

地铁新型车载式供电接触轨几何参数检测装置的研究及应用

吴晨恺 程志全 翟胡超

(广州地铁集团有限公司, 510335, 广州//第一作者, 工程师)

摘要 目的: 为确保接触轨供电系统安全服役, 指导运营养护维修, 特提出一种地铁新型车载式供电接触轨几何参数检测装置。方法: 详细阐述其定义、组成、检测原理、软件功能等, 并验证检测装置的精度和现场实际应用情况。通过长期跟踪试验和大量的数据分析, 验证供电接触轨检测装置的实际应用精度, 具体采用检测车以 30 km/h 速度往返检测 2 遍, 以采集接触轨的几何参数数据, 利用分析程序导出 4 次检测数据, 提取定位点支柱处工作高度和偏移值, 同时人工测量该段数据, 进行包括接触轨工作高度、偏移值的准确度动静态对比和检测系统本身重复性误差对比。结果及结论: 动静态对比 50 个定位点测量值, 其中: 48 个工作高度测量值动静态误差在 ± 2 mm 以内的占比 96%, 仅 2 个工作高度测量值动静态误差在 ± 3 mm 以外 (占比 4%), 精度满足标准要求; 50 个偏移值动静态误差均在 ± 2 mm 内, 占比 100%, 满足要求。对比 50 个定位点 4 次测量值, 工作高度重复性误差在 ± 2 mm 以内, 占比 96%, 满足精度要求; 偏移值重复性误差在 ± 2 mm 以内, 占比 99%, 满足精度要求。地铁新型车载式供电接触轨几何参数检测装置在 6 条正线接触轨上已正常运用近 1 年半, 约完成 130 次接触轨动态检测作业, 检测总里程达 1 万 km 以上, 长期跟踪下设备及检测装置稳定, 精度满足现场使用要求。

关键词 地铁; 供电接触轨; 检测装置; 车载式; 应用精度
中图分类号 U226.5; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.07.025

Research and Application of New Type Metro Vehicle-mounted Power Supply Contact Rail Geometric Parameter Detection Device

WU Chenkai, CHENG Zhiqian, ZHAI Huchao

Abstract Objective: To ensure safe operation of contact rail power supply system during service and guide operation, maintenance and repair, a new type of metro vehicle-mounted power supply contact rail geometric parameter detection device is proposed. Method: Its definition, composition, detection principle, software functionality are expounded, and the accuracy and practical application on-site situation of the detection device

are verified. Through long-term tracking experiments and an enormous amount of data analysis, the actual application accuracy of the power supply contact rail detection device is verified. Specifically, a detection vehicle is used to collect contact rail geometric parameter data by detecting twice on round-trip at a speed of 30 km/h, and the analysis program is used to export detection data four times while extracting the working height and offset value at the positioning column. At the same time, the accuracy of the data including contact rail working height and offset value is compared dynamically and statically with manual measurements, and the repeatability error of the detection system itself is compared. Result & Conclusion: In the dynamic and static comparison of the measured values at 50 positioning points, dynamic and static errors of working height measurements of 48 are within ± 2 mm, accounting for 96%; the dynamic and static errors of only two measured values are beyond ± 3 mm (accounting for 4%), meeting the accuracy requirements; the dynamic and static errors of 50 offset values are within ± 2 mm, accounting for 100%, meeting the accuracy requirements; comparing the four-time four measured values of the 50 positioning points, the repeatability error of the working height is within ± 2 mm, accounting for 96%, meeting the accuracy requirements; the repeatability error of the offset value is within ± 2 mm, accounting for 99%, meeting the accuracy requirements. The new metro vehicle-mounted power supply contact rail geometric parameter detection device has been in normal service on six main line contact rail main lines for nearly 1.5 years, completing approximately 130 dynamic contact rail dynamic detection tasks, with a total detection mileage of over 10,000 kilometers. Under long-term tracking, the equipment and device are stable, and the accuracy meets the on-site usage requirements.

Key words metro; power supply contact rail; detection device; vehicle-mounted; application accuracy

Author's address Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510335, Guangzhou, China

接触轨供电是地铁供电方式之一。地铁车辆通过集电靴与接触轨的电接触获取电能,确保接触轨长期处于良好状态,这对于地铁牵引供电系统的安全至关重要。一旦接触轨的相关部件发生机械故障或几何参数超限,不仅影响集电靴正常取流,还造成车辆无法正常运行,严重时甚至会导致重大安全事故。

针对上述情况,本文结合国内外接触轨检测系统设备研究现状,提出了一种地铁新型车载式接触轨几何参数检测装置。它由广州地铁与成都唐源电气股份有限公司合作进行开发研究和实际应用。该装置采用车载检测方式,安装于检测车或工程作业车上,能够高速进行接触轨几何参数测量和接触轨状态高清图像采集,是进行接触轨日常检测和维护的重要设备,对于确保接触轨供电系统安全服役、指导运营养护维修,具有重要的现实意义。

1 检测项目及规定

接触轨的主要功能是将电能通过电客车集电靴与复合轨的接触传输到地铁车辆上的电力牵引系统装置。其主要由钢铝复合轨、膨胀接头和端部弯头等相关部件及绝缘支撑装置等组成。

根据 GDY/QW-JG-GD-02.03《广州地铁接触轨运行检修规程》和上海申通地铁集团有限公司出版的《120 km/h 接触轨设计规范及施工验收标准》等内容,接触轨几何参数主要为测量接触轨偏移值和工作高度,即为本装置的检测项目。

1) 接触轨偏移值:是接触轨受流面中心距离线路中心的水平距离。以广州地铁为例,4 号线、5 号线、6 号线隧道内偏移值设计标准为 1 510 mm,14 号线、21 号线、知识城线设计标准为 1 550 mm。

2) 接触轨工作高度:是接触轨受流面至轨面的垂直距离。以广州地铁为例,隧道内工作高度设计标准值为 200 mm。

3) 接触轨状态高清成像:采集防护罩、防护罩搭接部分、接触轨与集电靴接触点、端部弯头等零部件图像,辅助人工巡检判断接触轨防护罩是否下塌、防护罩支持卡间距是否满足间隔要求、接触轨是否有异物等。

2 检测单元构成与功能

2.1 数据采集单元

地铁新型车载式接触轨几何参数检测装置由

数据采集单元、供电管理单元、综合定位单元和数据处理单元等组成。

该单元由用于拍摄接触轨和钢轨的相机阵列、用于补光的光源阵列、状态成像相机、电源模块以及数据处理服务器等设备组成。数据采集单元吊装于车体上,主要完成对各检测传感器的封装,为接触轨检测和高清成像系统提供原始数据。

2.2 供电管理单元

接触轨检测系统主机机柜由工程车或检测车提供一组 AC 220 V 电源连接到接触轨检测系统的主机机柜,额定功率 $P=1\ 200\ \text{W}$ 。在机柜内预留三路电源接线端子,一路发电机 AC 220 V 输入,两路外接电源 AC 220 V 输入(左侧和右侧),三路电源其中任何一路输入 AC 220 V 电源,即可保证机柜设备正常工作。

2.3 综合定位单元

通过检测车或工程车轴箱盖上的速度传感器、车底标签阅读器,测量车辆运行速度,利用轮径周长计算里程,实现里程定位,同时结合标签阅读器每千米读取线路安装电子标签,实现每千米校对误差,完成精确定位。

2.4 数据处理单元

由中央处理计算机、数据处理设备和打印机等组成,主要用于所采集数据的分析、处理及报表输出。

3 检测内容与原理

3.1 接触轨几何参数检测

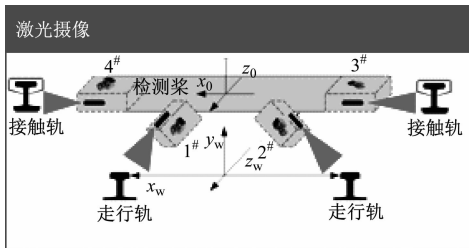
接触轨几何参数检测部分主要分为图像采集和偏移补偿系统(见图 1),最终将图像采集及偏移补偿数据传输至综合数据处理系统。

3.1.1 图像采集

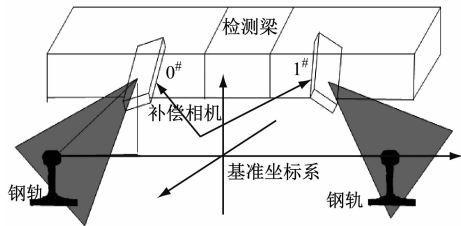
采用 2D 传感器拍摄接触轨激光轮廓图像,利用工业以太网,将图像信号从车底传输到车内的处理主机,基于图像滤波、去噪及特征提取算法,测量传感器距离接触轨的水平和垂直距离。

图像采集中,需要设计特定 2D 安装角度,拍摄激光光源照射的接触轨。其工作原理为:激光光源投射到接触轨表面,利用三角成像原理,摄像机与激光光源成一定角度,拍摄接触轨表面结构光图像,通过视觉成像模型,计算接触轨与传感器之间的距离。

3.1.2 偏移补偿



a) 图像采集系统



b) 偏移补偿系统

图1 图像采集及偏移补偿系统示意图截图

Fig.1 Screenshot of image acquisition and deflection compensation system diagram

补偿系统用于测量车体相对于钢轨平面的倾角和左右偏移距离,并将所测倾角及偏移值传送到处理主机。

偏移补偿系统分别运用2套2D传感器来扫描轨道、测量基准和钢轨图像轮廓。其补偿原理为:静态时,由左右2D传感器计算车体与轨面的几何位置关系,并将该位置标定为静态初始原点;检测车运行时,通过2D传感器测量实时结果,获取车体与轨面动态位置关系;由动态与静态位置之间几何关系换算,精确获取车体倾角及偏移量。通过车体与轨面的倾角和偏移,该系统将以车体作为测量基准的数据换算到轨道中心,最终实现车体振动测量误差补偿。

3.2 接触轨状态高清成像

接触轨状态高清成像采用工业相机及光源,同时利用大功率LED(发光二极管)阵列定制专用光源,在摄像机成像过程中频闪补光,与摄像机快门速度达到10 μs级同步响应,能够保证在隧道内及夜间的高质量成像。

最终实时对防护罩主要区域进行高清成像,拍摄目标覆盖防护罩、防护罩搭接部分、接触轨与集电靴接触点、端部弯头等,能够清晰反映其零部件的安装技术状态,并辅助接触轨几何超限的分析判断、辅助接触轨的人工巡检。

3.3 综合数据处理

综合数据处理系统采用工业控制计算机,通过以太网对多个传感器信号进行实时采集,在计算机上实现多路信号的同步、滤波和综合处理。同时接收几何参数检测、高清成像、综合信息定位所采集的数据,进行数据处理分析,实现在线实时检测功能,并最终实现显示、存储以及打印报表等功能。

在开始运行前及运行过程中,通过初始设置对话框设定检测线路、行驶方向、开始区段、起始支柱

号、里程等,随时可以通过菜单或工具栏按钮,对区段及定位信息进行调整。检测参数以波形曲线、超限数值及图像的方式实时显示于软件的显示屏上,所有线路原始数据及每次检测结果自动存储在计算机硬盘上。

4 数据采集及分析软件功能

4.1 接触轨几何参数采集软件

几何参数采集软件,通过采集卡和相机配合对接触轨及钢轨进行实时采集,实现接触轨廓形和钢轨廓形的采集,并结合定位系统将采集的原始数据进行存储。软件主界面一共包括6个部分,分别为系统、插件、窗口、开始采集、自动保存和快照。软件设置了自启动,综合定位服务启动后,软件会自启到主界面。

4.2 接触轨状态成像采集软件

接触轨状态采集软件拍摄接触轨高清图片并保存,在分析软件中通过软件处理以视频的形式展现,能够清晰的查看接触轨的状态,及时发现接触轨防护罩是否存在断裂、脱落等问题,为接触轨的人工巡检、维护提供依据。同时,图片与接触轨超限数据与波形联动,可辅助人工具体地分析超限情况。

4.3 接触轨检测系统分析软件

分析软件对几何参数采集软件和状态成像软件采集的原始数据、图片进行分析,判定超限数据及位置,输出超限数据报表并形成实时的接触轨偏移值、工作高度及对应的波形和图片,且可以进行多次历史波形的重复性对比,以辅助超限情况的判断。

同时,在历史模式下可选取对应的几何参数历史数据和状态成像图片联动回放,分析月度、季度接触轨几何超限的发展趋势和突变情况,辅助接触

轨整体不平顺状态的研究。

5 检验与验证

本装置已在地铁多条线路进行长期跟踪试验和检测精度验证,本文通过对其接触轨检测结果的重复性和准确性进行检验,验证该系统检测的接触轨几何参数精度。

5.1 精度标准与验证方法

5.1.1 检测指标与标准

检测系统评价指标主要包括分辨率、准确度和重复性指标三方面。重复性和准确度精度验证标准根据接触轨实际状况、维修能力和检测车运用经验,结合实际运营状况、线路技术条件、检测车类型等因素进行设置,经相关专业组研究、讨论通过后,确定并进行长期跟踪所得。分辨率和测量范围根据设备性能和安装角度确定,具体数值由实验室测得。

接触轨几何参数检测项目精度验证标准如表 1 所示。

5.1.2 验证方法

1) 准确性验证方法。检测车以 30 km/h 速度往返检测 2 遍,行车前需进行对标工作。利用分析程序导出 4 次检测数据,提取定位点支柱处工作高度和偏移值与该段人工测量数据进行对比。动静态对比误差范围依据表 1 进行验证,要求准确度 $\pm 3.0\text{ mm}$ 以内的占比为 95% 以上。

表 2 接触轨工作高度动静态验证记录表

Tab.2 Dynamic and static verification record of contact rail working height								
序号	里程	人工测量/mm	软件测量 1/mm	软件测量 2/mm	软件测量 3/mm	软件测量 4/mm	软件测量平均值/mm	误差/mm
1	K36 + 806. 7	200	201. 3	201. 9	201. 2	201. 6	201. 500	- 1. 500
2	K36 + 811. 6	199	201. 7	199. 6	201. 3	199. 2	200. 450	- 1. 450
49	K37 + 2. 1	202	201. 4	201. 9	202. 1	202. 4	201. 950	0. 050
50	K37 + 5. 2	202	202. 2	202. 5	202. 6	202. 6	202. 475	- 0. 475

动静态对比 50 个定位点测量值,其中:48 个工作高度测量值动静态误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,占比 96% ; 2 个工作高度测量值动静态误差在 $\pm 3\text{ mm}$

表 1 几何参数检测项目精度验证标准
Tab.1 Verification standard for the accuracy of geometry parameter test items

检测项目	几何参数精度标准	
	工作高度/mm	偏移值/mm
分辨率	1	1
重复性	$\pm 2. 0$	$\pm 2. 0$
准确度	$\pm 3. 0$	$\pm 3. 0$
测量范围	150 ~ 350	1 400 ~ 1 700

2) 重复性验证方法。检测车以 30 km/h 速度往返检测 2 遍,行车前需进行对标工作。利用分析程序导出 4 次检测数据,提取接触轨工作高度和偏移值进行重复性对比验证。重复性误差范围依据表 1 进行验证,要求重复性 $\pm 2. 0\text{ mm}$ 以内的占比达 95% 以上。

3) 数据源。检测系统评价的基础数据源主要包括系统检测数据和人工测量数据。系统检测数据指通过车载式接触轨几何参数检测装置测量的动态检测数据,人工测量数据则为现场人工利用接触轨测量尺测量接触轨的静态几何参数数据。

5.2 系统验证与分析

5.2.1 准确性验证

检测车在地铁某正线进行往返检测试验,接触轨工作高度动静态验证记录结果如表 2 所示。

以外,占比 4% ;其精度满足标准要求,详见表 2;50 个偏移值动静态误差均在 $\pm 2\text{ mm}$ 内,占比 100% ,满足要求,详见表 3。

表 3 接触轨偏移值动静态验证记录表

Tab.3 Dynamic and static verification record of contact rail offset value								
序号	里程	人工测量/mm	软件测量 1/mm	软件测量 2/mm	软件测量 3/mm	软件测量 4/mm	软件测量平均值/mm	误差/mm
1	K36 + 806. 7	1 550. 5	1 550. 3	1 550. 2	1 552. 0	1 551. 4	1 550. 975	- 0. 475
2	K36 + 811. 6	1 552. 0	1 552. 8	1 552. 5	1 552. 5	1 552. 2	1 552. 500	- 0. 500
49	K37 + 2. 1	1 549. 0	1 548. 4	1 548. 1	1 549. 0	1 549. 8	1 548. 825	0. 175
50	K37 + 5. 2	1 550. 0	1 550. 9	1 550. 9	1 551. 1	1 551. 1	1 551. 000	- 1. 000

5.2.2 重复性验证

检测车在地铁某正线进行往返检测试验,接触轨工作高度重复性验证记录结果如表 4 所示。对比 50 个定位点系统 4 次测量值,工作高度重复性误差

在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内的占比 96%,满足精度要求,详见表 4。偏移值重复性误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内的占比 99%,满足精度要求,详见表 5。

表 4 接触轨工作高度重复性验证记录表
Tab.4 Verification record of contact rail working height repeatability

序号	里程	工作高度 1/mm	工作高度 2/mm	工作高度 3/mm	工作高度 4/mm	误差 1/mm	误差 2/mm	误差 3/mm
1	K36+806.7	201.3	201.9	201.2	201.6	0.6	-0.1	0.3
2	K36+811.6	201.7	199.6	201.3	199.2	-2.1	-0.4	-2.5
49	K37+2.1	201.4	201.9	202.1	202.4	0.5	0.7	1.0
50	K37+5.2	202.2	202.5	202.6	202.6	0.3	0.4	0.4

表 5 接触轨偏移值重复性验证记录表
Tab.5 Verification record of contact rail offset value repeatability

序号	里程	偏移值 1/mm	偏移值 2/mm	偏移值 3/mm	偏移值 4/mm	误差 1/mm	误差 2/mm	误差 3/mm
1	K36+806.7	1 550.3	1 550.2	1 552.0	1 551.4	-0.1	1.7	1.1
2	K36+811.6	1 552.8	1 552.5	1 552.5	1 552.2	-0.3	-0.3	-0.6
49	K37+2.1	1 548.4	1 548.1	1 549.0	1 549.8	-0.3	0.6	1.4
50	K37+5.2	1 550.9	1 550.9	1 551.1	1 551.1	0	0.2	0.2

5.2.3 检测装置长期跟踪验证

该新型车载式地铁供电接触轨几何参数检测装置在 6 条正线上接触轨正常运用近 1 年半,约完成 130 次接触轨动态检测作业,检测总里程达 1 万 km 以上。通过长期跟踪,发现设备及检测装置的性能稳定,与人工复核对比的精度满足要求。期间多次指导接触轨维保,如某次维保人员根据检测装置检测波形对接触轨的 3 处位置进行工作高度修正,并测量相邻定位点,调整后各处的接触轨几何参数均在标准范围内。

6 结语

新型车载式地铁供电接触轨几何参数检测装置能够实现对地铁接触轨的快速、精准检测,提高人工检查效率。同时,经过对该装置的长期跟踪试验和大量的检测数据分析,对其实际应用效果和精度进行了验证,结果表明,其满足日常维保要求,实际应用效果较好。然而,本装置的接触轨成像系统仅对接触轨进行图像采集,不具备接触轨缺陷的智能化识别功能。如今轨道智能化巡检已较为成熟,接触网智能化巡检试验的效果也良好,但是接触轨智能化巡检项目仍存在空白,有待作进一步研究与应用。

参考文献

[1] 罗亚敏. 地铁接触轨几何参数检测装置研究[J]. 企业技术开发, 2019, 38(3): 10.
LUO Yamin. Research on geometric parameter detection device of metro contact rail[J]. Technological Development of Enterprise, 2019, 38(3): 10.

[2] 张爱明, 钟声标, 张晓良. 广州地铁综合检测车第三轨检测系统[J]. 现代城市轨道交通, 2013(6): 30.
ZHANG Aiming, ZHONG Shengbiao, ZHANG Xiaoliang. Third rail inspection system of comprehensive inspection vehicle in Guangzhou Metro[J]. Modern Urban Rail Transit, 2013(6): 30.

[3] 赵鑫欣, 王胜春, 王昊, 等. 城轨车第三轨廓形快速追踪算法研究及应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(9): 128.
ZHAO Xinxin, WANG Shengchun, WANG Hao, et al. Research and application of fast tracking algorithm for third rail profile of urban rail vehicles[J]. Railway Engineering, 2020, 60(9): 128.

[4] 张春光, 赵方, 李学峰, 等. 城市轨道交通综合检测车方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(11): 22.
ZHANG Chunguang, ZHAO Fang, LI Xuefeng, et al. Research on urban rail transit comprehensive inspection vehicle scheme[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(11): 22.

[5] 顾世平, 樊戈平, 熊斌. 北京地铁第三轨高低、水平距离检测系统[J]. 铁道建筑, 1997, 37(5): 9.
GU Shiping, FAN Geping, XIONG Bin. Detection system for height and horizontal distance of the third track of Beijing Subway[J]. Railway Engineering, 1997, 37(5): 9.

(收稿日期:2021-02-08)