

跨线桥梁高支模监测施工技术应用与研究

文 / 李小雄 广东省建筑工程机械施工有限公司

摘要：本文以某跨线桥梁工程项目为背景，系统介绍本工程高支模支撑体系的布置方法及要点，并对高支模支撑系统的监测倾斜角、水平位移、沉降、轴力数据进行分析，最后利用三次样条插值法对监测数据进行插值。结果表明：本项目监测数据整体稳定，并保持至安全预警值范围之内，能有效保证工程的施工质量和安全。此外，本文采用的三次样条插值法对缺失数据进行插值，其效果良好，轴力值误差仅为 0.912%，有效保证后期数据维护的精度和可靠性。
关键词：跨线桥梁；高支模监测；监测点布置；三次样条插值

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.070

引言

在公路与城市轨道交通密集交织的建设格局下，跨线桥梁施工显现出“高墩、长跨、重载”等复杂特征，高支模支撑系统作为施工临时承载的核心，其安全直接关系到施工阶段的结构整体稳定^[1]。受限于跨越对象的通行条件，高支模常在狭小作业面、强振动背景与不均质地基的环境中搭设，易出现立杆沉降、节点松动、水平位移累积与临界失稳等风险^[2]，因此，构建面向跨线桥场景的高支模监测施工技术体系，是保证跨线桥梁施工安全的重要抓手。本文依托实际工程，系统阐述高支模监测布置及方法，通过监测位移、沉降、轴力、倾斜角的数据分析，论证高支模体系的安全性，并提出适用于高支模监测数据缺失值的插值法，为监测数据后期维护提供思路。

一、高支模支撑体系的变形原因和监测的重要性

高支模支撑体系的变形即来源于外部施工荷载，也来源于自身构造、材料及地基基础条件等多个方面引起^[3]。在荷载作用下，支撑立杆、横杆与剪刀撑体系在竖向产生弹性变形与节点滑移，同时在混凝土不均衡浇筑或局部堆料时出现侧移与扭转，使得支架产生变形；从构造与材料看，立杆长细比偏大、扣件（或承插）节点刚度不足、水平与纵横向剪刀撑不到位、模板及次龙骨刚度不匹配、立杆顶部顶托伸出过长等问题，使得体系整体有过大变形，对于基础与地基条件，跨线场地常受既有道路、管线或铁路路基约束，存在填挖不均、承

载力差异与地下水波动等情况，易形成立杆附加偏压与节点二次变形，此外，昼夜环境的温度影响导致杆件变形也是主要的原因之一。

高支模监测技术在桥梁建造施工上具有风险管控的重要作用^[4]，通过对位移、沉降与倾角的实时跟踪分析，在接近限值之前捕捉速率异常与斜率拐点，及时采取降载、加撑或调整浇筑节奏，避免立杆屈曲、节点滑脱与整体侧移。通过反向校核预拱度、分段高度与振捣参数，从源头减少蜂窝麻面与线形偏差的返工。以少量高敏感度测点外加预警边界值作为主要判断失效方式，可用更低投入换取返工减少、材料周转提效、占道时间缩短与事故风险下降，通常可在同一项目周期内获得回收投入。

二、工程概况

本工程跨线桥位于通行大道交叉口，跨径组合为：(2x25)+(35+55+35)+(3x25)+(2x25)，桥梁全长 303.98m，共计四联，其中第二联为一联钢箱梁，其余三联为预应力混凝土连续箱梁，其设计参数可见表 1。本跨线桥高支模施工总荷载为 15kN/m² 及搭设跨度超过 18m 以上，现行《高大模板支撑系统实时安全监测技术规范》DBJ/T 15-197-2020 中要求对现场搭设高度超过 8m，或搭设跨度超过 18m，或施工总荷载大于 15kN/m²，或集中线荷载大于 20kN/m 的模板支撑系统进行实时安全监测。本工程属于施工总荷载大于 15kN/m² 及搭设跨度超过 18m 以上，故需要实施监测工作。

表 1 现浇混凝土箱梁跨径组合

联号	墩号	跨径布置	联长	桥面宽度	结构形式
		m	m	m	
1	0-2	2-25	50	25.5	等截面 PC 箱梁
2	2-5	35+55+35	125	25.5	等截面钢箱梁
3	5-8	3-25	75	25.5	等截面 PC 箱梁
4	8-10	2-25	50	25.5	等截面 PC 箱梁

三、监测项目及方法

(一) 监测布设原则

高支模监测点布设在高支模关键部位及薄弱部位，能准确反应支撑结构体系的状态、变化特征和趋势，因此布设监测点应遵循以下原则^[5]：

1. 布设在跨度较大的主梁跨中；

2. 布设在悬挑构件端部；

3. 布设在其它重要构件承受荷载最大的部位；

4. 超限梁选取监测比例具备超危大特征之一的选取比例不少于 1/3，具备超危大特征之二的选取比例不少于 2/3，三者均具备的选取 100%。

依据高支模专项施工方案和梁板结构图，确定该高

支模监测项目及监测点布设数量，如图1所示为第一联0-2轴监测点平面布置图。

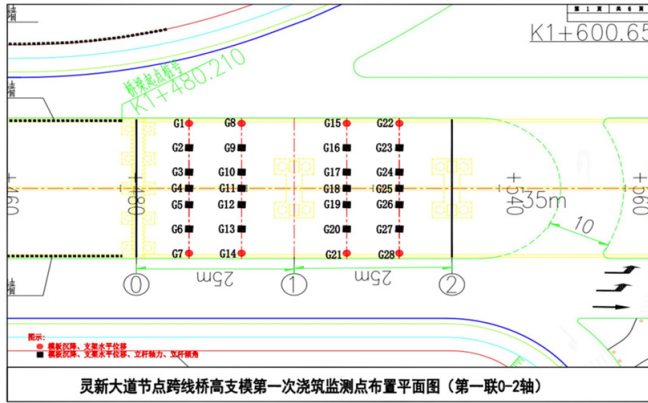


图1 第一联0-2轴监测点布设示意图

1. 水平位移的监测

水平位移监测点在高大支模的不同高度设置监测点，监测点竖向间距根据步距高度布设，布置间隔不大于9米；监测水平面上两个相互垂直方向的位移变化。水平位移采用传感器观测，水平位移监测点监测精度要求为±1.0mm，在立杆不同高度上布设传感器为监测点。

2. 立杆倾斜的监测

倾斜仪安装前，先根据设计要求确定仪器的安装位置和测量倾斜角的方向，打磨被测物的安装部位，使其表面尽量平整。检查倾斜仪完好后，将倾斜仪的安装支架固定在被测物的打磨部位，然后把倾斜传感器固定在安装支架上，随后调整安装支架的定位螺钉，使倾斜仪的轴线尽量垂直，之后倾斜仪连接读数仪将初始测值调整接近零点。也可根据设计需要自定义仪器的初始倾斜角度，使仪器的正负变化范围适应实际的测量需要。在倾斜仪的外圆上标有仪器的正负方向记号，安装时以此记号对应测量规定的正负方向。安装时也可松开传感器底面的4个螺钉，使仪器的正负方向记号做90°和180°调整以适应安装要求。如安装在施工复杂部位及高大被测物的顶端部位，应设置测点保护设施和防雷保护措施。

3. 立杆轴力的监测

立杆轴力监测点布置在立杆可调托撑与主楞之间，轴力计与立杆、面板或楞梁间应保持紧密接触，接触面应平整以保证接触均匀。立杆轴力监测点布置采用安装轴压传感器安装在顶托与模板底梁之间，再上紧顶托，立杆顶托与模板底梁需平整，可与传感器上下两边紧贴，使轴压传感器与立杆、模板受力在同上垂线上，共同受力。轴压传感器安装完成后，用传输给与无线采集终端联接，记录终端编号，在主机中检查该编号是否有压力，一般有初始压力值，如无压力，需检查立杆顶托与模板梁底是否紧贴。

4. 模板沉降的监测

模板沉降监测点的布设位置应与水平位移、倾斜监测点的平面位置相对应。模板沉降监测点在模板底木方

梁下的横杆安装位移传感器，安装时使传感器线头垂直向下，拉出约100mm，用钢丝线与下部固定螺丝相联，注意控制钢丝拉力不宜过大，不能与支撑体系相接。位移传感器安装完成后，用传输给与无线采集终端联接，记录终端编号，在主机中检查该编号是否有位移读数，一般有初始读数，如无读数，可拉动线头端或复位再拉出，至有读数。

(二) 监测方法

本监测的轴力传感器在安装调试完成后，只需在主机设置工程相关信息，主机自己根据设置的报警值、监测频率进行数据采集、报警。倾角传感器、竖向位移传感器、轴压传感器安装完成后，形成一个监测区域，通过无线采集终端与主机远程联接。在主机中设置相关工程参数，完成后主机自动根据设置的监测频率、报警值等进行监测与报警。高支模监测设有主机、无线压力传感器、无线倾角传感器、无线位移传感器等设备。在浇筑过程中，三类无线传感器将监测数据无线传输到主机上，监测人员能实时观测当前变形情况。浇筑前，监测人员将主机放置在视野开阔无远程信号干扰的地方与各传感器进行无线连接并对传感器初始化后，进行高大支模浇筑过程的安全监测。当超过设定的报警值时，后台立即通知各方人员，采取相应的应急措施。

四、监测报警值

根据施工高支模专项施工方案、相关规范和类似工程经验，确定各监测项目的预警值和报警值，详见表2所示。

表2 各监测项目的预警值和报警值

监测项	黄色预警值	红色预警值
支架水平位移	12mm	15mm
模板沉降	8mm	10mm
立杆倾斜	0.6%	0.8%
立杆轴力	37kN	46kN

五、监测结果分析

限于篇幅，本文选取第一联0-2轴的监测点G2、G3、G4、G5作为典型测点进行分析，并绘制出各测点的倾斜角度、沉降位移、轴力以及水平位移曲线图，如图2所示。由图中可以看出，整体曲线上呈现“平缓—上升（下降）—平缓”状态，其中曲线的上升（下降）波动幅度较大，原因是该时刻正处于混凝土开始浇筑，角度、立杆轴力及水平位移增大、沉降位移下降；从各曲线及测点位置对比可以看出，G4、G5先于G2、G3出现波动，这是因为G4、G5点处于梁跨中，混凝土浇筑方向由跨中至端部；同时，G4、G5点波动上升或下降过程呈阶梯形式，因为跨中位置进行混凝土分层浇筑。此外，跨中位置测点的各监测项目数值较端部的大，但均未超过表给出的红色预警值，故支撑体系处于安全状态。

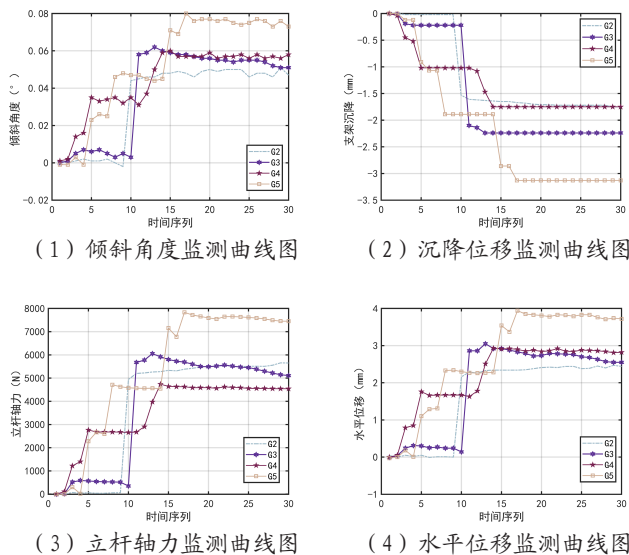


图2 各监测项目曲线图

六、异常值及缺失值处理

面对复杂的施工现场情况,由于硬件设备、数据传输、人为等原因,中途监测数据出现缺失是工程常见的风险点,在前期监测恢复正常的前提下,采用科学合理的方法修复和补充缺失值是保证数据连贯性的重点。对此,本文通过探讨各类插值方法,选用合适插值法对本工程监测数据进行插值处理,为类似工程提供参考。

常见插值方法有平均法插值,加权法平均法插值,拉格朗日插值以及三次样条插值等方法^[6]。然而平均法插值存在淡化负荷曲线特征的问题,加权平均法难以确定权值,拉格朗日插值方法,容易产生龙格现象,需要重新建立新的多项式,使计算变得烦琐;而三次样条插值函数不但收敛于函数本身及其微商,也收敛于函数的微商,这一特性比多项式插值更好。故本文将采用三次样条插值方法插值缺失值,简要的公式和原理如下^[7]:

假设有 $n+1$ 个数据节点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$;

a. 计算步长 $h_i = x_{i+1} - x_i (i = 0, 1, \dots, n-1)$;

b. 将数据节点和指定的首位端点条件代入矩阵方程;

c. 解矩阵方程,求得二次微分值 m_i 。该矩阵为三对角矩阵;

d. 计算样条曲线的系数:

$$a_i = y_i \quad (1)$$

$$b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{h_i}{2} m_i - \frac{h_i}{6} (m_{i+1} - m_i) \quad (2)$$

$$c_i = \frac{m_i}{2} \quad (3)$$

$$d_i = \frac{m_{i+1} - m_i}{6h_i} \quad (4)$$

其中 $i=0, 1, \dots, n-1$;

e. 在每个子区间中 $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ 中, 创建方程 $g_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$ 。

基于上述理论, 利用 matlab 软件编制三次样条插值函数, 选取 G2 监测点 30 组时间序列进行随机插值, 并将插值结果与真实值作比较, 如表 3 中所示。通过表中对比可以发现, 轴力及倾斜角度数据插值误差较小, 效果良好; 水平位移插值误差为 11.15%, 效果中等, 而沉降插值误差较大, 经分析原因是该缺失值处于混凝土开始浇筑阶段, 数据变幅大导致, 因此本研究还值得进一步利用机器学习算法探讨, 以提高数据的准确度。

表3 插值结果比较

监测参数	轴力 (N)	水平位移 (mm)	沉降 (mm)	倾斜角度 (°)
插值	5284.82	2.71	-1.94	0.049
真实值	5333.47	3.05	-1.61	0.046
误差	0.912%	11.15%	20.5%	6.52%

结语

本文结合实际工程项目对高支模系统监测技术进行分析, 得出以下结论:

1) 本工程的监测测点布置方法和原则, 能够有效进行支撑体系的轴力、水平位移、沉降及倾斜角度实行监测, 从而反映各参数的动态变化情况。

2) 经监测曲线分析, 各监测项目均较好反映现场实际施工状况, 如跨中部曲线波动较端部大等, 同时各监测结果均保持在规定的红色预警值之内, 支撑体系安全可靠。

3) 数据缺失是工程监测常见的风险隐患, 如未采取合理处理方式, 将影响后期数据的分析和利用, 本研究通过三次样条插值法可较好对缺失值进行还原, 为类似工程的高支模监测异常值及缺失值的插值提供借鉴。

参考文献

[1] 张云显. 高支模混凝土大梁模板支撑体系施工研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, (04): 19-21.
 [2] 段庚鑫. 基于施工全过程的高支模监测系统设计及安全预警研究 [D]. 吉林大学, 2023.
 [3] 乐培雨. 高支模工程实时监测施工技术研究 [J]. 福建建筑, 2025, (06): 61-66.
 [4] 樊冬冬, 连腾欢, 颜斌, 等. 高支模架体变形监测施工技术 [J]. 施工技术, 2017, 46 (S1): 418-420.
 [5] 赛菡, 周冀伟, 罗运平, 等. 基于 BIM 技术的建筑工程高支模监测应用与研究 [J]. 施工技术, 2021, 50 (02): 66-69+73.
 [6] 刘荣昌, 薛隆泉, 刘宏昭, 等. 一种多项式插值的新方法——加权平均法 [J]. 西安理工大学学报, 2002, (04): 372-375.
 [7] 陶婷. 三次样条插值函数稳定性分析及其应用 [D]. 成都理工大学, 2021.