

城市轨道交通接触轨质量指数评价方法研究^{*}

马德强¹ 冯超² 靳守杰¹ 刘兰¹

(1. 广州地铁集团有限公司, 510335, 广州; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 工程师)

摘 要 针对现有的接触轨不平顺检测不能有效地利用接触轨检测数据对接触轨线路质量进行评价分析提出了接触轨质量指数(CRQI)及其评价方法,对接触轨不平顺分段进行管理。利用接触轨检测车在广州地铁4号线金洲站—黄村站上行区间的检测数据,分别统计其CRQI,以及CRQI中方向不平顺和高低不平顺的频数分布和累计分布,计算方向不平顺和高低不平顺在CRQI中的权重,并分别探讨CRQI,以及CRQI中方向不平顺和高低不平顺管理值。

关键词 城市轨道交通; 接触轨检测; 接触轨质量指数

中图分类号 U225 TM922.6 : U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.025

Quality Index Evaluation Method of Urban Rail Transit Contact Rail

MA Deqiang, Feng Chao, JIN Shoujie, LIU Lan

Abstract In view of the irregular detection of the existing contact rail which can not effectively use the contact rail test data to evaluate the quality of the contact rail road, a conductor rail quality index (CRQI) and its evaluation method are presented for the section management of the conductor rail irregularities. By the detection data of uplink interval from Jinzhou Station to Huangcun Station on Guangzhou metro Line 4 by the conductor rail inspection van, the CRQI, the frequency and accumulation distribution of horizontal and vertical irregularities in CRQI are calculated separately. The weight coefficient of each kind of irregularity in the proportion of CRQI is computed to explore the management value of CRQI and each irregularity in CRQI respectively.

Key words urban rail transit; conductor rail inspection; conductor rail quality index

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

广州地铁4号线在国内率先采用DC 1 500 V 钢铝复合型接触轨下部授流方式。该方式具有工作稳定、可靠、少维护等优点^[1-2], 现已逐步在国内其

他城市地铁线路中推广。然而,随着4号线运营年限的增加,该授流方式逐渐暴露出接触轨授流面及碳滑板不均匀磨损、集电靴与接触轨离线拉弧、碳滑板棱边崩缺、碳滑板更换周期短等问题。国外研究表明,接触轨不平顺是造成上述问题的关键原因。

接触轨的平顺性是评价接触轨系统授流质量和接触轨系统稳定性的重要指标^[3]。国外研究侧重集电靴与接触轨动态特性,采用接触式检测方式,在接触轨检测车中安装检测集电靴,检测不同速度下集电靴的授流臂与集电靴安装底座纵向位移变化量、集电靴与接触轨接触压力变化量,用以计算集电靴授流臂力矩大小,并着重分析接触压力、集电靴授流臂力矩与接触轨的不平顺关系^[3-4]。

广州地铁4号线接触轨检测车采用非接触式检测方式。通过激光摄像检测方法,在国内首次实现了下部授流方式钢铝复合型接触轨几何参数连续动态检测,检测参数包括接触轨轨偏值(接触轨中轴线与左、右走行轨轨顶连线中垂线的距离)、接触轨轨高(接触轨授流面与走行轨轨顶连线平面的垂直距离)。其检测原理如图1所示。1[#]、2[#]、3[#]、4[#]为激光摄像式传感器,由高速摄像机及垂直于钢轨或接触轨的扇形激光切面构成。4个传感器均安装于同一检测梁上,检测梁与车体焊接固定。这种检测梁车体式安装克服了轴箱或构架式安装振动冲击过大的缺陷,既改善了系统工作环境,又提高了系统稳定性。其中:1[#]、2[#]用于测量车体参考坐标系(O_0, x_0, y_0, z_0)与轨道参考坐标系(O_w, x_w, y_w, z_w)的实时偏移;3[#]、4[#]用于测量左、右侧接触轨相对于车体参考系的偏移。综合这些数据,可精确测量出接触轨的轨偏值和轨高。4号线接触轨检测车于2011年10月研制成功并运行至今,其精度已得到了系统验证:检测速度不高于80 km/h,直线区段接触轨几何参数测量误差为 ± 2 mm,曲线区段测量误差为 ± 3 mm。

^{*} 广州市科技计划项目(201704030048)

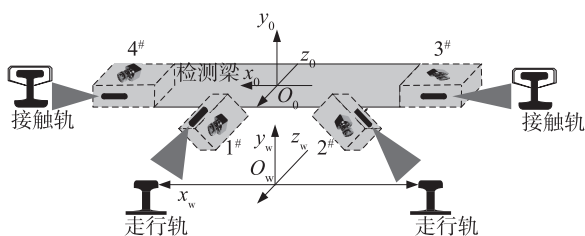


图1 接触轨检测车检测原理示意图

1 接触轨质量指数计算方法的确定

目前,国内对于接触轨不平顺管理的方法及其相关研究尚未见述及,也未建立相关的管理标准。因此,亟待系统地提出接触轨不平顺的计算方法,建立接触轨不平顺管理值和标准,科学评判接触轨不平顺,为地铁供电部门合理制定接触轨维修计划提供数据参考,确保接触轨系统稳定运行。

在综合国外轨道不平顺评价方法的基础上,国内大量学者对轨道不平顺进行了深入研究,提出了轨道质量指数(TQI)概念,并运用TQI对轨道不平顺进行管理。通过多年实际应用,收效明显^[5]。接触轨沿着轨道平行铺设,接触轨与轨道具有相似特性,接触轨不平顺与轨道不平顺随之也具有相似性。因此,基于TQI的轨道不平顺评价方法对接触轨不平顺状态评价具有借鉴作用。

一个理想的接触轨不平顺状态评价方法应该包括以下特征:①能够真实反映接触轨质量状态,用数值明确表示各个区段接触轨的好坏;②能够为地铁供电人员编制接触轨维修作业计划提供数据参考;③用于计算接触轨质量指数的接触轨原始测量数据准确,容易采集;④接触轨质量指数与接触轨质量状态对应关系明确,概念清晰,容易被掌握。

接触轨轨偏值变化情况可用以反映接触轨方向的不平顺,接触轨轨高变化情况可用以反映接触轨高低的不平顺。因此,采用广州地铁4号线接触轨检测车检测数据,运用合适的计算方法,能够综合反映接触轨不平顺状态。

采用峰值的管理方法对接触轨不平顺进行管理,会损失大量非超限数据信息,不能准确反映区段整体不平顺状态,无法对线路进行均衡评价。因而,该评价方法具有一定局限性,主要适用于对接触轨的紧急修补^[5-7]。

经过系统研究,针对广州地铁4号线接触轨检测车检测数据的特点,提出了一种基于单元区段标准差的接触轨质量指数(简称CRQI,其量符号为 I_{CRQ})

评价方法。其计算步骤如下:①以200 m作为单元区段进行计算;②每0.25 m取1组接触轨检测数据,共计800组数据;③分别统计这800组接触轨轨偏值和轨高标准差;④将200 m距离接触轨轨偏值和轨高标准差的和作为CRQI的输出。计算公式如下:

$$I_{CRQ} = \sum_{i=1}^2 \sigma_i \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \bar{x}_i^2} \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

式中:

I_{CRQ} ——接触轨质量指数;

σ_i ——单元区段单项标准差;

\bar{x}_i ——单元区段单项均值;

x_{ij} ——单元区段单项不平顺幅值。

计算时取 $i=1,2; j=1,2,\dots,800$ 。该评价方法满足了上述的4项基本特征,能够弥补接触轨峰值管理存在的不足。

2 试验数据分析

2.1 试验数据及CRQI计算

按照广州地铁的企业技术规范,标准接触轨轨偏值、轨高分别为 $1\,510 \pm 5\text{ mm}$ 、 $200 \pm 5\text{ mm}$ ^[8]。本文以广州地铁4号线为案例,采用接触轨检测车,对金洲站—黄村站上行区间全线接触轨几何参数进行动态检测。检测区间公里标为54.8~8.8 km,合计46 km的检测数据。全线最高检测速度达到75 km/h,最低检测速度为32 km/h,均速在60 km/h左右。

在主电分段、道岔及车站换边处,接触轨设置了断轨,采用自然断开方式。在断轨处,接触轨端部均设有端部弯头。端部弯头属于接触轨特殊设备,接触轨轨高根据需求,在端部弯头处有1/30或1/40坡度的动态抬升量。因而,在进行接触轨 I_{CRQ} 值计算时,需去除端部弯头接触轨动态抬升的几何参数数据。接触轨断口导致连续检测数据不足200 m区段,按不足200 m的数据计算 I_{CRQ} ;当连续检测数据不足50 m区段,则不计算该区段的 I_{CRQ} 。

接触轨检测车每0.25 m输出1组接触轨几何参数检测数据,46 km共计输出184 000组检测数据。连续检测数据曲线如图2所示。

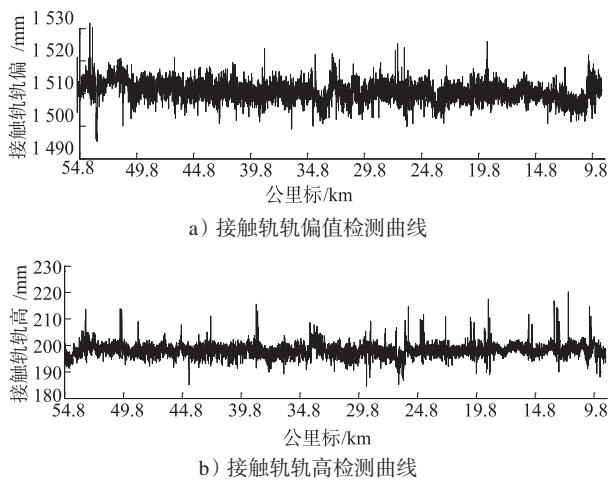
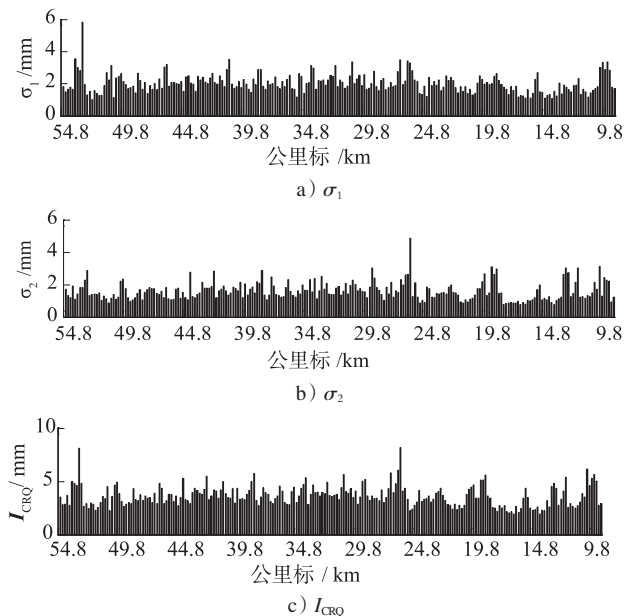


图2 接触轨几何参数检测曲线

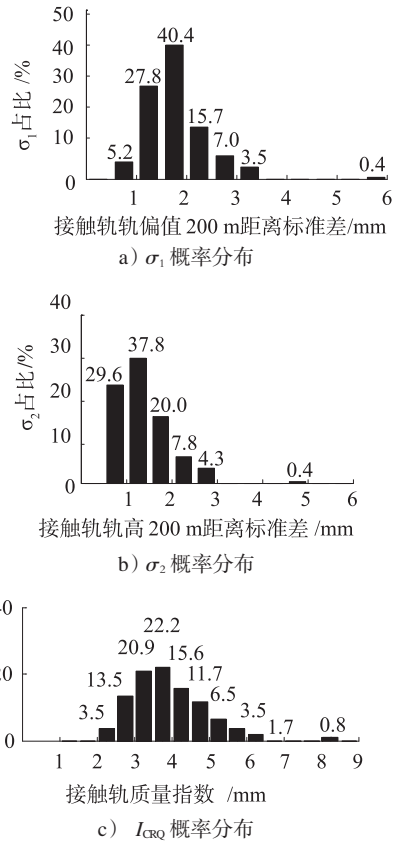
以 200 m 为 1 个单元区段, 每隔 200 m 计算 1 次接触轨轨偏值和轨高标准差。设 200 m 接触轨轨偏值和轨高标准差分别为 σ_1 、 σ_2 , 则 46 km 共有 230 组接触轨标准差计算数据, 计算结果如图 3。由图 3 a) 可知, 除公里标为 54.8 ~ 49.8 km 区间出现 $\sigma_1=5.8$ mm 外, 其余数据分布在 0.5 ~ 3.5 mm 区间; 由图 3 b) 可知, 除公里标 29.8 ~ 24.8 km 处出现 $\sigma_2=4.9$ mm 外, 其余数据分布在 0.5 ~ 3.0 mm 之间; 由图 3 c) 可知, 公里标 54.8 ~ 49.8 km 处出现 1 次 I_{CRQ} 为 8.12 mm, 公里标 29.8 ~ 24.8 km 处出现 1 次 I_{CRQ} 为 8.16 mm, 其余 I_{CRQ} 值分布在 2.0 ~ 6.5 mm 之间。

图3 接触轨轨高、轨偏值 200 m 标准差及 I_{CRQ} 统计

2.2 概率分布统计直方图

为获取 I_{CRQ} 、 σ_1 、 σ_2 的频数分布特性, 分别统计图

3 的接触轨 σ_1 、 σ_2 以及 I_{CRQ} 值在每隔 0.5 mm 区间出现的概率。各自频率百分比直方图统计结果如图 4。

图4 σ_1 、 σ_2 、 I_{CRQ} 概率分布

由图 4 a) 可以看出, σ_1 分布于 1.5 ~ 2.0 mm 区间最多(占 40.4%), 1.0 ~ 2.5 mm 区间所占的比例合计 83.9%; 由图 4 b) 可以看出, σ_2 分布于 1.0 ~ 1.5 mm 区间最多(占 37.8%), 0.5 ~ 2.0 mm 区间所占的比例为 87.4%; 由图 4 c) 可以看出, I_{CRQ} 分布较 σ_1 、 σ_2 分布更为均散, 动态分布范围更宽。 I_{CRQ} 分布于 3.5 ~ 4.0 mm 区间最多(占 22.2%), 2.5 ~ 4.5 mm 区间所占的比例较大, 合计占 83.9%。

2.3 接触轨轨偏值和轨高不平顺权重及累计分布

I_{CRQ} 中包含了接触轨方向不平顺和高低不平顺, 为区分连续区段中 σ_1 、 σ_2 对 I_{CRQ} 的影响, 分别引入接触轨轨偏值不平顺权重 η_1 和接触轨轨高不平顺权重 η_2 两个参数。对于 n 组 I_{CRQ} 检测数据, 定义 η_1 、 η_2 如式(4):

$$\begin{cases} \eta_1 = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{1,i} \right) / \left(\sum_{i=1}^n I_{CRQ,i} \right) \\ \eta_2 = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{2,i} \right) / \left(\sum_{i=1}^n I_{CRQ,i} \right) \end{cases} \quad (4)$$

将金洲站—黄村站上行 46 km 共 230 单元区段的 I_{CRQ} 、 σ_1 和 σ_2 代入式(4),得到 η_1 和 η_2 的统计结果分别为 55.76%、44.24%。不平顺权重值越低,则接触轨平顺性越好。比较 η_1 和 η_2 可知接触轨轨高平顺性较轨偏值平顺性好。地铁供电部门应根据此统计结果,对权重较高的不平顺进行重点维护。

对单项 σ_1 、 σ_2 的累积分布进行统计。累计分布增长速度越快,表明其在较小值区段分布比重越大,则平顺性越好。通过比较表 1 中 σ_1 、 σ_2 累计分布差值可知,接触轨轨高 σ_2 累计分布较接触轨轨偏值 σ_1 累计分布增长速度快。由此可判断,接触轨轨高平顺性较接触轨轨偏值平顺性好,这与采用接触轨轨高和轨偏值不平顺权重分析所得的结论一致。

表 1 σ_1 和 σ_2 累计分布差值

σ_i/mm	σ_1 累计分布/%	σ_2 累计分布/%	σ_1 与 σ_2 的差值/%
<1.0	5.2	29.6	24.4
<1.5	33.0	67.4	34.4
<2.0	73.4	87.4	14.0
<2.5	89.1	95.2	6.1
<3.0	96.1	99.6	3.4
<3.5	99.6	99.6	0
<4.0	99.6	99.6	0
<4.5	99.6	99.6	0
<5.5	99.6	100.0	0.4
<6.0	100.0	100.0	0

由表 1 可知:若将 200 m 接触轨方向不平顺标准差 σ_1 的管理值设为 3 mm,则小于管理值的 σ_1 个数占总 σ_1 个数的 96.1%;若将 200 m 接触轨高低不平顺标准差 σ_2 的管理值设为 2.5 mm,则小于管理值的 σ_2 个数占总 σ_2 个数的 95.2%。

2.4 接触轨质量指数 I_{CRQ} 管理值

I_{CRQ} 表示接触轨轨偏值及轨高对平均值的离散程度, I_{CRQ} 值越低,接触轨平顺性越好。金洲站—黄村站上行区间 46 km 的 I_{CRQ} 累计分布见表 2 和表 3。

表 2 I_{CRQ} 小于区间累计分布

I_{CRQ}/mm	<2.0	<2.5	<3.0	<3.5	<4.0	<4.5	<5.0	<5.5	... <8.5
累计分布/%	0	3.5	17.0	37.9	60.1	75.7	87.4	93.9	100

表 3 I_{CRQ} 大于区间累计分布

I_{CRQ}/mm	≥ 2.0	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	≥ 4.0	≥ 4.5	... ≥ 8.0	≥ 8.5
累计分布/%	100	96.5	83	62.1	39.9	24.3	... 0.1	0

由表 2 可知,若将 I_{CRQ} 管理值设为 5.5,则小于管理值的 I_{CRQ} 个数占总 I_{CRQ} 个数的 93.9%;由表 3 可知,大于等于 2.5 mm 的 I_{CRQ} 个数占总 I_{CRQ} 个数的

96.5%。

分析结果表明:接触轨高低不平顺占 I_{CRQ} 权重小于接触轨方向不平顺占 I_{CRQ} 权重,接触轨高低平顺性优于方向平顺性;若将 I_{CRQ} 管理值、 I_{CRQ} 方向不平顺和高低不平顺管理值分别设为 5.5 mm、3 mm 和 2.5 mm,则能保证 90%以上统计数据处于各自管理值以内。

3 结语

本文提出的城市轨道交通接触轨质量指数评价方法,对综合评价接触轨整体质量、合理编制接触轨线路的综合维修计划,以及提高接触轨状态维修的科学性、经济性、合理性,具有重要意义。然而,由于接触轨检测与管理方面的研究还处于起步阶段,参与 I_{CRQ} 及各项不平顺管理值计算的样本数据有限,研究得到的管理值需要日后累计更多的检测数据给以不断验证和完善。

参考文献

- [1] HARTLAND D. Electric contact systems-passing power to the trains [C]//Railway Electrification Infrastructure and Systems. London: IET Conference Publication, 2009: 70.
- [2] CONSTANT ME, SC B, A.M.C.E., et al. Conductor-Rail Installation and Maintenance, and Collector Shoe-gear [J]. Proceeding of the IEE-Part IA: Electric Railway Traction, 1950, 97 (1): 123.
- [3] STEWART E, WESTON P, ROBERTS C. Using bogie-mounted sensors to understand the dynamics of third rail current collection systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225 (2): 219.
- [4] WESTON PF, STEWART E, ROBERTS C, et al. Measuring the Dynamic Interaction between Electric Vehicle Shoe-gear and the Third Rail [C]. //Railway Engineering-Challenges for Railway Transportation in Information Age. Hong Kong: IET Conference Publication, 2008: 1.
- [5] 魏世斌, 杨凤春, 翁绍德. 轨道质量指数的研究和应用 [J]. 中国铁道科学, 1996, 17(2): 23.
- [6] 许玉德, 周宇. 既有线路轨道质量指数的分布与不平顺权重系数统计分析 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 71.
- [7] 周正, 赵国堂. 轨道质量指数计算问题的探讨 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 65.
- [8] 广州地铁集团有限公司. 城市轨道交通接触轨系统技术规范(征求意见稿) [S]. 广州: 广州地铁集团有限公司, 2011.

(收稿日期: 2018-06-20)