

# 斜拉桥主梁悬臂施工中的线形控制关键技术研究

胡令辉

中铁二十四局集团

DOI:10.32629/etd.v6i12.19229

**[摘要]** 斜拉桥因其跨越能力强、结构轻盈美观、经济性好等优点,在现代大跨径桥梁建设中得到广泛应用。在斜拉桥的施工过程中,主梁通常采用悬臂拼装或悬臂浇筑的方式进行施工,其施工过程具有高度非线性、时变性和复杂耦合性的特点。主梁线形作为衡量桥梁施工质量与成桥状态是否满足设计要求的核心指标,直接关系到结构的受力性能、行车舒适性及使用寿命。本文系统梳理了斜拉桥主梁悬臂施工中影响线形的关键因素,深入分析了当前主流的线形控制理论与方法,并重点探讨了基于正装—倒装迭代分析的预拱度设置、索力优化调整、施工监测与反馈控制、参数识别与误差修正等关键技术。所提出的综合控制策略能够有效提升线形控制精度,保障成桥线形与内力状态符合设计预期。研究成果可为类似大跨斜拉桥施工提供理论支撑与实践指导。

**[关键词]** 斜拉桥; 悬臂施工; 主梁线形; 线形控制; 索力调整; 参数识别; 施工监控

**中图分类号:** U448.27 **文献标识码:** A

## Research on Key Technologies for Alignment Control in Cantilever Construction of Cable-Stayed Bridge Main Girder

Linghui Hu

China Railway 24th Bureau Group

**[Abstract]** Cable-stayed bridges are widely used in modern long-span bridge construction due to their advantages such as strong spanning capacity, lightweight and aesthetically pleasing structure, and good economy. During the construction of cable-stayed bridges, the main girder is usually constructed by cantilever assembly or cantilever casting, and the construction process is characterized by high nonlinearity, time-varying nature, and complex coupling. As a core indicator for measuring whether the bridge construction quality and completed bridge state meet the design requirements, the main girder alignment directly affects the structural mechanical performance, driving comfort, and service life. This paper systematically sorts out the key factors affecting alignment in cantilever construction of cable-stayed bridge main girders, deeply analyzes the current mainstream alignment control theories and methods, and focuses on key technologies such as camber setting based on forward-reverse iterative analysis, cable force optimization adjustment, construction monitoring and feedback control, parameter identification, and error correction. The proposed comprehensive control strategy can effectively improve alignment control accuracy and ensure that the completed bridge alignment and internal force state meet design expectations. The research results can provide theoretical support and practical guidance for the construction of similar long-span cable-stayed bridges.

**[Key words]** cable-stayed bridge; cantilever construction; main girder alignment; alignment control; cable force adjustment; parameter identification; construction monitoring

### 引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展,大跨径桥梁建设技术不断突破。斜拉桥作为一种高效、经济、美观的桥型,已广泛应用于跨江、跨海及山区峡谷等复杂地形条件下的重大工程中。典型的如苏通长江大桥(主跨1088 m)、沪苏通长江公铁大

桥(主跨1092 m)等,均采用了双塔双索面钢箱梁或混凝土梁斜拉桥结构。斜拉桥主梁施工普遍采用对称悬臂施工法,即从桥塔两侧同步向跨中逐段推进。该施工方法虽能有效利用斜拉索的临时支撑作用,减少临时支架用量,但其施工过程具有显著的阶段性、时变性和力学行为非线性特征。每一施工阶段的结构体

系、荷载状态、边界条件均发生改变,导致主梁在施工过程中产生复杂的变形累积。若不加以精确控制,极易造成成桥线形偏离设计标高,甚至引发结构内力异常,影响桥梁安全与使用性能。因此,主梁线形控制成为斜拉桥悬臂施工中的核心关键技术之一。线形控制的目标是在考虑材料非线性、几何非线性、时间依存效应(如混凝土收缩徐变)及环境因素(温度、风荷载)等多重影响下,通过科学的预拱度设置、合理的索力张拉方案及动态的施工监控反馈机制,确保主梁在每一施工阶段及最终成桥状态下的空间位置与设计线形高度吻合。

### 1 悬臂施工中影响主梁线形的主要因素

斜拉桥主梁在悬臂施工过程中,其线形受多种因素耦合作用,主要包括:

#### 1.1 结构自重与施工荷载

主梁节段自重是引起悬臂端下挠的主要原因。随着悬臂长度增加,弯矩迅速增大,导致主梁产生显著的竖向位移。此外,施工机具、模板、人员等临时荷载也会对局部线形产生扰动。

#### 1.2 斜拉索索力

斜拉索不仅是永久承重构件,更在施工阶段充当“临时支撑”。索力的大小与张拉时机直接影响主梁的受力状态与变形形态。索力不足会导致主梁下挠过大;索力过大则可能引起主梁上拱甚至局部压应力超限<sup>[1]</sup>。因此,索力的精准控制是线形调控的核心手段。

#### 1.3 混凝土材料的时间依存效应(针对混凝土梁)

对于混凝土主梁,收缩与徐变效应不可忽视。混凝土在硬化过程中体积收缩,同时在长期荷载作用下产生徐变变形,导致主梁持续下挠。该效应具有时间累积性,且受环境温湿度、配合比、加载龄期等因素影响,难以精确预测。

#### 1.4 温度效应

温度变化是引起主梁短期线形波动的最主要环境因素。日照温差可导致主梁截面产生不均匀温度场,引发弯曲变形;整体温度升降则引起结构伸缩。尤其在大跨桥梁中,温度引起的位移可达数厘米,远超施工允许误差(通常 $\pm 10$  mm),必须予以修正。

#### 1.5 风荷载与施工误差

强风作用下,悬臂主梁可能发生横向摆动或扭转,影响测量精度与施工安全。此外,节段制造误差、安装定位偏差、索力张拉误差等施工不确定性也会累积影响最终线形。

## 2 线形控制的基本理论与方法

### 2.1 正装—倒装迭代分析法

线形控制的核心在于建立准确的施工过程仿真模型。目前广泛采用“正装—倒装迭代分析法”来协调施工过程与成桥目标之间的矛盾。正装分析模拟实际施工过程,按时间顺序逐阶段计算结构在自重、索力、临时荷载等作用下的响应,包括位移、内力及索力变化,并充分考虑材料非线性、几何非线性以及混凝土收缩徐变等时间依存效应。而倒装分析则以设计成桥状态为起点,反向推演各施工阶段应达到的理想状态,如主梁预抬值、斜

拉索初始张力等。通过反复进行正装与倒装计算,不断调整初始输入参数,使正装分析所得的成桥状态逐步逼近设计目标,从而获得一套切实可行的施工控制指令<sup>[2]</sup>。这一方法不仅能够保证成桥线形的准确性,还能有效控制施工过程中结构的内力安全,是当前大跨斜拉桥施工控制的理论基石。

### 2.2 目标线形与预拱度设置

设计线形通常指桥梁在恒载和部分活载作用下的理想成桥几何形态,常表现为平滑的二次抛物线或其他曲线形式。然而,在悬臂施工过程中,主梁不可避免地会因自重、混凝土徐变等因素产生下挠,若直接按设计线形施工,最终成桥状态将显著低于预期。因此,必须在施工阶段预先设置向上的预拱度,即预抬值,以抵消后续发生的变形。预拱度的确定需综合考虑成桥恒载引起的弹性挠度、混凝土收缩徐变产生的长期挠度,以及部分活载引起的短期挠度。其计算依赖于高精度的有限元模型和可靠的材料参数。值得注意的是,预拱度并非一成不变,而应根据施工监测数据和参数识别结果进行动态修正,以应对实际施工中不可避免的偏差,确保最终线形精准落位。

## 3 线形控制关键技术

### 3.1 高精度有限元建模与参数敏感性分析

实现精准线形控制的前提是建立能够真实反映桥梁施工全过程力学行为的高精度有限元模型。该模型需完整包含主梁、桥塔、斜拉索、临时支撑系统等所有关键构件,并准确模拟其材料属性、连接方式及边界条件。对于混凝土结构,必须引入随时间变化的弹性模量、收缩应变和徐变系数;对于斜拉索,则需考虑其垂度效应和非线性刚度。此外,施工阶段的划分、荷载的施加顺序、临时约束的拆除时机等细节均需严格对应实际工况。在模型建立后,还需开展参数敏感性分析,系统评估各类输入参数(如混凝土弹性模量、徐变系数、索力初值、温度梯度等)对主梁线形预测结果的影响程度<sup>[3]</sup>。通过识别出对线形最为敏感的关键参数,可为后续的现场监测和参数识别工作提供明确方向,集中资源提高这些核心参数的辨识精度,从而显著提升整个控制系统的可靠性。

### 3.2 施工监测与数据采集系统

一个完善、稳定、高精度的施工监测体系是实现动态线形控制的眼睛和神经。该体系需要对主梁的空间位置、内力状态及环境影响进行全方位、多维度的数据采集。具体而言,应在每个新浇筑或拼装节段的前端布设多个高程测点,利用精密水准仪或自动化静力水准仪定期观测其竖向位移;在关键斜拉索上安装频率式或压力式传感器,实时获取索力数据;在主梁典型截面布置温度传感器网络,记录由日照引起的截面温度梯度分布;同时,在主梁和桥塔的关键受力部位埋设应变计,监控结构应力是否处于安全范围。所有这些监测数据必须统一时间戳,并经过严格的质量控制和预处理,剔除异常值,才能作为后续分析和决策的可靠依据。只有建立起这样一套覆盖全面、响应及时的监测系统,才能为线形控制提供坚实的数据基础。

### 3.3 参数识别与模型修正

尽管理论模型力求精确,但实际工程中材料性能、施工工艺与理想假设之间必然存在差异,这会导致模型预测结果与现场实测数据出现偏差。为了弥合这一差距,必须引入参数识别技术,利用已有的监测数据反演结构的真实物理参数,进而对有限元模型进行动态修正。这一过程本质上是一个反问题求解,其目标是找到一组最优的模型参数,使得模型计算出的位移、索力等响应与实测值之间的误差最小化。常用的方法包括最小二乘法、扩展卡尔曼滤波以及近年来兴起的基于机器学习的智能算法。通过周期性地执行参数识别与模型修正,可以不断“校准”仿真模型,使其越来越贴近桥梁的真实状态。这种基于实测反馈的模型更新机制,是应对施工不确定性、提高后续阶段预测精度的核心环节,也是实现闭环控制的关键所在。

### 3.4 索力优化与动态调整策略

在悬臂施工的全过程中,斜拉索的索力是最直接、最有效的线形调控手段。当监测数据揭示出主梁线形出现偏差时,工程师不能被动等待,而必须主动干预,通过调整后续待张拉索索的张拉力来进行补偿。这种调整并非简单的增减,而是一项复杂的多目标优化问题。其目标既要最小化当前及未来若干阶段的线形偏差,又要确保主梁和桥塔的内力始终处于材料强度和规范允许的安全范围内,同时还需避免索力调整幅度过大,以免对结构造成不必要的反复应力循环。为此,工程实践中常采用影响矩阵法,即预先计算单位索力变化对各控制点位移的影响系数,形成一个灵敏度矩阵<sup>[4]</sup>。在此基础上,结合线性规划或启发式优化算法,求解出一组最优的索力调整量。随着施工的推进,这套优化策略会根据最新的监测数据和修正后的模型不断更新,形成一套灵活、稳健的动态调整机制,确保线形始终沿着预定轨道发展。

### 3.5 温度效应分离与修正

温度效应对主梁线形监测的干扰是巨大且不可忽视的。尤其是在晴朗的白天,主梁顶板受阳光直射而温度显著高于底板,形成强烈的非线性温度梯度,导致主梁向上拱起;而在夜间或阴天,温度场趋于均匀,结构又会回落。这种由温度引起的“虚假”位移,其量级常常远超施工控制的允许误差,如果直接将其用于模型修正或决策,将导致严重的误判。因此,必须采取有效措施将温度效应从总位移中分离出来。一种常用的做法是选择在夜间或全天阴天等温度场相对稳定的时段进行高程测量,此时测得的位移可近似视为由结构自身荷载引起的“净位移”。另一种更为科学的方法是,在有限元模型中建立详细的温度荷载工况,通过计算不同温度模式下的结构响应,建立温度-位移的映射关

系。再结合现场实测的多点温度数据,即可对任意时刻的测量值进行温度修正,还原出真实的结构变形。只有经过这样严谨的温度效应分离与修正,所获得的监测数据才能真正反映结构的力学行为,为精准的线形控制提供可靠依据。

## 4 挑战与发展趋势

尽管线形控制技术已取得显著进展,但仍面临以下挑战:(1)超大跨斜拉桥(>1000 m)的几何非线性效应更强,传统小变形理论适用性受限,需发展大位移、大转动的精细化分析方法。(2)智能建造与数字孪生技术融合不足。未来可构建桥梁施工数字孪生体,实现虚实交互、实时仿真与智能预警。(3)极端环境(强风、地震、腐蚀)下的鲁棒性控制。需发展考虑不确定性的鲁棒优化算法,提升控制系统抗干扰能力。(4)自动化监测与机器人施工。结合无人机、激光扫描、智能传感器网络,实现高频率、高精度、少人化监测。未来发展方向将聚焦于“智能化、数字化、自动化”,推动斜拉桥施工控制从“经验+计算”向“数据驱动+智能决策”转型。

## 5 结语

斜拉桥主梁悬臂施工中的线形控制是一项复杂的系统工程,涉及结构力学、材料科学、测量技术与控制理论的多学科交叉。本文系统阐述了影响线形的关键因素,深入剖析了基于正装—倒装迭代的预拱度设置、索力优化、参数识别、温度修正等核心技术。研究表明:高精度有限元模型是线形控制的基础,参数识别是提升预测可靠性的关键;建立“监测—分析—决策—调整”的闭环反馈机制,可有效抑制误差累积;索力作为主动调控手段,需结合影响矩阵与优化算法实现精准补偿;温度效应必须通过科学方法分离,确保监测数据的真实性。随着智能传感、大数据分析、数字孪生技术的发展,斜拉桥线形控制将迈向更高精度、更强适应性与更智能化的新阶段,为我国乃至世界大跨桥梁建设提供坚实技术支撑。

### [参考文献]

- [1]马胜辉.超宽大悬臂矮塔斜拉桥主梁线形控制技术[J].浙江建筑,2025,42(04):60-64.
- [2]许欣.混凝土斜拉桥主梁和桥塔同步施工线形控制问题探析[J].交通世界,2024,(25):142-144.
- [3]邹雨亭.悬臂拼装钢箱梁斜拉桥线形施工控制[J].城市道桥与防洪,2023,(11):149-153+321-322.
- [4]肖云华,钟开建,何驰.中央索面预应力混凝土斜拉桥线形控制及影响参数研究[J].工程技术研究,2024,9(09):28-30.