

轨道交通特大桥铺轨线形设计及其工程实践

段桂平 刘加华

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 针对先期施工预留轨道交通特大跨度公铁两用钢桁梁斜拉桥在荷载作用下变形较大,且与轨道交通设计线路纵断面线形不匹配的现状,根据梁面实测标高和桥梁设计变形,在既有线路设计纵断面基础上重新设计轨道施工时的纵断面即轨面控制标高。在满足限界、最小轨道设计高度等基本要求的同时,使新纵断面下的轨面线形及标高能够适应施工过程中、施工完成后和列车活载作用下的桥梁变形。目前工程已通车运营,现场轨道状态良好。

关键词 轨道交通; 特大桥; 铺轨线形; 轨道几何形位

中图分类号 U212.3; U215.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.009

Design and Engineering Practice of Track Laying Line of Rail Transit Extra-long-span Bridge

DUAN Guiping, LIU Jiahua

Abstract In view of the fact that the pre-construction reserved rail transit extra-long-span steel truss cable-stayed bridge has a large deformation under the load, and the deformation does not suit to the rail transit designed line longitudinal section profile, according to the actual measured elevation of the bridge surface and the designed deformation of the bridge, the track laying line is redesigned on the basis of the designed longitudinal section profile of the existing line. While satisfying the basic requirements of limit and minimum track design height, the track profile and elevation under the new longitudinal section can adapt to the bridge deformation during construction, after completion of construction and under the action of train live load. Currently, the project has started operation and the track geometry is in good status.

Key words rail transit; extra-long-span bridge; line of track laying; track geometry

Author's address Technology Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

轨道交通桥梁主体结构施工完成后,受二期恒载(轨道、触网及立柱、声屏障、电缆沟槽、线缆及支架等)和车辆活载等影响会产生一定的变形,相应

地会带动固结其上的轨道结构一起变形。对于一般简支梁或跨度较小的连续梁,上述变形较小,不足以引起大的轨道不平顺,铺轨时一般不予考虑;但对于变形较大的大跨度或其他特殊桥梁,轨道铺轨时必须考虑其影响,否则将引起较大的轨道几何不平顺。本文详述了上海轨道交通5号线南延伸项目闵浦二桥段铺轨线形的设计思路、施工实施过程及后续监测情况,供同类工程参考。

1 工程概况

1.1 桥梁

上海闵浦二桥位于黄浦江老闵行奉贤西渡区段,是连接老闵行和奉贤的地方客运专用通道。主桥全长436.65 m,上层为公路双向4车道,下层为双线轨道交通,设计活载为公路-I级荷载和两车道轨道交通荷载。大桥双层桥梁主体结构同步施工完成,上层公路于2010年5月建成通车;下层预留轨道交通5号线南延伸,除桥梁主体结构外其他均未实施。2014年6月,上海地铁5号线南延伸工程开工建设。

大桥主桥采用独塔双索面连续钢桁梁斜拉桥,主桥跨度布置为38.25 m + 147 m + 251.4 m(见图1)。主梁除边跨为N型桁架外,主跨及次边跨均为三角桁架,上、下层桥面为正交异性钢桥面,桥面宽23.04 m(见图2)。

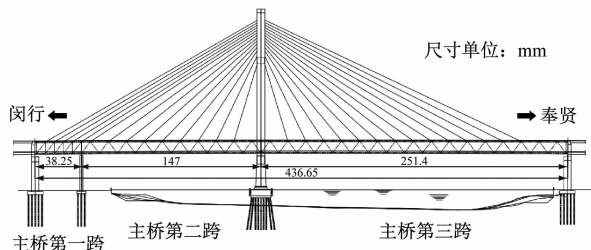


图1 闵浦二桥总体布置图

1.2 轨道

闵浦二桥下层5号线南延伸预留设计时,轨道结构按如下方案考虑:60 kg/m 钢轨,WJ-2 扣件,无

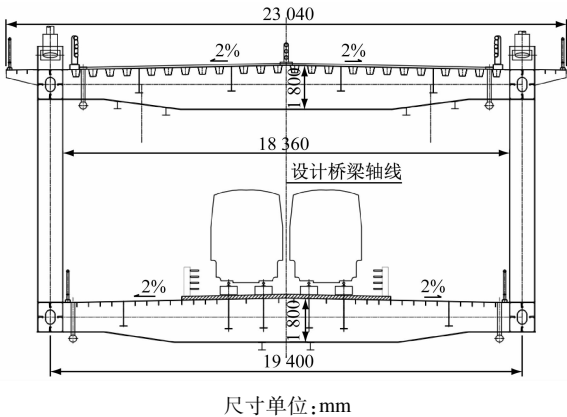


图 2 主桥桁梁标准横断面

缝线路,支承块承轨台整体道床,主桥两端大梁缝处设置钢轨伸缩调节器,设计轨道结构高度 500 mm。

5 号线南延伸实施时即施工图阶段,闵浦二桥

主桥段轨道设计方案为:60 kg/m 钢轨,无缝线路,主桥两端除大梁缝外采用钢弹簧浮置板整体道床配套 WJ-2A 扣件,中部采用减振扣件配套支承块承轨台整体道床,大梁缝处采用梁端伸缩装置和钢轨伸缩调节器。

2 桥梁预拱度设置与实测梁面标高

2.1 桥梁设计变形及预拱度

根据闵浦二桥桥梁设计计算资料,大桥主跨(跨度 251.4 m)在二期恒载(轨道结构、接触网立柱、电缆槽、声屏障等晚于桥梁施工的构筑物)作用下最大竖向变形为 123 mm,活载(运行的车辆)作用下最大变形为 104 mm(见表 1),桥梁结构施工时主桥梁面设置了活载预拱度,即梁面标高按照设计梁面标高叠加活载预拱度进行实施。

表 1 桥梁局部地段变形数据表

单位:m

上行线	下行线	铺轨后主梁产生的竖向位移	公路-Ⅰ级产生的竖向位移	轨交(2线)产生的竖向位移	1/2(公路-Ⅰ+轨交)竖向位移	原设计预留的活载预拱度
K2+743.400	K2+742.651	-0.087	-0.092 1	-0.059 5	-0.075 8	0.075 8
K2+758.100	K2+757.351	-0.101	-0.104 9	-0.068 8	-0.086 8	0.086 8
K2+772.800	K2+772.051	-0.112	-0.114 9	-0.076 2	-0.095 5	0.095 5
K2+787.500	K2+786.751	-0.119	-0.121 4	-0.081 2	-0.101 3	0.101 3
K2+802.200	K2+801.451	-0.123	-0.123 4	-0.083 5	-0.103 5	0.103 5
K2+816.900	K2+816.151	-0.123	-0.120 9	-0.081 9	-0.101 4	0.101 4
K2+831.600	K2+830.851	-0.116	-0.112 9	-0.077 1	-0.095 0	0.095 0
K2+846.300	K2+845.551	-0.104	-0.099 1	-0.067 6	-0.083 3	0.083 3

2.2 闵浦二桥梁面标高测量情况

一般桥梁地段设计轨面线与设计梁面线应为平行关系,两者之间存在一个固定的高差即设计轨道结构高度,实测梁面线在设计梁面线上下小幅摆动。对于设置预拱度的桥梁,设计轨面线叠加预拱度后与考虑预拱度后的设计梁面线平行,并应基本与实测梁面线平行。

将实测闵浦二桥下层轨道交通梁面标高与原设计轨面标高、原设计理论梁面标高和叠加预拱度值的理论梁面标高数据进行了对照,如图 3 所示。闵浦二桥主桥实测梁面线与前期设计标高相差甚远:① 根据前期设计资料,主桥实测梁面标高应在叠加预拱度的设计梁面标高线附近摆动,但实际却偏离较大,其中最大偏差达到了 247 mm。② 实测梁面至设计理论轨面的最小高度仅为 149 mm,设计理论轨面叠加预拱度后轨面至梁面最小高度仅为

252 mm,与设计轨道结构高度 500 mm 偏离较大。

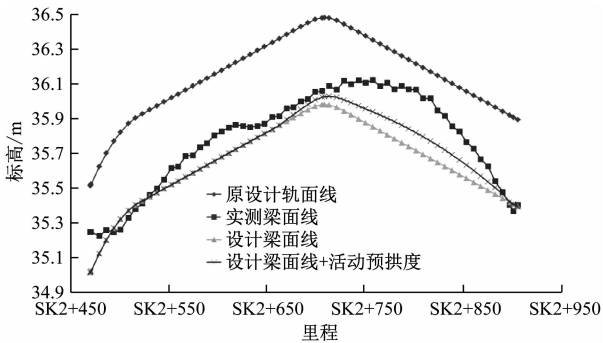


图 3 设计轨面线与实际梁面线关系图

2.3 轨面线形设计的必要性及需求

一般情况下,轨道交通结构工程施工完成后、轨道铺设前会进行调线调坡工作^[1]。根据实测资料,对结构施工偏差较大地段调整线路平面和纵断面去适应已实施完成的结构,以满足限界、轨道等

相关专业要求。

从上文可知,闵浦二桥段工况复杂:① 施工完成的梁面实测标高与原设计考虑活载预拱度的梁面标高偏差较大,按现状,轨道结构高度远远偏离标准要求,轨面必须进行调整;② 主桥恒载、活载作用下变形均较大,铺轨时的轨面线形必须考虑其影响。此时线路纵断面的调整不仅仅要满足调线调坡的要求,还必须适应桥梁变形的需求,可以称之为特大桥梁轨道铺轨线形设计。

常规连续梁铺轨时轨面标高一般按照设计轨面线叠加桥梁设置的预拱度考虑,桥梁变形时带动轨道结构同步变形逐步将预拱度抵消^[2],但闵浦二桥主桥段不能如此简单操作。这主要是由于桥梁施工时设置的预拱度仅为活载预拱度,未考虑二期恒载下的变形,并且活载预拱度实测数据与原设计理论值偏离较大。

铺轨线形的设计应满足如下条件:① 初始状态满足平顺性要求,即使桥梁未按设计理论发生二期恒载作用后的变形,但仍能确保轨面的平顺性;② 轨道、触网立柱、声屏障等恒载作用下轨面随桥梁变形实际发生后,轨道几何状态仍满足平顺性要求;③ 活载作用下的轨道几何状态满足平顺性要求;④ 最小轨道结构高度满足设计要求。

3 纵断面铺轨线形设计

3.1 原始线路纵断面

原设计纵断面基本以江中心为最高点向两侧设双面人字坡,坡度 3.1‰,坡长均为 244 m,竖曲线半径为 5 000 m。覆盖闵浦二桥主桥部分,初始线路纵断面设计未考虑桥梁变形趋势,如图 4 所示。

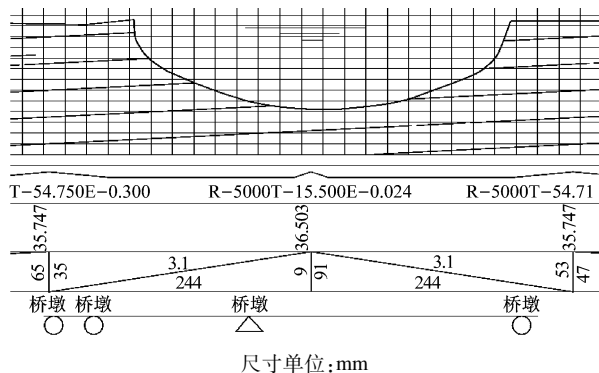


图 4 闵浦二桥主桥初始设计纵断面及桥墩位置

3.2 线形设计原则及思路

1) 为确保预留值尽可能接近实际变形值,与桥

梁专业人员共同研究后决定,将恒载作用下的理论变形值折减 10% 作为线形设计时实际考虑的恒载变形值;活载变形设计理论值为 1/2 (公路-I 级荷载 + 轨交荷载) 竖向位移,将公路-I 级荷载调整为 1 车道时的荷载,即将 1/2 (公路-I (1 车道) + 轻轨) 竖向位移作为线形设计时考虑的活载变形值。

2) 按第 1 条原则,根据桥梁计算资料,主桥第一跨、第二跨(见图 1)二期恒载作用下的变形均小于 10 mm,铺轨线形设计时不予考虑。

3) 将变坡点设置在主跨桥梁最大变形处,调整后的线形尽量适应现有桥面线形,确保初始状态轨面和桥面发生最大变形时轨面均满足平顺性要求。

4) 为满足较不利地段轨道结构高度的要求,因部分轨道高度会较高,需请桥梁专业人员对纵坡调整后的最大轨道荷载进行确认。

3.3 设计方案

基于前述主要原则和思路,对主桥段纵断面进行重新调整设计,提出了两个方案。两个方案均将原设计 3.1‰ 的两个坡段调整为 3 个坡段,在主桥主跨中间增设新变坡点(见图 5)。具体如下:

方案一:新调整的 3 个坡的坡度和坡长分别为:3.5‰ 和 141.0 m、1.5‰ 和 193.0 m、7.0‰ 和 157.5 m,新的坡长和坡度均满足规范要求^[3]。调整后,浮置板范围最大轨道结构高度为 768 mm,最小轨道结构高度为 579 mm;承轨台区域最大轨道结构高度为 662 mm,最小轨道结构高度为 472 mm。

方案二:新调整的 3 个坡的坡度和坡长分别为:3.3‰ 和 181.0 m、1.5‰ 和 153.0 m、6.86‰ 和 157.5 m,新的坡长和坡度均满足规范要求^[3]。调整后,浮置板范围最大轨道结构高度为 767 mm,最小轨道结

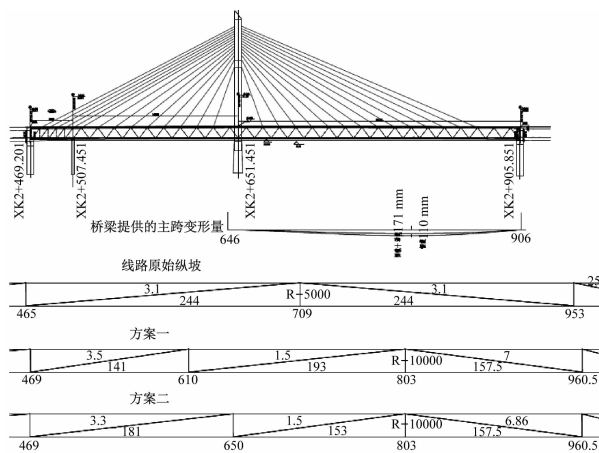


图 5 线形设计方案

构高度为 561 mm;承轨台区域最大轨道结构高度为 692 mm,最小轨道结构高度为 520 mm。

两个纵断面布置方案差别不大,其主要区别在于方案二中里程为 K2 + 650 的变坡点更靠近主塔。

3.4 方案校核

为确保方案的可靠性,在理论上对两个方案进行校核。将两个方案的初始轨面线形、桥梁恒载作用变形后轨面线形、桥梁恒载活载共同作用后轨面线形进行对照(见图 6 和图 7)。图中:曲线 1 为初始轨面标高数据绘制,根据桥梁专业人员提供的不同里程处桥梁变形值,利用三次抛物线模拟桥梁变形曲线,得到任意位置处桥梁变形值;将初始轨面线数据减掉恒载作用下桥梁变形成得到曲线 2;初始轨面线数据减掉恒载和活载引起的总变形后的轨面线为曲线 3。

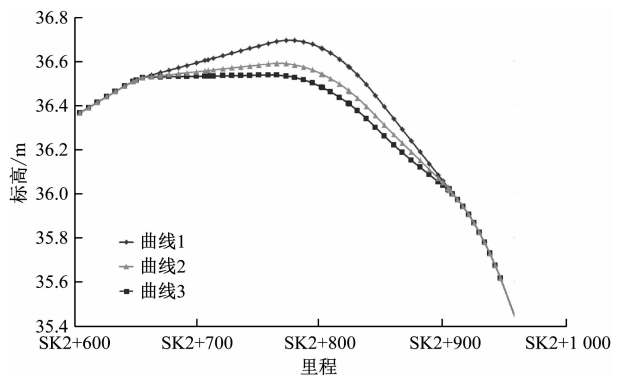


图 6 方案一校核

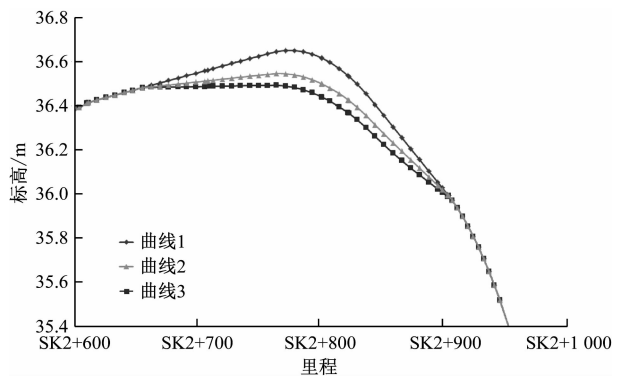


图 7 方案二校核

从图中可以看出,两个方案的初始线形和变形

后的线形均比较平缓,也即两个方案在理论上均适用于本工况。

4 方案实施及后续跟踪

4.1 方案实施

设计单位选择前述两铺轨线形方案中的方案一,维持变坡点位置不变,微调纵坡坡度后形成最终调线调坡设计图纸,供现场铺轨使用。

为方便过程中轨面标高测量和控制,施工前请测量单位在桥上布设控制点,并特别在主桥主塔位置加设控制点,以方便施工过程中的标高控制和变形监测^[4]。

实际轨道施工时按由主桥两端向中间的顺序进行施工。由于过程中轨道荷载逐渐增加,桥面变形也逐步发生,无法采用控制轨面绝对标高的方法进行铺轨施工,所以采用相对标高控制法进行施工。即施工前,根据测量的梁面标高和调坡后的轨面标高计算控制点的实际轨道高度;施工过程中,按控制点位的轨道结构高度为基准进行轨面标高的控制,混凝土道床浇筑完成后进行精调^[5]。

4.2 后续跟踪

4.2.1 施工过程中跟踪

2017 年 12 月底,现场反馈桥梁最大变形发生位置与设计位置出现偏移,经过对现场情况的比对分析,发现原因为:闵浦二桥主跨长 254 m,其中主跨小里程侧 169 m 为承轨台整体道床,现场已架轨但未浇筑混凝土;接着为 69 m 浮置板,板已铺,但未顶升;之后为抬枕和调节器地段,已架轨,道床未浇筑。由于靠近大里程侧浮置板道床大部分荷载已就位,承轨台整体道床地段仅架设了钢轨和轨枕,而且浮置板道床的荷载较承轨台道床重,故而出现最大变形点位置侧偏移的现象。

根据桥上预留精测网控制点点位复测结果,控制点垂向变形均小于桥梁专业最初提供的桥梁变形值(见表 2)。由于轨道荷载并未完全施加,认为桥梁变形在可控范围,要求后续施工仍按轨面与梁面高差即轨道结构高度不变进行控制。

表 2 控制点垂向变形与桥梁理论变形对照

控制点里程	桥梁提供变形数据最近点里程	控制点点位垂向位移/mm	桥梁理论变形/mm	控制点里程	桥梁提供变形数据最近点里程	控制点点位垂向位移/mm	桥梁理论变形/mm
SK2 + 685.481	SK2 + 684.600	8.4	23	XK2 + 685.481	XK2 + 683.851	8.7	23
SK2 + 765.429	SK2 + 758.000	41.4	90	XK2 + 765.429	XK2 + 757.000	41.7	90
SK2 + 840.438	SK2 + 846.000	58.0	94	XK2 + 840.438	XK2 + 845.000	60.0	94

4.2.2 施工完成后跟踪

为跟踪了解实际桥梁在二期恒载作用下的变形情况,2018 年 4 月 3 日利用铺轨前在主塔位置处预留的控制点,对轨道铺设完成后的梁面标高进行了实测,并与前期梁面标高进行对照,计算了桥梁变形量(见表 3)。桥梁变形趋势符合前期理论趋势,最大变形量为 78 mm,小于前期二期恒载作用下的最大理论变形值,符合预期,理论上可确保轨面平顺。经对实际轨面标高进行测量后,确认几何状态良好。

表 3 闵浦二桥轨面变形监测部分数据			
里程	沉降量/mm	里程	沉降量/mm
SK2 + 715.000	25	XK2 + 715.000	24
SK2 + 725.000	33	XK2 + 725.000	30
SK2 + 735.000	40	XK2 + 735.000	36
SK2 + 755.000	55	XK2 + 755.000	50
SK2 + 775.000	65	XK2 + 775.000	62
SK2 + 795.000	75	XK2 + 795.000	71
SK2 + 815.000	78	XK2 + 815.000	75

上海轨道交通 5 号线南延伸于 2018 年 12 月 30 日通车试运营,至今闵浦二桥段轨道状态良好。

5 结语

本文详述了上海轨道交通 5 号线南延伸闵浦二

(上接第 41 页)

4) 根据实时记录发现:距离列车轨行区较近地面测点噪声最大值为 95.5 dB,静止时为 50.1 dB;远离轨道一侧的测点噪声最大值为 87.9 dB,静止时为 49.4 dB,噪声最值超过规范限制 75 dB,需采取一定减噪措施。

参考文献

[1] 马晓磊,巴振宁,高愈辉,等.滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析[J].岩土工程学报,2019(增刊2):177.

[2] 邹超,汪益敏,汪朝晖,等.地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J].振动与冲击,2015(16):200.

[3] 肖桂元,韦红亮,王志驹,等.地铁列车引起与地铁合建建筑结构环境振动特性现场测试分析[J].铁道学报,2015(5):88.

[4] 张晓春,张辰辰,张磊,等.地铁列车振动对临近建筑内人体舒适度的影响研究[J].中国矿业大学学报,2009(6):835.

[5] 何卫,谢伟平,刘立胜.地铁隧道列车振动特性试验研究[J].

桥主桥段铺轨线形设计、铺轨工程实施方案和后续实施情况。通过本工程案例的经验,对采用特大跨度桥梁的轨道交通建设提出如下建议:① 轨道交通特大跨度桥梁,由于在二期恒载和活载作用下的变形较大,线路纵断面应考虑桥梁变形趋势结合桥跨布置进行设计。② 大跨度桥梁轨道铺设前应对梁面标高进行测量,并根据实测梁面标高、桥梁设计变形、桥面预拱度等参数进行铺轨线形设计,确保桥梁在二期恒载和活载作用下变形后轨面的平顺性。③ 铺轨施工过程中,轨面标高应按轨面与梁面的相对高程进行控制,并应实时监测过程中高程变化情况,发生异常及时协调处理解决。

参考文献

[1] 上海市住房和城乡建设管理委员会.城市轨道交通工程技术规范:DG/TJ 08-2232—2017[S].上海:同济大学出版社,2017.

[2] 王进,高晓新,李文英,等.大跨度预应力结构地段的轨道设计与施工技术要求[J].铁道标准设计,2007(10):22.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[4] 邓卫博,张涛,李照星.城轨交通大跨度钢桁斜拉桥轨道工程监测技术研究[J].现代城市轨道交通,2017(5):25.

[5] 周虎利.公路城轨两用大跨度钢桁斜拉桥铺设无砟轨道关键技术[J].城市轨道交通研究,2012(3):71.

(收稿日期:2019-08-01)

华中科技大学学报(自然科学版),2016(4):85.

[6] 盛涛,张善莉,单伽钰,等.地铁诱发的环境振动及振源减振效应的实测与分析[J].振动、测试与诊断,2015(2):352.

[7] 郑国琛,祁皓.福州地铁运行引起的环境振动加速度预测分析[J].工程力学,2015(增刊1):331.

[8] 陈艳明,冯青松,刘庆杰,等.下沉式地铁车辆段咽喉区车致振动特性[J].交通运输工程学报,2020(3):51.

[9] 侯博文,曾钦娥,费琳琳,等.城市轨道交通地下车站站台噪声评价方法[J].清华大学学报(自然科学版),2021(1):57.

[10] 袁扬,刘维宁,王文斌.地铁交通引起环境振动传递特性试验研究[J].铁道学报,2014(4):99.

[11] 刘鹏辉,杨宜谦,尹京.地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析[J].振动与冲击,2014(2):31.

[12] 宗刚,郑玉琴,任晓崧,等.建筑物对地铁引发场地振动影响的实测分析[J].工程力学,2018(增刊1):287.

[13] 曾泽民.地铁车辆段列车运行引发振动与噪声效应的现场试验研究[D].广州:华南理工大学,2015.

(收稿日期:2020-09-09)