

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.010

基于 GPS 一机多天线方法的大型桥梁动态变形监测

何秀凤,贾东振,刘志平

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 为解决目前大型桥梁动态变形监测成本过高及大型桥梁短时间内动态变化大的问题,建立了可应用于大型桥梁的 GPS 一机多天线动态变形监测系统,解决了工程实现的关键技术问题,进而根据桥梁动态变化特点提出了 GPS 双历元动态变形监测方法,并将该监测系统应用于杭州钱塘江三桥试验.连续数月稳定运行表明,该系统具有全自动、计算精度高等特点,能满足大型桥梁实时动态变形监测的要求.

关键词 GPS;一机多天线;大型桥梁;变形监测;精密定位

中图分类号 U441;P228.4 **文献标志码** A **文章编号** 1000-1980(2011)01-0044-05

桥梁结构内部应力、应变监测对大跨度桥梁安全运营十分重要,但对于全面监测与分析桥梁安全还不能满足要求,必须实时测定桥梁宏观几何量的变化及其大小才能更直观地判断桥梁的安全状态^[1].由于大跨度桥梁的变形快且幅度大,传统的变形监测手段难以满足变形监测要求.如对全站仪而言,存在测点不同步、实时性较差、受天气条件影响且不能满足恶劣天气情况下的监测要求等缺点^[1-2].对位移传感器而言,存在横向位移难以测量、难以接近的点无法测量以及受大气环境条件影响等缺点^[2].

GPS 以其精度高、速度快、全天候等优点成为当今最先进的变形监测手段之一,并成功应用于多座桥梁的变形监测^[2-7].但这些应用均采用每个监测点放置 1 台 GPS 接收机的常规监测模式,在监测点较多情况下,桥梁变形监测系统设备投入很多,成本高.如果能采用 GPS 一机多天线方法进行桥梁的动态变形监测,可大大降低变形监测系统成本^[6-7].

目前 GPS 一机多天线方法已在边坡、大坝等变形监测中取得了显著应用效果^[8-11].但桥梁处于动态环境,并且影响桥梁状态变化的因素比较复杂,风力、温度、湿度以及来往车辆动荷载等都可造成桥梁瞬时状态的变化,因而桥梁的变形监测不同于静态条件下的边坡和大坝变形监测.此外,边坡和大坝的变形量均较小,但桥梁短时间内可发生较大变形,因而大坝和边坡变形监测采用的精密定位方法和静态数据处理方法无法直接应用于桥梁动态变形监测.针对桥梁动态变化特点,笔者提出 GPS 双历元动态变形监测方法,并对杭州钱塘江三桥进行试验研究,设计并实现了桥梁远程自动化 GPS 一机多天线动态变形监测系统.

1 GPS 一机多天线方法

常规的 GPS 变形监测方法是每个监测点上都安装 GPS 接收机,当监测点很多时,监测系统的成本会很高.如果采用 GPS 一机多天线方法^[9],即 1 台接收机连接多个 GPS 天线,每个监测点上只安装天线,不安装 GPS 接收机,多个监测点共用 1 台接收机,则监测系统的成本可因接收机数量的减少而大幅下降.图 1 是 GPS 一机多天线方法示意图.

基于这种思路,笔者研制开发了 GPS 一机多天线控制器.该控制器将无线通讯的微波开关技术与计算机实时控制技术有机

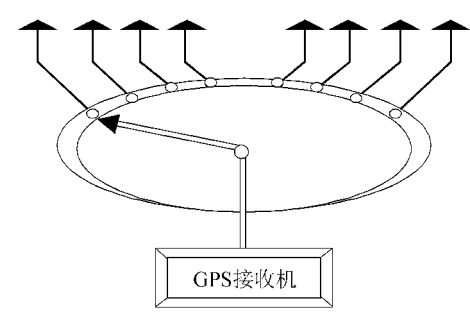


图 1 GPS 一机多天线示意图
Fig. 1 GPS multi-antenna method

结合,仅用 1 部 GPS 接收机就可以同时互不干扰地接收到 8 个 GPS 天线传输来的信号.每个 GPS 天线与多天线控制器内的微波开关相应通道连接,微波开关的 8 个信号通道的通断状态受微处理器和控制电路的实时控制,通过自行开发的计算机软件定时控制微波开关电路中各通道的通或断.

GPS 多天线控制器以嵌入式工业控制机 PC-104 作为控制器的核心,并集成了微波开关和 GPS-OEM 板,能够确保整个系统在恶劣野外环境下长期连续工作.此外,相应控制软件能有效地对 GPS 原码观测数据进行存储与传输.

2 GPS 双历元动态变形监测方法

由于桥梁处于动态环境,受风力、温度、湿度以及来往车辆荷载等因素的影响,桥梁短时间内可能产生较大变形,因而大坝和边坡等静态变形监测方法不适用于桥梁动态监测.针对桥梁动态变化特点,笔者提出一种 GPS 双历元动态变形监测方法.如图 2 所示, R 为基准点, b 为基线向量, M , M' 分别为监测点初始位置与变形后的位置, $d(t_i)$ 为历元 t_i 的变形向量, δd 为 t_{i+1} 相对 t_i 发生的动态变形, s^j, s^k 为双历元基-测站共视卫星.

设 s^j 为参考卫星,则由图 2 可以建立历元 t_i 的几何距离双差方程

$$\rho_{RM}^{jk}(t_i) = [\rho_M^k(t_i) - \rho_R^k(t_i)] - [\rho_M^j(t_i) - \rho_R^j(t_i)] \quad (1)$$

$$\rho_{RM'}^{jk}(t_i) = [\rho_{M'}^k(t_i) - \rho_R^k(t_i)] - [\rho_{M'}^j(t_i) - \rho_R^j(t_i)] \quad (2)$$

$$\rho_{MM'}^{jk}(t_i) = [\rho_{M'}^k(t_i) - \rho_M^k(t_i)] - [\rho_{M'}^j(t_i) - \rho_M^j(t_i)] \quad (3)$$

若波长为 λ ,双差相位观测值为 $\varphi_{RM'}^{jk}$,双差整周模糊度为 $N_{RM'}^{jk}$,则由式(1)~(3)可得双差几何距离 $\rho_{MM'}^{jk}$ 计算式为

$$\rho_{MM'}^{jk}(t_i) = \lambda [\varphi_{RM'}^{jk}(t_i) + N_{RM'}^{jk}(t_i)] - \rho_{RM}^{jk}(t_i) \quad (4)$$

对历元 t_i 时刻的卫星 s^j 和测站 M' 之间的几何距离 $\rho_{M'}^j(t_i)$ 在 M 初始时刻进行泰勒展开,并取至一次项可得

$$\rho_{M'}^j(t_i) - \rho_M^j(t_i) = - (l_M^j(t_i), m_M^j(t_i), n_M^j(t_i)) \cdot d(t_i) \quad (5)$$

式中

$$l_M^j(t_i) = \frac{[x^j(t_i) - x_M]}{\rho_M^j(t_i)}$$

$$m_M^j(t_i) = \frac{[y^j(t_i) - y_M]}{\rho_M^j(t_i)}$$

$$n_M^j(t_i) = \frac{[z^j(t_i) - z_M]}{\rho_M^j(t_i)}$$

$$d(t_i) = (x_{M'}(t_i) - x_M, y_{M'}(t_i) - y_M, z_{M'}(t_i) - z_M)^T$$

考虑卫星 s^k 和测站 M' 于历元 t_i 形成的几何距离 $\rho_{M'}^k$,同理可得

$$\rho_{M'}^k(t_i) - \rho_M^k(t_i) = - (l_M^k(t_i), m_M^k(t_i), n_M^k(t_i)) \cdot d(t_i) \quad (6)$$

将式(6)和式(5)求差,可得

$$\rho_{MM'}^{jk}(t_i) = - (l_M^{jk}(t_i), m_M^{jk}(t_i), n_M^{jk}(t_i)) \cdot d(t_i) \quad (7)$$

式中

$$l_M^{jk}(t_i) = l_M^k(t_i) - l_M^j(t_i)$$

$$m_M^{jk}(t_i) = m_M^k(t_i) - m_M^j(t_i)$$

$$n_M^{jk}(t_i) = n_M^k(t_i) - n_M^j(t_i)$$

与式(7)的推导类似,可得几何双差距离 $\rho_{MM'}^{jk}(t_{i+1})$ 与变形向量 $d(t_{i+1})$ 之间关系式

$$\rho_{MM'}^{jk}(t_{i+1}) = - (l_M^{jk}(t_{i+1}), m_M^{jk}(t_{i+1}), n_M^{jk}(t_{i+1})) \cdot d(t_{i+1}) \quad (8)$$

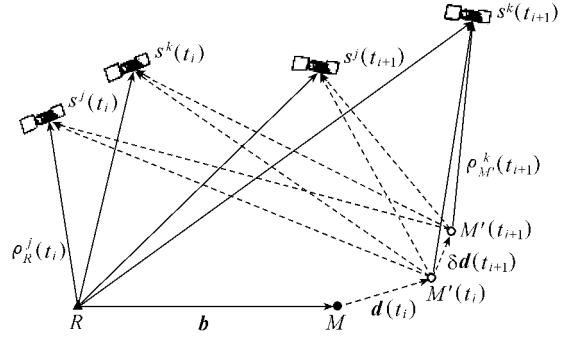


图 2 GPS 双历元动态变形监测示意图

Fig. 2 GPS double-epoch dynamic deformation monitoring

将式(8)与式(7)求差,并化简可得

$$\delta \rho_{MM}^{jk}(t_{i+1}) = -(\delta l_M^{jk}(t_{i+1}), \delta m_M^{jk}(t_{i+1}), \delta n_M^{jk}(t_{i+1})) \cdot d(t_i) - (l_M^{jk}(t_{i+1}), m_M^{jk}(t_{i+1}), n_M^{jk}(t_{i+1})) \cdot \delta d(t_{i+1}) \quad (9)$$

式(9)中, δ 表示历元间差分算子,即

$$\begin{aligned} \delta l_M^{jk}(t_{i+1}) &= l_M^{jk}(t_{i+1}) - l_M^{jk}(t_i) \\ \delta m_M^{jk}(t_{i+1}) &= m_M^{jk}(t_{i+1}) - m_M^{jk}(t_i) \\ \delta n_M^{jk}(t_{i+1}) &= n_M^{jk}(t_{i+1}) - n_M^{jk}(t_i) \\ \delta d(t_{i+1}) &= d(t_{i+1}) - d(t_i) \\ \delta \rho_{MM}^{jk}(t_{i+1}) &= \rho_{MM}^{jk}(t_{i+1}) - \rho_{MM}^{jk}(t_i) \end{aligned}$$

假设 t_i, t_{i+1} 为连续跟踪历元,即 $\delta N_{RM}^{jk}(t_{i+1}) = 0$,顾及式(4)可得

$$\delta \rho_{MM}^{jk}(t_{i+1}) = \lambda \delta \varphi_{RM}^{jk}(t_{i+1}) - \delta \rho_{RM}^{jk}(t_{i+1}) \quad (10)$$

若在某 2 个连续跟踪历元,基准站 R 与监测站 M 同步观测 n 颗卫星,并顾及在动态变形监测中式(9)右端第 1 项为微小量可以忽略,则由式(9),(10)可建立误差方程组

$$V(t_{i+1}) = B(t_{i+1}) \cdot \delta d(t_{i+1}) + L(t_{i+1}) \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} V(t_{i+1}) &= (V_1(t_{i+1}), \dots, V_{n-1}(t_{i+1}))^T \\ B(t_{i+1}) &= \begin{bmatrix} l_M^{12}(t_{i+1}) & m_M^{12}(t_{i+1}) & n_M^{12}(t_{i+1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_M^{1n}(t_{i+1}) & m_M^{1n}(t_{i+1}) & n_M^{1n}(t_{i+1}) \end{bmatrix} \\ L(t_{i+1}) &= (\delta \rho_{MM}^{12}(t_{i+1}), \dots, \delta \rho_{MM}^{1n}(t_{i+1}))^T \end{aligned}$$

若观测值 $L(t_{i+1})$ 随机模型记为 D_L ,则动态变形的最小二乘参数估计为

$$\hat{\delta d} = -(B^T D_L^{-1} B)^{-1} B^T D_L^{-1} L \quad (12)$$

3 桥梁 GPS 动态变形监测系统设计与实现

3.1 概况

试验研究的钱塘江三桥位于杭州市钱塘江,距杭州市中心约 3 km,北靠钱江新城,与杭州火车站相接,南联滨江区,与杭州萧山国际机场相通.钱塘江三桥总长 3 500 m,南北高架引桥 4 420 m,桥面总宽 29.5 m,航道上主跨 168 m,2 座索塔高 80 m,主桥 1 280 m,主桥是 2 座布置相同而又相互独立的 6 孔 1 联独塔单索面预应力混凝土斜拉桥.该桥于 1993 年开始建设,1996 年建成通车,是杭州老城区与滨江、萧山间交通要道.

3.2 系统组成及监测点布设

基于 GPS 一机多天线的桥梁变形监测系统主要包括桥面监测点、数据传输和控制中心 3 部分,系统组成如图 3 所示.

针对钱塘江三桥特点,并结合桥梁设计专家建议,在桥面中心和塔顶共设置 4 个 GPS 监测点,4 个测点均位于桥南端特征部位,分别是南端主塔的塔顶点 Q_1 ,南主塔至斜拉索末端 1/2 处的索下点 Q_2 ,斜拉索末端的索末点 Q_3 以及主桥 1/2 处 Q_4 ,各监测点具体分布如图 4 所示.GPS 基准站布设于桥南岸引桥下三桥管理处的楼顶,站点稳定可靠.

3.3 桥梁三维位移 GPS 动态监测信息显示

图 4 中的 4 个监测点上均安装有 GPS 天线,天线通过同轴电缆连接至位于南主塔北向约 102 m 处采集中心内的 GPS 一机多天线控制器.由于微弱的 GPS 信号在传输过程中会产生信号衰减,且 GPS 信号衰减随着同轴电缆长度的增加而变得更严重,从而使 GPS 不能正常工作.笔者研制开发的低噪声信号放大器,

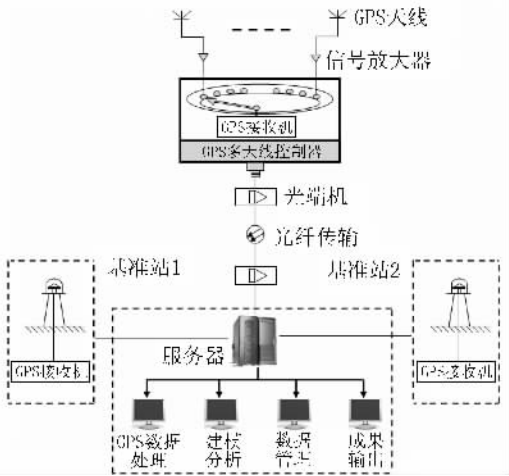


图 3 GPS 一机多天线变形监测系统

Fig. 3 GPS multi-antenna deformation monitoring system

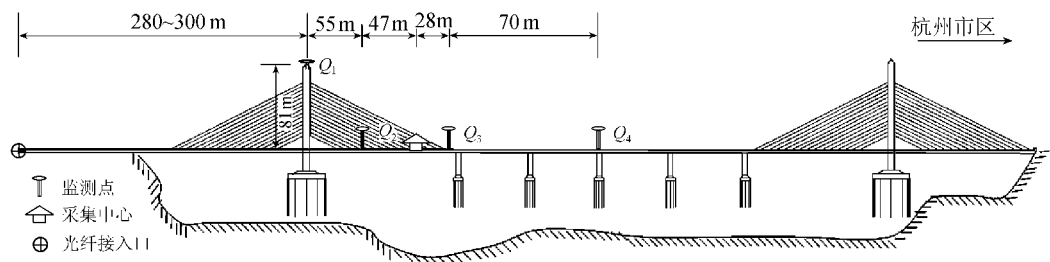


图 4 钱塘江三桥 GPS 监测点位布设

Fig. 4 Layout of GPS monitoring points for Qiantang River 3rd Bridge

可使 GPS 天线与多天线控制器之间的传输距离达几 km. 通过大桥上已有的光纤传输系统, 将采集中心的 GPS 原码监测数据实时地传输到三桥管理处的监控中心, 然后利用自主开发的 GPS 精密定位解算软件, 自动解算测点位移并实时绘制各监测点变形信息. 图 5 显示了钱塘江三桥测点三维位移动态变化信息.

4 结果与分析

基于 GPS 的连续观测值, 利用卫星截止高度角为 15° 的 GPS 观测值, 每个监测点的采样频率设置为 2 Hz. 采用自主开发的自动化解算软件, 得出各监测点在桥面坐标系下的三维位移量, 并存储到数据库供查询和分析. 限于篇幅, 图 6 只显示了 4 个测点 z 方向位移变化过程.

由图 6 可以看出 塔顶(Q_1) 点在 z 方向的位移在 -25 ~ 25 cm 之间变化, 变化量较大, 桥面上主塔至索末

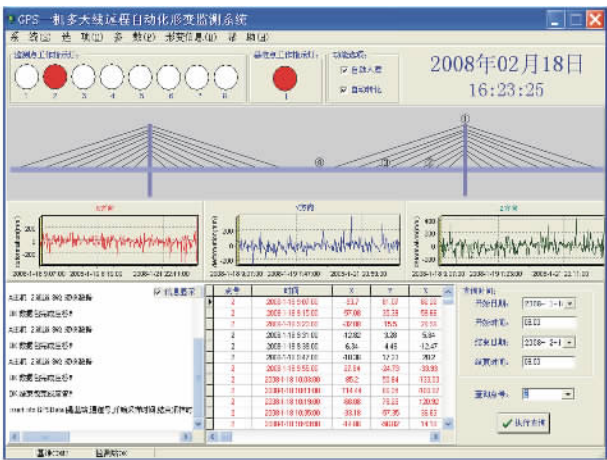
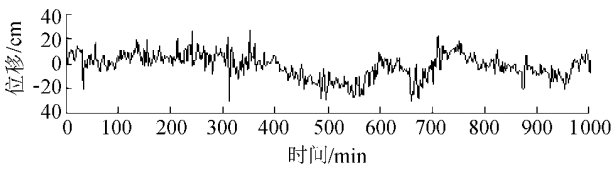
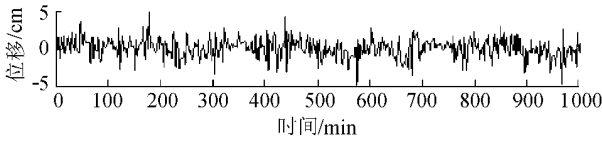


图 5 钱塘江三桥测点三维位移动态变化信息

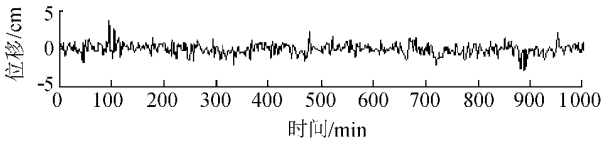
Fig. 5 Dynamic deformation information of 3D displacement at measuring points of Qiantang River 3rd Bridge



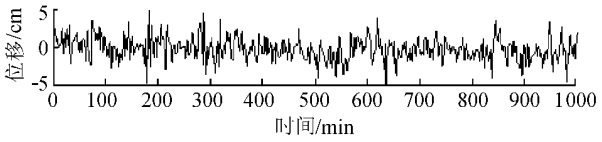
(a) Q_1 监测点



(b) Q_2 监测点



(c) Q_3 监测点



(d) Q_4 监测点

图 6 桥梁 z 方向位移变化过程

Fig. 6 Variations of displacement of Qiantang River 3rd Bridge along z direction

1/2 处(Q_2)、索末(Q_3)、主桥 1/2 处(Q_4) 3 点 z 方向位移在 -5 ~ 5 cm 之间变化, 变化量较小. 在这 3 点中, Q_2 点位移在 -2.5 ~ 2.5 cm 之间变化, 仅有极少时刻位移较大, 接近 5 cm; Q_3 点由于受到斜拉索的牵拉且接近大桥桥墩, z 方向位移变化小且稳定, 位移在 -1 ~ 1 cm 之间变化, 仅有极少时刻位移较大, 接近 4 cm; Q_4 点处于大桥的 1/2 处, 位移变化也较小, 大部分时刻位移位于 -3 ~ 3 cm 之间.

5 结 语

与传统测量方法相比, 采用 GPS 监测大型桥梁的三维动态变形具有独特优势, 但由于高精度测量型 GPS 接收机价格高, 当桥梁上布设的监测点较多时, 监测系统成本会很高. 采用基于 GPS 一机多天线方法的桥梁动态变形监测系统, 可大大降低变形监测系统成本. 针对桥梁处于动态环境的特点, 笔者提出了一种 GPS 双历元

变形监测方法,满足了桥梁短时间内动态变化监测的需要。该监测系统连续多月的工作情况表明,系统稳定可靠,数据处理实时性强,数据解算结果准确,整个桥梁的三维动态变形监测系统的运行达到了预期效果。

参考文献:

- [1] 吴栋材. 大跨度斜拉桥变形监测研究[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 278-281. (WU Dong-cai. Research on deformation monitoring of large cable-stayed bridge[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2002, 31(3): 278-281. (in Chinese))
- [2] 徐良, 过静翥. 用 GPS 和随机减量技术对悬索桥实时监测[J]. 清华大学学报 自然科学版, 2002, 42(6): 822-824. (XU Liang, GUO Jing-jun. On-line monitoring of suspension bridges using the GPS and the random decrement technique[J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology, 2002, 42(6): 822-824. (in Chinese))
- [3] NAKAMURA S. GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(12): 1413-1419.
- [4] 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. (HUANG Sheng-xiang, WU Wen-tan, LI Pei-hong. GPS dynamic monitoring experiment and result analysis of long-span cable-stayed bridge[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(11): 999-1002. (in Chinese))
- [5] 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. (HUANG Sheng-xiang, LIU Xing, YANG Yong-bo, et al. Experiment and result for measuring dynamic characteristics of large bridge using GPS[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(3): 198-200. (in Chinese))
- [6] 徐良, 江见鲸, 过静翥. 广州虎门悬索桥的模式分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 25-27. (XU Liang, JIANG Jian-jing, GUO Jing-jun. Modal analysis of humen suspension bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(1): 25-27. (in Chinese))
- [7] 李宏男, 伊廷华, 伊晓东, 等. 采用 GPS 与全站仪对大跨斜拉桥进行变形监测[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 3-13. (LI Hong-nan, YI Ting-hua, YI Xiao-dong, et al. Integration of GPS and total station technology for deformation monitoring of long-span bridge[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(1): 3-13. (in Chinese))
- [8] 贾东振, 何秀凤. 基于 GPS 一机多天线技术的尾矿坝全自动变形监测系统[J]. 水力发电, 2007, 33(12): 95-98. (JIA Dong-zhen, HE Xiu-feng. Automatic deformation monitoring of a tailing dam using GPS multi-antenna system[J]. Water Power, 2007, 33(12): 95-98. (in Chinese))
- [9] 何秀凤, 桑文刚, 贾东振. 基于 GPS 的高边坡形变监测方法[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 746-750. (HE Xiu-feng, SANG Wen-gang, JIA Dong-zhen. Deformation monitoring of steep rock slopes by means of GPS[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 746-750. (in Chinese))
- [10] 桑文刚, 何秀凤, 许斌, 等. 基于 GPS 多天线技术的远程自动化高边坡监测系统研究[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 63-65. (SANG Wen-gang, HE Xiu-feng, XU Bin, et al. Multi-antenna GPS technique-based remote monitoring system for steep slopes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1): 63-65. (in Chinese))
- [11] HE Xiu-feng, SANG Wen-gang, CHEN Yong-qi, et al. Steep-slope monitoring: GPS multiple-antenna system at xiaowan dam[J]. GPS World, 2005, 16(11): 20-25.

Application of GPS multi-antenna method to dynamic deformation monitoring of long-span bridges

HE Xiu-feng, JIA Dong-zhen, LIU Zhi-ping

(College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to solve the problems of high cost of dynamic deformation monitoring and large dynamic change in short time of long-span bridges, a dynamic deformation monitoring system based on the GPS multi-antenna method was developed. The composition of the system and the key techniques were introduced. The GPS double-epoch method was proposed according to the dynamic deformation characteristics of long-span bridges. The proposed deformation monitoring system was applied to the Qianjiang River 3rd Bridge in Hangzhou. The results of successive months of stable operation show that the GPS multi-antenna method is characterized by automation and high precision, and it can meet the requirements of real-time dynamic deformation monitoring of large-span bridges.

Key words: GPS; multi-antenna; long-span bridge; deformation monitoring; precision positioning