

大型跨江桥梁施工技术及其创新应用研究

刘湘源

湖南省湘交建设集团有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i5.7972

[摘要] 大型跨江桥梁作为综合交通枢纽的重要组成部分，其施工过程面临跨度大、水文复杂、功能复合等多重挑战。本文围绕桥梁施工关键技术展开系统研究，分析深水基础、大节段钢结构、斜拉索系统等核心工艺，归纳装配化、智能化建造技术在工程实践中的集成应用，并以沪通长江大桥为典型案例，提炼其在结构创新、材料研发与施工组织方面的工程经验。研究表明，复合交通结构下的桥梁施工需依托多技术协同推进，其技术演进趋势体现出高性能、智能化与绿色化的发展导向，对我国重大跨江通道建设具有现实参考价值。

[关键词] 大型跨江桥梁；施工技术；超大跨度；简支桁梁施工

Research on construction technology and innovative application of large cross-river Bridges

Liu Xiangyuan

Hunan Xiangjiao Construction Group Co., LTD.

[Abstract] As a crucial component of comprehensive transportation hubs, large-scale cross-river bridges face multiple challenges in construction, including significant spans, complex hydrology, and multifunctional integration. This paper systematically investigates key technologies in bridge construction, analyzing core processes such as deep-water foundations, large-segment steel structures, and cable-stayed systems. It summarizes the integrated application of prefabricated and intelligent construction techniques in engineering practice, using the Hu Tong Yangtze River Bridge as a typical case study to extract its engineering experience in structural innovation, material development, and construction organization. The research indicates that bridge construction under composite traffic structures requires the coordinated advancement of multiple technologies, with technological evolution trends reflecting a focus on high performance, intelligence, and green development. This has practical reference value for the construction of major cross-river channels in China.

[Key words] large river bridge; construction technology; super large span; simply supported truss beam construction

引言

跨江桥梁作为连接区域经济与支撑国家交通战略的关键工程，其建设技术的复杂程度远超普通桥梁。尤其在主跨超千米、通行双层多功能体系的复合结构中，传统施工方法已难以满足结构安全与工期控制的双重需求。近年来，伴随结构材料与施工装备的不断进步，大型桥梁工程逐步呈现出智能化、集成化的施工趋势。本文以典型跨江工程为研究对象，重点探讨其在深水基础、大跨度构造、吊装工艺与信息化监控等方面的关键技术，并通过沪通长江大桥的实践案例，验证技术体系的可行性与推广价值。

1 大型跨江桥梁施工的关键技术特征

1.1 跨江环境与施工难点

大型跨江桥梁建设通常面临极为复杂的自然条件。江面宽、水流急是其最基本的地理特征，水文因素直接影响施工安全、基础结构设计及材料选择。以长江为例，其主航道宽度普遍超过2公里，流速可达2~3米/秒，汛期波动剧烈，需对施

工期间的围堰防护、沉井下放和桩基成孔等工序进行精准管控。此外，长江作为国家黄金水道，通航密度高、等级高，建设期间需确保主航道不中断，施工场地布设必须兼顾航道净空要求与施工作业空间^[1]。尤其在感潮河段，昼夜潮差变化使得施工窗口时间有限，对材料运输、吊装精度和工序衔接提出极高要求。

1.2 超大跨度与多功能通行的结构不足

当桥梁主跨超过千米，结构体系所需承载的荷载显著增加。若桥梁同时服务于铁路与高速公路系统，不仅荷载种类复杂（恒载、活载、冲击荷载），还需要在结构布置上兼顾刚度、舒适性与疲劳性能。铁路系统对变形控制极为严格，特别是在高铁设计速度达到250km/h及以上时，挠跨比、竖向振动加速度、转角控制等指标均需精细化计算。传统钢桁梁或混合结构难以独立承载此类复合荷载，需采用高强度钢材、新型连接节点与协同受力设计理念。此外，上下层结构布置模式常见于公铁合建桥，纵向荷载传递路径更长、横向稳定性控制难度更大，对主梁、索塔与桥墩的集成设计能力提出挑战^[2]。

1.3 施工组织与材料技术协同要求

面对江面宽广、水下地质复杂和多功能通行需求，桥梁施工需构建高度协同的组织体系。一方面，桥位基础往往位于深水或软弱地基，沉井、钢管桩、钻孔灌注桩等基础施工需结合不同地层特性精细选择。另一方面，大节段构件（如钢桁梁、索塔塔柱等）往往采用工厂预制、江面浮运、同步吊装等组合工艺，对施工时间节点与设备调度精度要求极高^[3]。在此过程中，传统施工方法已难以满足高质量、高效率、高安全性的目标，需集成 BIM 系统、结构健康监测平台及高精度测控装置，形成“设计—制造—运输—安装”全过程可控的施工流程。此外，结构材料的性能升级是实现大跨径桥梁建设的技术保障。高性能桥梁钢（如 Q500qE）及高强斜拉索（如抗拉强度 2000MPa 平行钢丝）已成为现代桥梁材料的重要选择。新材料在强度、延展性、焊接适应性方面均优于传统结构钢，显著提升了结构安全裕度与施工适应性。同时，新型抗腐蚀涂层与节点焊接工艺的应用，也使得桥梁结构在复杂环境中具备更长的服役寿命和更低的运维成本。

2 核心施工技术体系研究

2.1 深水基础施工技术

在主桥塔区段，通常采用钢-混凝土组合沉井基础，通过浮运、吸泥下沉、封底等环节完成就位。为确保沉井稳定下沉，需控制单位时间内下沉速度 Δh ，其表达式为：

$$\Delta h = \frac{F - W}{\rho g A} \tag{1}$$

其中， F 为下沉驱动力， W 为井体重力， ρ 为水体密度， g 为重力加速度， A 为沉井底面积。对于引桥或中小型桥墩，采用大直径钻孔灌注桩，通过嵌岩设计和清孔灌注控制，提高竖向承载力与侧向抗震性能^[4]。

2.2 超大跨度钢结构施工技术

大跨度桥梁主梁普遍采用钢桁梁结构，具备自重轻、节点清晰的优势。节段化制造与浮运吊装是核心工艺流程，每节段重达 1500 吨以上，通过水上拖带至桥位，依托多点同步吊机完成就位。浮运设计需计算合力矩满足稳定要求，其简化形式为：

$$M = R \cdot d \tag{2}$$

其中， M 为合力矩， R 为浮力与重力差值， d 为作用臂长度，确保在波浪、流速扰动下浮态稳定。焊接质量与节点精度直接决定结构性能，常辅以激光准直与应力测试手段确保吊装匹配度。

2.3 主塔及斜拉索系统施工技术

主塔通常采用 C60 高性能混凝土，分节段浇筑，配合液压自爬模系统提升施工效率。塔身线形需在 3mm 内控制误差，借助激光测量系统实现实时修正。斜拉索系统采用三索面布置，拉索由直径 7mm 钢丝组成，强度高达 2000MPa。张拉施工采取

分批同步加载，借助智能张拉系统监控索力变化，并通过结构有限元模型进行实时复算，以确保主梁线形稳定与受力均衡。

2.4 工程信息化控制与实时监测

桥梁施工全过程引入 BIM 模型与物联网监测设备，形成从设计、施工到运行的闭环管理体系。关键监测点部署位移计、索力计、应变片等，构建数据分析平台，及时识别偏离风险并进行反馈调整。如：在主梁吊装过程中，实时采集的位移数据可通过时域分析模型转化为结构响应，供调度系统自动调整吊点张力，从而保障施工安全性与同步精度^[5]。

3 创新施工技术的集成应用

3.1 BIM 建模与全生命周期协同设计

BIM (Building Information Modeling) 技术突破了二维图纸的静态信息表达，通过构建多维参数模型，形成桥梁结构、材料属性、施工逻辑与运维策略的全过程信息载体。在施工阶段，BIM 可实现工程进度计划（4D）、成本管理（5D）与质量管控的同步联动，提升了构件管理、施工路径优化与工序协调效率。此外，BIM 模型在现场实施中可与构件编码、吊装标定、位移监测系统形成数据链路，支撑精准定位、动态仿真及应急调度，显著提升施工可控性。在运维阶段，BIM 模型通过嵌入传感器数据，构成结构数字孪生系统，实现基于运行状态的预测性养护与资源配置优化。

3.2 大数据与传感系统协同监测技术

大跨度桥梁施工过程中，各关键结构部位需进行连续实时的应力、位移、振动与温度监测，传统离散点检方式已难以满足精细化需求。当前工程中广泛布设应变片、位移计、索力传感器、倾角仪与 GNSS 模块，通过物联网平台进行集中采集与远程处理。监测数据集成后，可通过时域分析、频域识别与模型反算构建桥梁结构响应机制。典型索力与位移响应关系可表示为：

$$\Delta L = \frac{F \cdot L_0}{A \cdot E} \tag{3}$$

其中， ΔL 为位移增量， F 为受力， L_0 为初始长度， A 为截面积， E 为材料弹性模量。该模型可用于斜拉索张力调整、主梁线形校正与施工过程结构协调控制。

智能监测系统可实现数据异常自动报警、趋势识别与多源数据交叉验证，辅助现场技术人员在高风险施工阶段及时干预，增强了整个施工系统的鲁棒性与安全边界控制能力。

3.3 绿色建造与节能型施工体系

绿色建造强调在满足结构安全与施工效率的前提下，最大程度减少对资源环境的影响，是当前基础设施建设中可持续理念的核心体现。如下表 1 所示，具体到桥梁施工，绿色建造主要体现在以下几个方面。

表 1 绿色建造主要体现方面

表现方面	描述
材料节能降耗	使用高强度、耐久性高的混凝土及新型环保防腐涂层，降低结构自重与维修频率
工艺污染控制	桩基成孔、沉井下沉等工艺采用泥浆收集、隔污布设与环保围堰技术，控制泥沙流失与水体污染
设备节能替代	施工机械优先采用电驱或液压系统，减少噪音与碳排放
场地生态保护	桥墩布设兼顾行洪安全与岸滩植被保留，减少岸线扰动

3.4 装配化、工厂化桥梁构件制造体系

装配化施工以构件标准化、节点模块化与拼装精度控制为核心特征，显著提高了施工现场效率与构件质量稳定性。大型钢结构、主梁节段、塔柱构件等均通过工厂化集中预制后，经水路运输或码头转运送达现场，完成高精度拼装作业。

装配施工流程一般包括：构件加工 → 数字化检测 →

防腐涂装 → 标识定位 → 运输吊装 → 现场连接。各环节均配合数控设备、数字测量系统与吊装力矩控制算法，形成“制造—转运—安装”闭环作业链。该体系相较传统现场焊接与模板施工，有效提升来了施工安全性，减少施工周期与人为误差，是适应大跨度结构在水域环境中高效率建造的重要路径。

4 案例分析：沪通长江大桥施工技术与创新应用研究

作为当前我国桥梁工程中结构跨度最大、功能复合程度最高的代表性项目之一，沪通长江大桥集中体现了大跨度钢结构、智能索力调控、深水基础施作以及多桥型过渡的系统融合特征，对于理论向实践的技术转化具有典型意义。工程全长11072米，横跨长江澄通河段，在结构组织、施工流程与材料选择方面均体现出复杂性与前瞻性。其上层设置双向六车道高速公路，下层布设四线铁路，其中包含Ⅰ级重载货运线与250km/h等级城际客运线，在保障承载性能的同时，亦对结构响应精度提出了极高要求^[6]。

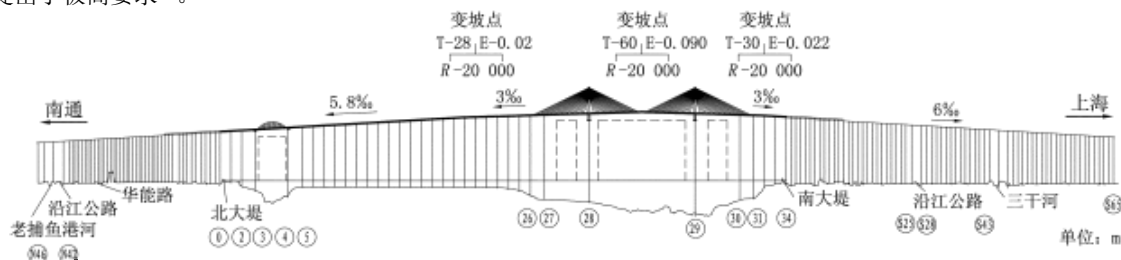


图1 沪通长江大桥主航道桥结构纵断面示意

在施工过程中，主梁构件采用大节段工厂化制造，单节段最大重量达1800吨。节段焊接完成后通过水路浮运至桥位，利用多点同步提升系统进行高空吊装，全过程配合BIM吊装仿真系统控制位移误差在5mm以内。斜拉索则采用三索面空间布设，索长最大576米，构成全桥主要受力骨架。索力在张拉过程中通过模型反算—实测校正机制实时更新，确保结构线形稳定。

4.2 深水基础施工控制与下部结构协同

主塔区段所处江面宽广、水流湍急，地质构造表现为厚层粉砂与局部嵌岩交错，极易引发冲刷及基底不均沉降问题。为保障基础体系的整体稳定性与结构承载安全性，工程采用钢-混凝土组合沉井基础。该沉井为目前国内桥梁中尺寸最大的沉井结构之一，平面尺寸达到86.9米×58.7米，沉井总深度超过百米，具备极高的嵌固深度与刚性性能。

钢壳段在干船坞内预制完成，采用分段焊接与整体拼装工艺，形成高一致性的密封结构。沉放过程通过浮运—定位—吸泥下沉的流程展开，结合激光测距系统与姿态传感装置实现三维实时校正。下沉全过程中，控制点偏移量保持在±50mm以内，沉井姿态变化可实时反映于平台监控系统界面，施工控制精度显著提升。

在沉井就位后，底部封闭采用高性能抗分散水下混凝土，经由限压灌注装置完成浇筑与封底。随后，通过设置嵌岩钻孔桩群构建“井-桩-岩”三重传力路径，确保沉井底板荷载可有效传递至深层持力层。对应的上部塔身则采用节段式滑模技术进行同步提升，塔体精度控制与沉井轴线一致性保持在10mm以内，最终实现塔、梁、索的空间对位协调与受力系统的顺畅延续。

4.3 多桥型段落转换中的结构适应性策略

由于桥位跨越区域水文、地质与线路曲线条件各异，为实现结构连续性与施工节奏均衡，项目在非主跨区段灵活采用多桥型协同配置。在横港沙浅滩段，采用21孔112米钢桁梁简支结构，配合特殊槽形桥面设计，有效解决平曲线路段对轨道连续性的影响。同时，为避免伸缩装置所引发的结构不连续，应力分布通过节点过渡设计与轨面刚度控制实现自然消解。

在专用航道桥段，工程结构采用刚性梁与柔性拱结合的复合体系。拱肋与主桁之间通过高强吊杆联接，并形成上下结构分力通道，拱矢高约60米，配合跨中吊杆张拉调整技术，提升整体抗风刚度与结构冗余性。

4.1 主航道桥结构体系与集成施工路径

主航道桥采用双塔斜拉结构，主跨达1092米，属目前国内结构跨度最大、功能最复杂的公铁合建桥梁之一。桥面采用双层布置结构，上层承载高速公路交通，下层布设四线铁路系统。为满足多种交通荷载并兼顾结构刚度，主梁设计采用“三主桁+五纵桁”组合式钢桁结构，有效提升扭转刚度与板面协同受力能力。图1展示了主航道桥的纵断面布置形式。从图中可见，双塔结构对称布置于主跨两侧，斜拉索三索面空间布设，桥面上下两层功能清晰分隔。

4.4 材料与系统集成对施工性能的支撑机制

高性能材料的选用在本工程中具有基础性支撑作用。Q500qE高强钢材的广泛应用使得桁架构件在满足强度需求的同时显著降低了自重，对吊装设备吨位与节段运输构成积极影响；2000MPa平行钢丝的使用则保证了斜拉索系统在超长跨径下具备足够的索力稳定性与抗疲劳能力。与此同时，集成式锚固系统与自动张拉平台协同运行，构建起一个从结构—设备—控制一体化的施工支撑体系。

5 结语

本研究围绕大型跨江桥梁施工过程中的关键技术路径与创新应用展开系统分析，厘清了深水基础、超大跨度钢结构、斜拉索系统与信息化控制等核心技术的集成逻辑，并通过沪通长江大桥案例，验证了多技术协同在复杂环境下的可行性与结构适应性。研究表明，现代桥梁工程正呈现出系统集成、智能控制与绿色建造并重的发展趋势，施工技术正由单项突破转向全流程耦合优化。未来大型桥梁建设将更加依赖技术间的协同调度与全过程数字化支撑，施工效率、结构安全与生态适配性也将成为其可持续发展的基本评价维度。本研究可为同类跨江桥梁项目的技术集成提供借鉴依据与实践参考。

【参考文献】

- [1]李拯稷, 谭木荣, 武照收, 等. 岩溶地区深厚卵石层地层中跨江桥梁桩基施工技术[J]. 工程建设与设计, 2024, (16): 212-214.
- [2]余葵, 刘文敏, 周昱焘, 等. 跨江桥梁中拱形独立式防撞装置水动力特性研究[J]. 水道港口, 2023, 44(04): 618-624.
- [3]饶冠琼. 城市跨江桥梁附属空间设计研究[D]. 湖北美术学院, 2023.
- [4]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, (04): 148-150.
- [5]戈玉龙. 跨江桥梁建设中的水中墩下结构施工工艺[J]. 中国建材科技, 2021, 30(02): 142+61.
- [6]高宗余, 梅新咏, 徐伟, 等. 沪通长江大桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2015, 45(06): 1-6.