

胶新铁路路基沉降监测中的水准测量及数据处理

刘升传,王连俊

(北京交通大学土建学院交环所,北京 100044)

[摘要] 从总体论述了胶新线沉降监测中水准测量的实施方法。首先论述了胶新铁路的概况,以及本次测量的目的以及内容,然后论述了测量的原理和测试方法。重点论述了数据的处理理论与方法,其中包括异常数据的探测及粗差的处理,涉及最小二乘法;稳健估计;最后重点介绍了傅里叶分析在本次测量中的应用。

[关键词] 异常数据探测;稳健估计;傅里叶分析;粗差

[中图分类号] P258

[文献标识码] B

[文章编号] 1007-3000(2004)02-0052-04

胶新铁路北起山东胶州,南至江苏新沂,全长 300 余 km。该线穿越山东低山丘陵区、沂沭活动断裂带强震区和冲积平原区,在北部局部地段还通过地下采空区,全线几乎全部为路基工程和桥梁工程。由于线路起伏较大,路基工程高路堤占很大比重,路堤填料在线路不同地段有较大差异,类型较多;在线路南北两端粉粘土、粘土地段存在低路堤。因此,只有对整个路基施工及运营过程中的路基沉降变形进行综合系统的试验监测研究,才能对路基沉降变形的时空变化进行准确地测定和预报,从而提出合理的设计技术指标,同时总结出修正的铁路路基沉降计算方法,为铁路类似路段的设计、施工提供可靠的试验数据和理论依据,促进铁路路基设计的科技进步,为我国铁路建设大发展奠定基础。本次测试内容有:地基、路基土分层沉降;路堤表面沉降板测试;水平剖面沉降。

1 测试方法

本次测试主要包括三个方面内容:

- 磁环沉降仪通过测定埋设在土体不同深度处磁环位置变化获得路基或地基不同深度处的沉降变形,研究路基沉降变形随时间及振动荷载的变化规律;
- 沉降仪测定路堤剖面不同高程处沉降管随路基沉降变形的变化,获得路基断面各部位的

沉降差异特征;

- 水准仪测定试验段各点沉降板高程改变量,计算路基的变形与沉降。

其中,水准测量是所有工作的前提和关键,只有水准测量的数据保证误差最小,才能准确计算沉降板的高程变化,进而计算出路基表面沉降;才能准确计算磁环的沉降;才能计算水平管的高程值,从而为以后的数据分析提供准确的依据,得出准确和有价值的结论。

根据实际出发,本文以胶州段为例,进行说明。该段测点分布如图 1。

本次采用了四等水准测量,在整个观测期要保管好沉降标不受损坏,使观测数据连续;观

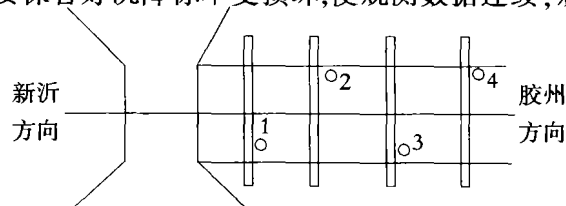


图1 胶新线胶州段 DK6 测点分布图

测应使每次观测条件相同,以消除观测中的系统误差。为此应做到五固定:测站位置固定,仪器固定,观测人员(司仪及持尺者)固定,水准尺固定(置于水准点上的后视尺也应固定),转点也应固定。外业手簿做到记录认真,字迹清晰、整洁,格式统一。水准仪应使用 DS3 级或以上,水

*[收稿日期] 2004-03-03

[作者简介] 刘升传(1978-),男,山东即墨人,硕士,2002年毕业于山东理工大学,2002年至今在北京交通大学,研究方向:路基沉降研究。

准尺为双面区格式木质标尺(一对),水准尺应有出厂检验书,使用前应对圆水准器进行校核;水准仪使用前应进行外观检查、圆水准器检核、十字丝检核、气泡式水准仪误差检核,三角的检核(三角 $\leq 20''$),使用中应定期进行三角检核。若三角大于 $20''$,应立即进行校核,否则不能使用。读数取位为1mm,计算取位为0.1mm。

测量的观测数据以7月17日测试结果,取其中的磁环沉降管测试数据为例简要说明。观测结果如表1所示。

表1 7月17日胶州段测量数据记录表

水准测量记录手簿							
观测日期:2003-7-17		天气情况:晴		观测地点:胶州 DK6			
测站	测点	水准尺读数		高差		高程 (m)	备注
		后视	前视	+	-		
I	BMA	1.278					A点 高程=0
	1	3.454	0.182				
II	1	2.909	0.899				
	2	2.909	0.838	1#			
III	2	2.909	0.804	2#			
	3	2.909	0.761	3#			
IV	3		1.406	4#			
	4						

平差处理:采用间接平差。按最小二乘原理,要满足 $V^T P V = \min$,即对 \hat{x} 的导数为0:

$$\frac{\partial V^T P V}{\partial \hat{x}} = V^T P B = 0$$

$$\Rightarrow B^T P V = 0 \Rightarrow B^T P B \hat{x} - B^T P l = 0 \Rightarrow \hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P l$$

从而 $V = Bx - l$,得平差结果:

$$\begin{cases} \hat{L} = L + V \\ \hat{X} = X^0 + \hat{x} \end{cases}$$

由以上公式出发,得到结果: $\hat{L}_1=6.720$; $\hat{L}_2=6.798$; $\hat{L}_3=6.759$; $\hat{L}_4=6.753$ 。

2 异常数据探测及粗差处理

在测量数据中,存在测量中不可避免的误差如系统误差和偶然误差,这些只能在客观条件允许的限度内使它们最小,从而确保观测成果具有较高的质量。另一方面,有些数据是因为观测中的失误而产生失真,我们称之为异常数据,或称为含有粗差的观测值。含有粗差的观测值,可以看成与其它同类观测值服从相同方差,不同期望的正态分布子样;也可以理解为与其它同类观测值有相同的期望,不同方差且是异常大方差的正态分布子样。因此在数据处理中,

有两种处理方法,一种是将粗差纳入随机模型;一种是将粗差纳入函数模型。前者服从 $l_i \sim N(E(l_i) + \varepsilon_i, \sigma^2)$ 主要考虑异常大方差问题,可以用稳健估计的选权迭代法来定位粗差和消除或减弱其对参数解的不良影响;后者服从 $l_i \sim N(E(l_i) + \varepsilon_i, \sigma_i^2)$, $\sigma_i^2 \geq \sigma^2$,其目的是在平差中检测粗差,定位粗差,将其剔除,然后在正常观测值中进行参数估计。

2.1 数据探测法

数据探测法用来处理第二种粗差,即进行粗差探测,定位,最终剔除。它包括单个粗差检验和多元粗差统计假设检验。由于多元粗差统计假设检验含有的参数比较多,因而在实施起来比较困难。本文采用了前者,即单个粗差检验,虽然其没有考虑粗差对残差影响的相关性,用它逐次判断多元粗差的存在也可能失误。

不含粗差影响的 V ,其期望和方差分别为:

$$E(V) = 0$$

$$D(V) = \sigma^2 Q_{VV}$$

向量 V 为正态向量。假设检验为:

原假设: $H_0: E(v_i) = 0, H_1: E(v_i) \neq 0$

检验统计量采用正态分布标准化残差:

$$W_i = \frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}} = \frac{|v_i|}{\sigma_0 \sqrt{Q_{v_i v_i}}} = \frac{|v_i|}{\sigma_0 \sqrt{r_i}} \sim N(0,1) \text{ 当成}$$

H_0 立时;

选择适当的检验水平 α ,分位值 $\mu_{\alpha/2}$ 。若 $W_i < \mu_{\alpha/2}$,则接受 H_0 ,即 V_i 不受粗差影响。否则则存在粗差影响。

2.2 稳健估计

所谓稳健估计,是在粗差不可避免的情况下,选择适当的估计方法,是所估参数尽可能减免粗差的影响,得出正常模式下最佳或接近最佳的估值。在假定模型基本正确前提下,稳健估计具有抗大量随机误差和少量粗差的能力,是所估参数达到最优或接近最优。抵抗少量粗差对参数估值的影响是稳健估计理论的研究重点,而抗粗差干扰强弱的标志是能容忍多少个观测粗差。稳健估计不象最小二乘估计那样追求参数估计在绝对意义上的最优,而是在抗粗差前提下的最优或接近最优。

稳健估计分类分为M估计,L估计和R估计。M估计是一种广义的极大似然估计,它是经

典的极大似然估计的推广,易于实施。因此主要采用 M 估计。M 估计(广义极大似然估计)的原理是基于用增长较慢的极小化残差函数代替平方和函数,由 Huber 提出。利用极大似然估计:设有参数向量 X,为了估计 X,进行 n 次观测,得到了观测向量 L 的观测值 l,则

$$\sum_{i=1}^n \ln f(l_i, \hat{x}) = \max \text{ 或 } \sum_{i=1}^n \ln f(l_i, \hat{x}) = \min \quad (1)$$

其中 f 是随机量 L 的密度函数。

$$\text{用 } \rho(l_i, \hat{x}) \text{ 代替 } -\ln(l_i, \hat{x}) \text{ 得: } \sum_{i=1}^n \rho(l_i, \hat{x}) = \min$$

$$\text{则由极大似然估计有: } \sum_{i=1}^n \psi(l_i, \hat{x}) = 0 \quad (2)$$

$$\text{其中: } \psi(l_i, \hat{x}) = \frac{\partial \rho(l_i, \hat{x})}{\partial x} \quad (3)$$

由(2)和(3)出发,对参数 x 进行估计,即 M 估计。

M 估计的估计方法有许多种,但应用最广泛的是选权迭代法。其模型是:

$$\text{误差方程: } V = A\hat{x} - l$$

$$\text{权函数: } P(V) = \text{diag}(P_1(V_1) \ P_2(V_2) \cdots P_n(V_n))$$

$$\text{估计准则: } V^T P(V) V = \min$$

$$\text{其中: } \rho(v_i) = \frac{\rho'(v_i)}{v_i}$$

选权迭代法主要有:①Huber 法;②一次范数最小法(L¹估计);③p 范最小法(L^p估计);④丹麦法;⑤Hampel 法;⑥IGG 法(周江文法);⑦验后方差估计法(李德仁法)

这里笔者应用了第一种即 Huber 法,因此对它进行论述。其 ρ 函数为:

$$\rho(v) = \begin{cases} v^2/2 & |v| \leq c \\ c|v| - \frac{1}{2}c^2 & |v| > c \end{cases}$$

式中 c 为常系数,通常 c=2σ,此函数的一阶导数为

$$\rho'(v) = \begin{cases} v & |v| \leq c \\ c \text{sign}(v) & |v| > c \end{cases}$$

权函数为:

$$\rho(v) = \begin{cases} 1 & |v| \leq c \\ \frac{c}{|v|} & |v| > c \end{cases}$$

例子:对大量的测量数据,有时难免会产生粗差,而采用稳健估计,可以帮助消除粗差。举磁

环沉降管的例子,如下所示为 DK612 米到目前为止的部分路段测量数据结果。

12m 左 6.787 6.754 6.756 6.795 6.649 6.646

经检验,先用数据探测法,取 α=0.05, 1- $\frac{\alpha}{2}$ =0.975, μ_{1- $\frac{\alpha}{2}$} =1.960,对 12m 左的数据进行检验,发

现 12m 左 8 月 11 日的数据的观测结果 6.795, 其 W_i=1.983>μ_{1- $\frac{\alpha}{2}$} =1.960,因此其存在粗差影响。

用 Huber 法进行改正,算的结果即改正数为-0.048。

因此,由以上可以看出,选权迭代法具有抗粗差的性质,而最小二乘估计不具备抗差性。

3 傅里叶分析方法应用于路基表面沉降曲线的绘制

测量数据处理,通常是研究时间序列在其时间域上的特性,例如在工程形变测量中,确定不同时间上的形变量,这就是观测序列在时间域上的变化特征。但观测的时间序列常受到各种因素的周期性干扰,既要研究时间序列在频率域上的特性以及时间域和频率域的相互变换,为此要运用傅里叶分析方法。由于观测数据是离散数据,因此采用离散傅里叶变换。其变换公式为:

$$F(j) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) W^{jk} \quad j \in [0, N-1]$$

$$\text{逆变换 } f(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} F(j) W^{-jk} \quad k \in [0, N-1]$$

其中 F(j) 为离散值。W=e^{-2πi/N}

例如对胶州段 DK6 磁环沉降管孔口高程取 2m 左结果为例,用 Excel 作曲线图。如图 2 所示。

用离散傅里叶变换,并作出其频谱图。先编号如表 2,则处理如下。

表 2 DK6 测点 2m 左观测数据编号

	4月 8日	6月 23日	7月 17日	8月 11日	9月 12日	9月 25日
	0	1	2	3	4	5
2m 左	6.752	6.723	6.722	6.725	6.608	6.611

$$\text{当 } j=0 \text{ 时, } F(0) = \sum_{k=0}^5 f(k) e^{-2\pi i k 0/N} = 6.752 + 6.723 + 6.722 + 6.725 + 6.608 + 6.611 = 40.141$$

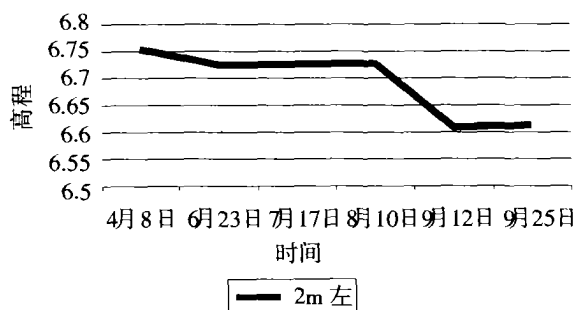


图2 2m左高程变化图

其谱为 $|F(0)|=40.141$

当 $j=1$ 时,有

$$F(1)=F(1)=\sum_{k=0}^5 f(k)e^{-2\pi k/6}=6.752e^0+6.723e^{-i\pi/3}+6.722e^{-2i\pi/3}+6.725e^{-i\pi}+6.608e^{-4i\pi/3}+6.611e^{-5i\pi/3}=0.03-i0.195$$

$$|F(1)|=\sqrt{0.03^2+0.195^2}=0.197$$

同理,可得其他各个点号的谱:

$$|F(2)|=2.261; |F(3)|=1.208; |F(4)|=2.261; |F(5)|=0.197。$$

从而绘制成图如图3所示。

从图3可以看出一些明显的规律,即存在对称性。

4 结束语

本文重点论述了测量数据的处理,在测量数据服从正态分布情况下,最小二乘估计具有最优统计性质,即它是最优线性无偏估计,因而,至今

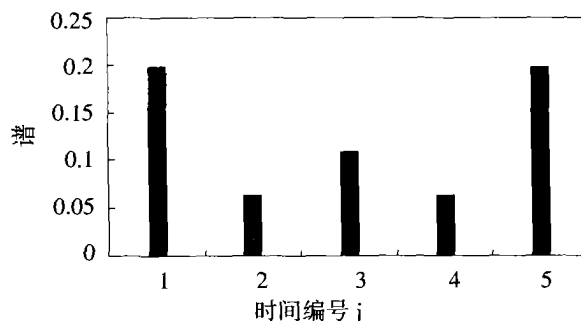


图3 2m左傅里叶频谱图

仍是应用最广泛的一种估计方法。但当出现粗差时,测量数据受到干扰而偏离正态分布,此时应用稳健估计可以抵抗粗差。而应用傅里叶分析,可以研究时间序列在频率域上的特性以及时间域和频率域的相互变换。它用到的数学知识是傅里叶级数和傅里叶变换。傅里叶级数,是将周期函数 $f(t)$ 表达成无限个正弦和余弦谐波分量之和;用傅里叶级数公式推导,将非周期时间函数转为频率函数,以进行时频特性分析,此为傅里叶变换。

参考文献

- [1] 刘大杰,陶本藻.实用测量数据处理方法[M].北京:测绘出版社,2000
- [2] 武汉测绘科技大学测量平差教研室编著.测量平差基础[M].北京:测绘出版社,2000
- [3] 冯金根.高速公路路基沉降观测现场工作要点.Road Machinery&ConstructionMechanization,2001

Level Surveying and Data Process in the Subsidence Monitoring of Roadbed of Jiaoxin Railway

LIU Sheng-chuan, WANG Lian-jun

Abstract: This paper describes the implement method of level surveying in the settlement monitoring of Jiaoxin railway in the whole. Firstly, it introduces the general situation of Jiaoxin railway as well as the purpose and the contents of this survey. Secondly, it describes the principle and method of survey. It emphasizes the data treatment theory and method, including the probing of abnormal data and Coarse Adjustment treatment as well as the Least Square Method and Robust Estimation. Finally, this paper emphasizes the application of Fourier Analysis in the survey.

Key Words: Probing of Abnormal Data, Robust Estimation, Fourier Analysis, Coarse Adjustment