

特大桥梁施工测量数据处理与精度评定方法研究

黄桂林

重庆北新融建建设工程有限公司，重庆 404700

[摘要] 特大桥梁施工测量中存在环境复杂、精度高、控制困难等问题；文中结合重庆巫溪至巫山高速公路巫山至大昌段龙井互通 A 匝道 2 号桥、长水机场至双龙高速公路项目大板桥特大桥，对施工测量的特点和难点进行了系统的阐述，在此基础上重点讨论了施工控制网的布设和平差模型、多种观测数据的综合应用以及粗差检测、实时观测数据处理与自动化管理等相关技术措施，提出了精度评价指标、建立了误差传递和精度计算公式，提出了基于 GPS 测量与全站仪测量、精密水准测量三种不同方法精度比较的方法以及敏感度分析。

[关键词] 特大桥梁；施工测量；数据处理；精度评定；多源数据融合

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19584

中图分类号: U446

文献标识码: A

Research on Data Processing and Accuracy Evaluation Methods for Construction Surveying of Extra Large Bridges

HUANG Guilin

Chongqing Beixin Rongjian Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing, 404700, China

Abstract: There are problems such as complex environment, high accuracy, and difficult control in the construction measurement of super large bridges; The article systematically elaborates on the characteristics and difficulties of construction surveying by combining the Longjing Interchange A Ramp 2 Bridge on the Wushan Dachang section of the Wuxi Wushan Expressway in Chongqing, and the Dabanqiao Extra Large Bridge on the Changshui Airport Shuanglong Expressway project. Based on this, the article focuses on the layout of the construction control network, the application of various observation data synthesis, and related technical measures such as gross error detection, real-time observation data processing, and automated management. Accuracy evaluation indicators are proposed, error transfer and accuracy calculation formulas are established, and methods for comparing the accuracy of three different methods based on GPS measurement, whole station instrument measurement, and precision leveling measurement are proposed, as well as sensitivity analysis.

Keywords: extra large bridges; construction surveying; data processing; accuracy evaluation; multi source data fusion

引言

特大桥是交通运输的重要组成部分，在整个工程当中其施工质量直接影响到整个工程的安全性和使用年限，测量工作伴随整个桥梁建设过程之中，在控制网的建立、基础工程、上部结构安装等各阶段都离不开精准的测量，而一般的桥梁大多建在较为平坦的地段，但是由于特大桥通常建造于跨江、跨河、跨湖以及复杂的地势之上，因此施工困难较大，控制网间距较长，墩台间距较大，对测量精度的要求也更加严格，《公路勘测规范》(JTG C10-2024)规定，特大桥施测过程中，桥墩中心线在桥轴线上各点位的测量较差不大于 15mm；主桥轴线长度测量较差不大于 10mm。本文以龙井互通 A 匝道 2 号桥（全长 1690m，桥

宽 12.25~22.5m，为渐变宽度桥梁）、大板桥特大桥（全长 1511m，跨越地铁车辆维修库）工程项目为例进行实际的、系统地针对特大型桥梁施工期测量数据处理及精度评估的方法的研究。

1 特大桥梁施工测量特点与难点分析

特大桥的施工测量有其特有的技术特征及实施难题。就环境特征而言，特大桥往往横跨广阔河面或是复杂的地貌，现场测量受到天气的影响较大，风浪、潮汐、大气折射等都会给观测精度造成一定的影响。龙井互通 A 匝道 2 号桥桥宽由 12.25m 逐步扩大到 22.5m，在变幅处施工测量放线难度加大，需反复开展模板定位及检查工作。大板桥特大桥紧挨地铁车辆保养库以及梦成机械交易市场，周

围建筑较多,视线较差,地铁运行的震动也会使测量结果受到影响。对于临近地铁车辆段等强烈震动区域测量仪器震动导致的对中误差变大,常规测量手段无法达到毫米级的精度标准的情况,在控制网布置方面,超长桥梁必须搭建高密度的施工控制网,而控制点又大多位于两岸或者高墩处,边长跨度较大并且还需要考虑到跨河水准测量的要求等因素。在测量实施困难上,特大桥梁工期较长、控制点较易出现偏位,需及时检查测设;大型构件吊装、合龙等重要环节对测量的及时性要求非常高;深水基桩、高墩、大跨度结构等地方不宜设置测设标记。

2 特大桥梁施工测量数据处理关键技术研究

2.1 施工控制网布设与最小二乘平差模型

施工控制网是超大型桥梁工程实测的依据,施工控制网的精度会影响后续的放样及监控结果的准确性。在施工控制网的设计过程中必须注意的是分级布网、逐级控制的原则,在进行首级控制网时应该使用 GPS 静态测量技术,在桥轴线两端布置强制对中观测墩以保证稳定性,在进行加密控制网时使用全站仪导线网或者边角网的形式来满足现场施工放样的要求,最小二乘法平差是对控制网数据进行处理的基本理论方法,主要是通过观测值误差平方和最小的原则得到所求未知参数的最佳估计^[1]。传统平差模型假定观测值向量有误差但是系数矩阵是确定无误的,而实际上高程拟合模型中的系数矩阵几乎都是由高程点的平面坐标构成,平面坐标本身也是通过观测获得的量测值,也带有一定的观测误差,最小二乘法忽略了系数矩阵的误差,显然不符合实际情况。针对这个情况,总的最小二乘法应用于测量数据处理中,它兼顾观测向量和系数矩阵的误差,在一定程度上可以得到更加合理的参数估算值。

2.2 多源测量数据融合处理方法

特大桥施工测量过程中往往运用不同的测量手段,例如全站仪、GPS、水准仪、三维激光扫描等,如何把不同的测量方式有机结合在一起并充分发挥各种方法的优点是保证测量结果准确可靠的重要因素。多层次数据融合机制通过对结构化的财产信息、非结构化的照片、环境参数以及传感信息等进行集成,以达到从数据层面、特征层面到决策层面的综合分析的目的。数据层面上的融合是对直接得到的各种观测信息进行合并以达到提高观测精度的效果,比如多个全站仪联合观测的加权求均值;特征级聚合首先提取各个数据源的特征信息之后再做聚合,适合不同来源的数据集成,比如把 GPS 得到的平面坐标同水准测量得到的高度值进行聚合;而决策级聚合是先分别进行数据源本身的运算处理后再统一得出结果。在大板桥特大桥施工过

程中,为解决地铁震动的影响,使用了全球导航卫星系统的实时动态观测以及全站仪极坐标法联合观测,用卡尔曼滤波方法对两种信息进行了融合,从而消除了震动的影响。

表 1 多源测量数据融合方法对比

融合方法	基本原理	适用场景	主要优势	局限性
数据级融合	直接融合原始观测值	同类传感器数据整合	信息损失小,精度高	对数据配准要求高
特征级融合	提取特征后融合	异构数据综合处理	计算效率高,适应性好	特征提取可能损失信息
决策级融合	独立处理后综合结果	多源成果综合评判	鲁棒性强,容错性好	难以利用底层信息

2.3 粗差探测与异常数据识别技术

测量数据不可避免会出现一些粗差,在未对其进行有效的辨别与剔除的情况下会使平差的结果得不到很好的保证,粗差检测的主要目的是从测量数据当中寻找出由仪器误差、观测误差以及记录失误等造成的离群点。针对监测数据当中的粗差现象而提出来的一种基于奇异谱分析结合密度聚类粗差检测方法,此方法融合了奇异谱分析提取信号以及密度聚类算法区分粗差与异常值的优势:先运用奇异谱分析对监测序列进行分解重构,精确地抽出主信号并且得到残余分量之后再用密度聚类法来对残余部分进行分析,并综合二者的结论来判定出粗差点从而把它们剔除出去。常见的一些粗差检测办法有:数据检测法、格拉布斯判据、中位数绝对误差法等。而大板桥特大桥悬臂浇筑过程中对于挂篮变形监测的数据利用移动窗口法以及格拉布斯准则相结合的方法找出及剔除了由风力所导致的突变点。

2.4 动态监测数据处理与时序分析方法

特大型桥梁工程施工期间,超高墩、悬臂浇筑、钢箱梁吊装等各种形式不断发生改变,必须开展动态监控来保证施工的安全以及线条质量。动态监控的数据处理主要是从时序数据中获取结构的变化量以及未来的发展趋势。在陆杨新区大桥工程当中,工程管理人员建立施工全生命周期智能化建造平台,把 BIM、现场检测数据以及有限元分析结合起来,生成桥梁数字化映射体,全过程动态仿真模拟体系转换的过程,在每次卸载、张拉之后结构的内力及形变状况^[2]。对即时动态数据可以用卡尔曼滤波器滤去随机干扰项,预测下一个时间点的状态量。对于大板桥特大桥挂篮悬浇施工,对各个分节块浇筑前、后以及张拉后的高程值进行时间序列研究,得出变形量与施工工序间的函数关系式。

2.5 测量数据自动化处理与信息化管理

基于测量设备以及信息科学技术的进步,提高测量工

作的自动化、数字化成为增强工作效率的一种重要措施。自动化处理的目标就是要能够把整个测量工作由数据收集、传送到最后平差计算、结果输出全部实现自动化。全站仪智能测量及数据分析系统分为手机端的数据收集软件以及服务器端的数据分析软件两个模块,手机端可以完成用户账号注册与登录、蓝牙连接、建立任务、数据获取等操作,而服务器端则能完成用户信息维护管理、测量数据保存、生成电子观察日志本、进行测量平差、坐标结果输出等功能。在龙井互通 A 匝道 2 号桥施工过程中,运用测量数据管理系统进行控制点信息、观测资料、平差结果的一次性记录保存,在施工期间利用无线网络技术将测量数据及时传递上来,降低人为错误几率。大板桥特大桥悬臂现浇施工监控中,搭建智能监控体系,全站仪测量机器人自行完成多次观测任务并将结果发送到云主机进行计算。

3 特大桥梁施工测量精度评定方法

3.1 精度评定指标体系构建

精度评估是针对测量结果品质进行客观定量分析的过程,建立合理有效的指标体系是进行精度评估的前提条件,特大桥工程建设测量精度评估指标应当包含控制测量以及施工放样两方面内容,即点位中误差、边长相对中误差、方位角中误差、高差中误差、高程中误差这些基础性指标,《工程测量标准》(GB50026-2020)规定了桥梁控制网精度的要求取决于桥梁长度及墩间最大跨度距离,当跨越宽度超过 500m 时,需单独设立桥梁施工专用控制网。其平面坐标系的精度指标有控制点点位中误差、最弱点相对中误差、桥轴线长度中误差。高程系统的精度指标有每公里高差中误差、最弱点高程中误差。放样精度指标包括墩台中心点位中误差、支座中心位置误差。

3.2 误差传播规律与精度分析模型

误差传递原理是测量精度研究的一个依据,它描述出观测误差与相应的函数误差之间的一种数量上的联系。在误差传递原理基础上对一些典型特征误差的关系进行识别后,从而构造出间接测量值与直接测量值的最优函数表达式,并结合误差传递原理对其他特征误差的影响加以考虑,得到整个方向、俯仰以及倾斜角误差数学表达式,在特大桥工程施工过程中,精度分析主要是由控制网精度分析、放样精度分析以及变形监测精度分析构成^[3]。常见的精度分析方式有误差传递公式的计算、蒙特卡罗仿真、统计检测法等等。

3.3 平面与高程精度评定方法

平面精度评定方法主要用来分析控制点、放样点的平

面位置精度。根据平差原理,控制网中任一点的点位精度可以通过该点的协因数阵以及单位权中误差来求得,桥轴线方向是重要的一个标准,精度评估需要同时考虑到控制点误差与放样误差的影响,《公路桥梁施工监控技术规程》要求:悬浇施工合龙段高程误差 $\leq \pm 10\text{mm}$;轴线误差 $\leq \pm 5\text{mm}$ 。高程精度测量方式分为水准测量精度评定以及三角高程测量精度评定两种。水准测量每公里高差中误差可以依据往返测不符值或环线闭合差来进行求算,精密水准测量每公里高差中误差为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

3.4 不同测量方法精度对比分析

特大桥施工放样的测量方法有很多,在不同的情况下对精度的要求也不同,通过比较各种方法的精度有利于正确地选择测量方法。全站仪极坐标法是最常用的一种放样方法,其点的位置精度取决于测角误差、测距误差以及仪器对中的误差,当距离不大且测站稳定时可以达到毫米级精度。GPS 施工放样法不需要通视,工作效率较高,平面位置能达到厘米级精确度,但是受卫星质量及多路径的影响严重。精密水准测量为高程基准传递的主要手段,每公里高差中误差只有亚毫米级,但是工作进度慢,受到地形等条件的影响大。测量机器人使用于陆杨新村大桥工程,刚性系梁的吊装每节系杆安装误差均保持在 3mm 之内,测量机器人实时巡检主墩及拱座位移变化,展示了高精度仪器对桥梁重要部位检测的工程质量效益。

表 2 不同测量方法精度对比分析

测量方法	精度指标	主要优点	局限性/注意事项
全站仪极坐标法	毫米级(距离不大且测站稳定时)	方法成熟,操作灵活,应用最广	精度受测角、测距及仪器对中误差影响;需通视条件
GPS 施工放样法	平面位置厘米级	无需通视,工作效率高,适合大范围或复杂地形	受卫星信号质量及多路径效应影响严重
精密水准测量	每公里高差中误差亚毫米级	高程基准传递的主要手段,精度极高	工作进度慢,受地形起伏、天气等条件影响大
测量机器人	安装误差 $< 3\text{mm}$;可实时监测位移变化	自动化实时巡检,适用于桥梁关键部位(如主墩、拱座)的高精度动态监测	设备及维护成本较高,对专业技术有要求(依据工程实践补充)

3.5 精度影响因素与敏感性分析

特大桥施工放样精度的影响因素众多,找到主要影响因素并对它们进行敏感性分析,有助于做好工程质量管理。仪器误差作为最基本的误差来源,有全站仪测角、测距误差,水准仪视准轴误差, GPS 接收机测量误差等,一般采用仪器校正以及使用高精度仪器来减少其误差;而

环境因素对测量精度的影响则相对更加复杂,比如空气折射率的变化、温度变换、风力大小等;另外由于海面测量环境中潮汐频发,在退潮时才会看到桩基露出水面,作业时间非常短暂,海上风浪大容易引起测量误差超过 10cm 等^[4]。观测条件因素有视距长短、目标是否清楚以及观测的时间选取;而人员操作的因素主要有对中的精度、整平的程度、瞄准的准确程度、读数的正确程度等。

4 结语

特大桥施工测量数据处理以及精度评定是保证特大桥施工质量以及安全的重要组成部分,基于龙井互通 A 匝道 2 号桥、大板桥特大桥等项目,探讨了施工测量的特点及其难题,并对施工控制网布置和平差模型、多源数据集成、粗差检测、实时监控、智能化管理等关键技术进行了探索,形成了精度评定的方法框架,在此过程中发现特大桥施工测量应该采取多种技术和手段进行综合应用,多源数据可以相互补充,动态监控是过程管控的基础。精度

评定应该建立一套完整的评估指标并对误差变化情况进行合理地分析。本课题的研究成果能给类似工程提供一定的参考意见和技术支持。

[参考文献]

- [1]唐建军,刘群德.GPS 测量技术在桥梁施工控制中的应用[J].交通世界,2017(11):92-93.
- [2]胡祥明,孙雪梅.GPS 技术在特大型桥梁测量中的应用[J].四川水泥,2024(6):198-200.
- [3]樊庆春.闽江特大桥深水高墩超大跨度桥梁施工测量控制技术[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2017,30(1):9-13.
- [4]李阳.桥梁测量数据处理与质量评估方法研究[J].工程建设与设计,2026(3):109-111.

作者简介:黄桂林(1993—),毕业于西安科技大学土木工程专业,工程师,现就职于重庆北新融建建设工程有限公司。