

大跨度连续梁桥施工监控与线形控制精度优化研究

丁 涛

陕西兴通监理咨询有限公司 陕西西安 710000

摘要：本文针对大跨度连续梁桥施工过程中线形控制难度大、精度要求高的核心问题，系统研究了施工监控与线形控制的优化方法。首先，在阐述大跨度连续梁桥结构特点、施工监控内涵及线形控制重要性的基础上，深入分析了影响控制精度的材料、施工、环境及模型四大关键因素。其次，构建了集数据采集、处理、偏差识别与调整于一体的线形控制技术方法体系。最后，从施工方案优化、环境因素补偿、数据实时反馈修正及建立精度评价体系四个维度，提出了具体的精度优化措施。研究表明，通过实施上述系统化的监控与优化策略，能够有效克服施工中的不确定性，显著提升线形控制的精准性和预见性，确保桥梁成桥线形与内力状态满足设计要求，为同类复杂桥梁工程的精细化施工提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词：大跨度连续梁桥；施工监控；线形控制

引言

大跨度连续梁桥因其跨越能力强、结构美观、行车舒适等优点，已成为现代交通基础设施中的重要桥型。然而，其超静定、高次内力重分布的结构特性，以及普遍采用的悬臂浇筑等复杂施工工艺，使得施工过程中的结构行为具有高度的非线性和时变性。混凝土的收缩徐变、温度变化、施工误差等多种因素耦合作用，极易导致桥梁线形偏离设计目标，影响结构安全与使用性能。传统的被动式、经验化的监控方法已难以满足现代大跨度桥梁对施工精度的严苛要求。因此，如何构建一套科学、系统、动态的施工监控与线形控制体系，实现对施工过程的精准预测与主动干预，是确保大跨度连续梁桥建设质量的关键技术难题，也是当前桥梁工程领域研究的热点与难点。

一、大跨度连续梁桥施工监控与线形控制基本理论

(一) 大跨度连续梁桥的结构特点

大跨度连续梁桥是指主梁跨径超过一定限值（通常为60米以上）且采用连续结构体系的桥梁形式。其结构特点主要表现为多跨连续、超静定次数高、结构内力分布复杂。主梁通常采用箱形截面，具有较大的抗弯刚度和抗扭刚度，能够有效承受活载和恒载作用。由于跨径较大，桥梁在施工过程中和成桥状态下均表现出显著的几何非线性效应，包括大变形、二阶效应等。此外，大跨度连续梁桥通常采用悬臂浇筑、顶推施工或节段拼装等特殊施工方法，施工阶段的结构体系与成桥状态存在

显著差异，导致内力重分布和变形累积。这些特点使得大跨度连续梁桥的施工过程具有高度复杂性和不确定性，对施工监控和线形控制提出了更高要求。

(二) 施工监控的基本概念与作用

施工监控是指通过对桥梁施工过程中关键物理量（如位移、应变、温度、索力等）的实时监测与数据分析，评估结构行为是否符合设计预期，并及时调整施工参数以确保结构安全和质量的过程。其核心作用包括三个方面：一是保障施工安全，通过实时监控结构响应，及时发现异常情况并采取应对措施，避免施工事故；二是控制施工质量，确保桥梁线形、内力等关键指标满足设计要求；三是优化施工工艺，通过分析监测数据，改进施工方法，提高施工效率。施工监控贯穿于桥梁施工的全过程，从基础施工到主梁合龙，直至桥面铺装完成，形成完整的监控闭环。其技术手段包括自动化监测系统、数据采集与传输设备、数据分析软件等，构成一个集监测、分析、预警、决策于一体的综合管理系统^[1]。

(三) 线形控制的内涵与重要性

线形控制是指通过调整施工参数，使桥梁的实际几何线形与设计线形保持一致的过程。其内涵包括两个方面：一是几何线形的控制，即桥梁的竖曲线、平曲线和横坡等几何参数的控制；二是结构内力的控制，即通过调整施工顺序、预应力张拉等方式，使结构内力分布符合设计要求。线形控制的重要性体现在三个方面：首先，线形偏差会影响桥梁的使用功能，如过大的竖向变形会导致桥面不平顺，影响行车舒适性和安全性；其次，线

形偏差会引起结构附加内力，可能导致结构开裂或承载力不足；最后，线形控制是桥梁美学的重要体现，良好的线形能够提升桥梁的视觉效果。对于大跨度连续梁桥而言，由于施工阶段多、变形累积效应显著，线形控制的难度和重要性尤为突出。

（四）影响线形控制精度的关键因素

影响线形控制精度的关键因素可分为四类：一是材料特性，如混凝土的弹性模量、收缩徐变性能等，这些参数的离散性直接影响结构变形计算精度；二是施工误差，包括模板安装误差、预应力张拉误差、测量误差等，这些误差在施工过程中会累积放大；三是环境因素，如温度变化、风荷载、日照辐射等，这些因素会引起结构附加变形；四是计算模型误差，包括结构简化假设、边界条件模拟、荷载取值等，这些误差会导致理论计算与实际行为存在偏差。其中，混凝土的收缩徐变是影响大跨度连续梁桥长期变形的最主要因素，其预测精度直接决定线形控制的效果。此外，施工过程中的临时荷载、支撑条件变化等也会对线形控制产生显著影响。这些因素相互作用，使得线形控制成为一个多变量、强耦合的复杂问题，需要通过系统化的监控和优化方法加以解决。

二、大跨度连续梁桥施工监控与线形控制技术方法

（一）施工监控的主要内容与流程

施工监控主要内容有结构变形、应力应变、温度、环境荷载及施工参数监测。结构变形监测针对主梁挠度、墩顶位移、支座沉降等关键几何参数，用全站仪等设备高精度测量。应力应变监测通过在主梁控制截面布设应变片等获取结构内部受力状态。温度监测在结构不同位置布置传感器记录温度场变化。环境荷载监测测量风速等参数评估对结构的影响。施工参数监测涉及混凝土浇筑方量等施工数据。监控流程分三阶段：施工前制定方案，明确监测点、频率和预警阈值；施工中按方案实时监测并分析数据；异常时启动预警，提调整建议并验证效果。该流程确保施工监控的系统性和可操作性^[2]。

（二）线形控制的测量技术与手段

线形控制的测量技术主要分为几何测量和物理测量两大类。几何测量包括传统测量技术和现代测量技术。传统测量技术以全站仪、水准仪为代表，通过建立高精度测量控制网，对桥梁关键节点进行三维坐标测量，其精度可达毫米级。现代测量技术则包括三维激光扫描、测量机器人、GNSS（全球导航卫星系统）等，具有自动化程度高、数据采集效率高的特点。例如，三维激光

扫描技术可快速获取桥梁表面点云数据，通过点云比对分析线形偏差；测量机器人可实现全天候自动跟踪测量，适用于长期监测。物理测量主要通过传感器获取结构响应信息，如倾角传感器测量梁体转角，位移传感器测量支座变形，光纤传感器监测结构应变分布。这些测量手段相互补充，形成多维度、多尺度的线形监测体系。在实际应用中，需根据桥梁结构特点、施工阶段精度要求以及环境条件选择合适的测量技术组合，并建立统一的坐标基准和时间基准，确保测量数据的一致性和可比性。

（三）施工过程中的数据采集与处理

施工过程中的数据采集需遵循实时性、准确性和完整性原则。数据采集系统通常由传感器子系统、数据传输子系统和数据存储子系统组成。传感器子系统负责采集各类物理信号，如应变、温度、位移等，其选型需考虑测量范围、精度、稳定性及环境适应性。数据传输子系统采用有线或无线方式将传感器信号传输至数据中心，常用技术包括RS485总线、光纤传输、4G/5G无线通信等。数据存储子系统采用分布式数据库结构，实现海量监测数据的分类存储和快速检索。数据处理包括数据预处理、特征提取和数据分析三个层次。数据预处理主要进行噪声滤波、异常值剔除、数据校准等操作，提高数据质量；特征提取通过时域分析、频域分析等方法提取反映结构状态的关键特征参数；数据分析则采用统计学方法、机器学习算法等建立监测数据与结构行为之间的映射关系。例如，通过回归分析建立温度-变形模型，或通过神经网络预测混凝土收缩徐变效应。数据处理结果以可视化图表形式呈现，便于工程人员直观理解结构状态变化趋势^[3]。

（四）线形偏差的识别与调整策略

线形偏差的识别基于实测数据与理论预测值的对比分析。首先建立考虑施工过程、材料特性、环境因素影响的精细化有限元模型，计算各施工阶段的理论变形值。然后将实测数据与理论值进行偏差分析，计算偏差量、偏差率及偏差分布特征。通过假设检验方法判断偏差是否超出允许范围，并分析偏差产生的原因，如材料参数取值偏差、施工误差累积、环境荷载影响等。偏差调整策略分为预防性调整和补偿性调整两类。预防性调整主要针对可预见的偏差因素，如根据混凝土实测弹性模量调整计算模型，或根据天气预报调整施工计划。补偿性调整则针对已发生的偏差，通过改变后续施工参数进行修正，常用方法包括调整预应力张拉力、改变节段浇筑

顺序、设置临时预拱度等。调整策略的制定需考虑结构安全性、施工可行性和经济性，通过多方案比选确定最优调整方案。调整实施后需进行效果验证，确保偏差得到有效控制。这一识别-调整-验证的闭环控制机制，是实现线形精度优化的核心保障。

三、大跨度连续梁桥线形控制精度优化措施

(一) 施工方案优化与控制参数调整

施工方案优化与控制参数调整是提升线形控制精度的核心措施。施工方案优化要综合考虑结构受力、施工可行性和经济性，经多方案比选确定最优方法，如悬臂浇筑施工要合理确定节段长度等以减小累积变形。控制参数调整针对影响结构变形的关键参数，如混凝土弹性模量等，其取值影响理论计算准确性，需根据试验与实测结果动态修正，如用实测弹性模量调整材料参数。此外，要优化临时支撑设置和拆除方案，避免结构附加变形。该措施需基于精细化有限元分析，通过参数敏感性分析识别关键因素并制定调整策略，从源头上减小理论与实际偏差，为线形控制提供依据^[4]。

(二) 环境因素影响的补偿机制

环境因素对大跨度连续梁桥线形控制影响显著，需建立补偿机制。温度变化是主要影响因素，季节温差可通过设置伸缩缝等补偿，日照温差需通过温度场监测和变形预测实时调整，如根据实测温度数据修正计算模型。风荷载在悬臂施工阶段影响振动和变形，需通过风速监测等确定安全条件，必要时采取减振措施。湿度变化影响混凝土收缩徐变，需通过环境湿度监测和材料试验数据修正模型。补偿机制基于长期环境监测数据，通过统计分析建立环境因素与结构变形的定量关系并制定补偿措施，如建立温度-变形修正系数，能有效减小线形偏差，提高控制精度。

(三) 监控数据的实时反馈与修正

监控数据的实时反馈与修正是实现线形动态控制的关键。要建立高效的数据传输和处理系统以实现实时反馈，借助无线传感器网络、4G/5G通信等技术实时采集和传输监测数据。数据处理系统需有自动分析功能，对数据滤波、去噪和剔除异常值。实时修正基于实测与理论预测值的偏差分析，用参数识别方法修正计算模型，如用卡尔曼滤波算法或遗传算法。修正后的模型用于预测后续施工变形趋势并指导参数调整。要建立闭环控制机制，涵盖数据采集、分析处理、模型修正、预测调整和效果验证流程，及时纠正偏差，确保精确控制。

(四) 精度控制标准与评价体系

精度控制标准与评价体系是衡量线形控制效果的科学依据。精度控制标准要根据桥梁设计、施工规范和工程经验制定，包括几何偏差、应力控制、变形速率等指标，如主梁线形偏差控制在跨径 1/5000 以内，支座沉降差不超 5mm。评价体系要建立多指标综合评价方法，从几何精度、结构安全、施工质量等方面评估，指标有实测与理论值吻合度、偏差分布均匀性等，采用层次分析法等定量手段结合专家经验判断。评价结果指导后续施工控制和工程验收。此外，要建立持续改进机制，完善控制标准和评价方法，为工程实践提供规范指导^[5]。

结语

实现高精度的线形控制，必须从被动应对转向主动优化，构建一个贯穿施工全过程的动态闭环管理系统。该系统的核心在于：通过精细化的有限元模型进行前瞻性预测，依托多源融合的实时监测技术获取结构真实状态，并建立基于数据反馈的快速识别与调整机制。本文提出的从施工方案源头优化、环境因素科学补偿、数据实时反馈修正到建立标准化评价体系的综合优化路径，形成了一套行之有效的方法。展望未来，随着BIM、物联网、人工智能等数字技术与桥梁工程的深度融合，施工监控将朝着更加智能化、自动化、可视化的方向发展，为实现桥梁建造全过程的“零偏差”控制提供更强大的技术支撑，对推动我国桥梁建设由“中国建造”迈向“中国智造”具有重要意义。

参考文献

- [1] 杨生宙, 罗阳, 吴培培. 高速铁路工程大跨度连续梁线形监控技术研究与应用 [J]. 青海水力发电, 2020, 000 (003) : P.25–29.
- [2] 李强, 王明刚. 大跨度连续梁线形监控信息化系统设计及应用 [J]. 铁道勘察, 2021, 47 (3) : 7.DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.202004290001.
- [3] 李广昊. 大跨度曲线连续梁桥结构分析及施工监控研究 [D]. 山东交通学院, 2021.
- [4] 冯骏骁. 大跨度PC连续梁桥施工监控关键技术研究 [D]. 河南大学, 2022.
- [5] 唐国栋, 许天能. 高速铁路多跨连续梁桥线形控制技术研究 [J]. 工程技术与管理, 2020.DOI: 10.26549/gcjsgl.v4i4.3986.