程质量出现难以预测的波动,留下长期安全隐患。

除了自然天气的限制,对于强风环境下的高空作业也应审慎评估。强风不仅直接威胁操作人员的人身安全,还会影响扭矩施加的稳定性,导致终拧扭矩出现偏差。若必须在严苛环境下开展作业,则需提前搭建完善的防护作业棚,并在作业前后对螺栓的扭矩值进行高频率抽测,通过动态数据监控来抵消不利环境因素对工程质量产生的负面干扰,保证施拧质量稳定。

二、高强度螺栓的施拧工艺

施拧工艺是高强度螺栓施工的核心环节,其目的在于通过标准化的操作流程,使连接副产生符合设计要求的预期轴向拉力。在施工过程中,必须严格遵守紧固顺序与增量原则,利用精密合格的工具对每一颗螺栓的紧固状态进行量化控制,不能仅凭施工经验随意操作。

(一) 初拧、复拧与终拧的扭矩递增控制原则

高强度螺栓的紧固过程并非一蹴而就,而是需要经历由浅入深、由松到紧的多次循环,逐步消除连接板件间的缝隙,让所有螺栓均匀受力。初拧的主要任务是使板束紧密贴合,通常初拧扭矩应达到设计预紧力的百分之五十左右。对于大型节点或板束厚度较大的区域,还需在初拧后增加复拧环节,复拧扭矩值应与初拧扭矩保持一致,以此确保所有螺栓的受力起点均衡一致,避免先后施拧导致的预紧力差。

终拧则是最终实现设计轴力的关键步骤,必须在初拧或复拧完成后的二十四小时内结束,避免间隔时间过长摩擦面受潮污染。终拧扭矩必须严格按照计算值执行,确保螺栓轴力的离散度控制在极小范围内。在整个递增过程中,操作人员应在螺栓上做好颜色标记,通过分段加载的方式观察垫圈与螺母的位移变化,避

免出现漏拧。这种阶梯式的受力控制方法，能有效避免因板件变形不均导致的内力重分配问题，让节点整体受力更均匀。

为了提高作业效率，施工班组通常会配备不同量程的扭矩扳手开展流水作业。初拧工具与终拧工具必须严格区分，严禁混用，避免工具精度偏差影响扭矩控制。每一阶段完成后，质检人员应对紧固状态进行初步目测，检查是否有漏拧或跳拧现象，发现问题立即整改。这种多层次的递增控制策略，不仅是出于对力学原理的遵循，更是为了在复杂的桥梁结构中构建起一道稳固的防线，确保连接节点的强度储备符合设计要求，能够承受长期动荷载作用。

（二）扭矩法与转角法的适用场景与操作规范

扭矩法是日前钢桥施工中最常用的施拧方法，主要依靠扭矩扳手直接控制紧固力。这种方法操作简便、结果直观，适用于大多数标准环境下的施工。但在使用前必须对扳手进行定期校验，确保扭矩误差控制在百分之三以内，精度达标后方可投入使用。作业时应平稳施力，避免突发冲击载荷，直至扳手发出达到预设数值的信号后停止施力。该方法对螺栓连接副的润滑状态较为敏感，因此对螺栓的存储条件要求极高，必须保证保护油层完整。

转角法则多用于对紧固精度要求更高或螺栓规格巨大的特殊节点场景。其操作规范是先将螺栓初拧至一个固定的起始扭矩，使板层紧密贴合，然后从该起始位置开始旋转螺母，使其转过一个预先通过试验确定的特定角度。转角法的优势在于能够排除摩擦阻力不均对轴力的干扰，使螺栓直接进入稳定的受力状态，预紧力精度更高。但在应用此法时，必须提前通过现场工艺试验确定转角数值，并严格记录每一颗螺栓的旋转刻度，确保每一步操作都符合要求。

实际工程中，两种方法各有优劣，选择时需综合考虑节点重要性、现场作业空间以及施工队伍的技术水平来确定。扭矩法对工具精度依赖性强，操作简单；转角法则对操作人员的熟练程度要求更高，过程管控更严格。不论采用何种方法，均应在施工方案中明确具体的操作参数，并在首个节点安装时开展工艺验证，确保所选工艺能够精准转化为结构所需的紧固力，满足设计受力要求。

（三）节点板束较厚时的复拧与接头紧固顺序

在大型钢结构桥梁中，核心受力节点处的板层数量往往较多，板束总厚度增加会导致紧固过程产生显著的相互干涉，后拧螺栓会挤压已经拧紧的螺栓，导致其预紧力下降。为了消除这种群栓效应的影响，必须坚持从中心向四周扩散的紧

固顺序。对于大型接头，应由中央向两端对称进行施拧，或者由刚度大的部位向不受约束的自由端推进，这样可以将板件间的缝隙逐层赶出连接区域，保证受力均匀分布，避免缝隙残留。

针对厚板束节点，复拧环节不仅不可或缺，有时甚至需要进行多次复拧才能保证预紧力达标。这是因为前序紧固的螺栓在后续螺栓受力后，会因为板间压缩变形而出现明显的应力松弛，预紧力会逐步降低。通过循环复拧，可以补偿这种由于厚度效应带来的预紧力衰减，让所有螺栓最终的预紧力都达到设计要求。施工人员在紧固过程中应密切关注板件边缘的缝隙变化，确保每一道工序完成后，板束均处于紧凑的受压状态，避免产生局部剪切风险，影响节点受力性能。

对于此类复杂节点的施拧，建议提前建立详细的紧固路径图，并在现场由专人负责指挥调度，确保施工顺序符合要求。操作人员应在每拧完一个螺栓后在相应的图表上做好记录，避免漏拧错拧。这种可追溯的数字化管理方式配合严密的物理施工顺序，能够有效解决厚板连接中容易出现假紧现象，为桥梁节点提供长期稳定的力学支撑，防止在桥梁使用寿命期间出现因螺栓松动导致的结构病害，保障结构安全。

（四）钢桁梁整体节点厚板束高强螺栓群的施拧顺序与扩展规律

钢桁梁整体节点属于桥梁结构中的核心受力枢纽，通常包含多片纵横方向的板件交汇，板束层数多、总厚度大，螺栓群排列密集且受力复杂，施拧顺序的合理性直接决定了整个节点预紧力的均匀性和整体承载能力。

钢桁梁整体节点厚板束的螺栓群施拧，必须遵循“由交汇核心向四周扩散、对称同步施拧”的基本原则。施拧作业需要从节点板块交汇的刚度最大中心位置开始，逐步向不同方向的板束边缘对称扩展，严禁从一侧向另一侧单向推进，也不得从边缘开始向中心施拧。这种由内向外的扩展规律，可以让板件间的间隙逐步被挤出节点范围，避免板件在紧固过程中产生内部翘曲或间隙残留，防止先后施拧的螺栓出现过大的预紧力差值。

对于包含多个拼接区的整体节点，需要划分作业区域，按照“先主桁拼接区、后联结系拼接区，先刚性拼接板、后自由拼接板”的顺序依次推进，每个区域内部依然遵循由中心向四周扩散的规律。当多班组同步作业时，需要保持施拧进度一致，避免单侧提前完成紧固，导致节点产生不均匀的初始变形，影响后续拼接精度。

整个施拧过程需要严格执行初拧、复拧、终拧的三次紧固流程，初拧阶段就需要按照既定顺序完成全部螺栓的初拧作业，不得分段完成初拧后直接进入终拧，复拧同样需要按照相同的扩展顺序重复一遍，确保所有螺栓都完成应力重分配，消除板束压缩带来的预紧力损失后，再统一进行终拧作业，最终保证所有螺栓的预紧力都符合设计要求，节点整体受力均匀稳定。

三、施拧质量的检查与验收

质量验收是确保施工成果符合设计标准的最后关口，必须采用科学规范的检测手段对已拧螺栓进行全面排查。通过对扭矩值、接触密贴度以及整体连接状态的综合评估，判定节点是否达到预定的力学性能，并对缺陷部位进行闭环处理，不留下任何质量隐患。

表 7-1 列出了高强度螺栓施拧质量不同检测方法的特点对比，方便施工单位根据现场实际情况选用。

表 7-1 高强度螺栓施拧质量检测方法对比表

检测方法	操作难度	对原有结构的影响	检测精度	适用场景
紧扣法	简单	无破坏	满足一般抽检要求	大批量常规节点抽检
松扣法	复杂	局部拆装	精度更高	关键受力节点复核、 争议复检

从表 7-1 中可以看出，不同检测方法适配不同的验收场景，现场验收时需结合节点重要性灵活搭配使用。

（一）“紧扣法”与“松扣法”的检查操作规程与判定标准

“紧扣法”也称补拧法，操作时使用检查扳手对螺栓施加一个等于终拧扭矩的力，观察螺母是否产生微小的转动。如果螺母转动角度在规定范围内，则判定为合格。这种方法的优点是不破坏现有的连接状态，检测效率较高，特别适用于大批量螺栓的快速抽检。判定合格的标准通常要求扭矩值的偏差在正负百分之五以内，且螺母无明显错位情况。

“松扣法”则相对复杂，需要先在螺母与螺栓端部做好对位划线，将螺母退回三十度左右，再重新拧至划线位置，读取此时的扭矩值。该数值与设计终拧扭矩的偏差应严格控制在允许范围内。松扣法能更准确地反映出螺栓内部的真实受力情况，但因其操作繁琐，检测速度慢，往往用于对关键受力节点的复核或在对

紧扣法检测结果产生争议时使用。

这两种方法在实际应用中相辅相成，通常每节点抽检量不应少于百分之十且不少于二套，保证抽检的代表性。若发现不合格项，必须加倍扩大抽检范围，直至查明问题产生原因。检测过程需详细记录每一颗螺栓的反馈数据，对于偏差超标的部件应标记位置并深入分析其产生原因，从工艺层面整改问题。通过这种严谨的检查规程，可以及时发现施拧工艺中的系统性偏差，为施工质量提供准确的量化依据。

（二）节点栓接板层密贴度（0.3mm 塞尺插入面积）检查

连接板层的密贴程度直接决定了摩擦力的传递效果，是验收中不容忽视的一项关键指标。检查人员应使用的塞尺对节点边缘进行逐一探测。在正常情况下，塞尺不应能插入板间缝隙。如果由于板件加工出厂误差导致局部存在间隙，塞尺插入的深度不应超过二十毫米，且这种局部间隙现象不应在节点周围普遍存在。

对于面积较大的连接面，需要评估间隙区域占整个接触面的百分比。若发现塞尺能够插入的面积超过了节点总面积的百分之二十五，则视为该接头密贴度不合格。这种情况往往意味着板材存在严重翘曲变形或紧固顺序错误，必须松开全部螺栓重新校正板件位置。密贴度的检查不仅是力学传递上的要求，也是为了防止外界水分进入板缝造成内部钢材腐蚀，影响桥梁长期耐久性。

在处理间隙超标的问题时，严禁使用强行补拧螺栓的方法来强行消除缝隙。应通过调整板件位置或在必要时使用不锈钢衬板进行填塞，不得采用普通钢板随意填塞。所有的调整工作完成后，该节点的所有螺栓必须重新按照初拧到终拧的完整程序进行施工，并再次组织专项验收，确认密贴度达标。只有确保每一处接触面都紧密咬合，才能真正发挥高强度螺栓连接的抗剪能力，延长桥梁的后期维护周期，降低运维成本。

（三）欠拧补拧与超拧更换的判定及换件防滑移处理

在验收过程中，发现扭矩不足的欠拧螺栓应立即进行补拧。补拧必须按照终拧的规范要求重新操作，并在完成后再次进行扭矩检测，确认扭矩达标。然而，对于超拧的螺栓，处理方式则完全不同。超拧会导致螺栓产生过大的塑性变形甚至颈缩，这种力学损伤是不可逆的，因此超拧螺栓严禁通过简单放松扭矩来处理，必须成套更换为全新的连接副，才能维持结构的整体安全性，避免埋下隐患。

更换螺栓时需要特别注意保护原有摩擦面，防止其在拆装过程中受到损伤，

破坏原有抗滑移性能。由于螺栓已被拆除,节点局部可能会发生微小的受力转移,必须重新检查整个节点摩擦面是否受损或被污染。如果发现滑移面有划痕或原有涂层脱落,应使用砂轮机或钢丝刷重新进行打磨处理,使其恢复至要求的抗滑移系数水平,保证摩擦传力效果。新换上的螺栓必须重新经历完整的初拧复拧终拧紧固过程,并进行百分之百的验收检查,确保更换质量达标。

防滑移处理是保障连接可靠性的重要措施。在换件过程中,任何沾染到摩擦面的油污、铁屑必须彻底清理干净,不得残留杂质。如果节点在更换过程中出现了明显的滑移迹象,则需对整个节点进行重新加固或调整板件位置,消除滑移带来的受力影响。通过对欠拧与超拧现象的分类精准处理,可以构建起一个零缺陷的连接系统。这种对质量问题的严谨态度,体现了桥梁建设中对安全底线的坚守,确保了钢结构桥梁在长期服役中的结构稳固与运营安全。通过多维度的质量监控,我们能够将施工中的人为误差降至最低,为打造长寿命、高品质的桥梁工程奠定坚实的技术基础,为行业的高质量发展提供可靠的技术支撑。

第二节 焊接连接现场施工

现场焊接连接是钢结构桥梁施工中极具挑战性的核心环节,作业全程受气候、场地环境、作业空间等外部客观因素干扰较大,任何一处细节失控都可能对焊接质量造成不可逆的影响。为了保证焊接接头的力学性能完全符合设计要求,施工团队必须从环境保障、操作规范以及变形控制等多个维度出发,实施精细化管理与全过程质量监控,确保每一道焊缝都能经受住长期荷载与自然环境的考验。

一、现场焊接环境保障

焊接环境的稳定性是获取高质量焊缝的基础条件。野外桥位施工常面临大风、低温及潮湿气候的侵袭,通过搭设物理防护设施和采取针对性温控措施,能够为焊接作业创造一个相对封闭且稳定的微型作业环境,从而规避外部不利因素对接头微观结晶组织产生的不良影响,为后续各道工序打下坚实的基础。

(一) 防风棚、预热棚的搭设与密封保温措施

针对桥位现场常年多风的特点,焊接作业区域必须设置全封闭式的防风棚。防风棚的骨架通常采用轻型型钢或专用脚手架构件现场组装,外围覆盖高密度的

防火阻燃帆布或双层彩钢板，兼顾防护效果与搭建便利性。棚体与梁体之间的所有缝隙应用耐火棉、石棉绳或橡胶条进行严密填充，确保内部空气流动处于稳定的微循环状态，严防过快的穿堂风导致电弧不稳定，或是引起熔池急速冷却而产生气孔缺陷。

在气温低于施工规范要求的临界值时，预热棚的搭设显得尤为关键。这种棚体在基本防风功能的基础上增设了内部保温层，墙体结构中可以加入聚苯板或岩棉毡增强保温效果，内部配置自动化电加热器或大功率红外线灯具，以此维持工作区域的温度处于预设的恒定区间。密封措施的完善程度直接关系到棚内能源的利用效率，良好的保温性能可以有效降低焊接过程中的热量损失，确保母材始终处于预定的工艺温度范围内。

关于防风棚的搭建与密封管理，主要涉及以下几个关键点：

1. 结构形式需兼顾整体稳定性和现场移动灵活性，底部应加装重型滚轮或专用滑轨，方便在不同梁段之间进行快速平移和定位。
2. 密封材料的选择必须通过严格的阻燃性能测试，防止高空焊接产生的火红飞溅物引燃防护设施，确保施工现场的安全稳定。
3. 棚顶应科学设置带过滤功能的排烟视窗，在有效排出焊接烟尘、改善作业环境的同时，不影响棚内的整体保温效果。

（二）冬季低气温环境下焊前预热与焊后缓冷的操作

严寒季节下，钢材的冷裂纹倾向会随着环境温度的下降而显著增加。为了应对这种不利影响，焊前预热工序必须严格按工艺文件执行。施工人员通常使用柔性陶瓷电加热器，将其紧贴在待焊坡口两侧各不小于板厚三倍、且不小于一百毫米的范围内，并通过多点分布的热电偶测温计进行实时温度监控。加热温度应依据钢材的厚度以及碳当量进行精准计算，一般控制在100至150摄氏度之间，加热过程中要确保整体受热均匀，避免局部温差过大。

焊接完成后的缓冷操作对于氢气的充分逸出及组织应力的平缓释放至关重要。施工人员应在焊缝及其热影响区立即覆盖加厚的石棉保温被或特制的矿棉布，形成一层厚度适宜的临时保温层。对于厚板或高强钢结构，有时还需执行后热处理，即在焊接结束瞬间立即加温至200至250摄氏度并持续保温两小时以上。这种做法能使残留在金属晶格中的氢原子拥有充足的时间进行扩散逸出，从根本上防止延迟裂纹的产生。

在低气温操作环境下，整个加热与冷却过程必须记录详尽的温控曲线，每一道工序的温度采集点都应具有代表性，能够真实反映作业区域的温度变化。如果预热温度未达到设定值，严禁开启焊接电弧。同样，如果在缓冷过程中保温层发生脱落，必须立即采取补救措施，防止因温差骤降增大脆性断裂的风险。

（三）焊接区域结露、积雪的吹干与除湿处理

湿度超标是产生焊接气孔的主要诱因。在雨季或清晨时段，梁体坡口表面受温差影响极易形成肉眼难以观察到的冷凝水膜。施工前必须利用大功率工业吹风机或清洁的压缩空气配合喷灯，对坡口区域进行彻底的物理吹干。除湿处理不仅局限于坡口表面，还应涵盖周边一定范围的母材区域，确保焊接热影响区范围内无任何水分残留。

针对降雪天气，焊接区的积雪清理必须细致到每一个隐蔽缝隙，不能留下任何死角。在物理除雪完成后，利用氧乙炔火焰对坡口及周边十至十五厘米的范围进行循环烘烤，直到表面无可见水气并升温至环境温度以上方可施焊。与此同时，施工人员需在防护棚内布设工业级除湿机，将内部相对湿度控制在百分之八十以下，确保电弧燃烧过程中的电离能保持在稳定状态，提高熔滴过渡的稳定性。

由于现场环境处于动态变化中，湿度的监测应贯穿整个焊接作业时段。在湿度较大的环境中，焊材存放也是管控重点，所有焊材在使用前必须经过严格的高温烘焙。当环境湿度超过规定限值时，必须停止作业并启动棚内强力抽湿系统。通过这种全方位的除湿控水手段，可以极大程度地净化焊接微环境，减少氢气孔及条状夹渣等缺陷的产生几率。

二、大跨桥梁与钢管拱现场主焊缝焊接

大跨桥梁的主焊缝是结构受力的关键枢纽，焊接质量直接决定了整座桥梁的整体承载能力与使用寿命，必须根据不同结构形式的受力特点，制定针对性的焊接工艺，严格管控每一道焊接工序的作业质量。

（一）悬索桥 / 斜拉桥钢箱梁环缝的全断面对称同步退焊工艺

钢箱梁在焊接过程中，焊接变形会直接影响梁段的线形精度和成桥后的内力分布，采用全断面对称同步退焊工艺，可以通过多焊工在对称位置同步焊接，让不同位置的焊接变形相互抵消，最大程度控制梁段的角变形和纵向收缩变形，保证整体线形符合设计要求。

作业开始前,需先将环缝坡口按顶板、底板、腹板、斜腹板划分成多个独立的焊接区域,根据板厚调整坡口参数,确认定位焊焊缝无裂纹、气孔等缺陷后,安排对称点位的焊工同时起焊。焊接过程中,所有焊工需保持相近的焊接速度,同一截面两侧的焊接填充量差需控制在合理范围内,避免因填充不均产生偏载变形。退焊作业需从坡口根部开始,分段逆向施焊,每段焊接长度控制在300~500毫米,通过短段退焊分散焊接应力,降低应力集中程度。

整个焊接过程需要分多层多道完成,每完成一道焊接都需要及时清理焊渣,检查表面是否存在缺陷,确认合格后再进行下一道焊接。在焊接完成二分之一填充量后,需要松开环缝的临时定位卡具,让钢箱梁在自由状态下完成后续焊接,释放部分焊接应力,避免约束状态下产生过大的残余应力。全部焊接完成后,需要按照规范要求对焊缝进行无损检测,确认内部质量符合要求,同时测量梁段的实际线形偏差,若偏差超出允许范围,需通过针对性的火焰矫正进行调整,确保满足合龙精度要求。

(二) 钢桁梁工地对接接头的平位、立位及仰位全熔透焊接

钢桁梁的工地对接接头因杆件安装位置不同,会同时存在平位、立位及仰位多种焊接作业姿态,全熔透焊接要求接头根部完全焊透,对焊工操作技能和工艺参数控制提出了更高要求。作业开始前,需根据不同焊接位置调整坡口角度和间隙:平位焊接可适当增大间隙保证根部熔透,仰位焊接则需适当缩小间隙,避免熔池下坠造成焊瘤缺陷。定位焊完成后,需彻底清理定位焊焊缝表面的焊渣,并检查是否存在裂纹等缺陷,若发现缺陷必须彻底铲除后重新定位。

焊接过程需严格按照预设的分层填充顺序作业,平位焊接采用直线或小幅摆动运条,控制每层焊缝厚度不超过4毫米,保证熔池充分渗透;立位焊接采用从上向下的坡口清理和从下向上的焊接施焊,通过小幅锯齿形摆动控制熔池温度,避免液态金属下淌;仰位焊接需选用较小直径的焊条和稍低的焊接电流,保持短弧作业,通过快速摆动控制熔池体积,确保根部熔透同时避免焊缝成形不良。

整个接头需保证全截面熔透,填充完成后进行盖面焊接,盖面焊缝需超出坡口边缘1~2毫米,保证焊缝余高符合规范要求,避免应力集中。全部焊接完成后,立即按规范要求进行无损检测,重点检测接头根部和不同焊接位置衔接部位,确认无未熔合、裂纹、气孔等内部缺陷,保证接头力学性能完全满足设计要求。

（三）钢管拱桥主弦管对接单面焊双面成型与管内焊缝质量保障

钢管拱桥主弦管通常壁厚较大且为封闭环形结构，受作业空间限制无法在管内进行清根和背缝焊接，单面焊双面成型工艺成为保障对接接头质量的核心方案，既能实现全熔透的焊接要求，又能避免额外的管内作业，大幅提升施工效率。

正式焊接开始前，需严格检查坡口加工精度和组对间隙，主弦管一般采用 V 形或 U 形坡口，钝边厚度需控制在 2~4 毫米，间隙控制在 3~6 毫米，错边量必须符合设计和规范要求，过大的错边会直接导致根部熔透不良。组对定位焊需在坡口内侧对称施焊，定位焊缝必须保证全熔透，焊后彻底清理焊渣并逐一检查，若发现裂纹、未熔合等缺陷必须彻底清除后重新定位。

打底焊接是实现单面焊双面成型的关键工序，通常采用钨极氩弧焊或纤维素焊条手工电弧焊，焊接过程中需严格控制焊接电流和运条速度，保证坡口根部完全熔透，同时让液态熔渣均匀流动到背面形成成形良好的背缝。填充焊接时需分层多道施焊，每层焊接完成后彻底清除焊渣，检查层间有无缺陷，确认合格后再进行下一道焊接，同时严格控制层间温度，避免因温度过高或过低影响力学性能。

由于无法从管侧直接观察背缝成形，管内焊缝质量保障成为管控的核心重点。目前施工中通常采用全自动超声检测结合射线检测的方式，对整条对接焊缝进行百分之百的无损检测，重点排查根部未熔合、夹渣、气孔等缺陷。若检测发现小的缺陷可通过打磨补焊处理，缺陷较大时则需从外侧彻底铲除缺陷区域，重新按工艺要求补焊，再次检测确认合格后方可进入下一道工序。对于管径允许的主弦管，可在管内布设柔性爬行者进行摄影检测，直观观察背缝的成形质量，进一步提升缺陷检出率，确保每一处接头的内在质量完全符合设计要求。盖面焊接完成后，需将焊缝表面余高控制在规范允许范围内，磨除接头部位的余高突变，避免应力集中，保障主弦管接头长期受力安全。

三、现场焊接变形控制

变形控制是钢结构桥梁现场焊接施工的终极质量目标之一。由于焊接本身是一个局部高温加热与后续冷却的不均匀物理过程，必然会产生内应力和不可逆的塑性变形。只有通过前期的科学补偿和后期的精密检测，才能将这些负面影响降至最低，确保桥梁在交付使用后拥有卓越的结构稳定性和耐久性能，满足国家现行交通荷载的运行要求。

不同焊接变形控制措施的适用场景如表 7-2 所示：

表 7-2 现场焊接变形控制措施适用场景表

控制措施	适用场景	核心作用	操作要点
坡口尺寸修正	所有现场拼装对接	保证焊接金属量均匀分布	拼装后精准测量，间隙超标时堆焊过渡处理
刚性固定	大型箱梁口对接	抵消焊接收缩分力	焊缝完全冷却后再拆除支撑
反变形预置	顶板、腹板直缝对接	提前抵消焊接收缩变形	依据历史实测数据设置预偏量
24 小时时效探伤	高强钢厚板焊接	排查延迟裂纹	严格遵守时间窗口，返修后重新时效

从表 7-2 可以看出，不同的变形控制措施对应不同的作业场景，需要相互配合才能达到最优的控制效果。

（一）反面清根深度与坡口尺寸的修正控制

对于非单面焊的高要求厚板对接，反面清根是消除焊缝根部潜在缺陷的关键操作步骤。清根深度必须依据坡口形式以及首道打底焊缝的实际熔深来精确确定。通常要求清根至露出内部致密的洁净金属层为止，彻底清除气孔、夹渣以及未焊透的部分。在清根完成后，施工人员必须使用角磨机对形成的凹槽进行精细修整，使其呈现出平缓的圆弧状坡面，从而为后续反面填充焊接创造良好的作业条件。

坡口尺寸的现场修正控制同样不可忽视。受环境温差导致的材料热胀冷缩或运输过程中的几何变形影响，现场拼装时的坡口间隙往往会出现不均匀的情况。针对这一问题，必须在施焊前对坡口进行高精度的测量复核。如果间隙过大，应根据规范要求采取在坡口边缘进行堆焊过渡处理或增加嵌条的方案，严禁强行拉拽合拢，避免产生过大的装配应力。

这种对坡口尺寸的微调和修正，能够确保焊接金属量在整个截面上均匀分布，减少收缩不均而引起的局部扭曲变形。每一次清根后的尺寸复核都要记录在案，作为质量追溯的重要凭证。只有通过这种严谨的控制，才能在多道叠焊的过程中保持构件的几何中心线不发生偏移。

（二）刚性固定与反变形在箱口对接中的应用

在大型箱梁口的对接作业中，刚性固定法是抵抗焊接角变形和波浪变形的高效手段。施工人员通常会在箱体的内部侧面设置临时性的撑杆或型钢加劲框架，通过这种外加的刚度约束来抵消焊接热循环过程中的收缩分力。支撑结构在整个

焊接期间必须保持锁死状态，直到整道焊缝完全冷却至环境温度，使得残余应力在受到约束的状态下完成初步的松弛。

反变形技术则是基于对焊接变形过程的精准预判。施工人员在组装阶段，会根据以往的实测数据，主动给出一个与预期变形方向相反的原始预偏位移，以此抵消后续焊接产生的收缩变形。

关于反变形技术的实施，主要涉及以下两个具体方面：

1. 在顶板对接时，预先通过液压千斤顶顶升，使对接边缘形成一个微小的上拱坡度，抵消焊接冷缩产生的下拉力，避免焊后顶板下挠。

2. 对于腹板的长直缝，通过调整坡口角度的大小，利用非对称受热的原理来补偿横向的内弯趋势，保证腹板线型符合设计要求。

这种预见性的工艺设计可以大幅度减少后期的火工矫正工作量，降低矫正作业对母材性能的额外影响。通过将刚性约束的硬性限制与反变形的软性补偿相结合，能够使复杂的箱口对接在焊后回复到设计要求的理论轮廓线上，满足精度要求。

（三）24 小时时效后超声波无损检测的时间窗口执行

无损检测时间节点的科学选择直接关系到检测结果的可靠性。尤其是对于采用高强度低合金钢制造的桥梁构件，焊接后存在明显的延迟裂纹风险。这种裂纹是由氢原子扩散积聚而引起的，往往在焊接完成后的数小时甚至十几个小时后才逐步萌生扩展。严格执行二十四小时时效后再进行超声波检测，是一个不可逾越的质量红线，过早的探伤极有可能漏掉那些尚未完全形成的细微裂缝，造成严重的质量隐患。

在执行超声波无损检测的过程中，技术人员需严格比对设计图纸的焊缝分级标准，对每一条主焊缝进行全覆盖的锯齿形扫查，不遗漏任何可疑区域。检测仪器的探头在移动过程中应保持恒定且适中的压力，并选用高性能的耦合剂确保声波能量能够顺利进入金属内部，保证检测灵敏度。对于检测出的每一处超标缺陷，都必须进行精准定位，详细记录其深度、波幅以及性质，为后续的返修决策提供科学可靠的依据。

返修方案必须经过技术负责人审批，在修复焊接完成后，再次重新计算二十四小时的等待时效，然后执行二次探伤，确认缺陷完全消除。这种闭环式的质量追踪机制确保了所有隐性缺陷都无处遁形。通过坚守检测的时间窗口，施工

方不仅履行了规范要求的程序，更从底层保障了钢桥焊接接头在长期动态循环荷载下的运行安全性。

第三节 栓焊混合连接技术

栓焊混合连接技术作为钢结构桥梁建设的核心工艺，结合焊接的高连续性与栓接的可调节性优势，实现了超大型构件的可靠对接。在处理受力复杂的节点部位时，这种复合连接形式能够显著提升结构整体稳定性，减少单一连接方式带来的应力集中隐患，为特大桥梁的安全施工提供了多样化技术支撑，是当前桥梁工程领域不可或缺的重要工艺手段。

一、栓焊混用节点的受力机理

深入研究栓焊混合节点的受力机理，本质就是探究两种不同连接件在同一荷载场下的协同受力演化过程。通过分析节点刚度、变形协调及内力传递路径，技术人员可以量化不同连接形式对整体受力的贡献，从而在设计阶段就实现连接效率的精准预判与结构优化，确保节点在整个服役期内的性能都维持在安全阈值范围内。

（一）焊接与栓接共同受力的刚度分配理论

焊接接头和高强螺栓连接在受力初期的刚度表现存在明显差异，这种差异直接决定了荷载在两者之间的分配规律。焊接区域依靠金属原子结合成型，初始刚度很高，几乎不会产生相对滑移，因此荷载施加初期，大部分应力会自然向焊缝区域集中。相比之下，高强螺栓依靠板件间摩擦力传递荷载，在达到滑动临界点之前变形量很小，但和焊缝的高刚度相比，它初始阶段分担的荷载比例通常更低。

当外部荷载持续增加，节点区域的应力分布会发生动态调整。如果焊缝发生屈服或者出现局部塑性变形，原本由焊缝承担的荷载就会逐步向周边的螺栓群转移。这种特性要求设计者在计算时必须考虑两种连接方式在变形协调上的差异，目前常用分层叠加法建立计算模型，通过模拟不同加载步长下的连接件位移，确定焊缝与螺栓在不同应力水平下的受力贡献系数。在弹性设计范围内，焊缝一般承担了主要的剪力和弯矩，螺栓则起到辅助支撑、增加系统冗余度的作用。

进一步分析这种刚度分配关系可以发现，板件厚度和材质均匀性也会影响力

流分布。厚板焊接产生的残余应力会提前改变局部刚度场，让螺栓群的实际受力比理论预测更复杂。为了保证协同工作的可靠性，工程实践中通常需要通过试验验证刚度衰减模型，修正传统的静力叠加计算方法。只有掌握这种由刚度差异引导的受力重分配规律，才能避免极端荷载条件下节点发生连锁破坏，维持桥梁结构的完整性。

（二）“先栓后焊”与“先焊后栓”的工艺选择及优劣对比

施工顺序的选择直接影响节点的初始应力状态和最终承载能力，目前行业内常用的两种工艺各有适用场景和优缺点。先栓后焊的工艺逻辑是利用螺栓定位，在焊接前就把构件精准固定在设计位置，能大幅减少焊接过程中的构件宏观位移。但焊接产生的高温不可避免会造成板件局部热膨胀，原本张紧的螺栓可能因为板间缝隙变化出现预紧力损失。

反过来先焊后栓的施工方案，核心思路是先完成焊接热循环，等焊缝收缩变形稳定之后再安装紧固螺栓。这种做法能消除焊接热影响对螺栓预紧力的干扰，螺栓的终拧扭矩更精准可靠。但先焊接带来的自由收缩很容易导致螺栓孔位的几何中心偏移，一旦错孔超标，后续穿孔作业会非常困难，甚至需要破坏性扩孔，因此这种工艺一般只适用于焊接变形控制把握较高的小型节点，或是对螺栓孔精度要求相对宽松的次要构件。

具体项目决策时，工艺选择通常由三个核心因素决定：构件的刚度约束程度，约束度较大的大型箱梁更适合用先栓后焊，能更好维持构件几何构型；焊缝的规模与位置，深坡口、多层多道焊缝散热量大，对螺栓预紧力威胁更高，需要额外做预紧力补偿；现场作业的空间条件，如果作业空间狭窄不利于后期大规模穿栓，一般会选择在地面组拼阶段完成部分栓接工作。

综合对比来看，先栓后焊在大型钢桥建设中应用更广泛，核心原因是它对桥梁整体线形的保障作用无可替代。尽管存在预紧力损失的风险，但通过焊后二次拧紧或者扭矩补偿，就能有效抵消这个负面影响。这种通过工艺组合而非单一工序解决问题的思路，体现了现代桥梁工程在复杂约束条件下的辩证处理思路，也为不同复杂程度的节点连接提供了可参考的技术模板。

（三）规范对混合连接使用的限定条件与设计要求

国家及行业标准对栓焊混合连接的应用设置了明确的限定条件，核心目的是避免受力不明确引发脆性断裂。规范明确要求，同一连接节点中，不能简单将两

种连接的极限承载力线性相加，除非经过专门的试验验证。对于承受动力荷载、疲劳作用明显的关键部位，规范通常要求以焊接作为主要受力方式，螺栓连接仅承担安装定位或是作为安全储备，且螺栓的数量与布置必须满足规定的最小间距与边距要求。

设计层面的要求同样细致。规范要求设计计算书中必须明确标注连接件的施工顺序，因为施工顺序直接决定计算模型的假定前提。对于采用高强螺栓摩擦型连接的混合节点，必须明确提出摩擦面处理的技术指标，抗滑移系数必须通过现场同批次试件检测。另外，设计者需要评估焊接热影响区对螺栓强度的潜在削弱，如果焊缝中心到螺栓边缘的距离小于规定值，就必须采取隔热措施，或是在计算中折减螺栓的有效承载力。

除此之外，混合连接设计还有材料匹配性的强制要求：焊接材料的屈服强度必须和母材匹配，螺栓通常选用高强度等级以适配整体刚度需求。在环境腐蚀等级较高的区域，规范还对连接节点的构造细节提出了防积水、防缝隙腐蚀的具体要求，比如要求连接板边缘做连续密封焊。这些限定条件不仅是设计底线，也是施工过程中的质量监督重点，保证栓焊混合连接技术在发挥灵活性的同时，不牺牲结构的本质安全。

（四）协作体系结合部与钢桁梁节点栓焊混合连接的受力协同

钢桁梁节点作为桁架结构的内力交汇核心，同时承受弦杆、斜杆、纵梁等多方向的内力作用，采用栓焊混合连接时，受力协同性直接决定节点的整体承载效率。协作体系结合部是指不同施工单元、不同受力体系拼接形成的过渡连接区域，该区域的板件层数更多、传力路径更复杂，焊接残余应力与栓接预紧力会相互影响，需要通过合理的构造设计保证各部分受力均匀，避免出现应力集中的薄弱点。

在钢桁梁的拼接节点中，通常将工厂焊接完成的杆件端部设置连接母材，现场通过栓接拼接板完成杆件对接，部分节点会对拼接板边缘采用角焊缝封闭处理，此时主内力主要依靠高强螺栓摩擦面传递，焊缝仅起到定位和防腐蚀密封作用，二者分工明确，受力协同关系清晰。如果是弦杆现场对接的栓焊混合节点，主焊缝承担主要轴向力，拼接侧的螺栓则作为塑性重分布的安全储备，当焊缝进入塑性阶段后，螺栓群可以有效承接转移过来的荷载，避免节点瞬间发生脆性破坏。

要实现稳定的受力协同，需要控制板件之间的贴合密实度。栓接面必须按规范要求除锈和摩擦面处理，初拧终拧的扭矩必须严格检测，保证板件之间的

摩擦力符合设计要求，避免拼接面出现缝隙导致荷载传递中断。焊接作业必须在栓接初挤密完成后进行，控制焊接热输入量，减少焊接变形对栓接预紧力的影响，焊后需要对全部螺栓进行扭矩复核，对预紧力损失超标的螺栓进行补拧，保证两种连接方式始终处于协同受力的状态。

二、栓焊混合连接的施工工序

施工工序的合理编排是栓焊混合连接技术成功应用的关键，每一个步骤的先后顺序和衔接质量，都直接决定节点最终的内力分布和成型质量。通过对定位、初拧、焊接与终拧等核心环节的模块化管控，可以同时提升施工效率和质量稳定性，把人为干扰因素降到最低，确保工程节点达到工业化制造的精度标准。

（一）冲钉定位与部分高强螺栓初拧的固定

构件吊装就位后，第一步是利用冲钉完成孔位初步校正。冲钉直径通常比螺栓孔径略大，通过机械强制对孔，把多层板件的中心对齐。这个环节对冲钉数量有严格要求，通常不少于节点总孔数的三分之一，保证在没有预紧力的情况下，构件也能维持稳定的几何形状，不会因为风载或者自重发生微小错动，为后续螺栓置换打好基础。

冲钉定位完成后，接下来就是部分高强螺栓的初拧作业。这个环节不安装全部螺栓，而是选择在关键受力点装入螺栓，拧到额定预拉力的 50% 左右。这么做的目的是让板件间形成初步压紧力，消除板材平整度误差带来的板间空隙。通过均匀分布的初拧点，节点区域形成稳固的刚性骨架，可以有效抵御后续焊接产生的热收缩力，避免焊接过程中构件发生不可控的扭转变形。

操作过程中对施工顺序的把控非常关键，通常遵循从节点中心向四周发散的原则布置螺栓，保证压紧力均匀平衡。如果顺序颠倒，很可能把板件残余应力锁在节点内部，引发局部板材失稳。初拧完成后的螺栓要做好明显标记，方便和未安装的孔位区分开。这一系列前期准备工作，就像给后续焊接作业搭好了稳固的支架，为高强度焊接提供平稳的作业基础，在复杂气象条件下，这种稳固支撑直接影响后续焊接熔池的成型质量。

（二）环缝焊接时热输入对周边螺栓预拉力的衰减影响

进入焊接阶段后，热输入是影响连接质量的核心变量。焊接弧光产生的高温会快速向母材传导，热流扩散过程会对周围已经初拧的螺栓产生明显影响，具体

表现为：热量引发钢板局部受热膨胀，原本密贴的板层会微观隆起或张开，拉长螺栓的夹持长度，造成预紧力瞬时下降；同时高温可能引发螺栓杆身材料软化，虽然这种软化大多是暂时的，但应力状态下的微小蠕变也会造成扭矩损失。

实际监测数据显示，距离焊缝中心线越近的螺栓，预拉力衰减幅度越大，通常能达到 10%~20%。衰减幅度不仅和焊接热输入量有关，还和焊接速度、散热条件密切相关，如果采用大电流、慢速度的焊接工艺，热量积累更严重，影响范围也更广。为了减轻这种影响，工程中通常采用多层多道焊技术，通过控制层间温度限制热影响区扩大，同时采用合理的跳焊顺序，在空间上分散热量，避免局部区域长时间处于高温状态。

施工过程中要重点监控螺栓的预拉力状态，通过抽样检测相邻螺栓的剩余扭矩，技术人员可以动态掌握预拉力衰减规律。如果焊接过程中发现某位置螺栓预拉力下降过快，必须立刻停工，排查是否存在板件间隙过大或是散热不良的问题。这种对热物理效应的严格管控，体现了栓焊混合连接工艺的精细化要求，只有把热输入控制在合理范围内，才能保证后续终拧工序在稳定的应力基准上开展，保障连接长期可靠。

（三）全部剩余螺栓终拧的跟进与扭矩补偿

焊接完成后，等接头温度降到常温，必须立刻开展剩余螺栓安装和全部螺栓的终拧作业，这个阶段的核心任务是收尾巩固。首先要把未安装螺栓的孔位填满，同时将定位用的冲钉撤除，替换为正式高强螺栓。由于焊缝已经冷却，产生了一定收缩应力，此时节点已经具备足够结构刚度，终拧必须遵循由内向外的原则，分两到三次完成，保证扭矩均匀传递。

针对前期受热影响产生的预紧力损失，终拧过程中必须实施严格的扭矩补偿。对于焊接前已经初拧的螺栓，不能只简单检查扭矩，而是要重新拧紧，把预拉力提升到设计标准值，补偿数值需要根据之前的衰减测试结果微调，保证节点内所有螺栓最终的内力状态趋于一致。这种二次紧固是栓焊混合工艺中不可省略的质量保障，能修复施工过程中产生的动态应力亏欠。

终拧完成后的检测是判断工序合格的最终环节，采用测力扳手对每个螺栓随机抽检，抽检合格率必须达到 100%，偏差也要控制在极小范围内。同时还要重点检查螺栓头和板件的贴合度，避免焊接变形引发垫圈悬空或是局部翘起。通过这种细致严谨的跟进管理，施工团队能把分散的单个构件融合成整体，让桥梁节

点在面对未来重载和环境考验时，拥有足够的韧性与稳定性。整个施工过程中，每一个螺栓的扭矩数据都要实时记录，这是质量追溯体系的重要环节。

三、混合连接的质量控制难点

在栓焊混合连接的实际作业中，质量控制面临多维度的挑战，这些难点往往隐藏在微观材料变化和宏观变形积累过程中。由于焊接热效应和栓接机械约束在同一空间叠加，任何一个环节失控都可能导致整个节点失效，因此必须针对性建立一套全过程、高精度的预防监测体系，有效化解潜在技术风险，保证工程质量万无一失。

（一）焊接热变形导致板层间隙超标的预防与处理

板层间隙超标是混合连接最突出的问题，焊接产生的不均匀热场是引发间隙超标的主要原因。焊接过程中，焊缝冷却收缩产生的内向拉力容易造成板边缘翘曲，让原本应该紧密贴合的摩擦面出现缝隙。一旦间隙超过 0.3mm，螺栓连接的抗滑移性能就会大幅下降，还可能导致水分渗入引发内部锈蚀。预防这类问题的关键是优化焊接顺序，比如采用对称焊、分段退焊等方法，让热变形互相抵消，维持板面平整度。

不同程度间隙的处理方式见表 7-3：

表 7-3 栓焊混合连接板层间隙处理方式表

间隙超标程度	处理方式
未超标可预防阶段	采用对称焊、分段退焊等优化焊接顺序抵消变形
轻微超标	1. 增加辅助夹具物理压紧，抵消变形应力； 2. 终拧前局部调整螺栓紧固顺序，依靠螺栓压紧力强制闭合间隙
严重超标且无法机械消除	拆除重新组装，或在设计允许范围内加设薄钢板衬垫

从表 7-3 可以看出，针对已经出现的板层间隙，需要根据超标程度选择对应处理方式。即便采取了预防措施，如果间隙过大且无法通过机械方式消除，就必须采取拆除重拼或是加设衬垫的补救方案。实际质量控制中，质检员需要用塞尺对每一个连接面逐一排查，尤其是焊缝交汇的三角区域，这里应力最集中，也最容易出现间隙超标。只有把间隙控制在极小范围内，才能保证摩擦力可靠传递，避免结构长期服役留下安全隐患，保障整体结构稳定性。

（二）栓接孔位在焊接收缩后的错位修正与扩孔限制

焊缝的纵向和横向收缩会挤压节点板，导致原本对齐的螺栓孔发生几何位置的微小偏移。这种缩孔现象在厚板多道焊中尤其明显，经常会造成高强螺栓无法顺利穿入，如果强行用大锤把螺栓击入，会损伤螺纹、破坏螺栓受力性能。因此孔位修正必须遵循科学原则，严禁随意大范围火焰割扩，小范围偏差一般用电动绞刀修正，绞除孔周少量金属，让孔形恢复圆滑。

规范对扩孔有非常严格的限制，原则上绞孔后的孔径不能超过原设计孔径2mm，扩孔数量也不能超过该节点总孔数的规定比例。如果错位过于严重，说明焊接工艺或者预装配环节存在重大缺陷，盲目扩孔会严重削弱连接板的有效承载截面，必须上报设计单位核算。为了从源头减少这类问题，施工单位通常会在钻孔阶段预留一定偏差余量，或是采用先钻小孔、焊后再扩钻到设计孔径的二次成孔策略，抵消不可避免的收缩变形。

修正后的孔洞必须处理表面毛刺，保证孔壁光滑无油污。这个过程中，技术人员要实时监测孔位的坐标变化，做好修正记录存档。这种对细节的严格要求，体现了桥梁工程对精度的极致追求。每一个修正后的孔位，都必须保证螺栓能在不受侧向挤压的情况下自然穿入，确保螺栓杆仅承受预期拉力，不会因为孔位不正承受额外的复杂剪切应力。通过严格管控成孔质量，可以大幅降低节点长期服役过程中的应力疲劳风险。

（三）栓接与焊接交叉区域的防腐密封处理

栓接和焊接的交叉区域构造复杂，很容易形成积水的微环境，引发严重电化学腐蚀，尤其是焊缝和螺栓垫圈交界的死角，涂装施工难度大，是防腐体系的薄弱点。解决这个问题的核心是做好全封闭密封，完成终拧后，必须用专用密封胶填充所有板层缝隙，再在螺栓头部和螺母位置喷涂高厚度防腐涂层，形成致密物理屏障，阻断外界腐蚀介质侵入。

除此之外，混合连接区域的底漆处理也有特殊要求。组拼初期，摩擦面通常喷涂无机富锌底漆保证抗滑移系数，但这种底漆在焊接热影响下会分解，影响焊缝质量，因此焊缝周边一定范围内要预先留出不喷涂区域，等焊接完成清理干净后，再做局部补漆。这种分区域、分阶段的涂装工艺，要求施工队伍有很高的协同意识，避免任何一个工序遗漏给后续维护留下隐患。

长期监测数据显示，混合节点的腐蚀通常从边缘向中心蔓延，因此密封处理

不只是涂装，还要完善构造细节。比如设计要求连接板边缘做倒角处理，方便涂料附着；施工完成后还要对密封区域做渗水测试，保证没有空隙让潮湿空气侵入。通过这种严密的防腐策略，钢结构桥梁节点才能在严酷自然环境下保持数十年安全性能，实现工程质量和使用寿命的双重提升，为桥梁长期运营安全提供坚实保障，也让全寿命周期的维护成本可控高效。这些细节处的质量控制，最终汇聚成大桥安全稳固的坚实基础。

第四节 连接节点质量检验

钢结构桥梁的连接节点作为结构受力的核心区域，其焊接质量直接关系到整座桥梁的安全性和耐久性。在现场施工过程中，必须通过一套严格完整的检验程序，确保每一道焊缝都符合设计提出的各项要求，从而保障桥梁在长达数十年甚至上百年的服役周期中保持稳定可靠的结构性能。

一、焊缝外观与内部无损检测

焊缝质量的内部与外部检测是连接节点验收的核心关键环节，外观检查可以帮助现场人员第一时间初步判断焊接工艺的执行稳定性，而内部无损检测则能够深入探测金属材料内部肉眼无法识别的微观缺陷。针对不同质量等级的焊缝，需要采用与之匹配的检测技术手段，不能一概而论。

（一）焊缝余高、咬边、气孔的外观质量标准分级

焊缝外观质量是评价焊接工艺执行情况的最直观指标，涵盖了焊缝几何尺寸、表面缺陷以及整体成型质量等多个维度。针对焊缝余高，不同等级的焊缝有着明确的数值限制，一级焊缝的余高通常要求控制在更小的范围内，目的就是减小应力集中效应，最大限度保障桥梁结构在动荷载反复作用下的疲劳寿命。若余高过大，不仅会在焊缝边缘形成明显的台阶，还会额外增大边缘位置的受力强度，埋下长期疲劳隐患。

咬边现象通常被视为比较严重的质量缺陷，因为它会直接削弱母材的有效受力截面，还会在母材与焊缝的交界处产生尖锐的应力缺口，长期受荷载作用很容易在此处萌生裂纹。对于关键受力部位的焊缝，咬边的深度和长度都有着极为苛刻的限定，通常不允许出现深度超过 0.5 毫米的连续咬边。气孔作为典型的表面

体积型缺陷，它的存在会直接降低焊缝的整体致密性，给腐蚀介质侵入留下通道。在外观检测环节，通常会通过肉眼观察配合低倍放大镜对焊缝表面进行全面普查，详细记录气孔的数量、单孔最大直径以及分布密度。结合各类缺陷的检测结果开展综合评定，会将焊缝外观质量划分为不同等级，只有达到合格标准以上才能进入下一道施工工序。通过精细化的外观测量，现场施工人员能够及时调整焊接参数，保证熔池形态的稳定，从而从源头上预防结构性损伤的产生。表 7-4 列出了不同等级焊缝常见外观缺陷的允许限值，方便现场检测人员快速对照判定。

表 7-4 焊缝外观质量允许限值表

缺陷类型	一级焊缝允许值	二级焊缝允许值	三级焊缝允许值
焊缝余高	0~3mm	0~4mm	0~5mm
咬边最大深度	≤ 0.3mm，总长≤ 焊缝长 10%	≤ 0.5mm，总长≤ 焊缝长 10%	≤ 1.0mm，总长≤ 焊缝长 15%
表面气孔最大直径	不允许存在	≤ 1.0mm，每 100mm 不 超过 2 个	≤ 1.5mm，每 100mm 不超过 3 个

（二）超声波检测的等级、验收标准与缺陷定位

超声波检测在钢结构桥梁内部缺陷探测中占据核心地位，它依靠超声波在金属介质中的传播特性，能够灵敏地捕获夹渣、未熔合、未焊透以及裂纹等各类内部不连续性缺陷。根据工程重要程度和焊缝受力情况，超声波检测被划分为不同等级，每一等级对应着不同的扫查覆盖范围和探头移动轨迹要求。验收标准则严格遵循现行国家标准，通过对比缺陷反射波的幅值与设备预设的评价线、定量线和判废线，来确定缺陷的严重程度。缺陷定位是超声波检测中的关键环节，检测人员需要精准计算缺陷在焊缝中的埋藏深度、水平位置以及沿焊缝长度方向的具体坐标。利用高频率的斜探头，在焊缝两侧进行往复扫查，结合示波屏上的波形反馈，可以大致勾勒出缺陷的三维形态。这种检测方法具有极高的穿透力，能够发现埋藏较深的闭合性缺陷，为后续质量评估提供翔实可靠的数据支持。与此同时，为了确保检测结果的准确性与可靠性，必须对检测表面进行精细的平整处理，保证耦合剂能够均匀分布在接触面，避免耦合不良导致漏检。在实际操作过程中，检测人员还需要定期校验探头的折射角和仪器灵敏度，最大限度排除设备本身带来的误差。

（三）射线检测在厚板及特殊位置的补充应用

虽然超声波检测具有灵敏度高、穿透力强、操作便捷等诸多优势，但在处理厚板焊接接头以及复杂空间节点位置时，射线检测展现出了其特有的互补作用。射线检测利用电离射线对金属的穿透能力，将焊缝内部的缺陷影像清晰呈现在感光底片上，能够提供直观可永久保存的追溯影像资料。在厚度超过 50 毫米的钢板对接焊缝中，超声波信号可能会因为声阻抗的逐步衰减而出现漏检，此时引入射线检测就可以有效弥补这一不足。

特别是在受力复杂的交叉节点、变截面连接处或空间受限难以摆放超声波探头的焊接部位，射线检测能够清晰地显示出缺陷的轮廓和性质，比如可以直观区分圆形气孔与条状夹渣的细微区别。这种原始影像记录作为工程质量档案的重要组成部分，为后期的质量责任追溯和结构运营期评估提供了权威直接的证据。射线检测的应用不仅限于厚板，对于某些对安全性要求极高的特殊焊缝，采用超声波加射线的双重检测，可以最大限度地降低缺陷逃逸的概率。在执行射线检测时，必须严格遵守国家辐射防护相关规定，提前划定安全警戒区域，疏散无关人员，并确保底片的感光质量符合后续观察评定的要求。通过多种检测手段的协同配合，能够构建起一套严密的内部质量防控体系，确保钢结构桥梁的受力骨架在承受巨大设计载荷时依然稳如磐石。

（四）钢管拱主弦管相贯线焊缝与悬索桥锚箱厚板焊缝的相控阵（PAUT）精确检测

相较于传统超声检测，相控阵检测可通过电子控制方式灵活调整声束角度与聚焦深度，能够适配相贯线焊缝复杂的曲面轮廓，也能在厚板焊缝中实现分层扫查，精准定位不同深度的缺陷。对于钢管拱主弦管的空间相贯焊缝，声束可以沿曲线焊缝实现连续覆盖，避免传统单角度扫查容易出现的检测盲区，能够清晰识别未焊透、层间未熔合这类危害性较大的平面型缺陷。而针对悬索桥锚箱的大厚度多层多道焊缝，相控阵检测通过多晶片探头的组合扫查，可以一次完成更大范围的覆盖，大幅提升检测效率，同时获得的缺陷成像更为直观清晰，方便检测人员准确判断缺陷性质和尺寸，为缺陷评定提供更准确的依据。实际检测过程中，需要根据被检焊缝的曲率、厚度和坡口形式预先设置聚焦法则，打磨平整检测区域，保证声耦合稳定，检测完成后所有扫查数据和缺陷成像都需要完整存档，为后续质量追溯提供完整可靠的依据。

二、磁粉与渗透检测的应用

表面无损检测是确保焊缝及其热影响区结构完整性的重要手段，尤其是针对连接节点中容易产生裂纹的应力敏感区域。磁粉检测与渗透检测通过不同的物理显像原理，将隐藏在金属表层的细微缺陷放大呈现出来，是保障连接节点表面质量的重要防线。针对不同材质和焊缝形式，选用合适的表面检测方法是提升检测效率和准确性的核心关键。

（一）角焊缝、熔透焊缝端部及临时焊缝拆除处的磁粉检测

磁粉检测凭借其对表面和近表面裂纹的高灵敏度，被广泛应用于角焊缝、熔透焊缝端部以及临时构件拆除后的母材痕迹检查。在角焊缝根部，由于焊接过程中应力分布不均，很容易产生微小的淬硬裂纹。利用磁轭产生的交变磁场，就能在焊缝区域形成闭合磁路，如果区域内存在缺陷，磁力线就会产生畸变并吸引磁粉在此处聚集，形成清晰可见的缺陷磁痕。对于全熔透焊缝的端部来说，这本身就是焊接缺陷的高发区域，通过磁粉检测可以有效保证节点受力的连续性。在桥梁建设过程中，经常需要焊接吊装耳板、临时支撑等构件，这些构件在拆除后，母材表面留下的焊疤必须彻底磨平处理，之后还需要通过磁粉检测确认是否存在打磨过程中没有发现的隐性裂纹。具体的检测流程包含三个核心步骤：首先是对待检区域进行彻底表面清理，去除油污、锈蚀和焊渣等干扰杂质；接着施加适度强度的磁场并均匀喷洒磁粉；最后观察记录磁痕形态，评估缺陷的性质并做好现场标记。这种检测方式操作便捷且结果直观可靠，能快速为焊缝表面的健康状况提供准确判定。与此同时，检测过程中要注意防止磁粉过度堆积造成误判，影响缺陷评定结果。通过这种周密细致的检查，能够及时发现由于应力集中引发的初始萌生裂纹，从而第一时间采取必要的补救措施，避免隐患扩大。在此过程中，检测人员还需要根据现场光照条件调整观察角度，确保不遗漏任何一个微小的磁痕显示。

（二）不锈钢复合钢板表面无损检测的渗透替代方案

不锈钢复合钢板凭借其优异的防腐性能和适中的成本，在现代桥梁建设中应用逐渐普及，但它的覆层是非磁性材料，传统的磁粉检测无法发挥作用。在这种情况下，渗透检测就成为了不锈钢复合板表面无损检测的首选方案。渗透检测主要依靠毛细管作用原理，检测时将含有荧光染料或者对比色料的渗透液均匀涂抹

在待检表面，渗透液会在毛细管作用下缓慢渗入表面开口的裂纹、气孔或疏松缺陷内部。

经过规定时间的静置渗透后，去除工件表面多余的渗透液，再均匀施加显像剂。显像剂具有很强的吸附作用，能将残留在缺陷内部的渗透液吸出到表面，从而在白色的显像背景上形成清晰鲜明的缺陷迹痕。这种方法对于检测不锈钢表面的晶间腐蚀微裂纹、轧制折叠以及细小孔穴都具有十分显著的效果。在实际应用中，渗透检测的环境温度控制至关重要，温度过高或过低都会影响渗透液的流动性，最终降低检出灵敏度。由于渗透检测不需要复杂的电源和大型设备，因此在桥梁的高空节点或现场修补位置都表现出了极大的灵活性，能够适应各种复杂的现场作业环境。施工人员通过严格控制渗透时间、表面清洗力度和显像等待时长，就可以获得清晰准确的缺陷图像。对于不锈钢复合板的覆层焊接质量来说，渗透检测是确保其结构完整性的关键屏障，能够有效防止腐蚀介质从微小缝隙渗入基材，延长结构整体使用寿命同时维持桥梁外观完整性。

（三）表面裂纹的检出灵敏度与验收等级判定

表面裂纹的检出灵敏度直接决定了结构安全评价的精度，而在现行的质量验收体系中，二级验收等级通常被设定为一种兼顾安全性与经济性的通用判断基准。为了达到标准要求的灵敏度，检测设备和对比试块的校准必须严格符合规范要求，确保能够稳定发现长度在数毫米级甚至微米级的表面开口缺陷。在判定过程中，检测人员需要对观察到的显示痕迹逐一进行分类定性，对于那些呈线性分布、具有一定深度感和明确延伸方向的痕迹，通常会被判定为危险性较高的裂纹类缺陷。在二级验收标准下，对单条缺陷的长度、同一条焊缝内缺陷累积长度以及在给定面积内的缺陷分布数量都有着严格的数值界定。如果缺陷的特征参数超过了该等级的限定值，就直接判定为验收不合格。在进行等级判定时，还要综合考虑连接节点的受力性质，如果是承受交变拉应力或者往复疲劳荷载的关键焊缝，工程上对可见裂纹的容忍度几乎为零，只要发现就必须进行返修处理。通过标准化的缺陷显像对比试块，可以量化表面缺陷的几何特征，提升判定结果的准确性。在此基础上，规范的判定逻辑不仅要求单个缺陷本身不超标，还要求缺陷之间保持足够的安全间距，避免多个缺陷距离过近连通后产生应力叠加效应，放大缺陷危害。通过严谨规范的定性分析，能够将各类表面隐患都消灭在施工初期阶段，避免带入后续工序。

三、检测不合格缺陷的处置

检测发现的不合格缺陷必须依照科学规范的程序进行处置。从缺陷范围的新界定，到返修工艺的精准实施，再到对多次返修部位的慎重对待，每一个环节都体现了对工程质量的敬畏，目的就是确保返修后的焊缝能够完全恢复其预期的力学性能，不留下任何安全隐患。

（一）发现裂纹时检测范围自动扩大至全长的规定

在无损检测过程中，一旦在焊缝中发现裂纹这种破坏性极强的缺陷，检测程序就会自动触发检测范围扩大的强制规定。裂纹的存在往往意味着焊接工艺参数或结构拘束应力已经超出了安全边界，同一批次或者同一条焊缝存在群发缺陷的风险。根据现行规范规定，当抽检焊缝发现裂纹缺陷时，该条焊缝的检测范围必须立即扩大至百分之百，也就是对整条焊缝进行全长检测。这种联动的检查机制，就是为了防止局部小缺陷演变成引发整体结构失效的重大隐患。

在扩大检测的过程中，不仅要重点关注原先发现缺陷的部位，还要对与之相连的交叉焊缝、焊接热影响区以及受力集中的节点区域进行重点扫查。如果扩大检测后依然发现新的裂纹缺陷，则需要对整个焊接工艺方案进行重新审查，全面分析母材成分、焊材质量以及现场环境温湿度等因素对焊接质量的影响。通过这种全覆盖的排查模式，能够最大限度地挖掘出潜在的危险因素。这种严苛的扩大化检测规定，体现了工程界对裂纹类缺陷零容忍的质量态度。施工管理人员应建立详细的缺陷追溯台账，详细记录裂纹的成因分析与范围扩展检测的实施过程，确保实现质量管控的闭环管理。由此构建的质量防御体系，能有效屏蔽任何由于随机性焊接失效可能引发的结构崩溃风险。

（二）碳弧气刨清除缺陷的坡口加工与补焊返修工艺

发现缺陷后，缺陷清除工作通常都采用碳弧气刨工艺，这是一种利用碳棒与工件之间产生的电弧热量熔化缺陷金属，再通过压缩空气吹除熔渣的高效清除方法。在操作过程中，必须精准控制气刨的深度和宽度，确保缺陷被完全移除，不残留隐患。气刨最终形成的沟槽要保持平滑过渡形状，深度还要略微超过缺陷所在的最低厚度位置，保证缺陷彻底清出。在坡口加工完成后，必须使用角向磨机对气刨表面进行彻底打磨，清除表面残留的渗碳层，直至露出干净的金属光泽，防止渗碳层补焊后导致接头脆化。补焊返修工艺有着比初次焊接更严格的要求，

其预热温度通常要比初次焊接时高出 20 到 30 摄氏度，目的是降低焊接后的冷却速度，减少淬硬组织产生。焊接过程中，应优先采用小电流、多层多道焊技术，严格控制层间温度不超过规范要求，并确保每一道焊缝都能与基体金属良好熔合。补焊完成后，不能立即进行无损检测，通常需要经过二十四至四十八小时的静置放置，待焊缝内的扩散氢充分逸出且焊接应力趋于稳定后，再按照原检测要求进行全套无损检测，确保返修部位的质量达到合格标准。整个修复过程必须由持有对应资质的焊工执行，并详细记录气刨位置、补焊参数以及最终检验结果。为了防止二次返修失败，现场应指派专业技术人员进行旁站监督，必要时还需要对补焊后的接头组织性能进行抽样校核，确认性能满足设计要求。

（三）同一部位返修次数的超标分析与专家论证程序

同一焊缝部位的返修次数并非无限制，现行规范通常规定同一位置的补焊次数不得超过两次，因为多次重复的加热与冷却会导致焊接热影响区的晶粒严重粗化，降低接头的冲击韧性和抗裂性能。当某一部位经过两次返修仍然不合格时，不能再进行常规的盲目修补，必须启动严谨规范的超标分析程序。这一程序首先要求项目技术部门对产生重复缺陷的根本原因进行全面深度剖析，从母材质量、焊材选型、焊接工艺、现场环境等多个维度逐一排查诱因。随后，必须组织正式的专家论证会，邀请设计单位、施工方、监理方以及行业内相关专家共同参与论证。会议将重点评估多次返修对母材和接头性能的影响，并审议专项修复方案的可行性与安全性。在论证过程中，通常需要额外补充力学性能试验，以量化多次返修带来的性能受损程度。只有当专家组审议通过论证，确认修复方案安全可靠后，方可开展第三次返修。这种严格的管控模式从制度上确保了结构整体安全，所有专家论证意见都需要完整存档，作为工程质量资料永久保存。这种对质量问题审慎处理的态度，是保障工程整体质量的重要基础，通过此类规范的专家论证，可以确保每一个复杂技术问题都得到妥善解决，最终保证修复后的结构依然具备设计要求的承载能力，满足长期服役的安全要求。

第八章 钢结构桥梁施工测量与监控

钢结构桥梁施工测量与监控是确保工程质量、结构安全及线形精准的核心工作，涵盖了从平面控制到空间定位的全过程。在复杂施工环境下，高精度测量体系能有效规避施工偏差累积，确保桥梁各构件安装后达到设计预定的位置与应力状态，为工程长期的耐久性与安全性夯实技术基础。由于钢结构对温度及荷载变化极其敏感，实时动态监控不仅能为施工决策提供数据支撑，还能提前预警可能存在的结构隐患。

第一节 施工控制网建立与维护

施工控制网是工程测量的基准，其精度直接决定了构件加工与现场安装的匹配精度。建立稳定可靠的控制网，既需要先进硬件设备的支持，更要有严谨的维护机制，确保复杂施工环境下地理坐标体系的唯一性与稳定性，为后续施工打下坚实基础。通过科学规划与动态监测，能让控制网在漫长的建设周期内始终保持高可靠性，为大型钢构件的精准对接提供可靠的坐标依据。

一、平面与高程控制网的布设

平面与高程控制网的合理布设是测量工作的基础，需要结合地形地貌、通视条件及工程规模做系统规划。布设过程要注重多手段融合，提升冗余观测数据的精度，通过科学平差算法消除系统误差，构建覆盖全桥范围的空间三维控制体系，让测量成果可以直接服务于钢结构深化设计与现场吊装作业。

（一）GPS 网与全站仪边角网的联合构网与平差

GPS 网与全站仪边角网联合构网，结合了卫星定位的高精度基准与地面全站仪的局部几何关系约束，能搭建起覆盖全桥范围的高可靠性控制框架。这个过程中，要利用三维空间约束平差技术，把卫星观测得到的空间直角坐标转换为工程坐标，同时有效控制长距离边长的投影变形。通过合理配置地面观测点，全站仪

构成的边角网可以在局部范围内提供精细的方向与间距校验，弥补单一卫星测量在垂直方向精度偏弱的不足。数据处理阶段要采用严密平差计算，对多余观测值做加权分配，削弱随机误差对整体网形强度的负面影响。这种联合构网模式不仅提升了施工控制网的抗干扰能力，也为后续主塔、主梁以及大跨度结构定位提供了统一稳定的空间基准。

开展联合平差时，必须重点关注基准转换的尺度比例因子与旋转参数，确保不同测量手段获取的数据在数学逻辑上高度统一。考虑到钢结构桥梁对跨径间距的精度要求极高，边角网的边长测量必须经过严格的气象改正与仪器常数改正。联合平差的精度评定要以点位中误差及最弱边边长相对中误差为核心指标，确保平差后的坐标精度能够满足钢梁合龙段匹配的亚毫米级要求。

（二）跨江、跨海水准测量的高程传递方法

大跨度钢结构桥梁往往横跨宽阔水域，传统水准测量受视距长度与大气折光影响，很难直接通过常规方法完成高程传递。针对这类特殊地形，跨江、跨海水准测量有三类成熟的技术方案：一是采用精密全站仪开展对向同步三角高程观测，抵消大部分大气折光误差与地球曲率影响；二是利用全球导航卫星系统开展长时段静态观测，配合高精度似大地水准面模型完成高程转换；三是实施多测回水准测量结合流体静力水准观测。

对向同步观测要求在水域两岸同时架设仪器，在相同的大气环境下开展往返观测，通过取平均值的方式最大程度消除垂直角观测中的折光系数干扰。为进一步提升观测稳定性，要选择日出后或日落前大气相对稳定的时段开展观测，避开中午的热对流干扰。针对海洋环境，还要考虑潮汐变化对临时水准点位移的微小影响，建立动态高程修正模型。

应用卫星定位技术开展高程传递时，要在两岸基准点连续观测不少于二十四小时，获取足够的数据样本用于基准拟合。通过在两岸已知高程点开展闭合校验，可以验证拟合模型的适用性，确保跨越水域后的高程系统保持一致。高程传递的最终结果必须经过多次闭合环路检验，保证全桥高程基准的闭合差优于国家一等或二等水准测量的技术规范要求。

二、制造与安装测量的基准统一

制造与安装测量的基准统一，是消除工厂预制与现场安装误差累积的关键环节。

通过建立统一的数学模型,把零部件加工坐标系映射到地理坐标系中,可以有效解决空间姿态转换问题,确保大型钢结构节段在现场对接时实现毫米级精度控制。这种一致性要求要从设计源头开始,贯穿加工图深化、胎架搭设、厂内预拼装直至现场吊装的全流程,确保每个几何特征点在不同空间体系内都有唯一标识。

(一) 厂内预拼装测量坐标系与桥位安装坐标系的转换

钢结构桥梁构件在工厂制造时通常采用局部工件坐标系,而现场安装依托大地地理坐标系。要实现两者的无缝对接,必须建立精确的转换矩阵,通过在构件上设置公共特征点,计算出平移、旋转及缩放参数。厂内预拼装阶段要采用电子全站仪或工业摄影测量系统捕捉构件的关键几何特征,比如销轴中心、边缘交点以及设计基准线,形成数字化三维几何模型。

转换过程中,要严格遵循最小二乘法原理,确保公共点转换后的残差分布均匀。尤其是处理超长钢梁或曲率复杂的异形构件时,转换模型必须考虑构件在自身重力作用下的形态差异。工厂预拼装要模拟现场受力状态,通过测量数据的坐标变换,提前评估节段间的匹配误差,在厂内完成必要修整,避免现场出现无法对接的问题。

坐标转换计算书要作为技术质量证明文件的组成部分,详细记录所有转换参数与特征点的偏差。技术人员要在现场吊装前再次验证坐标转换的正确性,利用现场基准网对构件上的特征点开展实测,确保转换后的空间位置与设计线形完全吻合。这种多重校验机制,能有效规避坐标系定义不明确引发的施工风险。

(二) 温度梯度对测量基线长度影响的修正计算

钢材有明显的热胀冷缩特性,温度梯度产生的形变往往会掩盖真实的几何尺寸偏差。测量长跨度钢基线时,必须同步记录环境温度以及钢结构表面的实际温度,引入线性膨胀系数对实测距离做严密的修正计算。当温度偏离标准参考温度时,构件轴线长度会发生相应改变,不做改正的话,测量结果就会失去参考价值。

修正计算要考虑构件内部的温度场分布,尤其是大体积钢箱梁,受光照影响顶板与底板存在温差,会导致构件产生整体弯曲变形。测量时要避开强光照射时段,优先选择凌晨或阴天开展作业。通过在结构表面布置温度传感器,实时获取温度特征值,就可以对测量坐标做实时补偿。

除此之外,测量仪器的测程也会受大气折光系数与环境温度影响,精密测量中要对测线路径上的平均温度做修正。针对大规模钢结构测量,要建立温度形变

修正系统，把温度作为变量实时输入计算软件。这种精细化的改正措施，可以确保不同温度条件下获取的测量数据具备可比性，为结构线形调整提供准确的决策依据。

三、测量仪器的合规性管理

测量仪器的合规性管理是保障数据真实性与准确性的法定前提。所有参与工程测量的精密仪器必须经过国家授权机构的检定，且在有效期内使用，通过规范化台账管理与软件校核流程，杜绝因设备失准或软件漏洞导致的方向性测量错误。在钢结构桥梁施工中，高频率的精度检查与严格的设备准入制度，能从源头上减少测量误差的产生。

（一）全站仪、水准仪、GNSS 接收机的强制检定周期

所有精密光学与电子测量设备都必须严格执行强制检定制度，常规检定周期为一年。全站仪的测角误差与测距常数必须通过标准基线校准，确保其精度等级符合工程施工技术规范要求。针对水准仪，重点检查长水准管的灵敏度与视准轴的补偿精度，防止大跨度高程传递过程中产生累计误差。卫星接收机则要在标准已知点位上开展同步观测校验，评估其在复杂电磁环境下的抗干扰能力。

施工期间，测量人员还要开展经常性的自检与互检，比如校正全站仪的视准轴误差。如果设备在运输或使用过程中受到剧烈振动或温差骤变，即便在检定有效期内，也应当重新开展局部校准。所有检定证书原件要留档存查，严禁使用未经检定、超期或检定不合格的仪器进入施工现场采集关键数据。

管理部门要建立电子化的仪器动态管理台账，提前预警检定到期的设备，安排轮换计划。这种全生命周期的合规化管理，能确保每一组上报的测量数据都具备合法追溯性，为质量验收提供科学依据。对于租借的仪器，必须按照相同标准开展资格审查，确保其技术性能完全满足高精度钢结构安装的要求。

（二）钢卷尺、拉力计的尺长与温度改正标定

在钢结构制造的精细测量中，高精度钢卷尺与拉力计依然发挥着不可替代的作用。由于钢卷尺在制造过程中存在一定长度偏差，使用前必须送往计量部门标定，获取尺长改正参数。标定时要明确标准拉力，因为钢卷尺在不同拉力作用下会产生弹性伸长，只有在规定拉力下读取的数值，配合尺长改正与温度改正，才能得到真实的物理长度。

拉力计的准确性直接影响钢卷尺测量结果，必须通过标定确认读数与实际作用力的对应关系。施工现场开展距离复核时，要确保环境温度均匀，使用经过检定的拉力计施加标准荷载。针对长距离基准线测量，要避免钢卷尺悬空下垂产生垂曲误差，必要时设置中间支撑点，或者开展严密的垂曲修正计算。

技术人员日常工作中要养成良好的设备维护习惯，避免钢卷尺出现弯折或锈蚀。在寒冷或炎热环境下开展高空测量时，温度改正项往往能达到毫米级别，绝对不可忽视。通过对这些基础量具做精密标定与科学使用，能让工厂内的构件下料精度与现场对接精度保持高度统一。

第二节 安装过程精密测量

在钢结构桥梁的建设过程中，精密测量是确保结构几何形态与设计要求高度吻合的关键技术环节。通过高精度的测量手段，可以对节段安装、缆索姿态以及结构整体变形进行全过程实时监控，为工程质量提供可靠的数据支撑和调整依据。

一、节段安装的实时三维定位

节段安装作为钢结构桥梁施工的核心，其精度直接决定了成桥后的受力状态。实时三维定位技术利用多种高精度传感器，实现对每一块节段在空间坐标系中的精确定位，保障整体结构的线形平顺与对接严密，降低后期调整难度。

（一）目标棱镜的布置与大气折光改正模型

在钢结构桥梁的节段安装过程中，目标棱镜的科学布置是高精度测量的基础保障。施工团队通常在钢结构节段的关键受力节点、焊缝交汇处以及端口边缘位置对称布置高精度全反射棱镜，形成稳固的测量控制网。这些棱镜的安装坐标与设计模型紧密对应，通过对棱镜中心三维坐标的实时捕捉，系统能够精确还原节段在空间中的实际姿态。

为了确保远距离测量精度，必须引入先进的大气折光改正模型。这种模型通过实时采集作业环境中的气温、气压与空气湿度，计算出光线在不同大气密度层中传播时的折射率变化。通过对测量视线进行曲率修正，可以有效消除因温度梯度引起的光路偏转，从而将长距离观测误差降至毫米级水平。

在实际操作中，工程人员会在测量路径上布置多个微气象站，连续获取全线

的环境参数，并将其代入折光修正公式，其中为标准大气压下的空气折射率，为实测大气压，为实测绝对温度。这样处理能显著降低测量光路穿越水面或热源区域时的突变影响。由于环境变化的随机性，折光修正必须实现动态化更新，在每一次全站仪自动扫描前完成改正数计算。这种基于精细化棱镜布局与智能化环境补偿的测量方案，大幅提升了钢桥节段在复杂现场环境下的空间定位精度。通过对大量观测数据的实时解析，系统能够过滤掉环境干扰噪声，输出反映真实物理形态的坐标信息。

（二）倾角传感器与全球卫星导航系统在钢塔倾斜度监测中的融合

钢塔结构的立面垂直度监测是施工监控的重中之重，单纯依赖常规测量手段难以应对高空复杂环境带来的挑战。将高精度倾角传感器与全球卫星导航系统进行深度融合，可以构建起一套全天候的动态监测网络。全球卫星导航系统接收机安装于索塔顶部，提供绝对坐标参考，通过长基线差分技术实时获取塔顶的摆动幅值，确保塔顶姿态始终处于设计要求的安全范围。

安装于塔身关键断面处的倾角传感器能够以更高采样率捕获结构的微小倾斜变化，这类传感器对高频振动及结构徐变具有极高的敏感度，能够捕捉到卫星定位难以分辨的微小瞬时变形。在数据处理中心，通过数据融合算法将两种信号进行互补处理。这种做法既能利用卫星定位系统的位置稳定性消除传感器的长期温漂误差，又能充分发挥倾角传感器在动态响应方面的优势。

通过多传感器数据融合算法的深度挖掘，能够实时给出索塔在各种载荷共同作用下的实时偏位数据。在施工过程中，监测数据被同步传输至监控指挥系统，作为调整爬模平台或吊装工序的直接参考。这种监测模式不仅提升了索塔垂直度的测量精度，还为分析塔体受力变形与温度效应之间的关联提供了宝贵的一手数据，实现了对桥塔施工姿态的精细化管控。

二、缆索系统几何参数测量

缆索系统作为大跨度钢桥的受力骨架，其几何参数的准确性直接关乎桥梁的整体承载能力与使用寿命。通过对主缆和斜拉索进行精密的几何测量，能够实时掌握缆索的空间分布与内力状态，为结构施工调整提供数据支撑，确保施工全过程与成桥状态的力学行为完全符合设计预期。

（一）主缆线形的非接触式三维激光扫描测量

在悬索桥施工中，主缆线形的精确测定通常面临空间跨度大、高空作业困难、传统测量手段效率低下等挑战。非接触式三维激光扫描技术为此提供了高效可靠的解决方案。通过在地面或索塔合适位置架设高精度激光扫描仪，设备可以对主缆表面进行全方位快速扫描，短时间内就能获取数以亿计的反射点空间坐标。这些密集的点云数据不仅包含了主缆的宏观整体轨迹，还完整记录了缆体截面的细节形貌。

点云数据采集完成后，利用专业的逆向工程软件对主缆轨迹进行拟合处理。通过剔除环境杂波并对缆心位置进行数学中心化提取，可以得到连续光滑的主缆中轴线几何参数。这种方法相比传统的单点测量，不仅大幅提升了数据采集的丰度和完整性，更能准确捕捉主缆在自重、温度和外界荷载作用下的细微线形波动。三维扫描技术还能高效监测索夹的位置偏移，确保缆梁锚固体系的几何精度符合设计要求。

（二）斜拉索索力（频率法）与空间倾角的联合测定

斜拉桥的索力监测是保障结构整体受力平衡的关键，频率法是目前应用最广泛的现场测力手段。在施工阶段，通过在斜拉索表面吸附无线加速度传感器，捕捉索体在自然风环境下的微小振动信号。利用快速傅里叶变换将采集的时程信号转化为频率响应曲线，结合拉索的线密度、计算长度等物理参数，可以精确反算当前状态下的拉索内力。

与此同时，由于拉索在自重作用下存在一定的垂度，空间倾角的准确测定对于精确反算索力至关重要。利用全站仪对索端锚头及索身多个特征点进行三维坐标测量，可以计算出索体轴线在三维空间中的实际投影角度。将实测倾角引入索力计算公式，可以修正因位置偏差带来的力学误差，使得计算得到的索力值更接近拉索的真实受力状态。

这种频率与几何参数的联合监测模式，极大提高了施工现场索力调整的准确度。在每一轮索力调整完成后，通过实测内力与坐标的联合校验，能够及时发现锚固端滑移等潜在安全隐患。这种数据互补的监测方式不仅降低了单一监测手段的系统性偏差，还为后续桥梁结构的长期养护提供了详实完整的技术档案。

三、测量误差的消减策略

测量误差的有效消减是实现桥梁毫米级安装精度的核心前提。针对环境干扰、仪器固有偏差以及人为操作因素，必须采取全方位的质量预控措施。通过建立严密的作业规范和数据处理流程，可以将各种误差源控制在极小范围，确保测量成果的可靠性与工程整体质量的稳健性。

（一）避开日照强烈时段的夜间稳定期测量组织

太阳直射引发的不均匀温差是精密测量最大的干扰源。在日间，钢结构表面受热不均匀会产生明显温差，引起梁体向上拱起或索塔产生明显的背光侧偏移，这种形变严重干扰了对结构静态几何形态的准确判断。为了获取结构在稳定温度场下的真实线形，关键性的控制测量作业通常被安排在午夜至凌晨这一温度稳定期进行。

夜间测量组织需要具备严密的规划逻辑。在这一时间段，大气垂直折光差趋于稳定，光路穿过空气时不再产生剧烈的波动，全站仪的测量精度均能达到仪器本身的理论峰值。施工团队会在日落后预留出数小时的结构热能释放期，待钢结构表里温度趋于一致时才正式启动测量工作。通过这种组织安排，可以有效剔除日照对结构形态的动态扰动，确保不同施工阶段采集到的数据具有高度的可比性。在特定的大风气象条件下，测量人员还需对现场风速进行实时监测，确保环境振动处于可控水平，从而获得最精准的静力形变数据。

（二）对称同步测量以消除大气条件不对称影响

在超长距离测量中，大气环境的空间不均匀性会导致不同测量光路产生不同的折射偏差。为了克服这一难题，工程中广泛采用对称同步测量技术，即在测量轴线的两侧同时部署测量点位与接收端。通过多组全站仪在同一时刻对相同目标进行观测，可以将大气折光的影响在数学处理中相互抵消。

实施对称同步测量通常遵循三个核心原则：

第一，严格保证观测时间的同步性，确保所有传感器捕获数据的瞬时一致性，减少时间差带来的波动误差；第二，保证测量路径的几何对称性，使各条视线穿越的大气层温湿度梯度基本一致，从路径层面均衡折光影响；第三，统一仪器型号与检定状态，避免设备本身的精度差异引入额外误差，确保观测数据的纯净性。

通过这种方式，单向测量的折光残差被有效抑制。在此期间，通过无线电通

信系统协调所有测量人员，确保指令下达与操作执行步调完全一致。这种多站点协同作业模式，显著改善了超宽跨度钢梁合拢前的定位精度，是大跨度钢桥建设中不可或缺的关键环节。在此基础上，通过对各测量站点的误差协方差矩阵进行分析，可以进一步优化观测方案的整体可靠性。

第三节 施工期结构健康监测

施工期结构健康监测是大型钢结构桥梁建造过程中不可或缺的技术保障措施。通过对施工过程中桥梁结构的应力、变形、环境因素等进行实时数据采集与分析，工程人员能够精准掌握结构实际受力状态与设计预期的偏差，从而有效预警潜在风险，确保施工全过程的安全稳固与线形精准。

一、传感器系统的选型与布设

传感器系统的选型与布设直接决定了监测数据的真实性与有效性。在钢结构桥梁施工现场，复杂的电磁环境、剧烈的温度波动以及多变的机械振动，都对传感器性能提出了严苛要求。合理的布设方案应当覆盖结构的关键受力部位，安装工艺上也要充分考虑长期稳定性与防护性，为后续数据分析奠定坚实的物理基础。

（一）光纤光栅应变计与电阻应变片的优劣势对比

光纤光栅应变计作为一种先进的传感设备，在钢结构桥梁施工监测中展现出了显著的技术优势。它的核心原理是利用光纤中布拉格波长对应变的线性响应测量结构受力，由于传输的是光信号，这种传感器天然具备抗电磁干扰的能力。在桥梁施工现场，塔吊运行、电焊施工及高压输电线路都会产生强烈电磁场，光纤光栅传感器在这类环境下仍能保持极高的信噪比。它的耐久性也非常出色，光纤材料本身耐腐蚀、抗老化，能够胜任从构件加工、吊装直到成桥后的长期监测任务。这种传感器还支持准分布式串接，一根光纤上可以刻蚀多个光栅，大大简化了现场布线难度，也降低了施工期间因线路损耗导致的监测中断风险。

电阻应变片作为传统的应变测量工具，在特定的临时性监测任务中仍占有一席之地。它的工作原理基于金属丝或箔片的电阻随机械形变变化的物理特性，通过惠斯通电桥将微小的电阻变化转化为电压信号。电阻应变片的优势在于技术成

熟度高、采购成本相对低廉,对于一些仅需在吊装瞬间或短期载荷试验中获取数据的节点,性价比很有吸引力。而且传感器尺寸极小,能够贴合在空间极其受限的复杂焊缝区域或微小构件表面。尽管如此,电阻应变片的局限性在长期施工监测中较为明显:它输出的微弱模拟电压信号极易受到环境电磁噪声污染,且对温湿度变化高度敏感;如果防潮处理不到位,应变片与钢结构表面之间的粘接层容易失效,导致零点漂移严重,无法提供可靠的长周期静态数据。

选择传感器时,需要根据监测目标进行科学取舍。钢结构桥梁的主梁、塔柱等核心受力构件,通常优先选用光纤光栅应变计,确保在长达数年的施工周期内获取稳定的应力演化轨迹。而对于一些次要的临时支撑,或是仅需验证施工步骤瞬间应力的部位,电阻应变片可作为辅助补充。这种混合应用的策略,既保证了核心数据的质量,也兼顾了工程预算的合理分配。从实际安装工艺来看,光纤光栅传感器通常采用点焊或结构胶固定,并加装钢制保护罩;而电阻应变片则需要极其精细的表面打磨与多层密封防水处理。

由于两种传感器在灵敏系数和温度补偿机制上存在差异,系统集成时必须进行严谨的标定。光纤光栅的波长移位受温度和应变双重影响,因此布设时必须同步安装温度补偿光纤,剔除环境温度波动引起的表观应变。相比之下,电阻应变片通常采用补偿片或半桥、全桥电路抵消温度影响。在数据处理层面,工程人员需针对不同传感器的特性建立各自的转换函数,确保同一平台上呈现的应力数值具有可比性,以此为依据评价钢结构桥梁在各施工阶段的力学行为是否处于受控状态。

（二）风速风向仪与温度传感器的防雷与防潮布置

风速风向仪在大型钢结构桥梁施工中扮演着气候哨兵的角色,尤其是在大跨度悬索桥或斜拉桥的钢箱梁吊装阶段。风力作用是导致梁段产生横向晃动和扭转颤振的主要外部动力因素。为了获取最真实的气流特征,风速风向仪通常安装在塔顶、主梁跨中或临时施工电梯的最顶端。但这些位置往往是施工现场的最高点,极易遭受雷击。防雷布置的第一要务是建立独立的引下线系统,将风速仪的金属外壳与桥梁主体的防雷接地网可靠连接。在此基础上,信号传输线路上必须安装高速浪涌保护器,防止感应雷击通过电缆击穿后端的采集终端。

温度传感器在钢结构桥梁监测中具有特殊地位,因为钢材对温度极其敏感,温度应力往往占据结构总应力的较大比重。温度传感器的布设需要考虑日照辐射、

环境气温以及钢构件内部温度梯度，在主梁的阳面与阴面、顶板与底板之间，需要对称布设测点，捕捉不均匀温差导致的结构次生内力。防潮布置对于温度测点至关重要，特别是安装在箱梁内部或靠近水面的部位：传感器封装必须达到较高的防护等级，避免施工喷淋养护或阴雨天气导致水汽侵入传感器内部造成短路，通常采用灌封工艺将传感元件完全包裹在导热性能良好的绝缘介质中，再通过防水接头将信号引出。

风速风向仪的布置还需规避施工机械的遮挡。在塔吊频繁作业的区域，气流会产生严重扰动，形成局部紊流，导致监测到的风速偏离真实的大气环境。合理的做法是采用悬臂支架将传感器伸出施工干扰区以外，并确保支架有足够刚度，不至于在强风下产生自振。对于超高墩身或超长跨度的桥梁，建议采用多点联测的方式建立局部流场模型，通过对不同高度层面的风速进行相关性分析，可以推算出作用在结构上的风压分布，从而为施工步骤的切换提供科学依据，比如明确风力达到什么等级时必须停止高空焊接或吊装作业。

针对防潮与防雷的综合维护，施工现场应建立定期巡检机制。传感器支架的焊缝是否锈蚀、避雷针是否变形、防水密封胶是否老化脱落，这些细节决定了监测系统在极端天气下的生存率。特别是在沿海地区的桥梁建设中，高盐雾环境对传感器的腐蚀作用极大：风速仪的转动轴承需要定期润滑，防止盐析导致测量阻力增大；温度传感器的接触面则需保持洁净，防止氧化层增厚导致热传导延迟。通过这一系列细致的硬件管理，才能确保监测数据在风雨交加的恶劣工况下依然能够稳定采集并实时回传。

二、数据采集与传输网络构建

数据采集与传输网络是监测系统的神经中枢，承担着将传感器感知的原始信号转化为数字信息，并精准输送至处理中心的重任。在钢结构桥梁施工现场，由于作业面积大、构件分布广且存在大量金属屏蔽体，构建一个既能承载高频动态数据又能适应恶劣环境的可靠网络是一项巨大挑战。这不仅要求采集硬件具备卓越的同步性与稳定性，更要求网络架构能够灵活应对各种电磁干扰，确保监测数据每一秒都能顺畅流转。

（一）高频动态数据采集与低频静态数据的分级存储

在施工监测过程中，不同物理量对采样频率的要求存在显著差异，这决定了

数据采集系统必须采用分级处理模式。高频动态数据主要来源于加速度计、GPS 动态定位以及应变计对冲击载荷的响应，采样频率通常设定在至之间。这类数据的特点是数据量庞大、实时性要求极高，主要用于提取结构的动力特性、振动模态以及分析突发性的载荷冲击。相比之下，低频静态数据包括环境温湿度、结构静态应变以及缓慢变化的几何形变，采样周期通常以分钟甚至小时计。这类数据反映的是结构随环境温度和施工进度演变的趋势，虽然实时性要求稍低，但对长期的零点稳定性和精确度要求更高。

针对这两类特性截然不同的数据，分级存储机制显得尤为必要，表 8-2 列出了分级存储方案的三个核心维度内容：

表 8-2 分级存储方案核心维度表

核心维度	具体内容
边缘端预处理与本地缓冲	在靠近传感器的采集网关处进行初步的信号清洗和均值化处理，将海量的高频原始波形转化为统计特征值，同时保留数小时的原始数据备份以防网络中断
数据库分库存储	采用时序数据库存储高频动态数据，利用其高性能的写入能力记录振动序列；将低频静态数据和系统元数据存储 in 关系型数据库中，便于进行长周期的关联查询与趋势分析
自动化降采样与云端归档	随着时间推移，将历史高频数据进行压缩抽稀处理，仅保留关键的极值和统计量，释放存储空间，同时确保关键监测节点数据能够永久追溯

这种分级架构有效缓解了传输网络的带宽压力，并大幅提升了数据查询的效率。在施工现场，如果所有传感器都以最高频率不间断向服务器推送原始数据，极易导致局域网拥塞和服务器宕机。通过在采集前端设置合理的触发机制，比如当风速超过一定阈值或应变发生突变时自动开启高频采集模式，平稳工况下保持低频监测，可以实现资源的最优配置。这种智能化的采集策略既能捕捉到关键的结构响应瞬态，又能保证系统在漫长的施工周期内保持轻量化、高效能运行，为管理层提供多视角的决策依据。

（二）复杂电磁环境下无线传输的抗干扰与低延迟保障

钢结构桥梁施工现场充满了各种电磁干扰源，比如大型电焊机工作时产生的电弧骚扰、无线对讲系统的信号重叠以及吊车变频器发出的高频噪声。在这种环境下，传统的无线传输链路面临着丢包严重、时延抖动等棘手问题。为了保障数据的可靠回传，无线监测网络必须采用先进的调制技术与容错机制。目前主流的

做法是利用扩频通信技术，比如长距离无线电技术或新一代窄带物联网，通过将信号分散在较宽的频带上，显著提升系统对窄带干扰的抵抗能力，即使部分频段受到干扰，系统仍能通过纠错算法还原出原始信息。

低延迟保障是实时预警系统的核心要求，尤其在进行吊装指挥或合龙段应力监测时，数秒的延迟都可能导致误判。为了降低网络延迟，施工现场的无线组网通常采用多级跳跃的自组网架构：当某一个采集点由于钢结构遮挡导致信号变弱时，数据可以自动寻找信号最强的中继节点进行转发，这种拓扑结构不仅增强了覆盖范围，更提高了路径的冗余度。与此同时，采用私有通信协议对数据包进行轻量化封装，减少握手确认次数，可以在带宽有限的情况下最大限度缩短端到端的传输时间。在极端施工环境下，甚至会采用双频备份机制，同时利用不同频段发送相同数据，确保监测信号万无一失。

物理层面的屏蔽与隔离同样是抗干扰体系的重要组成部分。所有无线发射模块均应安装在带有电磁屏蔽层的防护盒内，仅露出天线部分；天线的布设位置需经过严格测试，避开吊塔旋转路径和高压输电线。在数据传输链路中，引入冗余循环校验码是检测数据完整性的有效手段，一旦监测到数据包损坏，系统将自动发起重传请求。通过软硬件结合的防护手段，无线传输网络能够像有线光纤一样稳定，将分布在桥梁各处的监测点有机连接在一起。这种灵活、可靠的传输网络为施工现场提供了全天候的感知能力，让指挥中心能够跨越空间障碍，实时感知结构脉搏。

在实际操作中，还需针对无线信道的动态特性进行自适应调节。由于钢结构桥梁的施工进度不断推进，现场的物理遮挡关系也会随之改变，原本顺畅的通信链路可能因新吊装的钢梁而中断。因此，监测平台需具备网络拓扑实时诊断功能，能够动态调整发射功率和跳频策略；通过在施工区域内部署适量的移动中继站，可以灵活填补信号盲区。这种具备自愈能力的无线监测网络，不仅能够适应钢结构桥梁日益复杂的形体变化，也为大规模传感阵列的部署提供了极大便利，真正实现了监测网络与工程进度的动态契合。

三、施工异常数据的甄别与报警

在施工期间，由于复杂的工况和环境干扰，监测系统不可避免地会产生大量异常数据。如果不能有效甄别这些异常，频繁的误报将严重干扰正常的施工组织，

而漏报则可能导致灾难性的后果。建立一套科学、严密的异常数据甄别逻辑与分级报警机制，是确保结构健康监测系统发挥实效的关键，这要求系统不仅能读懂数字，更能通过算法与逻辑判断，透视数字背后的真实物理含义。

（一）传感器漂移、噪声干扰与真实结构响应的区分

甄别传感器漂移是确保数据质量的第一道防线。传感器漂移通常表现为在无外载荷变化的情况下，监测数值随时间产生的缓慢单向偏移，这往往是由于传感器老化、封装密封失效或粘接胶层蠕变引起的，在钢结构桥梁长达数年的监测周期中，这种现象尤为常见。为了区分漂移与结构真实的流变，通常采用基准点对比法和零点定期复核技术：如果同一截面内大部分传感器保持稳定，仅有个别测点出现线性持续增长，且不随施工工序回落，则大概率可以判定为硬件漂移，系统需要自动标记这些可疑测点，并在计算结构合力时降低其权重，防止漂移误差污染整体分析结果。

噪声干扰则表现为高频、无序的数值跳变，在施工现场主要源于电气干扰和施工机械振动，这类干扰很容易和结构真实的高频振动响应混淆。处理这类干扰时，通常会先通过小波变换对信号进行多尺度分解，滤掉超出结构正常振动频率范围的杂波，再结合周边测点的数据做相关性分析，如果仅单个测点出现无规律跳变，周边测点数据均保持平稳，就可以判定为噪声干扰，不会触发报警。真正的结构真实响应往往具有一致性，同一区域多个测点会呈现出相似的变化趋势，并且和施工工序、环境变化存在清晰的时序对应关系，比如吊装作业时应力随吊重逐步增长，降温时结构应力随温度降低均匀变化，这些规律可以帮助工程人员准确区分干扰与真实响应，保障异常甄别的准确性。

（二）多指标阈值报警与结构安全状态的红黄绿灯机制

要实现准确且高效的分级报警，仅依靠单一监测指标的阈值判定远远不够，必须结合多个维度的监测数据建立综合判定逻辑。不同类型的物理量对结构安全的指示意义不同，比如位移变形反映结构整体几何形态的变化，应力应变直接体现构件的受力水平，振动频率变化则能反映结构整体刚度的改变，将多指标的监测结果按照权重进行融合评估，才能避免单一指标误判的风险。

红黄绿灯分级机制是工程领域应用最广泛的安全状态分级方法，其核心是根据结构设计允许值和施工控制要求，为每个监测指标设定三级阈值，对应不同的安全状态：绿灯代表结构当前状态正常，所有监测指标均处于设计允许范围内，

监测系统按照原频率正常运行，无需采取额外措施；黄灯代表监测指标接近临界阈值，或单个指标出现小幅超限但结构整体状态未发生异常波动，此时系统自动升级监测频率，向现场安全管理人员发出预警提示，要求复核数据真实性并排查施工工况，确认是否存在违规加载或工序偏差；红灯代表监测指标超出临界阈值，或多个指标同时出现超限，结构安全存在明确风险，系统立即触发最高级别警报，自动推送预警信息至所有相关负责人，要求暂停对应区域的施工作业，开展全面的结构安全检查与验算评估，排除风险后方可恢复施工。

为了避免阈值设定过于僵化，这套机制还需要结合施工过程动态调整阈值：不同施工阶段结构的受力体系存在差异，比如悬索桥在猫道架设、主缆紧缆、吊装加劲梁、桥面铺装等不同阶段，允许的应力和位移阈值完全不同，系统需要根据当前施工工序自动调用对应的阈值参数，同时结合温度修正模型，剔除环境温度变化带来的规律性变形与应力波动，只对超出温度影响范围的异常变化触发报警，最大限度降低误报率，保障分级报警机制适配施工全过程的动态变化。

第四节 成桥线形与应力监控

在大跨度钢桥的建设过程中，成桥线形与应力监控始终是整个工程质量控制的核心环节。通过对桥梁成型后的整体几何形态和关键部位应力状态的精准掌控，能够确保钢铁架构在长期复杂的运营环境下始终保持设计要求的刚度与整体稳定性，为桥梁全寿命周期的安全运营奠定坚实的基础。

一、成桥理想状态的确定与预报

确定成桥的理想几何与受力状态，是整个监控工作开展的核心基点。这要求我们必须深入理解钢材材料特性、各阶段施工荷载以及徐变收缩等时间效应对桥梁线形变化的作用规律，通过建立精细化的有限元仿真模型，对桥梁从施工到成型的线形演变规律进行精准预报，才能为现场施工调整提供清晰明确的参照标尺，最终让桥梁的整体姿态尽可能贴近设计的理想状态。

（一）制造线形（无应力线形）与安装线形的倒拆计算

制造线形指的是桥梁构件在完全不受外荷载作用时的初始加工形状。为了让成桥后的线形完全符合设计要求，必须运用倒拆计算法，从成桥的最终理想状态

出发, 逆向逐段扣除恒载、构件自重以及温度作用带来的变形增量。这种方法的核心在于精准捕捉每一个施工步序转换过程中带来的结构姿态偏移, 计算过程中还必须充分考虑现场焊接作业产生的变形以及构件拼接连接间隙的影响, 最终倒拆计算得出的预拱度参数, 是指导工厂下料加工的关键核心依据。

安装线形则是现场构件吊装定位的直接参考标准, 它本身包含了无应力线形的基础, 同时还叠加了当前施工阶段下结构已经产生的弹性变形。制造线形与安装线形的匹配关系, 直接决定了桥梁最终的合龙精度。现场操作过程中应当建立动态的计算调整体系, 实时对比现场实测数据与理论计算的偏差, 由于钢材实际材料参数的波动或者现场焊接带来的刚度改变, 理论计算值必须根据现场监测的反馈结果及时地进行修正。只有确保制造阶段的偏差控制在极小范围内, 后续现场安装的精度控制才有稳固的基础, 才能最终保证成桥后的几何形态与设计轴线完全吻合。通过不断修正更新计算模型, 可以让结构在每一施工阶段的受力特性都处于严密监控之下, 从而逐步消除误差的不断累积, 实现对全桥宏观线形的终极控制。这种清晰的算法逻辑, 能够确保桥梁在复杂的受力体系转换过程中, 始终按照预定的施工轨迹达到设计要求的终点状态, 从根源上保障整个施工过程的安全。

(二) 二期恒载施加前后的结构响应预测

二期恒载主要包含桥面铺装、防撞护栏、各类附属设施等附加荷载, 荷载的实际施加顺序和加载方式对成桥线形有着十分显著的影响。开展预测工作时, 需要把二期恒载按照实际分布转化为节点力作用到计算模型上, 二期恒载带来的下挠变形是一个渐进发展的过程, 预测的精度直接决定了成桥后桥面的平整度是否符合行车要求。计算范围应当涵盖主梁关键断面挠度、桥塔纵向偏位以及全桥索力分布, 在大跨度不对称钢桥中, 非对称施工还可能引发主梁的扭转变形, 同时也应当关注结构阻尼和自振频率的变化规律。这种预测本身是动态更新的过程, 需要根据现场铺装作业的实际容重实时更新计算参数, 通过对比加载前后的监测数据, 可以校验计算模型的可靠性, 如果现场实测的变形量大于模型预测值, 就需要警惕是否存在结构刚度发生 unexpected 折减的问题。

这种精准的结构响应预报, 能够为后续桥面调平层的施工提供直接的技术支持, 确保施工完成后的桥面高程完全满足行车平顺性的要求。除此之外, 响应预测还能指导临时支撑、临时锚固等临时结构的拆除时机选择, 防止一次性拆除带

来的荷载突变引发不利的结构振动风险。在施工后期，精确的二期恒载受力分析还能够辅助优化最终的结构应力储备方案，让结构在成桥后的全寿命周期内具备更强的环境适应性，从而在各种复杂动载作用下始终维持稳定的几何姿态，这也正是现代化桥梁建造精细化工艺的核心体现。

二、成桥线形的最终检测

在完成桥梁主体结构建设、转入正式运营之前，开展全方位的成桥线形检测，是竣工验收的法定要求，核心目的在于对整个施工过程的几何精度进行最终清算，通过专业测量手段获取桥梁各部位的实际空间坐标数据，验证施工质量是否符合设计要求，同时为桥梁建立完整永久的几何档案，为未来长期运营过程中的养护管理提供初始基准数据。

（一）夜间温度稳定时段的桥面高程联测实施

桥面高程联测是检验成桥线形最直接的核心手段，由于钢材对温度变化十分敏感，日照照射会导致桥梁各部位产生不均匀温升，进而引发不必要的挠曲变形，因此检测工作必须安排在午夜至日出前这个时段进行。此时结构经过整夜充分散热，内外部温差极小，整体形态最接近设计基准温度对应的状态。联测作业应当布设覆盖全桥的高精度水准测量网，观测点分别设置在桥面中心线和两侧边缘位置，测点间距按照规范要求科学设定，测量人员使用高精度电子水准仪进行往返观测，消除系统误差带来的影响，同时还要在桥梁关键位置布置温度传感器，实时记录结构各部位的实际温度，只有温度均匀条件下采集的数据才能作为最终评定的依据。这种作业方式剔除了日照温差带来的测量误差，保证了所有采集数据的协调性。通过多轮观测结果取平均值作为最终实测高程，能够客观反映恒载作用下桥梁的实际形态。联测工作不仅要关注纵向线形的偏差，还需要对桥面横向坡度进行校验，确保桥面排水性能符合设计规范要求。这种在夜深人静时开展的严谨作业，反映了桥梁监控工作对测量精确性的极致追求，是保障大桥线形美观平顺的重要工序。每一组数据的采集都必须经过严格的复核，以确保数据的原始性与真实性，为后续的偏差评价提供无可争议的物理依据。

（二）实测线形与目标线形偏差的统计分析与评定

获得完整的实测数据后，需要和设计给出的目标线形进行逐点对比，线形偏差主要来源于施工过程的误差累积、材料实际参数的波动以及计算模型的简化处

理。统计分析的第一步是绘制全桥线形偏差曲线，直观观察偏差的整体分布趋势，再通过计算标准差等统计指标，对施工精度进行量化评价，偏差评定需要严格遵循现行行业规范，对超限的测点逐一开展原因排查，如果偏差呈现出周期性的规律性偏移，往往预示着存在系统误差源，比如测量基准点发生漂移或者预拱度设置存在系统性偏差，分析过程中应当重点关注支座、跨中以及合龙段等关键部位的偏差情况。

对于范围很小的微小偏差，可以通过后续的护栏安装或者桥面铺装找平进行视觉和功能上的微调修正，但若偏差值已经触及结构安全的控制红线，则必须通过调整索力或者改变配重分布等力学手段进行针对性修正。这种基于实测大数据的统计分析，能够将离散的单个测量点数据转化为对整个工程质量的宏观判断，这种评价不仅是为了评定工程的优良等级，更是为了分析偏差对结构承载力的潜在影响。通过建立偏差值与结构内力的映射关系，可以量化误差带来的受力不利影响程度，评定结论需要经过多方专家的联合论证，确保每一处偏差都始终处于受控范围之内。通过科学规范的偏差评定，能够赋予桥梁结构一个清晰完整的“身份档案”，明确它与设计理想状态的偏离程度，为后续的竣工验收交付提供可靠的技术背书。

三、成桥应力与索力偏差评估

成桥后的应力分布与拉索索力状态，是反映桥梁整体健康状况的核心指标，仅仅线形符合要求并不能掩盖内部内力分布异常的问题。在成桥阶段对应力状态进行全面评估，是确保结构拥有足够安全储备的核心举措，通过现场测试和偏差分析，能够及时辨识施工留下的安全隐患，为桥梁长期服役安全提供第一手的基础数据支撑。

（一）成桥状态下控制截面的残余应力测试与分析

钢结构焊接施工不可避免地会产生焊接残余应力，这些残余应力会和运营阶段的荷载应力相互叠加，严重时可能导致局部区域提前进入塑性状态。因此成桥后对控制截面开展残余应力测试至关重要，常用的检测方法包括盲孔法、磁测法等，测试点一般选择在受力复杂的节点、跨中底板以及桥塔根部等关键位置。分析过程要求将实测得到的总应力进行剥离，区分出恒载应力、活载影响以及焊接残余应力三个部分，如果实测数值异常偏高，必须重新开展结构承载力复核，通

过对比不同焊接工艺的测试结果，总结焊接热输入量对应力分布的影响规律，分析结果为评价结构整体疲劳寿命提供核心基础。

评估过程中还需要对应力分布的均匀性进行判定，确保应力流传递顺畅，这种深层检测弥补了单纯线形检测的局限性，能够让工程师从结构受力本质判定整体健康状态，确保结构骨架在荷载作用下拥有足够的安全余度。残余应力的测定必须在结构受力完全稳定后进行，以此消除施工扰动带来的影响，通过建立详细的应力分布云图，可以清晰识别出结构中的薄弱环节。分析工作不仅要立足于当前的结构安全，更要前瞻性地指出在长期交变荷载作用下可能出现的裂纹萌生点，从而为未来的精细化巡检提供精准的导航图，确保结构在整个设计使用年限内保持完整稳定。

（二）全桥索力均匀性偏差的评估与调索方案

对于斜拉桥、悬索桥这类缆索承重钢桥来说，索力分布的均匀性直接关系到梁体整体受力平衡，因此成桥阶段必须对所有拉索的受力状态进行全面排查。评估工作一般通过测定拉索自振频率反推实际索力，或者直接调取预埋传感器采集的长期监测数据，偏差评估的重点在于对称位置拉索、相邻拉索之间的索力差异，如果偏差超出设计允许范围，会导致主梁局部隆起或者下陷，甚至引发桥塔出现不可接受的纵向偏移。

针对不达标索力，需要制定系统科学的调索方案，调索过程必须充分考虑全桥结构的整体耦合效应，方案编制一般采用影响矩阵法，计算单根索张拉位移对全桥各部位索力和线形的贡献系数，调索的目标是在尽可能减小对成桥线形影响的前提下，实现全桥索力平滑均匀分布，调索过程中需要全程监控主梁关键截面的应力变化，防止局部板件出现失稳问题。通过反复测试调整，最终将索力误差控制在允许的极小范围之内。索力的均衡程度直接反映了调索工艺的成熟度，每一个张拉循环都必须伴随着实时的位移观测，以确保调索过程的可逆性与安全性。调索完成后，必须对所有拉索锚固端的紧固状态进行全面检查，防止出现锚固松动的问题。这种系统性的评估与调整，使得桥梁各承重构件能够“协同作战”，将外荷载科学合理地分摊到每一根拉索之上，从根本上优化了桥梁的整体受力格局，提高了大桥抵御台风、地震等极端环境荷载的整体能力。

第九章 钢结构桥梁质量控制与验收

钢结构桥梁的质量控制与验收是工程建设中至关重要的环节。它不仅关乎桥梁的使用寿命与结构安全，更直接影响社会公众的出行安全保障，因此必须通过严格的过程监控与标准执行，确保每一个构件、每一道焊缝都达到设计要求，从根源上消除潜在安全隐患。构建科学的质量评估体系，能够实现对工程品质的精准把控，为后续的运营维护打下坚实基础。

第一节 质量管理体系与标准

建立健全的质量管理体系，是保障桥梁工程品质的制度基础。结合行业规范引入先进管理理念，可以实现对生产要素的科学调配，在复杂的制造环境中保持工序连贯与结果可控，为打造优质工程提供系统的指导方针与行动框架。在此过程中，标准化作业流程既能提升生产效率，更能最大程度减少人为因素导致的质量波动。

一、质量管理体系的构建与运行

在质量管理体系实际运行过程中，各级管理人员与一线操作人员都需要明确自身的职责与权限。通过制定详细的质量计划与管理手册，将质量目标分解到每一个生产班组，形成全员参与、全过程覆盖的管理格局，确保质量方针在生产一线得到不折不扣的贯彻落实。有效的运行机制不仅需要完善的规章制度，更需要配套的激励与约束手段，督促每一位参与者在作业中保持严谨态度。

（一）ISO 9001 体系在钢桥制造中的三检制（自检、互检、专检）

在执行质量标准的过程中，三检制是应用最广泛的核心管理手段。自检要求操作人员完成本道工序后，按照工艺规范和质量标准对自己加工的部件做初步检查，及时发现并纠正操作偏差，这种自我监督的模式可以显著降低不合格品的产生概率。在自检合格的基础上，互检侧重后续工序对前道工序的复核，或是同班

组人员之间的交叉检查，这种横向监督机制能够有效发现个人盲区，确保流入下一环节的零件都处于受控状态。

专检由专职质量检查员负责，借助精密测量工具或无损检测技术，对构件的几何尺寸、焊接质量等关键指标做最终检验，签字确认后方可流转。通过三道防线的紧密配合，形成相互制约、相互支撑的质量闭环，让钢结构桥梁的制造质量在动态生产过程中始终保持稳定受控。质量管理不能只停留在纸面上，更要内化为每一位从业者的作业习惯，持续强化三检制的执行力度，既能减少返工带来的成本损失，也能为项目积累良好的行业口碑。

三检制的有效落地，还离不开完善的数字化管理平台支撑。将检查记录实时录入系统后，管理层可以动态监控质量变化趋势，针对频发的缺陷类型组织技术攻关。这种基于数据的闭环管理，让质量控制从被动发现问题转为主动预防问题，进一步提升了制造效率。数字化存档也为后续的质量追溯提供了便捷途径，确保每一条焊缝、每一个尺寸都有据可查，提升了整体质量管理的透明度。

（二）职业健康安全与环境管理体系的融合执行

钢结构桥梁的制造现场往往伴随高空作业、重物起吊以及焊接烟尘等高风险因素，因此质量控制必须与职业健康安全、环境管理体系实现有机融合。实际操作中，安全生产不仅是保障人员健康的底线，更是保证工程质量的前提——任何安全事故都会导致生产流程中断，甚至可能造成已完成结构的性能受损。环境保护同样不能忽视，尤其是涂装工序中，挥发性有机物的排放控制以及废弃物的分类处理，直接关系到企业的合规性与社会形象。

这种多体系融合的管理模式，要求管理人员制定质量计划时，同步考虑安全防护措施与环境影响因素，通过定期开展安全质量联合检查，消除生产环境中的不稳定因素。良好的工作环境与完善的职业健康保障，能够显著提升一线工人的操作精准度，进而依靠人员的稳定表现，确保每一个施工细节都符合精益求精的工艺要求。在职业健康管理中，企业应当关注工人的劳动保护，通过配备先进防护装备降低职业病发生风险。

落实绿色施工理念，减少资源浪费与环境污染，也是现代桥梁制造的重要发展方向。在施工现场建立废水处理系统、布设噪声监测点，能够有效降低施工对周边生态环境的影响。这种综合性管理方式，不仅提升了工程的综合效益，更符合可持续发展的社会要求。将环境指标纳入考核体系后，管理团队能够更全面地

审视工程整体质量，实现人与自然、生产与安全的和谐统一。

（三）原材料、工序流转与成品出厂的全过程可追溯性

可追溯性是质量管理体系中不可或缺的一环，要求对每一块钢板、每一批焊接材料的来源、性能及流向做详尽记录。原材料进库时，必须按照质保书信息做唯一性编号，录入数字化管理系统，确保在后续切割、拼装、焊接等各个环节，材料的身份信息都能实时传递。工序流转过程中，通过填写工艺卡片或扫描二维码，就能准确记录每一个零部件的加工人员、加工时间以及所用工艺参数。

这种完整连续的信息链条，为后期质量分析提供了宝贵的原始数据。成品出厂前，必须汇总整理全套可追溯档案，内容涵盖原材料复验报告、无损检测记录以及关键工序的质量合格证明。这种全生命周期的记录模式，不仅能在出现质量波动时快速定位问题源头，更能为桥梁未来数十年的运营维护提供详实的技术参考，真正做到对工程质量终身负责。

完善追溯链条，还需要加强对分包商和供应商的管理。将监管延伸到上游材料生产环节，才能确保原材料质量始终处于受控状态。成品运输环节，通过安装定位与震动记录设备，可以对长途运输过程中的构件受力情况做实时监控。这一系列措施共同构成了严密的追溯网络，让每一座桥梁都拥有清晰完整的建设档案，极大提升了业主对工程质量的信心。

二、计量器具与设备的管理

精度合格、状态完好的测量工具，是获取真实质量数据的硬件保障，必须对其进行严格的全寿命周期管理。通过建立动态设备档案，对每一件检测仪器做分类管控，确保其在检定有效期内使用，才能为质量判断提供客观依据，避免因量值偏差导致决策失误。管理过程中，要注重设备的日常维护保养，确保其在恶劣施工环境下依然能保持稳定性能。

（一）探伤设备、扭矩扳手、测厚仪的周期检定台账

针对钢结构检测常用的探伤仪、扭矩扳手以及漆膜测厚仪，企业应当建立详尽的周期检定台账。这些设备因使用频率高，精度容易受机械磨损或电子元器件老化影响，因此必须由具备资质的第三方计量机构定期校准，校准合格后粘贴明显标识方可继续使用。实际管理中，对计量器具的分类管控通常遵循标准化维护流程，具体内容如表 9-1 所示。

表 9-1 计量器具维护管控维度表

管控维度	具体内容
身份档案管理	建立设备电子身份档案，详细记录购置日期、历次检定结果、使用频次及维修历史，确保数据完整可查
领用归还管理	制定严格的领用与归还制度，由专职管理人员负责设备的清洁与外观检查，防止因保管不当造成损坏
内部比对校验	定期开展内部比对试验，通过不同设备间的测量数据比对，及时预警潜在的系统性测量误差
关键任务复核	针对关键测量任务，实施双人双机复核制，确保极端作业条件下采集的数据依然具备较高可信度

从表 9-1 可以看出，计量器具的管理覆盖从存储到使用的全流程，每一个环节都不能放松。精密的探伤仪器需要存放于恒温恒湿环境中，避免电子元器件受潮损坏；领用过程中要建立严格的交接手续，确保每一台工具都处于良好待命状态，这种细节上的严谨，是测量数据准确可靠的终极屏障。扭矩扳手使用前后的数值校核尤为重要，因为它直接关系到高强度螺栓连接副的紧固质量，任何微小偏差都可能在桥梁长期服役过程中引发严重的结构疲劳问题。

（二）大型工装胎架的定期刚度校验与沉降观测

在桥梁分段制造过程中，大型胎架是保证构件空间形态的关键支撑，其稳定性直接影响构件加工精度。受自重、循环荷载以及地基沉降变化影响，胎架可能产生肉眼难以察觉的微小变形或不均匀沉降，进而导致生产出的构件尺寸超标。因此，必须建立胎架定期巡检制度，使用高精度全站仪或水准仪对关键支承点的坐标进行复测，一旦发现数据偏离设计基准，立即采取加固或调整措施，把偏差消除在萌芽状态。

对于长期使用的定型胎架，还需要定期开展刚度计算与校验，分析其在动态荷载下的结构表现，确保在整个构件加工周期内，胎架始终能提供稳定可靠的几何定位基准。这种预控手段，对保障特大跨径桥梁的合龙精度具有决定性作用。施工过程中，管理人员要记录每一次观测的数据，绘制胎架变形曲线图，通过趋势预测提前干预，将传统经验式判断转变为数据驱动的精准决策，大幅降低构件报废的风险。

（三）不合格测量设备的隔离与追溯处理

日常检查中一旦发现测量设备超过检定有效期、合格封志损坏或示值明显异常，必须立即将其撤离生产现场，存放至专门的隔离区域。此时的处理工作不止

是修理设备本身，更关键的是要对该设备从上一次校准合格以来，检测过的所有产品重新进行质量判定。需要依托可追溯性记录，调取所有相关检测数据，分析设备误差是否可能导致构件质量误判，如果复核确认确实存在质量隐患，必须立即采取返工等补救措施。

对于损坏严重无法修复的设备，要按照正规流程办理报废，及时补充符合要求的新设备。这种对不合格计量器具的零容忍态度，体现了企业严守质量红线的决心，确保每一项检测数据都能经受住历史检验，不会因为工具失灵漏掉任何一个隐患。在此基础上，企业还应当加强对测量人员的技术培训，提升其对设备故障的识别能力，让质量问题能在第一时间被发现并隔离。

三、质量检验标准的层级体系

科学合理的标准体系是衡量工程质量优劣的标尺，它覆盖从基础规范到个性化设计要求的各个层面。施工单位要深入理解各层级标准之间的逻辑关系，在执行过程中灵活运用，既要守住行业底线，又要追求技术突破，从而在激烈的市场竞争中确立自身的品质优势。标准执行的深度，直接决定了桥梁工程的最终质量与使用效能。

（一）国家强制性标准与行业标准的底线要求

国家强制性标准与行业规范是钢结构桥梁建造必须无条件遵守的质量红线。这些标准凝聚了国内工程界的长期实践经验与科学研究成果，对材料性能、焊接强度、结构稳定性等方面划定了最低合格限值，任何低于这些指标的施工行为都属于违规，不具备验收资格。施工初期，工程技术人员必须全面梳理本项目涉及的强制性条文，编制专门的合规性清单，作为日常质量检查的最高准则。

需要注意的是，国家标准并非一成不变，会随着材料科学与计算技术的进步不断更新。施工单位必须建立动态标准库，确保现场使用的是现行有效的规范版本。针对新旧标准衔接过程中的技术差异，要组织专项研讨，确保施工工艺始终符合最新法定要求。行业标准更侧重具体工艺的实施指导，比如铁路桥梁或公路桥梁的专项施工规范，这些底线要求确保桥梁在设计使用年限内能够承受预期荷载，是维护公共安全的重要基础。

（二）企业标准严于国家标准的内控指标制定

优秀的桥梁制造企业通常会制定严于国家标准的内控指标，以此体现自身的

工艺领先性。建立企业内控标准，不仅是为了在验收时预留余量应对检测误差，更是通过更高标准的自我要求，倒逼生产管理水平整体提升。比如在钢板切割平整度控制上，内控指标可能要求误差范围比国标缩小 20%；在涂层厚度均匀性上，也会设置更严格的评价要求。

在激烈的市场竞争中，企业内控标准已经成为衡量企业核心竞争力的重要标尺。通过在焊接成型、几何尺寸精度等维度设立更高要求，企业不仅能生产出更可靠的桥梁产品，更能在这个过程中培养出一批技术精湛的产业工人。高标准产出的工程往往能获得国家优质工程奖等行业殊荣，为企业后续竞标赢得优势，实现品牌价值与社会效益的双重提升。这种对卓越品质的追求，已经成为优秀企业文化不可分割的一部分。

（三）设计图纸与专用技术规格书的特殊规定执行

对于大跨度或地标性桥梁工程，设计图纸与专用技术规格书往往会根据桥位的特殊环境，提出一些超越常规标准的特殊要求，这些规定可能涉及高性能钢材的焊接适应性试验、特殊的防腐涂装体系或是极其严格的疲劳强度测试。施工筹备阶段，项目团队必须组织深度图纸会审，把散落在图纸说明和专用协议中的每一项细节要求整理出来，比如某些特大跨径悬索桥的钢箱梁，对焊缝表面形貌及内部细微缺陷就有极高的控制要求。

执行过程中，技术人员要根据这些特殊规定制定专项施工方案，通过工艺评定试验验证方案可行性。只有把这些个性化的设计要求融入标准化制造流程，才能真正实现设计蓝图到优质实体的转化，确保每一座桥梁都能成为承载艺术与技术的作品。每一个环节的精雕细琢，都是对匠心精神的最好诠释。在当前工程背景下，这种精细化管理能够有效提升大型钢结构的抗震性能，让基础设施在应对极端挑战时依然稳如磐石。

针对特定海域的盐雾腐蚀环境，技术规格书通常会要求更高等级的喷砂除锈精度与涂层厚度，施工单位必须在涂装车间建立严格的温湿度监控体系，确保防腐体系的完整性。这种对细节的严格把控，体现了对自然环境的敬畏。通过这样的管理，每一座桥梁不仅能够跨越地理阻隔，更能在时间的长河中保持良好性能。这些细节的积累，共同构成了钢结构桥梁品质提升的基础，每一个螺栓的拧紧、每一道涂层的喷涂，都必须完全符合技术规格书的要求，不留任何质量漏洞。

第二节 制造过程质量控制

钢结构桥梁的制造质量是决定桥梁服役寿命与安全性能的核心环节，涵盖了从母材入场验收到构件拼装成型的全流程多环节监管。通过建立严密完善的质量保证体系，能够有效识别并消除制造过程中的各类潜在缺陷，确保每一处结构细节都严格符合设计与技术规范，为工程整体稳固性提供坚实可靠的基础保障。

一、原材料入厂检验与放行

原材料作为钢结构桥梁工程质量的物质基础，其品质优劣直接关系到后续加工精度与焊接接头的最终性能。入厂检验必须遵循一套严格完整的执行程序，确保每一块进场钢板与每一批焊材均具备完整可追溯性，从源头上杜绝劣质材料混入施工现场。质量检验人员应以高度的责任感落实每一项检验任务，确保进入生产线的所有材料都经得起实际工况与时间的考验。

（一）钢材炉批号核对与按批次抽样复验的流程

进场钢材的实物核查需要将钢板表面的喷码信息、钢印标注位置与厂家提供的质量证明书进行逐一比对核对。核对内容具体包括钢材牌号、规格尺寸、炉号、批号及交货状态，任何信息不符或标识模糊不清的材料均不得进入下一生产环节。质量管理人员应建立详细清晰的进场台账，专门记录每张钢板的唯一识别码，确保在桥梁全寿命周期内实现精准溯源，防止材料在场内流转过程中发生混淆错用。

完成初步信息比对后，专业检测人员需按照国家及行业规范要求完成取样作业，借助专业的化学成分分析与力学性能测试手段，对材料的屈服强度、抗拉强度、延伸率及低温冲击韧性进行全面评估。针对厚度超过规范阈值的钢板，还需额外进行超声波探伤检查，确认其内部是否存在夹层、裂纹或非金属夹杂等隐蔽缺陷。这些检测项目是确保结构安全的关键防线，能够有效避免由于微观缺陷引发的脆性断裂风险。所有测试数据经具备资质的第三方检测机构确认后，方可签署材料放行指令，允许材料流入生产环节。

（二）焊接材料、涂装材料性能指标的抽检与判定规则

焊接材料的性能直接决定了焊缝的最终强度与韧性，是桥梁受力安全的关键影响因素。每批焊丝、焊条或焊剂入库前，必须先检查其包装是否完整、是否存

在受潮变质的情况。性能抽检应重点关注熔敷金属的抗拉强度、屈服强度与扩散氢含量，确保其与母材具有良好的力学匹配性，能在高强度持续应力下保持性能稳定。涂装材料则需进行稠度、细度、干燥时间及固体含量等指标的常规试验，确保其防腐性能能够满足设计要求的使用年限。

针对处于沿海或高腐蚀特殊环境下的桥梁，涂料的附着力与耐盐雾性能更是检验的重中之重。通过对涂料组分的精确分析，可以有效防止因施工中溶剂挥发过快或配比失调导致的漆膜龟裂问题，大幅提高涂层的整体抗候能力。质量判定规则严格依据现行行业标准执行，若抽检发现某项指标不符合要求，需按规则双倍取样进行复检。复检仍不合格时，该批材料直接判定为不合格，不允许在桥梁任何部位降级使用。对于已经长期存放的库存涂料，在使用前还必须重新核实其保质期与物理稳定性，确保每一克涂料都能在钢材表面形成完整坚实的防腐屏障。

（三）不合格材料的隔离、标识与退库处理程序

在入厂检验中发现的任何不合格材料，必须立即启动质量预警程序，防止其在不知情的情况下被误用于桥梁重要受力构件。为了确保管理流程的严密性，工厂管理层应提前制定详尽明确的不合格品处置细则，具体操作中通常采取闭环处置措施：先立即将不合格钢材或各类辅助材料转移至专门设立的不合格品隔离区，该区域应设置明显的物理围挡与红色警示标牌，在空间上与合格材料存放区完全分隔开；随后在不合格材料的显著位置喷涂醒目的不合格标识，记录员同步更新工厂物料管理系统中的材料状态信息，将其锁定为不可调用状态，从流程上避免领料环节产生人为疏忽。

完成上述操作流程后，物资管理部门应及时联系材料供应商办理退货事宜，并全程监控装车外运的整个过程，完整保留退库回执与运输记录备查。所有处置过程中的影像资料与文字记录均需统一整理归档，以便在后续质量审计或责任追溯中提供完整证据支撑。这种闭环的不合格材料管理模式，不仅能彻底消除现存质量隐患，还能通过责任追溯机制倒逼原材料供应商提升自身品控水平，从供应链端保障进场原材料质量的持续稳定提升。

二、零部件加工与组装质量控制

零部件的精密加工是确保桥梁线形美观与整体受力合理的核心前提条件。从板材切割下料到单元模块组装，每一道工序都存在尺寸偏差累积的风险，必须通

过高频次的质量检测与精细化的工艺卡控来予以消除。加工过程中的误差管理水平，直接反映了制造企业的技术水准与对工程质量负责的态度。

（一）切割、矫正、制孔尺寸“全检与抽检”频次的规定

在板材切割环节，数控切割机必须提前按照预设的切割补偿值进行下料，避免热变形带来的尺寸偏差。针对主梁腹板、翼缘板等关键承载构件，应实施百分之百的全尺寸全检，确保构件几何形状与焊接坡口角度完全符合设计图纸要求。在零件产出后，专职检查员需要逐项核对长宽偏差、对角线误差及边缘粗糙度，对于超出公差允许范围的零件必须进行返工修正。矫正工艺的核心作用是消除焊接或剪切工序产生的残余应力及形变，通过机械矫正或局部热矫正的方式，将板材平整度控制在规范要求的数值范围内。

在制孔工序中，孔径大小与孔位位置精度是整个工序的控制重点。对于高强螺栓群等密集孔区，必须执行首件全检制度，后续生产按百分之二十的比例随机抽检。如果抽检中发现孔位超差问题，必须立即停止当前生产，查找模具损耗或编程软件错误的原因，并将受影响生产批次全部扩大检查范围。针对群孔整体通过率，应采用专用标准量规实测验证，确保现场安装过程顺畅无阻碍。精细化的检验频次规定，既平衡了工厂生产效率与质量管控的关系，也为整体加工精度搭建了坚实的制度防火墙。

（二）板单元、桁片、节段组装间隙与错边量的工序卡控

板单元的组装是大型钢梁制造的基础工序，重点在于控制纵向加劲肋与面板之间的相对位置精度。在专用胎架上进行定位作业时，必须使用精密测量仪器对组装间隙进行实时测量，确保焊缝根部间隙处于工艺要求的最佳范围。对于形态复杂的桁片结构，其几何线形的精准度直接决定了整桥跨径受力分布合理性，检测人员需要对节点夹角与构件空间坐标逐一复核。错边量的控制对于提升桥梁整体疲劳寿命具有重要意义，在节段对接过程中，应利用专用码板与液压顶撑设备进行精细化微调，将相邻钢板表面高差控制在极小范围内，防止焊缝位置产生不必要的应力集中。通过制定详细的工序卡控单，操作工人能够清晰掌握每种构件的允许偏差范围，并在完成自检合格后填写实际测量数据。班组长的复检与专职质检员的终检，共同构成了多级质量把控屏障。针对超过限值要求的偏差，必须第一时间查明原因并重新调整胎架参数，确保不合格误差不向下游工序传递。这种对组装间隙与错边量的严格把控，能大幅减少因拼装不良导致的焊接裂纹隐患。

（三）隐蔽工程（如箱内隔板、内部焊缝）的封闭前签证

箱形梁内部结构复杂，一旦完成封板作业，内部的焊缝质量与涂装情况将极难通过常规手段进行检查整改。隐蔽工程的验收签证制度是这类部位质量控制的最后关口，要求质检部门在顶板或侧板闭合焊接前，对内部的横隔板、纵肋连接件进行地毯式排查，确保每一条内部焊缝均已按照设计要求完成焊接施工。签证流程明确规定，现场施工员必须提前完成报验，由监理工程师会同业主代表共同进场检查。检查内容具体包括箱室内部清理情况、临时支撑拆除彻底度及关键受力部位防腐涂层厚度。任何残留在箱室内部的铁屑、杂物或未完成的工艺点，都必须在封闭前清理整改到位。签字确认后的验收影像资料应包含明确的方位参照物，确保存档资料真实可追溯。通过严格的验收签证手续，能有效预防内部腐蚀隐患与结构失效风险。在完成封闭焊接后，还应对封闭缝进行整体严密性试验，确保箱室内部环境能够长期保持稳定干燥。这种前置化的风险管控思维，能够把质量隐患提前控制在萌芽状态。

三、焊接与预拼装质量控制

焊接工艺的稳定性是钢结构桥梁整体强度的核心保障，而预拼装则是检验制造精度与设计意图吻合度的实战演习。通过对工艺纪律的严格巡查与对试板结果的精准评定，可以确保焊接接头的微观力学性能完全达标。预拼装环节则从宏观维度验证了整体结构的匹配性，有效降低后续现场安装作业的风险。

表 9-2 焊接与预拼装质量控制主要内容及要求表

管控环节	核心管控内容	管控要求
焊接工艺纪律管控	人员资质、参数监控、记录抽查	全员持证上岗，参数符合预设区间，一缝一档可追溯
产品试板性能评定	拉伸、侧弯、冲击试验	所有指标符合规范要求，不合格即暂停相关焊接作业
预拼装三方联检	线形、孔通过率、错边量	所有指标合格后方可出厂，误差全部消除在工厂内

从表 9-2 可以看出，焊接与预拼装质量控制环节的每项内容都对应着明确的管控要求，形成了覆盖全流程的质量防护网。

（一）焊接工艺纪律的巡检与参数记录的抽查

焊接现场的工艺纪律是保障焊接质量持续稳定的基础。专职巡检人员每日应

对现场焊工的岗位资格进行抽查验证，确保所有焊接作业人员均持证上岗，杜绝无证人员顶岗操作。在焊接作业过程中，必须实时监控电流、电压及焊接速度等关键工艺参数，确认其处于焊接工艺评定预设的区间范围内。针对低温环境作业或大厚板焊接施工，还需对预热温度与道间温度进行红外测温并记录，防止因冷却速度过快产生淬硬组织，引发焊缝脆裂风险。参数记录的抽查应覆盖每一台在役焊接设备，通过工厂数字化管理系统调取焊接电源的历史运行曲线，分析是否存在电流电压大幅异常波动的情况。

对于桥梁重要位置的主焊缝，必须做到一缝一档，清晰记录焊工编号、所用焊接材料批次及作业时的现场温湿度。这种全方位的监控管理，促使焊工时刻保持警惕，严格执行既定工艺规程，避免操作的随意性。巡检中如果发现违章操作行为，应立即责令停工整改，并对已完成的焊接部位进行全面探伤检测。通过持续的现场监管，在工厂内部培养起全员重视工艺纪律的良好氛围，为产出高质量焊缝提供基础支撑。这种严格把控，是打造精品钢结构桥梁的必然选择。工厂管理者应定期组织工艺技术交流活动，将日常巡检中发现的典型问题整理制成教学案例，教育全体员工以此为戒，不断优化焊接操作流程，确保每一条焊缝都经得起超声波与射线探伤的严苛扫描检验。

（二）产品试板（拉伸、侧弯、冲击）的试验结果评定

产品试板是模拟实际构件焊接过程的实物见证，其性能数据是评定整桥焊接质量的关键依据。试板的材质、规格以及采用的工艺参数必须与主桥焊接作业保持一致，并在相同的现场环境下完成施焊。焊接完成后，需按规范标准切取拉伸、侧弯及低温冲击试样，送往具备资质的专业实验室进行破坏性试验。在评定拉伸试验结果时，焊缝的实测抗拉强度不得低于母材标准值的下限要求，确保焊缝承载能力不弱于母材。侧弯试验则要求试样在弯曲到规定角度后，受拉面不得出现长度超过规范限值的裂纹，以此验证焊缝的塑性达标情况。冲击功的实测数值直接反映了焊接接头在极端低温环境下的韧性储备，是评定低温环境桥梁焊接质量的关键指标。若试板检测数据不合格，必须立即组织行业专家开展质量追溯，分析是材料波动还是参数偏离引发的问题。在查明原因并采取有效纠正措施前，相关部位的焊接作业必须暂停。通过严谨科学的试板评定制度，可以将潜在的质量风险量化呈现，确保桥梁在长期动载荷作用下保持结构稳固。

（三）预拼装胎架上线形、孔通过率、错边量的三方联检

预拼装是钢结构桥梁出厂前的综合大体检，旨在提前发现并解决后续现场安装可能出现的矛盾问题。在宽敞平整的预拼装胎架上，按设计跨径将各个制造节段依次排开定位，利用高精度测量仪器完成各项参数测量。三方联检由建设单位、监理单位及制造施工单位联合开展验收，具体检查内容分为三部分：线形联检侧重于测量全桥的预拱度与平曲线偏差，确保拼装后的整体线形与设计轴线精准契合，彻底消除各环节累积的加工误差；孔通过率检测使用比螺栓直径大半毫米的标准样板冲头，对所有拼装连接孔进行逐一试通，对于关键受力点的螺栓孔，其通过率必须达到百分之百，以此保障现场安装过程顺畅无阻；错边量联检重点关注板件对接面的整体平整度，利用塞尺逐一测量记录实际数据，对于超标部位需要现场制定针对性返修方案，确保所有精度调校都在工厂内完成。

三方参检单位共同在验收单上签字确认后，方可启动构件拆解与出厂涂装作业。这种三方联检机制通过监督与自检相结合，把所有加工误差都消化在工厂车间内，极大提升了后续野外现场安装的作业效率，为大桥精准合龙提供了坚实保障。这种机制本身就是质量保障的关键环节，也是对前期所有加工精度的一次全面复盘验证。通过对预拼装胎架采集到的数据进行深入分析，工厂技术团队可以进一步优化后续节段的下料补偿值，实现全桥制造精度的动态控制。每一项联检数据的合格，都代表着桥梁向成功合龙迈进了一大步。三方联检不仅是质量管控程序上的交接，更是多方技术力量的共同协作与质量承诺，确保了钢结构桥梁在离开工厂后，能够以完美的姿态耸立于山川河海之间，承载起跨越时空的重托与使命。

第三节 现场安装质量控制

现场安装阶段是钢结构桥梁建设的最终成型环节，涵盖了从构件运抵工地到最终完成整体拼装的全部施工过程，这一阶段的质量控制直接关系到桥梁投入使用后的结构安全、整体几何精度以及长期耐久性能，是决定桥梁建设整体品质的核心环节。

一、构件进场与现场环境控制

构件在运输过程中可能受到物理损伤或防腐涂层破坏，而现场环境因素对最

终焊接质量有决定性影响，加强进场检验与环境监控是确保后续安装作业顺利开展的核心前提，从源头上消除各类潜在的安全与质量隐患。

（一）进场构件涂装破损、变形的检查与现场修复审批

钢结构构件在长途运输和吊装卸货过程中，极易发生涂层划伤或是局部受撞变形。项目质量管理人员需在构件抵达现场后，立即对照装箱单与设计图纸开展全数检查，不遗漏任何一处细节问题。针对涂装破损问题，应详细记录损伤的面积、深度及具体部位，明确底漆、中间漆、面漆的各层剥落情况；若损伤已经涉及金属基材，必须进行精细化的表面打磨除锈处理，保证补涂后的附着力满足要求。变形检查则侧重于板件的平整度、边缘曲度及连接孔位偏移量，利用全站仪或高精度靠尺测量实际偏差值，确保各项指标均控制在设计允许的公差范围内。

对于检测出的各类质量缺陷，施工单位严禁擅自处理，必须先编制专项修复技术方案，详细说明修复采用的打磨工艺、补漆品牌型号以及施工环境温湿度控制要求，该方案需经监理工程师及建设单位代表严格审批通过，确保修复后的防腐层性能与原厂出厂涂层保持高度一致。若构件变形超标，则需根据变形的性质和严重程度，决定是采取现场物理矫正、热矫正或是直接返厂重新加工处理。所有修复过程都应当留存完整的影像资料，由项目质量负责人现场确认修复质量达到设计标准后，构件方可进入下一道施工工序。

现场修复过程中对涂装配套材料的选型必须格外慎重，必须采用与原厂出厂配置完全匹配的涂料型号，防止不同性质的漆膜发生化学反应，后续出现起皮、脱落等问题。补漆作业应在无尘且通风良好的条件下进行，施工过程中要严格控制湿膜厚度与干膜总厚度，保证防腐性能符合设计要求。

（二）现场高强螺栓穿孔率与板层间隙的逐孔检查

高强螺栓连接是钢结构桥梁受力传递的核心方式，其最终施工质量取决于螺栓孔的加工精准度与钢板接触面的严密贴合程度。在构件就位并初步固定完成后，质量管理人员应当对连接板的穿孔率进行逐个孔位的核实，一般通过使用专用量具或同规格螺栓实物进行试穿，严禁采用大锤强行敲入螺栓，以免损伤螺栓螺纹或是改变孔壁原有受力状态。对于穿孔率不达标的孔位，应先查明原因是构件制作偏差还是安装位姿不正导致的，并且严格禁止施工方擅自进行扩孔或是气割冲孔，必须上报审批后按照规范方案处理。

钢板层间的缝隙大小直接影响到摩擦面的抗滑移系数及连接的整体刚度。在

螺栓正式安装前，必须采用塞尺对各个连接板之间的缝隙进行全面探测。根据现行施工规范要求，板层间隙若超过规定数值，必须采取必要的技术处理措施，比如加设符合规格的垫片或是对板边进行修整，防止螺栓紧固后产生不必要的附加弯矩，影响节点受力性能。现场检查需要覆盖每一个连接节点，重点关注多层钢板叠加的复杂受力区域。对于间隙检查合格的孔位，应立即进行临时固定，防止灰尘或水分进入板层内部，影响摩擦面的抗滑效果。

（三）现场焊接防风防雨设施有效性的专项验收

钢结构桥梁现场焊接的作业环境通常极其复杂，多变的气候条件是产生气孔、夹渣、裂纹等各类焊接缺陷的主要诱因。项目质量管理人员应对每一个焊接工位配备的防风防雨设施进行专项验收，确保整个作业区域都处于受控状态。其中防风设施必须具备足够的结构强度与覆盖范围，能够将施焊区域的风速稳定控制在规范要求的范围之内；防雨棚则应具备良好的密封性能，防止雨水渗漏到焊缝区域，导致焊缝骤冷产生淬硬组织，留下脆性开裂隐患。验收过程中需重点检查围挡的整体稳固性、挡风板的连接严密性，避免出现漏风漏雨的死角。

专项验收还需要关注作业平台内部的施工微环境，焊接作业区除了满足基本的防风防雨要求，还应配套必要的除湿与局部预热设备，特别是在高海拔、高湿度或是低温地区施工时，这一点尤为重要。对于验收不合格的防护设施，应责令施工方立即停工整改，在设施未通过验收前，严禁启动任何焊接作业。验收工作应当形成完整的书面记录，明确每个焊点的防护状态，并且项目团队要根据气象预警及时调整防护等级。这种全方位的环境监控，是保证大跨度钢梁现场环口焊接质量的坚实屏障，只有防护设施通过验收，方可签署焊接作业开工指令。

二、安装工序的质量关键点

安装工序中的质量控制是桥梁成型的核心，整个过程涉及复杂的结构力学变化，针对关键节点的精细化管理，能有效规避结构应力集中问题，确保桥梁在施工过程中的每一个状态都处于设计的受控范围内，避免出现不可控的结构变形或应力超标问题。

（一）临时连接解除前节段应力与线形的确认

在钢梁节段吊装完成并实现初步连接后，解除临时支撑或临时连接是一项具有极高安全风险的操作。在操作正式开始之前，必须对当前节段的应力分布与几

何线形进行全面测量与确认。施工单位应利用安装在关键受力部位的应变片，读取实际应力数据，并将其与设计预测值进行对比分析。如果实际应力与理论计算的偏差超过预先设定的警戒值，必须立即暂停作业，分析是否存在结构卡死或支撑受力异常的问题，待查明原因并处理完毕后方可继续推进作业。

线形控制则主要依靠高精度全站仪对各特征点的三维坐标进行动态监测。在解除临时连接的过程中，节段的空间位置会发生微小的调整变化，因此必须建立实时监控机制，持续观测标高、平面位置及扭转角度的位移量。通过采集的实际数据，可以准确判断桥梁主梁的预拱度是否满足设计预期。确认工作必须同时满足以下三个核心条件：

一是关键截面的应力监测数据必须控制在设计给出的安全余量范围内；

二是整体线形偏差必须小于现行规范规定的容许值；

三是支座及其附属构件的受力状态需表现出协调性，不存在局部受力异常的问题。

（二）合龙口尺寸连续观测与温度敏感性分析验证

桥梁合龙是钢结构施工中最关键的一步，其合龙口的几何尺寸受环境温度变化影响极其显著。为了选定最佳的合龙时机，必须在合龙作业开始前进行不少于三天的连续观测，每隔两小时记录一次合龙口的开合量、钢梁表面温度以及环境空气温度。通过对采集的数据进行回归分析，建立温度与合龙口宽度的敏感性关系曲线，从而精准预测合龙当日特定温度下的理论尺寸。这种连续性的动态监测，可以有效降低由于热胀冷缩引起的结构合龙困难，保障合龙精度符合设计要求。

温度敏感性分析的深度直接决定了合龙的最终精度。除了常规的长度变化观测，还应分析日照温差导致的钢梁横向偏差与纵向伸缩的耦合效应，避免只考虑单方向变形带来的合龙误差。验证工作不仅局限于数据测算，还包括对临时锁定装置刚度的校核，确保锁定过程中结构不会发生额外变形。在正式合龙作业前，施工技术团队应根据敏感性分析结果，制定针对性的温度补偿方案与顶推方案，调整合龙口尺寸至设计要求范围。通过这些科学的预测与分析手段，可以将施工现场的误差降到最低，实现高质量、高精度的结构闭合。所有观测数据应实时汇总整理，为最终的合龙决策提供可靠依据。

（三）高强螺栓施拧标记与终拧扭矩的旁站监督

高强螺栓的紧固质量直接关系到节点的长期疲劳寿命，其施工过程必须严格遵循初拧、复拧与终拧的工艺顺序，不得省略任何一道工序。每一枚高强螺栓在完成终拧后，都必须由操作人员在螺栓头、螺母以及母材上划出整齐的白色或彩色标记，这些标记不仅是施工完成的证明，更是后续检查防松动以及判断扭转角度的重要依据。项目质量监督人员应定期巡视检查标记的完整性，重点排查是否存在漏拧、重拧或者施拧不到位的情况，确保每一组连接副都达到了设计预定的紧固力标准。

终拧扭矩的旁站监督是质量管控的红线要求。监理人员需对每天施工完成的高强螺栓进行抽样实测，利用经计量校准的数显扭矩扳手对已经紧固的螺栓进行扭矩复核。检查比例通常不低于节点螺栓总数的百分之十，且每个连接节点抽检数量不少于两个。旁站过程中应详细记录环境温湿度、校准扳手编号、抽检点位以及实测数值。如果发现扭矩不足或超拧现象，必须对该区域的所有螺栓进行全数排查并查明偏差原因，直至全部抽检合格后方可进入下一道工序。通过这种严格的管控模式，从根源上杜绝高强螺栓连接的安全隐患。

三、现场检测与缺陷闭环管理

现场检测作为评价安装质量的最后关卡，必须保证检测数据的客观性与准确性，建立缺陷闭环管理体系，能将所有问题都纳入受控流程，防止任何隐患遗留到下一阶段。这既是对现场安装成果的最终检验，更是推动项目质量持续改进的基础保障。

表 9-3 列出了钢结构现场安装常见质量缺陷台账核心字段信息：

建立系统化的质量缺陷台账是实现管理闭环的基础，上文表格列出了钢结构现场安装常见质量缺陷台账核心字段信息，台账应当详细记录工程建设过程中发现的所有质量问题，包括构件进场损伤、螺栓连接偏差以及焊缝探伤不合格等所有类型的问题，每一项缺陷都应分配唯一的编号，并载明问题的具体描述、发现日期、责任单位以及要求的整改期限。通过这种动态更新的数字化台账，项目管理层可以清晰掌握现场质量整体现状，及时协调资源推进整改。台账的管理不仅是简单的记录，更是通过数据分析识别出频繁发生的共性质量问题，从而在后续施工中提前采取预防性措施，推动质量管理从被动纠偏向主动预防转变。

表 9-3 钢结构现场安装质量缺陷台账核心字段表

字段名称	字段内容说明	填写要求
缺陷编号	缺陷的唯一身份标识	按缺陷发现顺序连续编号，不得重复
缺陷位置	缺陷所在的具体施工区域与构件部位	标注清楚桩号、构件编号、节点位置，便于查找
缺陷描述	缺陷的类型、尺寸与严重程度	内容客观准确，附现场原始照片
发现日期	缺陷被检出的具体日期	精确到年月日
责任单位	承担缺陷整改责任的施工班组或分包单位	明确到具体责任方
整改要求	缺陷整改的标准与完成时限	明确整改工艺与验收要求
整改状态	当前缺陷的处理进度	分为未整改、整改中、待验收、已销号四类
销号日期	缺陷验收合格完成销号的日期	精确到年月日，未销号留空

整改闭环销号是质量管控的最终终点。当质量问题整改完成后，责任单位应提交完整的整改报告及支撑材料，包括整改后的现场照片、复测记录及相关材料质量证明。销号程序包含三个严密的步骤：

- 首先由项目技术负责人核查整改措施的针对性，确认整改符合方案要求；
- 再由监理工程师进行现场实地核查，确认合格后签署核查意见；
- 最后由项目质量管理部门在台账中注明销号状态并整理归档。

只有完成销号的项目，才能计入当月的合格产量，通过严密的闭环销号制度，确保每一个质量缺陷都得到彻底解决，不会遗留任何隐患。

（一）现场焊缝无损检测的委托、实施与结果通知

钢结构现场焊缝的内部质量需要通过无损检测手段进行深度探测，以识别是否存在裂纹、未焊透或严重的内部夹渣等影响结构安全的缺陷。施工单位应根据设计要求与合同约定，委托具有相应资质的第三方检测机构进场作业，委托内容必须明确检测部位、检测比例以及采用的技术标准，比如采用超声波探伤或是射线检测。检测实施前，应对焊缝表面进行清理，确保其平整度满足探头耦合要求，不会因为表面杂质影响检测结果的准确性。检测过程应全程受监理监督，确保扫查范围覆盖所有热影响区，严禁出现漏检或是出具虚假检测报告的情况。

检测结果的通知与处理必须具备时效性。第三方机构在完成检测后，应在规定时间内出具正式书面报告，并将检测结论同步通报建设、监理与施工单位三方。结果通知单需清晰标注焊缝编号、探伤等级以及缺陷的具体位置和尺寸。对

于判定为合格的焊缝，方可进行后续的防腐喷涂作业；对于发现缺陷的焊缝，必须立即采取围挡警示，第一时间进入返修流程。所有检测数据应建立数字化档案，实现每一个焊点的检测结果可溯源，为桥梁全寿命周期的维护提供最原始的质量依据。

（二）不合格焊缝返修工艺的现场审批与复探确认

针对检测发现的不合格焊缝，施工单位必须编制严密的返修工艺方案并报现场工程部审批。返修方案应包含缺陷清除的方法、坡口修整的形状以及预热温度的设定，通常采用碳弧气刨或机械切割方式清除缺陷，清除深度必须超过缺陷部位并露出健康的金属母材，避免缺陷残留。审批过程中应重点审查返修所选用的焊接材料是否与原焊缝一致，以及返修焊工是否具备高难度位置的施焊资质。同一部位的返修次数严禁超过两次，若两次返修仍不合格，必须组织专项专家论证并制定针对性的处理措施。

返修完成后的复探确认是彻底消除缺陷的最后一步。返修区域在冷却至常温且经过规定的放置时间后，必须由原检测单位进行全数复探，复探范围应比原缺陷区域向两侧延伸至少五十毫米，保证缺陷没有残留。只有复探结论明确为合格后，该项缺陷方可视为处理完毕。返修过程中需要严格控制热输入，防止因反复加热导致母材性能劣化，影响结构整体强度。现场质量管理人员需对返修全过程进行旁站监督，并形成专项记录，载明返修时间、工艺参数及复探结果，确保每一条缺陷焊缝都得到彻底修复并符合设计规范要求。

（三）质量缺陷台账的建立与整改

闭环销号质量缺陷台账是现场安装质量管理的核心工具，需要安排专人负责日常维护更新，确保所有新发现的质量问题都能第一时间录入系统，不会出现遗漏。台账更新后，项目质量管理人员需要定期梳理未整改缺陷，提醒责任单位按时推进整改工作，对于超期未整改的问题，要启动相应的督办问责程序，督促责任方加快整改进度。台账的记录内容需要始终保持真实准确，不得随意涂改原始信息，所有修改都需要标注修改人员与修改日期，保证管理过程可追溯。

在完成台账记录、整改实施、分级验收后，最终的闭环销号环节是缺陷管理的收尾，也是确认问题彻底解决的关键一步。按照既定的销号流程完成所有核查步骤后，才能对缺陷进行销号处理，真正形成从发现问题到解决问题的完整管理链条。这套完整的缺陷台账与闭环销号管理模式，能够系统性梳理现场安装过程

中的所有质量问题，从根本上避免质量隐患的遗留，为钢结构桥梁的安装质量提供全方位的制度保障。

第四节 工程验收程序与标准

工程验收是钢结构桥梁建设流程中的终极环节，其核心目的在于通过标准化的检测手段与多方位的核查机制，确保桥梁结构的承载能力、耐久性能及外观品质完全符合设计预期与安全规范，为后续通车运行提供制度保障与技术背书。

一、分部分项工程验收

在钢结构桥梁的施工过程中，分部分项工程验收构成了质量控制的微观基础。通过对各工序、各单元进行细致的检查，能够及时发现加工制造与现场拼装阶段存在的偏差，确保每一个结构节点的稳固性与可靠性都达到行业标准。

（一）检验批的划分原则与主控项目、一般项目的判定

检验批的划分应当遵循便于施工质量控制与验收的原则，通常按照工程量、施工段或变形缝划定范围。在钢结构制造阶段，要以同材料、同工艺、同批次入库的构件作为一个检验单元；在现场安装阶段，则常以单跨梁体、支撑体系或节点连接区作为划分依据，确保每一组检验数据都具备代表性与可追溯性。通过这种层层递进的划分方式，管理人员能够精准锁定潜在的质量风险区域，为后续的抽检与评定提供科学的样本支撑，保障整个工程进度与质量协调统一。

主控项目是关乎结构安全与关键使用功能的强制性标准，必须达到百分之百合格率。对于钢结构桥梁来说，主控项目涵盖了钢材的化学成分与力学性能检验、焊缝内部缺陷的超声波探伤、高强度螺栓连接副的摩擦面抗滑移系数试验等核心指标。如果主控项目中有任何一项不符合要求，该检验批就直接判定为不合格，必须进行返工或加固处理。同时，主控项目的判定必须依托具备资质的第三方实验室出具的正式检测报告，任何口头承诺或是非标准化的简易测试都不能作为判定的法定依据。

一般项目的判定则留有一定的容错空间，主要针对构件的外观质量、几何尺寸偏差等非关键受力指标。通常情况下，一般项目的合格判定标准为：百分之八十及以上的抽检点实测偏差处于规范允许范围内，且最大偏差不超过规定限值

的一点二倍。比如钢梁的涂层厚度、构件边缘的毛刺处理、不影响受力的表面划痕等，都属于一般项目范畴。这种兼顾核心安全与实际落地的判定逻辑，既守住了结构安全的底线，又适配了工程实施效率与实际生产中的合理波动，体现出现行验收规范的科学性。

（二）隐蔽工程验收记录与影像资料的完整性审查

隐蔽工程指的是后续工序施工后会被覆盖、无法直接观察检测的部分，其验收工作是防止结构隐患被“掩埋”的关键屏障。在钢结构桥梁中，典型的隐蔽工程包括箱梁内部的加劲肋焊接、锚固端的预埋件设置、支座底板的灌浆填充以及封闭空间的内壁防腐涂装等。在下一工序启动前，必须由建设单位、监理单位及施工单位共同完成现场验收并签署书面确认文件。这种多方参与的审查模式，能有效杜绝单方疏忽带来的质量漏洞，确保桥梁每一个隐蔽部位都结构完整、性能稳定。

影像资料的收集与审查是隐蔽工程验收中不可或缺的实物证据，要求能够全方位、多角度还原施工现场的真实状态。影像内容必须包含隐蔽前的基层处理、关键工艺的执行过程以及成型后的整体形貌，还需要附带标注日期、地点、部位名称的电子标签。管理人员审查时，要重点核对影像内容和书面记录是否吻合，避免出现资料造假或是移花接木的情况。完整清晰的影像资料不仅给质量评定提供了直观参考，更为桥梁全寿命周期维护及突发事件的责任溯源提供了极具价值的第一手原始证据。

（三）分部工程质量评估报告的编制与签认

分部工程质量评估报告是评价某一阶段施工成果的总结性文书，编制过程需要整合所有检验批原始记录、原材料检测试验报告、施工过程监控数据以及各级自检资料。评估报告的编制包含三个核心环节：

一是基础数据的采集与汇总，由施工单位质量员负责归类整理检验批中的实测数据与合格判定结果；

二是监理工程师对汇总数据的真实性与符合性进行现场抽检核实，针对存在争议的项目重新测量或是组织专家论证；

三是形成书面评估结论，明确说明分部工程是否达到设计强度要求、构造连接是否安全可靠以及是否具备进入下一阶段施工的条件。

评估报告的签认必须严格执行签字盖章制度，由项目经理、总监理工程师及

建设单位代表做终审签署。这份报告不仅是分部工程验收通过的法定凭证，更是工程款拨付与最终竣工验收的重要支撑材料，签认过程的严肃性，本身就是参与各方对工程质量终身责任承诺的体现。

二、竣工预验收与整改

竣工预验收是正式交付前的全面“体检”，也是发现深层次问题、提升工程精细化水平的最后机会。通过模拟运行环境排查各项指标，能够在正式投用前彻底消除潜在缺陷，保障桥梁移交后的运行品质与社会口碑。

（一）实体质量全面排查（外观、尺寸、涂层、线形）与清单

外观质量排查侧重于钢结构表面的视觉效果与完整性，重点核查涂层是否存在流坠、气泡、开裂或锈斑等表观缺陷。对于暴露在外的连接节点，要检查焊缝波纹是否均匀、螺栓外露丝扣数量是否统一。桥面铺装的平整度、伸缩缝的安装平顺度以及排水设施的畅通情况，都属于外观排查的核心内容。通过这种大面积、地毯式的视觉排查，可以及时修补施工造成的细微损伤，让桥梁呈现出良好的工业美感。

尺寸偏差与线形核查需要借助全站仪、水准仪等精密仪器完成空间坐标定位。对于钢结构桥梁而言，桥跨中心的预拱度设置、主梁的轴线偏移以及横向宽度等几何参数，必须严格控制在毫米级误差范围内。线形的流畅度不仅影响车辆行驶的平顺性，更能反映钢结构整体拼装的精度水平。排查过程中，技术人员要对比设计坐标与实测坐标，通过统计分析各关键测点的偏差值，评价桥梁整体受力结构的空位形位是否符合平衡要求。

涂层厚度的检测一般采用电磁测厚仪随机抽测，目的是验证防腐体系是否达到设计年限要求的保护强度。对于处在海洋环境或高污染区域的桥梁，涂层厚度的达标率直接决定了钢结构的抗腐蚀寿命。排查过程中要建立详细的检测清单，标注每个部位的实测厚度，再和设计要求逐一比对。如果发现局部区域涂层过薄或是附着力不足，必须要求施工单位做完表面处理后重新喷涂，确保防腐屏障没有瑕疵。

完成以上各项排查后，最终会形成一份详尽的实体质量问题清单。这份清单要清晰标注缺陷的类型、具体位置、严重程度以及初步整改建议。这种清单化的管理模式，能让质量缺陷清晰量化、精准定位，避免整改过程中出现遗漏或是盲

目整改，清单的生成也标志着预验收进入实质性整改阶段，为后续高效修复提供了精准指引。不同排查内容的检查要点整理可见表 9-4。

表 9-4 实体质量排查内容要点表

排查项目	核心检查内容	控制要求
外观质量	涂层状态、节点焊缝、螺栓丝扣、桥面平整度、伸缩缝平顺度、排水通畅性	无明显表观缺陷，整体观感规整平顺
尺寸与线形	预拱度、主梁轴线偏移、横向宽度	误差控制在毫米级范围内，符合设计空间形位要求
涂层厚度	各部位防腐涂层实际厚度	满足设计要求，针对特殊环境需保证厚度达标率

（二）桥梁静、动载试验结果的符合性评判

静载试验通过对桥梁施加等效设计荷载，观测结构在极端受力状态下的应变、挠度以及裂缝开展情况，直接验证结构的强度与刚度储备。评判的核心依据是实测变形值与理论计算值的比值，也就是校验系数。通常情况下，校验系数需要处在合理区间内，数值过高可能预示结构刚度不足，过低则可能说明自重计算或是理论模型存在偏差。通过静载试验，管理部门可以直观判断桥梁能否安全承受预期交通荷载。

动载试验则侧重评估桥梁在动力荷载作用下的动力特性，包括自振频率、阻尼比以及动力冲击系数等关键指标。对于钢结构桥梁来说，由于自重相对较轻、阻尼较小，更容易在车辆行驶或是风荷载作用下产生共振。动载试验通过跑车测试、刹车测试等手段捕捉桥梁的振动信号，评判标准核心是实测频率分布是否避开共振敏感区，以及振动衰减速度是否符合动力稳定性要求，这一过程是保障桥梁行车舒适性、预防疲劳破坏的重要技术手段。

试验结果的符合性评判需要综合考虑环境温度、支撑条件以及材料实际参数对数据的影响。得出最终判定结论前，必须组织结构分析专家深度解析试验曲线。如果各项指标都优于设计标准或是处在安全阈值内，即可判定为合格。这种基于科学实验证据的评价体系，给桥梁投产运行提供了最高层级的安全技术准入证明，是任何书面检查都无法替代的硬指标。

（三）预验收意见汇总与限期整改落实情况的复查

预验收工作结束后，验收组会将各专业领域的检查意见系统化整合，形成预验收综合意见书。这份意见书不仅记录发现的质量问题，还包含对施工工艺提升

的建议以及后续运维的关注点提示。对于清单列出的每一个问题，必须明确责任主体、整改要求以及最迟完成时间。这种清晰的责权利划分，能有效推动施工单位集中力量解决残余的质量盲点，确保整改工作高效有序推进。

限期整改期满后，监理单位与建设单位必须组织复查小组开展“回头看”，对照整改清单逐一销号。复查过程强调实物核对，不能只审阅整改报告，必须到施工现场查看整改部位的修复效果。如果整改不彻底或是采用了掩盖性手段，坚决不予销号，还要视情况延长观察期或是采取相应处罚措施。复查结论要作为正式竣工验收申请书的必要附件，体现质量控制闭环管理的严密性。

在整个整改落实过程中，复查人员要关注整改行为是否对原有结构造成二次损伤，比如焊接修复会不会产生新的热影响区脆化，涂装修复会不会污染周边区域。只有当所有缺陷都得到实质性妥善处理，且修复后的性能满足原设计要求，预验收环节才算真正结束，这种精益求精的态度，正是打造高品质钢结构桥梁工程的重要体现。

三、正式竣工验收与档案移交

正式竣工验收是工程建设程序的终点，也是资产交付的起点。通过法律文书确认与技术档案完整移交，实现工程责任从建设者向管理者的平稳过渡，为桥梁长期安全服役提供了全套数据支持与法理依据。

（一）竣工验收证书的签署与工程质量保修书的提交

竣工验收证书的签署，标志着桥梁工程已经完成合同约定的全部建设内容，且质量得到建设、勘察、设计、监理、施工五方主体的共同认可。在签署现场，各方代表要对工程总体评价进行表决，并在验收记录上郑重落款。这份证书不仅是办理建设工程结算的法定依据，更是工程投入使用的行政许可前提，其法律效力覆盖了结构安全性、使用功能性以及环境保护达标情况等多个方面。

签署验收证书的同时，施工单位必须按规定提交工程质量保修书。保修书中要明确界定不同分部分项工程的最低保修期限，比如钢结构主体工程、路面铺装工程以及电气照明系统的质保年限等。保修书还需要提供详细的保修联系人、响应时限以及保修服务的具体范围。这份文件的提交，确保了桥梁投产初期的缺陷责任期内，任何因施工原因产生的质量问题都能得到及时、无偿修复，保障了建设单位的合法权益。

保修书的法律约束力，会推动施工单位在建设过程中更加注重质量细节。同时，建设单位也要依照保修书条款，在质保期内定期巡检桥梁，发现问题及时通知施工方。这种基于契约精神的后续保障机制，搭建起从建设到维护的责任链条，有效降低了桥梁运行早期的维护成本，为桥梁良性运营提供了坚实的契约支撑。

（二）竣工图纸的最终修订与电子版建筑信息模型交付

竣工图纸是真实记录桥梁结构最终状态的工程底图，必须根据施工过程中的设计变更、现场核准记录以及整改后的实际尺寸全面修订。和施工图不同，竣工图要求“所见即所得”，图面上的每一个标注都必须和实物完全一致。绘图人员要在原始图纸基础上，采用规范的修图符号标注，并加盖竣工图专用章，确保运维人员在未来的加固、改造或事故排查中，能获得准确的图纸指引。

随着数字化交付要求不断提升，电子版建筑信息模型交付已经成为现代钢结构桥梁验收的重要组成部分。该模型不仅包含几何三维信息，还集成了材料属性、焊接参数、检测结果、养护要求等非几何信息。交付前，要确保模型已经根据竣工后的实际状态同步更新，修正了施工过程中的模型偏差。通过这种高维度的数字化档案，养护单位可以在虚拟空间完成病害定位与模拟分析，实现桥梁管理从纸质化向智慧化的跨越。

建筑信息模型的详细等级要满足运营阶段的需求，尤其是针对复杂的钢结构节点及内部隐蔽空间。电子文件移交要包含原始建模文件、轻量化查看文件以及关联的属性数据库，除此之外，还要配套提供模型应用手册，指导运维人员提取模型信息。这种软硬件结合的档案移交模式，极大提升了桥梁资产的信息密度，为构建“数字孪生桥梁”奠定了底层数据基础。

（三）制造与安装全过程质量证明文件的组卷归档标准

质量证明文件的组卷归档必须遵循科学性、系统性与完整性的标准，确保档案能够真实、客观反映钢结构桥梁从工厂加工到现场拼装的全过程。档案管理遵循以下分类归档准则：

1. 材料质控类文件，涵盖每一批次钢板的入库合格证、力学性能复验报告、油漆涂料的理化检测证书以及连接副的质量保证书；
2. 施工记录类文件，包括各工序的施工日志、焊接工艺评定报告、无损检测报告以及高强度螺栓的终拧扭矩记录，确保关键工艺可追溯；
3. 过程评价类文件，主要由分部分项工程验收单、隐蔽工程记录、不合格项

的处理方案及复查结论组成，完整呈现质量控制的闭环轨迹。

所有纸质档案要采用耐久性强的墨水书写，组卷时编制详细的目录与页码，装订牢固美观。数字化扫描件要和纸质原件同步归档，并按照预设索引逻辑存储在建设单位的信息管理系统中。档案移交过程中，要由档案管理部门做专项验收，核对档案的案卷数量、内容真实性及编目规范性。

档案归档标准不仅是对过去施工行为的总结，更是对未来社会负责的体现。一套标准化、高质量的工程档案，哪怕经过数十年，依然能为桥梁的安全性评估提供精准参数。钢结构桥梁本身对环境敏感度高、连接部位多，对档案精确度的要求远高于传统混凝土桥梁，只有通过严丝合缝的档案管理，才能确保桥梁在漫长的使用周期中始终处于受控状态，真正实现工程建设的品质长青。

第十章 钢结构桥梁维护与管养

钢结构桥梁在长期服役过程中，同时承受自然环境侵蚀与车辆荷载作用，结构的安全性和耐久性会随服役时间推移不断下降。科学的维护与管养是延长桥梁使用寿命、保障交通安全的核心环节，这项工作必须建立在对结构现状精准掌握的基础上。开展系统化巡检能够动态掌握结构健康状态，为预防性养护提供可靠的决策依据。

第一节 常见病害类型与成因

准确识别并分析钢结构桥梁的常见病害，是开展有效维护工作的前提。病害的产生往往是材料劣化、力学效应与外部损伤等多种因素共同作用的结果，深入解析病害特征与形成机理，能够为后续加固维修方案提供扎实的数据支撑与理论依据。只有吃透病害发生的内在机理，才能在海量巡检数据中精准捕捉异常，真正做到防患于未然，保障桥梁在全寿命周期内的运行安全。

一、防腐涂装体系的劣化病害

防腐涂装是钢结构抵御外部腐蚀的第一道防线，涂层的完整性直接关系到主体结构的安全。在复杂的大气环境中，涂层会经历从表层失光到深层破坏的渐进过程，化学反应与物理损伤相互交织，逐步侵蚀涂装体系的保护效能，最终导致其保护功能完全丧失。研究涂装劣化规律，不仅涉及材料科学知识，还和区域环境气候条件密切相关。

（一）粉化、起泡、剥落与开裂的机理分析

涂装体系长期受紫外线照射，涂料中的高分子树脂分子链会发生断裂，面漆表层的有机成分逐渐降解，最终形成松散的粉末状物质，这一现象就是粉化，也是涂层性能衰退的初期表现。随着环境中的水分不断渗入涂层，水分和电解质会不断在涂层内部或是涂层与钢材基材的界面处积聚，在温度变化的作用下产生渗透压和膨胀应力。当这种内部应力超过涂层对基材的附着力后，局部区域就会形

成半球形隆起，也就是起泡病害。起泡不仅破坏了涂层平整度，更会因为水分持续聚集，加速钢材基体的电化学腐蚀进程。

腐蚀反应生成的铁锈会发生体积膨胀，进一步将涂层顶离钢材基体，最终发展为大面积的涂层剥落。这种从点状起泡到面状剥落的渐进发展过程，会让钢结构彻底失去防护屏障。与此同时，在干湿循环和高低温交替作用下，涂层柔韧性不断下降，逐渐变脆，最终产生脆性裂缝。开裂初期一般只出现在漆膜表层，但裂缝会顺着涂层厚度方向向下延伸，一直贯通到金属表面，给外界的氧气和腐蚀介质打开了直达基材的通道，进而引发严重的钢材锈蚀。

（二）机械损伤（刮擦、碰撞）导致的底漆裸露锈蚀

钢结构桥梁在施工、日常管养或是正常运营阶段，很难完全避免外部重物冲击或是交通工具的刮蹭。这类机械损伤往往只出现在局部位置，但破坏力极强，会瞬间破坏完整的涂装膜层。当重物碰撞构件表面时，巨大的冲击力会造成涂层剪切破坏或是受压变形，导致面漆、中间漆甚至底漆一同开裂或是直接脱落。这种瞬间发生的物理破坏，会让原本被涂层封闭保护的钢材基体直接暴露在空气中，彻底失去防腐涂层的化学保护与屏蔽作用。

底漆裸露之后，金属表面会迅速和大气中的氧气、水分发生氧化还原反应，生成红褐色的铁锈。这种局部锈蚀通常会以损伤点为中心，向周边完好涂层的下方潜伏蔓延。由于界面处会形成电化学腐蚀电池，腐蚀过程会不断在涂层与基材的界面推进，慢慢导致周边涂层松动。如果不及时进行局部修补重涂，这种由机械损伤引发的点状锈蚀会逐步发展为严重的坑蚀或是溃疡状腐蚀，大幅减小构件的有效承载截面积。

从受力角度来看，局部坑蚀会引发严重的应力集中，成为疲劳裂纹萌生的诱因。尤其是桥梁防撞护栏、主梁下缘，以及容易受船只碰撞的墩柱部位，机械损伤发生的概率更高。维护人员开展日常巡查时，必须重点关注这些易损部位，一旦发现涂层划痕，要立刻对照原始涂装工艺完成打磨除锈，重新补涂。及时修补能够有效阻止锈蚀扩散，避免小病害积累成大隐患，始终保持防护体系的有效性。

（三）海洋环境下氯离子渗透与紫外线老化加速

海洋环境对钢结构桥梁的侵蚀性极强，核心影响因素是环境中极高的盐分含量和强烈的紫外线辐射。氯离子本身离子半径小，穿透能力极强，能够顺着防腐涂层的微孔结构或是微细裂缝渗入涂层内部。氯离子到达钢材表面后，会破坏钢

材表面的钝化膜，形成强电解质环境，大幅提高腐蚀电流强度。在这种高盐雾环境下，哪怕涂层没有明显的宏观破损，其内部介电性能也会因为盐分富集明显下降，进一步加快底层钢材的腐蚀速率。

在氯离子侵蚀的同时，海洋区域充足的日照还会带来强烈的紫外线辐射。紫外线能量很高，足以破坏防腐涂料中树脂成分的共价键，引发材料光氧化反应。这不仅会让涂层快速褪色，还会让涂层结构变得疏松、脆性提升，大幅降低涂层的抗冲击和抗形变能力。紫外线引发的老化开裂和氯离子的渗透侵蚀相互叠加，会形成恶性循环，大幅缩短涂装体系的预期使用寿命。在高湿度、高盐度与强日照的共同作用下，海洋环境中桥梁涂装的维护频率要远高于内陆地区。

海洋大气中的海盐粒子会随风飘散，沉积在桥梁结构的各个位置，尤其是通风不良、容易积水的死角。这些位置的涂层长期处于潮湿高盐的环境中，劣化速度往往会超出预期。在管养工作中，针对海洋环境下的桥梁，必须选用更高规格的防腐涂料体系，比如富锌底漆搭配氟碳面漆的组合。同时要定期开展表面盐分测定和涂层性能评估，确保防护体系在严酷环境下始终保持有效，为结构提供长效保护。

（四）钢管拱桥管内积水与混凝土碳化导致的钢管内壁腐蚀机理

钢管拱桥一般采用钢管混凝土组合结构，依靠管内混凝土与钢管共同受力来提升承载能力。但受施工偏差、密封处理不到位以及温度变形产生裂缝等因素影响，大气中的水汽会慢慢渗入钢管内部，在钢管底部等低洼位置逐步积聚形成长期积水。同时混凝土浇筑过程中很难做到完全密实，内部存在的微小孔隙也会为水分迁移提供通道，进一步加剧管内的积水量。

积水形成后，会持续浸泡钢管内壁，溶解水中的氧气和二氧化碳形成酸性电解质环境，直接触发电化学腐蚀反应，不断侵蚀钢管内壁的钢材。而混凝土在服役过程中，空气中的二氧化碳会逐步渗入混凝土内部，与混凝土中的碱性水化产物发生中和反应，这就是碳化过程，碳化会不断降低混凝土的碱度，原本碱性环境可以在钢管内壁形成稳定钝化膜保护钢材，碱度下降后钝化膜会逐渐失效，进一步加快了内壁的腐蚀速率。

钢管内壁腐蚀属于隐蔽性病害，初期很难通过外部巡检发现，锈蚀会持续减小钢管的有效壁厚，降低钢管与管内混凝土的协同受力性能，长期发展会直接影响钢管拱桥的整体结构安全，因此管养过程中需要通过超声波检测等无损手段定

期排查，及时发现并处理管内积水和腐蚀问题。

二、结构受力与疲劳病害

钢结构桥梁承受动态车辆荷载作用时，局部区域因为应力集中和反复受力，很容易产生疲劳损伤。这类病害一般从微观裂纹开始发育，在长期交变应力作用下逐步扩展为肉眼可见的宏观结构损伤，给桥梁长期运营安全带来极大隐患，是钢结构维护工作中的重难点。疲劳破坏通常不会伴随明显的塑性变形，具有突发性，因此必须加强实时监测与定期探伤。

（一）正交异性钢桥面板顶板与 U 肋焊缝裂纹的萌生

正交异性钢桥面板凭借自重轻、强度高的优势在工程中得到广泛应用，但其复杂的焊接构造也带来了严峻的疲劳问题。重载车辆通行时，轮迹带正下方的顶板与纵向加劲肋之间会产生明显的局部受压变形，顶板与 U 肋连接焊缝长期处于高应力幅环境中，再加上焊接工艺本身存在残余应力，焊脚位置也难免存在几何不连续的问题，因此这个区域是疲劳裂纹的高发区。裂纹一般从焊趾或是焊根位置萌生，之后顺着焊缝长度方向或是向顶板厚度方向不断扩展。

这种裂纹在萌生初期隐蔽性很强，常规外观检查很难发现。随着裂纹不断延伸，顶板局部刚度会随之下降，可能引发桥面铺装层开裂，还会给雨水渗入提供通道，进一步恶化钢板的受力环境。在重载、超载车辆频繁作用下，裂纹扩展速度会明显加快。如果不采取有效的检测与抑制措施，裂纹可能会贯穿顶板，不仅影响行车平顺性，还会对桥梁的荷载横向分布性能产生不利影响，削弱桥面系的整体承载能力，严重时甚至会引发局部坍塌。

在长期反复受力过程中，焊缝内部的微观缺陷会成为应力集中的突破口。尤其是采用部分熔透焊接工艺的节点，焊根位置的未熔合区域本身就是一个天然的裂纹源。在车轮荷载反复的压剪作用下，这些区域的应力强度因子会不断累积。为了延缓这类病害发生，管养阶段要密切监控桥面铺装的情况，完好的铺装层能够分散荷载，减轻钢桥面板的局部受力负担。采用相控阵超声波等技术定期排查，是发现早期裂纹的关键手段。

（二）腹板竖向加劲肋焊缝端部的疲劳开裂特征

在钢梁结构的腹板位置，为了提高构件的抗剪承载力和局部稳定性，一般都会设置竖向加劲肋。加劲肋和腹板、顶底板的焊接连接位置，受力状态十分复杂。

尤其是竖向加劲肋的端部，因为构造不连续，当主梁发生整体弯曲变形、腹板发生局部鼓曲时，这个位置会产生非常严重的应力集中。交变荷载引发的二次应力和焊接残余应力在这里叠加，使得加劲肋焊缝端部很容易出现疲劳裂纹，这也是钢箱梁结构中的典型病害。

这类疲劳裂纹的典型特征是沿焊趾线呈弧形分布，或是垂直于主应力方向向腹板母材延伸。裂纹一旦扩展进入母材，危险性就会大幅提升。实际运营过程中，腹板的振动和受力状态非常复杂，裂纹可能呈现跳跃式扩展的特点。如果没能通过有效探伤手段及时发现，裂纹持续发展会削弱腹板的抗剪能力，甚至引发主梁的脆性断裂。维护人员必须重点关注加劲肋端部的细节部位，通过探伤尽早发现病害苗头。

腹板作为主梁抗剪的核心构件，其完整性不容有失。对于已经出现的裂纹，通常会采取打磨消除、增设止裂孔或是焊接补强板等加固措施。但单纯补焊往往会引入新的焊接残余应力，短时间内可能再次引发裂纹。因此在管养实践中，更推荐采用高强螺栓连接补强板的冷加工加固方法。统计大量实桥病害可以发现，加劲肋端部裂纹往往和该处焊缝的收弧质量直接相关，这也体现了精细化施工对后期运维安全的重要影响。

（三）整体节点板次应力导致的撕裂与变形

在钢桁架桥或是其他大型钢结构中，整体节点板负责汇集并传递多个杆件的內力。由于节点板本身刚度很大，各杆件变形时的相互约束会产生不可忽视的次应力，这种次应力往往在节点板边缘或是杆件连接的过渡区域达到峰值。在长期荷载作用下，次应力引发的疲劳损伤会表现为节点板边缘的微小撕裂，这些撕裂通常还伴随节点板的局部面外变形，使得结构实际受力状态偏离原设计模型。

节点板撕裂病害一般发展缓慢，但在极端工况或是材料韧性不足的情况下，可能出现突发性扩展。由于节点部位通常构造复杂，重叠板件多，这类撕裂可能出现在内部板件上，很难通过肉眼直接发现。局部变形还会导致螺栓连接或是焊接部位受力不均，引发连锁反应。在管养过程中，应当利用高精度测量工具监测节点板平整度，同时采用无损检测技术排查隐藏裂纹，避免局部失效引发结构整体受力失衡。

节点部位的受力特征主要有三个：一是应力梯度大，从杆件核心区到节点板边缘应力变化剧烈；二是双向应力状态复杂，还伴随明显的扭转效应；三是对几

何缺陷非常敏感。针对这些特征,管养工作中要重点监控节点板是否出现颜色异变或是锈粉堆积,这些往往是内部微小撕裂或是板间错动的征兆。对于大跨度桁架桥,建立长期的节点应变监测系统,是捕捉次应力异常波动的有效手段。

(四) 大跨悬索桥/斜拉桥锚箱区域交变索力作用下的疲劳开裂

大跨悬索桥与斜拉桥的主缆索股、斜拉索需要通过锚箱结构将索力传递给主梁或索塔,锚箱区域长期承受交变索力作用,应力状态极为复杂。斜拉索的索力会随着车辆荷载、温度变化以及风致振动不断发生波动,这种持续变化的拉力会让锚箱内的承压板、加劲肋与母材连接焊缝长期处于交变应力环境中,很容易从焊缝缺陷、应力集中位置萌生疲劳裂纹。

锚箱通常由多块钢板组焊而成,板件之间的约束作用强,焊接残余应力水平高,再加上索力传递过程中会产生显著的局部次应力,多重不利因素叠加,进一步加快了疲劳裂纹的萌生与扩展。裂纹一般先出现在承压板与主梁腹板、顶板的连接焊缝处,随后逐步向母材内部延伸,严重时会引起锚箱区域钢板的整体开裂,直接影响索力传递的可靠性,威胁桥梁整体结构安全。

由于锚箱部位往往构造隐蔽,很多开裂位置处于箱室内部,日常外观巡查很难发现早期病害,管养过程中需要定期进入箱室内部开展探伤检测,重点检查焊缝接口、转角等应力集中区域,同时可通过布设应变传感器监测锚箱区域的应力变化,及时捕捉病害发展的异常信号。对于已经出现的微小裂纹,可根据裂纹位置和扩展程度,采用打磨止裂、粘贴补强钢板或碳纤维板等方式进行加固,控制裂纹进一步发展,保障锚箱结构的受力安全。

(五) 悬索斜拉协作体系结合部应力集中导致的异常变位与开裂

悬索斜拉协作体系能够结合两种体系的受力优势,显著提升桥梁的跨径能力,但两种体系的荷载传递路径在此区域交汇,结合部的构件同时承受悬索体系的主缆拉力、斜拉体系的拉索索力,再加上主梁自身的弯矩和剪力,应力水平远高于桥梁其他区域,且应力分布复杂,很容易形成局部应力集中。长期承受车辆荷载、风荷载引发的交变应力作用后,应力集中位置会逐步萌生疲劳裂纹,同时伴随结合部构件的异常变位。

该结合部往往需要设置大型刚度转换构件来协调两种体系的变形差异,构件截面大、构造复杂,焊接作业难度高,更容易留下焊接缺陷、残余应力等先天隐患,这些缺陷会进一步放大局部应力,加速裂纹的萌生与扩展。异常变位初期通

常表现为结合部接口位置的微小错动，随病害发展会逐步引发连接螺栓松动、焊缝撕裂，最终造成结合部构件的整体开裂，破坏两种体系的荷载传递路径，直接影响桥梁整体结构安全。

由于该区域属于桥梁的关键受力部位，且构造复杂，病害隐蔽性较强，管养过程中需要结合外观巡查、高精度形变监测与无损探伤检测相结合的方式开展定期排查，重点关注结合部转角、焊缝等应力集中位置，长期监控变位发展速率。对于出现的微小裂纹和可控范围内的异常变位，可通过增设劲性补强构件、粘贴碳纤维复合材料等方式进行加固，控制病害发展；若变位和开裂已经发展到较为严重的程度，则需要采取体外预应力加固等措施限制变位，恢复结构受力性能，保障桥梁运营安全。

三、连接部位的松动与损伤病害

连接部位是维持结构整体性的纽带，其工作状态直接影响桥梁的整体承载能力。螺栓副失效、焊缝内部缺陷扩展以及结合段连接退化都是管养工作中的难点，这类病害通常隐蔽性强，会对结构局部稳定性和整体刚度构成潜在威胁。在复杂的服役环境下，连接部位的可靠性是维持结构超静定受力特征的基础，必须给予高度重视。

（一）高强螺栓长期振动下的延迟断裂与松动脱落

高强度螺栓连接是钢结构桥梁最常用的连接方式之一，依靠预紧力产生的摩擦力传递荷载。在车辆动力荷载的持续作用下，螺栓副会承受高频次的微小振动，这种振动会降低螺纹间的摩擦力矩，让原本张紧的螺栓逐渐发生松动。螺栓松动后，连接件之间的摩擦力会随之下降，原本设计的摩擦型连接可能转变为承压型连接，彻底改变了原有受力模式。更严重的是，在恶劣环境下，高强螺栓还可能发生延迟断裂现象。

延迟断裂往往和氢致开裂密切相关，特定高强度级别的螺栓，在服役数年后可能在没有明显先兆的情况下突然断裂。螺栓松动或是断裂后，会导致连接板件间的挤压应力分布不均，进而诱发周边螺栓接连失效。管养人员检查时，可以通过敲击法、扭矩检查或是涂抹防松标识等方式，确认每一个螺栓的紧固状态。发现松动螺栓后，严禁直接二次拧紧，必须查明原因后按照标准要求更换，避免单个紧固件失效引发局部风险。

由于钢结构桥梁的高强螺栓数量庞大,全覆盖检查会耗费大量人力物力,因此管养工作中通常采用抽检结合重点巡视的方法,重点关注主桁节点、横梁与主梁连接处等受力剧烈的部位。如果发现螺栓断裂,断口一般会呈现明显的脆性特征。预防这类病害的核心在于施工阶段严格控制预紧力,后期做好腐蚀环境防护。对于大直径高强螺栓,应当通过超声波测量伸长量间接核实轴力状态,确保连接始终稳固。

（二）焊缝内部微小缺陷在活载作用下的扩展

钢结构桥梁在制造过程中,受焊接工艺波动和施工环境影响,焊缝内部可能残留微小气孔、夹渣或是未熔合等缺陷。在静态工况下,这些微小缺陷一般不会影响结构的短期承载能力,但在长期活载作用下,缺陷部位天然就是应力集中点。随着循环应力作用次数增加,缺陷边缘的应力强度因子会逐渐超过材料的疲劳阈值,使得微观缺陷逐步向宏观裂纹发展,这类内部病害的核心特征就是隐蔽性极强。

在裂纹扩展到焊缝表面之前,常规肉眼检查根本无法发现。活载的幅值和频率直接决定了缺陷扩展的速度,一旦内部裂纹失稳扩展,会突然造成构件截面削弱。在维护阶段,必须定期采用超声波探伤、射线探伤或是磁粉探伤等专业技术,对关键受力部位的焊缝进行检测。通过定量分析缺陷的尺寸和位置,评估其对结构安全的潜在威胁,必要时采取挖补、加固等修复手段,把风险及时消除在萌芽状态。

随着检测技术不断进步,全自动超声扫描系统越来越多地应用于大型钢桥的焊缝监测,这种技术能够记录缺陷在多年服役过程中的形态变化,实现从被动加固向主动预防的转变。对于位于拉应力区的对接焊缝,任何细微的内部缺陷扩展都可能引发灾难性后果,因此在管养档案中,要详细记录每一条重要焊缝的初始缺陷状态,建立全寿命周期的焊缝指纹数据库,方便在发现裂纹萌生时准确溯源成因,及时采取应对措施。

（三）钢混结合段剪力键的疲劳断裂与混凝土脱空

在钢混组合结构桥梁中,结合段依靠剪力键实现钢与混凝土的共同受力。由于两种材料的线膨胀系数和刚度存在差异,在温度变化和车辆轮迹荷载作用下,结合界面会产生复杂的剪切应力和拉拔应力。长期反复荷载作用会导致剪力键根部发生疲劳断裂,这是结合段最危险的病害之一。当大量剪力键失效后,钢板与

混凝土之间的协同工作能力丧失，结构刚度会明显下降，导致挠度增大，直接影响桥梁使用寿命。

和剪力键断裂伴随出现的病害是结合界面混凝土脱空。由于剪力键松动或是界面剪切破坏，混凝土与钢板之间会形成微小间隙，水分顺着缝隙渗入后，不仅会加速剪力键锈蚀，在严寒地区还会发生冻胀破坏，进一步扩大脱空区域。脱空会改变主梁截面的中性轴位置，使得钢梁承担超过设计值的荷载，甚至引发钢板局部屈曲。养护工作中，通常采用敲击听音法或是红外热成像法检测界面脱空，及时发现隐藏在内部的质量隐患。

结合部位发生失效通常有三方面成因：一是长期荷载作用引发的疲劳应变积累，二是混凝土凝固过程中产生的收缩裂缝，三是施工时钢板表面清理不彻底导致黏结力不足。对于已经出现严重脱空或是剪力键断裂的部位，需要进行高压注浆修复，或是采用增加外部约束的加固措施。管养工作中要加强对组合梁挠度的定期观测，挠度异常增大往往预示着结合面性能退化，必须引起管养部门高度重视，及时采取治理措施。

第二节 检测技术与评估方法

钢结构桥梁的安全性与耐久性在很大程度上取决于科学严密的检测技术与精准的评估体系。通过对结构现状的实时监控与周期性体检，工程技术人员能够及时掌握钢材腐蚀、焊缝疲劳开裂及连接螺栓松动等关键质量指标的变化情况，为后续的维护管理提供扎实的决策依据与详实的数据支撑。建立健全的检测评估制度，是延长桥梁服役寿命、确保通行安全的核心屏障；通过对海量检测数据的归纳分析，还可以提前预判结构可能出现的劣化趋势，从而实现从被动抢修向主动预防性养护的根本性转变。

一、常规目视与简单工具检测

常规目视与简单工具检测作为钢结构桥梁日常管养的基础环节，具有成本低廉、覆盖范围广的突出特点。此类方法虽然一定程度上依赖检测人员的专业经验积累，但在发现宏观缺陷、表征早期病害方面具有不可替代的作用，通过定期的细致巡检，可以低成本地筛选出需要进一步深度探伤的重点部位，所以在日常养

护工作中,这种方法凭借极强的便捷性成为巡查的首选手段。

(一) 涂层厚度与附着力的小区域破损抽检

涂层厚度与附着力检测是确保钢结构防腐性能的核心内容。在实际作业过程中,由于涂装工艺可能受环境湿度、温度或是喷涂角度偏差的影响,局部区域往往存在成膜厚度不均的情况。采用磁性测厚仪进行抽检时,需根据构件表面积合理划分测点区域,在一些关键受力节点或是容易积留雨水的部位,还需辅以小区域的破损性试验验证。这种检测方式通常利用划格法或拉开法完成,通过将涂层剥离后观察涂层与底材的结合状态,确保防腐层在恶劣气候下不发生起皮脱落。

考虑到钢材表面的原始粗糙度会影响检测结果,测厚数据应进行多次测量后取平均处理,并剔除离散度过大的异常点。在抽检部位完成测试后,相关技术人员必须立即采取标准化的补涂措施,防止裸露的基材发生闪锈或是进一步腐蚀。为了提高检测结果的代表性,抽检点的选取应当遵循随机抽样与重点覆盖相结合的原则。

对于经常受到紫外线直射或是处于水位涨落干湿交替区的部位,应适当增加抽检频率。通过这种由面到点的细致复核,能够精准掌握防腐体系的真实衰减情况。与此同时,小区域破损抽检还能揭示涂层内部是否存在层间污染,这对于评估涂装施工过程中的质量控制水平具有重要的参考价值。

(二) 高强螺栓终拧状态与滑移迹象的敲击检查

高强螺栓作为连接钢结构构件的关键纽带,其受力状态的稳定性直接关系到整桥的几何线形与整体承载力。利用敲击检查法判定螺栓是否存在松动,是现场检测中最常用的便捷手段。检测者持小型检查锤对螺帽侧面进行轻敲,凭借敲击声音的清脆程度就能大致判断紧固力是否满足设计要求。当螺栓连接出现滑移迹象时,连接板表面往往会产生一些微观的变化,常见的变化可分为以下几类:

连接板边缘的漆膜出现放射状裂纹,或是由于挤压产生的碎裂现象;螺栓垫圈与构件接触面周围产生细微的金属粉末,或是由于反复摩擦生热引发的锈粉堆积;螺栓与连接板上预先标注的原始对齐刻线发生错位,且这种错位还会随荷载波动有进一步扩大的趋势。

这一检查过程对操作人员的经验要求较高,相关技术人员必须通过对比标准紧固状态下的敲击音频来识别异常情况。针对疑似松动的螺栓,应当进一步使用扭矩扳手进行复测,以此获得准确的定量扭矩数据。除此之外,还要重点观察节

点区域的密封胶是否完好，避免雨水渗入螺栓孔隙导致内部锈蚀，进而降低摩擦面的抗滑移系数，这对于保障连接部位的长期可靠性至关重要。

（三）结构宏观变形（挠度、旁弯）的全站仪定期复测

结构宏观变形是评价桥梁整体工作状态的重要物理指标。通过全站仪对主梁挠度与旁弯进行定期复测，可以有效监控钢结构在环境温度变化、日常车辆荷载以及材料长期蠕变共同作用下的形态演变规律。测点的布置应当选在跨中、支座及变截面等几何变形敏感部位。全站仪的应用确保了空间坐标采集的精度，哪怕是微小的位移变化也能被及时捕捉到。

在测量过程中，必须选择在固定的环境温度与相近的时间段内进行，以此排除钢材热胀冷缩引起的瞬时变形干扰。通过将实测数据与设计预拱度及历次监测记录进行对比，可以计算出结构的永久性变形趋势，及时发现可能存在的地基不均匀沉降或主梁刚度退化问题。大跨度钢桥的旁弯变形往往和其结构对称性及横向联结系的稳定性直接相关，需要引起管养单位的高度重视。

若发现旁弯数值超出设计容许范围，需要结合桥面铺装的平整度及伸缩缝的张开量进行综合分析。定期复测工作不仅准确记录了结构的当前现状，更为建立桥梁的全寿命周期健康档案提供了连续的时间序列数据，方便管理部门从宏观层面把握结构的演变特征。不仅于此，复测数据还是校验有限元仿真模型准确性的重要依据，对于科学评估结构的剩余承载力具有核心支撑作用。

二、适用于复杂结构的无损检测深度应用

相较于常规的目视和简单工具检测，无损检测技术能够在不损伤被测构件原有性能的前提下，精准探测出隐藏在结构内部的病害，解决了肉眼无法观测到的隐蔽缺陷识别难题，特别适合结构形式复杂、病害位置深在的大型钢结构桥梁检测作业，当前已经形成了多技术互补、多部位覆盖的成熟应用体系。

（一）相控阵（PAUT）在斜拉桥 / 悬索桥锚箱厚板焊缝与钢桁梁节点深埋裂纹中的精确量化

相较于常规单波束超声检测，锚箱厚板焊缝存在多侧焊接遮挡，结构应力集中程度高，内部更容易产生层状撕裂、未熔合等体积型缺陷，相控阵技术可以通过设置不同角度的聚焦法则，一次扫描覆盖全板厚范围内的多个缺陷，无需反复调整探头位置就能获得缺陷的完整成像，还能精准测量缺陷的长度、深度和自身

高度,为缺陷安全性评估提供准确的定量参数。对于钢桁梁节点位置的深埋裂纹,这类裂纹往往起源于节点板内侧,沿着应力方向向表面扩展,常规检测方法容易因声程衰减漏检,而相控阵的动态聚焦特性可以提升深埋区域的检测灵敏度,即使是距离检测面较远的微小裂纹也能清晰识别,有效避免漏检带来的安全隐患。在实际检测作业中,检测人员可以根据构件的厚度和焊缝坡口形式,灵活调整波束角度,适配不同形式的节点构造,大幅提升检测效率,降低检测人员的工作强度。

(二) 声发射(AE)技术在钢管拱桥管内脱空与主缆锚固系统疲劳监测中的应用

钢管拱桥的主拱管在长期服役过程中,管内混凝土与钢管壁容易因为收缩徐变、荷载反复作用发生分离脱空,脱空区域不仅会改变拱管的受力模式,还容易积存腐蚀介质加速内壁锈蚀,传统检测方法很难在不破坏管壁的前提下精准定位脱空范围,而声发射技术可以通过捕捉混凝土脱空区域在活载作用下产生的应力波信号,判断脱空区域的实际活动性,区分稳定脱空和发展中的危险脱空。对于主缆锚固系统,这类部位长期承受主缆传来的巨大动载拉力,锚板与锚杆连接部位容易产生疲劳损伤,声发射传感器可以布置在锚固区的外围构件上,实时捕捉疲劳裂纹萌生扩展过程中释放的弹性波,通过对信号参数的分析就能定位损伤位置,评估损伤的发展程度,实现全天候的在线监测,无需中断交通就能完成监测作业,特别适合大流量通行下的在役桥梁长期健康监测。

(三) 红外热成像在钢箱梁U肋内部闭口区域渗水与涂层脱粘的大面积普查

钢箱梁的U肋属于闭口结构,施工涂装阶段内部涂层一旦出现脱粘,后续常规检测很难深入排查,而长期通行中外界水分通过焊接间隙渗入U肋内部后,会在闭口区域不断积累,从内部逐步锈蚀U肋壁,短时间内就会造成构件壁厚削弱,给结构安全带来隐患。红外热成像技术凭借非接触、大面积快速扫描的特点,可以一次性完成整幅钢桥U肋区域的普查作业。当U肋内部存在渗水或涂层脱粘缺陷时,缺陷部位与正常基材的热传导率会产生明显差异,在红外热图上会呈现出与周边正常区域不同的温度异常色块,检测人员可以直接根据色块的位置和范围,快速圈定存在缺陷的U肋区段,不需要对每段U肋进行开孔检查,不会对原有结构造成任何损伤,普查效率远高于传统的检测方法。对于已经建成通车的大跨度钢箱梁桥,这种检测方法可以在不中断交通的情况下完成全桥检测,

大幅降低了检测作业对正常通行的影响，能够快速掌握全桥 U 肋的内部病害分布情况，为后续的针对性修复提供精准的位置指引。

三、桥梁技术状况评定

桥梁技术状况评定是根据检测数据对结构整体健康状况进行量化定级的过程。这一环节旨在将复杂的工程参数转化为清晰的分数与等级，为管养决策提供明确依据。通过科学的评定模型，管理部门可以合理分配养护资金，在确保通行安全的前提下，实现社会效益与经济效益的最大化，保障区域交通网络的高效稳定运行。

（一）《公路桥梁技术状况评定标准》的部件评分权重准则

公路桥梁的技术状况评定严格遵循行业标准的层级评分逻辑。在这一体系中，整桥被划分为部类、部位和构件三个层级。对于钢结构桥梁而言，主梁、联结系、支撑系统以及防腐体系均被赋予了不同的权重系数。权重的设定充分考虑了各部件在结构体系中的受力重要性与失效后果严重程度。评估过程中，分值的扣除基于缺陷的性质及其严重程度。

如果主梁关键断面的焊缝出现贯穿性疲劳裂纹，其部件评分将出现断崖式下跌，甚至直接导致整桥整体技术等级被判定为极差。这种评定方法体现了“关键构件安全决定整体结构安全”的原则，确保了任何潜在的重大风险都不会被庞大系统的均值所掩盖。为了提高评定结果的客观性，评估过程通常引入了病害程度、范围与部件权重的乘积运算规则。

相关技术人员在现场采集完数据后，需将数据录入标准化的软件系统进行自动核算。表 10-1 列出了不同类型构件的权重取值范围示例，方便评定过程参考。

表 10-1 公路钢结构桥梁典型构件权重范围表

构件类型	权重取值范围
主钢梁	0.40~0.60
连接部位	0.15~0.25
支座系统	0.08~0.15
防腐涂层	0.05~0.12
附属设施	0.02~0.08

从表 10-1 中可以看出，受力核心构件的权重占比明显更高，符合标准中突

出核心风险的评定思路。通过对历年评分数据的纵向对比，可以描绘出桥梁性能衰退的曲线，为预测结构的剩余使用年限提供量化模型支撑。不仅如此，评分结果还与养护等级直接挂钩，指引着养护资源的精准投放。

（二）铁路钢桥承载能力与耐久性的专项评估方法

铁路钢桥因长期受列车高速行驶产生的动载冲击影响较大，其承载能力与耐久性评估有着更高的标准与更为严苛的流程。专项评估方法涵盖了对钢材疲劳强度的校验以及节点板连接效率的复核。与公路桥梁不同，铁路系统更侧重于对结构动力响应的监测，包括振动频率、加速度以及动挠度等关键指标。在耐久性评估方面，主要通过对腐蚀速率的长期监测来预测截面损失对承载力的实质影响。

技术人员需定期对易锈部位进行超声波壁厚测量，并结合线路实际运量增长情况进行应力循环次数的累积计算。通过建立疲劳累积损伤模型，可以科学判定构件是否达到了设计疲劳寿命，并以此决定是否需要加固、限速或是更换处理。这类专项评估不仅关注现有的静态承载值，还深入探讨结构的整体冗余度。

在评估过程中，往往会模拟某一关键构件失效后结构的受力重分配情况，以此确定结构的整体抗坍塌能力。通过这种严谨的专项评估，可以确保铁路干线在超负荷运转下的运营安全，为线路提速或重载化改造提供坚实的技术可行性分析。综合来看，铁路钢桥评估更加强调动态参数与材料微观变化的结合，评估结果更贴合桥梁的实际运营状态。

（三）基于 BIM 模型的病害空间绑点与三维可视化评估

随着数字化技术的深度集成，基于 BIM 模型的评估方法正在改变传统的纸质记录模式。通过将现场检测发现的裂纹、锈蚀及变形点位在三维模型中进行精确绑点，实现了病害信息的空间数字化存储。这种方法使得评估过程不再是孤立的数据堆砌，而是直观的结构全景展示，具体优势体现在以下方面：

实现检测结果与原始设计参数的实时映射对比，能够快速定位高应力风险区域；可以提供病害随时间演化的动态模拟，方便管理人员观察缺陷在三维空间中的扩展路径；能够优化维修方案的选取，通过在模型中进行施工模拟，提前评估修复措施对整体受力的改善效果。

这种可视化的评估模式显著提升了管养决策的效率。技术人员可以通过移动终端在模型上即时调取特定部件的检测历史与维修档案，极大地方便了现场复核工作。在未来的智慧桥梁建设中，这种基于数字孪生的评估技术将与实时监测传

感器深度融合，实现桥梁状态的实时自动预警与智能化定级评估。通过构建虚实结合的评估环境，可以更精准地识别隐蔽部位的损伤风险，从而为工程管理带来革命性的提升。这种数字化手段不仅缩短了病害信息的反馈周期，也为大跨度复杂钢桥的精细化管养提供了科学的数字化模板，确保了桥梁资产的长期保值与安全运营。

第三节 维修加固技术与工艺

钢结构桥梁的维修加固是确保交通基础设施安全运行的关键环节。随着服役年限的增加，桥梁各组件受大气环境、盐分侵蚀以及交变荷载的共同作用，会出现涂层剥落、钢材锈蚀、疲劳开裂等典型病害，必须建立科学的维护体系，运用先进的修复工艺恢复结构可靠性。通过合理的干预措施，不仅能够显著延长桥梁的使用寿命，还能在全寿命周期内有效降低结构损伤引发的灾害风险，实现资源的高效利用。

一、涂层局部修复与全面重涂

涂装系统的完整性直接关系到钢材的抗腐蚀能力。在维修工程中，应根据涂层劣化的具体等级，合理选择局部修复或全面重涂方案，以达到最优的经济技术效益，延长防护周期。

（一）涂装缺陷部位的局部手工 / 机械打磨与底漆补涂

针对钢结构表面出现的局部锈斑、起泡、裂纹或机械损伤，采取局部修复工艺是维持桥梁耐久性的常用手段。在操作过程中，施工人员需要精准识别缺陷范围，并向四周延伸一定距离作为过渡处理区。打磨作业应严格遵守表面处理标准，利用电动砂轮机或针式除锈枪将病害部位清理至露出带光泽的金属基体，确保残余锈迹被彻底清除，避免封闭涂层后发生二次氧化。打磨完成后的表面应呈现均匀的粗糙度，这有助于提升后续涂层的机械啮合力。

在表面处理合格后，必须及时进行底漆补涂。底漆的选择要和原涂层体系保持良好的相容性，通常选用富锌底漆来提供阴极保护作用。涂刷时要注意控制漆膜厚度，采用多层薄涂的方式避免流挂。新旧涂层的衔接处要呈阶梯状渐变，保证两层涂膜能够严密融合。为了提高修复质量，需要在干燥环境下施工，严禁在

湿度过高或表面存在明水时操作，这样才能确保修复层在复杂服役环境下保持优异的附着力和封闭性能，让钢材重新获得可靠防护。

（二）旧涂层彻底喷砂去除至 Sa2.5 级的全面重涂工艺

当桥梁涂层大面积老化、失去保护功能或发生严重粉化剥落时，必须启动全面重涂工程。此工艺的核心在于利用喷砂技术将旧涂层彻底去除，喷砂作业以高压空气作为动力，带动磨料高速冲击钢材表面，这个过程不仅能清除所有氧化皮、旧漆皮和深层锈迹，还能给钢材表面打造出理想的粗糙度。

喷砂清理达到 Sa2.5 级设定标准后，钢材表面应呈现均匀的金属本色，不存在任何目视可见的污垢或油渍。随后，施工团队需要在限定时间窗口内完成第一道底漆的喷涂，防止清洁后的表面发生返锈。全面重涂通常采用多层防护体系，包括高性能中层漆和耐候性优异的面漆。

每一道工序施工时都要测量湿膜和干膜厚度，严格控制各涂层之间的涂装间隔时间，保证整个防护系统形成一个坚固的整体。这种工艺方案虽然初次投入成本较高，但能够为钢桥提供长达二十年以上的长效防腐保护。重涂施工期间，还要建立严格的质量抽检机制，对每一阶段的粗糙度和清洁度进行量化评估，确保最终防腐质量达到预期设计标准，为桥梁长久运行打下坚实基础。

（三）不停航 / 不停运条件下的环保型涂装施工作业

在繁忙的航道或铁路干线上，钢桥的涂装维护往往需要在不停航、不停运的条件下开展，这要求施工技术必须具备极高的环保性与安全性。为了防止磨料、漆雾和有害挥发物散逸到周边环境，通常需要搭建全封闭式的施工挂篮或作业平台，这种防护装置内部集成了高效除尘系统与废弃物收集设施，能及时吸除并集中处理施工产生的粉尘，保护水体环境和周边生态系统。

选用环保型涂料是此类施工的另一个重点，通过选用低挥发性有机化合物含量的涂料，可以有效降低施工过程中的异味和有害气体排放。作业管理上，需要和交通管理部门紧密配合，利用交通流量的间歇期开展关键工序施工，同时设置严密的监控系统实时监测环境参数。采用无气喷涂等先进设备，既提高了施工效率，又减少了涂料浪费和飞散，实现了基础设施维护 and 环境保护的和谐统一，最大化保障了社会公共利益。在复杂的动态交通环境下，这种施工模式既考验技术水平，也体现了现代工程管理对绿色施工理念的深度践行。

（四）钢管拱桥开孔注浆防腐与排气孔修复工艺

大跨度钢管拱桥大多采用钢管混凝土组合结构，依靠管内混凝土灌注提升整体刚度与承载能力，但受施工阶段排气不彻底、长期运营收缩变形影响，钢管上壁与混凝土界面容易出现脱粘空隙，外界水汽还会沿着空隙渗入造成内壁腐蚀，同时原有排气孔也容易因锈蚀出现开裂、渗漏问题，需要通过开孔注浆结合排气孔修复进行彻底处理。施工前需要通过超声波检测精准定位脱粘空隙的分布范围，确定注浆孔与新设排气孔的开孔位置，开孔时需要采用精密钻孔工艺，避免对钢管母材造成过大损伤。注浆通常选用微膨胀防腐注浆料，从下部注浆孔缓慢压注，依靠浆料自重与压力将空隙内的空气从上部排气孔彻底排出，当排气孔流出连续浆料后即可封闭孔口，保证脱粘空隙被完全填充。注浆完成后，对原有排气孔进行彻底清理，切除锈蚀开裂的孔口部位，更换专用防腐密封堵头，再补做与原体系一致的防腐涂层，修复后既可以解决内壁锈蚀问题，又能恢复钢管与混凝土的共同受力性能，且不需要中断桥梁交通就能完成施工，对桥梁正常通行影响极小。

二、疲劳裂纹的止裂与加固修复

疲劳裂纹是钢桥结构在往复循环荷载作用下最容易产生的安全隐患，如果不及及时干预，很可能会引发构件断裂事故。必须通过科学的止裂与补强手段，消除裂纹尖端的应力集中，阻止裂纹进一步扩展，恢复结构的原有受力性能。

不同裂纹处理工艺的特点和适用范围见表 10-2。

表 10-2 钢桥疲劳裂纹加固处理工艺对比表

处理工艺	核心优势	适用场景	施工难度
钻孔止裂法	操作简单、成本低廉	早期小型疲劳裂纹、应急处置	低
碳纤维贴片补强	不损伤母材、自重轻	中小型稳定裂纹、补强加固	中
返修焊	修复彻底、力学性能恢复好	深度扩展的关键部位裂纹	高

从表 10-2 可以看出，不同裂纹处理工艺各有优劣，需要根据裂纹的实际情况选择适配的方案。

（一）裂纹端部钻孔止裂法的孔径选择与实施

止裂孔法是处理早期疲劳裂纹最简单且有效的方法之一，核心原理是通过在裂纹尖端钻孔，把原本极小半径的裂纹尖端转化为具有一定半径的圆孔，从而消除严重的应力集中。孔径的选择需要根据裂纹长度、钢板厚度以及所受应力大小

进行科学计算，通常情况下，止裂孔的直径选取在 20 至 30 毫米区间内。如果孔径过小，可能无法充分缓解应力集中，导致裂纹在孔壁边缘重新萌生。

实施钻孔作业时，定位准确性至关重要。施工人员要利用磁粉探伤等精密手段准确锁定裂纹的真实尖端位置，确保钻孔中心稍微偏向裂纹延伸的前方，保证整个裂纹尖端完全进入孔洞范围。钻孔完成后，必须对孔壁进行精细打磨修整，去除钻孔产生的毛刺，保证孔内壁光滑平整。为了防止孔周区域发生锈蚀，还要对孔内部做防腐处理。这种方法在实际工程中常作为应急处置或长期观测的基础步骤，能够为后续永久性加固争取宝贵时间，有效延缓结构损伤进一步恶化。钻孔过程中还要保持钻头冷却，防止局部过热改变钢材的组织性能，保证加固过程的安全性。

（二）碳纤维复合材料贴片补强的胶粘工艺

碳纤维复合材料凭借其高强、轻质及优异的耐疲劳性能，在钢桥裂纹加固领域得到了广泛应用。胶粘工艺是确保碳纤维贴片与钢板协同受力的关键。在实施阶段，需要对加固区域的钢材表面做深层处理，通过打磨去除锈迹并制作出均匀的表面纹理。

具体施工要遵循几个关键步骤：首先在处理好的钢表面均匀涂布底胶和专用找平材料；接着将浸渍树脂后的碳纤维布平整粘贴到预定位置；之后用特制刮板顺着纤维方向多次挤压，排出内部气泡，保证胶层密实；最后等到树脂完全固化后，在表面涂刷防护涂层，抵抗紫外线和环境侵蚀。

这种粘贴补强工艺不会引入焊接热影响区，避免了对母材的二次损伤，能够有效分担裂纹截面的应力，显著提高受损构件的疲劳剩余寿命。施工过程中，要严格控制胶粘剂的配比与搅拌质量，环境温度维持在适宜范围内，保证树脂能够发挥出最佳力学性能。通过这种加固方式，可以在不增加结构自重的前提下，实现对疲劳易损部位的精准强化，提升桥梁整体结构的耐久度与安全余量。

（三）裂纹切除、重新坡口与焊接热输入严格的返修焊

对于深度较大或处于持续扩展趋势的关键性裂纹，返修焊是彻底消除隐患的重要手段。施工前必须彻底切除裂纹及其影响区域，通常采用机械切割的方式开出标准坡口。坡口的角度、深度和形状要根据钢板厚度及焊接工艺规程严格制定，保证焊缝能够实现全熔透连接。清理干净坡口内的氧化渣和水分后，还要做必要的预热处理，降低焊接过程中的冷却速度，减少冷裂纹产生的概率。

焊接过程中必须严格控制热输入量,采用多层多道焊工艺可以减小热影响区范围,降低焊接残余应力。每一层焊缝完成后,施工人员都要对其进行清理和检查,确认无夹渣、气孔等缺陷后,才能开展下一层施焊。焊接完成后,还需要进行缓慢的后热保温处理。最终的焊缝要和母材表面打磨平整,形成平顺过渡,还要做 100% 的无损检测。这种修复方法对工人的操作水平要求极高,但优势在于能够让受损部位恢复到接近原设计的结构完整性。通过对焊接电流、电压和行走速度的精确控制,可以最大限度减少焊接热对周围材质的负面影响,保证修复部位的受力性能能够达到甚至超过原始状态。

(四) 正交异性钢桥面板 U 肋裂纹的嵌补段更换与刚度增强加固

正交异性钢桥面板在长期车辆循环荷载作用下,U 肋与桥面板连接位置容易出现疲劳开裂,当裂纹扩展范围较大或 U 肋母材发生严重锈蚀损伤时,采用嵌补段更换是彻底根治病害的有效方案。施工前需要通过超声波探伤精准确定裂纹的实际扩展范围,标记出需要切除的嵌补段轮廓,切割作业时要严格控制切割精度,避免对周边完好的桥面板和 U 肋母材造成不必要损伤。切割完成后,对切口边缘进行打磨修整,开出符合焊接要求的坡口,同时清理表面锈污与氧化杂质,保证后续焊接质量。新预制的嵌补 U 肋需要按照切割缺口的实际尺寸精准下料加工,预留合适的焊接收缩量,现场吊装定位后进行点固,调整到位后再开展对称焊接作业。焊接过程同样需要严格控制热输入,采用小电流多层多道焊工艺,减小焊接变形与残余应力,焊接完成后对所有焊缝进行无损检测,确认无内部缺陷后,再将焊缝表面打磨平顺,避免新的应力集中点产生。嵌补更换完成后,还可根据结构整体受力评估结果,在 U 肋内部或连接位置增设局部加劲肋,进一步提升该区域的整体刚度,降低应力水平,避免疲劳裂纹再次萌生。这种修复方案能够彻底更换已经损伤失效的 U 肋段,从根本上恢复结构的承载能力与抗疲劳性能,虽然施工复杂度相对较高,但对于严重损伤的 U 肋裂纹,是耐久性最好的根治措施,且施工过程可通过分区域作业控制对交通通行的影响,在实际工程中得到了越来越广泛的应用。

三、结构体系的整体加固改造

当局部修复无法满足日益增长的交通荷载需求时,需要从全局出发对结构体系进行加固。通过改变力学模型或增加整体刚度,能够从根本上改善结构受力状

态，保障桥梁在超设计年限下的服役安全。

（一）粘贴钢板加固与增设加劲肋的局部刚度提升

粘贴钢板加固与增设加劲肋是提升钢桥局部刚度和承载能力的常用技术手段。粘贴钢板工艺通过高强度结构胶将钢板固定在原构件受拉或受剪薄弱区，使其形成组合截面，从而提高整体的抗弯和抗剪能力。实施过程中，需要对粘贴面进行精细处理，采用压力灌浆或螺栓辅助锚固的方式，保证钢板与原结构之间的剪力传递可靠。

对于存在局部失稳风险的区域，增设加劲肋可以有效减小板件的计算长度，提高其临界承载力。加劲肋的布置要避开原有的焊缝集中区域，避免产生过于复杂的残余应力场。这些措施工艺相对成熟，能够在短时间内大幅提升局部构件的强度和刚度；对桥下净空和原桥外观影响极小，适用性和可操作性都很好；还可以针对具体病害位置进行精准补强，显著改善主桁或主梁在极端工况下的变形。加固完成后，应通过荷载试验验证加固效果，保证新增钢板与原结构能够协同工作，同时也要关注钢板边缘的应力集中问题，必要时辅以螺栓栓接强化。

（二）体外预应力索主动加固的锚固构造与张拉控制

体外预应力索加固是一种主动受力技术，通过在结构外部张拉预应力筋，给桥梁施加反向荷载，从而抵消部分恒载和活载产生的应力。锚固构造是该系统的核心，通常采用在原梁段焊接锚固块或通过摩擦锚固装置将预应力传递给主体结构。锚固块的焊接质量和钢板厚度必须经过严密校核，保证能够承受巨大的集中拉力。转向块的设置则需要保证索道路径平顺，避免预应力索在张拉过程中发生局部折损。

张拉控制是决定加固效果的关键因素。施工时应采用应力与伸长值双控法，分阶段匀速张拉，保证各束索的受力均衡。张拉序列要遵循对称原则，防止结构产生附加的扭转或侧向变形。完成张拉后，必须对锚具进行可靠的防腐处理，并定期检查预应力索的索力变化情况。体外预应力索不仅能有效减小主梁的下挠，还能闭合部分细微裂缝，显著提高结构的抗疲劳性能。这种加固方式特别适用于跨度较大、承载力严重不足的钢结构桥梁，能够实现对整体结构的优化。通过对张拉吨位的精确控制，可以将主梁应力状态调整至理想区间，从而显著改善结构的服役表现和安全储备。

（三）降级使用、限速限载与结构体系转换的临时处置

在桥梁损伤严重且短期内无法完成彻底加固的情况下，采取临时处置措施是保障生命财产安全的必要手段。降级使用和限速限载是最直接的管理干预方式，通过在桥头设立明显的警示标识，限制重型车辆进入并降低过往车辆速度，可以显著减小动力冲击效应，缓解结构的疲劳损伤。与此同时，建立实时监控体系对结构关键点的位移和应变进行动态跟踪，能够为后续的维修决策提供数据支撑。

结构体系转换则是通过改变支承条件或受力模式来实现临时加固，比如增设临时支墩将长跨度转换为短跨度，从而大幅度改变结构内部的应力分布。实施体系转换时，必须详细计算转换过程中的瞬态受力情况，保证临时支撑稳固可靠。这些处置手段虽然会影响交通顺畅度，但在重大安全隐患排查期间具有不可替代的作用，它们为大修或拆除重建提供了必要的过渡期，通过科学的管理与临时的结构干预，最大限度控制了运营风险。

在最终的决策环节，管理部门需要综合考虑结构的损伤程度、剩余寿命以及交通需求，灵活运用各种临时或永久性手段。所有的处置方案都应在确保安全的前提下，尽可能减少对社会经济的影响。通过体系转换与限制措施的有机结合，可以在保证公共安全的同时，为后续的全面修复方案争取到足够的设计和施工筹备时间。这种分阶段、多层级的管理策略，构成了现代大型钢结构桥梁维护保障体系的重要基石，体现了工程技术的严谨性与交通管理的灵活性，为城市交通生命线的长期稳定运行提供了多重保险与技术支撑，确保了交通基础设施建设的质量与运行效率。

（四）悬索斜拉协作体系拉索更换与索力重分配的加固工艺

悬索斜拉协作体系结合了悬索桥主缆承重与斜拉桥斜拉索辅助调载的优势，能够有效优化大跨度桥梁的整体受力，但在长期服役过程中，拉索会因为环境腐蚀、应力腐蚀以及交变荷载作用出现损伤退化，需要通过更换受损拉索、重新调整索力来恢复结构的受力性能。

1. 旧索卸载与分步分级的拔除工艺

更换拉索前需要对原有索力进行精确检测，明确结构当前的实际受力状态，再根据检测结果制定卸载方案。卸载过程需要遵循分步分级原则，通过千斤顶逐步降低旧索的张拉力，同步监测结构各关键部位的位移和应变变化，避免单次卸载量过大引发结构内力重分布失衡。旧索完全卸载后，需要逐一解除锚头处的锚

固锁定装置，再利用牵引设备平稳将旧索从管道中拔除，拔除过程控制好牵引速度，避免扰动相邻拉索的索力和周边结构，同时做好旧索的移除与现场清理，为新索安装预留作业空间。

2. 新索制作安装与张拉过程的索力控制

新索需要根据设计要求的索长、规格和防腐要求提前预制，进场后要对其外观、强度和防护层质量进行逐一检测，确认合格后再开展安装作业。安装过程中通过牵引设备将新索逐步穿入预留管道，精准调整锚头位置，保证新索两端能够可靠锚固。张拉阶段采用分级张拉工艺，每完成一级张拉都要暂停并测量实际索力，对比设计值调整张拉吨位，同时监测主缆、主梁和桥塔的位移应力变化，确保张拉过程中结构受力始终处于安全范围。

3. 整体索力的优化重分配与成桥检测

全部换索作业完成后，需要对全桥所有拉索和主缆的索力进行整体检测，结合结构当前的线形和受力状态，对索力进行精细调整优化，实现索力的合理重分配，让结构整体受力回归设计预期范围。调整完成后，需要对新索锚头进行密封防腐处理，补做外层防护，再通过全面的成桥荷载试验验证加固效果，确认桥梁整体承载能力和刚度满足运营要求，后续还需要建立长期索力监测机制，定期跟踪索力变化情况，及时发现异常并处置，保障协作体系长期受力稳定。

第四节 全寿命周期管养策略

钢结构桥梁在长期运营过程中面临着环境侵蚀、荷载反复作用以及材料老化等多重挑战。建立全寿命周期的管养策略，旨在通过科学的规划与技术手段，将养护工作由被动补救转变为主动预防，从而在保障桥梁结构安全的前提下，最大限度降低桥梁生命周期的总成本，实现社会效益与经济效益的统一。

一、管养信息化与智能化建设

信息化与智能化建设是现代桥梁管养转型的核心驱动力。利用先进的数字技术构建一套全方位、多维度的感知与管理体系，可以显著提升数据采集的效率与准确性，为钢结构桥梁的精细化管养提供决策依据，确保每一项养护指令都有科学支撑。

（一）基于 BIM 的桥梁管养数据库的搭建与信息挂接

在钢结构桥梁的运营阶段，构建高精度的信息模型是实现智慧管养的基础。该模型不仅需要精确表达梁体、横隔板、加劲肋等构件的几何空间关系，更要整合材料属性、施工记录以及历史维修数据。通过将每一块钢板的生产批次、焊接工艺参数以及出厂涂装信息挂接到对应的模型构件上，管理人员可以在数字空间内直观查阅任何一个细节的原始档案。这种信息挂接的工作方式打破了传统纸质文档检索困难的僵局，让管养数据能够跨越时间限制，在不同部门之间实现无缝流转。

这种数字化资产的建立过程通常涉及多源数据融合，技术人员需要定期将现场检测获取的动态数据更新到模型中。实际操作中，通过对构件做唯一编码处理，可以把日常巡查发现的涂层剥落面积、螺栓松动位置等信息实时同步到数据库里。这种以模型为核心的数据管理模式，确保了信息在桥梁全寿命周期内的完整性与一致性，为后续的结构状态评估与维修决策提供了价值极高的数字化底座。与此同时，基于云端的访问机制让现场作业人员可以通过移动设备随时调取技术参数，极大提升了现场处置的精准度与作业效率，实现了管理流程的闭环。

（二）病害发展历程的数字化追踪与预测曲线生成

针对钢结构特有的疲劳裂纹与腐蚀病害，数字化追踪技术展现出了强大优势。通过对历年检测数据的归纳分析，系统可以为每一个关键部位建立独立的病害档案，清晰展示裂纹长度随时间的变化过程。结合数值模拟与大数据分析手段，管养平台能够根据环境湿度、盐雾浓度以及交通荷载的变化趋势，自动生成病害发展的预测曲线。这让管理人员可以提前预判构件性能下降至临界值的时间节点，在病害恶化前制定针对性的干预措施，避免后期病害爆发带来的结构安全风险和高昂修复成本。

构建预测模型时，技术人员会引入多种物理参数做加权修正。对于长期处于高湿度环境的钢梁底部，预测曲线会重点考虑腐蚀速率的非线性增长规律；而对于受车辆动力冲击明显的跨中节点，疲劳累积损伤就是预测的核心因子。通过这种数字化预测手段，养护工作不再盲目，而是可以根据曲线提示的风险等级安排优先级。这种前瞻性的管理思维，能有效避免突发性结构失效风险，提升桥梁整体运营的可靠性，也为养护资源的合理分配提供了定量参考依据。在长期运营过程中，预测曲线还会根据新采集的数据不断自我修正优化。

（三）无人机巡检与图像 AI 识别技术在日常巡查中的应用

在日常巡查领域，无人机技术的引入彻底改变了传统人工攀爬检查效率低、风险高的现状。配备高分辨率相机的无人机可以近距离捕捉钢结构节点的影像资料，尤其是高塔、拉索以及钢梁外侧等人员难以抵达的部位，无人机都能实现无死角覆盖。采集到的高清图像随后会输入专门的智能识别算法，系统会自动检索图像中存在的异常特征，比如焊缝处的细微裂纹、涂装层表面的锈迹以及构件变形征兆。

图像自动识别技术在应用中有着极高的准确度与处理速度，核心优势主要体现在三个方面：算法模型基于海量病害样本训练，能够精准区分光影干扰与真实锈蚀病害；系统可以对识别出的病害自动分类并估算受损程度，直接生成电子报告；通过前后两次巡检影像的自动比对，能够直观发现病害的新生或扩张情况。这种自动化巡查模式极大减轻了管养人员的工作强度，提高了病害发现的及时性。借助人工智能的分析能力，海量视觉数据被转化为结构健康的直观指标，为桥梁的实时监控提供了强有力的技术保障。除此之外，无人机巡查有明确的标准化特征，所有巡检路径和视角都可以通过程序固定，保证了不同周期巡检结果的可比性，为病害的长期追踪提供了最客观的一手资料。通过这种智能手段，管养单位可以建立更高效的预警联动机制，确保隐患在第一时间被发现并上报。

（四）大跨悬索桥 / 斜拉桥智能巡检机器人在索塔与钢箱梁内部的专项应用

大跨悬索桥与斜拉桥的索塔内部爬梯、钢箱梁内部腔室普遍存在空间狭窄、通风不良、光线不足的问题，人工巡检不仅作业效率低下，还会给巡检人员带来较高的安全风险。智能巡检机器人的投入使用，彻底解决了这一专项巡检的痛点，能够代替人工完成高危环境下的常态化检查作业。

针对索塔内部的检查需求，搭载了高清摄像头、超声探伤模块与气体检测传感器的攀爬式机器人，可沿索塔预设的导轨自主攀爬，自主完成全高度范围的影像采集与缺陷检测，实时识别混凝土索塔表面的裂缝、剥蚀，以及钢索塔节点的焊缝开裂、螺栓锈蚀等病害，同步监测塔内有害气体浓度，为管养人员提供完整的内部健康数据。而针对钢箱梁内部，轮式或履带式巡检机器人可在箱梁内部自主导航，沿预设路径遍历所有横隔板、焊缝与加劲肋区域，不仅能够识别表层的腐蚀与裂纹缺陷，还可通过超声检测技术发现构件内部的隐藏损伤，弥补人工检测的盲区。

机器人采集到的所有数据会实时同步到桥梁管养平台，自动与历史检测数据做对比分析，精准掌握病害的发展动态，既保证了专项巡检的覆盖度与准确度，又大幅降低了人工巡检的劳动强度与安全风险，成为大跨径缆索承重桥梁日常专项管养的核心技术支撑。

二、预防性养护体系的建立

预防性养护体系的核心在于防患于未然。这一体系依托严密的监测网络与科学标准，通过对微小病害的及时修复，阻止其发展为结构性破坏。建立完善的预防性养护机制，是保障钢桥长期服役性能、实现资产增值的必然选择。

（一）基于状态评估的“早发现、小修早修”决策机制

建立一套基于实测状态的评估体系是实施预防性养护的前提。该机制要求管养部门对桥梁的各项性能指标进行量化评分，评分内容涵盖结构刚度、动态响应以及关键构件的完好率。当评估分值触及预设的预警阈值时，决策系统会自动启动维修响应程序。通过这种方式，微小的锈蚀点可以在演变为穿孔前得到清理复涂，松动的螺栓可以在引发疲劳损伤前完成加固。这种“小修早修”的模式，单次投入远低于事后大规模修复，有着极高的成本效益比。

在决策流程执行过程中，需要综合考虑环境影响因素与交通流量波动。对于交通繁忙的干线钢桥，管养部门往往会采用更严苛的评估标准，确保任何潜在隐患都能在萌芽状态被消除。基于状态评估的决策机制不是僵化的教条，而是会根据结构反馈数据动态调整的过程。这种模式强调养护工作的精准性，确保有限的养护力量能够精准投放在最需要的构件上，通过对局部缺陷的快速处置，保障整个结构系统的稳定运营。决策层还会定期回顾养护成效，优化评估权重，让体系更贴合实际运营环境。

（二）易损件（支座、伸缩缝、排水管）的定期更换周期

钢结构桥梁能否正常运行，很大程度上取决于支座、伸缩缝以及排水系统这类易损件的功能状态。这些构件虽然不直接构成主受力体系，但它们失效往往会引发严重的次生病害。比如排水管破损会导致积水直接冲刷钢梁，诱发大面积腐蚀；支座功能失灵则会改变结构的受力模式。制定科学的更换周期表，可以有效规避个别构件失效引发的连锁反应。表 10-3 列出了三类关键易损件的巡查与更换周期建议。

表 10-3 钢结构桥梁易损件定期维护更换周期表

易损件类型	常规检测频率	更换周期参考	特殊情况调整规则
支座	每 5 年一次专项性能评估	服役 20 年后进入重点观察期，评估合格可延长更换	根据环境侵蚀程度提前或延后
伸缩缝	日常巡查结合年度检修	整体更换周期为 10-15 年	交通流量大的路段适当缩短周期
排水管路	每年雨季前完成疏通检查	老化管段每 5 年集中更新一次	高盐雾、酸雨地区缩短更新周期

在实际操作中，管养单位会根据所在地区的酸雨频率、温差幅度对周期做微调，确保每一类易损件始终处于可靠工作状态。对于在高盐雾地区服役的桥梁，排水系统的腐蚀评估频次会相应增加。通过这种清单化的管理模式，可以确保管养工作不留死角，将维护责任落实到具体的时间节点与构件编号上，为桥梁主体的长久健康运行扫清障碍。

（三）管养资金在检测、预防与大修之间的合理统筹分配

科学的资金管理是支撑全寿命周期管养策略的关键基石。在资金分配过程中，应当改变过去重抢修轻保养的陈旧观念，将更多预算向检测与预防性养护倾斜。通过加大对高精度传感器、自动化检测设备的投入，可以更早掌握结构状态，从而用较低的预防性投入规避未来高额的大修支出。行业经验显示，在预防阶段投入一元钱，往往能节省后期修复阶段十元甚至更多支出，这种资金分配优化，本身就是管理效率提升的直接体现。

为了实现资金的统筹分配，管养部门通常会构建多目标的资产管理模型。该模型会根据桥梁的重要性等级、服役年限以及检测评定结果，对未来的资金需求做多个方案的对比分析。在年度预算编制中，优先保障日常养护与定期检测的刚性支出，对于大修资金则采取储备金制度。通过这种动态调整与长远规划相结合的方式，可以确保资金链稳健，避免因资金短缺导致的养护欠账。这种科学的管理思维，为钢结构桥梁的持续安全运行提供了坚实的财务支撑。与此同时，资金分配的透明化也有助于监管机构对养护效果进行审计，提升了公共资金的使用效率。

三、应急响应与灾后评估

钢结构桥梁作为交通系统的关键节点，面对突发事件的抗风险能力至关重要。

建立健全应急响应与灾后评估体系,能在灾后迅速摸清受损情况,科学指导抢修,尽快恢复交通,降低灾害对经济社会的影响。

(一) 船舶撞击、地震、极端台风后的快速响应预案启动

针对钢结构桥梁可能遭遇的重特大险情,必须建立分级响应的应急预案体系。当安装在桥墩上的传感器感知到超过设定值的船舶撞击力,或者地震监测仪捕捉到强烈地壳波动,亦或是气象部门发布最高级别的台风预警时,指挥中心会立刻启动预案。第一时间的响应动作包括立即封锁受影响路段,引导车辆绕行;通过实时监控画面确认结构外观是否存在明显垮塌或倾斜征兆。这种快速反应能力建立在完善的监测硬件与流畅的通讯渠道基础之上。

预案执行过程中,各部门的协同配合是成功的关键。交通管理部门负责路面管控,管养单位负责现场初步上报,技术支撑团队则通过远程终端获取传感器传回的结构动力参数。基于这些实时数据,系统可以初步判断结构受损的范围与程度,为后续允许人员进入现场的决策提供安全评估。这种数字化的应急指挥模式,缩短了从险情发生到采取处置措施的空窗期,把次生灾害的发生概率降到最低,体现了现代桥梁管理对突发风险的高效控制力。与此同时,预案还会针对不同等级的灾害设定明确的处置流程,确保每一名参与人员都能各司其职。

(二) 灾后结构安全性应急排查与评估专家组的运作

在突发事件得到初步控制后,组织专业力量开展结构安全性排查是后续工作的重心。管养单位会立即召集由结构力学、材料科学以及桥梁工程等领域的资深专家组成的评估组赶赴现场。专家组的运作流程通常从初步目测延伸到精密的无损检测,重点考察钢梁主焊缝是否开裂、连接螺栓是否剪断以及主塔与支座的位移是否超出安全限制。这种多学科专家联合诊断,能够从不同维度揭示结构的深层次受损情况,为后续修复奠定基础。

评估过程不仅关注直观的物理损坏,还涉及对结构剩余承载能力的科学推演。专家组会依据现场实测数据,利用有限元模型进行快速核算,判断受损后的桥梁是否具备通行轻型车辆的条件。在这一过程中,专家们的经验与先进的监测技术紧密结合,为受损桥梁的“伤情”给出权威定论。评估报告不仅是决策部门下达通车或封锁命令的直接参考,也为接下来的临时加固方案提供了最详实的技术参数。这种严谨的运作机制,确保每一项应急决策都经得起科学与历史的检验。通过专家组的高效协作,可以最大限度缩短桥梁的封闭时间,减轻交通压力。

（三）受损结构临时加固保通与永久修复方案的衔接过渡

当钢结构桥梁遭受局部损伤但未发生整体垮塌时，如何实现从临时保通到永久修复的平稳过渡是技术上的难点。临时加固通常追求时效性，一般会采用临时钢支撑、碳纤维布粘贴或高强螺栓补强等手段，核心目标是迅速恢复结构承载力满足应急交通需求。但临时措施往往无法完全替代原设计的力学性能，必须在保通期间同步编制永久修复方案。这种衔接需要考虑材料兼容性、荷载重新分布以及施工空间局限性，确保修复过程不产生新的结构隐患。

在永久修复方案的制定过程中，技术团队会深入分析受损部位的受力机理，力求在不改变原桥建筑风格的前提下实现结构性能的全面恢复甚至提升。实施永久修复作业时，往往需要分阶段逐步替换临时构件。在此过程中，必须对桥梁的线形与内力进行全天候监控，确保新旧结构在更替过程中平稳过渡。通过这种精细化的施工组织，可以最大程度减少对交通的影响，确保受损桥梁能够重新恢复正常使用。这种从应急到永久的科学衔接，不仅体现了修复技术的成熟度，更展现了全寿命周期管养思维应对极端挑战时的韧性。在此基础上，永久修复工程还需要注重涂装防腐体系的重建，确保修复部位具备不低于原结构的耐久性能。通过这一系列精细化操作，桥梁在经历灾害后能够以更强韧的状态回归服役，真正体现了全寿命周期管理的闭环逻辑。这不仅是工程技术的进步，更是管养机制日趋完善的有力证明，反映了对公共基础设施安全运营的长久承诺与技术追求。

参考文献

- [1] 陈锦平.钢结构桥梁施工过程中的质量控制与管理[J].城市建设理论研究(电子版), 2023(22):37-39.DOI:10.12359/202322013.
- [2] 李东东.超声冲击法加固钢结构焊接接头的疲劳性能研究[D].北京建筑大学,2020.
- [3] 冯文.铁路桥梁钢结构焊接质量控制技术研究[J].中国品牌与防伪, 2025(2): 71-73.
- [4] 吴胜辉,李宝,吴承杰,等.钢结构桥梁高精度焊接工艺应用研究[J].建筑机械化, 2025, 46(9):122-125.
- [5] 崔云翔.道路桥梁施工中的养护管理与质量控制[J].运输经理世界, 2025(30): 121-123.
- [6] 何宗敏.钢结构桥梁厂内精细化制造工艺与质量控制策略研究[J].中国金属通报, 2025(3):118-120.
- [7] 王云龙.钢结构桥梁腐蚀防护中的涂装工艺及质量控制技术[J].石油和化工设备, 2026, 29(2):295-296.
- [8] 郭元春.船厂跨江桥梁钢结构运输安装施工工艺分析[J].工程建设与设计, 2023(4):148-150.
- [9] 唐黎标.大气防腐涂料与涂装工艺在钢结构防腐工程中的正确使用[J].涂料技术与文摘, 2021, 042(002):10-13.
- [10] 彭广涛.大型箱梁双机器人焊枪路径规划及焊接工艺研究[D].沈阳工业大学,2021.
- [11] 任永泉.道路桥梁施工中钢结构防腐技术的影响因素及改进策略[J].汽车导报, 2024(6):127-129.
- [12] 王宏宾.钢结构桥梁工程防腐涂装工艺及质量控制措施[J].大众标准化, 2023(24): 25-27.DOI:10.3969/j.issn.1007-1350.2023.24.010.
- [13] 李朋.大跨度钢结构桥梁吊装施工技术研究[J].交通世界, 2024(27):103-105.
- [14] 黄永亮.超危大钢结构桥梁施工工艺及焊接质量控制——以西湖大学建设工程三期为例[J].建筑施工, 2023, 45(9):1858-1861.

- [15] 白利勇.中承式提篮钢管拱桥拱肋及钢梁安装技术研究[J].住宅与房地产, 2023(14):30-33.
- [16] 罗刚.公路桥梁项目钢结构防腐措施及维护技术探讨[J].交通科技与管理, 2023(11):0137-0139.
- [17] 冀晓梅.桥梁钢结构长效防腐措施及维护施工技术[J].交通世界, 2022(35): 139-141.
- [18] 乔园园,袁正武,刘年明,等.下承式钢结构拱桥拱肋焊接质量控制研究[J].焊接技术, 2023, 52(5):160-164.
- [19] 谢计东.大跨径钢结构桥梁施工技术及质量控制要点探析[J].建筑与装饰, 2025 (8):178-180.
- [20] 徐杰胡元峰唐靖武德智刘小龙.对空间扭曲截面钢桁梁安装技术的探讨[J].城市道桥与防洪, 2022(10):136-141.
- [21] 白冰.一种三点式钢横隔梁标准化生产及施工误差控制方法研究[J].北方交通, 2022(004):000.
- [22] 舒宏伟,毛远航.桥梁拱组合钢结构技术工艺研究[J].黑龙江交通科技, 2022, 45 (12):83-84.
- [23] 陶龙,赵敏,雷军伟.大跨度钢结构桥梁整体吊装施工工艺及吊装安全控制技术 [J].安装, 2026(1):48-50.
- [24] 罗冬进.钢结构安装技术应用与质量控制措施[J].中国建筑金属结构, 2025, 24(24):67-69.
- [25] 徐鑫.交通桥梁钢结构焊接质量问题分析与整改措施研究[J].建设监理, 2025 (6):112-115.
- [26] 马存祥,仇模任,盘显铭,等.滨海盐雾环境下钢结构桥梁防腐涂装质量提升研究 [J].西部交通科技, 2025(12):48-50.
- [27] 田正兰,朱继成.超大复杂多曲面桥塔横梁制造技术研究[J].城市道桥与防洪, 2024(4):162-165.
- [28] 蔡正峰.大跨度桥梁钢结构节段工厂预制与现场拼装的精度控制技术研究[J].越野世界, 2025(22):142-144.
- [29] 彭菲,孙仁定,孙见文.钢结构劲性柱施工工艺优化与质量控制措施[J].四川建材, 2024, 50(8):136-138.

- [30] 李明明,冯渐熙,张浩群.大跨度双曲系杆拱人行钢箱梁桥吊装技术研究[J].建筑技术开发, 2023, 50(10):93-95.DOI:10.3969/j.issn.1001-523X.2023.10.032.
- [31] 王启生.道路桥梁施工技术中的细节问题及处理策略[J].魅力中国, 2021(17):0122-0124.
- [32] 夏岩.钢结构桥梁防腐涂装施工质量控制对策[J].砖瓦世界, 2021, 000(005):66-67.DOI:10.3969/j.issn.1002-9885.2021.05.053.
- [33] 林东.桥梁钢结构冷喷锌与热喷铝(锌)防腐工艺对比研究[J].现代涂料与涂装, 2022(3):26-29.
- [34] 李逢祥,刘治,张家豪,等.基于BIM技术的钢结构斜拉桥施工监控技术应用[J].北方建筑, 2025, 10(5):11-14.
- [35] 杨树玄.大型厚板H型钢结构GMAW焊接工艺与实验研究[D].杭州电子科技大学,2021.
- [36] 聂闻坤.刘家峡水库洮河大桥桥梁钢结构吊装施工技术要点分析[J].运输经理世界, 2025(1):117-119.
- [37] 吴力 赵丽.碳纤维复合材料在土建结构加固中的技术应用[J].佛山陶瓷, 2025, 35(1):22-24.DOI:10.3969/j.issn.1006-8236.2025.01.007.
- [38] 甘亚晴.钢箱梁制造施工质量控制措施[J].建筑工程技术与设计, 2025(1):52-54.
- [39] 陈伟,卓应贤.大跨径桥梁施工技术难点与应用对策[J].科海故事博览, 2025 (28):43-45.
- [40] 于建.拱桥超大质量拱肋钢结构吊装方案研究[J].工程机械与维修, 2023(4):274-277.
- [41] 杨军.建筑钢结构焊接生产工程中的技术要点[J].今日制造与升级, 2023(5):64-67.
- [42] 白帆.桥梁钢结构长效防腐技术和施工问题的防腐策略[J].智能建筑与工程机械, 2023, 5(9):28-30.
- [43] 李承宇.桥梁钢结构涂装维修关键技术设计研究[J].现代涂料与涂装, 2022(2):18-21.
- [44] 李海龙梁永强.钢结构桥梁焊接施工技术研究[J].企业科技与发展, 2022(7):115-117.
- [45] 毛娜.钢结构桥梁完整性设计探析[J].城市住宅, 2020, 27(12):199-200.

- [46] 臧星.高架桥施工中的钢桥面铺装工艺[J].工程机械与维修, 2021, 000(006): 80-81.
- [47] 王雪.钢结构箱梁自动化焊接工艺研究[J].今日制造与升级, 2025(3):84-86.
- [48] 朱庆菊.桥梁钢结构圆柱头焊钉智能化焊接试验研究[J].铁道建筑, 2024, 64 (12):117-121.
- [49] 张其林,欧阳元文.铝合金结构的技术现状与展望[J].钢结构(中英文), 2024 (11):28-39.DOI:10.13206/j.gjgS24101425.
- [50] 秦松林.U形加劲肋桥面板单面全熔透焊接技术研究[D].哈尔滨理工大学,2023.
- [51] 赵健业,李旺,关文勋,等.水合硅酸镁对溶剂型氟碳涂料性能影响研究[J].铁道学报, 2025, 47(9):166-173.