

大跨度斜拉桥 GPS 动态监测试验及结果分析

黄声享¹ 吴文坛¹ 李沛鸿²

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 江西理工大学环境与建筑工程学院,江西赣州市红旗大道 122 号,341000)

摘 要:为确保大桥建成后的安全运行,及时掌握桥梁结构的健康状况,避免出现灾难性的后果,有必要对桥梁结构的动态特性进行测定,以检验实测值与理论设计数值的偏差程度。结合武汉白沙洲大桥的 GPS 动态监测试验工作,介绍了试验实施方案及其数据处理过程。应用频谱分析法有效地确定了斜拉桥跨中的振动特征,其数值结果与理论设计值吻合较好。研究表明,高采样率 GPS 接收机与合适的数据处理方法相结合,可以有效地确定桥梁结构的自振特性。

关键词:大跨度斜拉桥;GPS 监测;动态特性;频谱分析

中图法分类号:P228.42

桥梁自振特性(自振频率、振型及阻尼系数)是反映桥梁自身特性和工作状态的重要参数。竣工桥梁在通车之前的静、动载试验中,测定桥梁结构自振特性可以验证理论计算值。桥梁在运营期间,或者遭受意外撞击,或经受地震以后,桥梁的工作状态有可能发生改变,通过对桥梁自振特性变化的监测,可以为确定桥梁运行状态提供可靠的科学依据。

多年来,测定桥梁结构的振动特性一般采用具有惯性传感器的加速度计。但是,为获取位移值,应用加速度计必须对结果进行两重积分处理,精度不高,并在大多数情况下不能实现连续、实时、自动处理的现代桥梁监控要求。GPS 作为一种新方法,随着其软、硬件的不断发展与日益完善,特别是高采样率(如 20 Hz) GPS 接收机的出现,在大型结构物动态特性和变形监测方面已表现出其独特的优越性,应用 GPS 测定高耸与高层建(构)筑物振动特性的例子可见文献[1~5]。在大跨度悬索桥监测方面,GPS 已有应用实例,如香港青马大桥、广东虎门大桥^[6]等;在大跨度斜拉桥 GPS 动态监测方面,笔者结合武汉白沙洲大桥的试验^[7],其结果是令人鼓舞的。为进一步证实 GPS 技术在大跨度斜拉桥动态特性监测方面的能力和可行性,本文介绍了 GPS 在武汉白沙洲大桥的动态监测试验工作情况,给出了实施方案、数据处理过程及实测结果。

1 GPS 动态监测试验

1.1 武汉白沙洲大桥概况

武汉白沙洲长江大桥位于武汉长江大桥上游 8.7 km 处,是武汉市中环线连接武昌和汉阳的重要生命线。大桥全长 3 586.38 m,其中正桥长 2 458 m,引桥长 1 128.38 m,由铁道部大桥局勘测设计院设计,于 1997 年 3 月开工,2000 年 9 月建成通车。该桥的主桥为 50 m+180 m+ 618 m+180 m+50 m 双塔双索面混合箱梁斜拉桥,主梁全长 1 078 m,桥面净宽 26.5 m,双向六车道,主跨 618 m 在同类桥梁中位居国内第二,世界第四。

1.2 试验方案

1) 测试方法。目前,桥梁动态特性的测试大致有强迫振动法、自由振动激励法和环境随机振动法等几种方法。为了不妨碍交通,出于实用上的考虑,这里选择环境随机振动法(即利用建筑结构所处的环境引起的微小振动,检测并分析结构的动力特性)。

2) 采样率。根据信号分析的采样定理^[8],

GPS 接收机的采样率 f_s 应满足以下条件:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_c \tag{1}$$

式中, f_c 为奈奎斯(Nyquist)频率; Δt 为采样步长,这样就可以近似地认为采样所得到的离散信号可以惟一确定原始的连续信号。如果实际包含的最高频率为 f_0 ,则一般可取 $\Delta t = 1/4f_0$ 或更小。大跨度桥梁的主要振动频谱区域一般在 0~2 Hz 范围,作为试验,选择数据采样率为 10 Hz 的 GPS 接收机是可行的。

3) 点位布置。采用 Trimble 5700 双频 GPS 接收机三台,一台接收机作为基准站,设置在北岸大堤的强制归心观测墩上,观测环境好,视野开阔,周围无遮挡和干扰源;另两台接收机作为监测点,设置在正桥主跨桥面的护栏杆上。其中,一个监测点位于跨中,观测环境较好,周围无明显遮挡;另一个位于跨中偏南向的 1/3 位置处,斜拉索对卫星信号接收有一定影响。点位分布如图 1 所示,基准站至监测点的距离在 1 km 左右。

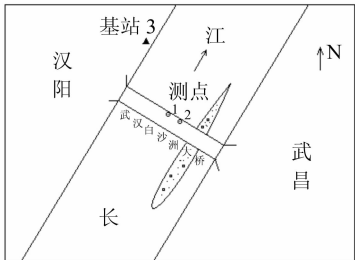


图 1 GPS 动态监测点位布置图
Fig. 1 GPS Dynamic Monitoring Scheme

4) 试验时间及有关情况。数据采集时间是 2003 年 5 月 17 日的上午,阴天,桥面车流量一般,但有风,有明显的间断性抖动感觉。按动态观测模式连续观测,三个测站同步观测约 1 h,卫星高度角限值设置为 13°。

1.3 数据解算

按整周模糊度动态解算法(ambiguity resolution on-the-fly)对采集数据进行处理,将 3 号点作为固定基准,可以同时获得 1 号测点和 2 号测点相对于基准站在 WGS-84 坐标系下各历元的三维大地坐标 (B_i, L_i, H_i) 。然后,进行投影变换,将大地坐标 (B_i, L_i) 变换为平面坐标 (x_i, y_i) ,这样,可以得到点位的三维坐标 (x_i, y_i, H_i) 数据序列。1 号测点的三维数据序列经均值化后的时程曲线部分如图 2 所示。图 2 的时程曲线反映了 GPS 动态测量的正常精度,表明 GPS 观测质量好、数据处理结果可靠,可用于桥梁结构的自振特性分析。

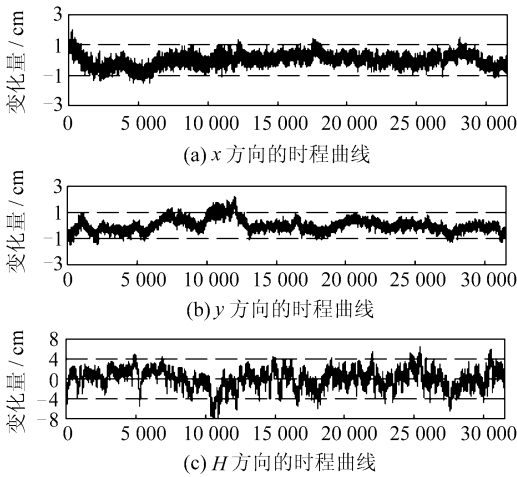


图 2 1 号测点的时程曲线
Fig. 2 3D Data Series of Monitoring Point No. 1

2 结果分析

2.1 坐标变换

由图 1 可见,武汉白沙洲大桥的桥轴线方向与地理方位存在较大偏角,为此,有必要将上述数据解算获得的点位三维坐标 (x_i, y_i, H_i) 进行平面坐标变换,保持 H_i 不变,这样可以得到桥轴线坐标系下的点位三维坐标 (x'_i, y'_i, H'_i) 数据序列。桥轴线平面坐标系的定义为,以自南向北与桥轴线平行方向为桥轴线坐标系的 x 轴,与桥轴线相垂直并且顺水流方向为其 y 轴,以桥面上任意一点为其原点所构成的独立坐标系。

2.2 频谱分析

采用频谱分析法,可以对试验所获取的三维数据序列时程曲线分别进行处理,计算出相应的频谱特征^[9]。由于武汉白沙洲大桥的横向弯曲(第一对称横弯)与竖向弯曲(第一对称竖弯)基频的理论计算数值在 0.2~0.3 Hz 之间,为了图示直观起见,将频谱分析图的横向与纵向的频率范围设置为 0.1~0.4 Hz,竖向的频率范围设置为 0.2~0.5 Hz。图 3 为 1 号测点在横向、纵向和竖向的频谱图。由频谱图不难发现,该大桥跨中的横向与纵向振动频率均为 0.229 9 Hz,但是,横向基频的幅值明显大于纵向基频的幅值,经估算,横向基频的幅值为纵向的 225%;竖向振动的主频为 0.293 2 Hz,其分析幅值虽然能够反映主频,但不太突出,不如横向和纵向的频谱图那样显著,这表明在环境随机振动条件下,车辆等因素对竖向的综合影响较大。

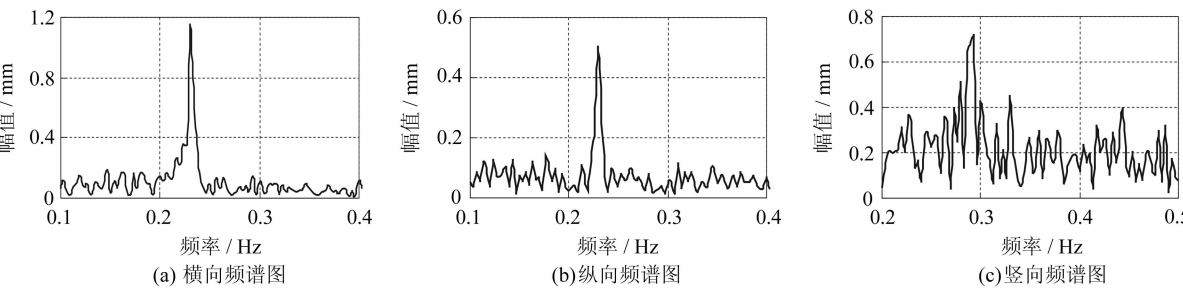


图 3 1 号测点的频谱图
Fig. 3 Spectrum of Point No. 1

同理,2 号测点的三维数据序列经频谱分析(这里限于篇幅,图略),发现其在横向、纵向和竖向的基频特征与 1 号测点完全一样,只不过在振幅(或功率谱)上略有差异。这也表明,大跨度桥梁不同测点的同方向的振动频率是相同的,但每个测点在某一振动频率下的幅值有所不同。则可以假设在大桥上的一定位置布置一定的点数,根据其振幅的不同,就能够描绘出该桥的整个振动模态,以达到了桥梁监测的最终目的。

2.3 结果对比分析

根据大跨度桥梁动力特性的理论与经验计算方法^[10],武汉白沙洲大桥的竖向弯曲(第一对称竖弯)基振频率的理论计算值为 0.282 7 Hz,横向弯曲(第一对称横弯)的基频计算值为 0.212 6 Hz,该数值与上述 GPS 试验的实测值吻合较好,其对比结果见表 1。

表 1 正桥主跨的自振频率计算值
与 GPS 实测值对比/Hz

Tab. 1 Comparison of the Vibration Frequency
Between the Calculations and GPS Measuring Value
for the Main Bridge's Middle Span

	有限单元法	经验公式法	简化计算公式法	GPS 实测值
竖弯基频	0.282 7	0.242 7	0.272 5	0.293 2
横弯基频	0.212 6	—	—	0.229 9

3 结 语

大跨度桥梁的自振频率是反映其动力特性的关键参数,本文采用 GPS 动态监测技术,结合武汉白沙洲大桥工程对大跨度斜拉桥的自振特性测定进行了试验研究,介绍了 GPS 动态监测试验方案、实施过程及其数据处理方法。应用频谱分析法计算得到的横弯与竖弯基频实测值,与该桥的理论设计数值相吻合,充分说明应用 GPS 监测大型桥梁的动态特性是可行的,GPS 动态监测技术是桥梁自振特性测试的一种有效的测量手段。

致谢:参加本文试验工作的还有张斌、杨永波、李晓华等同学,在此一并致谢。

参 考 文 献

1 Lovse J W, Teskey W F, Lachapelle G, et al. Dynamic Deformation Monitoring of a Tall Structure Using GPS Technology. *Journal of Surveying Engineering*. ASCE, 1995, 121(1): 35~40

2 Guo J J, Ge S J. Research of Displacement and Frequency of Tall Building under Wind Load Using GPS. *ION GPS'97*, Missouri, 1997

3 黄丁发,丁晓利,陈永奇,等. GPS 多路径效应影响与结构振动的小波筛分研究. *测绘学报*, 2001,30(1):36~41

4 Huang S X, Liu X L. Data Analysis of GPS Dynamic Monitoring for Tall Structure. *IAG Workshop on Monitoring of Constructions and Local Geodynamic Process*, Wuhan, 2001

5 Ogaja C, Rizos C, Wang J. Toward the Implementation of on-Line Structural Monitoring Using RTK-GPS and Analysis of Results Using the Wavelet Transform. *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, California,USA, 2001

6 徐 良,过静珩. 用 GPS 和随机减量技术对悬索桥实时监测. *清华大学学报·自然科学版*, 2002,42(6): 822~824

7 黄声享,刘 星,杨永波,等. 利用 GPS 测定大型桥梁动态特性的试验及结果. *武汉大学学报·信息科学版*, 2004,29(3):16~19

8 郑治真. *波谱分析基础*. 北京:地震出版社,1979

9 黄声享,刘经南. GPS 监测系统基准形变分析与动态随机模拟. *武汉测绘科技大学学报*, 2000,25(6):485~490

10 李龙安. 大跨度桥梁动力特性近似计算分析. *人民长江*, 2000,31(1): 52~54

第一作者简介:黄声享,教授,博士生导师。现主要从事变形监测与灾害预报、GPS 定位技术及应用的教学与科研工作。代表成果:变形数据分析方法研究;GPS 建筑测量技术;GPS 监测系统数据分析软件设计等。
E-mail: sxhuang@whu. edu. cn

GPS Dynamic Monitoring Experiment and Result Analysis of Long-Span Cable-Stayed Bridge

HUANG Shengxiang¹ WU Wentan¹ LI Peihong²

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

(2 Faculty of Environmental and Architectural Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, 122 Hongqi Road, Ganzhou 341000, China)

Abstract: For the sake of timely appraising the working condition of the bridge, measuring the dynamic characteristics of the bridge structure is very important and necessary. A GPS dynamic monitoring test was carried out in the Wuhan Baishazhou Bridge, which is one of the longest span cable-stayed bridges having been built in China. This paper introduces the experimental implementing scheme and data processing method. The vibration characteristics of the middle span of cable-stayed bridge are availably obtained by using the spectral analytic approach. The measuring results are very identical to the theoretical designed values. The research demonstrates that, with GPS receiver of the high sampling rate and suitable data processing method, the vibration characteristics of the bridge structure can be determined with high accuracy.

Key words: long-span cable-stayed bridge; GPS monitoring; dynamic characteristic; spectral analysis

About the first author: HUANG Shengxiang, professor, Ph.D supervisor. His major research interests are the high precision deformation monitoring and GPS engineering application. His typical achievements are datum deformation analysis for GPS monitoring system; GPS building measuring technique; design for data analysis software of GPS automatic monitoring system, etc.

E-mail: sxhuang@whu.edu.cn

欢迎订阅 2006 年《地球空间信息科学学报(英文版)》

《地球空间信息科学学报》为我国惟一的英文版测绘专业学术期刊。其宗旨是:立足国内,面向国际,通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果,促进国内外学术交流。本刊内容包括综述和展望、学术论文和研究报告、本领域重大科技新闻等,涉及测绘研究的主要方面,尤其是数字摄影测量与遥感、全球定位系统、地理信息系统及其集成等。收录本刊的数据库包括 CAS、PK 等,读者对象为测绘及相关专业科研人员、教师、研究生等。

本刊为季刊,国内外公开发行。邮发代号:38-348,国外代号:QR1556。A4 开本,80 面,定价 10 元/册,逢季末月 5 日出版。漏订的读者可与编辑部联系补订。