

基于移动三维激光扫描技术的地铁隧道 接触网导高检测新方法^{*}

卢建军¹ 黄小斌² 吴 勇¹ 郑佳佳¹ 鲍 艳³

(1. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 310014, 杭州; 2. 杭州杭港地铁有限公司, 310018, 杭州;

3. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 100124, 北京)

摘 要 [目的] 地铁隧道内接触网导高是保证列车正常受电的重要参数,需定期进行检测。针对其他导高检测方式存在的误差大、精度低的问题,需提出基于移动三维激光扫描技术的地铁隧道接触网导高检测新方法。[方法] 基于移动三维激光扫描技术提出了导高检测的新方法,分析了误差来源;提出通过在移动式三维激光扫描仪上增设刚性倾斜组件来改变扫描仪激光线入射角度,进而减少隧道断面点云模型的毛刺数量,并采用等角兰勃特投影来获取隧道真实点云模型。与导高仪检测结果进行对比,以验证其导高检测精度是否满足相关要求。[结果及结论] 基于移动式三维激光扫描技术建立的隧道断面点云模型存在毛刺,是因激光脚点垂直入射接触网发生散射和漫反射导致的。增加倾斜组件,可有效减少隧道断面点云模型的毛刺数量。移动式三维激光扫描仪与导高仪的导高检测数据对比结果表明,基于移动式三维激光扫描技术的导高检测精度基本在 ± 3 mm 以内,能够满足相关规范对导高检测的精度要求。

关键词 地铁隧道; 移动三维激光扫描技术; 接触网; 导高检测精度

中图分类号 U226.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.036

New Method for Metro Tunnel Catenary Height Detection Based on Mobile 3D Laser Scanning Technology

LU Jianjun¹, HUANG Xiaobin², WU Yong¹, ZHENG Jiajia¹, BAO Yan³

(1. Zhejiang East China Surveying and Engineering Safety Technology Co., Ltd., 310014, Hangzhou, China; 2. Hangzhou Hanggang Metro Co., Ltd., 310018, Hangzhou, China; 3. Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Ministry of Education, 100124, Beijing, China)

Abstract [Objective] The height of metro tunnel catenary is a crucial parameter for ensuring normal train electrification

and requires regular inspection. In response to the significant errors and low precision associated with other height detection methods, a new method for detecting the metro tunnel catenary height based on mobile 3D laser scanning technology is proposed. [Method] Based on the above new method, the error sources are analyzed. The method of adding a rigid tilting component on the mobile 3D laser scanner is suggested to modify the incidence angle of the laser, thereby reducing the number of spikes in the point cloud model of the tunnel profile. Additionally, the use of isometric Lambert projection is recommended to obtain an accurate point cloud model of the tunnel. A comparison is conducted with the height gauge detection results to verify whether the accuracy of the height detection meets the relevant requirements. [Result & Conclusion] The presence of spikes in the tunnel profile point cloud model built on mobile 3D laser scanning technology is caused by the scattering and diffuse reflection of the catenary due to laser foot point vertical incidence. The addition of the tilting component effectively reduces the number of spikes in the tunnel profile point cloud model. A comparison of the height detection data between the mobile 3D laser scanner and height gauge indicates that the accuracy of the height detection based on mobile 3D laser scanning technology is generally within ± 3 mm, thus meeting the precision requirements stipulated by the relevant regulations.

Key words metro tunnel; mobile 3D laser scanning technology; catenary; height detection inspection accuracy

接触网导高是保证列车正常受电的重要参数。若导高过高,则会使电弓离线产生电弧,进而烧损接触导线和受电弓;若导高过低,则会危及人员和超限货物的安全。可见,当接触导线坡度变化过大时,易因导高过高而产生电弧,从而影响弓网受流质量,加大滑板的接触导线的磨损。因此,需要定期进行导高检测^[1]。

^{*} 国家自然科学基金项目(51829801);国家重点研发计划项目(2017YFC0805403);浙江省交通运输厅科技计划项目(2019036)

导高检测分为接触式检测和非接触式检测两种。接触式检测的常用方式为吊杆式法及检测车法;非接触式检测的常用方式为光学法、超声波法、激光法和摄像法。接触式检测的检测工具须和输电高压线接触,在检测过程中存在安全隐患,且其过程繁琐、精度低。目前较先进的接触网导高检测多采用超声波法及激光法。其中超声波法检测受外界干扰影响大,误差大。三维激光扫描技术具有抗外界干扰强、检测精度高等优点,能实时自动监控,实现对接触网导高的动态测量^[2]。对此,本文提出基于移动三维激光扫描技术的地铁隧道接触网导高检测新方法。

1 导高检测新方法

1.1 模型构建

扫描设备为 Amberg GRP5000 移动式三维激光扫描仪(以下简称“扫描仪”),其采用线扫描模式进行外业数据采集,扫描速度为 100 r/s,移动速度为 0.5 m/s。推动扫描仪沿隧道中线前行,即可得到整个隧道的三维点云模型。由线扫描模式进行数据采集,隧道结构及附属物同扫描系统的距离相对稳定,所以点云模型的点云密度相对均匀,从而保证了点云模型的整体精度。

地铁隧道中的接触网大部分属于刚性接触网,接触导线被汇流排牵引,整体结构比较明显。通过三维激光扫描获取隧道结构点云模型(见图 1)的同时,也包含了接触网等附属结构的点云信息。接触网实景照片见图 2。通过数据裁剪可得到接触网部分的点云模型(见图 3),基于接触网点云模型可进行导高及拉出值的检测。

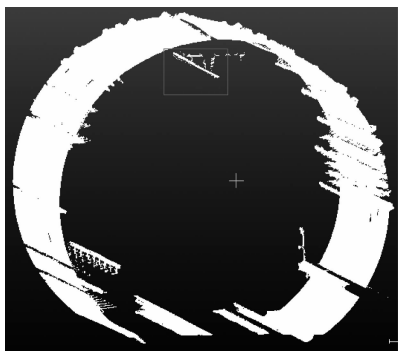


图 1 隧道结构点云模型

Fig. 1 Tunnel structure point cloud model

1.2 相对坐标系

在基于移动式三维激光扫描技术获取点云的

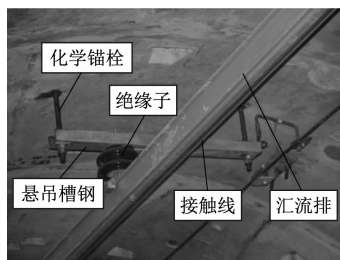


图 2 接触网实景照片

Fig. 2 Photo of catenary on site

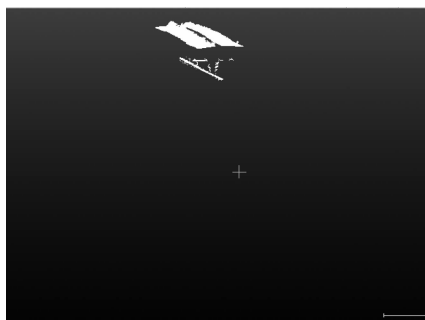


图 3 接触网点云模型

Fig. 3 Catenary point cloud model

原始数据中,有两套相对坐标系——UTC(超高改正)坐标系统,CTC(无超高改正)坐标系统。如图 4 所示:UTC 坐标系统的 X 、 Y 坐标轴分别为水平方向和竖直方向,坐标轴朝向不随扫描系统的倾斜角度变化而变化;CTC 坐标系统的 x 轴平行于轨面朝向隧道壁, y 轴垂直于轨面朝向隧道顶部。两套系统的坐标原点 O 都在轨面连线的中点。进行导高检测时采用 CTC 坐标系统,接触网点云模型中任意点 i 的纵坐标值 y_i 即为接触网导高,横坐标值 x_i 即为拉出值。

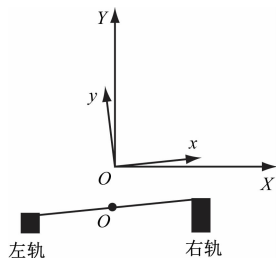


图 4 坐标系示意图

Fig. 4 Diagram of coordinate system

1.3 导高检测

三维激光扫描获取到的隧道结构点云模型中包含接触网等设备设施信息。通过点云截取可单独提取出接触网点云模型。接触网点云模型中包含接触导线、汇流排、绝缘子、悬吊槽钢、化学锚

栓等结构。其中有效信息是沿隧道延伸的接触网中接触导线最低点的高度及拉出值。由于 CTC 坐标系统中 y_i 值即为导高,因此在点云模型中找到 y_i 最小值,然后提取该位置里程即拉出值即可。

根据地铁隧道的环境特性(以一环一环管片拼装构成),因此为了数据的全面性及更好的定位,每一环管片生成找到 y_i 值最小值,并提取出该位置的拉出值及里程信息,加上该位置环号信息。导高有设计的标准导高,一般为 40 ~ 50 mm,可根据实测导

高值与设计值对比得到导高差异量。整个隧道接触网系统是由一根根锚段组成,为了保证受电弓能从一根锚段顺利平滑过渡到另一根锚段,在两根锚段衔接部位有一定重叠,通常涉及四环管片,在导高测量时两根锚段的高度都需要测量,故导高成果表中应包含锚段关节的信息。杭州某地铁区间盾构隧道采用扫描仪得到的导高检测结果(部分)见表 1。

表 1 杭州某地铁区间盾构隧道采用扫描仪得到的导高检测结果(部分)

Tab.1 Height inspection results (partial) obtained from applying scanner in an interval shield tunnel of Hangzhou Metro

里程	环号	正常段拉出值/mm	正常段导高/mm	正常段导高差异值/mm	锚段拉出值/mm	锚段导高/mm	锚段导高差异值/mm	超高/mm
K3 381.653 1	1	-53.9	4 054.0	4.0				1
K3 382.924 1	2	-55.8	4 054.1	4.1				3
K3 384.136 7	3	-51.0	4 051.1	1.1				6
K3 385.289 8	4	-53.5	4 050.2	0.2				8
K3 386.487 3	5	-51.3	4 050.3	0.3				10
K3 387.667 7	6	-51.8	4 051.4	1.4				12
K3 388.907 2	7	-48.9	4 053.5	3.5				14
K3 390.093 8	8	-46.1	4 053.6	3.6				15
K3 391.302 0	9	-43.2	4 052.7	2.7				17
K3 392.511 2	10	-32.6	4 056.6	6.6				19
K3 393.700 4	11	-38.0	4 051.8	1.8				21
K3 394.946 0	12	-37.5	4 054.9	4.9				24
K3 396.085 0	13	-41.2	4 056.1	6.1				26
K3 397.291 3	14	-43.0	4 056.3	6.3				28
K3 398.559 1	15	-40.3	4 056.5	6.5				30
K3 399.685 5	16	-35.0	4 058.5	8.5				32
K3 400.933 1	17	-32.4	4 057.6	7.6				34
K3 402.101 6	18	-34.6	4 053.8	3.8				36
K3 403.385 3	19	-32.4	4 054.9	4.9				38
K3 404.512 7	20	-31.3	4 057.0	7.0				39
K3 405.710 7	21	-27.6	4 056.1	6.1				41
K3 407.002 4	22	-24.6	4 056.1	6.1				43
K3 408.172 6	23	-21.7	4 055.2	5.2	-25.7	4 054.3	4.3	45
K3 409.406 0	24	266.3	4 053.9	3.9	266.2	4 052.9	2.9	47
K3 410.594 5	25	263.6	4 052.8	2.8	263.6	4 051.8	1.8	48
K3 411.810 5	26	264.3	4 050.6	0.6	264.6	4 049.7	-0.3	51
K3 412.971 9	27	263.5	4 045.4	-4.6	263.5	4 045.5	-4.5	53
K3 414.138 2	28	262.2	4 046.3	-3.7	262.2	4 045.3	-4.7	55
K3 415.342 5	29	261.9	4 045.1	-4.9				57
K3 416.580 8	30	265.8	4 046.8	-3.2				59

注:里程总范围为 K3 381.653 1—K42 382 568,此处为部分数据;标准导高为 4 050 mm;导高差异值 = 导高检测值 - 标准导高;拉出值按行车方向,向左为正,向右为负;里程以管片中间位置计。

1.4 误差来源分析

在进行处理导高检测结果时发现,隧道断面点云模型中存在毛刺,如图 5 所示。接触网点云模型中的毛刺会直接影响导高检测精度。

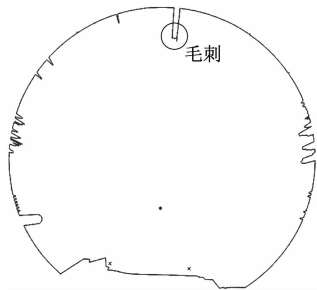


图 5 隧道断面点云模型中的毛刺

Fig. 5 Spikes in the tunnel profile point cloud model

经研究,接触导线及汇流排因同受电弓长期接触摩擦,其表面光滑且反射率较高,故而形成激光脚点(单个激光脉冲在物体表面的反射区域)。这些激光脚点在垂直入射接触网时会发生散射和漫反射,进而产生毛刺等噪点。为了减少激光的散射和漫反射,本文尝试采用改变激光入射角度来降噪。

2 降噪策略

2.1 改变扫描仪激光线入射角度

原扫描仪的激光扫描平面垂直于隧道中线,扫描激光线也垂直入射接触网。原扫描仪的扫描激光线入射示意图如图 6 所示。原扫描仪由多个传感器刚性连接,具有组装灵活且稳定的特点。基于此,为了降低激光脚点散射和漫反射,本研究采用预制固定倾斜角度的刚性倾斜组件来改变扫描仪的激光线入射角度,之后根据激光线入射角度对点云模型的坐标进行投影转换,即可得到真实的接触网点云模型。

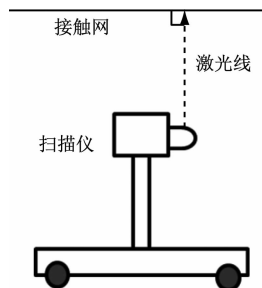


图 6 原扫描仪的扫描激光线入射示意图

Fig. 6 Diagram of scanning laser incidence of the original scanner

刚性倾斜组件样式如图 7 所示。刚性倾斜组件通过 8 个螺栓孔和中间卡槽,通过扫描仪的运载部件同扫描仪连接。刚性倾斜组件底面平整,表面倾斜。其倾斜的表面会使扫描仪产生倾角,进而改变扫描激光线的入射角度。

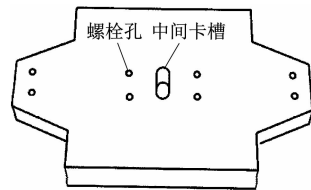


图 7 刚性倾斜组件示意图

Fig. 7 Diagram of rigid tilting component

加装刚性倾斜组件后,改进的扫描仪扫描激光线入射示意图如图 8 所示。经试验验证,此项改进可减弱激光脚点散射和漫反射。

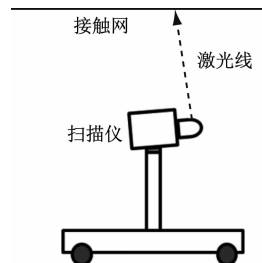


图 8 改进的扫描仪扫描激光线入射示意图

Fig. 8 Diagram of scanning laser incidence of the improved scanner

2.2 点云投影模型

由于扫描仪采用线扫描模式进行数据采集,点云模型是由无数扫描断面拼接而成,因此当扫描断面不垂直于隧道中线时,扫描断面为图 9 中的虚线椭圆,而非隧道真实结构。欲得到隧道真实点云模型,需要对实测断面进行等角兰勃特投影。改进扫描仪后,隧道扫描断面的等角兰勃特投影断面如图 9 所示。由于刚性倾斜组件的倾斜角度是预先设定的,故可根据已知倾斜角度对扫描断面进行投影。

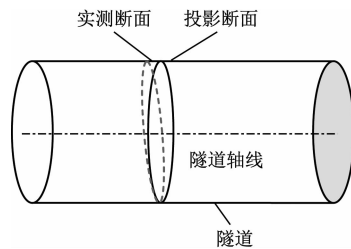


图 9 等角兰勃特投影断面

Fig. 9 Profile of isometric Lambert projection

2.3 降噪效果

为了验证加装刚性倾斜组件后的扫描仪检测精度提升效果,采用无倾斜组件的扫描仪和有倾斜组件的扫描仪,分别对同一区域进行扫描,并对采集数据进行处理和比较。加刚性倾斜组件后得到的投影断面如图 10 所示。对比图 5 和图 10 可见,增加倾斜组件,可有效降低因激光脚点垂直入射接触网发生散射和漫反射而产生的毛刺等噪点,进而提高导高检测精度。

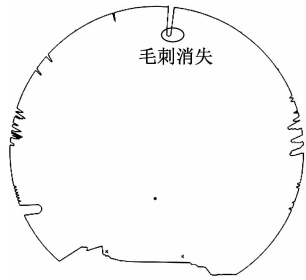


图 10 加刚性倾斜组件时的投影断面

Fig. 10 Projected profile of adding rigid tilting component

3 降噪后扫描仪的检测精度验证

为了验证加装刚性倾斜组件后的扫描仪检测精度,本研究分别使用导高仪和扫描仪测量,采用导高仪对改进后扫描仪的导高检测结果进行验证,将同一位置处的导高进行对比。

3.1 验证步骤

为验证检测结果的准确性,本测试采用固定点测量,保证导高仪和扫描仪严格测量同一位置处的导高值和拉出值。

验证的具体步骤如下:

步骤 1 选取测量位置。测量位置应选在地质情况比较好的区间内,以避免在详测时因工程地质问题发生较大变动。以每 10 环确定一个测量位置,并用石笔标记。

步骤 2 现场记录。推动导高仪,按照步骤 1 选取的测量位置,采用外业记录表记录测量位置里程;推动扫描仪到测量位置,测量导高和拉出值,并用外业记录表记录相应测量位置处的里程、环号、导高、拉出值。

步骤 3 内业处理。利用 Amberg Rail 内业处理软件提取导高仪测量位置对应断面,并将断面导入 CAD 软件中,利用量距功能量取接触网导高和拉出值,与扫描仪的测量数据进行对比。

3.2 导高检测结果

3.2.1 检测结果对比

检测精度验证共选取 69 个检测断面(第 1 环—第 680 环)的导高和拉出值进行对比测量。不同设备的导高检测结果对比如表 2 所示。

表 2 不同设备的导高检测结果

Tab. 2 Height inspection results of different devices

里程	环号	不同设备的导高测量值/m		导高差 Δ/mm	里程	环号	不同设备的导高测量值/m		导高差 Δ/mm
		导高仪	扫描仪				导高仪	扫描仪	
K4 433.689 9	680	4.050 2	4.050	0.2	K4 855.058 0	330	4.042 2	4.041	1.2
K4 445.731 7	670	4.045 4	4.044	1.4	K4 867.304 4	320	4.050 6	4.054	-3.4
K4 456.556 5	661	4.046 9	4.045	1.9	K4 879.157 1	310	4.045 3	4.044	1.3
K4 470.179 3	650	4.048 9	4.047	1.9	K4 891.226 2	300	4.049 7	4.048	1.7
K4 481.807 9	640	4.047 2	4.048	-0.8	K4 903.202 5	290	4.049 2	4.049	0.2
K4 492.710 6	631	4.049 4	4.048	1.4	K4 914.038 5	281	4.048 8	4.047	1.8
K4 505.882 8	620	4.049 5	4.049	0.5	K4 927.314 4	270	4.048 7	4.049	-0.3
K4 517.913 7	610	4.044 9	4.046	-1.1	K4 939.330 5	260	4.048 6	4.051	-2.4
K4 528.791 5	601	4.050 8	4.051	-0.2	K4 951.333 4	250	4.049 2	4.050	-0.8
K4 524.051 9	590	4.050 0	4.049	1.0	K4 963.423 0	240	4.050 5	4.051	-0.5
K4 554.052 3	580	4.047 6	4.048	-0.4	K4 975.439 9	230	4.049 0	4.050	-1.0
K4 566.052 9	570	4.050 6	4.050	0.6	K4 987.499 1	220	4.049 2	4.052	-2.8
K4 578.152 2	560	4.050 2	4.052	-1.8	K4 999.576 9	210	4.046 7	4.046	0.7
K4 590.508 6	550	4.049 6	4.051	-1.4	K5 011.526 4	200	4.048 7	4.049	-0.3

表 2(续)
Tab.2 (Cont.)

里程	环号	不同设备的导高测量值/m		导高差 Δ/mm		里程	环号	不同设备的导高测量值/m		导高差 Δ/mm
		导高仪	扫描仪					导高仪	扫描仪	
K4 602.250 5	540	4.050 8	4.051	-0.2		K5 023.658 1	190	4.049 0	4.050	-1.0
K4 614.264 5	530	4.051 2	4.051	0.2		K5 035.653 4	180	4.044 7	4.047	-2.3
K4 626.252 2	520	4.050 1	4.052	-1.9		K5 047.706 7	170	4.046 4	4.046	0.4
K4 638.341 9	510	4.051 3	4.053	-1.7		K5 059.760 0	160	4.047 0	4.047	0
K4 650.700 7	500	4.049 2	4.051	-1.8		K5 071.752 7	150	4.045 6	4.045	0.6
K4 662.359 1	490	4.051 9	4.051	0.9		K5 083.763 3	140	4.045 6	4.042	3.6
K4 673.263 8	481	4.048 2	4.051	-2.8		K5 095.895 5	130	4.042 7	4.042	0.7
K4 686.480 5	470	4.049 4	4.049	0.4		K5 107.844 4	120	4.046 6	4.048	-1.4
K4 698.575 4	460	4.045 6	4.046	-0.4		K5 119.874 6	110	4.040 9	4.038	2.9
K4 710.894 7	450	4.051 6	4.052	-0.4		K5 131.922 8	100	4.047 6	4.049	-1.4
K4 722.547 7	440	4.045 6	4.047	-1.4		K5 143.998 7	90	4.046 1	4.046	0.1
K4 734.675 7	430	4.050 7	4.053	-2.3		K5 156.072 4	80	4.047 7	4.043	3.7
K4 746.694 0	420	4.044 6	4.044	0.6		K5 168.073 5	70	4.044 2	4.046	-1.8
K4 758.684 4	410	4.051 1	4.052	-0.9		K5 180.130 9	60	4.045 8	4.045	0.8
K4 770.733 3	400	4.049 4	4.052	-2.6		K5 192.170 1	50	4.043 9	4.041	2.9
K4 782.838 3	390	4.051 6	4.049	2.6		K5 204.163 4	40	4.046 5	4.048	-1.5
K4 794.888 6	380	4.048 8	4.047	1.8		K5 216.169 3	30	4.046 4	4.047	-0.6
K4 806.872 1	370	4.049 8	4.051	-1.2		K5 225.823 1	22	4.047 1	4.045	2.1
K4 818.894 6	360	4.051 7	4.052	-0.3		K5 240.249 7	10	4.041 1	4.042	-0.9
K4 830.996 2	350	4.048 7	4.047	1.7		K5 251.129 5	1	4.049 6	4.048	1.6
K4 842.982 0	340	4.046 9	4.048	-1.1						

注:导高差=导高仪的导高测量值-扫描仪的导高测量值。

3.2.2 数据统计分析

由表 2 数据可得导高差 Δ 的统计结果,如表 3 所示。

表 3 Δ 的统计结果 Tab.3 Statistical results of height difference		
Δ /mm	数量/个	占比/%
0 ~ <2	56	81.20
2 ~ <3	10	14.50
3 ~ <4	3	4.30

由表 3 可见,扫描仪的导高检测精度基本在 ±3 mm 以内。根据 GB 50299—2018《地下铁道工程施工及验收标准》,地面导高允许偏差为 ±30 mm,隧道内导高允许偏差为 ±10 mm。对比表 1 和表 3 可见,改进后的扫描仪导高检测精度有所提高,已满足相关要求。

4 结语

本文基于移动扫描仪技术提出了地铁隧道接触网导高检测的新方法,并分析了误差来源;通过增加刚性倾斜组件来改变扫描仪激光线入射角度,进而减少扫描断面毛刺数量,并采用等角兰勃特投影来获取隧道真实点云模型。与导高仪的测量对比结果表明,改进后的扫描仪精度基本为 ±3 mm,满足相关规范要求,为实现快速、高精度、不接触、无盲区的地铁隧道导高检测提供了保障。

参考文献

[1] 彭朝勇,王黎,高晓蓉,等. 接触网导线高度动态检测系统[J]. 光电工程,2004, 31(增刊1): 91.
PENG Chaoyong, WANG Li, GAO Xiaorong, et al. Dynamic detection for the height of contact wire[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(S1): 91.

(下转第 209 页)

行车调度人员发布全线列车在相关车站不停站通过的命令后,司机及相关车站工作人员应做好乘客引导工作,及时引导乘客通过换乘来绕行故障点到达目的地。

3 线网行车组织的调整与配合

在城市轨道交通线网中,一旦某条地铁运营线路发生接触网塌网事故,则势必会影响整个线网的乘客服务质量。此时,线网控制中心需通过 PIS(乘客信息系统)发布相关信息并播放车站广播,引导乘客通过线路换乘来抵达目的地。邻线应根据客流情况及时组织加开列车上线,以缓解客流压力。

4 结语

目前,我国地铁应对接触网塌网抢修的方案基本采用传统的行车组织,一般需要 3~6 h^[1-2],耗时较长,对运营秩序影响较大。因此,本次对接触网塌网应急处理的研究应突破传统做法,大胆创新。一是在针对接触网塌网行车组织应急研究,如:利用动力学原理及借鉴国铁机车过相邻两个供电段的分相绝缘处(中性处),降下受电弓运行做法,维持接触网塌网不中断运行,待运营结束后再组织接触网恢复抢修。二是研究接触网塌网各专业联动应急预案,力求将刚性接触网塌网应急处理整体时间缩短 1 h 内甚至更短。

参考文献

[1] 唐刚,刘川容. 重庆单轨交通车体接地故障研究及处置策略[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 215.

(上接第 205 页)

[2] 于杰. 电气化铁路接触线定位点抬升量在线监测系统[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
YU Jie. The registration point uplift monitoring system of the contact wire in electrified railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

· 收稿日期:2020-11-05 修回日期:2023-10-20 出版日期:2024-01-10

TANG Gang, LIU Chuanrong. Chongqing monorail transit carbody grounding fault and treatment strategies[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(7): 215.

[2] 卫妍,潘彩霞,周爱萍. 地铁接触网失电故障下运营交路设计及调整[J]. 无线互联科技, 2023, 20(13): 165.
WEI Yan, PAN Caixia, ZHOU Aiping. Design and adjustment of operation routing under the power loss of catenary in subway[J]. Wireless Internet Technology, 2023, 20(13): 165.

[3] 魏光华. 电气化铁路接触网故障原因及其防护措施分析[J]. 科技与创新, 2021(5): 161.
WEI Guanghua. Cause analysis of catenary fault in electrified railway and its protective measures[J]. Science and Technology & Innovation, 2021(5): 161.

[4] 冯志亮. 地铁供电系统中刚性接触网故障及防范[J]. 工程建设与设计, 2020(8): 86.
FENG Zhiliang. Failure and prevention of rigid catenary in metro power supply system[J]. Construction & Design for Engineering, 2020(8): 86.

[5] 张格学. 地铁供电故障的调度应急指挥[J]. 现代城市轨道交通, 2017(6): 46.
ZHANG Gexue. Dispatching emergency command under metro power supply failure[J]. Modern Urban Transit, 2017(6): 46.

[6] 栾文波. 提高行车调度员应急处置能力的对策[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(7): 66.
LUAN Wenbo. Improving the disposal capability of traffic dispatching in emergency[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(7): 66.

· 收稿日期:2021-06-29 修回日期:2021-08-23 出版日期:2024-01-10
Received:2021-06-29 Revised:2021-08-23 Published:2024-01-10
· 通信作者:彭章硕,高级工程师, szmc271@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

Received:2020-11-05 Revised:2023-10-20 Published:2024-01-10
· 第一作者:卢建军,高级工程师, Email: lu_jj@ecidi.com
通信作者:鲍艳,副教授, Email: baoy@bjut.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站
www. umt 1998. tongji. edu. cn