

文章编号:1005-0523(2011)01-0042-05

三点偏弦法复原轨面不平顺波形的理论及研究

程 樱,许玉德,周 宇,陈 文

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:弦测法是目前常用的轨面不平顺检测方法之一,通过研究 30 mm+300 mm 弦三点偏弦法的传递函数特性,给出幅频及相频关系,并利用傅立叶级数展开、合成的数学模型,实现弦测法对轨面不平顺波形的复原。单一频率下的正弦波调试验证了传递函数及傅立叶变换思路的准确性;通过比较正矢法及上海地铁波磨小车数据,分析其复原精度及可靠性,并针对弦测法中所存在的问题提出相应的改善措施,为三点偏弦法的运用及推广提供了理论依据。

关键词:三点偏弦法;传递函数;幅频;相频;轨面不平顺复原

中图分类号:U211

文献标识码:A

准确测量掌握轨面不平顺的实际情况是实现轨道平顺状态科学评定、监控管理的前提条件^[1]。目前,世界各国用来测量高低、轨向不平顺的方法可归纳为弦测法和惯性基准法两大类^[2]。对于弦测法,国内普通采用三点中弦法(又称正矢法)对轨向进行检测^[3],主要不足在于振幅增益随不平顺波长的变化较大,应用受到局限^[4]。对于高低不平顺,除惯性基准法外,国外部分轨检车也采用三点偏弦法(又称偏矢法)来研究轨面短波不平顺^[5],本文重点研究三点偏弦法,并通过比较正矢法及其他测试手段,分析其复原精度及可靠性,并针对偏矢法中所存在的问题提出相应的改善措施,为三点偏弦法的运用及推广提供参考。

1 三点偏弦法测量

1.1 三点偏弦法的基本原理

所谓三点偏弦法就是利用图1所示A、C两轮与轨道接触点的连续ac作为测量的“基准线”,将B轮与轨道接触点b偏离这一弦线的数值bd作为轨面不平顺的测量值,弦测值bd通过测量A、B、C三轮的轴箱相对于车体主梁的位移按式(1)计算求得。

以相同轮重作用下轨道完全平顺的状态为“实际基准线”(x轴),轮轨接触点b偏离实际基准线的数值 bo'_2 ,即是轨面不平顺的实际值,用 $M(x)$ 来表示,bd为弦测法的测量值,简称弦测值,用 $y(x)$ 来表示,若A、B、C三轮的轮重相同, $ad=a$, $dc=b$, $ac=l$ (弦长),由于 $M(x) \ll l$,所以可认为 $o'_1o'_2 \approx a$, $o'_2o'_3 \approx b$,则弦测值 $y(x)$ 与实际值 $M(x)$ 之间的关系可用式(2)表示。

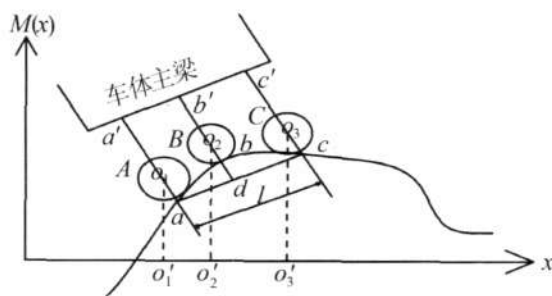


图1 三点偏弦法示意图

Fig.1 Asymmetrical chord offset method system

$$bd = b'd - b'b = \frac{b}{l}a'a + \frac{a}{l}c'c - b'b = bo'_2 - do'_2 = bo'_2 - \frac{b}{l}ao'_1 - \frac{a}{l}co'_3 \quad (1)$$

收稿日期:2010-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50908179);高等学校博士学科点专项科研项目(200802471003)

作者简介:程 樱(1987—),女,硕士研究生,研究方向为轨道工务管理。

$$y(x) = M(x) - \frac{b}{l} \cdot M(x-a) - \frac{a}{l} \cdot M(x+b) \quad (2)$$

当轨面不平顺为正弦波^[6],即 $M(x) = F_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x$ 时(λ 为正弦波波长)

$$y(x) = F_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \left[1 - \frac{a}{a+b} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \right) - \frac{b}{a+b} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \right) \right] + F_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \left[\frac{b}{a+b} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \right) - \frac{a}{a+b} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \right) \right] \quad (3)$$

因此,传递函数

$$H(w) = 1 - \frac{a}{a+b} e^{iwb} - \frac{b}{a+b} e^{-iwa} \quad (w = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ 为正弦波的圆频率}) \quad (4)$$

$$\text{相位 } \tan \theta(w) = \frac{\frac{b}{a+b} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \right) - \frac{a}{a+b} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \right)}{1 - \frac{a}{a+b} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot b \right) - \frac{b}{a+b} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \right)} \quad (5)$$

1.2 三点偏弦法传递函数的幅频及相频关系

现拟定弦长 $l = 330$ mm, 其中 $a = 30$ mm, $b = 300$ mm, 采用 30 mm+300 mm 弦的三点偏弦法, 根据式(4)计算其传递函数, 幅频及相频关系如图2(a), (b)所示。

当 $\lambda < 189$ mm 时, 振幅增益在 0~2 间振荡;

若传递函数过小, 过度放大弦测值, 引起剧烈振荡, 因此需设定警戒线, 考虑以 0.1 为限值。

当 $\lambda > 189$ mm 时, 振幅增益 < 1 且随不平顺波长增加而递减。此时, 传递函数只对弦测值只起放大作用, 复原波形具有偏安全性。

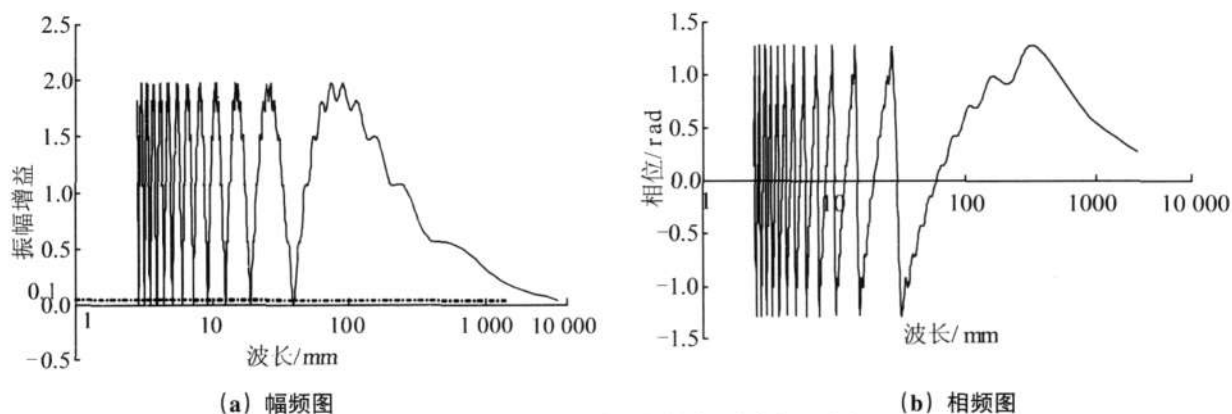


图2 30 mm+300 mm 弦测法的传递函数幅频及相频图

Fig.2 The amplitude-frequency and phase-frequency of transfer function by 30 mm+300 mm chord-based measuring system

1.3 正弦波调试

假造一单一正弦曲线: $y = 2 \sin(2\pi \cdot x/50)$ (单位:mm), 采样间距 2 mm, 原始波形与复原波形见图3。

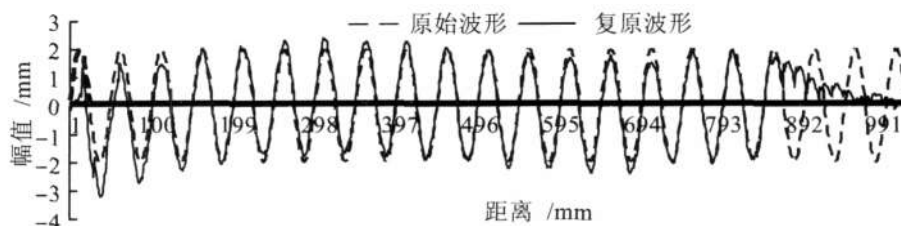


图3 正弦函数的复原及原始波形图

Fig.3 Recovery and original irregularity oscillogram of sine function

观察该区段主体段(去掉前15个,后150个无弦测值的点),在单一频率下,复原波形(实线)与原始波形(虚线),图形相似,频率一致,幅值略有波动,但波动范围不大。其次,通过matlab调试^[7],复原波形的敏感频率是20 Hz,与实际一致,且无相位偏差。

单一频率的正弦波调试验证了30 mm+300 mm弦在偏矢法测量不平顺时的传递函数(图2)的准确性和偏矢法在理论上复原正弦波的可行性及可靠性。

1.4 等弦长下的偏矢法与正矢法比较

另外,考虑三点中弦法的传递函数为 $H(w_{\text{mid}}) = 1 - \cos(lw/2)$,可得到同样弦长下的振幅增益比较图(振荡部分)。

正矢法较之偏矢法,振荡更剧烈,有更多点落于“0”及“2”限值附近,因为在正矢法中,若 l/λ 为奇数时,传递函数即为2,弦测值恒为实际值的2倍;若 l/λ 为偶数时,传递函数即为0,此时无法复原,即使在0附近,也会造成对弦测值的过度放大。因此,正矢法的复原准确性严重受到传递函数的制约。相较而言,偏矢法传递函数更为复杂,振幅增益变化更为平缓,端值出现概率更低,如图4所示,30 mm+300 mm弦在波长 $\lambda > 30$ mm范围内,其振幅增益已在(0,2)间平缓变化,且增益不在限值附近,这也是使用偏矢法比正矢法更合理的一面。

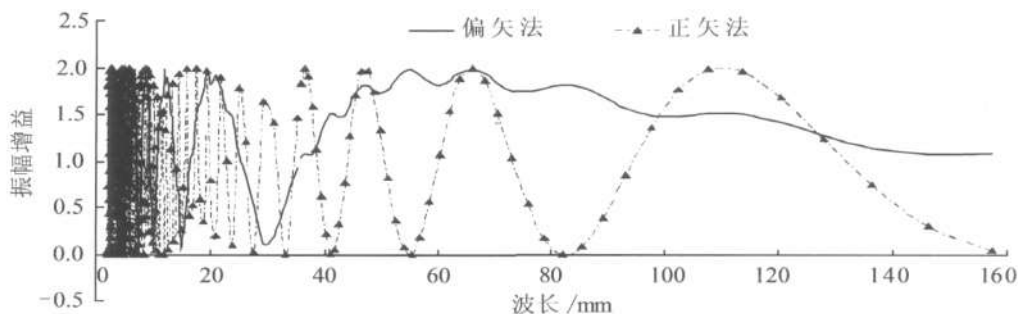


图4 等弦下的偏矢法与正矢法的传递函数幅频比较图(振荡部分)
Fig.4 The amplitude-frequency of transfer function compared by Asymmetrical chord offset method and chord versed sine method with the same chord length

2 利用傅立叶级数的展开、合成复原轨面不平顺

所谓傅立叶级数的展开、合成法,即把连续、随机的轨面不平顺曲线近似成周期的离散频谱,拆分成若干个对应频率特性 $H(w)$ 的正弦波,形成测定波形 $y(x)$ 的正弦频谱 $y(w)$,分别在对应频率域内计算 $M(w) = y(w)/H(w)$,再将 $x(w)$ 反向傅立叶变换,合成连续波形,即轨面不平顺 $M(x)$ 。根据傅立叶级数展开原理^[8]

$$y(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Y_k \cdot e^{jw_k x} \quad (6)$$

其中: $Y_k = \frac{1}{T} \int_0^T y(x) \cdot e^{-jw_k x} dx$; $w_k = 2\pi k/T$ ($k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

利用传递函数得 $M_k = Y_k \cdot \frac{1}{H(w_k)}$, 因此原波形 $M(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} M_k \cdot e^{jw_k x}$, 合成复原。

注意到在 $H(w_k)=0$ 时是不可复原的。即使 $H(w_k)$ 不为0而非常接近于0时,对弦测波形直接扩大 $1/H(w_k)$ 倍,会使不平顺数据骤然放大,引起波形剧烈振荡,影响复原波形的可靠性,如前所述,必须设定 $H(w_k)$ 的下限,避免过度放大。

3 数据测试

将上海地铁波磨小车所推的数据假设为轨道实际不平顺,随机选取一个实验段进行偏矢法弦测、复

原,并与波磨小车数据进行对比,采样点4 096个,采样间距2 mm。

在某些长波高低不平顺中常含有弦测法所无法反映出的随轨道纵断面坡度变化的高程数据,这些均值不为零,含有趋势项的数据,将导致谱密度值的错误,必须在进行谱密度处理分析之前,对数据进行预处理,本研究采用多项式拟合通过最小二乘法来消除趋项。

观察图5,该区段主体段(去掉前15个,后150个无弦测值的点),复原数据、九阶去趋原始数据的不平顺波峰、波谷值最大值均出现在同一位置。具体数据如下表1。

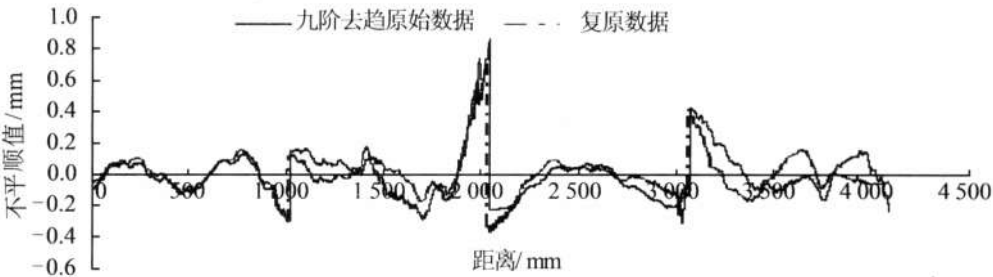


图5 该区段的复原及九阶去趋原始波形图
Fig.5 Recovery and original irregularity (Degree 9 tendency-off) oscillogram

表1 该区段不平顺数据表
Tab.1 Data table of Track irregularity in the zone

峰值	复原数据/mm	九阶去趋原始数据/mm	振幅增益/%
波峰值	0.712	0.865	-17.7
波谷值	-0.372	-0.309	+20.4
峰峰值	1.084	1.174	-7.67

复原数据与九阶去趋原始数据之差的平均值为-0.002 mm,标准差为0.110 mm。

但是受弦测法本身的限制,无法准确反映区段首尾段不平顺情况,因此无法测得尾段的不平顺波峰值(九阶去趋的尾段波峰值为0.143 mm)。同时局部区域出现了歪曲实际不平顺的正负方向及出现虚假图形等弦测法本身所无法克服的缺陷。

将复原数据反向叠加九阶趋势项后,可整体反映原始轨面不平顺波形。

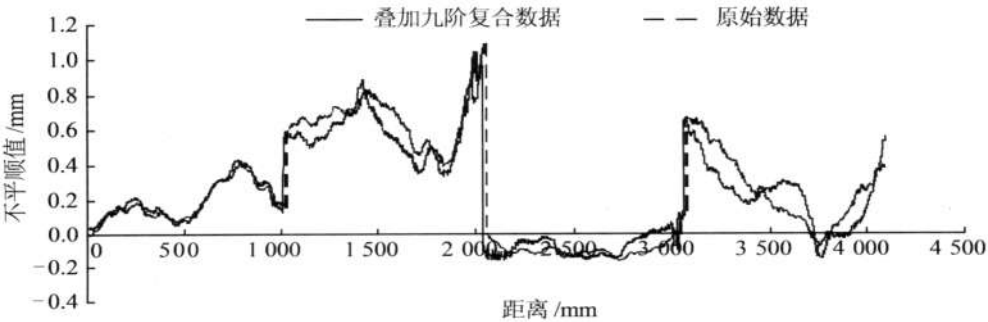


图6 该区段的复合及原始波形图
Fig.6 Complex and and original irregularity oscillogram

4 结语

本文重点研究了30 mm+300 mm弦偏矢法的复原情况,对于弦长对复原波形范围的影响, a/b 取值对传递函数的影响受篇幅影响,在此暂不讨论。

通过研究 30 mm+300 mm 弦偏矢法的传递函数特性,给出了其幅频与相频关系,并利用傅立叶级数的展开、合成法来实现弦测数据对轨面不平顺的复原。通过与正矢法和其他测试手段的比较,评估了偏矢法的测试精度和可靠性。

1) 30 mm+300 mm 弦在偏矢法测量不平顺时的传递函数,当 $\lambda < 189$ mm 时,幅值增益在 0~2 间振荡;当 $\lambda > 189$ mm 时,幅值增益 <1 ,且随不平顺波长增加而递减。

2) 在等弦长下,偏矢法传递函数的振幅增益更为平缓,落于限值附近的增益值更少,复原波形更为准确,因此,在等弦长下,偏矢法优于正矢法。

3) 弦测法本身具有夸大、缩小、歪曲实际不平顺的正负方向及出现虚假图形等无法克服的缺陷。对比正矢法,偏矢法大大减小了虚假波形出现的概率;对原波形的夸大及缩小仍不可避免,但幅值整体的缩放度较之正矢法减小了很多。从正弦波测试及现场数据统计分析来看,偏矢法最大约 30% 的放大或缩小。

通过对现场实测数据的统计分析,了解偏矢法传递函数的幅频及相频关系,分析了传递函数对数据复原的影响及偏矢法复原中存在的一些缺陷,为今后进一步研究偏矢法复原轨面不平顺以及针对性地指导现场作业提供了一定的参考和依据。

参考文献:

- [1] 任盛伟. 等弦法对轨面不平顺测量滤波特性影响的研究[J]. 铁道建筑, 2006(2): 83-84.
- [2] 罗林, 张格明, 吴旺青, 等. 轮轨系统轨道平顺状态的控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [3] 杜鹤亭. 长波长轨道不平顺检测中的数字滤波方法[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 58-65.
- [4] 朱洪涛. 轨检仪弦测法“以小推大”检查轨道轨向不平顺的理论研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(1): 36-05.
- [5] 周永健, 练松良, 杨文忠. 轨面短波不平顺对轮轨力影响的研究[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(4): 6-12.
- [6] STUART L, GRASSIE. Measurement of railhead longitudinal profiles: a comparison of different techniques[J]. Wear, 1996, 191: 245-251.
- [7] 王济, 胡晓. Matlab 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 知识产权出版社, 2006.
- [8] 吉村彰芳. 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の確立とその応用[R]. 铁道技术研究报告, 1986.

Theory and Research of Asymmetrical Chord Offset Method of Restoring a Waveform of Track Irregularity

Cheng Ying, Xu Yude, Zhou Yu, Chen Wen

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Chord-based method is a common method of rail irregularity detection. Through studying transfer function amplitude-frequency characteristics of 30 mm+300 mm Asymmetrical chord offset method, relation between amplitude-frequency and phase-frequency is given. By using the mathematical model of Fourier series spreading and synthesizing, the restoration of track irregularity is realized. Single frequency sine wave debugging verifies accuracy of the transfer function and the Fourier transform. By comparing the chord versed sine method and Shanghai metro wave grinding data, the accuracy and reliability of three-point tapered chord method is analyzed. This paper also gives some problems and corresponding improving measures, which will help provide a reference for the application of asymmetrical chord offset method.

Key words: asymmetrical chord offset method; transfer function; amplitude-frequency; phase-frequency; restoration of track irregularity