

基于中点弦测模型的钢轨波磨量值估计*

殷 华^{1,2}, 朱洪涛¹, 魏 晖³, 王志勇¹, 谭卿杰¹

(1. 南昌大学机电工程学院 南昌, 330096) (2. 江西农业大学软件学院 南昌, 330045)

(3. 江西科技学院汽车工程学院 南昌, 330098)

摘要 针对中点弦测模型无法复原轨道不平顺量值的问题, 在分析钢轨波磨及对应的弦测数据后发现两者均具有周期性, 在此基础上提出了一种多弦测量并计算钢轨波磨量值的方法。通过采用不同弦长对同一轨道的测量, 避免单一中点弦测法中特殊波长幅值增益为零的问题; 利用小波变换多分辨率的特点获取了波磨的频率及出现位置, 将其应用于轨道波磨量值测算。结果表明, 该方法能够从轨道中点弦测数据中发现钢轨波磨, 并通过计算复原其原始量值, 适合工程中对钢轨波磨的快速检测估计。

关键词 小波变换; 钢轨波磨; 中点弦模型; 轨道不平顺

中图分类号 U216.3; TH17

引 言

钢轨波浪形磨耗(简称“波磨”)广泛存在于各种铁路轨道线路中, 是机车运行时产生震动和噪声的激扰源, 影响机车的使用寿命及乘坐的舒适性, 严重时还可能导致列车出轨, 造成生命财产的巨大损失。为了剖析钢轨波磨产生的机理, 国内外的学者们进行了深入的研究。西班牙的 Emesto 等^[1]认为波磨的产生与轨枕间距有关。Tassilly^[2]在对巴黎轨道线路详细调查后认为轨头的原始不平顺、钢轨接头会引起轮轨系统垂向力冲击的大大增加, 当这种应力超过轨道的承受度时将会造成波磨。王小文等^[3]在对准高速铁路钢轨进行测量后发现其磨耗主要在于道岔区、曲线及轨道结构受约束较多处发生。由于钢轨波磨形成过程较为复杂, 目前未对其产生的原因达成统一观点。但近年来, 通过对各种轨道的波磨进行观察和测量表明轨道波磨存在着普遍规律: 同一处轨道的波磨频率基本一致, 且维持一定里程, 形态以正弦或准正弦为主, 通常深度^[4-8]不大于 0.7 mm; 波磨形成的初期就必须加以修复, 否则将会随时间逐渐恶化。因此, 如何对波磨进行检测成为轨道波磨病害防治的关键问题。

国内外对钢轨波磨的检测方法之一是惯性法,

利用加速度计的惯性基准, 通过对得到的大型轨检列车轴箱加速度信号进行二次积分获取不平顺值, 如: 英国 Rail measurement 公司研制的 RCA 波磨分析车、我国钢轨波浪磨耗动态检测系统 RCIU-1 等。该方法的检测精度最高能达到微米级, 但其设备成本高, 在轨道日常人工巡检中不太适用。另一种更为常见的检测方法是平直尺, 其测量原理简单, 但操作者劳动强度大且测量效率低下。轨检小车目前在各个铁路工务段被广泛使用, 能够实现轨道的连续测量, 但由于原理所限不能获取轨道波磨幅值。文献^[9]给出了一种轨道不平顺测量与数据复原的方法, 其采用的偏弦测量仅限于理论分析, 在实际工务段并无成熟设备, 对特殊波长无法测量的问题也仍未解决, 因此并未使用。笔者从轨道检查小车的结构出发, 结合中点弦测法的原理和轨道波磨的基本规律, 提出双弦模型及小波分析的测量方法, 实现从轨检小车弦测数据中得到波磨病害信息。

1 中点弦测法的波磨响应特性

弦测法指的是沿钢轨轨面拉一根固定长度的弦, 在此弦的某个位置放置一个或多个位移传感器(或钢尺), 测头与轨面接触, 通过该传感器读取当前位置上弦与轨道之间的垂直距离, 并以此来判断当

* 国家自然科学基金地区科学基金资助项目(51468042); 江西省自然科学基金资助项目(20142BAB206003)
收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2015-08-10

前轨道的几何不平顺情况。根据放置位移传感器的数量不同,弦测法可以分为三点弦与多点弦;而根据放置位移传感器位置的不同,可以分为中点弦与偏弦。由于文献[10]规定目前轨道不平顺静态评价需采用中点弦测法,且实际工务段也是基于中点弦模型进行轨道不平顺测量,因此以中点弦测量为基础进行讨论。令 L 表示当前测量弦长, X 表示固定在弦中点处的位移传感器的位置。设当前轨面不平顺函数为 $F(X)$,则位移传感器测得的不平顺幅值 Δ 可用下式来表示

$$\Delta = \frac{F\left(X - \frac{L}{2}\right) + F\left(X + \frac{L}{2}\right)}{2} - F(X) \quad (1)$$

若轨道实际不平顺幅值存在周期性 T ,即 $F(X+T) = F(X)$,则由式(1)可知,中点弦测法测得的不平顺幅值同样存在周期性 T 。以上是从时间域进行讨论,对式(1)进行频域变换,得到其传递函数为

$$\begin{cases} |H_L(\omega)| = 1 - \cos(\pi L/\lambda) \\ \varphi_L(\omega) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\omega = 2\pi/\lambda$ 为空间角频率, λ 为轨道不平顺的波长。

中点弦测法在频域的输入输出关系可表示为 $Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$ 。观察式(2)可以发现中点弦测法的输入输出并不存在着相位上的偏差,但其幅值却和测量弦长及被测轨道波长有关。图1为中点弦测法的幅频曲线,从图中可看出,当被测轨道不平顺波长与测量弦长比值较小时,幅值增益在 $0 \sim 2$ 之间振荡,这使得中点弦测法无法如实反映当前轨道的不平顺幅值,特别是当 $L/\lambda = 2n(n=1, 2, \dots)$ 时幅值输出为 0 。

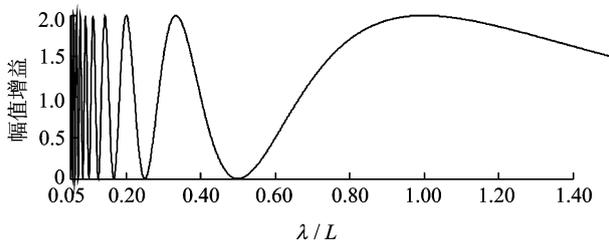


图1 中点弦测法幅频特性曲线

Fig. 1 Midpoint chord amplitude-frequency curve

2 双中点弦测量模型

2.1 测量原理

基于上述分析,对于特定波长不平顺而言,若改

变弦长的值使其与被测波长不存在偶数倍关系则可以得到非零响应。因此,只要在测量过程中采用不同的弦长对同一段轨道进行测量,则幅值增益响应为 0 的概率将大幅下降。为了说明上述方法,分别用弦长 L_1 和 L_2 对不平顺波长为 λ 的轨道采用中点弦法进行测量,并按照里程取得对应点的测量不平顺之和 Σ ,即

$$\Sigma = \frac{F\left(X - \frac{L_1}{2}\right) + F\left(X + \frac{L_1}{2}\right)}{2} + \frac{F\left(X - \frac{L_2}{2}\right) + F\left(X + \frac{L_2}{2}\right)}{2} - 2F(X) \quad (3)$$

对式(3)进行频域变换得到其幅频与相频响应为

$$\begin{cases} |H_{L_1+L_2}(\omega)| = 2 - 2\cos(\pi(L_1+L_2)/2\lambda) \cdot \\ \quad \cos(\pi(L_1-L_2)/2\lambda) \\ \varphi_{L_1+L_2}(\omega) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,当采用不同弦长对同一轨道进行测量时,其相位偏差依然为 0 ;但幅值增益与选定的弦长 L_1, L_2 及不平顺波长 λ 有关。

2.2 参数优化

由于轨道波磨波长通常在 $50 \sim 200$ mm 之间,在实际工程中只要找到两个不同弦长 L_1 和 L_2 ,使得它们测量值的增益和在波磨波长范围内满足以下条件即可

- 1) 不存在幅值为 0 的点且最小增益尽可能的大;
- 2) 增益曲线在整个波长区间尽可能平坦。

条件(1)保证了对所有轨道波磨波长均有响应;条件(2)则确保了幅值增益波动较小。由于目前已有的 0 级轨道检查小车弦长 L_1 为 750 mm,在此基础上分别取不同的 L_2 可得到随不平顺波长 λ 变化的幅值增益和。为了保证能够从数据中准确地辨识及计算波磨周期,最小增益和阈值可设定为 0.5 ,即从原始增益和数据中抛弃幅值增益小于 0.5 的点,得到 L_2 的有效弦长取值序列

$$L_2' = \{63, 64, \dots, 89, 667, 668 \text{ mm}\}$$

方差通常用来度量变量的各个取值与其均值之间的偏离程度,方差值越小数据平坦程度越好,其定义为

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5)$$

为了从 L_2 的有效弦长取值序列中选取最优值,引入方差对其中每种弦长下幅值增益倍数进行评价,可得图2。图中当 L_2 选择为 667 mm 时,方差值最小。

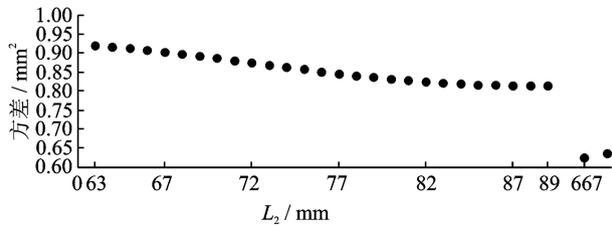


图2 不同弦长时幅值增益方差

Fig. 2 Variance of different wavelength gain

此时, L_1 与 L_2 测量值的增益倍数与不平顺波长变化之间的关系如图3所示。

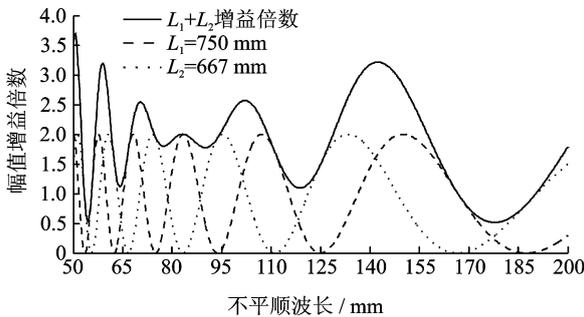


图3 $L_1=750$ mm 及 $L_2=667$ mm 时幅值增益倍数随波长变化

Fig. 3 Sum of amplitude gain with wavelength $L_1=750$ mm and $L_2=667$ mm

3 基于时频分析的滤波方法

不论选择何种测量弦长,所测得数据始终会存在着夸大或缩小现象,这是由中点弦测法的性质决定的。观察图3所示的中点弦测法的幅频特性曲线,当测量弦长一定时,不同不平顺波长对应的幅值增益是不同的,如果某时刻的不平顺波长已知,则其对应的幅值增益即可通过式(2)的逆变换得到。因此,如何获取轨道不平顺的具体波长成为关键问题。经典的傅里叶变换能对周期获取,但丢失了位置信息,而轨道不平顺是里程的函数,有规律的波磨在轨道里程中的一段出现,必须结合里程对波磨进行分析。小波变换是时间-频率联合分析方法,被定义为设 $\phi(t)$ 为平方可积函数,若其傅里叶变换 $\zeta(\omega)$ 满足条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\zeta|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (6)$$

则称 $\phi(t)$ 为小波母函数。将该母函数进行伸缩和平移后可得到不同尺度下的函数并与待分析信号做内积,若在连续的情况下可得到小波序列

$$\zeta_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \zeta\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R; a \neq 0) \quad (7)$$

其中: a 为尺度因子; b 为平移因子。

小波变换的过程实际上就是利用小波母函数的尺度变换与待测信号进行比对的过程,通过得到的数值来表示待测信号与小波函数的相近程度。中心频率是用来描述不同小波的最基本的特征,设小波的中心频率为 f_c ,则当小波以尺度 a 拓展时中心频率就可以变化为 f_c/a ;若采样率为 f_s ,当前尺度所对应的实际频率即可表示为

$$f_a = (f_c \times f_s) / a \quad (8)$$

因此,通过小波变换可以较为准确地得到当前某一时刻的特征频率^[11-12]。在把小波变换运用到轨道不平顺分析后,也同样可以得到不同里程处轨道不平顺的瞬时频率。

设某理想轨道总里程为 3 000 mm,里程 1 000~2 000 mm 区间包含有一个正弦不平顺,其波长为 50 mm,测量小车推行速度为 1 m/s,不平顺幅值为 1 mm,其余为平顺区间。采用弦长 150 mm 的中点弦对该理想轨道进行测量,采样频率为 1 kHz,由中点弦测法的性质,测量值依然存在着周期性,除不平顺起点及结束处外幅值相对于原始值均有所夸大。对测量数据选用带宽为 3 kHz,中心频率为 8 kHz 的 Morlet 小波作为母小波,尺度序列长度为 512 进行小波分解。

图4(a)为小波变换后各个频率的小波系数和分布,尺度因子等于 256 处的小波系数和最大,带入式(8)及式(2)计算得到当前弦长下轨道不平顺幅值被夸大了 1.987 1 倍。图4(b)为小波系数和随里程变化,里程 1 000~2 000 mm 处能量比较集中表明其中包含有主要频率成份。由此,可利用式(2)的逆变换复原原始波形。图5是复原波形与原始波形差值,由于在里程 1 000 及 2 000 mm 附近测量弦的一个支点并不在周期不平顺上,其幅值增益及周期不定,但从里程点 1 150 mm 开始复原后的轨道不平顺波形与真实值最大相差不超过 0.01 mm,并且该差值还会随着小波变换尺度序列的增加以及测量弦长的合理选择而减小,因此该复原轨道波磨的方法

是可行的。

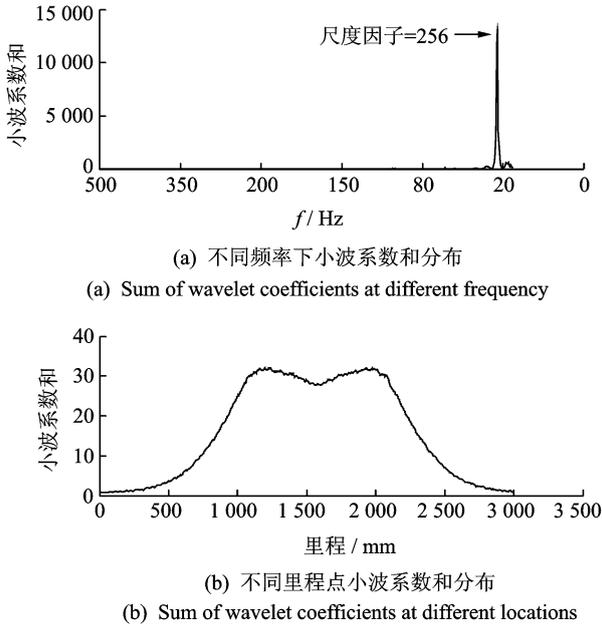


图 4 小波变换时频分布图

Fig. 4 Wavelet transform time-frequency distribution

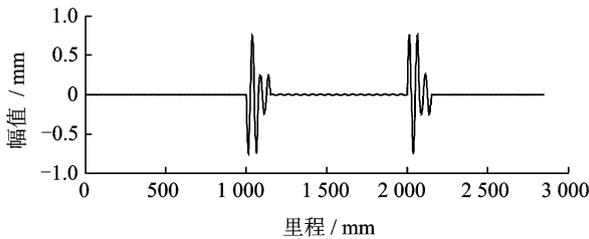


图 5 复原波形与原始波形差值

Fig. 5 The difference between restore and original waveform

根据上述分析,可以得到下面轨道波磨量值估计方法:

- 1) 选取不同弦长 L_1, L_2 对同一轨道测量, L_1, L_2 的选择要求能够在 50~200 mm 波长范围内幅值增益倍数最小,幅值增益较大且曲线变化平坦。
- 2) 以里程为基准点得到双中点弦测值之和,进行小波变换并利用多尺度分析得到主要频率成份及波磨出现的起始位置。结合小车的推行速度,可计算出当前波磨的波长范围。
- 3) 真实轨道不平顺往往包含有很多杂波,为了减小计算误差对获取的双中点弦测数据进行滤波,截止频率可根据(2)中小波变换结果选取。
- 4) 通过(2)中所计算的波长范围,结合式(4)得到平均幅值增益,利用该增益及滤波后的测量数据即可复原原始波磨不平顺值。

4 轨道波磨实测

上述分析均基于理想数据,在实际轨道测量中存在着大量噪声及不确定因素,有必要在真实环境中验证方法的可行性。测试对象选择自备的实验线路,该线路总长度为 120 m,整条线路存在着长波不平顺,平均幅值约为 0.1 mm;在里程 6.5~11 m 之间有准周期性的波磨病害,波长范围为 75~85 mm,平均幅度约为 0.2 mm。按照前面分析,小车的测量弦长 L_1, L_2 分别取 750 及 667 mm。小车推行速度约为 0.7 m/s,测量采用基恩士 IL-100 激光传感器,数据重复精度为 4 μm ,采样率为 50 Hz。该实验条件下,测得中点弦测数据之和 Σ 如图 6 所示。

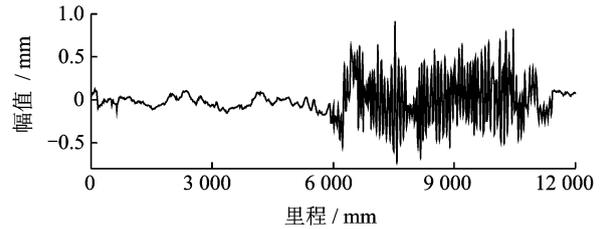
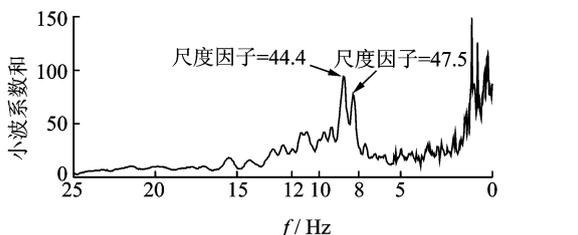


图 6 弦长为 750 及 667 mm 时的弦测值之和

Fig. 6 The sum of 750 and 667 mm chord test data

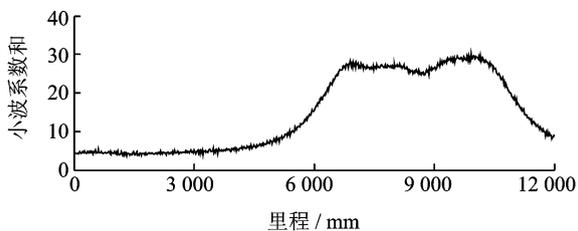
选择中心频率为 8 kHz 的 Morlet 小波对数据作分解,不同尺度及里程对应的小波系数和如图 7。图 7(a)表明频率分布主要在 8~12 Hz 之间,出现的两个尖峰说明 8.3 及 8.9 Hz 两个频率为主要成份。根据推行速度、波长与频率之间的关系,可计算出当前轨道波磨主要波长在 78~84 mm 之间,这与线路实际情况一致。另外,图中在低于 5 Hz 的部分也逐渐出现尖峰,这说明该线路中存在着低频成份,是线路的长波不平顺所导致。图 7(b)给出了该段波磨所出现的位置信息,在 6~11 m 之间小波系数和最大,则该区间波磨较为集中。为了减少长波不平顺对波磨量值估计的影响,以截止频率为 5 Hz 设计高通滤波器滤波。根据图 3,在波磨波长为 78~84 mm 之间双中点弦测量幅值响应曲线较平坦,以 0.001 mm 为采样间距求其方差为 0.004 4,因此可以求均值 1.928 作为复原时的幅值增益进行计算。复原后波形如图 8,其幅值约为 0.2 mm 与线路实际情况一致;在某些里程点出现偏差,这是因为利用小波变换进行频率计算时出现频率估计误差及线路波磨本身具有准周期性。

对于单独使用 667 或 750 mm 弦测量,在相同条件下方差分别为 0.130 3 及 0.182 4,远大于双弦测量法,若使用其均值作为复原时的幅值增益则误差较大。为了说明双弦法与单弦法在波磨量值复原方面的优劣,分别绘制部分实测数据幅值增益极大值、极小值与均值复原波磨原始量值之差曲线。图 9(a)为双弦测量法极大、极小值与均值复原之差,误差分别为 0.02 和 0.01 mm;图 9(b)为 667 mm 单弦测量时极值与采用幅值增益均值复原波磨原始值之差,由于在波长为 83.3 mm 附近时幅值响应约为 0,因此极小值误差为无穷,而极大值误差如图中所示约 0.5 mm;采用 750 mm 单弦测量如图 9(c),其极小值误差约为 0.02 mm,但其极大值误差接近 0.4 mm。因此,采用单弦法不能对波磨量值进行估计,而双弦法对于幅值复原误差较小,能够满足当前铁路工务中对钢轨波磨量值估计要求。



(a) 双弦测量不同频率的小波系数和分布

(a) Sum of wavelet coefficients at different frequency under double-chord measurement



(b) 双弦测量不同里程小波系数和分布

(b) Sum of wavelet coefficients at different locations under double-chord measurement

图 7 实测线路小波系数和分布

Fig. 7 The sum of wavelet coefficient distribution based on measured data

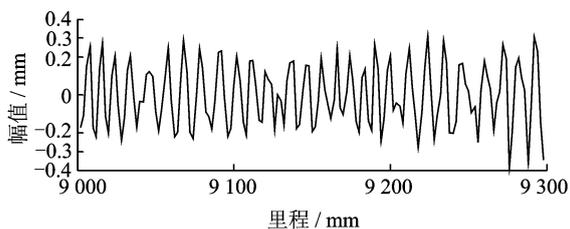
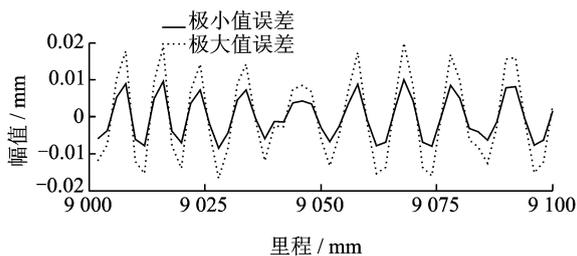


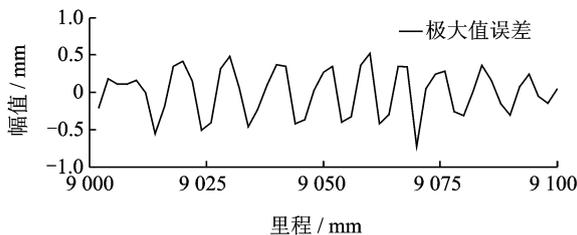
图 8 部分复原数据

Fig. 8 Part of restore waveform



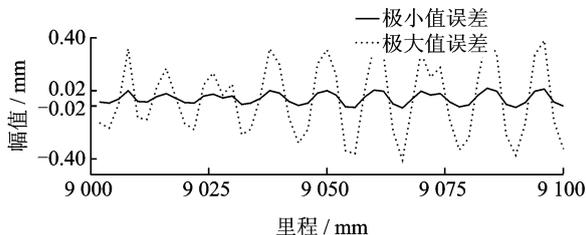
(a) 双弦测量极值与均值误差

(a) The error between extremum and mean under double-chord measurement method



(b) 667 mm单弦测量极大值与均值误差

(b) The error between extremum and mean at 667 mm chord



(c) 750 mm单弦测量极值与均值误差

(c) The error between extremum and mean at 750 mm chord

图 9 不同弦测法下极大值、极小值误差

Fig. 9 The error between extremum and mean at different measurement method

5 结论

1) 中点弦测法具有相位、周期不变的特点,周期性的钢轨波浪磨耗在经过中点弦测后仍然具有周期性。因此,通过小波变换及小车的推行速度可以得到当前轨道波磨的波长范围。

2) 选用合适弦长组成双弦测量法可使得在被测轨道波磨波长范围内不存在幅值为 0 的点、最小增益尽可能的大且增益曲线在整个轨道波磨波长区间尽可能平坦,利于轨道波磨量值复原计算。

3) 实际线路测试证明,双弦法复原轨道波磨精度明显高于单弦测量法对波磨幅值的测量估计,在笔者所测线路中最大不超过 0.02 mm。该方法适合在铁路线路工程中对钢轨波磨量值的快速检测估计。

参 考 文 献

- [1] Ernesto G V, José A T, Gorka G Z, 等. 轨枕间距对钢轨波磨的影响[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(2): 13-17.
Ernesto G V, José A T, Gorka G Z, et al. Effect of sleeper spacing on rail corrugation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(2): 13-17. (in Chinese)
- [2] Tassilly E, Vincent N. A linear model for the corrugation of rails[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 150(1): 25-45.
- [3] 王小文, 章欣, 冯文相. 广深准高速铁路钢轨波状磨耗特点和发展规律[J]. 中国铁道科学, 1998, 19(2): 28-34.
Wang Xiaowen, Zhang Xin, Feng Wenxiang. Characteristics of rail corrugation on guang-shen quasi-high speed railway and the pattern of its development[J]. China Railway Science, 1998, 19(2): 28-34. (in Chinese)
- [4] 沈钢, 张学华, 郭满鸿. 地铁曲线钢轨波浪型磨耗的测量分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(4): 53-54, 58.
Shen Gang, Zhang Xuehua, Guo Manhong. Measurement and analysis of rail corrugation on curved track of metro system[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(4): 53-54, 58. (in Chinese)
- [5] 曹亮, 许玉德, 周宇. 城市轨道交通钢轨波浪形磨耗特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(2): 46-48, 52.
Cao Liang, Xu Yude, Zhou Yu. Characteristics of rail corrugation in urban mass transit[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(2): 46-48, 52. (in Chinese)
- [6] 温泽峰. 钢轨波浪形磨耗研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [7] 姜子清, 司道林, 李伟, 等. 高速铁路钢轨波磨研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 9-14.
Jiang Ziqing, Si Daolin, Li Wei, et al. On rail corrugation of high speed railway[J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 9-14. (in Chinese)
- [8] 丁大尉, 纪淑波, 王立志. 光电式钢轨磨损实时检测系统[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(1): 64-67.
Ding Dawei, Jin Shubo, Wang Lizhi. Photoelectric real time detection system for rail abrasion[J]. China Railway Science, 2006, 27(1): 64-67. (in Chinese)
- [9] 程樱, 许玉德, 周宇. 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.
Cheng Ying, Xu Yude, Zhou Yu. Theory and research of Asymmetrical Chord offset method of restoring a wave form of track irregularity[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(1): 42-46. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国铁道部. TG/GW115-2012, 高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [11] 赵志宏, 杨绍普, 刘永强. 多小波系数特征提取方法在故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2): 276-280.
Zhao Zhihong, Yang Shaopu, Liu Yongqiang. Application of feature extraction method in fault diagnosis based on multi-wavelet coefficients[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2): 276-280. (in Chinese)
- [12] 郭亚, 应怀樵, 武颖奎. 小波在频率发生较小变化识别中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 102-103, 140.
Guo Ya, Ying Huaqiao, Wu Yingkui. Study on wavelet application in the identification of frequency's indistinct-ve change[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(5): 102-103, 140. (in Chinese)



第一作者简介: 殷华, 男, 1982年11月生, 博士生、讲师。主要研究方向为传感器与检测技术, 故障诊断。曾发表《基于MIPS的普适农业监测系统设计》(《单片机与嵌入式系统应用》2012年第12卷第3期)等论文。

E-mail: pkilllo@163.com

