

道路桥梁悬臂浇筑线形控制技术应用

张东升

宣汉县公路（水运）质量监督站，四川 达州 636150

DOI:10.61369/ADA.2026010067

摘 要： 大跨度预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工中线形偏差控制的技术难点是出发点，本文系统分析了线形控制技术的适用性基础与实行要点，深度分析了挂篮变形、混凝土收缩徐变、温度效应及预应力张拉等关键因素，给出了依据实时监测以及动态修正的线形控制技术方案。研究融合工程实践需求，建立了施工监测体系与数据反馈机制，形成了从理论分析到技术实现的完整应用途径，给同类桥梁工程线形精度控制给予了可操作的参照依据。

关 键 词： 悬臂浇筑；线形控制；施工监测；精度管理

Application of Linear Control Technology in Cantilever Casting of Road and Bridge

Zhang Dongsheng

Xuanhan County Highway (Waterway) Quality Supervision Station, Dazhou, Sichuan 636150

Abstract： This paper looks at the trouble of keeping line alignment right when building long span prestressed concrete continuous girder bridges with cantilever casting. It explains why line control methods work and how to put them into practice. By looking closely at main factors like formwork carriage deformation concrete shrinkage and creep temperature effects and prestress tensioning a linear control technical scheme using real time monitoring and dynamic adjustment is put forward. Tied to what engineers actually need on site, this study sets up a construction monitoring system and a way to feed data back, building a full path that goes from theory straight to real world use, giving other bridge projects something practical to follow when they try to control linear precision.

Keywords： cantilever casting; linear control; construction monitoring; precision management

引言

大跨度预应力混凝土桥梁施工工艺的分析表明，悬臂浇筑施工期间的线形控制精度直接决定成桥后的结构内力分布以及行车平顺性，桥梁跨径一直增大，施工阶段的不确定因素对线形的作用愈发明显，传统依托经验修正的施工形式已比较难满足现代桥梁工程对精度控制的严苛要求。线形控制技术凭借建立监测体系以及计算模型的联动机制，完成施工偏差的提前预判以及实时修正，变成保障桥梁施工质量的核心手段，本文围绕悬臂浇筑线形控制技术的适用性分析、关键技术要素及实施方案展开论述，意在形成系统化的技术应用框架。

一、悬臂浇筑线形控制技术的适用性分析

（一）大跨度桥梁施工精度控制的必要性分析

现代公路桥梁建设发展的领域，连续刚构桥与连续梁桥的跨径已大量地突破100m，部分工程的主跨到了200m以上，在此类大跨度结构的内部，悬臂浇筑施工一般分为20至40个节段，每个节段的施工偏差都会累积且传递至后续节段，最终干扰合龙的精度以及桥面的线形。成桥后的线形偏差不仅使得桥面铺装的厚度不均，增多材料的用量，更会在结构的内部产生附加的内力，改变设计的受力状态，在长期的运营阶段可能引发裂缝扩展等病

害，故此，建立系统化的线形控制技术体系，把施工偏差控制在允许的范围，是保证桥梁结构的安全性以及耐久性的基础前提^[1]。

（二）悬臂浇筑工艺对线形影响的敏感性研究

悬臂浇筑施工利用挂篮承担重量并给予作业平台，混凝土浇筑、预应力张拉及挂篮前移等工序中，结构体系持续地转换，混凝土浇筑后，挂篮前端出现竖向的弹性变形，变形量同浇筑混凝土重量及挂篮刚度有关，一般在15mm至35mm范围内。若未准确地计算此变形且设置预拱度，已浇筑梁段会偏离设计标高，另外，混凝土由浇筑至预应力张拉完成期间，材料自身发生收缩以

及徐变变形，让梁段标高不停地改变，研究表明，单个节段在28d内的收缩徐变变形可达8mm至12mm，累积效应不可忽视。温度变化引起的梁体热胀冷缩同样作用明显，昼夜温差使得悬臂端竖向位移可达10mm至20mm，上述因素互相叠加，让悬臂浇筑施工在线形控制上具备高度的敏感性，必须借助技术手段开展系统的管理^[2]。

二、悬臂浇筑线形控制的关键技术

（一）挂篮结构变形监测与修正技术

悬臂浇筑施工的承重体系中，挂篮是重点设备，变形特性直接决定梁体线形，挂篮变形由主桁架弹性变形、底篮横梁挠度和吊杆伸长三部分组成，主桁架弹性变形与荷载大小呈线性关系，可借助荷载试验绘制变形曲线，底篮横梁挠度受模板重量以及混凝土分布制约，浇筑前后需开展差异监测^[3]。吊杆伸长以及材料弹性模量及受力状态有关，监测技术使用精密水准仪以及全站仪组合，挂篮前中后设置观测点，设立变形监测断面，如图1所示，挂篮变形监测布置示意图中，主桁架前端、底篮前后横梁及已浇筑梁段顶面布置监测点，依托几何关系计算挂篮总变形量。挂篮变形修正需在立模标高中预置反变形量，依据监测数据将模板前端抬高相应数值，保证混凝土浇筑后梁底标高符合设计要求。

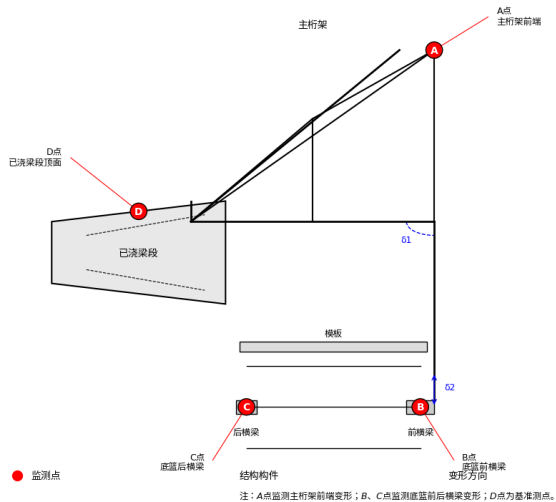


图1 挂篮变形监测布置示意图

（二）混凝土收缩徐变参数实时采集方法

材料特性以及环境耦合效应决定混凝土收缩徐变属于典型的时间相关变形，发展规律取决于材料配比、环境温湿度及养护条件，实时采集方法要求混凝土浇筑时埋设应变传感器，推荐使用振弦式应变计，埋设位置选择距表面5cm至10cm处，避免局部应力集中造成干扰。传感器沿梁体纵向每节段布置2个至3个测点，沿截面高度在顶板、腹板及底板分别布设，形成立体监测网络，数据采集频率在浇筑后7d内每12h采集1次，7d至28d每24h采集1次，之后每7d采集1次，持续至合龙后3个月。凭借应变数据反演混凝土的收缩应变与徐变系数，修正理论计算模型中的材料参数，当实测徐变系数与设计使用值偏差超过15%时，需重新计算后续节段预拱度，保证长期线形预测准确性。

（三）预应力张拉线性反馈调控机制

依据施工控制场地分析，预应力张拉是悬臂施工体系转换的重点环节，张拉后梁体出现反拱，标高发生突变，实际操作时，反馈调控机制建立在线形实时监测的前提下，张拉前后使用精密水准仪测量控制点标高的变化，计算实际反拱值。理论反拱值由预应力筋的张拉力、管道摩阻损失及梁体刚度共同决定，实际反拱值以及理论值的偏差折射预应力效应的实现程度，当偏差超过5mm时，需分析管道摩阻、锚具回缩等参数，修正后续节段的张拉伸长量计算，张拉完成后开展24h线形跟踪观测，捕捉混凝土弹性压缩后的徐变恢复过程，把此数据作为下一节段立模标高的计算依据，形成施工数据向设计参数的反馈闭环。

（四）温度效应分离与滤波的算法实现

线形监测数据的干扰因素分析中，温度效应是首要干扰源，需用算法分离温度变形以及荷载变形，算法依托温度场监测数据与结构热传导模型，算出各监测点因温度变化产生的理论位移，从实测总位移中减去温度分量，得出纯荷载作用下的结构变形^[4]。滤波处理用滑动平均法，选取连续的5d至7d的监测数据序列，排除异常天气干扰，提取结构变形的趋势项，针对昼夜温差引起的周期性波动，凭借设定固定测量时段规避，统一安排在日出前2h至3h实行标高测量，此刻梁体温度场最均匀，接近平均温度状态。温度效应分离算法的精度直接决定线形评估的可靠性，需建立项目所在地的温度修正系数库，依据季节变化动态地调整计算参数。

三、悬臂浇筑线形控制技术实施方案

（一）施工阶段划分与监测点布设方案

在线形控制实施方案中，首先需清晰施工阶段划分，一般把每个悬臂浇筑节段当作1个控制单元，包含挂篮就位、模板调整、混凝土浇筑、预应力张拉及挂篮前移5个工序，监测点布设遵循核心断面原则，在0号块设置基准点，每个悬臂节段在距前端0.5m处设置1个监测断面，每断面在箱梁顶板左右两侧各布设1个标高测点，形成空间监测网络。跨度超过150m的桥梁，需在跨中增设1个至2个监测断面，加密控制节点，监测设备选用精度为0.1mm的电子水准仪以及测角精度为1秒的全站仪，建立独立施工控制网，同路线控制网实行联测复核，如表1所列，悬臂浇筑各阶段线形控制允许偏差清晰了各工序的精度控制目标，其中立模标高允许偏差为±5mm，合龙前悬臂端标高相对偏差控制在±15mm以内，给施工控制给予量化标准。

表1 悬臂浇筑各阶段线形控制允许偏差的详细数值

施工阶段	控制项目	允许偏差 /mm	检测频率
挂篮就位	底模标高	±5	每节段1次
立模调整	模板平面位置	±3	每节段1次
混凝土浇筑后	梁体标高	±10	每节段1次
预应力张拉后	反拱值	±5	每节段1次
合龙前	悬臂端相对高差	±15	每日1次
成桥后	桥面标高	±20	全桥测量

（二）线形偏差的实时计算与预警阈值设定

实时计算依托结构分析软件建立有限元模型，输入实际施工参数包含混凝土容重、弹性模量、预应力张拉力及挂篮重量，实行正装计算得到各阶段的理论线形，现场测量数据凭借无线传输系统实时导入计算平台，以及理论值实行差值分析。预警机制设置三级阈值，当实测标高以及理论标高的差值在5mm以内为正常状态，差值到了5mm至10mm时发出黄色预警，提示关注后续施工参数，差值超过10mm时发出红色预警，暂停施工实行偏差原因排查，预警阈值的设定需考虑测量误差以及结构响应的融合作用，避免误报使得施工频繁中断，同时保证重大偏差可以及时发现。计算平台每日生成线形控制日报，包含当日测量数据、偏差分析及下阶段的立模标高方案，变成施工指令的技术依据^[5]。

（三）基于实测数据的立模标高动态调整

在线形控制环节，立模标高作为重点调控手段，设置值由设计标高、预拱度、挂篮变形量及温度修正值叠加确定，预拱度计算考虑混凝土收缩徐变、预应力反拱及二期恒载产生的下挠，按1000d长期效应实行预估，动态调整机制显现在每个节段施工后，依据实测线形与理论线形的偏差，修正后续节段的预拱度设置。如表2所示，温度监测以及线形修正数据记录显示了环境温度与梁体温度的对应关系，还有由此产生的线形修正量，当连续3个节段出现同向偏差时，说明计算模型有系统误差，需重新实行参数识别，调整混凝土弹性模量或者徐变系数等核心变量。立模标高调整量单次不超过10mm，避免调整幅度过大使得线形突变，依托渐进式修正实现最终收敛。

表2 温度监测与线性修正数据记录

测量日期	环境温度 /℃	梁体顶板温度 /℃	梁体底板温度 /℃	温差 /℃	线形修正量 / mm
第10节段	18	22	19	3	+2
第11节段	20	24	20	4	+3
第12节段	22	26	21	5	+4
第13节段	19	23	19	4	+3
第14节段	21	25	20	5	+4
第15节段	23	27	22	5	+4

（四）合龙段线形误差的修正与收敛控制

合龙是悬臂浇筑施工的最终环节，两悬臂端标高相对偏差需控制在15mm以内，轴线偏差控制在10mm以内，合龙前需实行不少于7d的连续线形观测，掌握温度变化与线形的对应规律，选择温度稳定的时段实行合龙，当相对偏差超过允许值时，可依托调整合龙段配重或者预压水箱实行线形微调，每调整1t配重可产生约2mm的标高变化。合龙段混凝土浇筑应安排在当日最低温度时段实行，减小温度应力对合龙精度的干扰，合龙后需持续实行线形跟踪，监测体系转换过程中的内力重分布，保证成桥线形平稳地过渡至设计状态，收敛控制的目标是使成桥线形偏差控制在20mm以内，满足规范要求，同样保证桥面纵断线形平顺，无突变点。

四、结语

悬臂浇筑线形控制技术凭借建立系统化的监测体系以及动态调整机制，有效解决了大跨度桥梁施工的精度控制难题，本文围绕适用性分析、关键技术及实施方案，说明了线形控制技术的应用要点，突出了挂篮变形监测、混凝土收缩徐变采集、预应力反馈调控及温度效应分离等关键环节的技术要求。依靠实行阶段划分、实时计算预警、立模标高动态调整及合龙误差修正等措施，形成了完整的技术应用途径，工程实践证明，该技术的系统应用可以将施工线形偏差控制在允许范围内，保证成桥质量满足设计以及规范要求，给同类桥梁施工给予了参照。

参考文献

[1]董青华. 现浇箱梁挂篮悬臂施工技术在市政桥梁工程中的应用[J]. 交通世界, 2025, (16): 153-155.DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.16.035.
[2]何理. 高速公路桥梁悬臂挂篮浇筑施工技术应用探讨[J]. 低碳世界, 2025, 15(04): 133-135.DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2025.04.046.
[3]张伟. 道路桥梁加宽加固设计及施工工艺[J]. 运输经理世界, 2025, (10): 81-83.
[4]储建辉. 道路桥梁施工中的大跨径连续施工技术应用方法[J]. 运输经理世界, 2025, (10): 87-89.
[5]李朋. 悬臂桥梁施工工艺在桥梁施工中的应用[J]. 交通建设与管理, 2024, (06): 85-87.