

文章编号:1005-0523(2013)05-0013-05

基于四点弦测法的轨面不平顺检测及复原方法

毛晓君,许玉德,周宇

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海201804)

摘要:为了实现轨面不平顺的在线连续检测,并进一步提高弦测法的检测精度,提出了一种四点弦测法。通过理论推导其传递函数,并基于快速傅里叶(FFT)变换利用MATLAB建立了其自动复原算法。为更加合理地确定四点弦测法各参数,用20个随机产生的正弦波叠加模拟轨面不平顺并选用复原误差的最大值、平均值和标准差3个指标来进行复原精度比选。在最优参数的基础上,对上海地铁一段长30 m的实测数据进行复原,其结果与对应形式下三点弦测法的复原结果对比,结果表明四点弦测法的复原精度能控制在微米级,且相对于三点弦测法误差平均值和标准差均改善了50%以上,最大值改善了70%以上。

关键词:轨面不平顺;弦测法;复原算法;复原精度

中图分类号:U25

文献标志码: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]。随着列车运行速度的提高,轨面短波不平顺引起的轮轨冲击破坏、振动以及运行噪声问题日益凸显^[2-5]。如何在有限的天窗时间内对短波不平顺进行连续在线检测,是目前工务系统急需解决的问题。

轨面短波不平顺是指钢轨顶面小范围内的不平顺,包括轨面不均匀磨耗、擦伤、剥离掉块、焊缝不平、接头错牙等钢轨表面不平顺^[6]。其幅值通常小于2 mm,波长小于1m。对于如此小幅值、小波长但对轮轨冲击、振动和噪声具有极大破坏作用的不平顺,传统长波长轨道不平顺检测方法已难以适用。例如我国目前在主干线铁路上使用的基于惯性基准法的轨检车,能检测得到的高低不平顺波长范围为1.5~50 m、检测精度仅为 ± 1.0 mm^[7]。无论是可检测的波长范围,还是检测精度都不能满足轨面短波不平顺的检测需要。目前,国内外对于轨面短波不平顺的检测都是基于弦测法和轴箱加速度原理^[8-10]开发的专用检测小车实现的。

传统弦测法以三点中弦法为主,但是由于三点中弦法的几何特性,基于此弦测形式的传递函数在特定波长处振幅增益值为0,在这些特定波长处无法实现复原,因此会造成检测波形的失真,这限制了弦测法进一步应用于短波长轨道不平顺的检测。三点中弦法的这一弊病,可通过增加传感器数量或不等间隔放置传感器来改善弦测法的传递函数特性^[11-12]。为此国内外学者对三点偏弦法进行了研究^[13-14],三点偏弦法虽在复原精度上有了极大的提高,但较高的精度是建立在较小的弦比基础上,这给检测仪器的加工造成一定的困难。除此之外,基于三点偏弦法的复原波形在两端存在失真,因而未被广泛应用于轨道工务检测中。

基于上述分析,本文从增加传感器数量的角度创新性地提出一种新的弦测方法——四点弦测法,并重新定义弦测法的检测值,以期得到理想的复原精度。

1 四点弦测法复原的基本原理

四点弦测法通过在三点弦测法的基础上新增一个检测传感器,并对检测值进行重新定义,以此得到一个具备更优特性的传递函数,从而提高检测精度。其检测原理如图1所示。

收稿日期:2013-06-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50908179);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介:毛晓君(1989—),女,硕士研究生,研究方向为轨道工务。

在检测车车厢底部A,B,C,D位置装4个传感器,相邻两个传感器之间的距离分别为 m,n,k 。检测过程中先取A,B,C处3个传感器,则B处传感器在轨道的照射点 b 偏离弦线 ac 的数值如图1所示为 bo ;再取A,B,D处3个传感器,则B处传感器在轨道的照射点 b 偏离弦线 ad 的数值为 bo' ,将 bo 与 bo' 的差值作为四点弦测法的检测值 f ,即

$$f = bo - bo' \quad (1)$$

图1中: a,b,c,d 点处轨道的真实不平顺幅值为 y_1, y_2, y_3 和 y_4 ,通过几何关系推导得到与测量值 f 的关系如下

$$f = \frac{m}{m+n+k}y_4 - \frac{m}{m+n}y_3 + \frac{mk}{(m+n+k)(m+n)}y_1 \quad (2)$$

由于4个测量点经历的是同一段轨道不平顺,只是存在一个恒定相位差,因此根据傅里叶变换的线性性质及时移性质,可由(2)式推导得到四点弦测法的传递函数:

$$H(\omega) = \frac{m}{m+n+k}e^{j(n+k)\omega} - \frac{m}{m+n}e^{jn\omega} + \frac{mk}{(m+n+k)(m+n)}e^{-jm\omega} \quad (3)$$

由(3)式可知,四点弦测法传递函数特性由四个检测传感器之间的两两间隔 m,n,k 决定。

2 四点弦测法参数确定

为了分析新增传感器对检测精度的影响,固定 m,n 的大小,取 $m=250$ mm, $n=600$ mm。并让 k 以50 mm为间隔,依次从50 mm增加至200 mm,比较四种情况下传递函数增幅增益的差异,如图2所示。图中250+600+50表示四点弦测法4个检测传感器之间的两两间隔 m,n,k 依次为250,600 mm和50 mm。以此类推。下文表达均简化为这种形式。

传统三点弦测法的传递函数振幅增益曲线一般均在0~2之间波动,且存在较多极值点。当传递函数振幅增益在0~1之间时,说明对应波长处的检测值小于轨道真实的不平顺值;当传递函数振幅增益在1~2之间时,说明对应波长处的检测值又大于轨道真实的不平顺值。而从图2中可以看出,四点弦测法的传递函数振幅增益波动范围小于三点弦测法,不再为0~2,说明其振荡速度缓于三点弦测,这点有利于弦测法检测精度的进一步提高。除此之外,任意波长处的振幅增益值均小于1,说明所有波长处的检测值均小于轨道真实的不平顺值,经除法运算后得到一个放大的结果,这只会造成检测复原值的放大,也有利于一定的安全储备。

此外,图2中随着新增检测传感器与相邻传感器的间隔 k 值的进一步增大,传递函数振幅增益曲线振荡变得剧烈,且更慢进入平稳期,极值点也有所增多,这些都会在复原过程中带来一定误差。因而 k 值应选取较小值,考虑到检测仪器的加工限制,最终选定 $k=50$ mm。

2.1 模拟轨面短波不平顺构造

为进一步确定四点弦测法的另两个参数:第一、第二传感器的间隔 m 和第二、第三传感器的间隔 n ,利用MATLAB构造轨面短波不平顺模拟波形,从理论层面讨论 m,n 的不同取值对复原精度的影响。构造得到一段长10 m的模拟不平顺波形如图3所示。

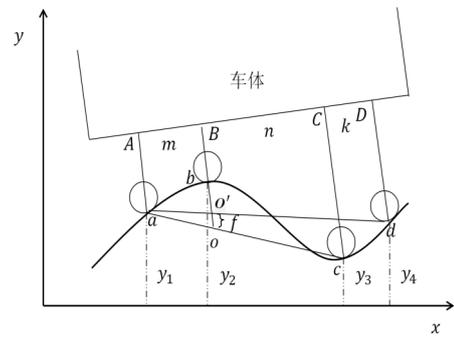


图1 四点弦测法检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of four-point chord method

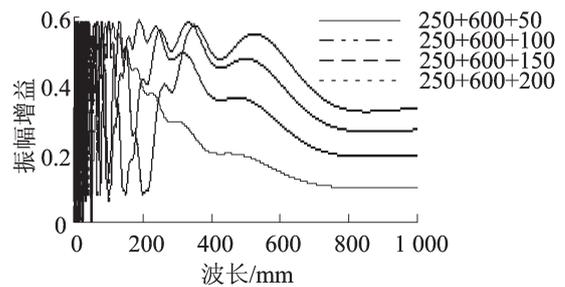


图2 不同 k 值下传递函数振幅增益

Fig.2 Magnitude gains under different value of k

上述模拟不平顺波形是通过式(4)构造所得

$$y = \sum_{i=1}^N a_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} x + \varphi_i\right) \tag{4}$$

其中: N 是正弦波的数量; a , λ 和 φ 依次为各正弦波的振幅、波长和相位角。图 3 中 $N=10$, $a_i \in [0, 0.0025]$ mm, $\lambda_i \in [0, 1000]$ mm 和 $\varphi_i \in [-\pi, \pi]$ 且均由构造程序随机产生。

2.2 不同参数对复原精度的影响

固定总弦长不变且取 $l=900$ mm, 如上所述 k 取 50 mm, 令 m 以 100 mm 为步长从 50 mm 依次增加至 750 mm, 则共有 8 种不同的情形。

利用 MATLAB 编写程序, 在模拟不平顺波形的基础上实现上述 8 种传感器布置形式下四点弦测法检测值的获取, 并得到随线路长度变化的检测波形。其次在检测波形的基础上, 基于快速傅里叶(FFT)变换复原算法利用 MATLAB 实现从检测波形 $f(x)$ 到模拟不平顺波形 $y(x)$ 的自动复原。

为比较 8 种不同传感器布置形式下复原得到的波形与模拟不平顺波形的精确程度, 即复原精度, 取复原误差的最大值、平均值和标准差 3 个指标进行衡量。8 种不同布置形式下各指标计算结果见表 1。

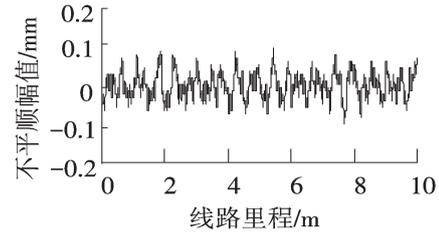


图3 轨面短波不平顺模拟波形
Fig.3 Simulation waveform of rail surface short wavelength irregularities

表 1 不同布置形式下复原精度指标

Tab.1 Restoration accuracy indexes under different m and n

弦测形式	复原误差最大值/mm $\text{Max} f_i - y_i $	复原误差平均值/mm $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i - y_i $	复原误差标准差/mm $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}{n-1}}$
50+800+50	0.003 7	0.001 1	0.001 3
150+700+50	0.003 9	0.001 1	0.001 3
250+600+50	0.005 8	0.001 3	0.001 7
350+500+50	0.007 8	0.001 4	0.001 9
450+400+50	0.009 8	0.001 5	0.002 3
550+300+50	0.011 8	0.002 1	0.002 9
650+200+50	0.013 7	0.002 6	0.003 6
750+100+50	0.015 6	0.003 3	0.004 3

表 1 说明, 从平均值与标准差的角度, 四点弦测法的复原精度已经达到了微米级。此外, 随着 m 从 50 mm 增加到 750 mm, 复原误差的三个衡量指标也随之变大。但是在“(50+800+50) mm”与“(150+700+50) mm”两种布置形式下, 复原误差最大值仅增加了 0.2 μm , 而复原误差的平均值和标准差并没有差异, 说明 m 取过分小时不再对复原精度的进一步提高有显著的改善作用。基于此, 最终选用“(150+700+50) mm”的弦测形式。

3 实测数据下四点弦测法与三点弦测法复原精度对比

2.2 节中对模拟不平顺波形的复原虽然已经达到微米级别, 但实际轨面不平顺是一个非平稳过程, 是一个随里程变化的随机函数^[6], 并非是若干个正弦波的叠加。因此, 有必要基于一段实测轨面短波不平顺数据进行复原, 以验证四点弦测法的复原精度。

实测数据来源于上海地铁, 检测仪器为德国 Vogel & Plötscher 公司的 RMF-2.3E 型波磨测量仪。采样

间隔为2 mm/点,取其中一段长30 m的数据作为分析对象。

此外,为进一步分析新增一个检测传感器对弦测法检测精度的改进作用,在2.2节最后确定的四点弦测形式的基础上,分别用“(150+700+50) mm”的四点弦测和“(150+700) mm”三点弦测两种形式进行30~1 000 mm波长范围内的轨面短波不平顺波形检测和复原。复原结果与经30~1 000 mm带通滤波后的RMF-2.3E型波磨测量仪检测数据对比,并计算相应的复原精度。两种方法的复原结果如图4所示。

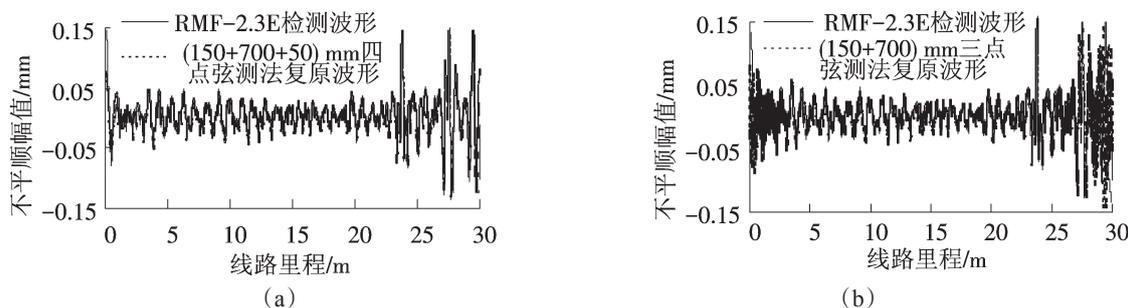


图4 30~1 000 mm波长下两种方法复原波形

Fig.4 Restoration waveforms from the two methods under 30~1 000 mm wavelength

从图4可以看出,基于四点弦测法的复原波形相对于三点弦测法,与带通滤波后RMF-2.3E型波磨测量仪的检测波形更加吻合。除此之外,由于弦测法前后两端各有若干数据检测不到,因而无论是三点弦测法还是四点弦测法,其复原波形在两端都存在一定程度的复原失真。当检测长度进一步增大时,两端有限范围内的失真可忽略。但是不论是从失真的程度,还是失真的范围,四点弦测法相对于三点弦测法都有了很大的改进。

对于吻合程度都较好的中间段数据,取3~27 m段进行复原精度指标的计算,见表2。

表2 三点弦测法与四点弦测法复原精度对比

Tab.2 Restoration accuracy indexes of three-point and four-point methods

复原精度指标	(150+700) mm 三点弦测法	(150+700+50) mm 四点弦测法	相对百分比/%
复原误差最大值/mm	0.022 1	0.006 0	72.85
复原误差平均值/mm	0.002 8	0.001 3	53.57
复原误差标准差/mm	0.003 8	0.001 8	52.63

表2说明,在不失真的中间段,四点弦测法相对于三点弦测法在检测精度上有了显著的提高,复原误差的平均值和标准差两个指标均改善了50%以上,而复原误差最大值改善了70%以上。此外,基于实测轨面短波不平顺的四点弦测法检测精度仍然为微米级,控制在较高的精度上。

4 结论

在传统三点弦测法的基础上,通过新增一个检测传感器并对检测值进行重新定义,得到了一种新的弦测形式——四点弦测法,并由此推导得到了其传递函数。基于理论构造的模拟波形,确定了其最优参数组合,并在最优参数的基础上,结合实测数据得到了四点弦测法的复原精度。得出以下几点结论:

1) 四点弦测法传递函数振幅增益幅值的波动范围小于三点弦测法,不再为0~2之间,而更平缓的振幅增益曲线有利于复原精度的进一步提高。因此四点弦测法相对于传统三点弦测法具备更优传递函数特性。

2) 四点弦测法的传递函数由4个检测传感器的两两间隔 m, n, k 的取值决定,其中较小的 m 与 k 值对复原精度的进一步提高有较为显著的改进作用。

3) 实测数据表明,在最优参数组合下四点弦测法的复原精度已经达到了微米级,且相比于对应形式下的三点弦测法,复原误差平均值和标准差均改善了50%以上,最大值改善了70%以上。因此,对于轨道不

平顺,特别是现在工务部门较为棘手的波长小于1 m的钢轨表面短波不平顺,四点弦测法具备较强的适用性。

参考文献:

- [1] 李明华,李立林,何晓源,等. 高速铁路轨道不平顺幅值控制研究[J]. 铁道工程学报,2009(9):26-30.
- [2] 陈敏敏,练松良,程小平,等. 接头区轨面短波不平顺与P1、P2力关系的试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2011,30(1):59-63.
- [3] 周永健,练松良,杨文忠,等. 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.
- [4] 徐庆元,曹扬风,周小林,等. 短波随机不平顺对列车-板式无砟轨道-路基系统振动特性的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(4):1105-1110.
- [5] 韦红亮,练松良,刘扬,等. 城市轨道交通轨面短波不平顺测试分析[J]. 华东交通大学学报,2011,28(4):33-37.
- [6] 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,2006:7-8.
- [7] 乔小雷. 轨检车检测技术的比较研究[J]. 城市轨道交通研究,2009,12(6):33-39.
- [8] GRASSIE S L. Measurement of railhead longitudinal profiles: a comparison of different techniques[J], Wear, 1996, 191: 245-251.
- [9] 张伟. 基于轴箱谱的轨道短波不平顺识别方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [10] MARIJA MOLODOVAA, ZILI LI, ROLF DOLLEVOET. Axle box acceleration: measurement and simulation for detection of short track defects[J]. Wear, 2011, 271: 349-356.
- [11] SINCLAIR I. Sensors and transducers [M]. London: Butterworth Heinemann, 2001: 30-37.
- [12] SIMON IWNICKI. Handbook of railway vehicle dynamics[M]. United Kingdom: CRC/Taylor & Francis, 2006: 451-452.
- [13] 程樱,许玉德,周宇,等. 三点偏弦法复原轨面不平顺波形的理论及研究[J]. 华东交通大学学报,2011,28(1):42-46.
- [14] YOSHIMURA A. A new method for repairing railway track irregularities using levelling and lining machines[J], Transactions on the Built Environment, 1996, 18: 1743-3509.

Rail Surface Irregularities Detection and Restoration Based on Four-point Chord Reference Method

Mao Xiaojun, Xu Yude, Zhou Yu

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

Abstract: In order to realize continuous detection of rail surface irregularities and improve detection precision, a new four-point approach based on chord reference method is presented in this paper. With the theoretical deduction of its transfer function, the automatic restoration algorithm based on Fast Fourier Transform (FFT) has been realized by means of MATLAB. A simulation waveform consisting of 20 random sine waves has been used for scientific determination of the three separation distances. The maximum value, average value and standard deviation of restoration error are therefore adopted to weigh their restoration precision. Finally, on the basis of optimal parameters, a length of 30m real track irregularities from Shanghai metro is used for comparison. Results show that restoration precision of the new four-point method has been controlled at micron level. In the aspect of restoration error's average value and standard deviation, the detection precision has been improved over 50% and the maximum value has been improved over 70% when compared to the traditional three-point method.

Key words: rail surface irregularities; chord reference method; restoration method; restoration precision