

支撑轨枕,可使荷载沿纵向逐渐过渡,降低不均匀沉降对轨道几何形位的影响。通过结构优化设计,能够在源头上缓解桥隧过渡段的刚度差异,提升运营阶段结构的整体协调性与使用寿命。

#### 4.3 填筑材料与施工质量控制

桥隧过渡段的填筑材料与施工质量直接决定沉降控制效果。选用级配合理、压缩性低、渗透性良好的填料是确保填筑体稳定的关键。常用材料包括碎石土、级配砂砾及石灰粉煤灰稳定土等,其物理性能应满足强度与变形协调的要求。在施工过程中,应严格控制分层厚度、压实度与含水率,采用分层碾压与动态监测相结合的方式,确保填筑均匀密实。对于结构连接处,应采取加强压实与差异分区填筑的工艺,防止接缝处产生应力集中。此外,施工中需实时监测沉降与压实参数,及时调整施工工艺与压实能量,防止局部过压或欠压导致隐患累积。通过全过程质量管控与动态检测,可显著降低施工阶段的残余沉降风险,为后续结构稳定与长期使用安全提供保障。

### 5 桥隧过渡段沉降控制的综合应用与效果分析

#### 5.1 多技术协同控制的工程实践

在桥隧过渡段沉降治理过程中,单一技术手段往往难以应对复杂地质条件及多源变形因素的综合影响。工程实践表明,采用地基处理、结构优化与施工控制相结合的多技术协同体系,能够有效提升沉降控制的系统性与可靠性。在地基处理方面,常通过换填加固、注浆加固或 CFG 桩复合地基技术改善地基承载力;结构优化环节则通过设置刚度过渡层、加厚桥台基础或调整轨道结构形式,缓解刚柔差引起的不均匀沉降;施工阶段通过分层填筑、分段加载及施工监测,实现全过程的沉降控制。这种综合控制思路在多条高速铁路及城际轨道工程中得到验证,实践结果表明,多技术协同能有效降低桥隧过渡段差异沉降幅度,提高结构整体稳定性,为类似工程提供可复制的技术路径。

#### 5.2 运营期沉降监测与动态调整

桥隧过渡段的沉降控制不仅应在设计与施工阶段充分考虑,更需在运营期持续跟踪与动态管理。由于地基固结、荷载作用及环境变化等因素,过渡段在投入使用后仍可能产生次生沉降,因此应建立长期监测体系。通过布设自动化沉降监测点,结合光纤传感、GNSS 定位及地质雷达等技术,可实现对变形发展的实时观测与数据回传。监测数据的积累不仅有助于判断沉降趋势和不均匀变形区域,还为制定维修与加固措施提供科学依据。当监测数据出现异常时,可通过

增加填筑、注浆补强或轨道调整等方式进行动态修复。运营期的精细化监测与调整,有助于延长结构使用寿命,降低维护成本,并在保障高速列车运行安全方面发挥关键作用。

#### 5.3 技术应用的局限性与改进方向

尽管当前沉降控制技术体系在工程实践中取得显著成效,但在复杂地质环境和长周期运营条件下仍存在一定局限。部分地基加固技术施工周期长、成本高,对施工环境要求严格,难以满足大规模工程快速建设的需求。此外,沉降预测与控制模型在考虑地质非均质性、施工扰动及长期荷载影响方面仍有不足,导致控制精度存在偏差。未来研究应在新型高性能加固材料的研发、数值模拟技术的多因素耦合分析以及智能监测系统的构建等方面持续突破。通过引入人工智能与物联网技术,可实现对沉降过程的实时预测与反馈调控,逐步构建数据驱动的沉降控制体系。技术创新与信息化手段的融合,将为桥隧过渡段沉降治理提供更精细、更科学的工程解决方案。

### 6 结语

高铁桥梁与隧道过渡段沉降问题具有成因复杂、影响深远的特点,是高速铁路工程中亟需重点关注的技术难题。通过系统分析沉降机理可以看出,地基条件差异、结构刚度突变以及列车动荷载的长期作用是导致不均匀沉降的主要原因。在工程实践中,采取地基加固、结构优化与施工质量控制相结合的综合技术路线,对于减缓过渡段沉降、提升线路平顺性具有显著效果。今后,随着高速铁路运营里程和服役年限的不断增加,应进一步加强对桥隧过渡段沉降长期演化规律的研究,完善设计理论与控制技术体系,为高速铁路安全、平稳、耐久运行提供坚实的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 卢裕杰,王伟,刘彦文,等.大直径盾构隧道穿越高速铁路桥梁关键技术[J].铁道建筑,2024,64(08):95-99.
- [2] 郭波.盾构隧道下穿高速铁路桥梁施工影响数值分析[J].铁道建筑技术,2019,(07):105-109.
- [3] 刘洋,吴海明.高速铁路信号系统与桥梁监测系统接口设计方案研究[C]//中国铁道学会,西南交通大学,中铁二院工程集团有限责任公司.第三届中国铁路发展论坛学术论文集.中铁上海设计院集团有限公司通信信号设计院,2022:407-414.
- [4] 李文俊.运营高铁框架涵(桥)路桥过渡段病害整治施工难点与工程实践[J].地基处理,2023,5(02):159-166.
- [5] 杨庚辰.地震作用下高速铁路桥过渡段动力响应规律及减震措施研究[D].石家庄铁道大学,2025.

# Research on Construction Control and Line Adjustment Technology of Long-span High-speed Railway Cable-stayed Bridge

Tong Li

China Railway 12th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710024, China

## Abstract

As a critical control project in high-speed rail systems, large-span cable-stayed bridges feature complex structures and unique stress mechanisms, requiring stringent construction control and precise alignment. During construction, factors such as temperature variations, cable force deviations, material nonlinearity, and construction sequence can easily cause alignment deviations, directly impacting track laying accuracy and train safety. This study systematically analyzes construction monitoring and control technologies based on the stress characteristics of cable-stayed bridges, proposing an integrated construction control system centered on cable force regulation, main girder alignment control, and synchronous tower-girder adjustment. Through numerical simulations and field monitoring data comparison, the research explores multi-stage alignment optimization and closure error correction methods, establishing a full-process control model tailored for high-precision requirements. The findings demonstrate that scientific construction monitoring and alignment adjustment strategies significantly enhance both alignment precision and structural performance of cable-stayed bridges, providing crucial technical support for quality control in China's high-speed rail bridge construction.

## Keywords

long-span cable-stayed bridge; high-speed railway bridge; construction control; cable force adjustment; alignment optimization; structural monitoring

## 大跨度高铁斜拉桥施工控制与线形调整技术研究

李通

中铁十二局集团第四工程有限公司, 中国·陕西 西安 710024

## 摘 要

大跨度高铁斜拉桥作为高铁线路中的关键控制性工程, 其结构复杂、受力体系特殊, 对施工控制与线形精度提出了极高要求。施工过程中, 受温度变化、索力偏差、材料非线性及施工顺序影响, 桥梁线形极易产生偏差, 直接影响轨道铺设精度与列车运行安全。本文从高铁斜拉桥的受力特征出发, 系统分析施工全过程的监测与控制技术, 提出以索力调控、主梁线形控制及塔梁同步调整为核心的综合施工控制体系。通过数值仿真与现场监测数据对比, 探讨多阶段线形优化与闭合误差修正方法, 构建了适应高精度要求的全过程控制模型。研究表明, 科学的施工监控与线形调整策略能显著提升斜拉桥成桥线形精度与结构性能, 为中国高铁桥梁建设的质量控制提供了重要技术支撑。

## 关键词

大跨度斜拉桥; 高铁桥梁; 施工控制; 索力调整; 线形优化; 结构监测

## 1 引言

大跨度高铁斜拉桥作为高铁线路跨越江河或城市核心区域的重要结构形式, 兼具跨度大、刚度高、荷载复杂等特征。其线形精度不仅决定桥梁结构受力的合理性, 也关系到高速列车运行的平顺性与安全性。高铁桥梁在设计阶段多采用有限元仿真优化, 然而施工过程中的多变量干扰使理论设

计与实际成桥状态存在差异。尤其在斜拉索张拉、主梁节段拼装及温度梯度变化等阶段, 若控制不当, 会导致索力失衡、塔梁偏位及线形误差累积。为确保结构线形符合设计要求, 施工中需采用高精度测控技术与动态调整手段。本文围绕大跨度高铁斜拉桥的施工控制与线形调整展开研究, 重点分析多因素耦合作用下的结构响应规律, 探讨全过程的控制体系与实施策略, 为高精度施工提供理论依据与技术路径。

## 2 大跨度高铁斜拉桥的结构特点与施工难点

### 2.1 结构受力特征与设计要求

大跨度高铁斜拉桥通常采用混合梁或钢箱梁结构体系,

【作者简介】李通 (1996-), 男, 中国江西宜春人, 本科, 助理工程师, 从事土木工程、道路桥梁研究。

结合了梁桥和悬索桥的受力特点。主梁与索塔通过多根斜拉索形成一个空间受力体系，其独特的结构设计使得桥梁在荷载作用下的受力分布较为复杂。与公路桥不同，高铁桥梁对竖向刚度与线形平顺性有着更为严格的要求，偏差必须控制在毫米级别之内。这一精确控制要求确保了高铁运行的安全性与舒适性。桥梁在恒载、活载及温度荷载共同作用下，主梁、索塔及索力之间呈现高度耦合的关系，结构响应在施工阶段通常表现出显著的非线性特征。特别是在索力控制不当的情况下，主梁的线形和索塔的应力分布可能偏离设计值，进而影响桥梁的安全性与耐久性。因此，精确的受力分析与控制策略对于高铁斜拉桥的施工至关重要。

## 2.2 施工阶段的复杂性与误差来源

高铁斜拉桥的施工通常采用悬臂拼装或整体提升法，施工过程中，每一节段的拼装误差、张拉误差以及测量偏差均可能在后续工序中被放大，形成累积效应。由于施工环境中的温度梯度变化，特别是在日照差异较大的区域，主梁与索塔的温度应力对线形的影响十分显著。这些温度应力与结构变形会在施工过程中造成结构的暂态变化，进一步加剧了施工控制的难度。此外，施工荷载和索力调整的时效性问题也是导致结构响应偏差的重要因素。随着施工进度的推进，传统的单一索力调整方法已无法满足高铁桥梁对控制精度的高要求。为了确保施工过程中结构的精确控制，必须建立一个集成多源信息的监控与调整体系，以动态调整施工计划并优化结构响应。

## 2.3 高精度控制的技术瓶颈

在大跨度高铁桥梁的施工中，控制精度是关键问题。传统的施工监测手段，如全站仪与水准仪，受限于环境因素，难以实现全桥同步监控，且对施工过程中的动态响应调整存在较大局限性。由于高铁桥梁的结构跨度较大，对精度的要求极为苛刻，任何局部偏差都可能引起整体线形的异常，影响桥梁的长期稳定性与安全性。目前，施工过程中面临的主要技术瓶颈包括数据实时性不足、模型反馈滞后以及调整手段有限。在多阶段施工过程中，如何实现索力、位移与线形的闭环控制，确保每一阶段的精确调整，是提升高铁斜拉桥施工质量的核心问题。因此，采用更加先进的实时监测与动态反馈技术，结合多源数据融合的智能控制体系，成为提升施工精度和保障施工质量的关键。

## 3 施工监控体系的建立与实施

### 3.1 施工监测系统的总体架构

大跨度斜拉桥的施工监测系统是确保施工质量与结构安全的关键技术手段。该系统由结构响应监测、索力测量、环境参数采集及数据处理模块组成，全面覆盖施工过程中的各类关键指标。为实现精确监控，系统通过布设高精度位移计、应变计、测斜仪及索力传感器，能够对结构的关键节点进行多维监测。监测数据采用无线数据采集技术，实时传输

至云平台，确保信息能够快速共享。云平台技术不仅支持数据的存储与分析，还能够对采集到的数据进行自动校核，实时检测潜在的异常情况，并通过预警机制通知施工管理人员。这种系统架构使得施工过程中的所有关键参数得以实时监控与调整，为施工控制决策提供了科学依据，有效提升了施工精度和安全性。

### 3.2 索力监测与张拉控制

斜拉索在大跨度桥梁中的重要性不言而喻，索力控制直接关系到桥梁的线形稳定性与整体受力均衡。因此，施工监测系统必须在张拉过程中实时记录索力的变化曲线，并与设计理论值进行实时对比。当监测数据与理论值之间的偏差超过设定的阈值时，系统将自动发出调整提示，确保及时采取措施进行修正。为了防止结构局部受力过大，张拉控制过程中应采用分级加载和对称张拉的方法，以均衡力的分布。为提高索力测量的精度，可结合振动频率法和油压法对索力进行交叉校验，形成多维验证体系。这种多维度的控制方法能有效提升索力监测的可靠性和准确性，从而确保桥梁线形的稳定与安全。

### 3.3 主梁与索塔变形监测

在大跨度斜拉桥的施工中，主梁与索塔的变形监测是保证施工精度和结构安全的核心环节。监测系统通过高精度全站仪、激光测距和GNSS定位技术，能够实现全桥多点同步测量，对主梁的三维变形进行精确记录。通过实时解算监测数据，系统能够绘制出主梁的三维变形曲线，及时识别变形趋势并进行控制。除了主梁外，索塔的偏位也是监测的重点，系统通过对塔梁相对位移的周期性校核，确保竖向与水平偏差始终在设计控制范围内。监测结果与有限元预测模型进行对比，依据差异修正模型参数，提高控制模型的可靠性和精度。通过这一系统的实时监测与校核，施工过程中能够及时发现并解决变形问题，从而确保桥梁施工的顺利进行。

## 4 线形调整与多阶段优化控制技术

### 4.1 基于仿真分析的线形预测模型

在大跨度桥梁施工中，精确的线形调整依赖于对结构变形的准确预测。为此，采用全过程有限元模型进行分析，模型将施工顺序、索力施加、温度荷载及边界条件等因素纳入计算体系。通过该模型，能够获得各阶段施工中主梁的位移和应力分布曲线，为施工过程中实时调整提供科学依据。随着施工进展，监测数据与仿真结果的比对可以实时反馈结构的实际变形情况，从而不断修正模型参数。通过这种动态调整，预测误差可控制在1mm以内，确保了模型的高精度。这一预测模型的有效性直接影响后续线形优化的成功与否，决定了施工过程中是否能及时、准确地修正误差，确保桥梁在各阶段的力学性能和几何形状符合设计要求。

### 4.2 施工过程中的线形控制方法

在大跨度桥梁施工过程中，线形控制可分为阶段性调