

文章编号: 1007-3817(2008)05-0003-03

中图分类号: P228.4

文献标志码: B

# 频谱分析在虎门大桥动态监测中的应用研究

喻永平<sup>1</sup> 方 锋<sup>1</sup> 林 鸿<sup>1</sup> 欧海平<sup>1</sup> 杨 光<sup>1</sup> 孙晓明<sup>2</sup>

(1 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州市建设大马路 10 号, 510060; 2 青岛市勘察测绘研究院, 青岛市拜泉路 95 号, 266035)

**摘 要** 采用了频谱分析法对虎门跨海悬索大桥进行安全监测, 通过利用 GPS RTK 技术方法获取虎门大桥在台风激励下的动态监测数据, 对动态监测数据进行时程分析和频谱分析, 获取虎门悬索大桥的振动特性, 得到了大桥的运营特征和实时位移特征。

**关键词** 频谱分析; 快速傅立叶变换; GPS RTK; 时程分析

环境激励下的位移特性是桥梁抗震的重要特性之一。目前, 对桥梁结构进行动力特性试验以获取结构动力特性参数的方法主要有工频激励法和环境随机振动法两类。由于受外界干扰, 虎门大桥桥梁结构经常处于微小而不规则的振动之中。桥梁环境激励动态特性常用的监测方法有加速度传感器法、激光铅直仪法、全站仪(测量机器人)法, 这些传统监测方法因受其能力限制, 已不能满足桥梁等大型建筑物的实时动态监测要求。为此, 设计虎门悬索大桥在环境激励下动态特性的 GPS 监测方案, 旨在探索应用 GPS RTK 技术实时监测虎门大桥在环境激励下的动态特性的新方法, 加强虎门大桥的日常安全监控工作, 及时掌握其运营特征和实时位移特征, 并由此有针对性地桥梁安全进行准确的评估, 面对可能潜在的风险采取及时、有效的应对措施, 以确保大桥的安全运营<sup>[1-3]</sup>。

## 1 监测方案

虎门大桥总投资接近 30 亿元, 是由我国自行设计建造的第一座特大型跨海悬索大桥, 被誉为“世界第一跨”, 它以高难度的建造技术和雄伟的气势而闻名于世。大桥横跨珠江干流狮子洋出海航道, 全长 15.76 km, 主桥长 4.6 km, 桥面双向六车道, 主跨为 888 m, 矢跨比 1/10.5, 双向六车道, 中央设 1.5 m 的分车带。建立稳定、可靠、高效的虎门大桥 GPS 实时动态监控系统, 以确保大桥的安全运营, 具有重要的意义。

为获取虎门大桥在环境激励下动态监测数据, 对桥梁运行状态进行监控, 采用 GPS RTK 技术进行监测。GPS RTK 技术基于 GPS 载波相位差分技术, 已能达到相当的精度和采样频率, 具有受外界影响小、可以全天候 24 小时测量的优

## 参考文献

- [1] Tsui, J B Y. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 2005
  - [2] 刘基余. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1993
  - [3] Elliott D K, Christopher J H. Understanding GPS: Principles and Applications[M]. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2005
  - [4] 吴大正. 信号与线性系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
  - [5] 张旭东, 陆明泉. 离散随机信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
  - [6] Borre K, Akos D M, Bertelsen N, et al. A Software-defined GPS and Galileo Receiver: A Single-frequency Approach[M]. Boston: Birkhäuser Boston, 2006
  - [7] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 收稿日期: 2008-05-19。  
第一作者简介: 李伟, 硕士研究生, 现主要研究 GPS 软件接收机及其应用。  
E-mail: lwyouhuihou@126.com

## SIGNAL ANALYZATION OF SOFTWARE GPS RECEIVER

LI Wei HU Congwei

(Department of surveying and Geo-Informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

**ABSTRACT** The composition and the self-character of GPS signal are introduced. Then an in-depth research of the signal pretreatment procedure including sampling scheme and sampling frequency selection in the design of the software GPS receiver, three character depiction figures are shown with the calculation of real data in Matlab, followed by the analyzation of these three characters of intermediate frequency.

**KEY WORDS** software GPS receiver; intermediate frequency; signal character

点。根据虎门悬索桥的结构和受力特点,认为  $L/2$ 、 $L/4$ 、 $L/8$  ( $L$  是桥梁的长度)是位移变化的关键点,因此,把测量点置于这些点上。桥面及桥塔规划有 12 个监测点,考虑到桥梁的对称性,目前一期工程只安装 7 个测量点。基准站置于大桥管理中心楼顶。GPS 监测站分布如图 1 所示。GPS 动态

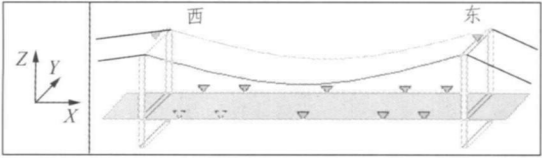


图 1 GPS 监测站分布

监测时间为 2006 年 7 月 7 日的 0 点 10 分至 0 点 30 分,接收机采样率设置为 1 Hz,卫星高度角设置为  $15^\circ$ ,按照 GPS RTK 测量模式连续观测 20 min,并同步观测了气象条件<sup>[4,5]</sup>。

2 监测数据结果和处理

按照整周模糊度动态解算方法 (Ambiguity Resolution On-the-fly) 对所有观测数据进行处理。其思路是将大桥管理中心楼顶的 GPS 点作为固定基准,获得监测点 1~7 号站相对于基准点在 WGS-84 坐标系下每个历元的三维坐标 ( $B_i, L_i, H_i$ ),台风激励下的 GPS 监测数据如表 1 所示,其中  $t$  为历元,  $N$  为点名,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为桥面坐标。

表 1 台风激励下的 GPS 监测数据

$t$	$N$	$X$	$Y$	$Z$
00:10:00.996	1 001	4 290.797	248.884	79.283
00:10:01.996	1 002	4 290.795	248.882	79.358
00:10:02.996	1 003	4 290.789	248.888	79.299
00:10:03.996	1 004	4 290.788	248.899	79.253
00:10:04.996	1 005	4 290.794	248.899	79.212
00:10:05.996	1 006	4 290.791	248.899	79.188
00:10:06.996	1 007	4 290.794	248.892	79.232
00:10:07.996	1 008	4 290.791	248.900	79.261
00:10:08.996	1 009	4 290.795	248.883	79.304
...	...	...	...	...

对获取的 1 200 个历元观测数据进行投影,将大地坐标变换为桥梁平面坐标 ( $X_i, Y_i, H_i$ ),从而得到监测点的桥梁坐标序列。这里以站点 2 的观测数据为例说明。站点 2 的基准坐标已知,其坐标为 (4 290.800, 248.770, 78.900)。获取该站点每个历元监测坐标,共计 1 200 个三维坐标值,将监测获得的坐标值与基准坐标差分,并绘制了三个不同方向的时程曲线。时程曲线如图 2 所示。

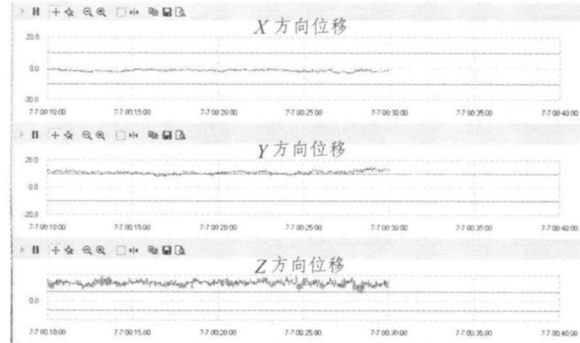


图 2 时程曲线

由图 2 可以看出:整个时程曲线的变化量,南北方向 ( $X$  方向)在  $\pm 3$  cm 左右;东西方向 ( $Y$  方向)一般在  $\pm 3$  cm 左右,最大不超过  $\pm 3$  cm;垂直方向 ( $Z$  方向)一般在  $\pm 5$  cm 左右,最大不超过  $\pm 6$  cm。这样的时程曲线结果符合动态 GPS 测量的正常精度,表明 GPS 观测质量是好的,数据处理结果可靠。其他的观测数据,均具有相类似的数据处理解算结果。

3 频谱分析及其结果

频谱分析是动态观测时间序列数据分析研究的一个重要途径,该方法是将时间域内的观测序列通过傅立叶变换转换到频率域内进行分析。其不仅有助于确定时间序列数据的准确周期,并且判别其中的隐蔽性和复杂性的周期数据、确定趋势项等。

对于时间序列,傅立叶级数展开式为:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(2\pi n/Tt + \Phi_n) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(2\pi f_0 t + \Phi_n) \tag{1}$$

式(1)表明,各次谐波的频率分别是基波频率  $f_0$  的整数倍。

直流分量幅值为:

$$A_0 = C_0, A_0 = \int_0^T x(t)dt. \tag{2}$$

$$a_n = 2/T \int_0^T x(t) \cos 2\pi n f_0 t dt \tag{2}$$

$$b_n = 2/T \int_0^T x(t) \sin 2\pi n f_0 t dt \tag{3}$$

各频率分量幅值为:

$$A_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \tag{4}$$

各频率分量相位为:

$$\varphi_n = \arctg(b_n/a_n) \tag{5}$$

式中,  $a_n, b_n, A_n, \varphi_n$  为信号的傅立叶系数,表示信号在频率  $f_n$  处的成分大小。

习惯上将计算结果用图形的方式进行表示,以  $f_n$  为横坐标、 $a_n, b_n$  为纵坐标画图,绘出的曲线图称为实频-虚频谱图;以  $f_n$  为横坐标、 $A_n, \varphi_n$  为纵坐标画图,绘出的曲线图称为幅值-相位谱;以  $f_n$  为横坐标、 $A_n^2$  为纵坐标画图,绘出的曲线图称为功率谱。

式(1)表明复杂周期数据是由一个直流分量  $A_0$  和无限个不同频率的谐波分量所组成的。

在实际应用中,通常观测时离散时间序列数据,应用频谱分析法求频率和谱值 ( $A_n, \varphi_n$ ),实际就是求其系数。对于离散时间序列,设观测时间  $T$  内的采样数为  $N$ ,采样间隔为  $\Delta t = T/N$ ,  $t_i$  时刻的观测值为  $X(t_i)$ ,则:

$$A_0 = (\sum_{i=0}^{N-1} x(t_i))/N \tag{6}$$

$$a_n = 2(\sum_{i=0}^{N-1} x(t_i) \cos 2\pi n i/N)/N \tag{7}$$

$$b_n = 2(\sum_{i=0}^{N-1} x(t_i) \sin 2\pi n i/N)/N \tag{8}$$

式中,  $n=1, 2, \dots, M$ ,  $M$  应满足条件:  $N \geq 2M+1$ 。式(6)~式(8)是离散时间序列的有限傅立叶级数计算公式。频谱是构

成信号的各项频率分量的集合,它完整地表示了信号的频率结构,即信号由哪些谐波组成,各谐波分量的幅值大小及初始相位,从而揭示了信号的频率信息。

采用频谱分析法,对 GPS 监测数据时间序列分别进行处理,可以计算其相应的频谱特征<sup>[6,7]</sup>。

绘制了站点 2 的 (X,Y,Z)三个不同方向的频谱曲线。频谱曲线如图 3 所示。其曲线所对应的频率范围为 0.001~0.5 Hz。

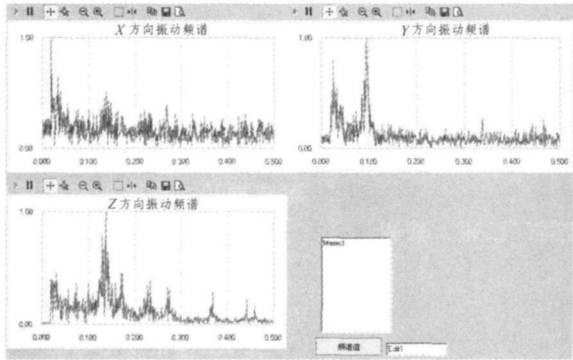


图 3 频谱曲线

从图 3 中可以看出,虎门大桥的六阶频率。虎门大桥也同时采用加速度计和有限元获得了其频谱特性,对于 GPS、加速度计和有限元所得频率进行了比较,比较结果如表 2 所示。GPS RTK 技术得到的结果与其比较,两者基本一致,这

表 2 比较结果

序号	GPS	加速度计	有限元
1	0.094 7	0.111 9	0.088 2
2	0.137 7	0.134 4	0.138 7
3	0.172 9	0.170 5	0.171 5
4	0.233 4	0.232 5	0.225 1
5	0.266 8	0.276 8	0.276 5
6	0.367 1	0.368 7	0.368 2

说明 GPS RTK 技术用于虎门大桥动态安全监测是可行的。需要注意的是该数值作为虎门大桥固有震动频谱一种参考,不能作为精确的数值。

#### 4 结束语

采用双频 GPS 接收机,应用 GPS RTK 定位技术方法,

对虎门大桥进行动态监测,获取了 GPS 动态监测资料,通过严密的数据解算,并根据离散傅立叶变换的频谱分析方法,计算得到了大桥在台风激励下的 1~6 阶主频率。通过本大型工程项目实践,基于 GPS RTK 技术获得的跨海悬索大桥的振动频率,能够准确反映虎门大桥的环境激励动态特性,这对于加强虎门大桥的日常安全监控工作,及时掌握其运营特征和实时位移特征,并由此有针对性地对桥梁安全进行准确的评估,面对可能潜在的风险采取及时、有效的应对措施,以确保大桥的安全运营,具有重要作用。

#### 参考文献

[1] 刘星,黄声享,姚刚. 基于 GPS 的高层建筑环境激励动态特性研究及应用[J]. 工程勘察,2006,(2):61-63

[2] 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

[3] 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[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2004,29(3):198-200

[4] 陈永奇,吴子安,吴中如. 变形监测分析与预报[M]. 北京:测绘出版社,1998

[5] 黄声享,尹晖,蒋征. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002

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

[7] Guo J J, Ge S J. Research of Displacement and Frequency of Tall Building under Wind Load Using GPS[C]. ION GPS '97, Missouri, 1997

[8] 黄声享,吴文坛,李沛鸿. 大跨度斜拉桥 GPS 动态监测试验及结果分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2005,30(11):999-1002

[9] 张斌,黄声享,李晓华. 基于 GPS 技术的大桥自振频率测量研究[J]. 测绘信息与工程,2005,30(5):43-44

收稿日期:2008-05-13。

第一作者简介:喻永平,博士,现主要研究时空动态信息的理论和方法。

E-mail:yopiyu@163.com

## APPLICATION OF SPECTRUM ANALYSIS IN DYNAMIC MONITORING OF HUMEN BRIDGE

YU Yongping<sup>1</sup> FANG Feng<sup>1</sup> LIN Hong<sup>1</sup> OU Haiping<sup>1</sup>  
YANG Guang<sup>1</sup> SUN Xiaoming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, 10 Jianshedama Road, Guangzhou 510060, China;  
<sup>2</sup> Qingdao Prospecting and Surveying Research Institute, 95 Baiquan Road, Qingdao 266035, China)

**ABSTRACT** The spectrum analysis is introduced into the safe monitoring of Humen Bridge. The dynamic monitoring data under typhoon prompting is gained through GPS RTK. The time interval and spectrum analysis is used to analyze the dynamic monitoring data. The vibration characteristic of bridge is acquired. The management and real time displacement characteristic have been got.

**KEY WORDS** spectrum analysis; FFT; GPS RTK; time interval analysis