

# 城市轨道交通弓网动态检测技术及其参考标准\*

王会丰<sup>1</sup> 魏志恒<sup>2\*\*</sup> 马志鹏<sup>3</sup> 周于翔<sup>2</sup>

- (1. 北京城市快轨建设管理有限公司, 100027, 北京;  
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 100081, 北京;  
3. 中国铁道科学研究院, 100081, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的:我国城市轨道交通(以下简称“城轨”)弓网动态检测的评价主要参考铁路领域相关标准,但考虑到城轨普遍采用低净空的刚性接触网悬挂方式,以柔性接触网为主的评价标准并不完全适用于城轨弓网动态检测。为了完善城轨弓网动态检测的技术规范,需要探讨现有的弓网动态检测技术及其标准。方法:结合我国城轨弓网关系检测现状,依次对弓网接触压力、燃弧、弓网硬点、弓网动态几何参数等动态检测指标相关的国内外标准进行了梳理,探讨了现有标准中检测手段、检测指标在我国城轨领域应用中的不足,并提出相关优化建议。结果及结论:依据现有标准开展城轨弓网动态检测,存在适用性不强、实施性差等问题。国内标准与国外标准存在诸多差异,如对燃弧率的限值规定不一;城轨采用的刚性接触网与铁路采用的柔性接触网差距较大,现有弓网动态检测标准并不太适用于城轨领域的弓网动态检测;部分弓网动态检测指标的计算较为模糊,如弓网接触压力与燃弧率等。弓网燃弧检测、动态几何参数检测等已经实现非接触式检测。非接触式检测技术有望取代接触式检测技术,成为未来弓网动态检测的主要手段。

**关键词** 城市轨道交通;弓网动态检测技术;参考标准  
**中图分类号** U226.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.10.013

## Urban Rail Transit Pantograph-Catenary Dynamic Detection Technology and Reference Standards

WANG Huifeng, WEI Zhiheng, MA Zhipeng, ZHOU Yuxiang

**Abstract** Objective: The evaluation of PC (pantograph-catenary) dynamic detection for URT (urban rail transit) in China primarily refers to relevant standards from the railway sector. However, considering the rigid overhead catenary suspension method with low clearance commonly employed in

URT, the assessment standards primarily based on flexible catenary are not entirely suitable for PC dynamic detection in URT. To enhance these technical specifications, it is necessary to explore existing PC dynamic detection technologies and their standards. **Method:** Taking into account the current status of PC relationship dynamic detection in URT in China, both domestic and international standards related to dynamic detection indicators such as PC contact pressure, arcing, PC hard points, and PC dynamic geometric parameters are systematically reviewed. The investigation examines the shortcomings of the detection methods and indicators in existing standards concerning their application in China URT industry, and relevant optimization suggestions are proposed. **Result and Conclusion:** Carrying out URT PC dynamic detection based on existing standards reveals issues such as limited applicability and poor feasibility. Numerous differences exist in domestic and international standards, such as varying limits for arcing rates. There is substantial difference between the rigid overhead catenary used in URT and the flexible catenary used in railway, rendering that existing PC dynamic detection standards can be less suitable for URT PC dynamic detection. Some calculations for PC dynamic detection indicators are rather vague, including contact pressure and arcing rate. Non-contact detection methods are implemented for PC arcing detection and dynamic geometric parameter detection. Non-contact detection technologies are poised to replace contact-based ones and become the primary means of future PC dynamic detection.

**Key words** urban rail transit; pantograph-catenary dynamic detection technology; reference standards

**First-author's address** Beijing Urban Rapid Rail Construction Management Co., Ltd., 100027, Beijing, China

\*北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金项目(L211001);中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2022YJ235);铁科院(北京)工程咨询有限公司科研项目(2021ZXJ004)

\*\*通信作者

## 0 引言

弓网动态检测技术在我国铁路领域应用较为成熟,已形成了较为完善的评价标准体系。近年来,随着我国城市轨道交通(以下简称“城轨”)的快速发展,采用弓网动态检测技术实现对弓网动态性能及其匹配关系等的测试,已成为城轨发展趋势之一<sup>[1]</sup>。目前,我国城轨弓网动态检测的评价主要参考铁路领域相关标准,但考虑到城轨普遍采用低净空的刚性接触网悬挂方式,以柔性接触网为主的评价标准并不完全适用于城轨弓网动态检测。

与城轨弓网检测相关的国外标准包括 EN 标准和 IEC 标准,如 EN 50206:2010 *Railway applications-Rolling stock-Pantographs: Characteristics and tests*、EN 50317:2012 *Railway applications-Current collection systems-Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line*、EN 50367:2012 *Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)*、EN 50119:2020 *Railway applications-Fixed installations-Electric traction overhead contact lines*、IEC 62486:2017 *Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead contactline (to achieve free access)*、IEC 60494:2013 *Railway applications-Rolling stock-Pantographs-Characteristics and tests* 等;国内弓网评价标准包括 GB/T 32592—2016《轨道交通受流系统 受电弓与接触网动态相互作用测量的要求和验证》、GB/T 21561—2018《轨道交通机车车辆受电弓特性和试验》、GB/T 1402—2010《轨道交通牵引供电系统电压》、GB/T 32578—2016《轨道交通地面装置 电力牵引架空接触网》、TB/T 3271—2011《轨道交通 受流系统 受电弓与接触网相互作用准则》等。除上述标准外,国内还依据 TB 10761—2013《高速铁路工程动态验收技术规范》、TG/GD 124—2015《高速铁路接触网运行维修规则》等开展弓网关系在内的高速铁路工程验收及运营检测。但城轨领域除交办运[2019]17号《城市轨道交通初期运营前安全评估技术规范第1部分:地铁和轻轨》、DB 11/T 1714—2020《城市轨道交通工程动态验收技术规范》之外,在验收及运营阶段缺乏明确

的技术规范,因此亟需研发适用于城轨线路条件的弓网检测技术,以及颁布面向城轨领域弓网动态检测的评价标准。

根据交办运[2019]17号的要求,城轨弓网动态检测内容包括接触网动态几何参数、弓网燃弧指标、弓网动态接触压力及受电弓垂向加速度(硬点)检测。除上述标准规定的参数外,非标准检测内容还包括受电弓气动特性、接触线及滑板磨耗、受电弓温度分布及动应力等。本文仅研究标准规定的城轨弓网动态检测项目,通过分析现有检测标准,提出城轨弓网动态各检测项目的优化意见,并结合国内外先进成果开展城轨弓网检测技术研究。

## 1 弓网接触压力检测

### 1.1 检测标准

#### 1.1.1 检测手段

弓网接触压力是表征弓网动态相互作用性能的重要参数。EN 50317:2012 推荐采用力传感器进行弓网接触压力检测。弓网接触压力  $F_c$  的计算公式为:

$$F_c = \sum_{i=1}^{k_f} F_{\text{sens},i} + \frac{m_{\text{ab}}}{k_a} \sum_{i=1}^{k_a} a_{\text{sens},i} + F_{\text{corr,aero}} \quad (1)$$

式中:

$k_f$ ——压力传感器数量;

$F_{\text{sens},i}$ ——第  $i$  个压力传感器所测得的压力;

$m_{\text{ab}}$ ——受电弓的归算质量;

$k_a$ ——加速度传感器数量;

$a_{\text{sens},i}$ ——通过加速度传感器检测得到的加速度值;

$F_{\text{corr,aero}}$ ——空气动力。

式(1)为目前国内普遍采用的弓网接触压力计算公式。但在该种接触式压力检测方式下,压力与加速度传感器的加装会导致测量误差的产生,且未明确说明惯性力和空气动力的修正方式。

#### 1.1.2 检测指标

城轨一般采用 DC 1.5 kV 及 AC 25 kV 供电制式,设计速度普遍在 160 km/h 以下。从各规范摘录出与城轨相关的弓网接触压力检测指标(见表1),其特点如下:

1) 上述规范或标准对于弓网接触压力的评价指标并不统一,如弓网最小接触压力的规定及平均接触压力的限定范围。

2) 部分现行规范未考虑城轨弓网动态特性的

表 1 弓网接触压力指标  
Tab.1 PC contact pressure indicators

规范编号	适用线路 名称	v/ (km/h)	供电制式	$F_m$ 取值范围/N	最大接触 压力/N	最小接触 压力/N	接触压力的 最大标准 偏差/N
EN 50367:2012	铁路	≤200	AC	(0.000 47v <sup>2</sup> + 60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90)			0.3F <sub>m,max</sub>
		≤200	DC 1.5 kV	(0.001 12v <sup>2</sup> + 70, 0.000 97v <sup>2</sup> + 140)			0.3F <sub>m,max</sub>
EN 50119:2020	铁路	≤200	AC		300	0	
		≤200	DC		300	0	
IEC 62486:2017	铁路	≤200	AC	(0.000 47v <sup>2</sup> + 60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90)			0.3F <sub>m,max</sub>
		≤200	DC 1.5 kV	(0.001 12v <sup>2</sup> + 70, 0.000 97v <sup>2</sup> + 140)			0.3F <sub>m,max</sub>
TB/T 3271—2011	铁路	≤200	AC	(60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90)	300	0	0.3F <sub>m,max</sub>
		≤200	DC 1.5 kV	(70, 0.000 228v <sup>2</sup> + 140)	300	0	0.3F <sub>m,max</sub>
TB 10009—2016	铁路	≤200		(60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90]	300	0	0.3F <sub>m</sub>
TB 10461—2019	铁路			[0.000 47v <sup>2</sup> + 60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90]	F <sub>m</sub> + 3σ	20	0.3F <sub>m</sub>
GB/T 32578—2016	铁路	≤200	AC		300	0	
		≤200	DC 1.5 kV		300	0	
交办运[2019]17 号	城轨		AC 25 kV	(0.000 47v <sup>2</sup> + 60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90)			0.3F <sub>m,max</sub>
			DC	(0.001 12v <sup>2</sup> + 70, 0.000 97v <sup>2</sup> + 140)			0.3F <sub>m,max</sub>
DB 11/T 1714—2020	城轨		AC 25 kV	(0.000 47v <sup>2</sup> + 60, 0.000 47v <sup>2</sup> + 90)	300	0	0.3F <sub>m,max</sub>
			DC 1.5 kV	(0.001 12v <sup>2</sup> + 70, 0.000 97v <sup>2</sup> + 140)	300	40	0.3F <sub>m,max</sub>

注： $F_m$ 、 $F_{m,min}$ 、 $F_{m,max}$  分别为平均接触压力及其最小值和最大值，单位 N； $\sigma$  为接触压力的标准偏差，单位 N； $v$  为列车运行速度，单位 km/h。

影响,仅考虑静态接触压力。除此以外,目前被行业接受的城轨 DC 1.5 kV  $F_m$  取值介于  $0.000\ 97v^2 + 140$  与  $0.001\ 12v^2 + 70$  之间,适用于柔性接触网;而刚性接触网跨距与锚段长度远远小于柔性接触网,且相邻定位点间隔较短,在 1 个跨距内有相当数量的检测定位点过于靠近锚段关节,导致弓网接触压力测量值较大,容易造成  $F_m$  检测超限的问题。

3) 现行规范或标准对于弓网接触压力的计算不够明确,如  $F_m$  计算中  $v$  的取值方法。这导致在实际线路检测中,为了使弓网接触压力符合要求,人为扩大  $v$  取值、强行放大弓网接触压力限值的现象较为常见。

因此,现有的弓网接触压力评价标准不太适应于城轨刚性接触网的检测现状,对于弓网接触压力具体参数的选择较为模糊,因此,需对刚性接触网检测数据进行统计分析,在现有规范的基础上审视弓网接触压力的合理范围,明确计算公式,统一计算参数。

1.2 检测技术

弓网接触压力检测大多以力的平衡(平衡法)为基础对弓网接触压力进行检测,可大致分为接触式压力检测与非接触式压力检测。相对于平衡法,逆向法(非平衡法)是将受电弓视为一个线性系统,通过测量系统输出结果反推弓网接触压力,且弓网接触压力等于传感器输出信号与系统传导函数的比值<sup>[2]</sup>。该方法于 21 世纪初日本铁路技术研究所提出,其测定频率范围更广,对传感器的设置制约较少,但该方法目前并未获得实际的工程应用。

1.2.1 接触式压力检测技术

常用的接触式压力检测技术需将 4 个力传感器分别安装于 2 列滑板与底座之间,各个力传感器显示的数值与惯性力、气动力测量结果叠加得到最终的弓网动态接触压力。

然而,城轨采用的刚性接触网相较于柔性接触网波磨现象更为突出。文献[3]证实高频振动对接触线磨耗具有重要影响,惯性力精准计算的实现有必要考虑弓网之间的高频振动范围。上述惯性力的计算将整个弓头滑板视为一个整体,适用于低频

条件下的运动分析,尽管采用 4 个测点对加速度进行求取,但仍然忽略了高频条件下滑板的柔性形变,因此,采用传统的惯性补偿计算公式存在一定的误差。为此,文献[4]将 3 个加速度传感器对称布置于单个滑板上,经过计算得到各传感器对应滑板的等效质量,求取各部分惯性力并进行叠加,以此得到更加准确的惯性力。该方法综合考虑了柔性体惯性补偿的理论推导与工程的实践需求,为惯性力的计算提供了一种新的思路。

受电弓滑板长期工作于高磁场和高电压环境中,相比常用的压电式传感器,光纤式力传感器无需额外的电气隔离措施,能够有效避免电磁干扰。光纤式力传感器可以嵌入安装于受电弓滑板内,通过建立受电弓滑板的梁体模型,依据传感器算得的应变推导出弓网接触压力。文献[5]分析了滑板的梁体模型及其检测的数学原理,通过试验验证了此种方式的可行性。

文献[6]将嵌入式光纤传感器应用于列车高速运行时弓网系统的实时接触测量。文献[7]详细比较了光纤式与电气式弓网接触压力检测方式,证明了光纤传感器作为电气式弓网接触压力检测替代方案的可行性。光纤式压力传感器也可布置于滑板与滑板底座之间,直接测量滑板的接触压力,如

德国 HBM 传感器公司开发的光纤式压力传感器<sup>[8]</sup>。弓网接触压力  $F_C$  的计算公式如下:

$$F_C = A(s_2 - s_1) \tag{2}$$

式中:

- $A$ ——传感器的灵敏度系数;
- $s_1$ 、 $s_2$ ——单列滑板下两传感器的应变。

项目组还配套了对应的光纤式加速度传感器用于惯性力补偿,并通过试验验证了该系统的可行性及实用性。目前,光纤式压力传感器已经获得了实践应用,如北京鼎汉技术集团股份有限公司已将光纤式压力传感器应用于轨道交通弓网关系检测。

### 1.2.2 非接触式压力检测技术

采用接触式压力检测技术测量弓网接触压力会不可避免地影响受电弓的动态性能,基于计算机视觉处理的非接触式压力检测技术可以有效克服接触式压力检测技术的缺点。国内外有很多关于图像处理技术的研究,文献[9]率先将图像处理技术应用于弓网接触压力检测,通过将图像处理传感器安装于列车顶部,采集弓头和弹簧的位移来间接计算弓网接触压力。文献[10]采用图像处理技术对弓网接触压力进行非接触式检测,验证了该技术的可行性。基于图像处理技术的弓网接触压力计算方法见表 2。

表 2 基于图像处理技术的弓网接触压力计算方法

Tab.2 Calculation method for PC contact pressure based on image processing technology				
$F_C$ 的计算公式	分力名称	分力计算公式	已知量	检测量
$F_C = F_{bs} + F_I + F_{\zeta} + F_a$	弹簧反力 $F_{bs}$	$F_{bs} = \sum_{i=1}^n K_i x_i$	弹簧个数 $n_s$ 、弹簧等效刚度 $K_i$	弹簧变形 $x_i$
	惯性力 $F_I$	$F_I = \sum_{i=1}^n m_i a_i$	传感器个数 $n_t$ 、弓头等效质量 $m_i$	弓头振动加速度 $a_i$
	阻尼力 $F_{\zeta}$	$F_{\zeta} = -Cv$	弓头等效阻尼系数 $C$	弓头振动速度 $v$
	气动力 $F_a$	$F_a = C_a v_r^2$	比例常数 $C_a$	相对流速 $v_r$

注:测量设备包括高速摄像机、补光灯及数据处理计算机等。

依据视觉处理技术开展弓网接触压力的检测需要系统具有较高的精准度、可靠性和鲁棒性,但刚性接触网一般位于地下隧道,所处的复杂环境相对较少,视觉处理技术具有较好的应用条件。

## 2 燃弧检测

### 2.1 检测标准

EN 50317:2012、GB/T 32592—2016 对燃弧检测方式进行了详细说明,且 EN 50317:2012 对燃弧功率密度限值的规定更为详细,并规定了多个连续

电弧判定的最短间隔时间为 100  $\mu$ s。

从各规范中摘录出适用于城轨线路的燃弧评定指标,如表 3 所示。经分析,得到如下结论:

1) 目前大多数规范将燃弧率定义为时间的比值,EN 50317:2012、GB/T 32592—2016 提出了通过燃弧数目来统计燃弧率的计算方式,然而在该种方式下相关评定参数并不明确。

2) 不同标准对燃弧率的评定限值并不统一,国外标准规定燃弧率在 0.1% 以下,而国内标准规定其一般为 0.1% 或 5.0%,两者差异较大。

表 3 燃弧评定指标

Tab.3 Arcing evaluation indicators

规范编号	适用线路类型	最短持续时间/ms	$N_Q$ 计算公式	$N_Q/\%$	最大燃弧时间/ms	燃弧次数/(次/160 m)
EN 50317:2012	铁路	5	$N_Q = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100\%$			
EN 50367:2012	铁路	5		$\leq 0.1$		
IEC 62486:2017	欧洲铁路	5	$N_Q = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100\%$	$\leq 0.1$		
	中国铁路	5		$< 5.0$	$< 100$	$\leq 1$
TB/T 3271—2011	铁路	5	$N_Q = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100\%$	$\leq 0.1$		
TB 10009—2016	铁路	5	$N_Q = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100\%$	$< 0.1$		
TB 10461—2019	铁路	5	$N_Q = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100\%$	$< 5.0$	$< 100$	$< 1$
GB/T 32592—2016	铁路	5	$N_Q = \frac{\sum t_{arc}}{t_{total}} \times 100\%$			
交运[2019]17 号	城轨			$< 5.0$	$< 100$	$< 1$
DB 11/T 1714—2020	城轨			$< 5.0$	$< 100$	$< 1$

注： $N_Q$  为燃弧率； $t_{arc}$  为持续大于 5 ms 的燃弧时间； $t_{total}$  为测量电流超过标称电流 30% 的时间。

3) 最小间隔时间的设定将影响燃弧次数和燃弧时间的检测结果,然而目前仅有 EN 50317:2012 对多个连续电弧的间隔时间进行了限定。

综上所述,现有燃弧检测标准还需结合城轨燃弧的实测现状,明确燃弧判定及燃弧率的计算公式,同时规定适应于城轨行业的燃弧评价指标。

2.2 检测技术

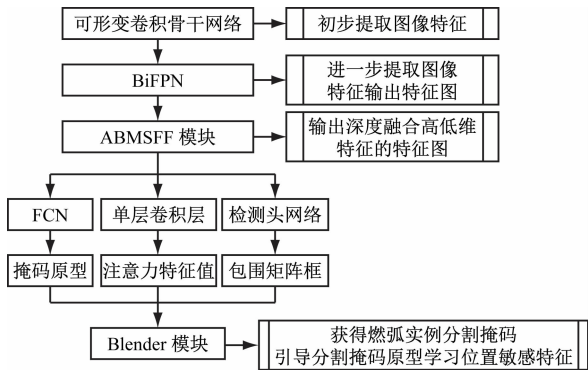
铁路行业主要基于图像处理、紫外光燃弧传感器及电磁辐射等技术开展弓网燃弧检测。

2.2.1 基于图像处理技术的燃弧检测

EN 50317:2012 对燃弧检测装置提出了光谱波段的灵敏度要求,而紫外光能够很好地避免灯光及太阳光对测试结果的干扰,具有较高的准确度,因此,搭配紫外照相机的图像处理技术获得了普遍应用。在此基础上,文献[11]还将紫外照相机搭配高灵敏度的火焰探测器实现燃弧图像的采集,进一步提高了燃弧捕捉的精准度。

利用红外热像仪搭配可见光图像实现燃弧检测也是一种可行的方式。文献[12]提出了一种改进的大律法分割算法,将红外图像区域分割,并进行灰度化、二值化处理,通过红外图像和可见光图像的自动融合实现燃弧的筛选,兼顾快速性与精准性。

除上述方式外,结合先进控制算法,基于可见光图像实现燃弧检测是目前很多学者研究的热点。文献[13]提出了一种基于卷积神经网络算法的 CNN 电弧检测模型,并通过视频验证了该方法的有效性,但该方法对一些极端情况下的电弧识别存在误差,需要更多的训练样本进行完善。文献[14]设计了一种基于深度神经网络算法的适用于燃弧检测的实例分割模型 ArcMask(见图 1),该模型对骨干网络、特征金字塔进行了改进,为基于可见光图像的燃弧检测提供了参考。



注:BiFPN 为加权双向特征金字塔网络;ABMSFF 为基于视觉的多尺度特征融合;FCN 为全卷积网络。

图 1 适用于燃弧检测的 ArcMask 网络模型

Fig.1 ArcMask network model suitable for arcing detection

2.2.2 基于紫外光燃弧传感器的燃弧检测

图像采集容易受到强光、雨雪等情况的干扰,而直接采用对燃弧光谱较为敏感的采集装置进行检测是一种简单可靠的方式。目前,中国铁道科学研究院集团有限公司采用 TC-ZA 型燃弧传感器进行城轨线路的周期性燃弧检测,且准确识别有效燃弧及其时长,以及通过传输、显示模块准确无误地显示与记录,是该技术需要克服的技术难题。

2.2.3 基于电磁辐射的燃弧检测

通过电磁辐射信号进行燃弧检测是一种能够替代传统电压、电流检测的方式。文献[15]设计了一种四阶 Hilbert 曲线分形天线用于捕获电弧的电磁辐射信号,通过时域、频域、时频域分析证明了电磁辐射脉冲与产生电弧过程中电压的对应关系,该种方式能够较为方便地得到燃弧的相关参数,并可用于弓网状态及受流性能的评价。

3 弓网硬点检测

3.1 检测标准

弓网“硬点”一般是指列车高速运行中,导致受电弓相对接触线出现局部空间位置、速度或加速度

突然变化的点,是一种有害的物理现象。国内一般通过一跨内弓头的最大垂向加速度来判断硬点,详见 TB 10761—2013、TB 10461—2019、TG/GD 124—2015 等标准。对于城轨领域,交办运[2019]17 号与 DB 11/T 1714—2020 等将受电弓垂向加速度作为硬点的检测标准,并将  $490\text{ m/s}^2$  作为垂向加速度的检测限值。

然而相关学者对上述基于受电弓垂向加速度的评判标准提出了质疑。文献[16]通过实测结果指出,依据加速度最大值判断硬点的方式存在误判的现象,提出了将一跨内受电弓的最大垂向加速度、峰值因子及标准偏差作为硬点的评判准则,并通过在京哈线上开展的实际检测验证了该评价准则的优越性。文献[17]提出了利用弓网接触压力来判定硬点的设想。另外,也有相关学者提出了硬点检测的其他评价标准。

3.2 检测技术

工程应用中一般依据受电弓垂向加速度开展硬点检测。目前具有代表性的弓网硬点检测方式见表 4。

表 4 弓网硬点检测方式  
Tab.4 Detection method for PC hard points

检测项目	检测技术	研究成果	实例验证
垂向加速度	接触式在线检测技术 <sup>[18]</sup>	车辆设备架空接触线检测系统,包含加速度计、信号调理单元、处理器单元等	对英国西海岸和东海岸的干线铁路进行了检测,证明了系统的准确性
	非接触式(图像)检测技术 <sup>[19]</sup>	受电弓位移及硬点检测系统:该系统可依据线阵照相机采集图像数据,通过模式匹配获取受电弓的位移及硬点	无
	基于模型算法的硬点诊断技术 <sup>[20]</sup>	建立隐式马尔科夫模型,通过训练处理加速度信号	从数据库中提取部分数据进行验证,证明了该技术的准确性
垂向加速度、滑板振幅	高压隔离技术、加速度及振幅检测技术 <sup>[21]</sup>	硬件:电容式加速度传感器、光纤测距仪、数据采集器等 软件:基于 LabVIEW(实验室虚拟仪器工程平台)编写的软件系统	对杭州地铁 2 号线进行了验证,其结果与实际检测结果一致
垂向加速度 + 燃弧	光电振动综合检测技术 <sup>[22]</sup>	硬件:光电传感器、加速度传感器、计算机等 软件:光电综合检测系统	对韶山 4 型电力机车进行跟车验证,成功测得硬点

随着城轨线路设计速度的提高,其安全性愈发受到重视,仅依据受电弓垂向加速度评价硬点显现出其局限性。与此同时,基于图像处理的非接触式检测技术能够克服接触式检测技术的不足,也能够实现弓网状态监测设备的最大化利用,有望成为弓网硬点检测的一种有效手段。

4 弓网动态几何参数检测

4.1 检测标准

依据 DB 11/T 1714—2020,弓网动态几何参数检测的内容包括接触线高度、拉出值、定位线间的高差和接触线动态抬升量。现有标准对弓网动态

几何参数的规定如下:

1) EN 50367:2012、IEC 62486:2017 等规定了各设计速度下城轨线路采用的接触线高度,其制定的5.00~5.75 m接触线高度的标准基于柔性接触网,并不适用于刚性接触网的导高检测。在实际检测中,城轨弓网动态抬升量、导高等参数与普通、高速铁路存在较大差异,需要探究适应于城轨线路的几何参数标准。图2为城轨刚性接触线导高与速度随里程变化曲线。

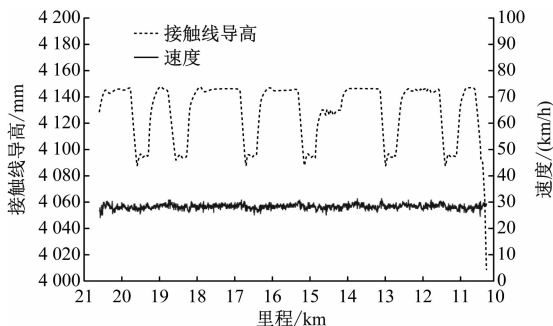


图2 城轨刚性接触线导高与速度随里程变化曲线

Fig.2 Curves of URT rigid overhead contact line clearance and speed changing with mileage

2) TB 10461—2019 建议将综合检测列车作为接触网几何参数的检测装备。交办运[2019]17号也提出了在列车上安装几何参数检测装置的测量方法。然而,城轨搭载式检测设备及综合检测列车的应用仍未得到普及,阻碍了城轨接触网动态几何参数检测标准的制定,也在一定程度上限制了弓网动态几何参数检测技术的实践应用<sup>[23]</sup>。

## 4.2 检测技术

目前,基于图像处理和激光雷达扫描的非接触式检测技术将逐步取代接触式检测技术,成为弓网动态几何参数检测的主要手段。对于图像处理技术,一般基于计算机视觉方法,根据转换矩阵和图像匹配方法得到实际几何参数,不同之处在于对于图像识别的算法不同。相对于图像处理技术,弓网动态几何参数检测对激光扫描雷达提出了更高的要求,为此,文献[24]利用最小二乘数据拟合方法提高系统的检测精度,以实现对接触线动态高度、拉出值的测量。此外,文献[25]基于机器学习算法,通过弓头的惯性测量结果来预测接触线的几何特征,为弓网的动态检测提供了一种思路。综上所述,弓网动态几何参数检测技术的研究本质上是对计算机处理算法的改进和设备精度的优化,可满足

列车高速运行下的检测需求。

## 5 结语

1) 依据现有标准开展弓网动态检测,存在适用性不强、实施性差等问题。通过研究发现:国内标准与国外标准存在诸多差异,如对燃弧率的限值规定不一;城轨采用的刚性接触网与铁路采用的柔性接触网差距较大,现有弓网动态检测标准并不太适用于城轨领域的弓网动态检测;部分弓网动态检测指标的计算较为模糊,如弓网接触压力与燃弧率等。

2) 目前,弓网燃弧检测、动态几何参数检测等已经实现非接触式检测。非接触式检测比接触式检测方式对弓网系统的影响要小,无需采取高压隔离措施;非接触式检测方式可以依托弓网巡检等照相机设备,充分利用检测资源,因此,非接触式检测技术有望取代接触式检测技术,成为未来弓网动态检测的主要手段。

## 参考文献

- [1] 魏志恒, 王文斌, 李明航, 等. 面向绿色化的城轨基础设施检测模式分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 75.  
WEI Zhiheng, WANG Wenbin, LI Minghang, et al. Analysis of urban rail transit infrastructure testing model for greenification [J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 75.
- [2] IKEDA M. The contact force between pantograph and contact wire—an estimation method using the inversion technique[J]. Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute), 2004, 45(2): 80.
- [3] COLLINA A, LO CONTE A, CARNEVALE M. Effect of collector deformable modes in pantograph—catenary dynamic interaction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(1): 1.
- [4] IKEDA M, SEI N, TAKAYUKI U. A precise contact force measuring method for overhead catenary system[C]//Proceedings of the 5th World Congress on Railway Research. Palma: Civil-Comp Press, 2001: 1.
- [5] SCHRÖDER K, ECKE W, KAUTZ M, et al. An approach to continuous on-site monitoring of contact forces in current collectors by a fiber optic sensing system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2): 172.
- [6] MAURIN L, FERDINAND R, LAFFONT G, et al. High speed real-time contact measurements between a smart train pantograph with embedded fibre bragg grating sensors and its overhead contact line[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 2: 1808.
- [7] BOCCIOLONE M, BUCCA G, COLLINA A, et al. Comparison of optical and electrical measurements of the pantograph-catenary contact force[J]. Proceedings of SPIE—The International Society

- for Optical Engineering, 2010, 7653: 644.
- [8] WAGNER R, MAICZ D, VIEL W, et al. A fibre optic sensor instrumented pantograph as part of a continuous structural health monitoring system for railway overhead lines[C]// 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2014). Nantes: EWSHM, 2014, 20(2):151.
- [9] KOYAMA T, IKEDA M, KOBAYASHI S, et al. Measurement of the contact force of the pantograph by image processing technology[J]. Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute), 2014, 55(2): 73.
- [10] 周宁, 蔚超, 谭梦颖, 等. 弓网系统动态及受流性能测试技术研究及应用[J]. 铁道学报, 2020, 42(3): 47.
- ZHOU Ning, WEI Chao, TAN Mengying, et al. Investigation on and application of measurement technology of dynamic performance and current collection quality of pantograph-catenary system[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(3): 47.
- [11] 鲁尧. 地铁智能弓网检测系统的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- LU Yao. Design of subway intelligent bow network detection system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [12] 吴俊明. 基于图像处理的弓网燃弧检测与识别[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- WU Junming. Arcing detection and recognition of pantograph and catenary based on image processing[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [13] HUANG S, ZHAI Y, ZHANG M, et al. Arc detection and recognition in pantograph-catenary system based on convolutional neural network[J]. Information Sciences, 2019, 501: 363.
- [14] 郭少鹏. 基于实例分割的弓网燃弧视觉检测技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- GUO Shaopeng. Research on visual detection technology of pantograph-catenary arc based on instance segmentation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [15] GAO G, YAN X, YANG Z, et al. Pantograph-catenary arcing detection based on electromagnetic radiation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(4): 983.
- [16] 康熊, 刘金朝, 韩通新, 等. 基于弓头垂直冲击加速度接触网硬点评判准则的研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 108.
- KANG Xiong, LIU Jinzhao, HAN Tongxin, et al. Research on the criteria for evaluating the hard spots of catenary based on the vertical impact acceleration of pantograph head[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 108.
- [17] 李丰良, 李敏. 接触网的硬点检测[C]//中国铁道学会电气化委员会. 中国铁道学会电气化委员会 2006 年学术会议论文集. 北京: 中国铁道学会电气化委员会, 2006: 240.
- LI Fengliang, LI Min. Hard point detection of catenary[C]// Electrification Committee of China Railway Society. Proceedings of the 2006 Academic Conference of the Electrification Committee of China Railway Society. Beijing: Electrification Committee of China Railway Society, 2006: 240.
- [18] PHILLPOTTS R. Monitoring discontinuities in the 25 kV overhead[C]//IEEE Seminar Condition Monitoring for Rail Transport Systems. London: IEEE, 1998:501.
- [19] YAMAMOTO H, WATABE Y. Pantograph displacement measuring device and trolley wire hard spot detection method; JP 2019041934A[P]. 2020-09-10.
- [20] TIAN S, ZHANG P, HUANG L, et al. Hard-point detection of catenary based on Hidden Markov Model[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1/2/3/4): 701.
- [21] 伍川辉, 卿云, 吴琛, 等. 地铁车辆接触网硬点在线检测系统设计[J]. 中国测试, 2020, 46(1): 77.
- WU Chuanhui, QING Yun, WU Chen, et al. Design of on-line detection system of the hard point of catenary for metro vehicle[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(1): 77.
- [22] 汤兆平, 唐帅, 杨建国, 等. 弓网硬点光电振动综合检测技术研究[J]. 中国科技论文, 2015, 10(23): 2760.
- TANG Zhaoping, TANG Shuai, YANG Jianguo, et al. Research on photoelectric vibration comprehensive detection of pantograph-catenary hard point[J]. China Science Paper, 2015, 10(23): 2760.
- [23] 田新宇, 魏世斌, 赵延峰, 等. 城市轨道交通基础设施综合检测列车创新技术[J]. 现代城市轨道交通, 2019(8): 32.
- TIAN Xinyu, WEI Shibin, ZHAO Yanfeng, et al. Innovative technology of comprehensive inspection train for urban rail transit infrastructure[J]. Modern Urban Transit, 2019(8): 32.
- [24] 孔龙飞, 韩通新. 基于激光雷达的接触网动态几何参数安全监测研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(4): 86.
- KONG Longfei, HAN Tongxin. Research on safety monitoring of dynamic geometric parameters of catenary based on laser scanning radar[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(4): 86.
- [25] BLANCO B, ERRANDONEA I, BELTRÁN S, et al. Panhead accelerations-based methodology for monitoring the stagger in overhead contact line systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 171: 104742.

(收稿日期:2023-03-13)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821