

# 基于小波去噪的苏通大桥索塔 GPS 监测数据分析

许映梅<sup>1</sup>, 岳东杰<sup>2</sup>, 袁豹<sup>2</sup>

(1. 江苏苏通大桥有限责任公司, 江苏 常熟 215536; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

**摘要:** GPS 技术以其全天候、高精度、高频性以及实时性等优点被广泛应用于大型桥梁结构或是工程的动态监测中。然而由于受各种因素的影响监测数据中不可避免地会含有粗差与噪声, 这些粗差与噪声的存在势必影响对监测数据的处理与分析。为了消除或削弱粗差与噪声对分析结果的影响, 依托苏通大桥索塔 GPS 监测数据, 分析比较了小波分析与莱茵达准则法两种方法探测粗差的效果, 鉴于二者的优缺点, 提出小波变换、去噪与莱茵达准则相结合的方法, 探测粗差的同时提取趋势项, 并采用实测数据验证分析了该方法的有效性。最后在时间域里分析了索塔动态监测数据, 得到一些具有参考价值的结论。

**关键词:** 小波去噪; 苏通大桥; GPS; 小波变换; 动态监测

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)02—0001—06

## Analysis on GPS Monitoring Data of Sutong Bridge's Pylon Based on Wavelet Denoising

XU Ying-mei<sup>1</sup>, YUE Dong-jie<sup>2</sup>, YUAN Bao<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Sutong Bridge Co., Ltd., Changshu, Jiangsu 215536, China; 2. Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The GPS technology has been widely applied in the dynamic monitoring for large bridges or other engineering with its advantages of all-weather, high precision, high frequency and real-time. But the monitoring data would inevitably include the gross error and noise because of all kinds of factors, and the processing and analysis of the data would be affected by the abnormal values and noise. In order to eliminate or weaken the influence of the gross error and noise on analysis results, relying on the GPS monitoring data of Sutong Bridge's pylon, the wavelet analysis and  $3\sigma$  criterion are introduced to detect the gross error, and the detected results are analyzed and compared. In view of the advantages and disadvantages of both methods, the wavelet transform denoising analysis method with  $3\sigma$  criterion is applied in gross error detection and trend extraction, then its validity is verified by measured data. At last, the dynamic monitoring data of the pylon is analyzed in time domain, and some valuable conclusions are acquired.

**Keywords:** wavelet denoising; Sutong Bridge; GPS; wavelet transform; dynamic monitoring

## 0 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 国内建成了一批超大跨径桥梁, 其复杂性和重要性, 使得人们越来越关注桥梁在施工和运营过程中的安全性问题, 理想的桥梁结构几何线形与合理的内力状态不仅与设计有关, 也与合理施工和安全运营密切相关, 桥梁的变形监测已成为土木工程界和桥梁建设和养管部门关注

和研究的热点, 尤其是桥梁整体变形监测已成为超大跨径桥梁结构健康监测系统重要组成部分。超大跨径斜拉桥主要由塔、梁、索三部分组成, 是一种高次超静定结构体系。索塔为斜拉桥重要组成部分, 承载着作用在桥上的主要动静荷载, 是斜拉索锚固的基础, 关联着桥面曲线的形态。且索塔属于高耸建筑物, 高耸的索塔在强风和日照作用下将产生显著的位移和振动, 由于强风、日照等作用的随机性和

不均匀性,使得塔体风场和温度场的变化难以准确描述,因此这种变化和振动必须控制在结构设计的动态特性范围以内,否则将影响塔的正常运行和安全,从而对整个桥梁安全产生威胁。因此,实测并分析塔的动态变化具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。

基于 GPS 具有全天候、高精度、高频性和实时性等优点,以及 GPS 技术在软硬件方面的成熟发展,使得 GPS 技术在超大桥梁等大型动态结构的变形监测中取得了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。GPS 测量最常用的是莱茵达准则法,也称  $3\sigma$  准则,其可以有效发现静态重复观测序列中的粗差,而对于动态变化的 GPS 监测序列,在动态监测数据的粗差探测与去噪方面,近年来经常采用的是小波分析法。小波分析作为傅里叶分析的继承和发展,由于其在时域和频域方面具有较高的局部化特点而成为比傅里叶变换更占优势的分析方法,其良好的滤波去噪与奇异信号检验能力,已在地震、医学等许多领域获得普遍应用<sup>[5]</sup>。基于此,本文依托苏通大桥北索塔 GPS 监测数据,在比较分析小波分析法和莱茵达准则法检测粗差效果的基础上,提出采用基于小波分离噪声的莱茵达准则法,并同时提取趋势项,对监测数据进行时域分析。

## 1 苏通大桥索塔 GPS 监测概况

### 1.1 苏通大桥概况

苏通大桥位于江苏省东南部,连接苏州和南通两市,西距江阴长江大桥 82 km,东距长江入海口约 108 km,全长 8.146 km,由引桥、主桥和辅桥等三部分组成。其中主桥为 100 m + 100 m + 300 m + 1088 m + 300 m + 100 m + 100 m = 2 088 m 的七跨双塔双索面钢箱梁斜拉桥。大桥桥位区江面宽约 6 km,南北主桥墩、辅助墩以及过渡墩位于江中,距离两岸江堤达 2 km ~ 3 km,两主塔高度均为 300.4 m(承台以上)。上部结构主梁为扁平流线形封闭钢箱梁,其上翼缘为正交异性板结构,桥面按双向六车道布置,宽 34.0 m。

主桥索塔为倒 Y 型塔,由上塔柱(包括上、中塔柱连接段)、中塔柱(包括中、下塔柱连接段)、下塔柱和下横梁组成,采用 50 号混凝土,索塔锚固区采用钢混组合结构。除上塔柱 30.859 m 为曲线变化段外,其余均为线性变化段。塔柱顶高程为 306.0 m,塔柱底中心高程为 5.6 m。其中上塔柱高 91.361 m,中塔柱高 155.813 m,下塔柱高 53.226 m。

### 1.2 索塔 GPS 监测概况

为确保苏通大桥的安全运营,苏通大桥施工期建立了结构健康监测系统,系统采用全球卫星定位系统 GPS 系统,实时监测桥梁整体线型位移变化,对位移变化信号进行连续采样,研究钢箱梁、桥塔位移与环境变化(如温度、风)及交通荷载状况的关系,为大桥工作状态动态显示及结构健康评估提供资料。GPS 系统采用瑞士徕卡公司生产的 GRX1200Pro 系统,包括 GPS 接收机及其天线,共 5 台,其中 4 台为监测站,1 台为基准站,4 台 GPS 监测站分布于塔顶和主桥主跨跨中<sup>[6]</sup>,见图 1。GPS 系统自 2008 年 4 月 1 日开始运行,以 1 秒的间隔记录了大量监测数据序列,包含了索塔与钢箱梁丰富的状态信息,为分析塔梁变化趋势与规律奠定了基础。本文基于索塔监测数据,采用小波分析技术对监测数据进行去噪处理,然后分析索塔的变化。并以 2011 年 9 月 1 日到 2011 年 9 月 6 日的 GPS 监测数据作为分析数据示例,进行数据处理和小波分析。由于 GPS 测量所得的高程精度不高,且索塔高程信号受桥梁荷载影响较大,没有固定的频率和周期性,故此处着重分析索塔 GPS 信号在二维空间 X 方向和 Y 方向的变化规律。

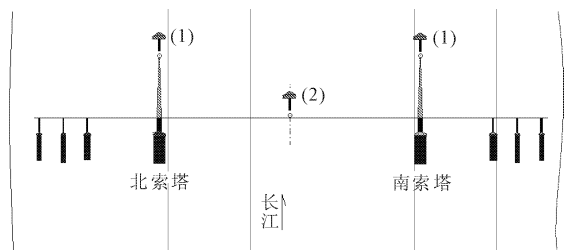


图 1 GPS 监测站分布图

## 2 GPS 监测数据预处理

GPS 监测所获得的变形数据是随着时间变化的数据序列,因此桥梁的变形分析实质上可以看作信号分析。然而在振动信号的采集和传输过程中,由于受环境条件、仪器设备和人为操作等因素的影响,信号数据不可避免地混入各种误差(噪声)<sup>[7]</sup>,变形信号就包含有真实的变形信号和噪声信号。噪声数据的出现对研究变形观测的规律造成一定的影响,所以对变形监测数据进行预处理,有效地进行去噪处理,提取真实变形信号是分析桥梁变形规律的前提。

### 2.1 粗差探测与插补

根据上述分析,在 GPS 数据采集过程中,受到

各种干扰信号的影响,测量信号不可避免含有一定数量的粗差。粗差的数量尽管相对较少,但由于其特征明显不同于随机误差,势必会影响数据分析的可靠性,因此,首先要对数据进行粗差探测并予以剔除。对于有较多数据组成的数据序列,常用的粗差探测与剔除方法有:小波变换法、“莱茵达”准则。

(1) 小波变换法

近年来,小波分析作为傅里叶分析的继承和发展,由于其在时域和频域方面具有较高的局部化特点而成为比傅里叶变换更占优势的分析方法,其良好的滤波去噪与奇异信号检验能力,已在地震、医学等许多领域获得普遍应用。利用小波变换对数据序列进行粗差探测可以直接对数据进行分析以判别粗差,不仅可以避免利用残差法探测粗差时产生的模型误差,而且可以较好地满足实时自动化监测对数据快速自动化智能处理的要求。

小波变换的基本思想是用一簇函数去表示或逼近某一信号或者函数。这一簇函数成为小波函数系,它是由一个基本小波函数经过伸缩和平移构成的。假设基本小波函数为  $\psi(t)$ , 平移和伸缩因子分别为  $a$  和  $b$ , 则小波变换基底定义为:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

对于任意的函数或者信号  $f(t) \in L^2(R)$ , ( $L^2(R)$  表示平方可积的实数空间), 其小波变换为该函数与小波函数的内积:

$$W_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

其中  $\bar{\psi}(t)$  是  $\psi(t)$  的共轭。为了理论和计算上的方便,在实际应用中,需要将连续小波  $\bar{\psi}_{a,b}(t)$  及其变换  $W_f(a,b)$  离散化处理。取  $a = a_0^j, b = kb_0 a_0^j (a > 1, b_0 \in R, j, k \in Z)$ , 带入式(2)得离散小波的函数为:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - kb_0 a_0^j}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (3)$$

相应地,实值函数  $f(t)$  的小波变换为:

$$D_f(j,k) = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = a_0^{-j/2} \int_R f(t) \psi(a_0^{-j} t - kb_0) dt \quad (4)$$

当  $a_0 = 2, b_0 = 1$  时,式(3)、式(4)即为离散的二进小波及其变换,此时有:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - k) \quad (5)$$

$$D_f(j,k) = 2^{-j/2} \int_R f(t) \psi(2^{-j} t - k) dt \quad (6)$$

当小波函数  $\psi(t)$  是平滑函数  $\theta(t)$  的二阶导数时,信号小波变换模的过零点也就对应于信号的突变点。因此采用检测小波变换系数模的过零点和局部极值点的方法,可以检测信号的突变点<sup>[8]</sup>。根据小波函数的定义可知小波函数  $\psi(t)$  具有多样性,因此在实际工程应用中一个重要的问题就是选择恰当的小波基。

(2) 莱茵达准则法

莱茵达准则又称为“ $3\sigma$ ”准则,也叫差分法:将残差大于 3 倍样本标准差的观测值当做粗差处理。根据误差理论,随机误差  $\delta$  服从正态分布,  $\sigma$  为标准差,一般是未知的,通常用贝塞尔公式算得  $S$  代替  $\sigma$ , 以观测值平均值  $\bar{L}$  代替真值。

$$\bar{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N-1}} \quad (8)$$

其中  $v_i = |\bar{L} - L_i|$ , 对某个时刻的观测值  $L_i$ , 若其残差  $v_i$  满足  $|\bar{L} - L_i| > 3S$ , 则判定  $L_i$  为粗差。此方法适宜于静态重复观测数据,对于动态波动较大的数据由于标准差较大,只能检测较大的粗差。

(3) 两种方法粗差探测结果比较

选取 2011 年 9 月 1 日一天的数据进行分析。图 2、图 3 为原始信号图,可以看出原始数据中存在较多明显的粗差点(异常点)。图 4 和图 5 表示了对原始信号进行小波分解后高频信号重构图,从图上可以看出粗差所在的位置,进而进行粗差剔除。表 1 列出了两种方法探测粗差结果。

表 1 两种方法结果比较(Y 方向)

	方法	粗差序号(历元)	粗差个数
X 方向	小波变换法	2792, 2795	2
	莱茵达法	2791, 2792, 2801, 2809, 2811	5
	小波变换法	2644, 2649, 2659, 2694, 2697, 2712, 2716, 2792, 2793, 2794, 2795	11
Y 方向	莱茵达法	2644, 2646, 2647, 2652, 2659, 2678, 2677, 2783, 2784, 2786, 2791, 2792, 2794, 2795	19

从表 1 可以看出,两种方法均检测出粗差点,有部分粗差点一致。采用莱茵达准则探测出的粗差个数较小波变换法要多。但从图上也可以看出,0 ~ 2000 历元间的粗差均未检测出来。一方面,小波变

换法采用小波变换系数模的过零点和局部极值点探测粗差,局部极值的阈值很难确定,致使部分粗差点不能被探测出来。从原始数据图可以看出,监测对象具有明显的动态变形,非单纯的静态重复观测,因此直接采用原始观测信息将数值上偏离均值的观测

值都作为粗差处理是不合理的。为此提出采用基于小波分离噪声的莱茵达准则法,即首先采用小波分解将趋势项与噪声分离,对噪声部分采用莱茵达准则进行粗差探测。

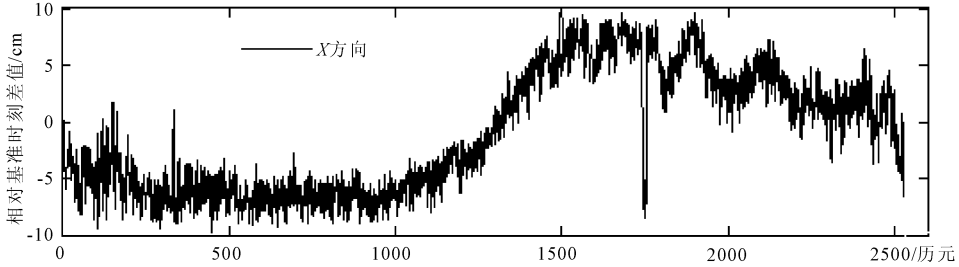


图 2 X 方向原始信号图

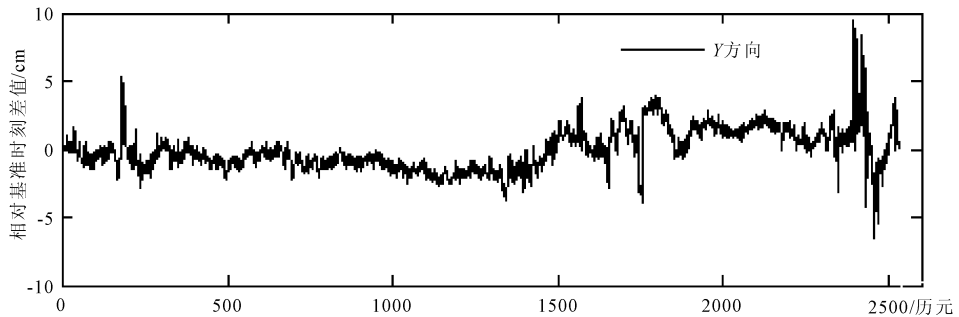


图 3 Y 方向原始信号图

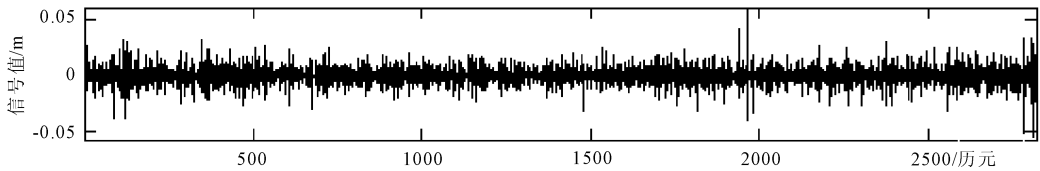


图 4 X 方向高频部分重构信号图

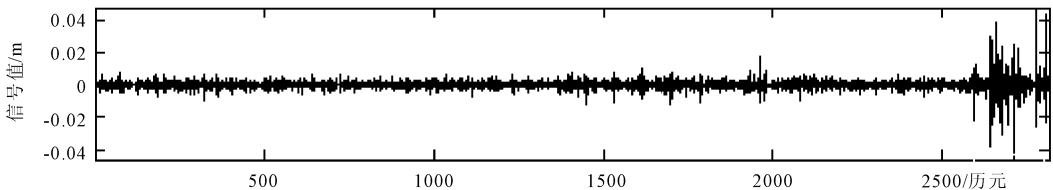


图 5 Y 方向高频部分重构信号图

#### (4) 基于小波分离噪声的莱茵达准则法

对图 2、图 3 中的噪声数据采用莱茵达准则进行处理,对所有粗差点进行标示。为了确保数据的等间隔,对粗差点按线性变化进行数据插补,图 6、图 7 为插补后的数据序列,可见该方法可以很好地探测出粗差。

## 2.2 小波去噪处理

含有噪声的一维信号可以表示为:

$$S(t) = f(t) + \sigma \cdot e(t) \quad (t = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (9)$$

式中: $f(t)$  表示真实的变形信号; $e(t)$  为噪声信号; $S(t)$  表示含噪声的信号。最简单的噪声模型是  $e(t)$  为高斯白噪声,符合正态分布  $N(0, 1)$ ,其噪声级为 1。在实际工程中,真实的变形信号通常表现为低频平稳信号,而噪声往往表现为高频信号。数据信号的这些特点为利用小波分析去噪提供了前提条件。所以去噪过程可按如下方法进行处理<sup>[5]</sup>:首先对实际

信号进行小波分解处理,选择小波基并确定分解层次为  $N$ ,则噪声部分一般包含在高频部分。然后对小波分解得到的高频系数进行门限阈值量化处理。最后根据小波分解的第  $N$  层低频系数和经过量化的  $1 \sim N$  层高频系数进行小波重构,达到去除噪声的目的,即抑制信号  $S(t)$  中的噪声部分,恢复  $S(t)$  中的

真实信号  $f(t)$ <sup>[9-10]</sup>。总体上来看,针对一维离散信号,其高频部分影响的为小波分解的第一层细节,其低频部分影响的为小波分解的最深层和低频层。

采用 db3 小波函数,4 层结构进行小波分解和重构去噪后所得结果见图 8、图 9。

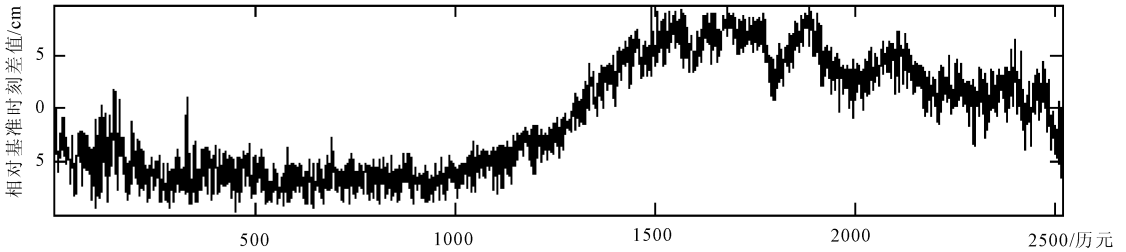


图 6 X 方向信号周日变化图

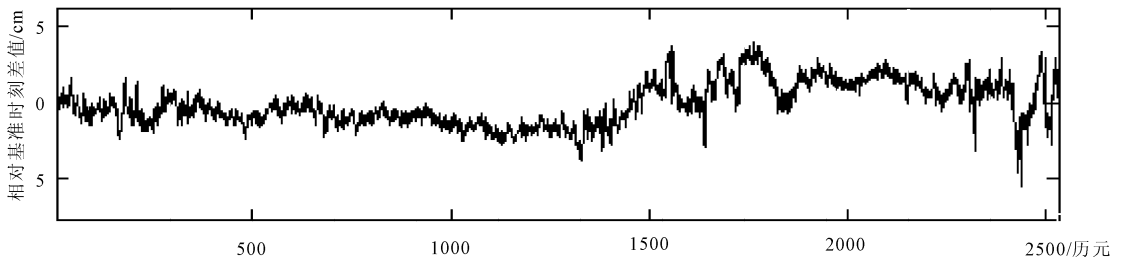


图 7 Y 方向信号周日变化图

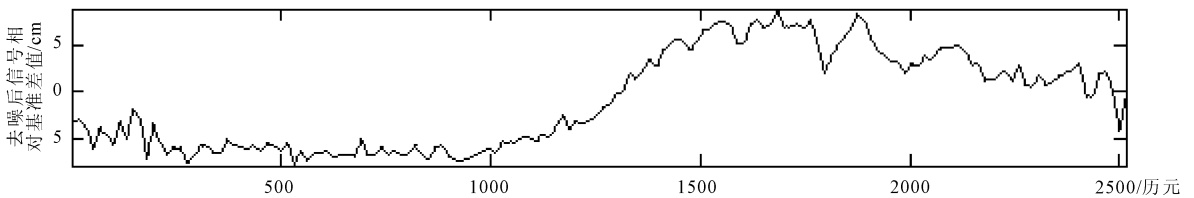


图 8 X 方向原始信号序列图与小波去噪后序列图

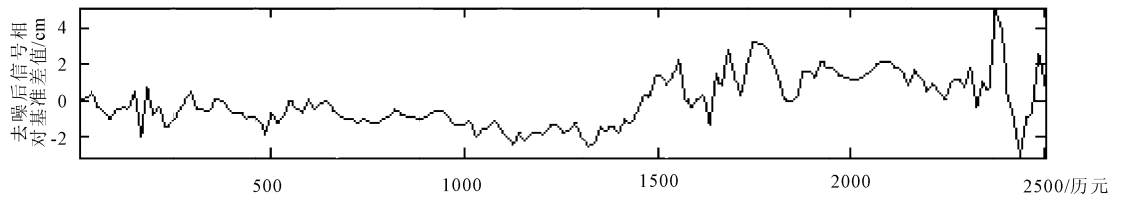


图 9 Y 方向原始信号序列图与小波去噪后序列图

### 3 数据后处理及分析

GPS 动态监测信号经过粗差剔除和小波去噪后,需要在时域和频域内对数据进行分析。为了减少外在环境因素对桥梁振动特性分析的影响,在查阅苏通大桥所在地——常熟地区历史天气后,选定 2011 年 9 月 1 日到 2011 年 9 月 6 日为期六天的 GPS 监测数据作为源数据。9 月 1 日到 9 月 6 日的天气状况详见表 2。

表 2 常熟 2011 年 9 月 1—6 日天气详情

日期	最高气温/℃	最低气温/℃	天气	风向	风力/级
2011-09-01	33	25	晴	东风	3-4
2011-09-02	32	22	晴	东北风	3-4
2011-09-03	31	22	晴	东北风	3-4
2011-09-04	30	21	晴	北风	3-4
2011-09-05	28	22	多云	北风	3-4
2011-09-06	28	21	多云	北风	3-4

从表 2 可以看出,9月1日到6日天气晴好,温度适中,风力较小,且各天天气状况相近,反映了苏通大桥整体处在一个天气较为稳定的环境中。外界环境的稳定变化利于提取桥梁自身振动的特性信息。

根据 2011 年 9 月 1 日—6 日信号数据,经过初步的粗差探测和剔除处理后,将 GPS 信号  $X$  方向和  $Y$  方向数据在时域上绘制出时程变化曲线图如图 10、图 11 所示。

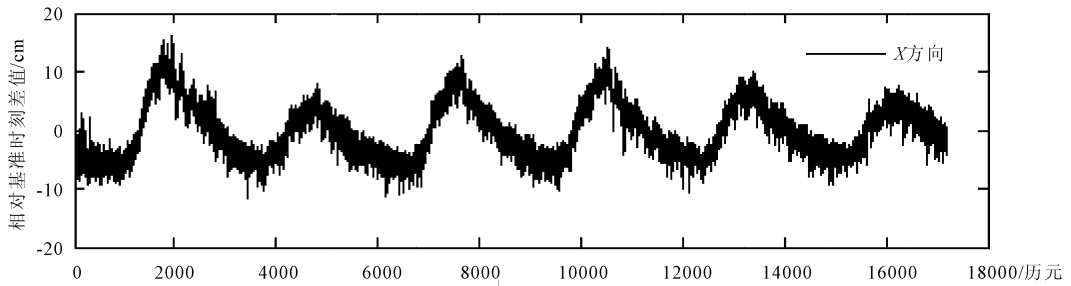


图 10  $X$  方向信号曲线图

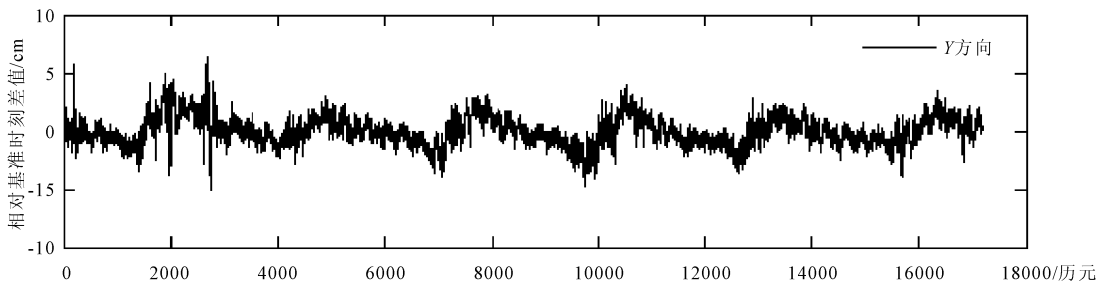


图 11  $Y$  方向信号曲线图

从图 10 和图 11 可以看出,信号在  $X$  方向和  $Y$  方向具有明显的周期性,且周期约为一天,这就表明在天气状况相近的各周日里,索塔的变形具有明显的日周期性。说明索塔在温度、风、车辆等荷载作用下一直处于摆动状态,能有规律地恢复到一个平衡位置。下面通过分析索塔 GPS 监测数据中  $X$  和  $Y$  方向在 9 月 1 日(0:00~24:00)这一天的周日时域变化来探究索塔在周日时间里的动态变形特性。图 6、图 7 为经过粗差探测插补的数据序列,图 8、图 9 为去噪后提取的周日变化趋势图。

从图 8~图 9 可以看出: $X$  方向在上午时间段较为平缓,正午以后呈现逐渐增大态势,表明索塔随着太阳的不断照射,局部温度升高,造成索塔向  $X$  方向偏移,下午到夜间索塔逐渐回复,经过一昼夜基本可以回复到起始位置,说明索塔的运动具有可恢复性。 $Y$  方向具有与  $X$  方向相似的发展趋势,只是在数值上远小于  $X$  方向。说明温度、车辆等的荷载变化均会引起索塔的动态变化,且南北方向( $X$  方向)的变化明显大于东西方向( $Y$  方向),但总能回到平衡位置。表明主塔处于良好的工作性态,塔顶位移具有可恢复性,不存在连续缓慢的方向性偏移,各种荷载对塔柱变形的综合影响程度远不危及塔柱的

正常工作。

## 4 结 论

苏通大桥索塔是桥梁健康监测的重要部位之一。本文基于索塔 GPS 动态监测数据,分别采用小波分析法与莱茵达法对信号进行粗差处理,二者均能在一定程度上检测出粗差,但由于二者在应用上的局限性,仍存在明显的粗差点未能检测出来。为此提出基于小波分离噪声的莱茵达准则法,将二者结合,得到了较好的处理结果。采用小波分析技术进行监测序列的去噪,提取趋势项,分析索塔的周日变形特性。分析结果表明,索塔在温度、车辆、风等各种荷载作用下,处于有规律的摆动状态,摆动周期基本为 1 d(24 h),索塔变动具有可恢复性,表明主塔工作性态良好。

### 参考文献:

- [1] 杨柏宁. 苏通大桥索塔 GPS 实时动态监测技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 2-3.
- [2] 张洋, 岳东杰, 顾志强, 等. 现代谱估计在苏通大桥钢箱梁振动信号分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(2): 36-40.