

现代谱估计在苏通大桥钢箱梁振动信号分析中的应用

张 洋, 岳东杰, 顾志强, 赵国庆
(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 及时准确地掌握桥梁的振动频率对桥梁健康监测和安全运营具有十分重要的意义。对苏通大桥钢箱梁 GPS-RTK 动态监测的三维变形数据进行时程变化分析。为有效地识别振动信号, 针对传统谱估计算法的不足, 提出采用基于 AR 模型的现代功率谱估计方法对监测数据进行频谱分析, 计算得到了苏通大桥主梁振动的特征要素, 所得结果与有限元计算值吻合。

关键词: 苏通大桥; 钢箱梁; 变形监测; AR 模型; 现代谱估计

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)02-0036-05

Application of Modern Spectrum Estimation Algorithm in Vibration Signal Analysis of Sutong Bridge's Steel Box Girder

ZHANG Yang, YUE Dong-jie, GU Zhi-qiang, ZHAO Guo-qing

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

Abstract: It is of great significance to obtain the bridge vibration frequency timely and accurately. In this paper, the time change rule of Sutong Bridge's steel box girder is discussed according to the three-dimensional deformation data collected by GPS-RTK dynamically. According to the deficiency of traditional spectrum estimation algorithm, the modern spectrum estimation algorithm based on AR model is proposed to analyze the spectrum of monitoring data so as to identify the vibration signal effectively. The vibration characteristic values of Sutong Bridge's main girder are obtained by calculation and verified by the finite element method.

Keywords: Sutong Bridge; steel box girder; deformation monitoring; AR model; modern spectrum estimation

桥梁的振动频率是桥梁健康监测的重要参数之一。目前,测定大跨度桥梁振动特性的常用仪器为加速度计,但加速度计存在位移精度不高、无法连续实时监控等缺点^[1-2]。随着 GPS-RTK 技术的出现和 GPS 采样率的提高,GPS 技术提供了一种实时、全天候、高动态、高精度的结构监测新手段,在动态变形监测方面具有无可比拟的优势。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振动特性^[3]。传统的以傅里叶变换为基础的经典谱估计方法在识别桥梁振动特性时存在着分辨率低、方差性能不好和旁瓣泄露严重等固有缺点^[4]。现代谱估计方法隐含着数据和自相关函数的外推,弥补了传统谱估计算法的不足。在现代谱

估计中,参数模型法可以大大提高功率谱的分辨率,是现代谱估计的主要研究内容。本文采用基于 AR 模型的现代功率谱估计方法对采用 GPS-RTK 技术获取的苏通大桥钢箱梁三维变形监测数据进行分析。首先根据观测数据估计 AR 参数模型,再按照求参数模型输出功率的方法估计信号功率谱,通过频谱分析获取苏通大桥主梁振动的特征要素,并与有限元计算所得的结果进行了对比分析,得出一些参考性结论。

1 AR 模型参数估计及功率谱分析

现代谱估计方法可以分为参数模型法和非参数模型法两大类。参数模型法是现代谱估计的主要方

法,其基本思路是将广义的平稳过程 $x(n)$ 看作是由一个输入序列 $u(n)$ 激励的线性系统的输出 $H(z)$;由已知的 $x(n)$ 或其自相关函数 $r_x(m)$ 来估计 $H(z)$ 的参数;最后根据估计的模型参数估计 $x(n)$ 的功率谱。对于一个确定的线性系统,不论 $x(n)$ 是确定性信号还是随机信号, $x(n)$ 和 $u(n)$ 之间总有如下的输入、输出关系^[4]:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^q b_k u(n-k) \quad (1)$$

及
$$x(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) u(n-k) \quad (2)$$

式中: $u(n)$ 为白噪声序列; a_k 和 b_k 分别为自回归模型系数和平均移动模型系数; p 和 q 分别为自回归模型和平均移动模型的阶数。对(1)和(2)式两边分别取 Z 变换,可得:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (3)$$

式中: $A(z) = 1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}$, $B(z) = 1 + \sum_{k=1}^q b_k z^{-k}$,

$$H(z) = \sum_{k=1}^p h(k) z^{-k}$$

假定 $u(n)$ 是一个方差为 σ^2 的白噪声序列,由随机信号通过线性系统的理论^[4] 可知,输出序列 $x(n)$ 的功率谱为:

$$P_x(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2 B(e^{j\omega}) B^*(e^{j\omega})}{A^*(e^{j\omega}) A(e^{j\omega})} = \frac{\sigma^2 |B(e^{j\omega})|^2}{|A(e^{j\omega})|^2} \quad (4)$$

这样,当激励白噪声的方差 σ^2 及模型的参数 a_i, b_i 确定后,就可以根据式(4) 求出输出序列 $x(n)$ 的功率谱。在式(1) 中,如果 b_1, b_2, \dots, b_q 全为零,那么式(1)、式(3) 及式(4) 分别变成:

$$x(n) = - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (5)$$

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (6)$$

$$P_x(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2} \quad (7)$$

此三式给出的模型称为自回归(auto-regressive)模型,简称 AR 模型。对于 AR 模型参数的估计有自相关法、改进的协方差方法、Burg 法等。其中, Burg 算法是建立在数据基础上的 AR 系数求解的有效算法,由 Burg 算法求解 AR 模型参数的递推步骤是:

(1) 由初始条件 $e_0^f(n) = x(n)$, $e_0^b(n) = x(n)$ 根据式(8) 求出反射系数 \hat{k}_1 ;

$$\hat{k}_m = \frac{-2 \sum_{n=m}^{N-1} e_{m-1}^f(n) e_{m-1}^{b*}(n-1)}{\sum_{n=m}^{N-1} |e_{m-1}^f(n)|^2 + \sum_{n=m}^{N-1} |e_{m-1}^b(n-1)|^2} \quad (8)$$

(2) 由 $\hat{r}_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2$ 求出 $m=1$ 时的 AR 参数 $\hat{a}_1(1) = \hat{k}_1$ 与前后项预测误差功率之和 $\rho_1 = (1 - |k_1|^2) \hat{r}_x(0)$;

(3) 由 \hat{k}_1 和式(9) 求出前项预测误差 $e_1^f(n)$ 与后项预测误差 $e_1^b(n)$, 然后由式(8) 估计反射系数 \hat{k}_2 ;

$$e_m^f(n) = e_{m-1}^f(n) + k_m e_{m-1}^b(n-1) \quad (9)$$

$$e_m^b(n) = e_{m-1}^b(n-1) + k_m^* e_{m-1}^f(n)$$

(4) 依照式(10) 的 Levinson 递推关系, 求出 $m=2$ 时的 AR 模型参数 $\hat{a}_2(1), \hat{a}_2(2)$ 及 $\hat{\rho}_2$ 。

$$\hat{a}_m(k) = \hat{a}_{m-1}(k) + \hat{k}_m \hat{a}_{m-1}^*(m-k)$$

$$\hat{a}_m(m) = \hat{k}_m \quad (10)$$

$$\hat{\rho}_m = (1 - |\hat{k}_m|^2) \hat{\rho}_{m-1}$$

(5) 重复上述过程,直到 $m=p$, 求出所有阶次的 AR 参数。

2 现代功率谱分析在苏通大桥工程中的应用

2.1 数据采集

外业数据采集采用了功耗低、尺寸小的诺瓦泰 OEM4-G2L 板卡,其标称精度为 $1\text{cm} + 1\text{ppm} \cdot \text{s}$ 。天线选用了诺瓦泰 GPS702,其具有的风火轮技术可以提供带有扼流圈的天线所具有的性能。在布设 GPS 基准站时,为了提高 GPS 信号接收的质量基准站必须远离各种强电磁干扰源,且周围上空开阔、无任何遮挡物^[4]。GPS 监测点布设在索塔顶和钢箱梁桥面上,基准站和监测点位置示意图如图 1。

大跨度桥梁主梁的主频一般在 $0 \sim 0.5 \text{ Hz}$ ^[5], 根据 Nyquist 抽样定理,如果保证抽样频率 f_s 大于信号包含的最高频率 f_c , 则可以由抽样得到的信号恢复原信号^[6-7], 因此将 GPS 采样频率设置为 1 Hz , 卫星天线高度角限值设置为 15° , 取早上 10 时 25 分至 12 时 27 分 2 个小时的钢箱梁桥面数据。根据现场实际情况,苏通大桥的桥轴线方向与地理方位存在偏角,为此,需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。桥轴线平面坐标系定义为:与桥

轴线平行方向为 X 轴, 向南(苏州侧)为正方向; 垂直于桥轴线方向为 Y 轴, 上游为正方向; 以桥面上

任意一点为原点所构成的独立坐标系。

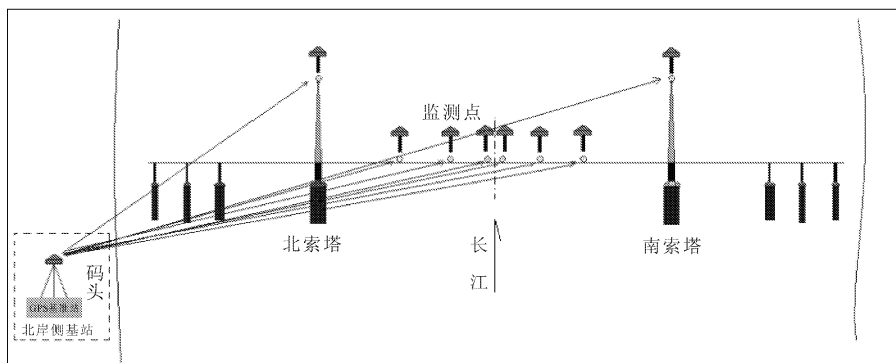


图 1 基准站和监测点位置示意图

监测点的变化时程如图 2 所示, 结合当天温度随时间变化曲线(图 3)对信号进行分析, 可以看出, 钢箱梁在 X 方向的长周期变形趋势很大, 一直处于单方向增长趋势, 从 -60 mm 变化到 $+60$ mm。这是由于从 10 时到 12 时气温不断升高, 钢箱梁的温度也在不断增高, 热胀冷缩导致整体钢箱梁长度的增

大, 所以监测点在 X 方向坐标处于单方向增长趋势。从 Y 方向的变化趋势看, 桥梁是先向上游侧偏扭然后再向下游侧偏扭, 综合当天气象条件(全天刮西北风, 风力 5~7 级)分析桥梁在 Y 方向上不仅受日照的影响, 还受到风的影响。

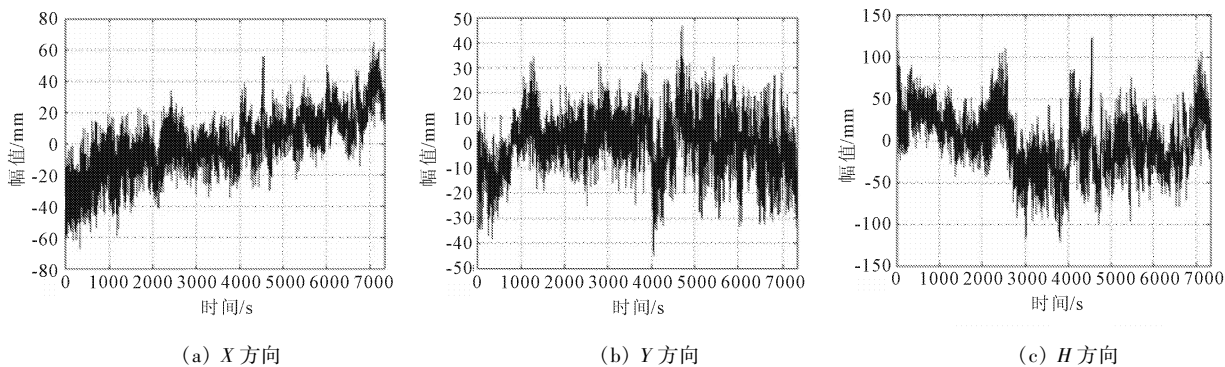


图 2 监测点变形时程曲线

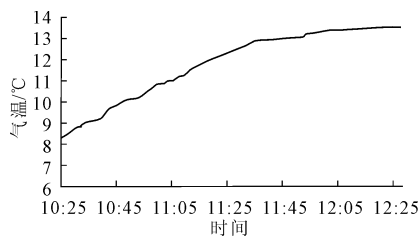


图 3 气温随时间变化曲线

2.2 苏通大桥钢箱梁振动的频谱分析

对 3 个方向的数据分别采用经典功率谱估计的改进算法 Welch 法和 AR 模型 Burg 法估计功率谱。Welch 法采用分段叠加平均的方法进行周期图功率谱估计, 每段数据 1 024 个, 重叠 50%, 在保证分辨率的前提下最大限度地抑制噪声; AR 模型采用 Burg

法, 并进行了模型阶次优化, 所得到的结果见图 4~图 6。

从图 4~图 6 中可以看出: 在频率 $0 \sim 0.05$ Hz 的低频段集中了幅值较大的频率成分。这主要是由于长周期变化成分占主要部分, 其来源有周日变形和多路径效应。GPS 动态观测时, 监测点所受到的多路径效应影响与基站是不一样的, 所以仅依靠参考点施加的改正是不能够得到消除的。在频率为 0.05 Hz ~ 0.5 Hz 的频段, 曲线基本平稳, 说明 0.05 Hz 以后基本没有短周期变形。采用现代谱估计 Burg 法得到的特征信号比较明显, 谱峰清晰检出能力优于经典谱估计的 Welch 法。X 方向振动功率谱显示, 在高频段无明显周期振动, 而在 Y 方向和 H

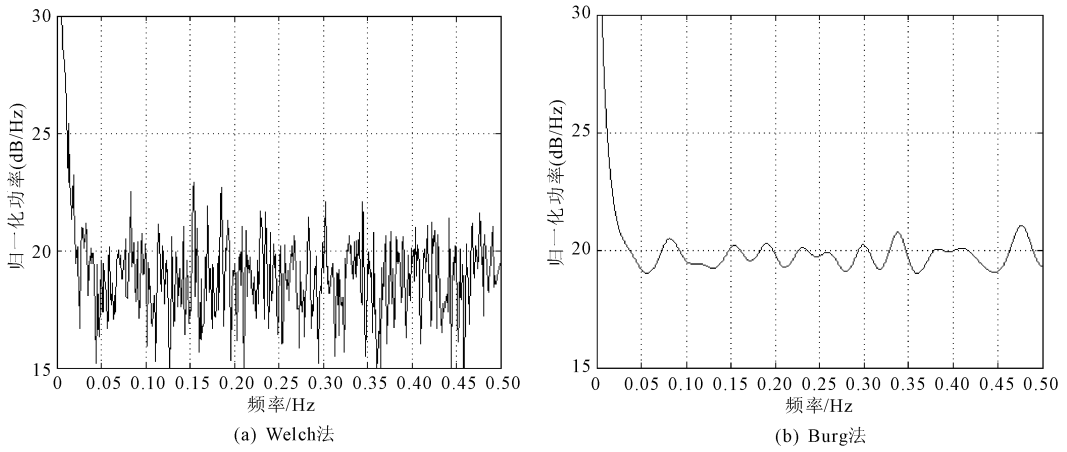


图 4 监测点 X 方向振动功率谱

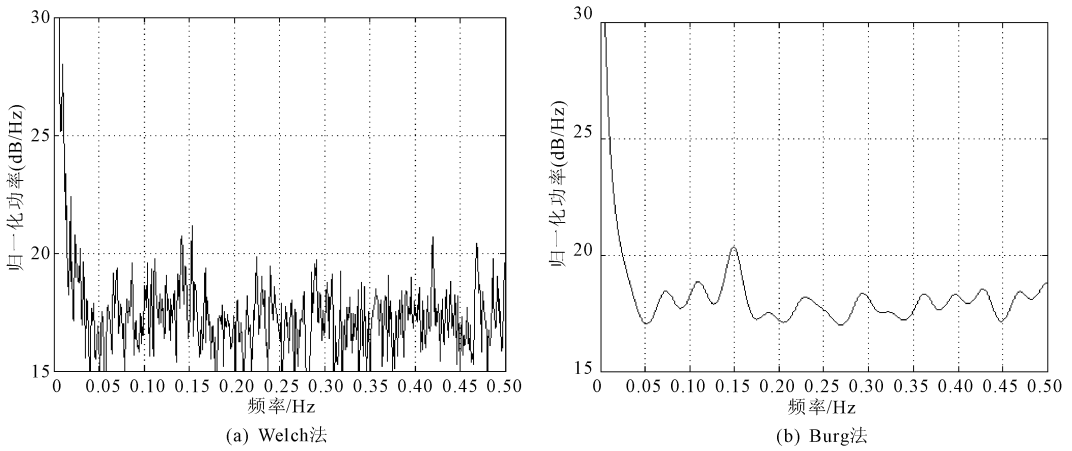


图 5 监测点 Y 方向振动功率谱

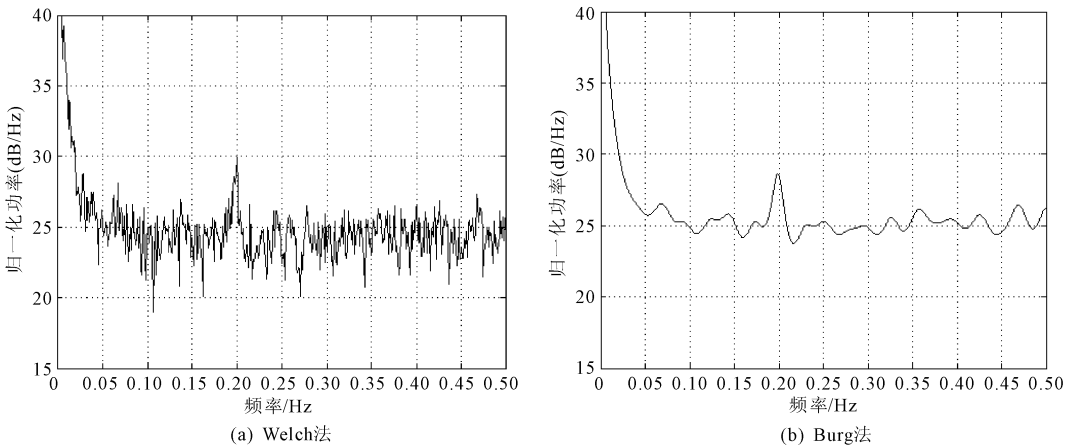


图 6 监测点 H 方向振动功率谱

方向(a)图和(b)图中都可以看出有一明显周期振动。图 5(a)中的峰值对应频率分别为 0.1533 Hz,图 5(b)中为 0.1482 Hz,图 6(a)中的峰值对应频率分别为 0.2002 Hz,图 6(b)中为 0.1988 Hz。根据苏通大桥结构动力特性分析报告的分析及有限元模型的计算^[8-9],主梁横摆频率为 0.1475 Hz,一阶对称竖弯

频率为 0.1950 Hz, Y 方向为垂直于大桥桥轴线方向, Y 方向振动频率对应于大桥主梁横摆频率, H 方向振动频率对应于一阶对称竖弯频率。可以看出,用现代谱估计 Burg 法估计出的频率偏差要比用经典周期图方法估计出的频率偏差小,现代谱估计估计的结果优于经典周期图方法估计的结果。

3 结 语

针对建筑物的振动情况一直是很多科研工作者研究的重要课题,及时掌握建筑物的振动频率对了解建筑物的健康状况具有重要的意义。本文结合温度、风力等因素对桥梁钢箱梁的变形进行了分析。为了有效地提取桥梁振动的特征要素,本文分别采用经典谱估计的 Welch 法和基于 AR 模型的现代谱估计方法对苏通大桥钢箱梁的 GPS 监测数据进行分析处理,进行了两种方法的比较,得出现代功率谱估计较经典谱估计具有频率定位准、谱峰清晰、谱线光滑等优点,更适于大跨度斜拉桥的动态监测。桥梁变形规律是很复杂的,变形的原因更加复杂,本文仅从外部对桥梁进行了变形趋势的判断和振动特征的提取,从桥梁内部的影响因素对桥梁变形规律和振动特征进行研究还值得进一步的探索。

参考文献:

[1] 朱海峰,侯振兴,汪 宏,等.大跨径预应力混凝土斜拉

桥自振特性研究[J].水利与建筑工程学报,2009,7(4):148-149.

[2] 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.

[3] 杨柏宁,徐爱林.GPS 在苏通大桥索塔动态特性测试中的应用[J].工程勘察,2009,37(3):56-59.

[4] 胡广书.数字信号处理(理论算法与实现)[M].北京:清华大学出版社,1997:354-359.

[5] 杨 臻,史天骄,费庆国.钢管混凝土系杆拱桥空间建模技术及其动力特性分析[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):42-44.

[6] 许 昌,岳东杰.基于 RTK-GPS 技术的高索塔振动试验与分析[J].振动与冲击,2010,29(3):134-136.

[7] 姚连璧,姚 平,王人鹏,等.南浦大桥形变 GPS 动态监测试验及结果分析[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(12):1633-1636.

[8] 胡晓伦.大跨度斜拉桥颤抖振响应及静风稳定性分析[D].上海:同济大学,2006:158-162.

[9] 许福友,陈艾荣.苏通大桥三维颤振分析[J].工程力学,2008,25(8):139-144.