

地铁出入段线类矩形盾构隧道振动传递特性测试分析

刘爱德¹ 张 斌² 许永富¹

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波;

2. 隔而固(青岛)结构设计事务所有限公司, 266108, 青岛//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以宁波地铁3号线一期工程出入段线类矩形盾构隧道为研究对象,在隧道内与地面布置加速度传感器进行同步测试分析,测试分为一列列车运行与两列列车同向并行运行两种行车工况。结果表明:两列列车同向并行运行工况与一列列车运行工况相比,同一测点振动加速度有效值明显增大;各测点振动加速度级在绝大部分频段均有增大,且在4 Hz处增大最显著;两种行车工况下,过车引起的振动由隧道壁向地面各测点传播过程中,呈波动衰减趋势,高频段振动传递损失较低频段大,大部分测点在5 Hz以内频段传递损失均出现负值,说明此频段附近振动加速度从隧道壁传递至地面有放大现象;两列列车同向并行运行工况对环境振动评价影响较大,在线路设计时,建议考虑列车会车对环境振动的影响。

关键词 地铁出入段线;类矩形盾构隧道;现场测试;振动加速度级;振动传递特性;振动评价

中图分类号 U451+.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.026

Test Analysis of Quasi-rectangular Shield Tunnel Vibration Transmission Characteristics on Metro Access Lines

LIU Aide, ZHANG Bin, XU Yongfu

Abstract The quasi-rectangular shield tunnel on the access lines in the first phase project of Ningbo metro Line 3 is studied. Acceleration sensors are fixed on the tunnel and ground for the synchronous test, which is divided into two operation conditions: one train running and two trains co-directional parallel running. The results show that compared with one train running, the effective value of vibration acceleration at the same test point for the two trains parallel running is obviously increased; the vibration acceleration level at each test point is increased in most frequency bands, and the increase is most significant at 4 Hz. In both conditions, the vibration transmission from tunnel wall to test points on the ground attenuates in the form of fluctuation, and the transmission loss in high frequency section is greater than in low frequency section. Since the transmission loss for most of the test points is negative below 5

Hz, it indicates that the vibration acceleration in this section from tunnel wall to ground is amplified, and the condition with two trains parallel running has a great influence on the environmental vibration evaluation. So, in the line design, the impact on the environmental vibration caused by train running should be considered.

Key words metro access line; quasi-rectangular shield tunnel; in-situ test; vibration acceleration level; vibration transmission characteristics; vibration evaluation

First-author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

地铁列车在隧道内轨道上运行时,由轮轨激励产生振动并通过轨道—隧道—土壤传递至地面及建筑物^[1]。隧道形状与振动响应密切相关^[2]。目前,轨道交通常用的隧道形状有圆形、马蹄形等,许多专家学者对其进行了大量的振动分析研究。文献[3]对北京地铁5号线圆形盾构隧道与马蹄形隧道内采用不同减振措施时,钢轨、道床和隧道壁的振动特性进行了振动测试分析与理论验证。文献[2]对上海轨道交通8号线单圆与双圆盾构隧道进行了测试分析,在单列车运行的情况下,相同测点处双圆盾构隧道的竖向振动加速度峰值小于单圆盾构隧道。文献[4]对上海某轨道交通线路圆形隧道上方的地面振动进行了测试分析,发现由列车引起的地面振动存在放大区。文献[5]对上海某轨道交通线路圆形盾构隧道内与自由场地的振动频谱特性及传递规律等进行了测试分析,同时对邻近建筑物的室内舒适度作了评估。文献[6]对北京地铁15号线圆形盾构隧道小半径曲线段地面进行了实测,分析了地铁列车通过曲线段时引起地面振动加速度的时域和频域的传播规律。文献[7]对上海轨道交通1号线圆形隧道进行了振动测试,并结合数值分析,研究了振动波在地表的传播规律。文献[8]对某地铁1号线马蹄形隧道引起的地面振动实况和

振动特性及其传播规律进行实测分析,发现存在一个振动放大区及主要响应频带。文献[9]对北京地铁1号线东单站—建国门站区间马蹄形隧道进行了现场测试,得出环境背景振动、道路公交振动等地面车辆和地铁的地面振动响应规律。

宁波地铁大断面类矩形盾构隧道在我国尚属首次应用^[10],为目前世界上最大断面的类矩形盾构隧道,振动实测数据缺乏。本文选取宁波地铁3号线一期工程的出入段线类矩形盾构隧道,对其进行了隧道-地面同步测试,并分析了其振动传递规律。

1 宁波地铁3号线一期工程出入段线试验段测试概况

1.1 测试断面及测点布置

测试断面位于宁波地铁3号线一期工程里程为CK 0+379.5的出入段线试验段(以下简为“试验段”)。出段线和入段线曲线半径分别为405 m和400 m。出段线隧道顶面距地面的距离为7.7 m,隧道底面距地面的距离为14.6 m。试验段测试断面及测点布置示意如图1所示。采用普通整体道床,铺设60 kg/m钢轨、DTⅢ2型扣件。采用施工运输车作为激励,运输车由牵引机车与拖车组成,牵引机车总质量约45 t(轴距为2.6 m,轴重为22.5 t),拖车总质量约23 t(轴距为1.15 m,定距为4.1 m,轴重为5.75 t)。

在隧道内壁距钢轨顶面1.5 m处布置竖向测点;同时在地面布置4个竖向测点,与出段线的中心线距离分别为0 m、5 m、15 m、30 m。

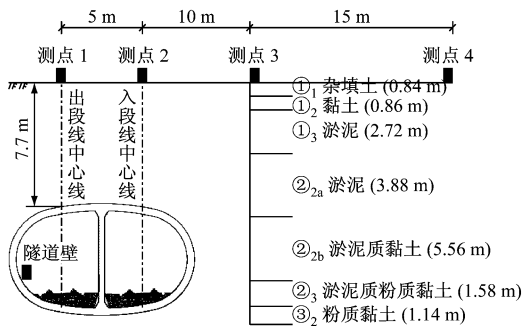


图1 试验段测试断面及测点布置示意图

1.2 测试仪器及测试内容

隧道内测试采用LMS SCADAS Mobile SCM 01采集系统和PCB 356A17型加速度传感器,加速度传感器量程为 $\pm 10\text{ g}$,频率范围为0.5~3 000 Hz。地面测试采用东方所INV 3062-C1(L)型采集

系统和LANCE LC 0116型加速度传感器,加速度传感器量程为 $\pm 0.5\text{ g}$,频率范围为0.1~300 Hz。采样频率设定为1 024 Hz。

本次测量分为一列列车在出线段运行与两列列车在出段线和入段线同向并行运行两种工况。两车反向交会运行并同时经过待测断面的情况较难控制,因此采用两车同向并行来模拟两车交会工况。为避免测试时的随机干扰,两种工况均选择10组效果较好的数据进行分析。

文献[11]研究表明,随着车速增加,振动总体呈增大趋势。受车辆条件限制,本文仅测试分析列车匀速运行工况,运行速度取9 km/h。

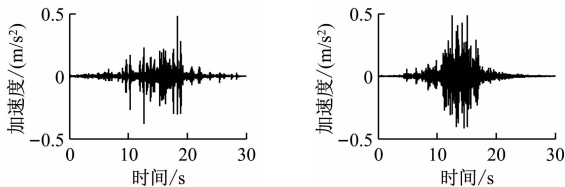
2 时域分析

2.1 振动加速度时程

图2~4为一列列车运行工况与两列列车同向并行运行工况下隧道壁测点与地面典型测点振动加速度时程曲线。由图2~4可以看出:

(1)两列列车并行运行时,时域信号中的过车信号更加明显。

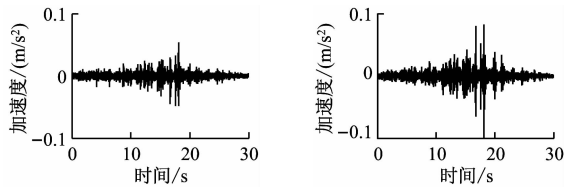
(2)隧道壁振动加速度时程峰值在 10^{-1} m/s^2 量级,地面各测点振动加速度峰值主要在 10^{-2} m/s^2 量级。



a) 一列列车运行

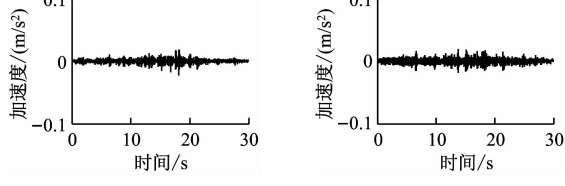
b) 两列列车运行

图2 隧道壁典型测点振动加速度时程曲线



a) 测点1

b) 测点2



c) 测点3

d) 测点4

图3 一列列车运行工况下地面典型测点振动加速度时程曲线

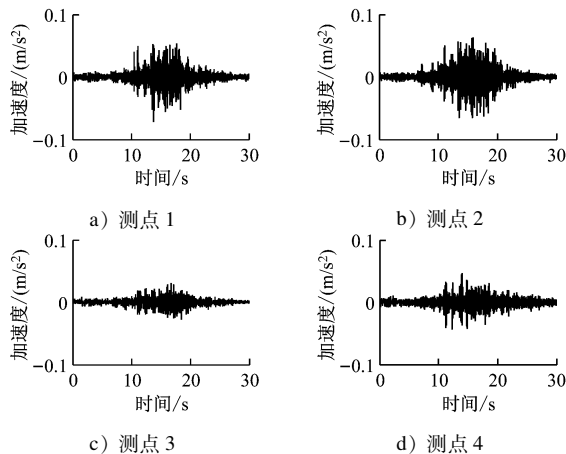


图4 两列列车同向并行运行工况下地面典型测点振动加速度时程曲线

2.2 振动加速度有效值

将振动加速度有效值 a_{rms} 定义为:

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (1)$$

式中:

$a(t)$ ——加速度时间函数;

t ——分析时间长度。

根据式(1)计算得到施工运输车经过测试断面时间段各测点振动加速度有效值均值,绘制两种行车工况下各测点振动加速度有效值变化曲线,如图5所示。由图5可以得到如下结论:

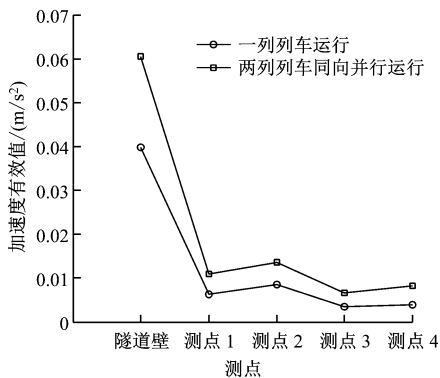


图5 各测点振动加速度有效值变化曲线

(1)两列列车同向并行运行工况下的同一测点振动加速度有效值大于一列列车运行工况。两列列车同向并行运行工况下,各测点振动增大效应较为明显。

(2)两种行车工况下,过车引起的振动由隧道壁向地面各测点传播过程中,呈波动衰减趋势。振动加速度有效值由隧道壁传播至出段线中心线正上方测点1的衰减幅度较大。

(3)地面振动加速度有效值的最大值并非在出段线中心线正上方测点1处出现,而是在偏离出段线中心线5 m的测点2处出现。

(4)在横向距离出段线中心线30 m处的测点4振动加速度有效值比测点3(横向距离出段线中心线15 m处)有反弹放大现象,且该现象与文献[8]类似。

3 频域分析

3.1 振动加速度级

根据 GB 10071—1988《城市区域环境振动测量方法》^[12],振动加速度级 V_{al} 的计算公式为:

$$V_{\text{al}} = 20 \cdot \lg(a_{\text{rms}}/a_0) \quad (2)$$

式中:

a_0 ——基准加速度,一般取 10^{-6} m/s^2 。

两种行车工况下隧道壁测点与地面各测点振动加速度级如图6~7所示。由图6~7可以看出:

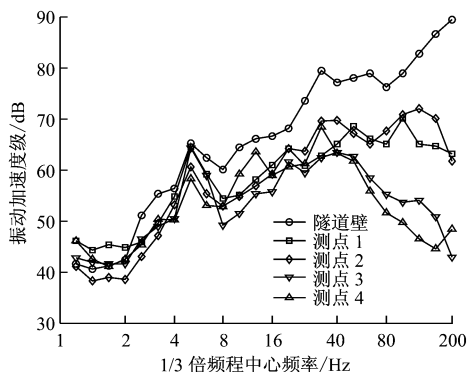


图6 一列列车运行工况下各测点振动加速度级

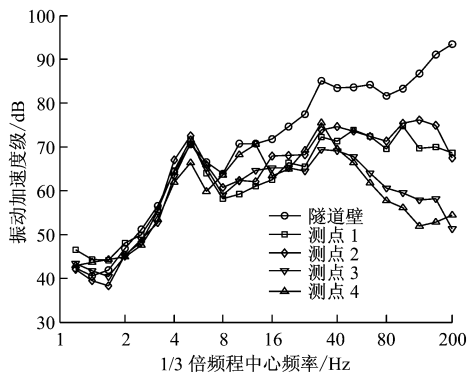


图7 两列列车同向并行运行工况下各测点振动加速度级

(1)两列列车同向并行运行工况下,隧道壁测点的加速度级在3 Hz频段,大于单列车运行工况;在3 Hz以内频段,两种行车工况下振动加速度级交替变化。两种行车工况下振动加速度级均在

200 Hz 处出现最大值。

(2) 两种行车工况下,地面各测点在 40 Hz 以内频段振动频谱特性较一致;对于 40 Hz 以上频段,测点 1、2 处振动频谱特性较为一致;测点 3、4 处振动频谱特性较一致。

(3) 地面各测点随着与出段线中心线距离增加,大部分频带振动逐渐减小。测点 1、2 在 30 Hz 以上频带振动较为显著,测点 3、4 在 30 Hz 附近频带振动较为显著。

3.2 两种行车工况对比分析

对两种行车工况下各测点振动响应进行对比,并分析两列列车同向并行运行时的振动放大效应。两列列车同向并行运行与一列列车运行工况各测点振动加速度级差值如图 8 所示。由图 8 可以看出:

(1) 两列列车同向并行运行工况相对于一列列车运行工况各测点振动加速度级在 4 Hz 处放大最显著。

(2) 隧道壁测点在 1.25 Hz、2.5 Hz 处振动均减小 0.01 dB;在其他频带处均有所放大,其中在 4 Hz 处达到最大值,为 8.01 dB。

(3) 地面测点 1 在 1.25 ~ 1.6 Hz 频带振动减小 0.01 ~ 1.21 dB,在其他频带均有所放大,在 4 Hz 处达到最大值,为 9.82 dB。

(4) 地面测点 2 在 1.6 Hz 处振动减小 0.57 dB,在其他频带均有所放大,在 4 Hz 处达到最大值,为 13.79 dB。

(5) 地面测点 3 在 1.25 ~ 1.6 Hz 频带处振动减小 0.18 ~ 1.22 dB,在其他频带均有所放大,在 4 Hz 处达到最大值,为 12.92 dB。

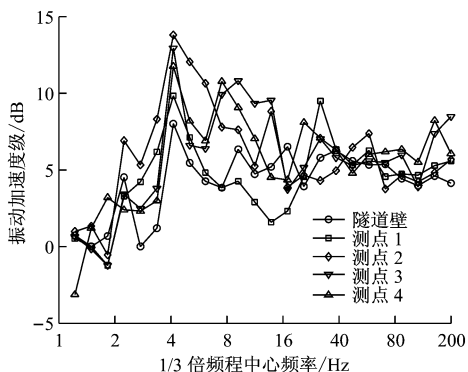


图 8 两种行车工况下各测点的振动加速度级差值

(6) 地面测点 4 在 1 Hz 处振动减小 3.13 dB,在其他频带处均有所放大,其中在 4 Hz 处达到最大

值,为 11.75 dB。

3.3 振动传递衰减分析

将隧道壁测点作为参考点,计算两种行车工况下隧道壁至地面各测点的振动传递损失,用以评价类矩形隧道与宁波软土地地的振动传递衰减特性。

图 9 与图 10 分别为一列列车运行工况与两列列车同向并行运行工况下隧道壁至地面各测点振动传递损失。由图 9 ~ 10 可以看出:

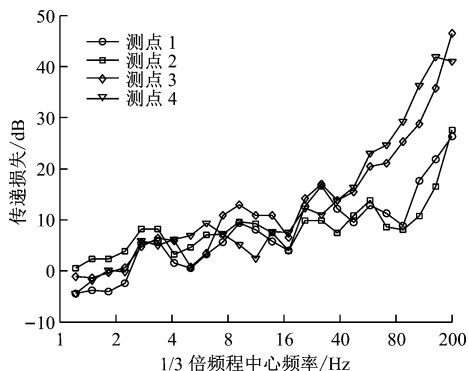


图 9 一列列车运行工况隧道壁至地面各测点振动传递损失

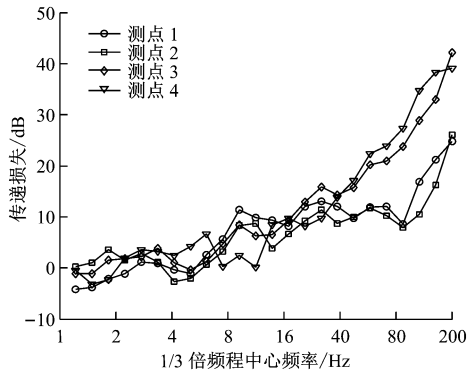


图 10 两列列车同向并行运行工况隧道壁至地面各测点振动传递损失

(1) 一列列车运行工况下,隧道壁至测点 1 的传递损失值为 1 ~ 2 Hz 时的频带为负值,振动加速度级为 -4.41 ~ -2.41 dB,说明这些频带振动由隧道壁传递至测点 1 时并未衰减,反而有所放大,在 200 Hz 处,传递损失值达到最大,为 26.30 dB;测点 2 在各频段均呈现振动衰减的趋势,在 200 Hz 处,传递损失值达到最大,为 27.62 dB;测点 3 在 1.6 Hz 内振动传递损失为 -1.34 ~ -0.33 dB,在 200 Hz 处,传递损失值达到最大,为 46.49 dB;测点 4 处于 2 Hz 内的振动衰减为 -4.41 ~ -0.19 dB,在 160 Hz 处,传递损失值达到最大,为 41.95 dB。

(2) 两列列车同向并行运行工况下,隧道壁至

测点1传递损失值在1~2 Hz及4~5 Hz附近频带的振动加速度级为-4.21~-0.32 dB,说明这些频带振动由隧道壁传递至测点1处时并未衰减,反而有所放大,传递损失值在200 Hz时达到最大,为24.84 dB;测点2传递损失在4~5 Hz附近频带为-2.62~-2.00 dB,其他频段振动均衰减,在200 Hz时达到最大,为26.08 dB;测点3传递损失在1~1.25 Hz及5 Hz附近时的频带为-1.17~-0.31 dB,其他频段振动均衰减,在200 Hz时达到最大,为42.15 dB;测点4传递损失在1~1.6 Hz附近的频带为-3.14~-0.55 dB,其他频段振动均衰减,在200 Hz时达到最大,为39.09 dB。

4 振动评价

现行的用于评价轨道交通环境振动水平的标准及评价指标主要为GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》^[13]规定的Z振级 V_z 与JGJ/T 170—2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》^[14]规定的分频最大振级 $V_{l,max}$ 。本次测试在昼间进行,故均采用昼间限值进行评价。

4.1 Z振级评价

V_z 按照全身振动Z计权因子修正后得到振动加速度级,其频率计权范围为1~80 Hz。文献[13]规定以列车通过的Z振级的算术平均值作为评价量。

Z振级计算如下:

$$V_z = 10 \times \lg(\sum 10^{(V_{ai}+c_f)/10}) \tag{3}$$

式中:

c_f ——Z计权因子,具体取值见文献[12]。

各测点由10组数据计算得到的Z振级算术平均值见表1。

表1 各测点Z振级均值						dB
工况	Z振级均值					
	隧道壁	测点1	测点2	测点3	测点4	
一列列车运行	77.4	69.8	69.4	68.3	68.6	
两列列车同向并行运行	82.8	75.6	77.2	75.0	75.9	

由表1可以看出:

(1)一列列车运行工况下,隧道壁Z振级仅满足“铁路干线两侧”限值80 dB的要求,地面各测点Z振级均满足“居民、文教区”限值70 dB(昼间)的要求。

(2)两列列车同向并行运行工况下,隧道壁Z

振级超过“铁路干线两侧”限值80 dB,地面各测点Z振级除测点3满足“交通干线道路两侧”限值75 dB(昼间)以外,其他3个测点仅满足“铁路干线两侧”限值80 dB的要求。

(3)两列列车同向并行运行工况相对于一列列车运行工况,隧道壁Z振级增大5.4 dB,地面测点1、2、3、4处Z振级分别增大5.8 dB、7.8 dB、6.7 dB和7.3 dB。当地面建筑刚好处于两车交会处,可能对建筑物振动评价产生不利影响。

4.2 分频最大振级评价

文献[14]规定: $V_{l,max}$ 在4~200 Hz频率范围内采用1/3倍频程中心频率,且按不同频率计权因子修正后的分频最大振级。各测点由10组数据计算得到的分频最大振级算术平均值如表2所示。

表2 各测点 $V_{l,max}$ 的算术平均值						dB
工况	$V_{l,max}$ 算术平均值					
	隧道壁	测点1	测点2	测点3	测点4	
一列列车运行	71.5	64.9	61.7	64.7	62.7	
两列列车同向并行运行	77.3	72.0	72.9	71.2	69.7	

由表2可以看出:

(1)一列列车运行工况下,隧道壁 $V_{l,max}$ 满足“交通干线道路两侧”限值75 dB(昼间)要求,地面各测点 $V_{l,max}$ 均满足“特殊住宅区”限值65 dB(昼间)的要求。

(2)两列列车同向并行运行工况下,隧道壁 $V_{l,max}$ 超过“交通干线道路两侧”限值75 dB,地面测点1、2、3满足“交通干线道路两侧”限值75 dB(昼间),测点4满足“居住、商业混合区,商业中心区”限值70 dB的要求。

(3)两列列车同向并行运行工况相对于一列列车运行工况,隧道壁 $V_{l,max}$ 增大5.8 dB,地面测点1、2、3、4处 $V_{l,max}$ 分别增大7.1 dB、11.2 dB、6.5 dB和7.0 dB。

5 结论

通过对宁波地铁3号线一期工程出入段线类矩形隧道进行振动测试分析,主要得出以下结论:

(1)两种行车工况下,隧道壁振动加速度时程峰值主要在 10^{-1} m/s²量级;地面各测点振动加速度峰值主要在 10^{-2} m/s²量级。过车引起的振动由隧道壁向地面各测点传播过程中,呈波动衰减趋势。地面振动加速度有效值的最大值在距离出段线中心线5 m处出现,且30 m处振动相对于15 m

处存在反弹放大现象。

(2) 两列列车同向并行运行工况相对于一列列车运行工况,各测点振动加速度级在大多数频段均有增大,在 4 Hz 处最显著。两种行车工况,隧道壁至地面各测点,高频段振动传递损失较低频段大。大部分测点在 5 Hz 以内频段传递损失均出现负值,说明此频段附近振动加速度由隧道壁传递至地面有放大现象。

(3) 一列列车运行工况下地面各测点 Z 振级与 $V_{l,max}$ 基本能满足对环境振动要求较高的公共区域及以住宅为主的私家区域的要求,但两列列车同向并行运行工况不能满足此类区域的要求。因此在选线设计时,建议考虑两车交会运行对环境振动的影响。

参考文献

- [1] 李晓霖,陶连金,张丁盛. 地铁运行诱发振动对车辆段上盖开发结构的影响[J]. 都市快轨交通,2014,27(3):13.
- [2] 李明宇,刘国彬,胡蒙达,等. 运营地铁盾构隧道结构振动响应实测分析[J]. 铁道学报,2011,33(6):88.
- [3] 李克飞,刘维宁,孙晓静,等. 北京地铁 5 号线地下线减振措施现场测试与分析[J]. 铁道学报,2011,33(4):112.
- [4] 单涛涛,楼梦麟,蒋通,等. 地铁诱发地面振动传播衰减特性

分析[J]. 防灾减灾工程学报,2013,33(4):461.

- [5] 盛涛,张善莉,单伽铨,等. 地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):54.
- [6] 袁扬,刘维宁,刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律[J]. 中国铁道科学,2012,33(4):133.
- [7] 高广运,朱林圆,李卫华,等. 上海地铁一号线人民广场振动测试与分析[J]. 地震工程学报,2014,36(3):429.
- [8] 闫维明,聂晗,任珉,等. 地铁交通引起地面振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报,2006,3(2):1.
- [9] 刘卫丰,刘维宁,袁扬,等. 地铁列车与道路车辆运行对环境的振动影响现场测试与分析[J]. 铁道学报,2013,35(5):80.
- [10] 龙建兵,杨志豪,沈张勇. 类矩形盾构工法在宁波轨道交通工程中的应用探讨[J]. 地下工程与隧道,2016(3):1.
- [11] 贾颖绚,刘维宁,马蒙,等. 地铁列车运行振动对环境影响因素的参数分析[J]. 城市轨道交通研究,2016(1):30.
- [12] 国家环境保护局. 城市区域环境振动测量方法:GB 10071—1988[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [13] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准:GB 10070—1988[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准:JGJ/T 170—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:1-6.

(收稿日期:2018-05-31)

(上接第 100 页)

(2) 通过静力学理论分析确定了滑靴表面压力与摆臂表面贴应变片中心处应变值的线性关系。通过动力学理论分析建立了滑靴动态载荷、应变值和滑靴中心点加速度之间的关系式。

(3) 通过静态标定试验获得受流器摆臂表面粘贴应变片位置的应变与滑靴中心所承受静态载荷之间的比例系数。通过动态标定试验获得固连砝码的右段摆臂等效质量,并与模型计算结果进行对比,验证了测量模型和等效参数的精确性。

参考文献

- [1] 尹洪权,薛海峰,张煜超,等. 城市轨道交通第三轨供电系统集电靴的力学性能试验研究[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(2):101.
- [2] HARTLAND D. Electric contact systems-passing power to the

trains[C]//2007 3rd IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems. Birmingham, UK: IET, 2007.

- [3] WESTON P F, STEWART E, ROBERTS C, et al. Measuring the dynamic interaction between electric vehicle shoe gear and the third rail[C]//2008 International Conference on Railway Engineering-challenges for Railway Transportation in Information Age. HongKong: IET,2008:1-4.
- [4] WANG Z Q. Multi-train movement simulation research for urban rail transit under sudden failure[J]. Applied Mechanics & Materials,2011,97:523.
- [5] LI A X, ZHANG W, JIN F, et al. Urban transportation of Beijing in a fast expansion based on the resident satisfaction survey[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2008,7144:714430.
- [6] ZHU W. Urban rail transit operation during world expo 2010 Shanghai[J]. Applied Mechanics & Materials,2012,178:1797.

(收稿日期:2018-05-23)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704