

文章编号:1001-1595(2009)01-0066-07

苏通大桥施工期几何监测系统的建立与应用研究

黄声享¹, 杨保岑¹, 张 鸿², 梅文胜¹

1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 中国交通建设股份有限公司第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430022

Real-time Dynamic Monitoring with GPS and Georobot during Sutong Bridge Construction

HUANG Sheng-xiang¹, YANG Bao-cen¹, ZHANG Hong², MEI Wen-Sheng¹

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Second Harbour Engineering Company LTD., China Communications Construction Company Limited, Wuhan 430022, China

Abstract :Construction progress of large cable-stayed bridge is complicated and the quality control is strict. Any disadvantage during construction may potentially affect the internal forces and deck alignments after it is open to traffic. To exactly evaluate the periodic alignments, internal forces and safety, geometrical and physical monitoring is needed during construction. Aims at the requirement of dynamic geometric monitoring during Sutong Bridge construction, and introduces the realization and observing schemes of the self developed GPS and georobot based remote real-time dynamic geometrical deformation monitoring system and enumerates some of the application achievements. Long-term operation during Sutong Bridge construction indicates that the system runs steadily and the results are credible. The monitoring system indicates superiority compared with conventional methods and ensures the progress of the project construction.

Key words :Sutong bridge; dynamic deformation monitoring; GPS; georobot

摘 要:大型斜拉桥施工过程复杂、控制要求严格,施工期各种不利条件均可能对成桥内力、线型造成潜在的影响。为准确评价结构的阶段线形、受力与安全,有必要在施工期进行几何、物理监测。结合苏通大桥施工期动态几何监测需要,介绍自主研发的基于 GPS 和测量机器人的远程实时动态几何监测系统的实现方法及其观测方案,并列举本系统的部分应用成果。依托工程的长期运行情况表明,系统稳定、可靠,与常规测量方法相比较体现出独特的优越性,保障工程建设的技术要求。

关键词:苏通大桥;几何监测;GPS;测量机器人

中图分类号:P258 **文献标识码**:A

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAG04B03)

1 前 言

现代斜拉桥于 20 世纪 50 年代开始兴建,具有跨度大、造型美、刚度较悬索桥大等特点。随着电子计算机硬件与软件的发展,近代新型材料的开发,施工技术的进步,斜拉桥得到迅速的发展,规模不断增大,其跨度已突破千米。超大跨度斜拉桥的施工过程复杂,周日温差、风振和特殊工况等都将引起索塔和钢箱梁较大的偏位。因此,研究和开发钢箱梁安装期间塔梁的动态几何测量与监测控制系统,加强对整个施工过程的控制和重要施工环节的监测,分析预报各种不利组合条件的施工状态,评价施工安全和规避不利施工条件,正确地指导施工等是极为重要的。

过去,通常使用位移传感器、加速度计、激光干涉仪和全站仪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,不能满足对桥梁进行连续、实时和自动的动态监测需要。近年来,现代测量新技术如全球定位系统(GPS)、智能型全站仪(测量机器人,Geo-robot)等为大型结构物的位移测量和动态特性监测提供了新的技术手段,国内外学者在此方面进行了大量研究^[1~7],结果表明,GPS 和测量机器人可以用于斜拉桥、悬索桥、高层建筑物等的变形监测。已有试验认为,利用 GPS 可以测出振幅 2 mm 以上、频率 50 Hz 以下的动态特性参数^[7~10]。广东虎门大桥^[11]、山东滨州黄河公路大桥^[12]、香港青马管制区三桥^[13]建立的基于 GPS 技术的实时动态位移监测系统,用于桥梁运营期的健康状况监测,取得了理想效果。

本文结合苏通大桥上部结构施工监控的实际

情况,重点介绍基于 GPS 和测量机器人的实时动态几何监测系统构成,初步探讨监测数据处理与分析方法,并列系统应用的一些成果。

2 苏通大桥概况

苏通大桥位于江苏省东部的南通市和苏州(常熟)市之间,西距江阴大桥 82 km,东距长江入海口 108 km,是交通部规划的国家高速公路沈阳至海口通道和江苏省公路主骨架的重要组成部分。苏通大桥主桥采用主跨为七跨双塔双索面钢箱梁斜拉桥,跨径为 100 m+100 m+300 m+1 088 m+300 m+100 m+100 m=2 088 m,通航净空高度 62 m,为目前世界上最大跨径斜拉桥(如图 1 所示)。工程自 2003 年 6 月开工建设,2007 年 6 月中跨合拢,其大跨径(1 088 m)、超规模群桩基础(平面 112 m×48 m,深 125 m)、高索塔(300.4 m)和斜拉索长(577 m)均创造了世界第一。

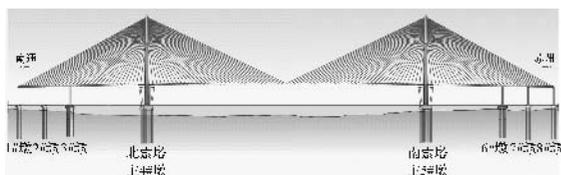


图 1 苏通大桥主桥示意图

Fig. 1 Main bridge sketch of Sutong Bridge

大桥地处长江下游,受季风和台风影响,常年平均风速很大,悬臂施工阶段的结构风振效应突出,加上日照和季节温差等影响,致使桥梁结构长期处于动态变化过程,为此,对测量的监测精度和可靠性提出了更高要求。为正确评价结构的阶段线形、受力与安全,及时掌握环境条件下准确的结构状态,亟须一套动态、实时、高精度和效率的监测系统解决方案。

3 系统构成

充分利用 GPS、测量机器人、数据通讯、网络、计算机等现代先进技术进行系统集成,研发并成功实现了一套基于 GPS 和测量机器人的远程实时动态几何监测系统,该系统具有高精度、实时、连续、全天候、自动监测等特点,弥补并克服了常规测量技术在异常恶劣天气、夜间与高空作业困难的局限性。

3.1 远程 GPS 实时动态监测子系统

系统由基准站、监测点、通讯系统和监控中心等部分组成。基准站上的 GPS 接收机跟踪视场内的所有卫星,通过通讯系统将基站信息传输到监测点;监测点 GPS 接收机同时接收视场内可见卫星的信号和来自基准站的信息,并进行实时差分处理,以 10 Hz 采样率获取监测点的 3 维坐标并将其发送到监控中心;监控中心接收各监测点的监测结果,通过数据处理软件作进一步的处理与分析,得到监测点在 3 维方向上的位移等参数,实时显示并将其存入数据库。有权限的用户终端可以通过网络查看系统的工作状态。该系统的网络结构组成如图 2 所示。

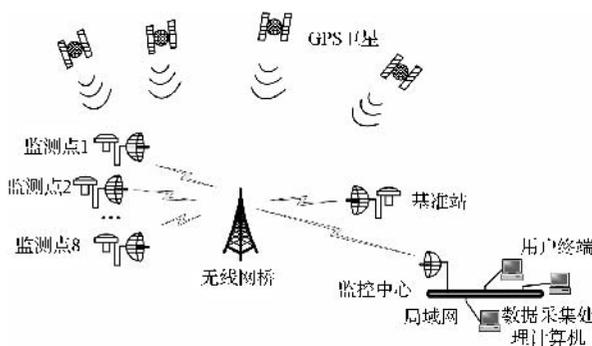


图 2 系统的网络结构图

Fig. 2 Network structure diagram of the system

监控中心设置于苏通大桥建设项目部。为尽量缩短 GPS 基准站至各个监测点之间的距离,确保 GPS 定位解算精度,将基准站设置在交通码头的一固定建筑屋顶上。GPS 监测点设置在索塔顶和钢箱梁安装期的桥面上。其中,两索塔顶各布设 1 个 GPS 监测点。桥面上的 GPS 监测点要根据钢箱梁安装进程逐步增加并移位,而且,桥面上所有 GPS 监测点安置在同一侧。

根据施工控制以及监测需要,在钢箱梁安装过程中,桥面上 GPS 监测点的总体布置如下:

1. 在中跨钢箱梁安装到远离南、北索塔约 200 m 时,各自开始安置并相对固定第 1 对 GPS 监测点。

2. 在钢箱梁安装至远离索塔 300 m 时,各自开始安置第 2 对 GPS 监测点。随着钢箱梁安装的向前延伸,桥面上第 2 对 GPS 监测点紧随其移位,并始终保持其在钢箱梁向前延伸的最前端。当钢箱梁安装到远离索塔达 400 m 时,将第 2 对 GPS 监测点相对固定。

3. 随着钢箱梁安装向前延伸,各自增加第 3 对 GPS 监测点,并随着钢箱梁的安装而向前移,

直到钢箱梁安装合拢段前。此时,桥面上共有 6 个 GPS 监测点。各监测点的布置如图 3 所示。

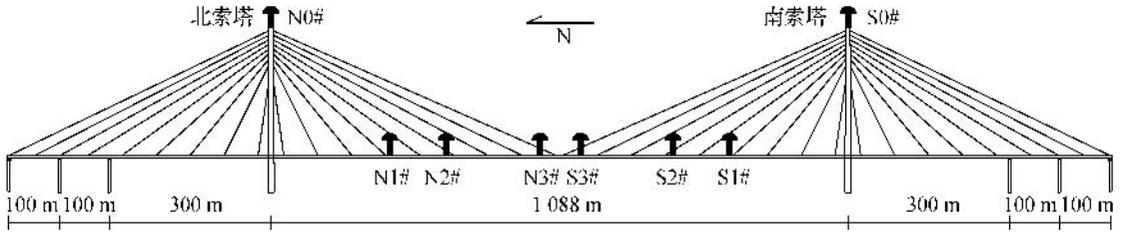


图 3 GPS 监测点的分布

Fig. 3 Deployment of the GPS monitoring points

系统的数据链采用了点对多点无线扩频的通讯专用网络。考虑到监控中心、GPS 基准站、索塔顶和整个桥面相互之间的距离和通视情况,以及钢箱梁安装过程中桥面机械设备的干扰,在南索塔顶布置了一个通讯中继站,以确保整个通讯网络的质量。

3.2 测量机器人实时动态监测子系统

钢箱梁安装期间,根据索塔和主跨桥面变形监测的需要,测量机器人实时动态监测系统采用了两种监测模式:一种是定点跟踪法,即对某一监测点进行长期的连续、动态快速跟踪测量;另一种是定期扫测法,即对视场范围内的所有监测点进行定期的快速扫描测量。

定点跟踪法是在一定时间内,通过对某一监测点所进行的连续快速跟踪测量,采集数据,然后进行分析与计算,求得该监测点的平衡位置(3 维坐标)及其动态特征。该方法应用时,快速跟踪测量的采样率可以达到 0.3 s,适用于动态环境施工时的变形监测需要。但该方法在观测时一台仪器仅能对一个监测点进行测量。定点跟踪法的测量精度与仪器型号和环境因素有关,根据苏通大桥采用 Leica TCA2003 由自编机载的自动监测软件,在测站微震状态下对 500 m 测程的钢箱梁悬臂前端测点所进行的试验,打开或关闭补偿器,其跟踪测量的精度均在 5 mm 以内。

定期扫测法是在较短的时间内,对视场范围内的所有监测点进行正倒镜测量,采集有效数据,然后进行分析与计算,求得各个监测点的平衡位置(3 维坐标)。考虑到钢箱梁的抖动,每一监测点应进行不少于 4 测回的观测,而且每一监测点的观测时间控制在 2 min 以内。如果监测点的动态环境恶劣,该方法就无法保证所有监测点的测量结果的时间同步性,因此,应用该方法一般选择

相对稳定的外界环境。

在监测点上布置反射棱镜,采用测量机器人 3 维坐标法对索塔变形进行定期扫测的观测方案如图 4 所示。其中,测量机器人的测站设置在索塔南、北侧的辅助墩和过渡墩上,分别以索塔横梁上的两个施工加密控制点作为后视与校核点,每一索塔布置有 44 个监测点。

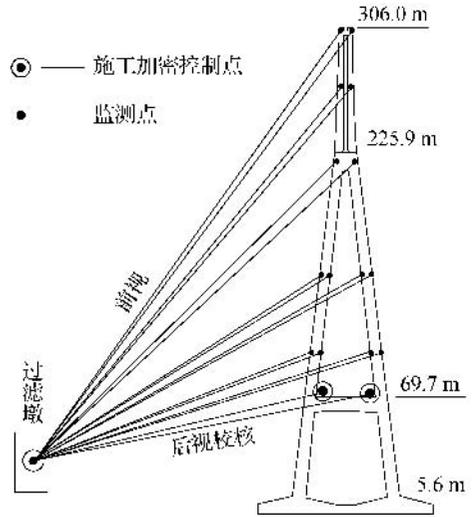


图 4 测量机器人的索塔定期扫测示意图

Fig. 4 Periodic scan mode of the georobot for bridge pylons

对桥面变形进行定期扫测的观测方案如图 5 所示。其中,将测站布置在索塔上、下游塔肢内侧的施工加密控制点上,以其中一个加密控制点为主测站,另外一个加密控制点为辅助测站,定期扫测包括边跨部分钢箱梁所布置的桥面变形监测点。每块钢箱梁共设置 8 个变形监测点,桥面定期扫测取上游侧、下游侧和轴线上各一个监测点。

如果南北索塔和钢箱梁均要同时进行实时动态变形监测,则至少需要 4 台测量机器人。

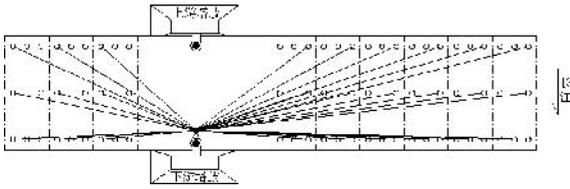


图 5 测量机器人的桥面定期扫测示意图

Fig. 5 Periodic scan mode of the georobot for bridge deck

3.3 系统布点与监测的统一

为充分发挥 GPS 和测量机器人的各自优势,出于性价比等因素的综合考虑,在索塔和钢箱梁的关键部位布置 GPS 监测点,进行施工期的 GPS 连续自动监测;对索塔和钢箱梁的线形控制部位布置棱镜监测点,采用测量机器人技术在安全环境条件下进行定期监测。

4 监测数据处理与分析

4.1 坐标系的统一

为了便于分析监测点在桥梁三维方向的变形,并且与测量机器人的监测结果进行统一,首先有必要将 GPS 的 WGS-84 坐标成果转换为桥梁施工坐标。其坐标转换的基本过程为:① 将 GPS 基准站与苏通大桥首级桥梁施工控制网点进行 GPS 联测,得到 GPS 基准站的施工坐标系坐标和坐标转换参数;② 根据坐标转换参数,由 3 维空间坐标转换模型实现 GPS 监测点的坐标转换;

③ 由于苏通大桥上部结构的施工与监测,采用的是自定义桥轴线里程坐标系,为此,还需要将桥梁施工坐标系下的坐标转换至桥轴线里程坐标系下,其转换关系可以通过式(1)确定。

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, θ 为两坐标系之间的旋转角, $(x_i \ y_i)^T$ 为监测点平面施工坐标, $(X_0 \ Y_0)^T$ 为桥轴线里程坐标系原点坐标, $(X_i \ Y_i)^T$ 即为监测点的桥轴线里程坐标。垂直方向通过平面拟合得到。由以上过程得到的最终成果即可直接反映各监测点在桥梁纵向、横向和垂直方向的变形。测量机器人系统的监测结果属于桥轴线里程坐标系,将两个子系统的监测结果比较,相互检核,以增强系统的可靠性。

4.2 GPS 和测量机器人的监测成果对比

图 6 为 2006 年 12 月~2007 年 4 月北索塔顶同时刻,GPS 监测点和临近塔顶的监测棱镜 x 方向坐标成果对比。结果表明,两种方法监测成果的变化趋势呈现非常强的一致性,其微小的系统性差异是因为两类监测点在索塔的不同高度位置,测量机器人的监测点位低于 GPS 监测点位约 29 m。图 6 监测数据的变化过程线,同时客观地反映了索塔在不同工况下变形较明显,两条曲线显示为整体的波动变化。

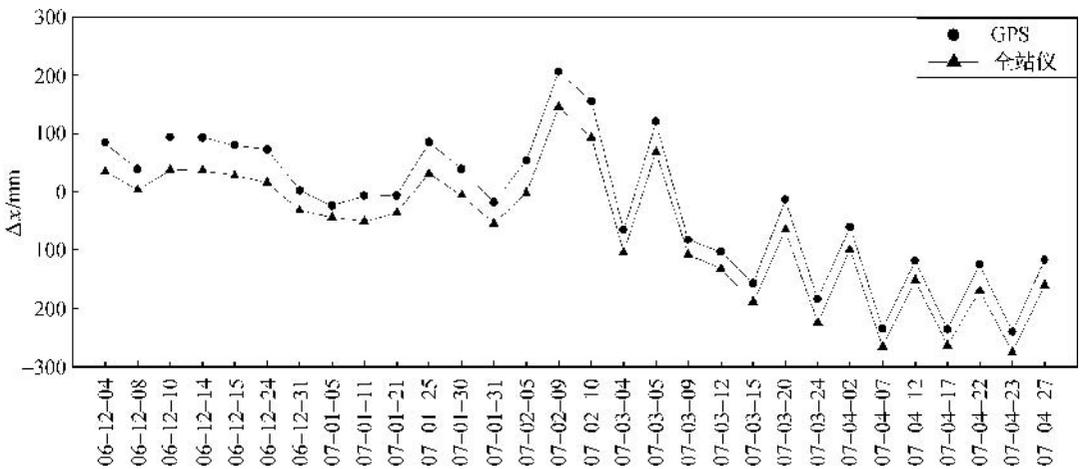


图 6 GPS 与测量机器人的监测结果比较

Fig. 6 Comparison of the results of GPS with that of georobot

4.3 索塔顶位移与温度、风力变化的响应关系

实时监测之目的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,进一步分析位移与

温度、位移与风力、位移与工况等动态响应关系。为说明问题起见,图 7 为 2006 年 12 月 15 日南北索塔顶顺桥向位移与温度变化的对应关系。

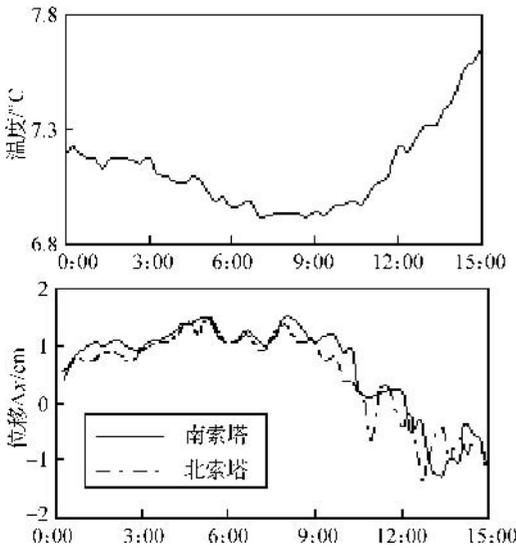


图7 索塔顶顺桥向位移与温度变化的响应关系

Fig. 7 Response relationship of longitudinal direction displacements of top of the bridge pylons with temperature change

用相关分析法可对图7所对应的数据进行处理,计算影响因素(温度)与响应量(位移)之间的相关系数,定量分析其响应关系。因温度(T)对索塔顶位移($\Delta S_x, \Delta N_x$,这里下标“ x ”表示顺桥向)的影响可能存在延迟,且温度的实际采样间隔为20 min,故以此时间间隔作为时间延迟计算相关系数,列于表1中。结果表明,温度与索塔顺桥向位移的变化呈现强反相关关系,且南索塔随温度变化的响应有约80 min的时间延迟,相关系数达 -0.9424 ,北索塔随温度变化的响应存在约2 h的时间延迟,相关系数为 -0.9383 。

表1 温度-位移相关系数与时间延迟的关系

Tab. 1 Relationship of time delay and correlation coefficients between temperature and displacement

时间延迟/min	$T-\Delta S_x$	$T-\Delta N_x$
-20	-0.7351	-0.6904
0	-0.7860	-0.7679
20	-0.8241	-0.7753
40	-0.8670	-0.8239
60	-0.9175	-0.8646
80	-0.9424	-0.8897
100	-0.9344	-0.9185
120	-0.9352	-0.9383
140	-0.9020	-0.9101
160	-0.8627	-0.8934

图8为2007年4月15日某时段北索塔顶位移与风力变化的响应关系。在17:30时出现风速

达23 m/s的飓风,引起北索塔顶的纵向位移(Δx)与横向位移(Δy)呈现明显突变,纵向位移变化数值达10 cm。风速平稳后,纵横向位移变化也趋于平稳。

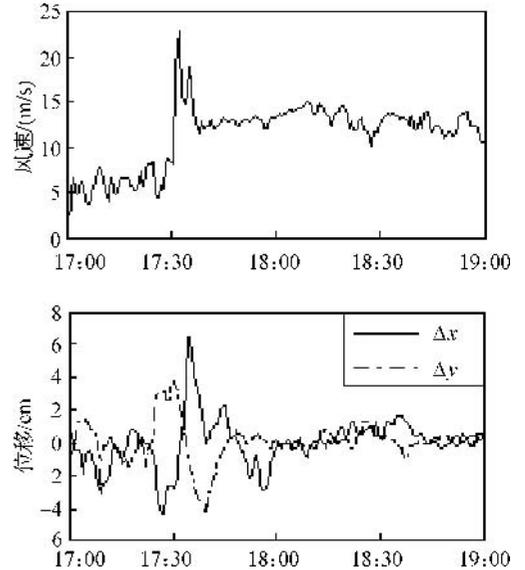


图8 北索塔顶位移与风力变化的响应关系

Fig. 8 Response relationship of top of north pylon displacement with wind load

4.4 动态特性分析

GPS监测系统以高采样率(10 Hz)运行,通过频谱分析法处理各监测点的监测数据可以得到点位的振动频谱曲线,与理论设计数值及不同工况、不同时间段的谱曲线进行比较,可以诊断各施工阶段或异常天气条件下桥梁结构的稳定性。2007年5月16日有较强的横桥向风,对监测数据序列进行频谱分析,结果表明,J31#梁段监测点横桥向的振动频率为0.0908 Hz。图9为钢箱梁J31#梁段GPS监测点受横桥向风力影响下的横桥向频谱图。

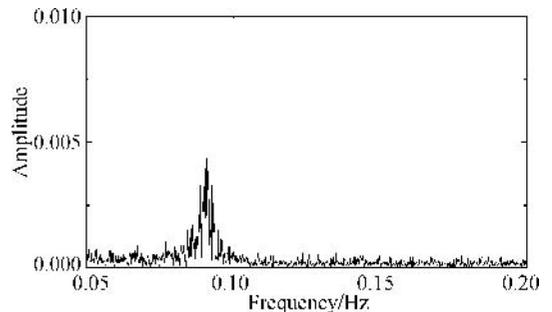


图9 强风作用下钢箱梁J31#梁段横桥向的频谱图

Fig. 9 FFT of lateral displacement of J31# girder monitoring station by strong wind

5 结 论

从 2006 年 10 月苏通大桥钢箱梁开始安装施工至 2007 年 6 月全桥合拢贯通, 系统运行稳定, 监测结果可靠, 在上部结构施工的质量监控中发挥了重要作用。系统应用的技术优势主要反映在以下几个方面:

1. 研发的远程 GPS 实时动态监测子系统, 成功实现了监控中心同时对塔梁上多个测点的实时监测功能, 并具有高的数据采样率。独立组网的系统通讯不仅承担基准站到各个监测点的数据通讯, 而且承担远程各个监测点到监控中心的数据通讯, 同时还附加有远程视频监控功能, 是真正意义上的点对多点、双向通讯。

2. 远程无线、实时、连续、全天候、无人值守自动监测, 弥补并克服了常规测量技术在恶劣天气、夜间和高空作业困难的局限性。

3. 精度的理论分析和实测数据表明, 测量机器人系统应用的实际点位精度优于 $\pm 5 \text{ mm}$; GPS 监测系统在高采样率 (10 Hz) 应用条件下, 平面点位精度优于 $\pm 5 \text{ mm}$, 高程精度优于 $\pm 10 \text{ mm}$ 。

4. 提出的基于测量机器人的两种监测模式所研发的机载自动监测软件, 通过实践的长期应用, 反映该系统运行稳定, 软件操作方便, 简单易用。

5. 由长期连续监测积累的数据, 分析索塔和钢箱梁的位移与温度、位移与风力、位移与工况等动态响应特性, 为苏通大桥施工期健康评估提供了准确的依据。

6. 利用索塔 GPS 和测量机器人监测数据, 分析并评价了远程 GPS 实时动态几何监测系统与测量机器人系统应用效果的一致性, 真正意义上实现了苏通大桥钢箱梁安装的几何监测“双控法”。

基于 GPS 和测量机器人的索塔和钢箱梁远程实时动态几何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毫米级, 且 GPS 动态监测子系统具有 10 Hz (甚至 20 Hz) 的采样率, 同其他常规测量方式相比显示出独特的优越性, 非常适用于桥梁的动态特性分析, 值得推广应用。

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] HUANG Sheng-xiang, LIU Jing-nan, LIU Xiang-lin. Deformation Analysis Based on Wavelet and Its Application in GPS Dynamic Monitoring for High-rise Buildings[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(2):153-157. (黄声享, 刘经南, 柳响林. 小波分析在高层建筑动态监测中的应用[J]. *测绘学报*, 2003, (32)2:153-157.)
- [3] CELEBI MEHMET, EERI M, SANLI Ahmet. GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-period Structures[J]. *Earthquake Spectra*, 2002, 18(1):47-61.
- [4] COSSER EMILY, ROBERTS G W, MENG Xiao-lin, *et al.* Measuring the Dynamic Deformation of Bridges Using a Total Station[A]. *Proceedings 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*[C], Santorini:[s. n.], 2003.
- [5] BROWN JOHN JAMES, RIZOS CHRIS, TAN Guan-hong, *et al.* Real-time Long-term Monitoring of Static and Dynamic Displacements of an Office Tower. Combining RTK GPS and Accelerometer Data[A]. *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham*[C]. Nottingham:FIG, 2004.
- [6] NAKAMURA SHUN-ICHI. GPS Measurement of Wind-Induced Suspension Bridge Girder Displacements[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, (126):1413-1419.
- [7] CHAN Wai-shan, XU You-lin, DING Xiao-li, *et al.* Assessment of Dynamic Measurement Accuracy of GPS in Three Directions[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2006, 132:108-117.
- [8] WATSON CHRISTOPHER, WATSON TIM, COLEMAN Richard. Structural Monitoring of Cable-stayed Bridge: Analysis of GPS versus Modeled Deflections[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2007, (133):23-28.
- [9] NICKITPOULOU A, PROTOPALTI K, STIROS S. Monitoring Dynamic and Quasi-static Deformations of Large Flexible Engineering Structures with GPS: Accuracy, Limitations and Promises[J]. *Engineering Structures*, 2006, (28):1471-1482.
- [10] ROBERTS G W, COSSER EMILY, MENG Xiao-lin, ALAN DODSON. Monitoring the Deflections of Suspension Bridges Using 100 Hz GPS Receivers[A]. *ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division*[C]. Long Beach:[s. n.], 2004, 1403-1413.
- [11] GUO Jin-jun, XU Liang, DAI Lian-jun, *et al.* Application of the Real-time Kinematic Global Positioning System in Bridge Safety Monitoring[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, (10):163-168.
- [12] Li Hong-wei, Ou Jin-ping. A Remote Deformation Mon-

toring System for a Cable-stayed Bridge Using Wireless Internet-based GPS Technology [A]. 3rd IAG/12th FIG Symposium[C]. Baden: IAG, 2006.

[13] CHEN Xin. Hong Kong Tsing Ma Traffic Control Area Real-time GPS Bridge Deformation Monitoring System [J]. Transpworld, 2002, (1): 34-35. (陈新. 香港青马交通管制区实时 GPS 桥梁变形监测系统[J]. 智能交通, 2002, (1): 34-35.)

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2007-11-14

修回日期: 2008-07-10

第一作者简介: 黄声享(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事卫星导航定位技术应用、变形监测分析与预报等方面的研究。E-mail: sxhuang@whu.edu.cn

First author: HUANG Sheng-xiang (1964-), male, professor, PhD supervisor, majors in the deformation monitoring analysis and disaster forecast and GNSS engineering application. E-mail: sxhuang@whu.edu.cn

[编读往来]

有读者反映本刊 2008 年 4 期 516 页的图 1“基于语义的多细节层次 3 维房产模型”有不清楚之处,特此刊出此图。

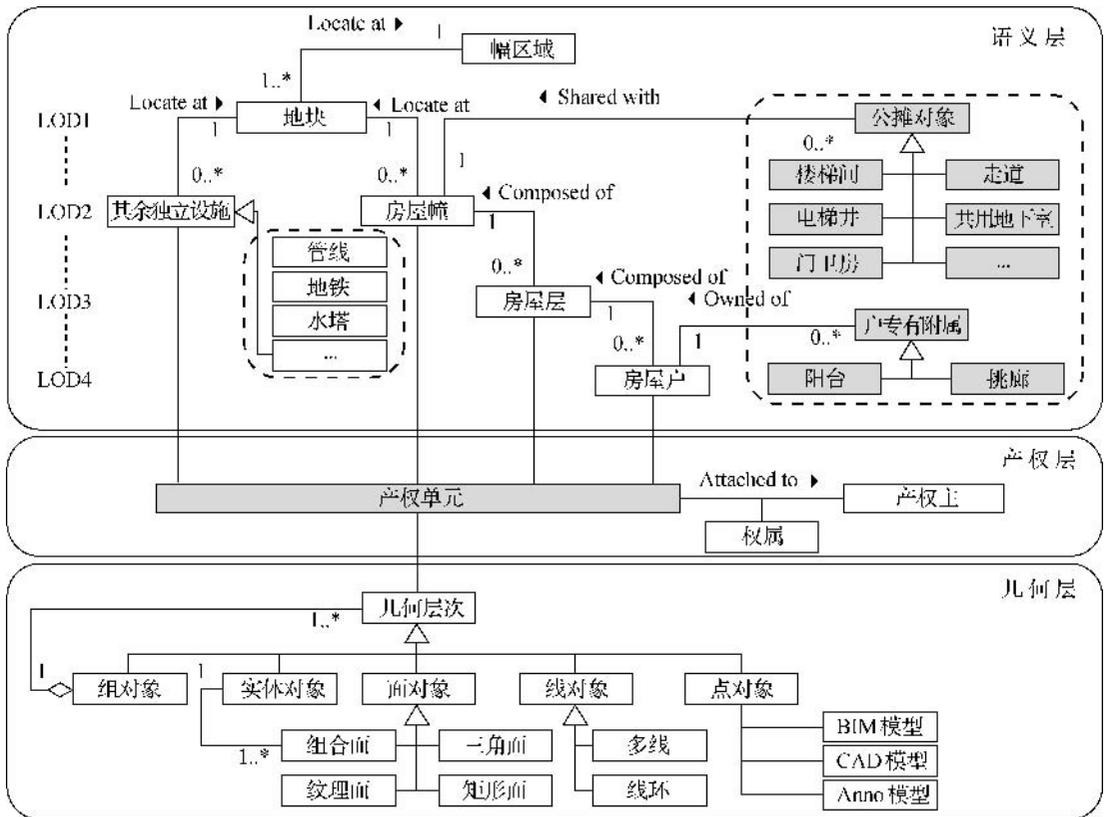


图 1 基于语义的多细节层次 3 维房产模型

Fig. 1 Semantics-based LOD model of 3D house property

(本刊编辑部)