

GPS 动态几何监测系统在桥梁施工中的应用研究

黄声享¹ 杨保岑¹ 游新鹏²

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 中交第二航务工程局有限公司,武汉市民主路 553 号,430071)

摘要:介绍了苏通大桥施工期 GPS 动态几何监测系统的构成及监测点的布置方案,结合系统在现场应用的情况,对其动态监测的精度进行了统计分析。结果表明,水平方向位移的精度优于 ± 5 mm,高程方向优于 ± 10 mm。通过对索塔的温度响应进行分析,对上部结构施工给出了有益的建议。利用频谱分析法计算了桥梁的模态频率,与有限元模型比较结果表明,GPS 系统的模态参数识别结果是可靠的。

关键词:GPS;实时监测系统;精度分析;动态特性;苏通大桥

中图分类号:P228.42;P258

大型桥梁施工过程复杂,控制要求严格,任何偏离设计的施工都会导致成桥线型和内力偏离设计值,从而影响桥梁设计的承载能力。为此,必须从桥梁开始施工,即着手进行全过程的安全监测。过去,通常使用全站仪、位移传感器、加速度计等方法测量桥梁的位移、动态特性等参数,然而在大型桥梁施工监测中,这些传统的测量手段存在一定的局限性^[1,2],不能满足对桥梁进行连续、实时和自动监测的需要。近年来,GPS 为位移测量、动态分析提供了新的技术手段,国内外学者作了大量的试验研究^[1,3-9]。目前,一些重大结构工程,如香港青马大桥^[10]、广东虎门大桥^[2]、日本明石海峡大桥^[11]、新加坡共和国广场大厦^[12]等均已成功布置了 GPS 监测系统,进行长期实时的监测,从而更好地分析结构的安全状况。本文结合苏通大桥上部结构施工的情况,研究了 GPS 动态几何监测系统的应用效果。

1 系统简介

苏通大桥主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,大桥全长 8 146 m,主跨 1 088 m,主索塔高 300.4 m,为世界同类桥梁之首。大桥位于长江下游,每年都要经历长时间的台风期,加上昼夜及季节温

差大,各种恶劣因素对上部结构施工的精确定位带来十分不利的影 响。为确保施工安全及成桥结构设计的指标,对施工期主梁的几何线型、高程、动力学参数和索塔偏位等的确定提出了极高的要求。为此,本文提出并成功实现了一套基于 GPS 技术的远程实时动态几何监测系统,对大桥施工期塔、梁的几何和结构状态进行连续、实时的监测。

苏通大桥主梁施工期 GPS 实时监测系统基于载波相位差分技术,由 GPS 基准站、监测点、数据通讯网络和监控中心等部分组成。监控中心的计算机接收各监测点的数据,实时计算各监测点在桥梁坐标系下的位移,以时程曲线、点云等形式显示,并将其存入数据库。考虑到通讯链路的稳定性要求和施工现场的复杂性,采用点对多点无线扩频通讯专用网络进行数据传输,通过增加远端站设备,可以方便地扩充监测站点。

索塔顶 GPS 监测点在索塔封顶后即着手安装,并开始连续监测;桥面上的 GPS 监测点根据钢箱梁施工的进度逐步增加并移位,而且,桥面上 GPS 监测点安置在上游侧。大型斜拉桥的固有频率一般远小于 5 Hz,根据奈奎斯特定理可知,将监测点 GPS 接收机的采样率设置为 10 Hz 即可无失真地记录下所有振动信号。

2 系统监测的精度及效果

2.1 精度分析

由于诸多影响因素和本身结构的复杂性,桥梁始终处于运动状态,难以选择一个绝对静止的测点分析动态 GPS 监测成果的精度。为合理评价 GPS 动态几何监测系统在现场应用的效果,选择桥梁处于相对稳定时的观测数据进行分析。北索塔 2007 年 1 月 14 日 2:00~3:00 之间没有进行吊梁、张拉作业,塔吊处于平衡状态,温度变化小于 0.1 ℃,塔顶平均风速 5.1 m/s(微风),以此期间索塔顶部监测数据分析结果的精度。图 1 所示为 1 h 共 36 000 个历元的监测数据点位空间分布。

针对该监测点此时段内的监测数据,忽略点位变形因素的影响,对数据序列进行精度统计,其标准差分别为 $m_x = 3.6 \text{ mm}$, $m_y = 2.8 \text{ mm}$, $m_z = 9.1 \text{ mm}$ 。由此可知,监测点平面方向的精度优于 ±5 mm,高程方向优于 ±10 mm。

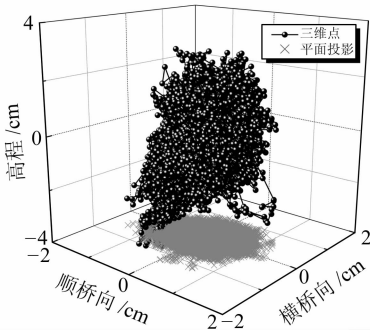


图 1 三维点云及其在平面方向的投影

Fig. 1 3D Scatter of Point Cloud and Their Projection on the Horizontal Plane

2.2 索塔刚度测试

苏通大桥索塔刚度测试是在钢箱梁施工至 8 # 梁段时,通过不对称起吊,使索塔产生明显的变形,同时采集测试过程中各阶段对应的时间、索塔位移、气象数据(风力、温度)等。通过对各种测试数据的详细分析,充分掌握索塔的抗拉强度,为后期长悬臂施工提供基础资料。图 2 所示为 2006 年 12 月 26 日测试过程中索塔顺桥向位移及现场记录的各阶段时间表,表明 GPS 监测的位移可以准确地反映吊梁的过程。

2.3 温度响应分析

实时监测的目的之一是及时获得监测点在桥梁纵向、横向和垂直方向上的位移,结合工况信息以及温度、风力、风向等气象数据,进一步分析位

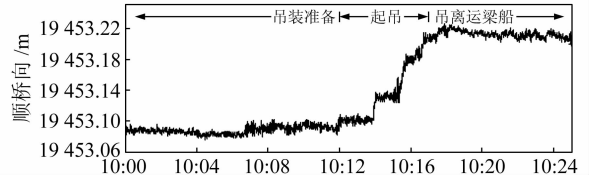


图 2 索塔刚度测试顺桥向时程曲线

Fig. 2 Longitudinal Displacements of North Pylon Tower During the Rigidity Test

移与温度、风力、工况的关系等。以温度为例,因温度数据的采样间隔为 20 min,为便于比较,将位移作均值化处理,使其在时间上对应起来。图 3 所示为 2006 年 12 月 3 日上部结构施工至 3 # 梁段时南索塔顶顺桥向位移与温度变化的对应关系。由图 3 可知,索塔位移与温度的变化呈现明显的反对称,经计算,其相关系数为 -0.743 6,表现为强反相关关系。

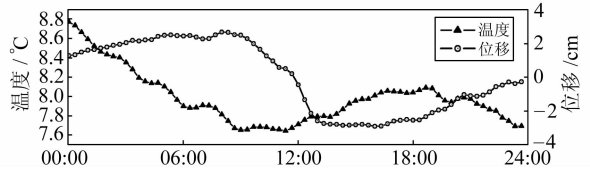


图 3 索塔顺桥向位移与温度变化的响应关系

Fig. 3 Response Relationship Between Longitudinal Displacements and Thermal Loading Effects of the Pylon Tower

为研究索塔顶部位移在平面方向上 1 d 内的变化,对上述 GPS 监测结果以 1 h 间隔取 10 min 数据计算其均值,形成位移数据序列,并绘制平面位移过程线,如图 4 所示。可知,索塔顺桥向(近似南北向)因温度变化的位移要比横桥向(近似东西向)显著得多,南北方向在 1 d 内因温度变化产生的位移约 5.5 cm,东西方向仅 0.9 cm。凌晨

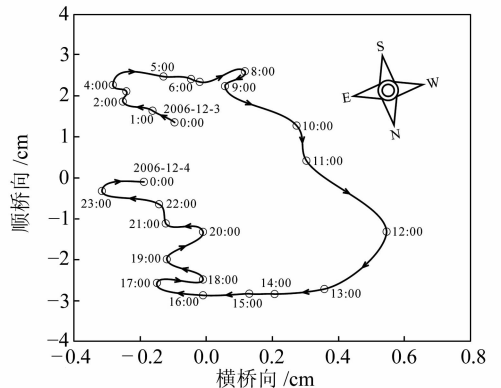


图 4 索塔周日变形曲线

Fig. 4 Daily Deformation Curve of the Tower in Horizontal Plane

0:00 到 6:00 与晚上 10:00 到凌晨期间,索塔变形甚微,均在 1 cm 之内;白天受阳光照射,索塔两侧产生不均匀变形导致顶部位移变化剧烈,9:00 ~13:00 之间平均 1 h 位移变化量为 1.2 cm,13:00 之后,索塔位移开始变缓,趋于稳定。所以,要确保桥轴线方向钢箱梁的安装精度,宜选择晚上 10:00 至凌晨 6:00 期间,在该时间段索塔本身因温度效应产生的变形较小,对施工有利。

3 动态特性监测效果分析

3.1 动态特性

桥梁的动力学参数如固有频率、振型等是反映桥梁自身特性和工作状态的重要参数,是评价桥梁动力性能的重要依据。大跨度斜拉桥结构复杂,而且在自然状况下还要受到风荷载、水流、地脉动等的激振,因此,精确确定桥梁的动力学参数具有重要的意义。通过桥梁动态特性的测试,得出相关参数,可为桥梁状态的确定提供可靠的依据。

要对桥梁的动态特性进行分析,就要了解其频域特征。通过频谱分析法^[13]处理 GPS 位移序列,计算相应的频谱特征。图 5 所示为 2008 年 3 月 19 日北索塔上部结构施工至 19# 梁段(中跨悬臂长约 300 m)时顺桥向幅值谱图,前两个尖峰分别对应 0.166 Hz 和 0.500 Hz,表明 GPS 监测数据至少可以反映低频模态频率。

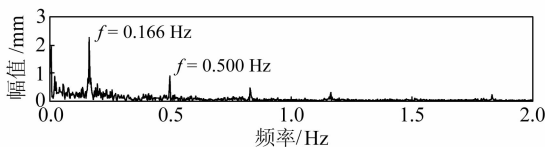


图 5 索塔顺桥向幅值谱图

Fig. 5 Spectrum Diagram in Longitudinal Direction of the Pylon Tower

3.2 与有限元法的对比分析

苏通大桥运用 MIDAS 软件采用正装分析法建立了三维有限元模型用于施工控制。图 6 所示为有限元模型计算的振型图。

如前所述,处理 GPS 的监测数据可以获取桥梁的模态频率,选取该桥上部结构施工至 31# 梁段时的数据进行分析,得到塔、梁的振动频率,并与有限元模型的计算结果进行比较(见表 1)。

分析表 2 数据可知:① 由 GPS 监测数据得到的各阶主振动频率接近,与其均值的差值在 5% 以内,表明结果是可信的,利用系统的监测数

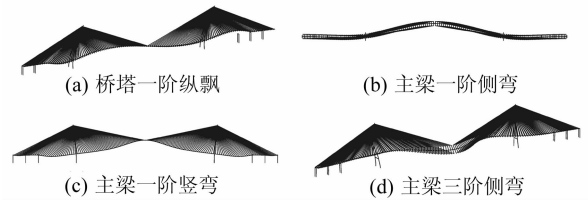


图 6 苏通大桥有限元模型计算的各阶振型图

Fig. 6 Mode Shapes Computed by Finite Element Model of Sutong Bridge

表 1 GPS 监测频率与有限元模型比较

Tab. 1 Compare of the Dominant Frequencies Derived from GPS Data and FEM

		振型频率/Hz			
		桥塔纵弯	桥塔侧弯	主梁侧弯	主梁竖弯
GPS 监测	07-5-12	0.199	0.361	0.091	0.194
	07-5-13	0.198	0.354	0.093	0.198
	07-5-15	0.202	0.359	0.092	0.195
	07-5-16	0.203	0.361	0.091	0.195
FEM 计算		0.214	0.367	0.108	0.214

据进行模态分析是可靠的;② 由 GPS 监测数据所得到的频率与有限元模型计算的固有频率均存在一定的差值,说明两种计算结果均存在系统性的差异。究其原因,有限元模型的计算结果是桥梁在无外界荷载作用、理想状态下的固有频率,而 GPS 实测结果不仅受施工期外界荷载的干扰,还受桥面、索塔所固接的机械设备(塔吊、桥面吊机等)的影响,导致实测频率低于其固有频率。

4 结 语

苏通大桥主梁施工期 GPS 实时监测系统克服了传统桥梁监测方法的缺点,实时监测桥梁在各方向位移值的精度达 mm 级,采样率高,可用于斜拉桥、悬索桥、高层建筑物等高大结构物的实时位移监测及其模态分析,并可测量结构物在异常天气(台风、暴雨)、交通荷载或温度效应下的变形。系统可实现多点同步观测,受外界影响小,数据采集方便,易于进行实时、自动化管理,同其他常规测量方式相比,显示出其独特的优越性,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Lovse J, Teskey W, Lachapelle G, et al. Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology[J]. Journal of Surveying Engineering, 1995, 121(1):35-40
- [2] 过静琚, 徐良, 江见鲸. 利用 GPS 实现大跨桥梁的实时安全监测[J]. 全球定位系统, 2001, 26(4):1-8

- [3] 黄声享. 变形数据分析方法研究及其在精密工程 GPS 自动监测系统中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2001
- [4] Watson C, Watson T, Coleman R. Structural Monitoring of Cable-stayed Bridge: Analysis of GPS Versus Modeled Deflections[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2007, 133(1):23-28
- [5] Breuera P, Chmielewskib T, Gorskic P, et al. Application of GPS Technology to Measurements of Displacements of High-rise Structures Due to Weak Winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(3):223-230
- [6] Robert G, Brown C, Meng X. Bridge Deflection Monitoring[J]. *GPS World*, 2006, 17(2):26-31
- [7] Kijewski-Correa T, Kochly M. Monitoring the Wind-induced Response of Tall Buildings: GPS Performance and the Issue of Multipath Effects[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9):1 176-1 198
- [8] Psimoulis P, Pytharouli S, Karambalis D, et al. Potential of Global Positioning System (GPS) to Measure Frequencies of Oscillations of Engineering Structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 4:10. 1016
- [9] Kijewski-Correa T, Kareem A, Kochly M. Experimental Verification and Full-scale Deployment of Global Positioning Systems to Monitor the Dynamic Response of Tall Buildings[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(8):1 242-1 253
- [10] 刘正光. 人造卫星定位系统在桥梁结构健康监测中的应用[J]. *广西交通科技*, 2003, 28(1):1-7
- [11] Fujino Y, Murata M, Okano S, et al. Monitoring System of the Akashi Kaikyo Bridge and Displacement Measurement Using GPS[C]. SPIE, Bellingham WA, 2000
- [12] Ogaja C, Rizo C, Wang J. High Precision Dynamic GPS System for On-line Structural Monitoring[C]. The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, 2001
- [13] 黄声享, 刘经南. GPS 监测系统基准形变分析与动态随机模拟[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25(6):485-490
- 第一作者简介: 黄声享, 教授, 博士, 博士生导师。主要从事变形监测与灾害预报、卫星导航定位技术的应用教学与科研工作。
E-mail: sxhuang@whu.edu.cn

Applications of GPS Dynamic Geometric Deformation Monitoring System to Sutong Bridge

HUANG Shengxiang¹ YANG Baocen¹ YOU Xinpeng²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 China Communications Construction Company 2nd Harbor Engineering Co., Ltd, 553 Minzhu Road, Wuhan 430071, China)

Abstract: We introduce a structure of the GPS real-time dynamic geometric deformation monitoring system and the instrumentation deployment. Accuracy of the monitoring system is estimated based on the data collect during Sutong Bridge construction. The results indicate that the accuracy is better than 5-10 mm in horizontal and vertical directions, respectively. Displacement responses of the tower caused by thermal loading effects are analyzed and some advice is given. Spectral analysis is used to compute the modal frequency of the bridge pylon tower and the cantilevers using GPS monitoring data. Dominant frequencies derived from GPS monitoring data and the finite element model are compared and the results indicate that identification of modal parameters using GPS data is reliable.

Key words: GPS; real-time monitoring system; accuracy analysis; dynamics; Sutong Bridge

About the first author: HUANG Shengxiang, professor, Ph. D, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in high precision deformation monitoring and GNSS engineering application.

E-mail: sxhuang@whu.edu.cn