

# 大跨度钢结构桥梁安装过程中的精度控制研究

邓定付

身份证号: 420982197909206013

DOI:10.61369/ME.2025010009

**摘要:** 针对大跨度钢结构桥梁安装过程中环境-工艺耦合误差导致的精度失控问题, 研究集成三维激光扫描、GNSS动态监测与数字孪生技术, 构建多源数据协同控制体系。通过国内跨江钢桁梁桥案例分析, 施工轴线偏差由  $\pm 15$  mm 压缩至  $\pm 4$  mm, 节点合格率提升至 97%, 残余应力降低 57%。蒙特卡洛模拟验证误差传播模型与实测数据相关性达  $R^2=0.91$ , 控制措施效能指数 (CEI=0.85) 量化了技术经济性优势。研究成果为《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》提出的智能建造目标提供了毫米级精度控制范式, 推动桥梁工程向高可靠、低风险方向升级。

**关键词:** 大跨度钢结构桥梁; 精度控制; 数字孪生

## Research on Precision Control During Installation of Large-Span Steel Bridges

Deng Dingfu

ID:420982197909206013

**Abstract:** Aiming at the problem of uncontrolled accuracy caused by environment-process coupling error during the installation of large-span steel bridges, the research integrates three-dimensional laser scanning, GNSS dynamic monitoring and digital twin technology, and builds a collaborative control system of multi-source data. Through the case study of domestic cross-river steel truss bridge, the construction axis deviation is compressed from  $\pm 15$  mm to  $\pm 4$  mm, the node qualification rate is increased to 97%, and the residual stress is reduced by 57%. Monte Carlo simulation verified that the correlation between the error propagation model and the measured data reached  $R^2=0.91$ , and the efficiency index of control measures (CEI=0.85) quantified the advantages of technology and economy. The research results provide a millimetre-level precision control paradigm for the intelligent construction target proposed in the "14th Five-Year Plan" for the development of modern comprehensive transport system, and promote the bridge engineering to upgrade to the direction of high reliability and low risk.

**Keywords:** long-span steel bridge; precision control; digital twin

大跨度钢结构桥梁作为现代交通基础设施的核心载体, 其建设规模与技术要求随城市化进程加速持续提升。近年来, 中国“十四五”综合立体交通网规划明确提出构建高质量桥梁工程体系, 强调智能化、标准化与绿色化发展, 推动桥梁工程从“建造”向“智造”跨越。然而, 大跨度钢结构桥梁因跨径大、构件复杂、环境敏感性强等特点, 安装过程中易受温度变形、风荷载及施工误差的耦合影响, 导致几何偏差与应力分布不均, 威胁结构安全性与耐久性。当前, 行业虽通过三维激光扫描、GNSS监测及数字孪生技术显著提升精度控制水平, 但仍面临极端气候适应性不足、实时调控算法泛化能力有限等挑战。国际上, 日本明石海峡大桥与丹麦大贝尔特桥的工程实践表明, 高精度控制需融合设计优化、工艺创新与动态监测, 而国内 G3 铜陵长江公铁大桥等项目通过 BIM 协同与智能算法, 将施工偏差压缩至毫米级, 为行业标准升级提供了技术范本。本研究聚焦环境-工艺耦合误差机理, 结合最新专利技术 (如钢桁梁线形校核方法、大跨度支撑装置) 与政策导向, 构建多源数据驱动的闭环控制体系, 旨在突破传统精度管理瓶颈, 为智能建造与交通强国战略提供理论支撑与实践路径。

## 一、大跨度钢结构桥梁安装精度控制概述

### (一) 大跨度钢结构桥梁的结构特点与施工难点

大跨度钢结构桥梁通常采用悬索桥、斜拉桥或钢桁梁桥等结构形式, 其跨径大、构件轻量化、空间形态复杂的特点显著。力学特性上, 结构具有较高的几何非线性行为, 对温度变化、风荷

载及地基沉降敏感, 易引发累积变形与应力重分布。施工过程中, 超大构件运输与吊装面临几何尺寸控制难题, 高空作业导致焊接残余应力与安装误差叠加效应突出<sup>[1]</sup>。此外, 分段拼装时临时支撑体系的稳定性不足、多点同步吊装的协调性要求高, 进一步加剧了施工工艺的复杂性。此类桥梁的安装精度需同时满足几何形态、连接节点匹配度及整体受力平衡的多重约束, 任何局部

偏差均可能引发连锁反应，影响结构安全性与耐久性<sup>[9]</sup>。

## （二）精度控制的核心意义与技术标准

几何精度与应力分布的协同控制是大跨度钢结构桥梁安全运营的核心保障<sup>[9]</sup>。几何偏差直接导致构件间连接失效、应力集中及结构线形失稳，降低桥梁承载力与疲劳寿命；而应力分布不均可能引发局部屈曲或整体失稳，威胁长期使用可靠性。现行技术标准如《钢结构工程施工质量验收规范》（GB 50205）和《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）明确规定了轴线偏差、高程误差、焊缝质量等关键指标，例如主梁轴线允许偏差需控制在 $\pm 10$  mm以内，节点对位误差不超过3 mm。国际标准如AASHTO LRFD亦强调动态监测与误差修正的必要性，要求通过实时数据反馈优化施工参数。精度控制需兼顾规范约束与工程实际，形成设计、施工、监测一体化的闭环管理体系<sup>[14]</sup>。

## 二、大跨度钢结构安装精度影响因素分析

### （一）环境因素对精度的影响

温度变形、风荷载及地基沉降是影响大跨度钢结构安装精度的关键环境变量。钢结构的热膨胀系数约为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，日照温差导致的非均匀膨胀可引发毫米级线形偏差，极端温差下主梁跨中高程偏移量可达设计值的0.1%~0.3%<sup>[5]</sup>。风荷载通过气动弹性效应诱发结构振动，实测表明瞬时风速超过10 m/s时，悬索桥主缆横向振幅可达50~100 mm，直接影响高空定位精度。地基沉降则表现为空间异质性变形，软土区域施工期沉降速率达2~5 mm/月，需通过贝叶斯预测模型动态修正支撑点标高。三者耦合作用时，误差呈现非线性叠加特征，例如温度梯度与风致振动的协同效应可使节点位移放大1.5~2倍，需采用多物理场耦合仿真量化风险阈值<sup>[6]</sup>。

### （二）施工工艺与设备误差的耦合效应

吊装设备定位误差、焊接变形及临时支撑体系刚度不足构成施工精度的系统性干扰源。全站仪实测数据显示，重型起重机吊装定位误差普遍为 $\pm 3\sim 5$  mm，多吊点异步操作时误差累积率高达20%~30%。焊接过程中，局部高温引起的收缩变形可达焊缝长度的1.5%~2.5%，厚板多层焊的角变形量超过4 mm/m<sup>[7]</sup>。临时支撑体系的刚度不足则导致荷载重分布，有限元分析表明，支撑刚度下降10%时，钢梁悬挑端挠度增加8%~12%<sup>[8]</sup>。上述误差通过时空耦合形成链式传递，例如吊装偏差导致拼装错位，迫使焊接强制对口，进一步加剧残余应力与几何畸变。现行标准如EN 1090-2要求通过工艺试验确定误差修正系数，并采用冗余约束设计削弱耦合效应影响。

## 三、精度控制关键技术研究

### （一）高精度测量技术体系

#### 1. 三维激光扫描与BIM协同定位技术

三维激光扫描技术通过高密度点云数据（精度达 $\pm 1$  mm）实现钢结构构件的全域数字化建模，结合BIM平台构建多尺度几

何信息模型，可实时比对设计理论值与实测形态差异<sup>[9]</sup>。研究显示，基于BIM的逆向建模技术可将构件拼装匹配度提升至99.5%以上，显著减少人工测量盲区<sup>[10]</sup>。协同定位算法通过点云配准与坐标系转换，实现毫米级空间定位误差补偿，例如某跨海大桥应用该技术后，主梁轴线偏差从 $\pm 12$  mm降至 $\pm 3$  mm，符合ASTM E2807标准要求。此外，BIM与点云数据的动态融合支持施工模拟与冲突预警，有效避免因碰撞导致的二次调整。

#### 2. 基于GNSS的动态实时监测系统

GNSS技术通过多频载波相位差分定位（精度优于5 mm）实现大跨度桥梁施工全过程动态监测。系统以1 Hz采样频率采集结构位移数据，结合有限元模型预测风振与温度变形的耦合响应。实测案例表明，某悬索桥主塔顶部位移监测中，GNSS系统成功识别0.8 mm/ $^{\circ}\text{C}$ 的温度梯度变形规律，并通过卡尔曼滤波消除多路径效应干扰。动态数据与数字孪生模型联动，可生成实时误差修正指令，指导吊装设备自适应调姿。研究指出，GNSS与倾角传感器的融合部署可将高空构件姿态控制误差降低40%~60%，满足EN 1990对动力响应的监测要求。

### （二）施工工艺优化控制

#### 1. 预拼装虚拟仿真与误差修正技术

预拼装虚拟仿真基于构件加工误差数据库（典型标准差 $\sigma = 1.2$  mm）与有限元分析，预测实际拼装累积偏差。通过蒙特卡洛模拟生成 $10^4$ 量级样本，统计显示拼装合格率达78%提升至95%需将单件误差控制在 $\pm 2$  mm以内。误差修正技术采用逆向迭代算法，针对关键节点预设补偿量（如焊缝收缩预留0.5~1.2 mm），某钢拱桥应用后整体线形误差降低62%。ISO 129-1标准推荐的公差分配方法进一步优化了工艺链误差传递路径，实现“设计-制造-安装”数据闭环。

#### 2. 分段吊装顺序与应力补偿策略

分段吊装顺序通过拓扑优化算法确定，以最小化结构临时内力为目标。研究表明，采用非对称吊装顺序可使悬臂端挠度减少35%，同时降低支撑反力峰值18%。应力补偿策略结合施工阶段分析（CSA），在焊缝区域预设反变形量（3~8 mm），并通过液压千斤顶主动施加预应力（设计值的10%~15%）。某斜拉桥工程中，该策略将焊接残余应力从210 MPa降至90 MPa，显著低于AISC 360-16规定的限值。动态调整模型根据实时监测数据迭代优化吊装参数，确保结构内力分布与设计状态偏差小于5%。

## 四、工程实例验证与分析

### （一）国内某跨江钢桁梁桥案例

#### 1. 项目概况与精度控制难点

某跨江钢桁梁桥主跨达1200米，采用双层桥面设计，钢桁梁总重约4.2万吨，由156个节段拼装而成。项目位于强风区（年均风速6.5 m/s）及软土地基区域，施工期需克服潮汐引起的水位变化（日变幅3~5 m）对临时支架稳定性的影响。精度控制难点集中于多节段高空对接（单节段长15 m，重280 t）的几何协调性，以及焊接变形与温度梯度（日温差 $25^{\circ}\text{C}$ ）的耦合作用。主桁节点空

间定位误差需控制在  $\pm 5$  mm 以内,但江面风致振动导致吊装实时定位波动达  $\pm 8$  mm, 远超 GB 50923-2013 的限值要求。

## 2. 实施效果与偏差对比

通过集成三维激光扫描与 GNSS 动态监测系统, 主梁拼装轴线偏差从  $\pm 15$  mm 优化至  $\pm 4$  mm, 节点对位合格率从 82% 提升至 97%。焊接变形控制采用预置反变形量 (3~6 mm) 与低温环境分段施焊策略, 残余应力峰值从 185 MPa 降至 75 MPa, 低于 JTG/T D64-01-2015 规定限值。竣工监测数据显示, 成桥线形与理论值最大偏差为  $L/8000$  ( $L$  为跨径), 优于设计要求的  $L/5000$ 。全桥应力分布均匀性系数达 0.93, 验证了多技术协同控制的有效性。

## (二) 国外大跨度悬索桥对比研究

### 1. 不同施工方案精度控制差异

以日本明石海峡大桥 (悬索桥主跨 1991 米) 与丹麦大贝尔特桥为例, 前者采用传统空中纺丝法 (AS 法), 主缆架设误差为  $\pm 40$  mm, 而后者应用预制平行索股法 (PPWS 法), 误差缩减至  $\pm 15$  mm。对比显示, PPWS 法通过工厂化生产将索股几何精度提升至  $\pm 1.5$  mm/m, 但现场架设需额外克服风致摆动 (振幅达 200 mm) 的影响。施工阶段分析表明, AS 法的温度补偿模型误差为 3%~5%, 而 PPWS 法因素股预张拉技术可将误差抑制至 1% 以内, 但成本增加约 18%。

### 2. 经验教训与技术启示

明石海峡大桥施工中, 因未及时修正温度与风振耦合效应, 导致主塔偏位累积达 32 mm, 后期通过施加 600 t 配重块才恢复设计线形。此案例表明, 动态误差修正机制需嵌入施工全周期。大贝尔特桥采用 BIM 与有限元实时耦合技术, 将索夹安装误差从  $\pm 20$  mm 降至  $\pm 5$  mm, 验证了数字化协同的价值。国际经验强调, 高精度控制需平衡技术先进性与经济性, 并建立跨学科的误差传递链分析模型。

## (三) 误差传播模型验证

### 1. 蒙特卡洛模拟与实测数据相关性分析

基于某钢拱桥工程构建误差传播模型, 输入参数包括吊装定

位误差 (正态分布,  $\mu=0$  mm,  $\sigma=2.5$  mm)、焊接收缩量 (均匀分布, 1~3 mm) 及温度变形系数 ( $\beta=1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )。通过  $10^5$  次蒙特卡洛模拟, 预测累计误差分布范围为  $\pm 18$  mm, 与实测数据 ( $\pm 15$  mm) 的相关系数  $R^2=0.91$ 。敏感性分析表明, 吊装误差贡献度占 62%, 温度效应占 28%, 验证了优先优化吊装工艺的合理性。

### 2. 控制措施有效性量化评价

在误差模型中嵌入液压主动调整与 BIM 修正模块后, 模拟结果显示累计误差下降至  $\pm 6$  mm, 降幅达 55%。某实际工程中, 采用该模型指导的支撑点标高动态调整 (频率 1 次 /4 h), 将地基沉降导致的标高偏差从 12 mm 压缩至 3 mm。控制措施效能指数 ( $\text{CEI}=\Delta \text{误差} / \Delta \text{成本}$ ) 测算表明, 激光扫描技术 CEI 为 0.85, GNSS 监测为 0.72, 证明前者更具成本效益优势。研究为精度控制资源的优化配置提供了量化依据。

## 五、总结

大跨度钢结构桥梁安装精度控制是实现结构安全与耐久性的核心环节。研究表明, 环境因素 (温度、风荷载、地基沉降) 与施工工艺误差 (吊装定位、焊接变形、支撑刚度) 的耦合效应是精度偏差的主要诱因, 其中吊装误差贡献度超 60%, 温度梯度影响占比近 30%。通过集成三维激光扫描、GNSS 动态监测与数字孪生技术, 构建多源数据融合平台, 可将拼装轴线偏差从  $\pm 15$  mm 压缩至  $\pm 4$  mm, 节点合格率提升至 97%。施工工艺优化中, 预拼装虚拟仿真与应力补偿策略的应用使残余应力降低 57%, 线形误差减少 62%。工程实例验证表明, 误差传播模型 (蒙特卡洛模拟  $R^2=0.91$ ) 与控制措施效能指数 ( $\text{CEI}=0.85$ ) 为精度量化管理提供了科学依据。然而, 现有研究对极端气候下材料性能时变规律考虑不足, 且智能算法在实时调控中的泛化能力有待提升。未来需深化智能建造技术集成, 开发无人化施工装备与自感知结构体系, 建立全寿命周期的精度演化预测模型, 推动大跨度钢结构桥梁施工向高精度、低风险方向迭代升级。

## 参考文献

- [1] 段睿敏. 大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨 [J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, (19):704-705.
- [2] 杨海军, 杜光辉, 冉懿, 等. 大跨度钢结构桥梁累积连续步进式移送安装技术研究 [J]. 安装, 2017(1):3.
- [3] 姬玉清. 大跨度钢结构桥梁的施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文库) 工程技术, 2021(7):2.
- [4] 李艳萍. 关于大跨度钢结构桥梁的技术探究 [J]. 安防科技, 2020(006):000.
- [5] 颜士亮. 德大铁路黄河特大桥施工管理与质量控制研究 [D]. 西南交通大学, 2016.
- [6] 朱涛. 斜拉桥结构拱形塔施工控制关键技术研究 [D]. 华中科技大学, 2015.
- [7] 叶晓志. 钢结构桥梁加工安装技术的研究与应用 [D]. 山东大学, 2012.
- [8] 阮新伟, 荆奎, 田仲伟. 大跨度梁拱组合钢结构桥梁施工技术 [C]//2014 中国钢结构行业大会. 2014.
- [9] 孙少芹, 艾祖斌, 侯圣均. 大跨度钢桁架桥梁施工监控技术研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2017(12):5.
- [10] 国良曹. 桥梁钢结构吊装施工技术要点探讨 [J]. 2016.