

# 地铁非接触式靴轨关系在线检测技术研究

余朝富<sup>1</sup> 邱启盛<sup>2</sup> 占 栋<sup>1</sup> 刘 兰<sup>2</sup> 谢强斌<sup>2</sup> 王志惠<sup>2</sup>

(1. 成都唐源电气股份有限公司, 610046, 成都;

2. 广州地铁集团有限公司, 510308, 广州//第一作者, 工程师)

**摘 要** 介绍了地铁非接触式靴轨关系在线检测技术的原理及系统构成。以广州地铁4号线和上海轨道交通17号线为依托, 对其进行了靴轨关系检测试验。结果表明, 在列车不同速度下, 接触轨几何参数检测系统的重复性误差符合要求, 靴轨燃弧检测能够实时获取集电靴接触轨运行状态。

**关键词** 地铁; 非接触式靴轨关系; 在线检测技术

**中图分类号** U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.010

## Research on Online Detection Technology for Metro Non-contact Interaction Between Collector Shoe and Contact Rail

SHE Chaofu, QIU Qisheng, ZHAN Dong, LIU Lan, XIE Qiangbin, WANG Zhihui

**Abstract** The principle and system composition of online detection technology of metro non-contact shoe-rail relationship are introduced. Based on Guangzhou Metro Line 4 and Shanghai Rail Transit Line 17, the shoe-rail relationship test is carried out. Results show that under different train speeds, the detection accuracy of the contact rail geometric parameter detection system meets the requirements, and the shoe-rail arcing detection can obtain the running state of the collector shoe contact rail in real time.

**Key words** metro; non-contact shoe-rail relationship; online detection technology

**First-author's address** Chengdu Tangyuan Electric Co., Ltd., 610046, Chengdu, China

集电靴与接触轨的滑动电接触是地铁车辆获取电能的重要方式。因此, 地铁牵引供电系统的安全性及接触轨是否能长期保持良好状态有着重要关系。

靴轨关系在线检测包括接触轨几何参数检测和靴轨燃弧检测。接触轨几何参数检测包括人工检测和机器检测两种方式<sup>[1]</sup>。随着科技的发展, 人工检测逐渐被机器检测替代。非接触式靴轨关系

在线检测技术是目前地铁中常用的靴轨关系检测技术。其采用激光摄像测距原理对接触轨进行检测, 不与靴轨系统直接接触, 检测精度高, 并可实时检测<sup>[4-6]</sup>。

靴轨燃弧检测是利用一种特殊光学采集系统, 在滤除太阳光及其他杂散光的干扰后, 选取特定波长的紫外光段作为检测特征量, 从而实现燃弧检测<sup>[7-8]</sup>。

## 1 地铁非接触式靴轨关系在线检测技术原理

### 1.1 线结构光测量技术原理

线结构光向物体表面投射时, 产生了物体对光束的空间调制, 进而形成了激光轮廓线, 该轮廓线能够反映物体的形貌。

接触轨几何参数检测系统测量参数的需求为: ①走行轨中心与接触轨中心间的距离; ②接触轨受流面距相邻走行轨轨面的垂直距离。

接触轨几何参数检测示意如图1所示。标准接触轨外侧到接触轨中心的距离为46 mm, 已知 $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_{11}$ 、 $C_{12}$ (见图1), 故仅需测量 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$ 、 $C_7$ 、 $C_8$ 、 $C_9$ 、 $C_{10}$ (见图1), 即可得到接触轨几何参数:

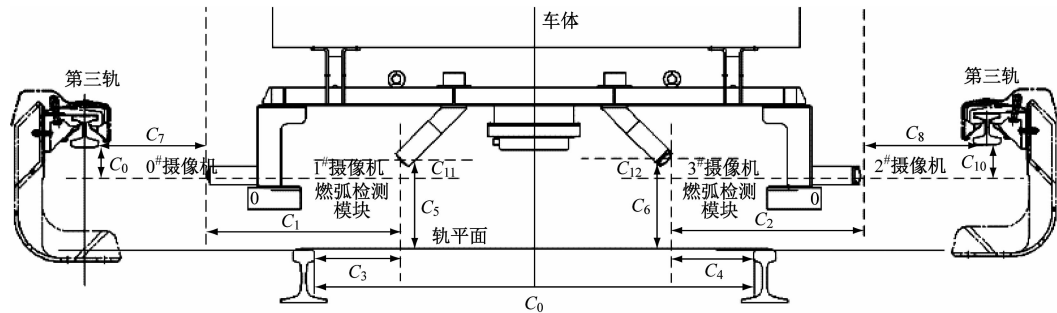
$$\begin{cases} x_0 = C_1 + C_7 + \frac{C_0}{2} - C_3 + 46 \text{ mm} \\ x_1 = C_2 + C_8 + \frac{C_0}{2} - C_4 + 46 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} y_0 = C_9 + C_5 - C_{11} \\ y_1 = C_{10} + C_6 - C_{12} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$x_0$ 、 $x_1$ ——分别为左、右接触轨中心距线路中心的水平距离, 即轨偏, mm;

$y_0$ 、 $y_1$ ——分别为左、右接触轨受流面与轨面的垂直距离, 即轨高, mm。



注:  $C_0$  为走行轨轨距;  $C_1$  为 0<sup>#</sup> 与 1<sup>#</sup> 摄像机中心的水平距离;  $C_2$  为 2<sup>#</sup> 与 3<sup>#</sup> 摄像机中心的水平距离;  $C_3$ 、 $C_4$  分别为 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 摄像机中心到相邻走行轨内侧下方 16 mm 处的水平距离;  $C_5$ 、 $C_6$  分别为 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 摄像机中心到相邻走行轨轨面的垂直距离;  $C_7$ 、 $C_8$  分别为 0<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 摄像机中心到相邻接触轨外侧的水平距离;  $C_9$ 、 $C_{10}$  分别为 0<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 摄像机中心到相邻接触轨受流面的垂直距离;  $C_{11}$  为 0<sup>#</sup> 与 1<sup>#</sup> 摄像机中心的垂直距离;  $C_{12}$  为 2<sup>#</sup> 与 3<sup>#</sup> 摄像机中心的垂直距离。

图 1 接触轨几何参数检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contact rail geometric parameter detection

1.2 紫外光子检测技术检测原理

通过光谱分析仪,可以得到太阳光和弓网燃弧的光谱特性曲线,如图 2 所示。由图 2 可见,相对太阳光光谱,弓网燃弧光谱辐射强度相对较低,在 240 ~ 260 nm、300 ~ 330 nm、390 ~ 400 nm 等 3 个波长范围内分布有紫外光频谱波段。200 ~ 300 nm 波段处于太阳盲区,如果采用 240 ~ 260 nm 波段的紫外光作为燃弧检测的目标特征量,便可以排除太阳光干扰,从而准确地检测到由弓网燃弧发出的紫外光,进而就可以判断弓网燃弧现象是否发生。

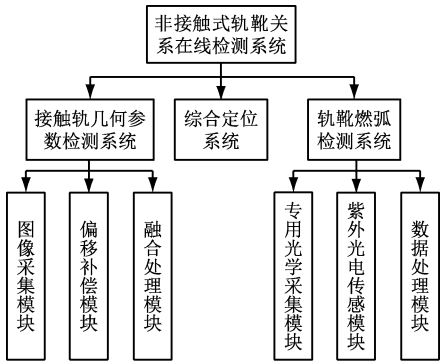


图 3 非接触式靴轨关系在线检测系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of non-contact shoe-rail relationship online detection system

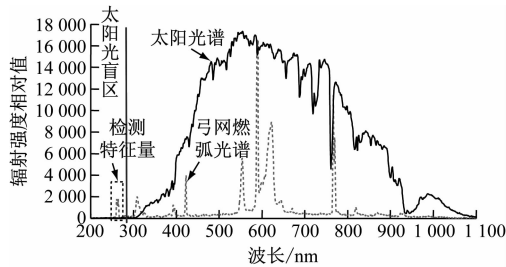


图 2 太阳光谱与弓网燃弧光谱特性曲线

Fig. 2 Arcing spectrum characteristic curves of sunlight and catenary

2 非接触式靴轨关系在线检测系统的构成

非接触式靴轨关系在线检测系统以运营车辆为载体,采用模块化设计。整个检测系统主要由接触轨几何参数检测系统、靴轨燃弧检测系统、综合定位系统 3 部分组成,如图 3 所示。

2.1 接触轨几何参数检测系统

接触轨几何参数检测系统由图像采集、偏移补偿、融合处理 3 个模块构成。

2.1.1 图像采集模块

二维激光测距传感器(2D 传感器)为图像采集模块中的核心组件。该传感器由线激光和相机组成。其工作原理是:利用三角成像原理,首先将激光光源投射在接触轨表面;然后令摄像机在其他角度对接触轨表面进行拍摄;最后利用视觉成像模型,计算目标点所在的世界坐标位置。

2.1.2 偏移补偿模块

偏移补偿系统是将测量到的车体左、右侧的偏移距离和车体倾角,通过现场总线传送到处理主机。分别运用两套 2D 传感器,扫描轨道测量基准。车体静态时由左、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 传感器实时测量来获取车体与轨面的动态位置关系。由车体动态与静态位置间的几何关系换算,精确获取车体倾角及偏移量。通过车体与轨面的倾角与偏移,将以车体作为

测量基准的数据换算到轨道中心,实现车体振动测量误差补偿。

2.1.3 融合处理模块

融合处理系统接收图像采集模块、偏移补偿模块、综合定位模块所测量的数据,并进行数据处理分析,实现实时在线检测功能。

2.2 靴轨燃弧检测系统

靴轨燃弧检测系统主要由专用光学采集模块、紫外光电传感模块、供电模块及数据处理模块组成。

2.2.1 专用光学采集模块

专用光学采集系统是将弓网燃弧发出的特定谱段的紫外光进行高效捕捉,并有效滤除多余的太阳光或其他杂散光,这样便可提取到弓网燃弧的特征光。专用光学采集模块的采集示意如图4所示。

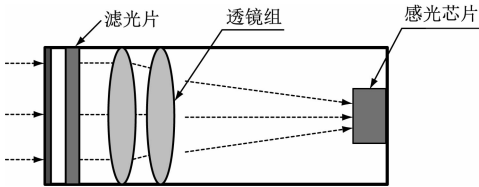


图4 专用光学采集系统的采集示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of optical acquisition system

2.2.2 紫外光电传感模块

紫外光电传感系统由信号处理电路、紫外光电传感器、电源模块构成。该模块的工作原理是:将获取的燃弧特征光变成可处理的电信号。

2.2.3 数据处理模块

小信号调理电路、AD 转换及发送电路、弓网监控图像采集及嵌入式计计算机构成了数据处理模块。而 AD 采集电路、FPGA 模块电路构成了 AD 转换及发送电路。

3 现场试验验证

以广州地铁4号线(以下简为“4号线”)、上海轨道交通17号线(以下简为“17号线”)为依托,进行系统数据分析,验证靴轨关系非接触式在线检测技术的可行性。

3.1 接触轨几何参数检测

3.1.1 列车相同速度下接触轨轨高、轨偏重复性误差对比

为验证接触轨几何参数检测装置的检测效果,对4号线黄村站—石碁站区间(以下简为“黄石区间”),以正向和反向采用40 km/h 的速度对试验区

段各检测3次,如图5~6所示。

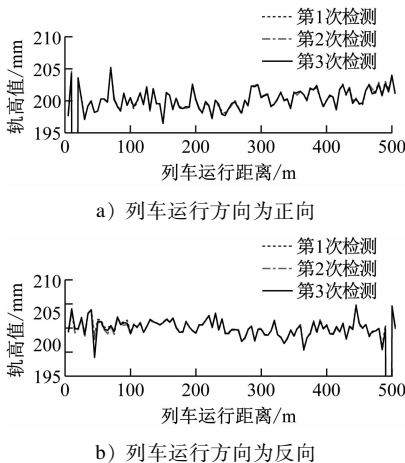


图5 4号线黄石区间接触轨高-列车运行距离曲线  
Fig. 5 Contact rail height-train operation distance curve at Line 4 Huangshi interval

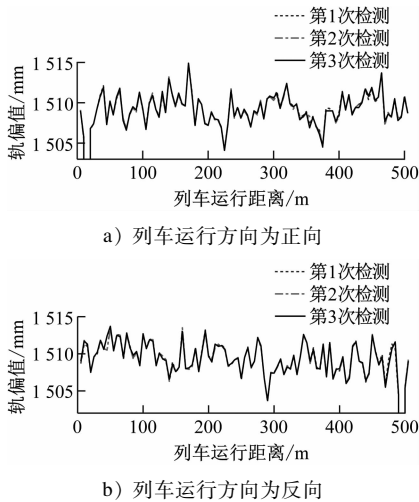
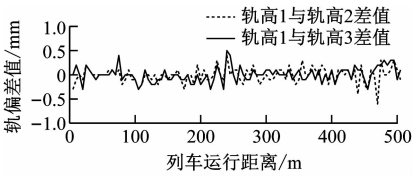


图6 4号线黄石区间接触轨轨偏-列车运行距离曲线  
Fig. 6 Contact rail deviation-train operation distance curve at Line 4 Huangshi interval

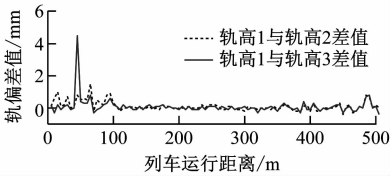
对4号线新造站—石碁站区间(以下简为“新石区间”)采用60 km/h 的速度进行检测,对比接触轨轨高、轨偏重复性误差是否合格。以第1次检测数据为基准值,得到第2次、第3次接触轨轨高、轨偏与第1次的差值曲线见图7~8。

3.1.2 列车不同速度下接触轨轨高、轨偏重复性误差对比

选取4号线新石区间,列车分别采用30 km/h、60 km/h 的速度对该区间的接触轨进行检测(见图9~10)。随机抽取接触轨检测数据,对比该数据的重复性误差是否合格,具体如表1所示。

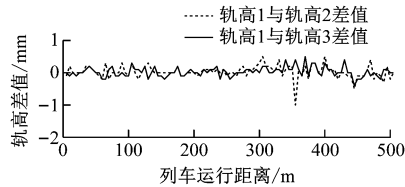


a) 列车运行方向为正向

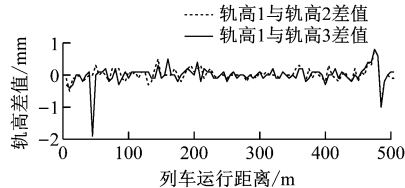


b) 列车运行方向为反向

图 7 4 号线新石区间接触轨轨偏差值-列车运行距离曲线  
Fig. 7 Contact rail deviation-train operation distance curve at Line 4 Xinshi interval

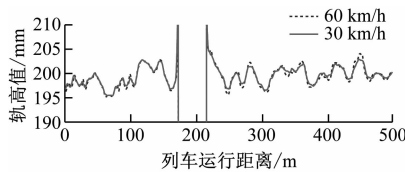


a) 列车运行方向为正向

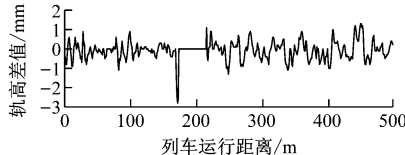


b) 列车运行方向为反向

图 8 4 号线新石区间接触轨轨高差值-列车运行距离曲线  
Fig. 8 Contact rail height difference-train operation distance curve at Line 4 Xinshi interval

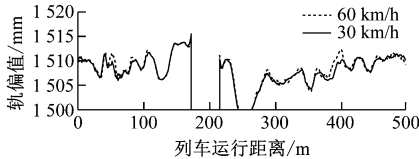


a) 轨高

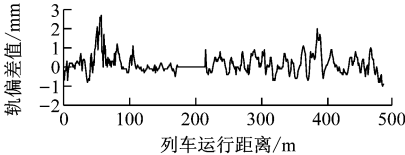


b) 轨高差值

图 9 列车不同速度下接触轨轨高-列车运行距离曲线  
Fig. 9 Contact rail height-train operation distance curve at different operation speeds



a) 轨偏



b) 轨偏差值

图 10 列车不同速度下接触轨轨偏-列车运行距离曲线  
Fig. 10 Contact rail deviation-train operation distance curve at different operation speeds

表 1 列车相同速度下黄石区间接触轨轨高、轨偏重复性误差

Tab.1 Repeatability error of contact rail height and deviation at Huangshi interval at same train speed

测量参数	列车运行方向	$\varepsilon_{1,i,max}/mm$		$\varepsilon_{1,i,95\%}/mm$	
		$i=2$	$i=3$	$i=2$	$i=3$
轨高	正向	0.6	0.5	0.3	0.3
	反向	1.5	4.5	0.7	0.6
轨偏	正向	1.0	0.5	0.4	0.3
	反向	0.9	1.9	0.5	0.4

注： $\varepsilon_{1,i,max}$  为第  $i$  次和第 1 次重复性误差的最大值； $i$  为检测数据总量， $i$  为正整数且  $i \geq 100$ 。 $\varepsilon_{1,i,95\%}$  为  $\varepsilon_{1,i,max}$  由小到大排列后的第  $(95\% i)$  个数值。

由表 1 可知,4 号线新石区间接触轨轨偏、轨高的重复性误差大多在  $\pm 3\text{ mm}$  以内;系统轨偏的  $\varepsilon_{1,i,95\%}$  的最大值为  $0.9\text{ mm}$ ,轨高的  $\varepsilon_{1,i,95\%}$  的最大值为  $0.7\text{ mm}$ 。

3.2 靴轨燃弧检测

为验证靴轨动态检测装置的检测效果,在 17 号线上进行了动态试验。本试验选取东方绿洲站—虹桥火车站站区间(以下简为“东虹区间”),列车运行速度分别选取  $80\text{ km/h}$  和  $100\text{ km/h}$ ,对该区间进行靴轨燃弧检测。

由图 11 ~ 12 可见,在下行线路中,列车以  $80\text{ km/h}$  和  $100\text{ km/h}$  的速度运行时,燃弧持续时间最大值变化曲线大致相同,在蟠龙路站—诸光路站区间燃弧持续时间出现最大值  $87.1\text{ ms}$ 。燃弧率变化曲线走势亦大致相同,仅在最大值处略有偏差。列车以  $80\text{ km/h}$  的速度运行时,在蟠龙路站—诸光路站区间燃弧率出现最大值  $0.023\%$ ;列车以  $100\text{ km/h}$

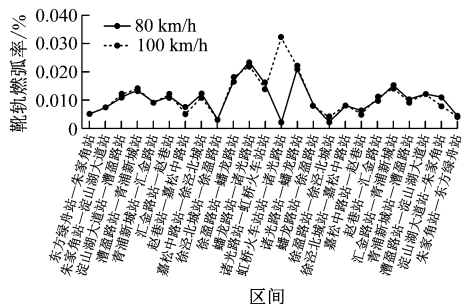


图 11 17 号线东虹区间下行线靴轨燃弧率曲线

Fig. 11 Curve of down line shoe-rail arcing rate at Line 17 Donghong interval

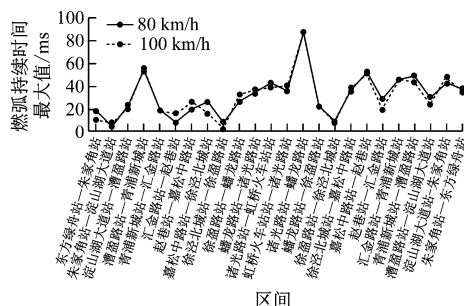


图 12 17 号线东虹区间下行线燃弧持续时间最大值曲线

Fig. 12 Curve of down line arcing maximum duration time at Line 17 Donghong interval

h 的速度运行时,在诸光路站—虹桥火车站区间燃弧率出现最大值 0.032%。列车在两种运行速度下燃弧率均小于 EN 50367—2012 规定的 0.1%,靴轨受流质量良好。

由图 13~14 可见,在上行线路中,列车分别以 80 km/h 和 100 km/h 的速度运行时,燃弧持续时间最大值变化曲线大致相同,徐盈路站—蟠龙路站区间燃弧持续时间出现最大值 86.4 ms;燃弧率变化曲线亦大致相同,在徐盈路站—蟠龙路站区间燃弧率出现最大值 0.021%,且燃弧率小于 EN 50367—2012 规定的 0.1%,靴轨受流质量良好;徐盈路站—

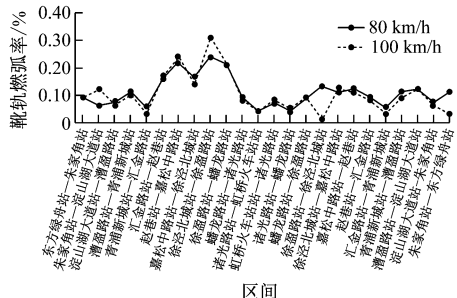


图 13 17 号线东虹区间上行线靴轨燃弧率曲线

Fig. 13 Curve of up line shoe-rail arcing rate at Line 17 Donghong interval

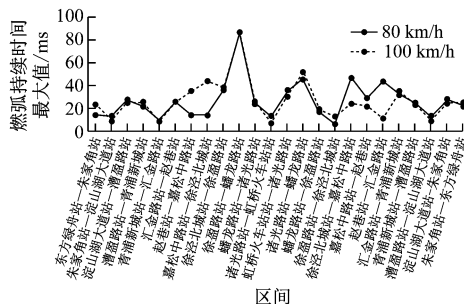


图 14 17 号线东虹区间上行线燃弧持续时间最大值曲线

Fig. 14 Curve of up line arc burning maximum duration time at Line 17 Donghong interval

蟠龙路站为高架线至地下线的过渡区间,出现燃弧次数最多。

## 4 结论

1) 车载式接触轨几何参数检测系统检测的轨偏、轨高的重复性误差均在  $\pm 3$  mm 以内。

2) 通过 17 号线靴轨动态参数试验,实时获取集电靴、接触轨的运行状态。上行线路燃弧率最大值为 0.021%,下行线路燃弧率最大值为 0.023%,且燃弧率均小于 EN 50367—2012 规定的 0.1%,靴轨受流质量良好。

3) 非接触式靴轨关系在线检测系统的动态实时在线检测功能,能够满足城市轨道交通接触轨供电线路的检测需要,亦能够有效提高城市轨道交通线路的检测效率,对地铁牵引供电系统的正常运行具有较高的参考价值。

## 参考文献

- [1] 唐崇伟. 接触轨检测中摄像机标定的分析与研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.  
TANG Chongwei. Analysis and research of camera calibration in contact rail measurement [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [2] 刘寅秋. 基于图像处理的接触网动态几何参数测量研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2012.  
LIU Yinqiu. Study on OCS dynamic geometric parameters detection based on image processing [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012.
- [3] 牛大鹏. 非接触式接触网几何参数检测系统研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.  
NIU Dapeng. Study on the OCS geometric parameters inspection system based on non-contact measurement [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [4] CHEN T, JIAN X. The study of novel detection methods for over-

- head contact system zigzag of high-speed electrified railway[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2005, 4(5): 529.
- [5] 马成. 基于燃弧检测装置的弓网受流质量试验分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- MA Cheng. Analysis the quality of current collection of pantograph-catenary system based on detection of ultraviolet arcing measurement [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [6] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2003.
- YU Wanju. OCS of high-speed electrified railway[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.
- [7] 唐唐龙. 高速铁路接触网检测若干关键技术[D]. 成都:西南交通大学, 2006.
- CHEN Tanglong. On some key subjects in the detection of high-speed railway overhead contact system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [8] 吴积钦. 受电弓与接触网系统[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2009.
- WU Jiqin. Study on the characteristics of electric contact between pantograph and overhead contact line[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.
- [9] 李霖峰,董磊,张雷,等. 基于 LabVIEW 的光谱自动测试系统[J]. 光学仪器,2006(2): 66.
- LI Linfeng, DONG Lei, ZHANG Lei, et al. Auto-measuring system for light spectrum achieved by LabVIEW[J]. Optical Instruments, 2006(2): 66.
- [10] 黄煜,王淑荣,张振铎,等. 用 150 W 氙灯标定 200 ~ 300 nm 光谱辐照度[J]. 光学精密工程,2007(8):1215.
- HUANG Yu, WANG Shurong, ZHANG Zhenduo, et al. Calibration of 200 ~ 300 nm spectral irradiance using 150W deuterium lamp[J]. Optics and Precision Engineering, 2007(8): 1215.
- [11] 占栋. 线结构光视觉测量关键技术及在轨道交通巡检中应用[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- ZHAN Dong. Research on key techniques of line-structured light vision measurement and its applications in railway dynamic inspection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

(收稿日期:2020-04-16)

(上接第 46 页)

- CHENG Yulan, WANG Yihong. Analysis on mutual deformation influence between deep soft soil foundation pit and adjacent metro station[J]. Urban Mass Transit, 2019(9): 14.
- [6] 高玄涛. 后建车站基坑开挖及区间近距离下穿既有车站安全技术措施研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2019(4):101.
- GAO Xuantao. Study on safety measures for excavation of post-built metro foundation pit and closely crossing underneath adjacent operation metro station[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2019(4): 101.
- [7] 徐腾飞. 基坑开挖对近接地铁车站影响的数值分析[J]. 土工基础,2019(4):418.
- XU Tengfei. Numerical simulation of influence of foundation pit excavation on adjacent subway station[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019(4): 418.
- [8] 陈先智,黎忠,刘道炎. 新建地铁车站近接施工对既有地铁车站稳定性的影响研究[J]. 工程技术研究,2018(15):24.
- CHEN Xianzhi, LI Zhong, LIU Daoyan. Study on the influence of nearby construction of new metro station on the stability of existing metro station[J]. Engineering and Technology Research, 2018(15): 24.
- [9] 李世辉. 超大面积深基坑开挖对毗邻地铁车站影响的监测与数值分析[J]. 城市轨道交通研究,2018(8):115.
- LI Shihui. Measurement and numerical analysis of deep foundation pit excavation impact in super large area on the adjacent subway station[J]. Urban Mass Transit, 2018(8): 115.
- [10] 马腾飞. 新建地铁车站及隧道对临近既有地铁车站稳定性的影响研究[D]. 昆明:云南大学,2018.
- MA Tengfei. Research on the influences of newly-built subway station and tunnels the stability of adjacent existing subway station [D]. Kunming: Yunnan University, 2018.

(收稿日期:2020-04-20)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com