

文章编号:1005-0523(2019)01-0012-06

有轨电车轨道病害现场调研与分析

黄大维¹,冯青松¹,罗信伟²,罗 锐¹,刘庆杰¹,孙 魁¹

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013;2. 广州地铁设计研究院有限公司,广东 广州 510010)

摘要:对国内运营3~4年的3个城市有轨电车线路现场调研发现,轨道主要病害包括:在平交道口位置,轨道周围沥青混凝土路面易发生开裂与破损,且路面与轨道易发生不均匀沉降;钢轨两侧的沥青混凝土路面易发生棱边破损;部分地段发生了轨面沉降而导致轴箱与底部结构物发生刚蹭;扣件罩顶部的路面易发生开裂与破坏;桥梁刚度过渡设置不合理易诱发扣件松动。对各种轨道病害的诱因进行分析,并提出相应的防治建议,如钢轨两侧采用预制型钢包边的钢筋混凝土板,在钢轨与预制混凝土板之间设置一定宽度的橡胶块;加强轨道与公路路面以及两种交通路基的匹配性设计。

关键词:有轨电车;轨道;病害;现场调研;路基

中图分类号:U216.3

文献标志码:A

现代有轨电车是在传统有轨电车的基础上全面升级改造的一种先进公共交通方式,具有中等运量、设计新颖、环境友好和资源节约等特点,能够良好地满足城市环境和社会可持续发展的基本要求^[1-2]。自有轨电车应用以来,已经得到世界各国和地区的广泛认可。截至目前,现代有轨电车已在欧洲约30个国家100多个城市和北美超过30个城市中运营,成为城市公共交通的主要形式之一。在日本等亚洲国家,现代有轨电车也得到广泛运用。然而,我国的现代有轨电车发展起步相对较晚,近几年来,国内不少城市已经开始积极规划和建设现代有轨电车系统,现代有轨电车以全新的面貌、舒适的服务迅速吸引了国内有关城市的关注。

现代有轨电车属于城市轨道交通范畴,与地铁和轻轨有较多相似之处,但同时又具备其自身独有的技术和运营特征。特别是现代有轨电车路权形式复杂、下部路基型式多样且车辆型式独特,故在设计、施工与养护维修等方面不能盲目地套用地铁与轻轨的设计标准^[3]。然而,由于我国现代有轨电车研究起步较晚等原因,目前新型轨道交通设计和修建并无统一标准,多参照国外应用情况或借鉴其他城市轨道交通方式^[4-5]。对于新理论与新技术,实践是检验其合理性的唯一标准,为此,对国内现已运营的现代有轨电车进行调研,并对出现的病害进行分析,进而针对性地提出参考建议,对已建有轨电车的维修及新建有轨电车的设计与施工具有重要的参考意义。

对国内3个城市的已运营3~4年的有轨电车轨道病害进行了现场调研,并对病害的诱因进行了定性分析,在此基础上提出现代有轨电车轨道设计建议。

1 国内有轨电车现状简介

截至2017年2月,国内共有大连、天津、上海、沈阳、长春、苏州、南京、广州、淮安、青岛10座城市开通运营了15条有轨电车线路,运营里程177.47 km,车站258座。我国现代有轨电车的建设与运营时间短,真正开始较大规模地建设钢轮钢轨的现代有轨电车是在2012年的沈阳浑南有轨电车开建之后。

然而,截止目前,国内有据可查的有轨电车设计规范并不多,如:《北京现代有轨电车技术标准》(暂未正式出版)、《成都现代有轨电车工程设计规范》(暂未正式出版)、中华人民共和国住房和城乡建设部发布的

收稿日期:2018-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608200,51368020)

作者简介:黄大维(1984—),男,讲师,博士,主要研究方向为铁道与岩土工程研究。

通讯作者:冯青松(1978—),男,教授,博士生导师,研究方向为线路工程系统动力学、铁路环境振动与噪声。

《城市有轨电车工程设计规范》(征求意见稿)、上海市住房和城乡建设管理委员会发布的《有轨电车工程设计规范》^[6]等,但这些标准或规范对有轨电车轨道与路基的设计并没有特别详细的相关规定,且更多的是参考与借鉴其他轨道交通的设计规范。如规范^[6]规定,埋入式轨道结构宜采用柔性材料包裹系统,包括轨腰柔性材料、轨底包裹材料及轨头密封材料,但并未说明包裹材料的几何参数、力学性能等。再如,前两本规范基本未涉及有轨电铁路基设计,而从后两本规范相关有轨电铁路基设计来看,更多的是借鉴高铁或地铁的相关设计参数,并未明显地考虑到现代有轨电车的轴重、最高设计速度、列车构造形式等相关特点对路基关键设计参数的影响;因此,国内不同城市的有轨电铁路基设计参数相差较大,从表 1 所示的已建及在建有轨电铁路基厚度即可看出。

表 1 有轨电车基床厚度
Tab.1 Thickness for subgrade bed of the tramway

项目	支承层厚度	基床表层厚度	基床底层厚度	基床厚度/mm
珠海有轨电车	0.2	0.4	0.5	1.1
佛山新型轨道交通	0.3	0.5	0.6	1.4
南京有轨电车	0.4	0.4	0.7	1.5
沈阳有轨电车	0.1	0.4	0.7	1.2
苏州有轨电车 1 号线	0.2	0.4	0.5	1.1
苏州有轨电车 2 号线	0.2	0.4	0.6	1.2
上海松江有轨电车	0.3	0.4	0.5	1.2
成都有轨电车	0.2	0.4	0.6	1.2

由以上可知,我国现已建成通车的现代有轨电车里程少,运营时间短,且暂无成熟的有轨电铁路基与轨道设计规范。可是我国现已大规模地开展现代有轨电车建设;因此,对已运营的有轨电车进行调研与分析,并针对性地提出的设计改进与完善建议,对促进我国现代有轨电车建设与发展具有重要意义。

2 有轨电车轨道病害调研与分析

2.1 轨道周围路面开裂

已运营的有轨电车在平交路口位置,轨道周围一定范围的沥青混凝土路面易发生开裂,甚至发生了沥青混凝土剥离,如图 1 所示。由于多方面条件不充分,在现场调研时并未对轨道的沉降与平顺性做量化测量。但在下雨时从路面的积水可以明显地看出,轨道出现了明显的不均匀沉降。

在平交路口位置,轨道周围的路基与路面同时承受有轨电车与汽车两种形式完全不同的荷载,其中有轨电车荷载为集中荷载作用在轨面上,而汽车荷载为均布荷载作用在路面或路面与轨面上。此外,为了使钢轨顶面与路面尽量平齐,在曲线地段易导致外轨超高设置不合理;因此,在平交路口位置,沥青混凝土路面应力非常复杂,尤其在有轨电车轨道板与其两侧路面发生一定的不均匀沉降时,轨道周围的沥青混凝土路面的拉力与剪力均大幅度地增加,从而加速了沥青混凝土路面的开裂与破损。

在平交路口位置,路基作为支承有轨电铁路



图 1 轨道周围路面开裂与破损

Fig.1 Fracture and pavement breakage beside the tramway

道与公路路面的基础,但是,两种交通对路基的结构设计参数、压实质量的要求均不同^[6-7],且两种交通荷载对路基的影响也不同;因此,在平交路口位置易发生不均匀沉降。此外,在平交路口位置,路基同时承受汽车与有轨电车两种交通荷载的作用,荷载循环次数远大于一般地段,对应的路基土体的循环累积变形也较大,设计时也不容忽视。

2.2 钢轨两侧路面棱边破损

有轨电车钢轨两侧的沥青混凝土路面棱边易发生破损,尤其在以下3种情况下更容易发生:①钢轨两侧未设置橡胶包裹材料(如图2所示);②钢轨两侧的橡胶包裹材料破损(如图3所示);③钢轨两侧的橡胶包裹材料脱落。

有轨电车钢轨在列车车轮的集中荷载作用下,沉降变形、横向位移及振动影响较大。当在钢轨与沥青混凝土路面之间未设置橡胶包裹材料时,在钢轨发生一定的横向位移状态下,直接受到两侧沥青混凝土的约束,从而产生较大的约束荷载。当约束荷载导致钢轨两侧的沥青混凝土内部应力超过其强度时,沥青混凝土将发生碎裂。在曲线地段,因列车离心力的作用,轮缘对钢轨产生水平向外的荷载,而水平向内的荷载可以忽略^[8];因此,类似的问题更容易发生在曲线地段外轨的外侧,如图2所示。

当钢轨两侧设置一定宽度的橡胶包裹材料时,因橡胶的弹性模量小,在钢轨发生一定的横向位移状态下,橡胶侧部的沥青混凝土产生的水平附加荷载相比无橡胶包裹材料要小得多;因此,钢轨横向位移对其两侧沥青混凝土破损作用也要小得多。但是,当钢轨两侧设置一定宽度的橡胶包裹材料时,橡胶侧部的沥青混凝土的侧部荷载小,在汽车轮载作用下,橡胶侧部的沥青混凝土因围压较小而更容易发生破损。此外,当橡胶包裹材料发生老化或硬化时易发生破坏(如图3所示),甚至脱落。此时在汽车轮载作用下橡胶侧部沥青混凝土路面极易发生棱边破损。从多个城市调研来看,钢轨两侧的橡胶包裹材料不一定均进行了设置,即使设置了,其结构形式、几何参数、力学参数等相差很大。由此可见,钢轨两侧的橡胶包裹材料设计还有较大的优化空间。

此外,在轨道周围沥青混凝土路面施工时,因钢轨以及钢轨两侧橡胶包裹材料的存在,影响沥青混凝土碾压施工质量,这也加速了沥青混凝土的破损;因此,有轨电车钢轨两侧的沥青混凝土路面施工工艺与质量保证措施还有待进一步完善。



图2 钢轨两侧未设置橡胶包裹材料

Fig.2 No rubber covering material at both sides of the rail

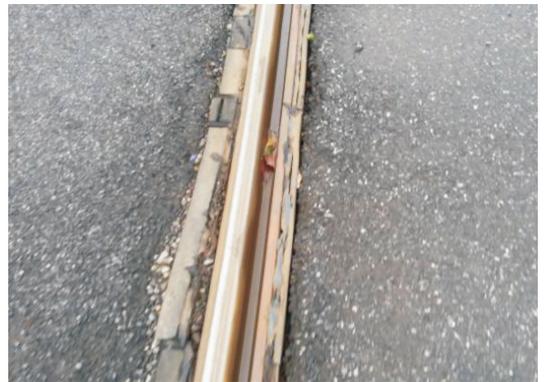


图3 钢轨两侧的橡胶包裹材料破损

Fig.3 Breakage of rubber covering material at both sides of the rail

2.3 扣件顶部路面开裂

在平交道口位置,部分路段的扣件顶部路面出现了开裂,裂缝呈括弧形状;而有的扣件顶部路面发生了破损,沥青混凝土出现了脱落,如图4所示。

扣件顶部路面开裂或破损主要与扣件罩有关。扣件罩是设置在扣件顶部确保扣件正常弹性变形空间的构件,一般采用高分子塑料加工而成。扣件顶部路面出现开裂与破损有以下两种可能。

1) 在沥青混凝土路面施工时,高温作用下扣件罩的强度降低,压路机碾压荷载作用下扣件罩易发生破

坍塌陷,从而影响到扣件的弹性变形空间,列车荷载作用下,作用点两侧一定范围内的钢轨发生一定的翘曲变形,对应的扣件也发生向上的弹性变形,扣件直接作用在其顶部的沥青混凝土上,从而导致沥青混凝土路面开裂与破损。

2) 在完成沥青混凝土路面施工后扣件罩仍保持完好,但因扣件罩的刚度与变形特性与其周围的沥青混凝土完全不同,在汽车荷载作用下,扣件罩与沥青混凝土存在变形不协调问题,从而导致扣件罩周围的沥青混凝土产生较大的应力,加速了扣件罩周围沥青混凝土的开裂与破损。

由此可见,为了防止扣件罩顶部路面的开裂与破损,应对扣件罩的强度与刚度合理性做深入研究与分析,或采用其他形式的轨道结构或钢轨周围路面结构进行替代。

2.4 有轨电车轨面沉降

在非绿化区,部分地段的轨面发生了不同程度的沉降,导致转向架的轴箱与其底部的结构物产生刚蹭,如图 5 所示。在绿化区,因轨面沉降导致转向架的轴箱与其底部的种植土发生了刚蹭,如图 6 所示。此外,轨面沉降导致两侧的地面高于轨面,在雨水作用下易使泥土流入轨槽内。

钢轨受到集中荷载的作用,当轨垫板发生一定的压缩变形或轨枕发生一定的沉陷时,导致轨面发生沉降^[9],而在混行区与平交道口区域,设计道路顶面与轨面平齐,轨面沉降将导致路面高于轨面;因此,当钢轨两侧为沥青混凝土路面时,设计应使轨面与其两侧的路面发生同步沉降,防止转向架的轴箱与路面发生刚蹭。当轨道位于绿化区时,轨面应该高出绿化区地面一定高度,防止轨面沉降后转向架的轴箱与其侧部的地面发生刚蹭,同时防止雨水将泥土冲入轨槽内。



图 5 道路上的轨面沉降

Fig.5 Rail surface settlement in road area



图 6 绿化区轨面沉降

Fig.6 Rail surface settlement in green area

2.5 轨下基础刚度过渡设计不合理

某城市有轨电车有一座 U 型梁桥,桥两端为路基。桥上的钢轨直接固定在桥面板上,轨下有一定厚度的轨垫板调研时发现,桥梁两端(如图 7 所示)纵向上有 3~5 个扣件发生了松动,其扣压力大幅度减小,甚至完全失效。有轨电车通过路桥分界位置时引发的噪声明显增大。

钢轨直接固定在桥面板上,轨下基础刚度远大于轨道底部为路基状态的基础刚度^[10]。在列车通过刚度过渡段时,其振动影响加强;此处,因桥上的轨下基础刚度大,当列车荷载作用在桥端的路基上部轨道上时,钢轨在桥头上的翘曲导致扣件的附加扣压力较一般地段要大得多,由此加速了桥端扣件的松动与扣压力失



图 4 扣件顶部路面开裂与破损

Fig.4 Pavement cracking and breakage at the top of rail fastener

效。文献[6]规定,无砟道床与有砟道床间应设置弹性过渡段,其长度不宜短于全轴距,图7所示的工况符合不设置过渡段的条件,但是在桥面上直接铺设轨道,导致基底刚度差过大^[11];因此,轨道设计时应考虑轨下基础的刚度过渡。

3 有轨电车轨道优化设计建议

由以上关于有轨电车轨道病害的现场调研与分析可知,因设计不合理导致轨道出现了不同类型及不同程度的病害,所以有必要对有轨电车轨道及轨下基础的设计进一步完善。

1) 加强平交道口及混合路权状态下轨下基础设计,尽量使道路路面与轨面发生同步沉降。为了防止轨枕发生沉陷,应加强轨枕基础,如采用沥青混凝土轨枕基础^[12]。

2) 设计时建议绿化段轨面高程,高出周围地面 10~15 cm,以防止轨面沉降导致转向架的轴箱与钢轨周围的地面发生刚蹭,或钢轨两侧的泥砂冲入轨槽内。

3) 为防止钢轨周围路面发生开裂与破损,且方便钢轨与扣件更换,建议参照美国平交道口的设计^[12],即钢轨两侧采用预制型钢包边的钢筋混凝土板,在钢轨与预制混凝土板之间设置一定宽度的橡胶块,如图8所示;或在平交道口的钢轨两边直接采用橡胶板。

4) 因有轨电车轨道在很多情况下与公路共建(混合路权、非混合路权与公路平交道口均涉及),轨道结构与公路路面的匹配性设计以及两种交通的路基匹配性设计是有轨电车设计的关键之一。

5) 开展现代有轨电车轨路与路基相关研究,推进现代有轨电车的标准化设计与施工,并形成统一的标准与规范,为新建有轨电车轨道与路基设计提供参考。



图7 轨道基础刚度过渡段

Fig.7 Unreasonable tramway foundation stiffness transition



图8 美国铁路平交道口

Fig.8 American rail-highway crossing

4 结论

1) 在平交道口位置,轨道周围的沥青混凝土路面易发生开裂与破损,且路面与轨道易发生不均匀沉降。在有轨电车轨道与公路共建(混合路权、非混合路权与公路平交道口均涉及)时,应该重点关注轨道结构与公路路面的匹配性设计,以及两种交通的路基匹配性设计。

2) 在钢轨侧部未设置橡胶包裹材料的状态下,钢轨发生横向位移易导致其两侧的沥青混凝土路面发生棱边破损,尤其在曲线地段,外轨的外侧沥青混凝土路面更易发生路面破损。当钢轨两侧设置的橡胶包裹材料的质量或施工质量不良时,也易导致其侧部沥青混凝土路面发生棱边破损。

3) 扣件罩顶部路面易发生开裂与破坏,主要包括以下两方面原因:一是沥青混凝土路面施工时扣件罩易发生塌陷破损,从而影响到扣件的弹性变形空间;二是因扣件罩与沥青混凝土存在变形不协调,汽车荷载作用导致扣件罩周围的沥青混凝土产生较大的附加应力。

4) 当轨面发生沉降时,易导致转向架轴箱与其底部的结构物或绿化段的种植土发生刚蹭。建议加强平

交道口及混合路权状态下轨下基础设计,尽量使道路路面与轨面发生同步沉降;对于绿化段轨道,设计时建议轨面应高于两侧地面 10~15 cm。

5) 为防止钢轨周围的路面发生开裂与破损,且方便钢轨与扣件更换,建于道路上的有轨电车轨道(包括平交道口及混合路权时的轨道),建议参考图 8 所示平交道口设计方法,即钢轨两侧采用预制型钢包边的钢筋混凝土板,在钢轨与预制混凝土板之间设置一定宽度的橡胶块。

参考文献:

- [1] 杨阳,丁军君,李芾,等. 基于 RSM 模型及 NSGA-II 算法的低地板车辆曲线通过性能优化[J]. 铁道学报,2017,39(3):25-30.
- [2] 李佳杰,柏赞,邱宇,等. 现代有轨电车时刻表与操纵节能协同优化[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(7):1552-1558.
- [3] 北京市规划委员会. 地铁设计规范 GB 50157-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [4] 林红松,颜华. 有轨电车埋入式无砟轨道及关键部件型式研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(6):60-65.
- [5] 杨阳,李芾,张茂松,等. 槽型轨磨耗演变过程数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(8):1607-1612.
- [6] 上海市城市建设设计研究总院. 有轨电车设计规范 DG/TJ08-2213-2016[S]. 上海:同济大学出版社,2016.
- [7] 同济大学. 城市道路路基设计规范 CJJ 194-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [8] 丁军君,杨阳,李芾,等. 基于槽型轨的低地板有轨电车车轮磨耗及优化研究[J]. 铁道学报,2017,39(7):54-59.
- [9] 陈林,姚林泉. 不同无砟轨道类型对车辆动力学特性影响的数值分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(4):1-9.
- [10] 邹彦,刘扬,马晓云,等. 预制短板浮置板轨道减振特性研究[J]. 华东交通大学学报,2017,34(1):33-39.
- [11] 许玉德,刘一鸣,沈坚锋. 轨道不平顺预测随机模型的 SVM-MC 求解方法[J]. 华东交通大学学报,2017,34(7):54-59.
- [12] LIU QINGJIE, WANG TENG, REGINGALD SOULEYRETTE. A 3D evaluation method for rail-highway hump crossings[J]. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering,2017(32):124-137.

Site Investigation and Analysis of the Tramway Diseases

Huang Dawei¹, Feng Qingsong¹, Luo Xinwei², Luo Kun¹, Liu Qingjie¹, Sun Kui¹

(1. Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: Though the construction scale of tramcar transportation in China becomes larger and larger, the design of track and subgrade is at the exploratory stage. Tramways with 3-4 years' operations from three different cities in China were explored in this study. Site investigation showed that at rail-highway crossing, cracking and breakage for bituminous concrete pavement around track were easily generated, and differential settlement for pavement and track was easy to be seen. Edge damage for the pavement at the sides of the rail was also included. Settlement of rail surface in some sections resulted in scratch between the axle box and objects under the axle box. Cracking and breakage for highway pavement were generated at the top of fastener cover. Unreasonable tramway foundation stiffness transition caused the fastener loose. All the track disease inducements were analyzed and corresponding prevention and control suggestions were given, such as adding precast reinforced concrete plate wrapped with profile steel on both sides of the rail, setting the rubber block between the rail and concrete plate, matching design between tramway and pavement, and strengthening the subgrade for both tramway and highway.

Key words: tramcar; tramway; diseases; field investigation; subgrade