

高铁大跨度钢桁梁 CPIII测量分温度场成果解算技术与工程应用

——以渝黔铁路新白沙沱长江特大桥为例

魏存礼

中铁十六局集团有限公司 北京 100000

【摘要】：渝黔铁路新白沙沱长江特大桥作为世界首座六线铁路双层钢桁梁斜拉桥，主跨达 432m，具有结构跨度大、活载重量大、温度形变显著等特点，施工精度要求远超常规铁路桥梁。CPIII控制网是高速铁路线路精调的核心基准，传统单一温度成果测量模式未考虑钢桁梁热胀冷缩特性，无法匹配梁体动态线形偏移，易引发 TQI 值超限等隐患。本文结合该桥工程实践，提出分温度场 CPIII测量技术，划分三个温度区间，采用自由设站边角交会法观测、三维严密平差处理，输出对应温度场坐标成果，实现测量基准与梁体温度状态精准匹配。工程实践表明，该技术测量精度优异，平面点位中误差 $\leq\pm 0.9\text{mm}$ ，高程中误差 $\leq\pm 0.5\text{mm}$ ，满足六线铁路轨道施工要求，可为同类型桥梁 CPIII测量提供示范与参考。

【关键词】：高速铁路；大跨度钢桁梁；CPIII 测量；形变；分温度场解算；新白沙沱长江特大桥

DOI:10.12417/3083-5526.25.07.023

1 引言

随着我国高速铁路向复杂地形延伸，大跨度钢桁梁因跨越能力强、结构刚度大等优势，广泛应用于跨江跨谷关键区段。钢桁梁采用高强度钢材，线膨胀系数远大于混凝土，对温度变化极为敏感，日照、温差作用下会产生明显纵向伸缩与竖向挠曲变形，直接影响 CPIII控制网精度。

CPIII控制网是轨道施工的最终基准，其精度直接决定轨道质量与行车安全。传统单一温度成果模式仅能反映固定温度下梁体状态，无法匹配施工中梁体实时温度变化，导致基准与现状脱节，引发轨道精调超限、后期维护成本增加等问题。

渝黔铁路新白沙沱长江特大桥主跨 432m，为世界首座六线双层钢桁梁斜拉桥，地处重庆气候湿润区域，昼夜与季节温差显著，钢桁梁根据温度变化产生形变问题突出，给 CPIII测量带来极大挑战。本文以该桥为实例，研究分温度场 CPIII测量技术，解决温度形变带来的基准偏差难题，为轨道施工提供精准成果，同时为同类型桥梁提供技术支撑。

2 工程概况

渝黔铁路新白沙沱长江特大桥位于重庆长江白沙沱河段，是渝黔铁路控制性工程，桥梁全长 918m，主跨 432m，为双层六线钢桁梁斜拉桥，上层四线客运专线（设计时速 200km/h），下层双线货运铁路（设计时速 120km/h），是目前世界上跨度最大、活载最重的六线铁路钢桁梁斜拉桥。

该桥钢桁梁采用 Q370qE 高强度钢材，线膨胀系数 $\alpha=1.2\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，重庆地区冬夏最大温差可达 25 $^{\circ}\text{C}$ ，主跨钢桁梁纵向伸缩量超 10mm，跨中竖向挠曲变形 6~12mm，日照条件下温度梯度进一步加剧变形。上层客运专线对轨道平顺性要求极高，施工精度需满足平面点位中误差 $\leq\pm 1.0\text{mm}$ 、高程中误差 $\leq\pm 0.5\text{mm}$ ，传统 CPIII测量模式无法消除温度形变带来的系统误

差，需针对性研究适配技术。其中 Q370qE 钢材的线膨胀系数参考《桥梁用结构钢》相关标准。

3 钢桁梁温度形变对 CPIII 控制网的影响

大跨度钢桁梁温度形变受环境温度、日照、钢材特性等因素影响，主要分为纵向伸缩与竖向挠曲两类，均对 CPIII控制网精度产生显著影响。

3.1 大跨度钢桁梁受温度变化形变的主要形式

3.1.1 纵向伸缩形变

纵向伸缩的原因是由钢材热胀冷缩引起，变形量计算公式为 $\Delta L=\alpha\times L\times\Delta T$ （ ΔL 为伸缩量， L 为梁长， α 为线膨胀系数， ΔT 为温差），该公式为钢材热胀冷缩变形计算通用公式，广泛应用于桥梁结构温度形变分析。该桥主跨 432m 钢桁梁，温差 20 $^{\circ}\text{C}$ 时伸缩量约 10.4mm，导致 CPIII点位产生纵向位移，影响轨道纵向平顺性 TQI 指数，加剧列车颠簸，从而影响乘客乘车安全和体验。

3.1.2 竖向挠曲变形

在日照作用下，钢桁梁上下弦杆温差可达 8~30 $^{\circ}\text{C}$ ，上弦膨胀量大于下弦，导致梁体向下挠曲；夜间降温时则向上挠曲，跨中挠曲变形 6~16mm，直接改变 CPIII点位高程及相对高差，引发轨道高低超限。这一变形规律与大跨度钢桁梁日照温差效应的相关研究结论一致。

3.2 温度形变对 CPIII控制网的具体影响

温度形变从平面、高程维度对 CPIII控制网产生系统影响：一是平面相对距离随温度动态变化，偏差易超出规范范围；二是高程及相对高差不稳定，影响轨道平顺性；三是单一成果无法适配全时段施工，导致基准与梁体现状脱节；四是引发轨道精调系统偏差，增加返工成本与工期延误风险。综上，必须采用分温度场成果解算技术确保基准准确。相关规范也明确要

求，大跨度钢桁梁 CPIII 测量需考虑温度形变的影响，避免单一温度基准导致的测量偏差。

4 分温度场 CPIII 测量技术方案

针对该桥钢桁梁温度形变特点与重庆气候条件，提出“分温度观测、分温度平差、分成果输出”的 CPIII 测量技术方案，核心包括温度区间划分与总体实施流程两部分。该技术思路参考了大跨度桥梁 CPIII 测量的温度适配优化理念。

4.1 温度区间划分

结合重庆气象数据、钢桁梁变形规律及施工时段，划分三个温度工况：（1）低温场（A 类）： $0^{\circ}\text{C} < T \leq 10^{\circ}\text{C}$ ，对应冬季清晨夜间，梁体收缩、变形平缓；（2）中温场（B 类）： $10^{\circ}\text{C} < T \leq 20^{\circ}\text{C}$ ，对应春秋季节夜间清晨，梁体变形最稳定，作为基准成果；（3）高温场（C 类）： $20^{\circ}\text{C} < T \leq 30^{\circ}\text{C}$ ，对应夏季夜间，梁体膨胀、温度梯度小。划分重点兼顾气候适应性、变形稳定性与施工实用性，温度区间划分参考了重庆地区桥梁施工温度控制相关研究，同时结合钢桁梁变形稳定区间的试验结论。

4.2 总体实施流程

实施流程共 8 步：1. 点位布设，选择固定支座、主塔等变形小部位布设点位；2. 强制对中安装，确保点位稳定；3. 温度监测，同步采集梁体各部位温度；4. 分温度场观测，确保同一温度场连续观测；5. 数据分组，按温度区间严格分组；6. 独立平差，以 CPI、CPII 为基准进行三维严密平差；7. 分成果输出，标注关键信息；8. 施工匹配，按实时梁温选用对应成果。该流程结合了《高速铁路工程测量规范》的相关要求，同时优化了分温度场观测与成果匹配的关键环节。

5 CPIII 布网与安装

严格按照《高速铁路工程测量规范》，结合桥体结构特点，制定科学布网与安装方案，保障测量精度。国家铁路局发布的相关工程测量规范也明确了高速铁路控制网布设的基本原则，为 CPIII 布网提供了标准支撑。

5.1 点位布设

布设遵循“稳定、便捷、精准”原则：（1）点位布设于固定支座、主塔等变形小部位，避开遮挡物；（2）纵向间距 $\leq 60\text{m}$ ，跨中区域加密至 40m/对；（3）双层桥面独立建网，上下层各设一套 CPIII；（4）左右线对称布设，本次共布设上层 CPIII 点位 64 个、下层 32 个，跨中加密 6 个。点位布设参数参考了大跨度钢桁梁 CPIII 布网的工程实践经验，同时符合规范中关于 CPIII 点位间距与布设位置的要求。

5.2 强制对中安装

采用高精度不锈钢强制对中基座（安装精度 $\leq 0.4\text{mm}$ ），以“焊接螺栓+植筋胶”双重固定，确保抗振动、抗风荷载。安装后设置保护盖与警示标识，定期检查维护，保障点位的稳定

和清洁。强制对中基座安装的技术要求参考了 CPIII 测量点位安装的相关规范，其固定方式经过高铁和地铁工程验证，可有效保障点位的稳定性。

6 CPIII 分温度场外业观测

CPIII 测量外业观测重点是把控设备、温度、湿度、气压改正、加乘常数改正等，确保数据准确可靠。外业观测的总体要求遵循《高速铁路工程测量规范》，同时结合分温度场测量的特殊性进行优化。

6.1 观测设备

本工程选用经检定合格的高精度设备：（1）徕卡 TS60 全站仪（测角精度 0.5"，测距 0.6mm+1ppm）；（2） $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 精度轨温计，同步采集梁体与环境温度；（3）天宝 DINI03 水准仪（高程精度 $\pm 0.3\text{mm/km}$ ）；（4）铁三院 CPIII 专业平差软件，保障数据处理精度。该套设备组合符合高铁 CPIII 高精度测量的设备要求，其中徕卡 TS60 全站仪与 DINI03 水准仪的精度参数已通过多个高铁工程及地铁工程实践验证。

6.2 观测时段

严禁在日照、大风、温度剧变时段观测：（1）低温场：冬季 20:00–次日 07:00；（2）中温场：春秋季节 22:00–次日 06:00；（3）高温场：夏季 23:00–次日 05:00。安排专人监测温度，遇恶劣天气立即停止观测。观测时段的选择参考了以往钢桁梁温度形变稳定时段的实际监测数据研究，可有效规避温度剧变导致的测量误差。

6.3 观测要求

CPIII 控制网采用自由测站边角交会的方法测量，具体测量方法分为以下：

（1）一般情况下，按 120m 左右的测站间距设站观测，自由测站到 CPIII 点的最远观测距离不应大于 120m，每个 CPIII 控制点应有三个方向交会，每个自由测站观测 6 对控制点，测站间重复观测 2 对控制点。

（2）平面测量水平方向应采用全圆方向观测法进行观测，水平方向观测应满足规定。

（3）平面测量距离观测采用多测回距离观测法，应满足规定。边长观测应实时地在全站仪中输入温度和气压进行气象元素改正，温度读数精确至 0.2°C ，气压读数精确至 0.5hPa 。

7 数据处理与成果解算

通过数据检查，数据预处理与数据计算三维严密平差，输出精准成果，保障施工应用可靠性。数据处理与成果解算的核心要求遵循《高速铁路工程测量规范》，同时借鉴了高铁 CPIII 数据处理的先进经验。

7.1 数据预处理

按温度场分组独立处理数据：（1）每个温度场数据严格

分组，不混算拼接；（2）完成仪器、气象修正、棱镜常数改正等；（3）采用 3σ 准则剔除粗差；（4）不做统一温度修正，保留真实温度下坐标数据，确保基准与钢梁梁体状态匹配。 3σ 准则是工程测量中粗差剔除的常用方法，其应用规范参考了《工程测量数据处理规范》，仪器与气象改正的方法符合高精度测量数据预处理的通用要求。

7.2 三维严密平差

以 CPII 为约束平差基准，采用平面约束网平差与三角高程网联合平差，控制指标：单位权中误差 $\leq 0.8\text{mm}$ ，平面点位中误差 $\leq \pm 1.0\text{mm}$ ，高程中误差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ，环闭合差 $\leq \pm 3.6\sqrt{n}\text{mm}$ (n 为环内观测点数)，不满足要求则重新处理平差。三维严密平差的方法与控制指标参考了《高速铁路工程测量规范》，同时结合分温度场成果的特殊性，优化了平差约束条件。

7.3 成果输出

每套测量数据成果分别标注温度场类别、温度区间、观测平均温度、观测信息，输出独立成果表与精度评定报告，确保可追溯、可直接应用于施工。成果输出的格式与要求参考了高铁 CPIII 测量成果管理的相关规范，同时结合该桥双层桥面的结构特点进行了针对性的优化。

8 精度统计与应用效果

通过精度统计与实际工程应用，验证分温度场 CPIII 测量技术的有效性与实用性。精度验证的方法遵循《高速铁路工程测量规范》，应用效果分析参考了同类同等级铁路 CPIII 测量技术的评价标准。

8.1 精度统计

三个温度场 CPIII 成果精度统计如下表（单位：mm）：

温度场	平面点位中误差	高程中误差	相邻点相对中误差
低温场 A	± 0.8	± 0.5	± 0.5
中温场 B	± 0.6	± 0.4	± 0.5
高温场 C	± 0.9	± 0.6	± 0.6

参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家标准.高速铁路工程测量规范 TB 10601-2009
- [2] 重庆市气象局. 重庆地区气候特征及桥梁施工温度控制指南[R]. 重庆: 重庆市气象局, 2018.
- [3] 赵亮, 王芳. 高精度水准仪在高铁 CPIII 高程测量中的应用[J]. 测绘工程, 2020,

以上结果显示，测量成果精度均满足规范要求，其中中温场精度最优，三个温度场精度稳定，可以有效消除温度形变基准偏差。该精度水平优于规范要求，与分温度场测量技术的优化效果密切相关，同时验证了该技术方案的可行性。

8.2 应用效果

应用效果显著：（1）轨道精调偏差 $\leq 1\text{mm}$ ，线形平顺，满足高速重载要求；（2）线路精调一次合格率超 92%，消除温度形变返工，工期节约约 20%；（3）双层桥面轨道状态稳定，经长期运营检验无相关病害；（4）该技术无需额外仪器设备投入，流程规范，可推广至同类型高铁桥梁。应用效果的评价指标参考了时速 200km/h 高铁有砟轨道施工质量验收标准，其工期节约与质量提升效果与同类工程技术应用成果一致。

9 大跨度钢桁梁 CPIII 测量注意事项

结合本工程实践，总结 7 项关键注意事项：1. 以梁体温度为准，不单独采用环境气温；2. 同一温度场一次性连续观测，禁止跨温度拼接数据；3. 双层桥面独立建网、观测、出成果；4. 斜拉索张拉、梁体调整期间禁止观测，稳定 $\geq 24\text{h}$ 后再开展；5. 成果使用前接边检查，较差 $\leq \pm 1.0\text{mm}$ ；6. 建立温度—成果台账，按实时梁温匹配使用；7. 严格执行自检、专检、监理抽检三级复核制度。各项注意事项结合了该桥工程实践经验，同时参考了《高速铁路工程测量规范》的相关要求，部分条款借鉴了高铁 CPIII 测量的实践总结。

10 结论与推广价值

结合本工程实践，得出以下结论与推广价值：

（1）大跨度钢桁梁 CPIII 测量需采用分温度场独立观测、平差、出成果模式，可从根本上消除因温度梁体产生形变的基准偏差；（2）划分的三个温度场工况覆盖施工温度范围，变形稳定、观测可靠；（3）采用自由设站边角交会法与三维严密平差，成果精度满足时速 200km/h 高速铁路施工要求；（4）技术应用效果良好，可提高施工精度、减少返工、节约成本。上述结论均通过该桥工程实践验证，同时与大跨度钢桁梁 CPIII 测量的相关研究结论一致。