

基于 GPS 的大跨悬索桥动态特性监测及分析

乔 燕¹, 孙传智^{1,2}, 缪长青²

(1. 宿迁学院 建筑工程系, 江苏 宿迁 223800; 2. 东南大学 混凝土及预应力
混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

Monitoring Dynamic Characteristics of Long-span Suspension Bridge Based on GPS Technology

QIAO Yan, SUN Chuanzhi, MIAO Changqing

摘要: 桥梁结构不同位置的动态位移能够实时反应悬索桥结构的受力性能和工作状态。介绍润扬大桥健康监测系统中 GPS 子系统布设方案, 该系统用于监测大桥在各种荷载作用下的变形。分析桥梁结构在不同环境荷载作用下的结构反应。对 GPS 监测数据进行频谱分析, 识别出结构的基频, 并与有限元模型分析结果及振动传感器所测数据分析结果相比较, 说明利用 GPS 可以有效、准确地监测桥梁工作状态, 为该桥的承载能力、工作状态和耐久性评估提供参考依据。

关键词: GPS; 大跨悬索桥; 监测; 动态特性

一、引 言

大跨度悬索桥作为一种柔性结构, 在运营期间, 由于材料性能退化, 其强度和刚度会降低, 同时由于各种极端环境, 或遭受意外撞击, 极易发生过大变形而使结构不能处于正常的工作状态, 或产生局部破坏, 甚至整体破坏。因此, 对结构的性能进行实时地监测, 对可能发生的灾害进行预测, 发现结构损伤, 评估其是否安全, 从而及时对结构进行维护, 已成为现代大跨度桥梁工程的必然要求。

大跨度桥梁结构在各种因素激励和影响下, 其线形会发生较大变化。位移是结构的重要参数, 能够直接表现结构的受力状态, 因此通过监测桥梁结构不同位置的坐标变化, 能够实时监测悬索桥结构的受力性能和工作状态。近年来, 随着 GPS RTK 技术越来越成熟, 国内外已有许多应用 GPS 技术对大型结构建筑进行健康监测的成功案例。法国的 Le-roy 等^[1] 对诺曼底大桥进行的实时水平位移监测, 证明了 GPS 能够以厘米级精度进行实时水平位移监测; Kashima 等^[2] 对世界最大跨径(中跨跨径 1991 m) 的三跨二铰悬索桥 Akashi Kaikyo 大桥进行了风振测量和温度变形测试; Nakamura^[3] 对一主跨为 720 m 的大桥进行了 GPS 测试, 得到主梁横向位移和风速之间具有强相关性, 且与数值模拟结果一致。我国的过静珺等^[4] 对虎门大桥进行了 GPS

RTK 实时位移监测; 黄声享等^[5] 对白沙洲大桥进行了 GPS 测试; 在数据处理方面, 黄声享等^[6-8] 用小波滤波及多分辨分析技术有效地从噪声中筛分出结构的微小振动, 并进行了数据处理。

本文以润扬大桥悬索桥为研究对象, 介绍了润扬大桥 GPS 健康监测系统的构成, 分析研究了大跨度悬索桥在各种工况下的动态坐标, 并通过对 GPS 监测数据进行处理与分析, 识别出了大桥的低阶振动频率, 并与振动传感器测量、有限元分析的结果进行了比较。为该桥的承载能力、工作状态和耐久性评估提供参考依据, 并为同类千米级悬索桥设计提供参考。

二、工程概况

润扬长江公路大桥是我国目前规模最大的索支承载结构, 它由特大型悬索桥、斜拉桥组成, 是一座组合桥梁。其中, 悬索桥为主跨 1490 m 的单跨双绞简支钢箱梁桥, 悬索桥跨度为中国第一、世界第三。作为我国建桥史上规模空前的特大型桥梁, 润扬大桥于 2005 年投入运营。

润扬大桥悬索桥的 GPS 健康监测系统是由 GPS 测量子系统、信息收集子系统、信息处理与分析子系统和系统运作与控制子系统 4 部分组成。其硬件包括 GPS 测量仪、信息收集总控制站、光纤网络、GPS 计算机系统和显示器等。数据采集频率为

收稿日期: 2011-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51078080); 江苏省高校自然科学基金(10KJB58005); 宿迁学院基金(2010KY15)

作者简介: 乔 燕(1976—), 女, 江苏睢宁人, 讲师, 主要研究方向为桥梁结构工程。

5 Hz,精度达毫米级。图1为润扬大桥悬索桥的GPS接收机站的布置方案。在主梁1/4、1/2和3/4截面布置了6个站点, GPS天线用特制的密封盒固定在箱梁外侧边缘处,接收机放在外站控制箱内。另外,在两个塔顶各布置一个站点,对索塔的变形进行监测。测试基准站设在润扬大桥的监控中心屋顶上。

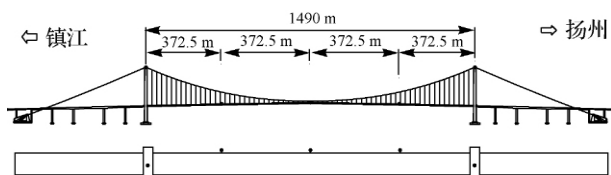


图1 润扬大桥悬索桥 GPS 接收站布置图

三、位移监测结果及分析

1. 交通荷载下的位移分析

润扬大桥箱梁和主塔作为柔性结构,实际运营时,在正常交通荷载作用下,车辆的激励导致它发生了一定程度的变形,由于车辆行驶的随机性,主梁的变形和振动亦是随机的。图2为2008年8月16日5:00—6:00时间段内的跨中竖向位移变化情况。根据健康监测系统的记录,在这个时间段桥面风速为2 m/s左右,环境温度从14.1℃变化到14.2℃,可以认为风荷载和温度变化对大桥存在影响。主梁竖向方向在重载作用下最大振幅达40 cm。图3为跨中横向位移变化情况,振幅只有6 cm。比较图2和图3可以看出,跨中位置竖向位移挠度虽大,但是远不如横向抖动剧烈。图4、图5为2007年5月1日5:00—6:00时间段内的南塔顺桥向坐标变化情况,从中可以看出,在这时段内,南塔和北塔纵向方向(南北方向)位移达5 cm,其抖动程度比跨中主梁竖向方向大,比跨中主梁横向方向小。

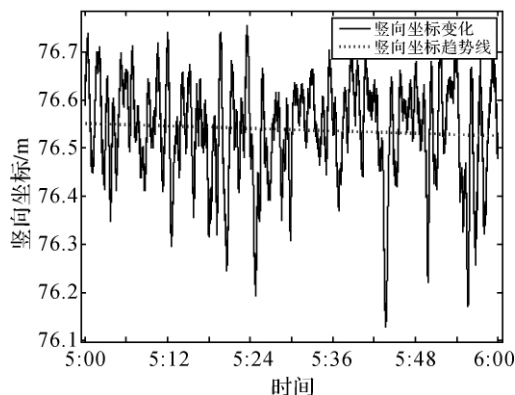


图2 2008年8月16日5:00—6:00跨中竖向坐标时程图

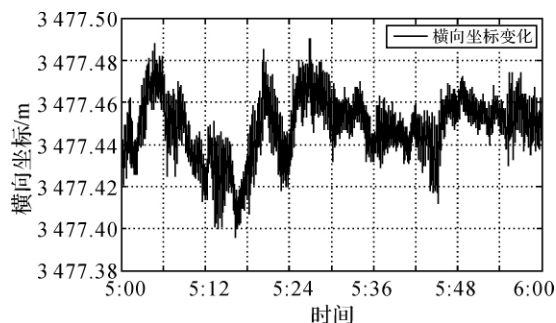


图3 2008年8月16日5:00—6:00跨中横向坐标时程图

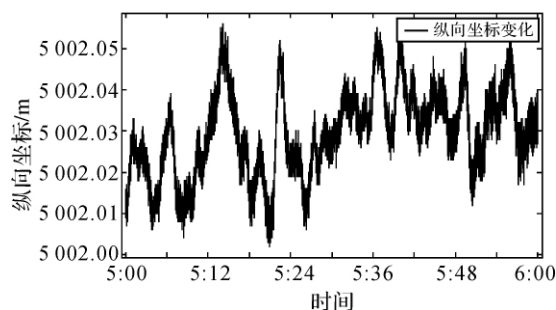


图4 2007年5月1日5:00—6:00南塔顺桥向坐标时程图

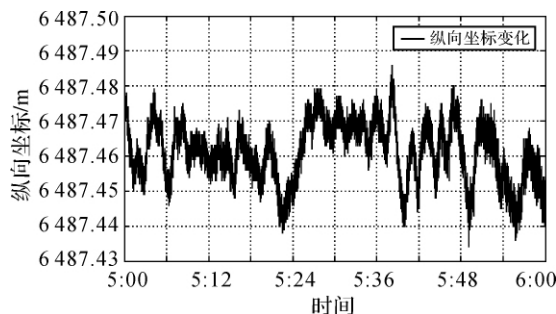


图5 2007年5月1日5:00—6:00北塔顺桥向坐标时程图

2. 温度作用下的位移分析

润扬大桥作为柔性结构,对温度影响特别敏感。在温度影响下,主梁竖向方向和顺桥方向都会发生较大的位移变化,2007年9月16日—2007年9月20日的主梁跨中竖向坐标时程如图6所示(数据过大,每2 min平均1次)。从图6中可以看出,主梁跨中竖向坐标变化规律呈明显的正弦曲线变化,主梁跨中高程与环境温度是负相关关系,主梁跨中整体高程随着温度降低而升高,随着温度升高而降低。2007年9月16日昼夜温差达15℃,波峰平均值和波谷平均值相差近25 cm,通过有限元软件建模并计算温度对该桥的受力影响,整体升温15℃时,跨中位移达到16 cm,和实测结果基本吻合。图7为该时间段内北塔南北方向的位移变化情况,剔除变形变异点后,可以发现北塔变形与温度相关性较弱。

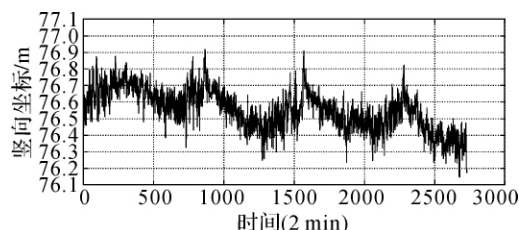


图6 2007年9月16日—9月20日主梁跨中
竖向坐标时程图

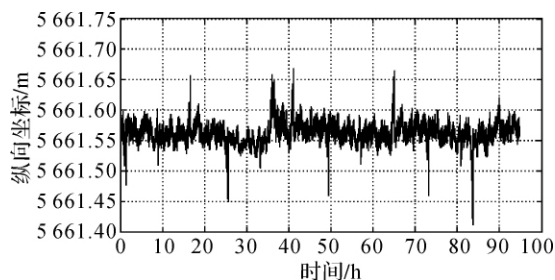


图7 2007年9月16日—9月20日主梁跨中横向
坐标时程图

图8 为大桥在2009年1—12月的环境温度月平均值,图9 为大桥跨中和1/4处竖向坐标2009年1—7月的平均高程值。可以看出,1月平均高程最高,为77.453 m,8月平均高程最低,为76.533 m,相差0.92 m,3月和4月的平均高程值相差36.6 cm。因此主梁挠度和温度具有较强的负相关性,其跨中测点坐标与温度相关性系数为 -0.963 ,1/4处测点坐标与温度相关性系数为 -0.924 。

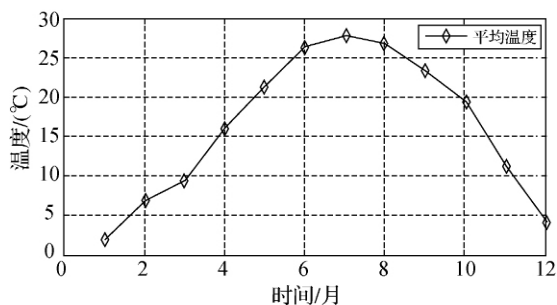


图8 2009年1—12月环境温度月平均值

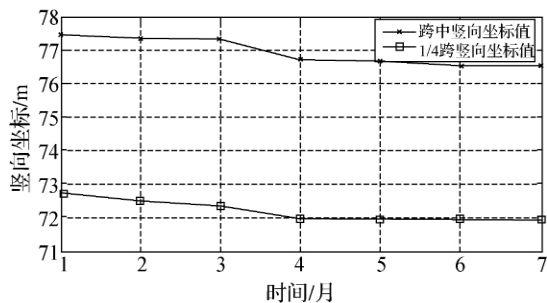


图9 2009年1—12月平均高程值

3. 风荷载作用下的位移分析

润扬大桥位于长江下游,自运营以来每年都要受台风影响。台风“韦帕”是2007年对华东地区影响较大的台风之一。“韦帕”于2007年9月16日8:00在菲律宾东北部的洋面上生成,于18日早晨加强为超强台风。润扬大桥在台风作用下产生了一定的变形。图10为2007年9月18日的横桥向坐标时程图,可知9月18日11:00,桥面风速开始变大,使得大桥主梁突然产生了剧烈的横向和顺桥向的振动。在台风作用影响下,横向摆动振幅最大近20 cm,近于3倍平时的横向摆动,顺桥向振动振幅也达到30 cm(如图11所示),而平时只有5 cm,是平时的6倍,然而跨中竖向振动特征没有大的变化。

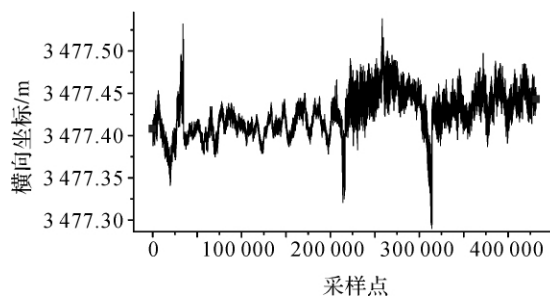


图10 2007年9月18日横桥向坐标时程图

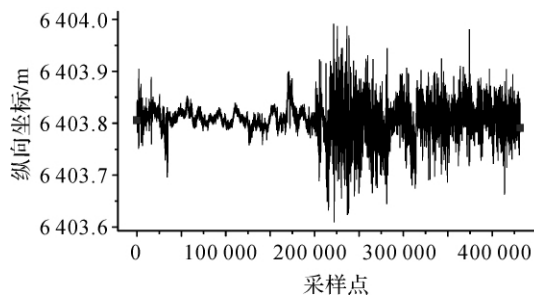


图11 2007年9月18日顺桥向坐标时程图

四、模态频率分析

从文献[1]可知,利用GPS监测数据可以进行频谱分析,可得出结构的基频。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里叶变换转换到频率域内进行分析。它不仅有助于确定时间序列数据的准确周期,而且能判别其中的隐蔽性和复杂性的周期数据、确定趋势项等。图12是利用傅里叶变换对2008年1月16日的1/4跨处GPS竖向坐标监测数据进行分析得到的频谱图,图13是利用傅里叶变换对2009年9月1日的2/4跨处GPS竖向坐标监测数据进行分析得到的频谱图。

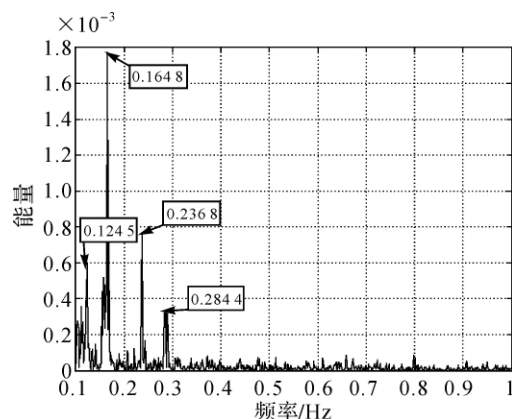


图12 2008年1月16日0:00 1/4跨处竖向频谱图

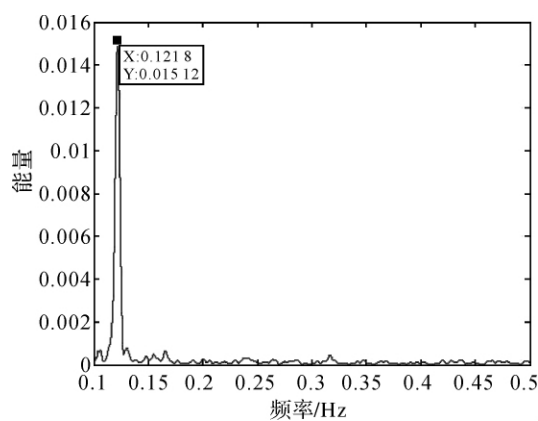


图13 2009年9月1日0:00 1/2跨处频谱图

对2008年1月16日凌晨1:00—1:10时间段所得模态频率、利用大桥健康监测系统的振动传感器监测数据得出的结构频率和有限元分析得出的频率进行比较, 比对结果见表1, 结果显示, 利用GPS监测数据可以较好地辨别出大桥的频率。

表1 GPS频谱分析与振动传感器及有限元分析比较

阶数	GPS 频谱分析	振动传感器频谱分析	有限元分析
1	0.124 5	0.123 3	0.123 2
2	0.164 8	0.165 3	0.168 5
3	0.236 8	0.257 6	0.248 3
4	0.284 4	0.313 2	0.304 2

为了考察环境温度对大桥模态频率的影响, 分别选取2009年每一月第一天凌晨0:00—0:10时间段的数据进行分析, 其结果如图14所示。从图中可以看出大桥的模态频率总体上表现为“外界环境温度高结构频率低、外界环境温度低结构频率高”的变化特征。

五、结 论

1) 利用GPS健康监测系统可以准确地掌握结构在各种荷载作用下的工作状态, 不仅可以掌握大

桥的常规荷载作用下的工作性能, 而且能够掌握大桥在极端荷载作用下的工作状态。相比较普通的桥梁维护监测方法, 能够保证大桥不间断运行, 对于大桥的变形监测十分适用, 既有效地降低了监测成本, 又极大地提高了作业的灵活性。

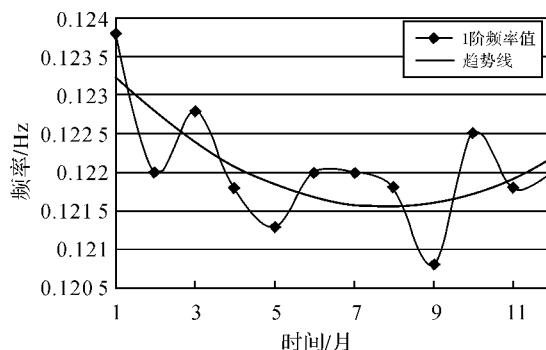


图14 模态频率曲线图

2) 通过分析监测数据, 可以发现大桥结构在正常交通荷载、温度影响和风荷载作用下, 主梁竖向挠度对温度较为敏感, 横向振动和索塔振动的顺桥向振动对风荷载较为敏感, 同时可以利用GPS监测数据, 通过频谱分析可以很好地辨别出结构的前几阶频率。

参考文献:

- [1] LEROY E. 用GPS实时监测世界上最长的索拉桥[J]. 测绘通报, 1996(6): 46-48.
- [2] KASHIMA S, YANAKA Y, SUZUKI S, MORI K. Monitoring the Akashi Kaikyo Bridge: First Experiences[J]. Structural Engineering International, 2001, 11(2): 120-123.
- [3] NAKAMURA S. GPS Measurement of Wind-induced Suspension Bridge Girder Displacements[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(12): 1413-1419.
- [4] 过静琚, 戴连君, 卢云川. 虎门大桥GPS(RTK)实时位移监测方法研究[J]. 测绘通报, 2002(12): 4-5.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李旋, 戴吾蛟, 陈永奇, 等. 基于小波变换的GPS动态变形分析[J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 55-56.
- [8] 黄丁发, 陈永奇, 丁晓利, 等. GPS高层建筑物常荷载振动测试的小波分析[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 12-15.
- [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[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 485-489.