

基于激光三角测距法的双轨式钢轨波磨检测仪

许敏娟

(昆明地铁运营有限公司, 650200, 昆明//高级工程师)

摘要 为有效解决钢轨波磨病害检测及整治,设计了一种基于激光三角测距法的双轨式钢轨波磨检测仪。介绍了该波磨检测仪的总体结构、检测系统的硬件组成和核心软件系统的功能。该波磨检测仪采用弦测法测量原理和动态基准弦结构,可实现同时对双轨顶面波磨的非接触式动态测量,具备测量数据全程记录、回放、分析等功能。通过该波磨检测仪检测数据与 RMF1100 波磨小车检测数据的对比分析,验证了该波磨检测仪检测数据的重复性与真实性,以及检测的可靠性。昆明地铁的现场试用表明,采用该波磨检测仪,能够大大提高检测效率,能够实现钢轨波磨的精准测量,为波磨病害检测及整治提供了高效合理的解决方法。

关键词 地铁; 钢轨波磨检测仪; 弦测法; 非接触; 双轨测量

中图分类号 U216.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.043

Dual-track Rail Corrugation Detector Based on Laser Triangulation Ranging Method

XU Minjuan

Abstract To effectively detect and treat rail corrugation disease, a dual-track rail corrugation detector based on laser triangulation ranging method is designed. The corrugation detector overall structure, the detection system hardware composition and the core software system functionality are introduced. By adopting chord measurement principle and dynamic reference chord structure, the corrugation detector can realize non-contact dynamic measurement of corrugation on the top surface of both tracks simultaneously, and has functions of recording, playback and analysis of measurement data throughout the entire process. By comparing and analyzing the detection data of the corrugation detector and RMF1100 corrugation trolley, the repeatability and authenticity of the corrugation detector detection data and detection reliability are verified. The field trial in Kunming Metro shows that using this corrugation detector can greatly improve detection efficiency and achieve accurate measurement of rail corrugation, providing an efficient and reasonable solution for the detection and treatment of rail corrugation disease.

Key words metro; rail corrugation detector; chord measurement method; non-contact; dual-track measurement

Author's address Kunming Metro Operation Co., Ltd., 650200, Kunming, China

良好的钢轨状态是列车安全、平稳运行的重要保证。地铁线路的小半径曲线居多,容易导致轮轨接触不良,而且地铁车辆轴重较轻,车站间距较短,列车频繁制动、起动,这些都极易导致钢轨出现周期性不平顺现象,即钢轨波浪形磨耗(以下简称“波磨”)。波磨的波长一般为 30 ~ 250 mm,且深度较浅,引起的振动频率较高,一般在 200 Hz 以上^[1]。波磨的产生不仅会加剧轮轨之间的相互作用力,降低车辆和轨道使用寿命,引发轮轨噪声,而且会增加后期养护维修费用,影响列车行驶的平稳性和舒适性,甚至危及行车安全,带来安全隐患。

目前,国内外的波磨检测设备种类较多,1 m 范围内的短波波磨可以用 SEC(直边紧凑型)电子平直尺^[2]测量,但效率较低;动态测量设备如英国 RailMeasurement 公司生产的 CAT(波磨检测小车)钢轨波磨仪^[3],采用的是惯性基准法,该设备较轻,携带方便,但对操作者的要求较高;德国 Vogel & Plotscher 公司研发制造的 RMF(钢轨测量设备)型钢轨波磨测量小车^[4],采用的是接触式位移传感器,利用弦测法检测钢轨波磨,但此设备成本较高,整体质量较大,接触式探头也存在易磨损等问题;国内西南交通大学利用电磁原理研发的 MCR(产品型号)系列钢轨波磨测量仪,也可以实现对钢轨波磨的高效测量,但其对提离值有严格要求,而且也容易受钢轨表面铁屑的影响。相较于电磁检测原理、惯性基准法及接触式检测原理,采用激光三角测距法检测钢轨波磨具有频率高、精度高、安装距离大、测量光斑小、无磨损、非接触等优点,而且探头无磨损、人为干预情况较少,更加适合短波不平顺测量,可满足快速高精度的测量需求。

本文所研究的是采用激光三角测距法的双轨式钢轨波磨检测仪。

1 检测系统设计原理

钢轨波磨检测仪的走行轮轮径和波磨波长直接影响检测结果的准确性,当走行轮轮径小于波磨波长时,则建立不起来描述钢轨短波不平顺的绝对坐标系,而弦测法^[5]的测值精度也会受到波磨波长影响。针对这一问题,为了提高钢轨波磨检测仪检测精度,设计了一种长度达 1.2 m 的动态基准弦结构,该结构通过安装在前后的密集排轮,保证所测位移值的基准弦始终位于波峰面顶。同时,利用激光三角测距法测量与被测物之间的距离,测量精度及效率较高,而且可获得更精确的数据,实现非接触式连续高精度快速测量。基于激光三角测距法的钢轨波磨检测原理如图 1 所示。

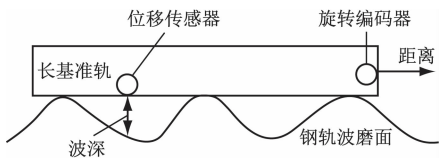


图 1 钢轨波磨检测原理

Fig. 1 Rail corrugation detection principle

2 技术方案

2.1 总体结构设计

双轨式钢轨波磨检测仪为质量 < 20 kg 的可拆卸、折叠式波磨检测仪。为了减轻检测仪的质量,方便工作人员现场运输,测量仪走行系统采用铝合金材料制成。铝合金是工业上广泛应用的一种金属材料,质量轻、强度高且经济性较高,非常适合用于测量仪走行部分。同时,为了进一步方便现场工作人员的运输,将测量仪设计为可拆卸式。采用伸缩、折叠及拆分组合的设计思想,根据机械重复定位原理,利用三维结构设计软件进行走行平台的机械结构设计。进行机械结构设计时要考虑到以下几个方面:

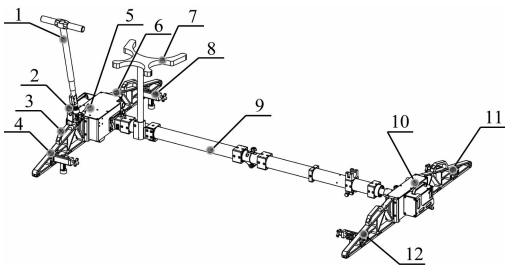
- 1) 走行平台整体结构满足结构简单、小型化、质量轻、可拆卸、便于运输携带的原则要求,达到两人拼装、一人推行操作的目的。
- 2) 保证运动基准的唯一性,这是设计考虑重点。因此,采用氮气弹簧伸缩结构,并设计基准靠轮使紧靠钢轨内侧作用边。

3) 激光位移传感器的安装支架定位和安装面精度,是保证测量精度的前提。当测量高亮或者有高低差的检测物时,对位移传感器安装有一定的特殊要求。

4) 绝缘性,这是对轨道检测设备的一般性要求。

5) 应留出充分合理的走线空间,保证电器连接线走线标准、规范,不外露,不影响整体的美观性。

双轨式钢轨波磨检测仪总体结构如图 2 所示。



注:1—推杆;2—检测电池;3—排轮把手;4—左后排轮结构;5—左机箱;6—左前排轮结构;7—电脑支架;8—基准靠轮;9—中间连杆;10—右机箱;11—右前排轮结构;12—右后排轮结构。

图 2 双轨式钢轨波磨检测仪总体结构

Fig. 2 Overall structure of the dual-track rail corrugation detector

2.2 检测系统硬件设计

检测系统能够实现对钢轨顶面波磨数据的采集分析。检测系统主要由激光位移传感器、里程编码器、信号控制器和工控机等相关部件组成。其中,激光位移传感器和里程编码器是检测系统的关键部件。在检测速度为 5 km/h 最高推行速度下,为达到 1 mm 的采样间隔要求,激光位移传感器的采样频率至少需要达到 2 kHz,同时需利用里程编码器触发激光位移传感器进行数据采集。

测量时,工控机控制传感器采集波磨数据并计算处理,然后将结果发送到人机界面进行呈现。检测系统硬件间的工作关系如图 3 所示。

2.3 检测系统软件设计

双轨式钢轨波磨检测仪主要是利用激光测距原理进行钢轨波磨检测,所搭载软件能够对钢轨顶面不平顺波长和波磨幅值及其超限情况等进行分析,并通过滤波算法分析出钢轨 10 ~ 30 mm、30 ~ 100 mm、100 ~ 300 mm、300 ~ 1 000 mm 的波磨。为实现人机交互的方便性、数据的阅读性和统计结果的准确性,设计并开发了该检测仪专用软件,主要有实时检测、回放处理和数据分析 3 个软

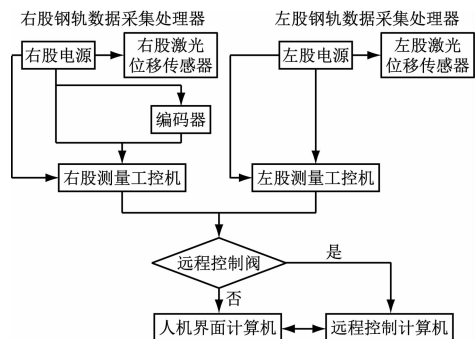


图3 检测系统硬件间工作关系

Fig. 3 Working relation between detection system hardware

件。数据分析结果以图表形式配合显示,直观展现被测钢轨波磨的真实情况,并且可以按照相关标准一键式出具所有分析结果的检测报告。软件的具体功能为:

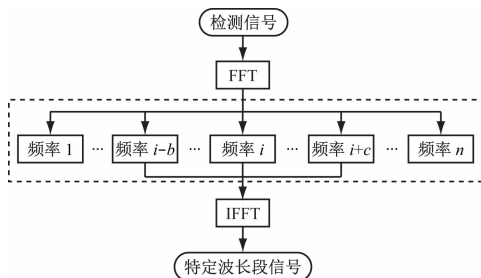
- 1) 设置参数,包括测量线路、里程、线别、线型、报警上下限、分析要求等。
- 2) 可同时实现单轨或双轨不平顺状态的连续检测。
- 3) 实时处理数据并显示钢轨不平顺波形图,实时显示当前里程位置和检测速度。
- 4) 对钢轨的平顺性进行实时、全方面、高效评估分析,能够统计分析出钢轨 10 ~ 30 mm、30 ~ 100 mm、100 ~ 300 mm、300 ~ 1 000 mm 波磨或设置不同波长,能够统计各采样窗的峰值、谷值、峰峰值及超限率等,并能一键式出具钢轨波磨分析报告。
- 5) 可对焊接接头、桥梁、曲线等重点关注地段进行标记,以便对这些地段进行专项分析,例如对钢轨焊接接头平直度进行专项分析。

2.3.1 滤波分析方法

数据处理是检测系统的核心功能。通过滤波分析方法对所采集的原始不平顺数据进行处理,得到特定波长段的波磨数据。滤波是指从检测信号中滤除或提取特定波段频率。由于轨面不平顺随线路里程变化表现为一定的空间随机性,因此往往将其转换到频域,并通过滤波分析方法提取重点关注地段的波长段。

目前,国内外将 1 m 以下的短波分为 4 个波长段:10 ~ 30 mm、30 ~ 100 mm、100 ~ 300 mm、300 ~ 1 000 mm。采用 FFT(快速傅里叶变换)^[6]将检测信号转换到频域,在频域内提取相关频率范围,再利用 IFFT(快速傅里叶逆变换)将该频率范围内的

信号转换到时域,实现对不同波长段进行滤波。具体数据处理流程如图 4 所示。



注:b—波长下限值;c—波长上限值。

图4 数据处理流程

Fig. 4 Data processing flow

2.3.2 波磨分析评价方法

目前,对地铁线路钢轨波磨的整治按照普速铁路线路修理规则规定进行维修整治,当波磨波谷深度超过 0.2 mm 时应进行修理性打磨或铣磨。钢轨波磨分析评价方法为:在检测段内通过软件滤波分析方法分析出具有周期性的 10 ~ 30 mm、30 ~ 100 mm、100 ~ 300 mm、300 ~ 1 000 mm 的波磨区段,分析滤波后波磨峰峰值、波磨峰峰值移动平均值即平均谷深,同时以每 100 m 为 1 个统计段分析波磨峰峰值移动平均值的超限百分比。

波磨峰峰值如图 5 所示,在规定长度 l 的采样窗内沿轨道采样,并按式(1)计算波磨峰峰值移动平均值。

$$P_{x,l} = (a_1 + a_2 + \cdots + a_n) / n \quad (1)$$

式中:

- a_n ——第 n 个波磨峰峰值;
- x ——线路里程。

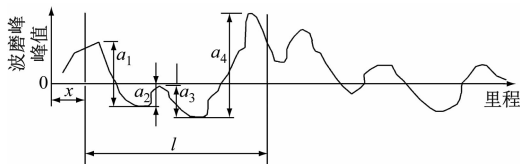


图5 波磨峰峰值随里程变化曲线

Fig. 5 Change curve of corrugation peak-to-peak amplitude over distance

3 与 RMF1100 波磨小车检测数据对比分析

RMF1100 波磨小车为德国 Vogel & Plotscher 公司研发制造,其采用接触式位移传感器,利用弦测法检测钢轨波磨,采样间隔为 2 mm,检测精度为 0.01 mm。将双轨式钢轨波磨检测仪检测数据与

RMF1100 波磨小车检测数据进行对比,来验证双轨式钢轨波磨检测仪数据的重复性与真实性,以及两台检测数据的差别。测试时,将两台检测仪对准起始里程进行正反两次推行检测。正反两次推行检测的左轨波磨数据对比如图 6 和图 7 所示。

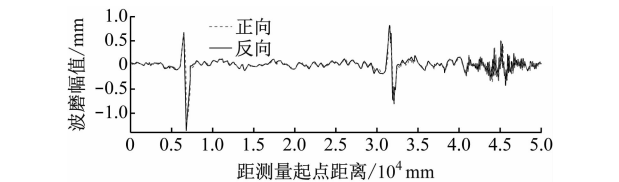


图 6 双轨式钢轨波磨检测仪左轨正反两次推行检测数据对比

Fig. 6 Comparison of left rail positive and negative inspection data of double-track rail corrugation detector

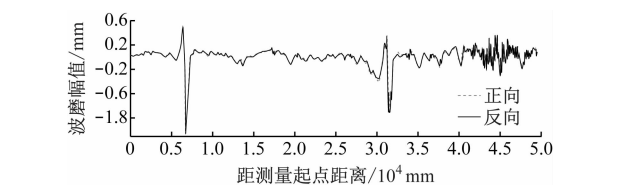


图 7 RMF1100 波磨小车左轨正反两次推行检测数据对比

Fig. 7 Comparison of left rail positive and negative inspection data of RMF1100 corrugation trolley

3.1 波磨数据自对比

为了确定测试结果的可靠性,对两台检测仪各自正反推行两次检测结果进行定量分析。波形中存在 2 个明显接头,接头附近幅值较大,接头处的正反推行两次检测结果的差异也较大。在统计正反推行两次检测差异时,需要排除掉接头区域。统计接头之间 9 ~ 29 m 区段内两次推行检测波磨之间的差值,选择两波磨幅值差值的绝对值作为统计指标,结果如图 8 和图 9 所示。

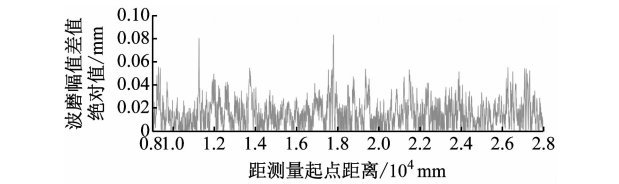


图 8 双轨式钢轨波磨检测仪左轨正反两次推行检测波磨幅值差值

Fig. 8 Amplitude difference between left rail positive and negative inspection waveforms of dual-track rail corrugation detector

为了对比数据的重复性,两台检测仪在两段线路正反两次推行情况下,统计两段线路左轨波磨的幅值差值,结果如表 1 所示。

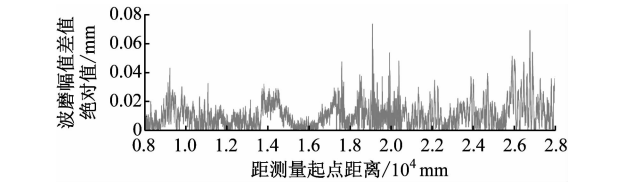


图 9 RMF1100 左轨正反两次推行检测波磨幅值差值

Fig. 9 Amplitude difference between left rail positive and negative inspection waveforms of RMF1100 trolley

表 1 两段线路正反推行两次左轨波形检测波磨幅值差值统计表

Tab.1 Statistics of left rail waveform detection amplitude difference by positive and negative inspection of two lines

检测仪	第一段线路正反推行 两次检测结果		第二段线路正反推行 两次检测结果	
	波磨幅值 差值均值/ mm	波磨幅值差值 95 分位数/ mm	波磨幅值 差值均值/ mm	波磨幅值差值 95 分位数/ mm
双轨式钢轨 波磨检测仪	0.011 9	0.030 4	0.011 2	0.028 9
RMF1100 波磨小车	0.010 8	0.027 4	0.010 5	0.020 5

3.2 波磨数据互相对比

为了准确对比双轨式钢轨波磨检测仪与 RMF1100 波磨小车的检测波形差异,首先按照两个接头位置,将区段划分为 8 ~ 29 m 和 35 ~ 45 m 两个部分。之后按照长度为 1 m 的间隔统计波形曲线之间的波磨幅值差值。因两台检测仪所测数据坐标系不一致,统计前要对波磨进行里程微调 and 坐标系调整,对检测曲线进行去趋势项处理以消除两台检测仪各标定带来的误差。以其中的 13 ~ 14 m 段为例,为确保真值的可靠性, RMF1100 波磨小车在同一个方向的同一位置测量两遍, RMF1100-1 为第一遍测量数据, RMF1100-2 为第二遍测量数据。图 10 a) 为左轨测试段内波磨对比图,图 10 b) 为波磨幅值差值统计图,其余段的对比方法与 13 ~ 14 m 段的相同。

将各检测段波磨的幅值差值进行统计汇总,得到整个区段的波磨幅值差值,如表 2 所示。

经现场测试和分析比对发现,两台检测仪的检测波形相似度很高,正反推行两次检测结果差值均较小,重复性均比较好,波磨幅值差值均值均能达到 0.01 mm 左右,波磨幅值差值的 95 分位数均在

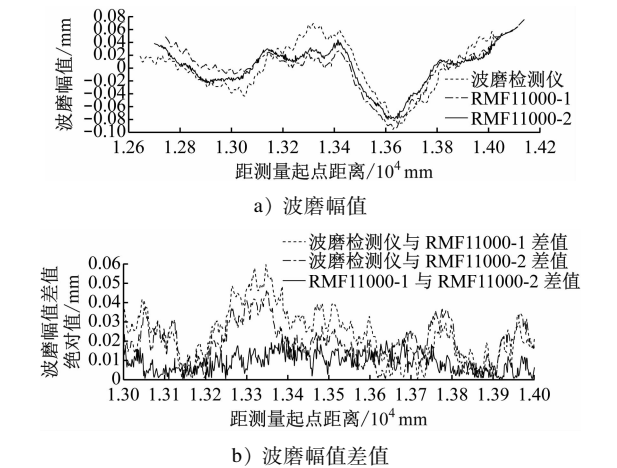


图 10 13 ~ 14 m 段检测波磨幅值及其差值图

Fig. 10 Diagram of detection waveform and amplitude difference of 13-14 m segment

表 2 左轨正向推行检测波磨幅值差值表

Tab. 2 Statistics of left rail positive inspection waveform amplitude difference

项目	波磨幅值差值 均值/mm	波磨幅值差值 95 分位数/mm
双轨式钢轨波磨 检测仪检测数据 与 RMF1100-1	0.014 9	0.039 8
双轨式钢轨波磨 检测仪检测数据 与 RMF1100-2	0.015 8	0.040 0
RMF1100-1 与 RMF1100-2	0.009 2	0.025 0

0.04 mm 以内,说明检测系统的稳定性较好。

在两台检测仪测试数据相互对比中,为了更好地确认真值,RMF1100 波磨小车在同一个方向的同一位置测量了两遍。对双轨式钢轨波磨检测仪与 RMF1100 波磨小车两次检测数据进行对比发现,波磨幅值差值均值也均能达到 0.01 mm 左右,波磨幅值差值的 95 分位数均在 0.04 mm 以内。

4 结语

基于激光三角测距法的双轨式钢轨波磨检测仪,采用上道组装、下道拆分的机械结构,小型便携,方便运输携带,可实现同时对双轨顶面包括焊接接头的非接触式动态测量,具备测量数据全程记录、回放、分析等功能。经现场数据分析比对,该检测仪能够满足钢轨波磨检测要求。

钢轨波磨检测分析系统,具有实时检测、统计

分析及数据回放功能,可实现钢轨波磨、钢轨焊接接头平直度检测。通过对钢轨顶面不平顺波长、波磨幅值、超限情况等进行分析和统计,可分析出不平顺的重点区段,并提供相应的维修决策建议方案,一键式出具相应报表,实现对钢轨打磨作业进行指导或者在钢轨打磨作业后对钢轨平顺性进行验收评价。

昆明地铁的现场试用结果表明,采用双轨式钢轨波磨检测仪能够大大提高检测效率,能够实现钢轨波磨的精准测量,为波磨病害检测及整治提供了高效合理的解决方法。

参考文献

[1] 叶利宾,王迦淇,肖宏. 基于地铁波磨测试的钢轨打磨标准研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(3): 68.
YE Libin, WANG Jiaqi, XIAO Hong. Research on rail grinding standard based on metro corrugation test[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(3): 68.

[2] 丁韦,李力,宋宏图,等. 钢轨焊接接头平直度测量方法及分析[J]. 铁道技术监督, 2010, 38(8): 24.
DING Wei, LI Li, SONG Hongtu, et al. Method of measuring the flatness of rail welding joint and the analysis[J]. Railway Quality Control, 2010, 38(8): 24.

[3] 李帅,易杨明,王源,等. 基于惯性基准法的高速铁路纵断面线形平顺性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 1901.
LI Shuai, YI Yangming, WANG Yuan, et al. Study on profile line regularity based on the inertial reference method in high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 1901.

[4] 杨杰,王培俊,肖俊,等. 基于弦测法与密度聚类的三维结构光波磨检测[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 40.
YANG Jie, WANG Peijun, XIAO Jun, et al. Three-dimensional structured light corrugation detection based on chord measuring method and density clustering[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(2): 40.

[5] 刘文辉. 基于弦测法原理的波磨检测小车的设计与实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
LIU Wenhui. Design and implementation of wave grinding inspection car based on string measurement principle[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2016.

[6] 卢新宁. 基于全相位 FFT 的铁道信号频率检测算法研究[D]. 海口: 海南大学, 2013.
LU Xinning. Research on frequency detection algorithm of railway signal based on all-phase FFT [D]. Haikou: Hainan University, 2013.

(收稿日期:2023-02-14)