

## 地铁车辆段咽喉区临近建筑物的振动响应特性分析\*

邬玉斌 宋瑞祥\*\* 何 蕾 吴雅南 刘必灯

(北京市劳动保护科学研究所, 100054, 北京//第一作者, 研究员)

**摘 要** 为研究地铁列车经过车辆段咽喉区时对临近建筑物振动影响的特征及传播分布规律,以某地铁车辆段咽喉区临近新建建筑物为研究对象,选取咽喉区线路临近的场地土及建筑物内部的房间作为测试点开展振动测试分析。结果表明:车辆段咽喉区振动影响持时长、强度大、频率特性复杂;咽喉区内的减振垫碎石道床地面线路以低频振动为主,振动主频为 12 Hz;咽喉区内的 U 型槽整体道床线路高频振动多,振动主频为 63 Hz。建造隔墙对楼板振动的影响较大,实测其减振量可达 5.9 dB 以上。建筑楼板的振动强度及分布规律受振源频率及楼板固有频率共同影响,在楼板设计时应避免共振效应。

**关键词** 地铁;车辆段咽喉区;临近建筑物;振动响应特性  
**中图分类号** TB533+.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.013

## Analysis of Vibration Response Characteristics of Buildings Adjacent to Metro Depot Throat Area

WU Yubin, SONG Ruixiang, HE Lei, WU Yanan, LIU Bideng

**Abstract** In order to study the vibration response characteristics and propagation distribution pattern of buildings adjacent to throat area of depot when metro train is passing, a new building near the throat area of certain metro depot is taken as the research object, and site soil and building rooms close to throat area route are chosen as test points to conduct vibration response test analysis. The results show that vibration impact in throat area of metro depot has characteristics of long duration, high intensity and complex frequency. Low-frequency vibration is dominant along route of gravel ballast bed with vibration cushion in throat area, and the main vibration frequency is 12 Hz. High-frequency vibration occurs frequently along U-groove monolithic track bed metro line in throat area, and the main vibration frequency is 63 Hz. Building partition wall has distinct

impact on floor vibration, which can reduce vibration up to 5.9 dB according to site measurement. The vibration intensity and distribution pattern of building floor are affected by both vibration source frequency and natural frequency of floor. Resonance effect should be avoided in structural design.

**Key words** metro; throat area of metro depot; adjacent building; vibration response characteristics

**Author's address** Beijing Municipal Institute of Labor Protection, 100054, Beijing, China

地铁车辆段咽喉区具有轨缝多道岔多、曲率半径小等特点,是车辆段振动噪声影响最为严重的区域,也是车辆段上盖物业开发工程振动控制的重点和难点。部分学者对车辆段咽喉区地铁列车通过产生的振动源强及其正上方车辆段平台和上盖建筑的振动响应开展了一些测试研究工作<sup>[1-4]</sup>,但关于咽喉区线路临近地区建筑物的振动影响研究还未见有报道。由于建筑基础条件、振动传播路径等方面存在差异,咽喉区上盖建筑物的振动响应必然有别于临近地区建筑物振动响应的特征。

另外,地铁车辆段咽喉区多为地面线,列车运行产生的振波在岩土中的传播过程、频率特征及对建筑结构的作用机理也不完全同于地铁正线和其他地下线路<sup>[5-11]</sup>,因此有必要对车辆段咽喉区临近地区建筑物的振动响应特征进行研究,为车辆段物业开发的振动控制提供参考依据。

## 1 测试方案

### 1.1 测试对象

本文以某地铁车辆段咽喉区临近的新建建筑物为研究对象进行测试分析。该建筑物与车辆段咽喉区线路的最小距离约为 31 m,咽喉区线路的设

\* 北京市自然科学基金资助项目(8192013);北京市科学技术研究院青年学者项目(YS202102);北京市科学技术研究院改革发展培育资助项目(PY2020AQ01)

\*\* 通信作者

计车速为 25 km/h,列车采用 6 节编组 B 型车。该建筑物为地下 2 层、地上 18 层的框架剪力墙结构,建筑基底埋深为 9 m,采用筏板基础,建筑物沿线路方向长为 105 m,如图 1 所示。

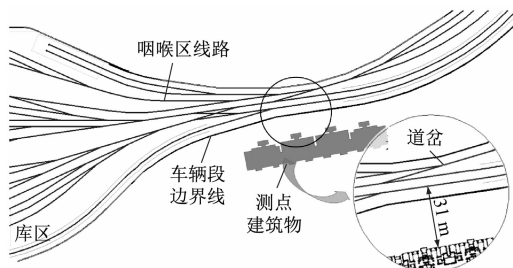


图1 地铁咽喉区线路与测试建筑物的位置示意图

## 1.2 测试方案

本次测试仪器包括:①INV3018C 8 通道 24 位高精度采集仪,其最高采样频率为 51.2 kHz,动态范围为 0 ~ 110 dB;②Bruel&Kjaer8344 型加速度传感器;③DASP 数据采集及分析软件。

如图 2 所示,建筑物的西侧为减振垫碎石道床地面线,东侧为地面线转为地下线的 U 型槽整体道床过渡段。布设 3 个场地土测点,其中:测点 1 和测点 2 对应减振垫碎石道床地面线;测点 3 对应 U 型槽整体道床线路。此外,针对源强特点在建筑物的东、西两端 4 个房间的中心点处布设振动测点,其中:房间 1 和房间 3 的几何形状相似;房间 2 和房间 4 的几何形状相似。

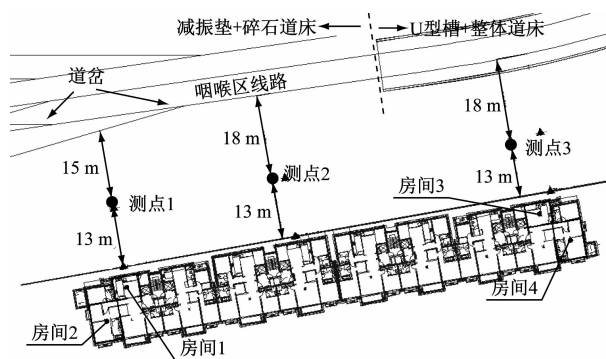


图2 测点布置图

本次研究共开展了 3 次测试:第 1 次为建筑物修至 12 层时,对 3 个场地土测点及 4 个房间的 1 层楼板进行同步测试;第 2 次为建筑物主体结构完成、室内未砌筑隔墙时,对不同楼层的房间 1 和房间 2 进行振动测试;第 3 次为建筑物的 1 ~ 8 层砌筑隔墙完成、其余楼层尚未砌筑隔墙时,对房间 1 (1 层、4

层、12 层、16 层)和房间 2 (1 层、4 层、6 层、12 层、16 层、18 层)进行有无隔墙的对比测试。

## 1.3 评价量

地铁列车运行产生的振动以竖向振动为主,因此本文仅对竖向加速度进行测试分析,并以全频段振动加速度级作为评价量。振动加速度级的计算公式为:

$$L = 20 \lg \left( \frac{a}{a_0} \right) \quad (1)$$

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

式中:

$L$ ——振动加速度级, dB;

$a$ ——振动加速度有效值,  $\text{m/s}^2$ ;

$a_0$ ——基准加速度,  $a_0$  取  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ ;

$a(t)$ ——加速度时程;

$T$ ——加速度持续时间, s。

## 2 实测数据分析

### 2.1 对场地土的振动测试

振动测试时停止了其他干扰振源,并进行了背景环境振动测试。如图 3 所示,地面背景环境振动实测加速度峰值仅约  $0.0004 \text{ m/s}^2$ ,说明测试条件良好、外界振动干扰非常小。

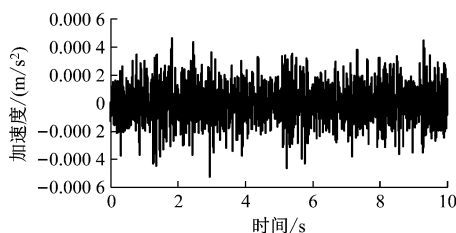


图3 背景振动加速度时程图

对场地土的 3 个测点和建筑物第 1 层 4 个房间的楼板中心点进行同步地铁列车振动测试。图 4 为场地土测点实测得到的典型地铁列车振动加速度时程曲线。由图 4 可知,由于列车运行速度较慢,其振动影响的持续时间较长,约为 32 s。

如图 5 所示,3 个测点的振动加速度频谱特性存在较大差异:测点 1 和测点 2 靠近减振垫碎石道床地面线,其低频振动相对显著,主要振动频率集中在 10 ~ 20 Hz,最大振动峰值约为 12 Hz。由于测点 1 靠近道岔,其振动影响大于测点 2;测点 3 的高频振动成分更多,主要振动频率集中在 50 ~ 70 Hz

之间,最大振动峰值约为 63 Hz。

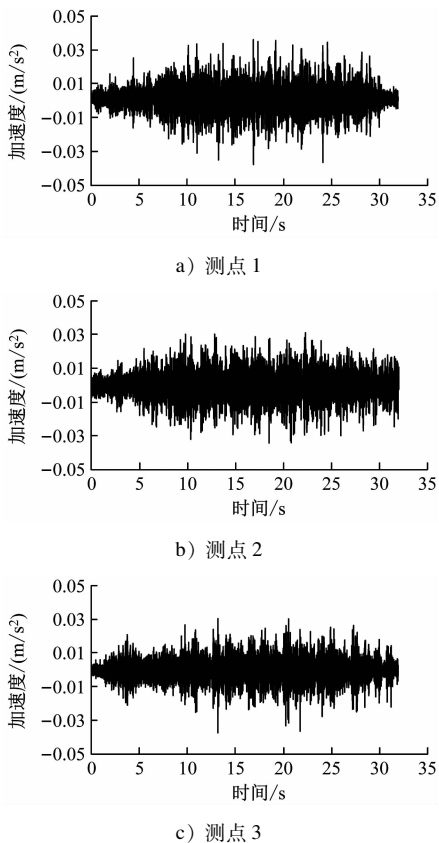


图 4 场地土 3 个测点的振动加速度时程曲线

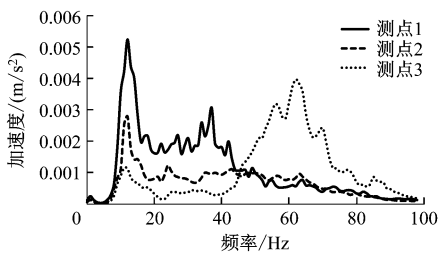


图 5 场地土 3 个测点的振动加速度频谱

图 6 为场地土 3 个测点的振动加速度级时程曲线,可以看出:测点 3 的振动最大,测点 1 的振动其次,测点 2 的振动最小。这是因为测点 3 对应的线路无轨道减振措施,而测点 1 和测点 2 对应的线路采用了减振垫 + 碎石道床的减振措施。测点 1、测点 2、测点 3 的振动加速度级峰值分别为 82.0 dB、78.2 dB 和 84.3 dB。

2.2 对建筑物 1 层楼板的振动测试

图 7 为测试建筑物 1 层楼板的振动加速度级时程曲线图。如图 7 a) 所示,位于建筑物西侧的房间 1 和房间 2 的振动响应相差不大,其实测振动加速度级最大值分别为 79.8 dB 和 78.7 dB。相比室外

场地土测点 1 的实测数据,房间 1 和房间 2 的振动加速度级最大值分别衰减了 2.2 dB 和 3.5 dB;如图 7 b) 所示,位于建筑物东侧的房间 3 和房间 4 的振动差异明显,房间 4 振动明显小于房间 3,两者的振动加速度级最大值相差 4.3 dB。相比室外场地土测点 3 实测数据,房间 3 和房间 4 的振动加速度级最大值分别衰减了 6.3 dB 和 10.7 dB。

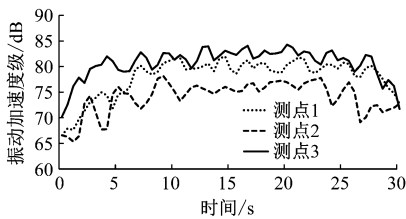
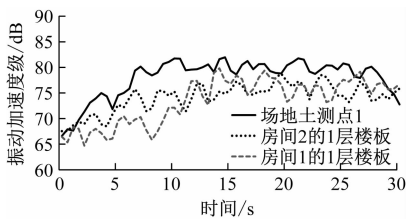
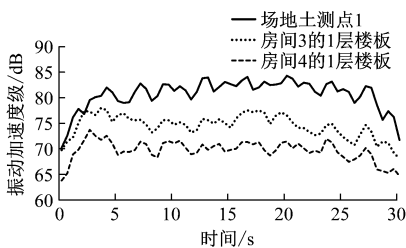


图 6 场地土 3 个测点的振动加速度级时程曲线



a) 建筑物西侧



b) 建筑物东侧

图 7 测试建筑物 4 个房间 1 层楼板处的振动加速度级时程曲线

由此可知,测试建筑物东侧场地的土振动实测值大于西侧的土振动实测值,但西侧房间室内的振动大于东侧房间室内的振动,这说明低频列车振动荷载对西侧室内楼板的激励作用更为显著。

图 8 为测试建筑物 1 层楼板的室内振动加速度频谱图。从图 8 可以看出,4 个房间在 10 ~ 12 Hz 均存在振动波峰,这与图 5 的场地土振动波峰相接近。此外,房间 1 在 38 Hz 存在 1 个非常明显的振动波峰;房间 2 振动频率范围较广、存在多个频率波峰,房间 2 楼板振动主频为 22 Hz 左右,这说明即使在相同荷载作用下,不同房间的振动响应也可能存在较大差异。

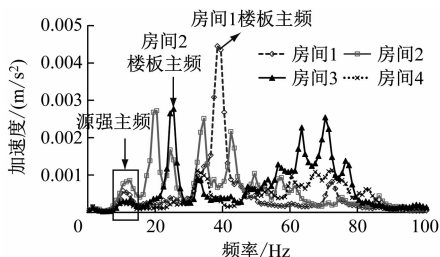


图8 测试建筑物1楼层板的实测加速度频谱

本文对房间1和房间2的1楼楼板进行了模态分析。这2个房间的楼板厚度均为0.11 m,房间1的尺寸为6.3 m(长)×8.2 m(宽),房间2的尺寸为7.6 m(长)×4.7 m(宽)。楼板材料参数均按C25混凝土参数取值。由于楼板由剪力墙或断面尺寸较大的梁构件分割而成,楼板四周边界采用全约束固定。如图9所示,房间1和房间2的楼板第1阶固有频率分别为38 Hz和22 Hz,楼板振动响应的实测频率峰值与楼板固有频率的计算结果较为接近。

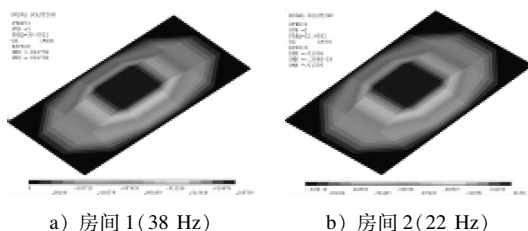


图9 楼板第1阶振型截图

由于房间2的固有频率相对较低,且同地铁列车振源主频接近,所以虽然房间2距离地铁线路较远,但其振动响应与房间1相比并无较大衰减。建筑物东侧的振源主频较高,且大于房间3和房间4楼板的第1阶自振频率,地铁列车激振源强主频和楼板自振频率无共振现象,因房间4与地铁线路的距离较远,其振动小于房间3的振动。房间3和房间4的振动频率集中在50~80 Hz,这与东侧地铁列车振源频谱特征相吻合。由此可知:建筑物楼板振动响应受到楼板自振特性及源强频率特性的共同影响,在进行结构设计时应尽量避免地铁列车振动荷载与建筑楼板的共振作用。

### 2.3 振动随楼层的分布规律测试

为了解地铁列车振动影响随楼层的分布规律,在主体结构完成、尚未砌筑隔墙时,对不同楼层所对应的房间1和房间2的进行现场振动测试。如图10所示,楼板振动随楼层的递增呈波动性变化,在

相同列车荷载作用下,2个房间的振动变化规律有所不同:房间1的振动最大值出现在第4层,房间2的振动最大值出现在第12层;在1~10层房间1的振动大于房间2的振动,在11层及以上房间2的振动大于房间1的振动。

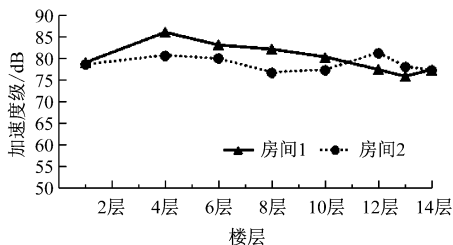


图10 测试建筑物各楼层内房间1和房间2的振动加速度级

图11给出了10 Hz、35 Hz、60 Hz、80 Hz 4个频率下振动加速度级随楼层的变化情况。从图11可以看出:①房间1在10 Hz和35 Hz下的振动较大,在35 Hz下振动随楼层升高而增大,在10 Hz下振动随楼层升高呈衰减趋势;在60 Hz和80 Hz高频下房间1的振动相对较小,仅随楼层小幅度波动变化。②房间2的低频振动较为显著,10 Hz下的振动最大,且随楼层升高线性增大;房间2在35 Hz下振动随楼层呈波动性衰减,60 Hz和80 Hz高频下的振动随楼层变化不大。

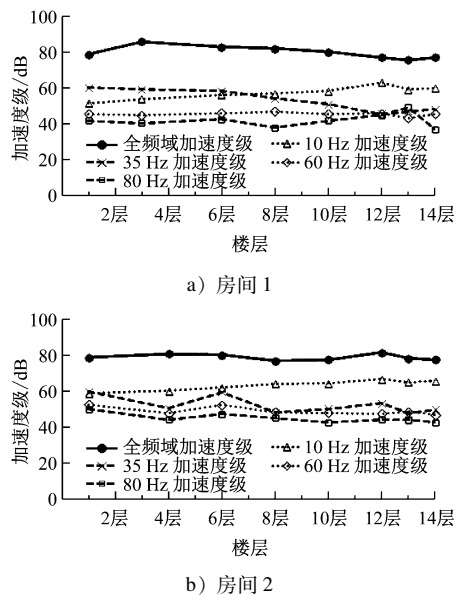


图11 不同频率下加速度级随楼层变化曲线

### 2.4 隔墙对楼板振动的影响测试

建筑物室内增设隔墙后会改变楼板的自振频率特性,进而影响室内楼板的地铁列车振动响应特征和分布规律。为此,对房间1和房间2在有隔墙

振(1~8层)和无隔墙(9~18层)2种情况进行了对比测试,测试现场如图12所示。



a) 无隔墙的楼层

b) 有隔墙的楼层

图12 有隔墙楼层和无隔墙楼层的测试现场

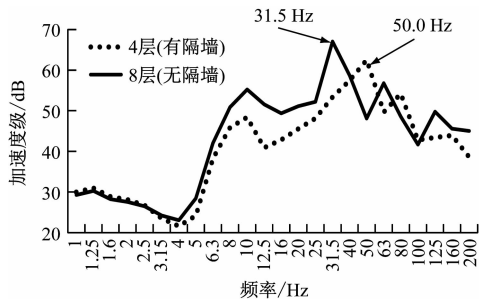
实测结果表明:隔墙可降低楼板的振动加速度级。对于有隔墙的1层和4层,房间1实测得到的振动加速度级分别为69.8 dB和68.9 dB,2个楼层的振动加速度级平均值为69.4 dB;对于无隔墙的12层和16层,房间1实测得到的振动加速度级分别为74.3 dB和76.2 dB,2个楼层的振动加速度级平均值为75.3 dB。由此可计算得到,增设隔墙后楼板振动的平均减小量为5.9 dB。

房间2的测试结果如下:对于有隔墙的1层、4层和6层,房间2实测得到的振动加速度级分别为70.7 dB、69 dB和69.3 dB,3个楼层的振动加速度级平均值为69.7 dB;对于无隔墙的12层、16层和18层,房间2实测得到的振动加速度级分别为82.6 dB、79.2 dB和78.7 dB,3个楼层的振动加速度级平均值为80.2 dB。由此可计算得到,增设隔墙后楼板振动的平均减小量为10.5 dB。

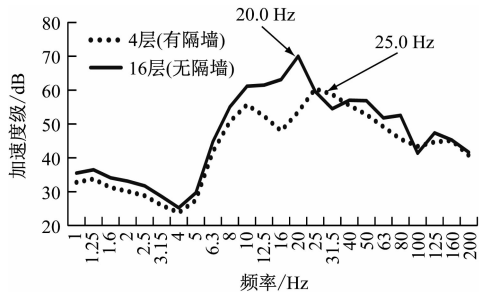
图13为房间1、房间2的振动加速度1/3倍频程谱。如图13所示,隔墙能够改变楼板的振动频谱特征。砌筑隔墙后,房间1的楼板振动峰值从砌筑隔墙前的31.5 Hz提高至50.0 Hz,房间2的楼板振动峰值则由砌筑隔墙前20.0 Hz增加至25.0 Hz,这说明隔墙增加后提高了楼板固有频率,避开了地铁列车的振动主频,从而降低了地铁列车振动对模板的影响。

### 3 结论

1) 地铁车辆段咽喉区的振源具有持续时间长、影响强度大、频谱特性复杂等特点。咽喉区减振垫碎石道床地面线路附近场地土的振动频率集中在10~20 Hz,最大振动主频约为12 Hz。咽喉区U型槽整体道床线路附近场地土的振动频率集中在50~70 Hz,最大振动主频约为63 Hz。



a) 房间1



b) 房间2

图13 有隔墙和无隔墙2种情况下的振动加速度1/3倍频程谱对比

2) 楼板振动响应受振源频率特征和楼板自振特性共同影响。当地铁振源主频同楼板固有频率相同或接近时,由于共振作用建筑物楼板振动响应一般较为严重。地铁振源主频越低,对建筑物楼板的激振作用也更为明显。

3) 建筑物室内不同区域内的振动随楼层的变化规律不完全相同。楼板振动随楼层呈波动性变化,个别低频振动可能随楼层升高而放大。

4) 砌筑隔墙能够改变楼板的振动特性,并对楼板振动起到明显的衰减作用。

### 参考文献

- [1] 何卫,谢伟平. 地铁车辆段列车动荷载特性实测研究[J]. 振动与冲击,2016(6):132.
- [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] 邹林志,杜麒麟,黄涛,等. 地铁上盖物业咽喉区道岔段振动测试与分析[J]. 四川环境,2018(3):41.
- [4] 何蕾,宋瑞祥,郭玉斌,等. 车速对车辆段上盖物业振动影响的实测分析[J]. 建筑结构,2015(19):96.
- [5] JONES C J C, HOMPSON D J, PETYT M. A model for ground vibration from railway tunnels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2002, 153(2):121.

(下转第68页)

分区公交体系构建目标,并结合城市轨道交通的发展水平,一二圈层应主要通过加密城市轨道交通线网、改善慢行接驳环境等措施提升城市轨道交通的服务能力和服务品质;三圈层主要通过新建城市轨

道交通线路、加强公交接驳等方式提高城市轨道交通的覆盖范围。

综上分析,本文提出了深圳市 4 类交通发展区的公交发展政策建议,如表 3 所示。

表 3 深圳市 4 类交通发展区的政策建议

交通发展分区	主要圈层	出行强度	城市轨道交通 线网密度	公共体系结构	公交发展路径
城市轨道交通 优势发展区	一圈层以及二 圈层部分区域	高	高	城市轨道交通为主体,道 路公交为补充	提升“轨道+慢行”的出行环境;预留外围区接 入城市轨道交通线网的通道条件
私人小汽车优 势发展区	二圈层	高	一般	城市轨道交通为主体,道 路公交为补充	提升“轨道+慢行”的出行环境;按出行需求方 向加密城市轨道交通
	三圈层	一般	较低	城市轨道交通为骨干,道 路公交为主体	加快城市轨道交通建设,并提升道路公交的服务 水平
道路公交优势 发展区	三圈层	一般	较低	城市轨道交通为骨干,道 路公交为主体	加强道路公交与周边城市轨道交通的接驳服务 功能,并争取引入更多的城市轨道交通线路
交通平衡发 展区	三圈层	一般	较低	城市轨道交通为骨干,道 路公交为主体	提高道路公交与周边城市轨道交通的接驳服务 水平

5 结语

掌握居民出行结构的空

间演变规律有利于客

观认识不同交通方式在综合交通发展中的定位与

作用,科学指导公交发展政策制定。本文从宏观、

微观 2 个层面分析了深圳市 2010 年和 2016 年居民

出行结构的空

间演变特征,发现城市轨道交通、道

路公交、私人小汽车分担率演变在空间上基本呈圈

层差异化分布。基于两步聚类分析法,将深圳市划

分为 4 类交通发展区,在分析现状公交发展政策不

足的基础上提出现阶段公交发展的政策建议。由于

公交发展政策制定涉及因素较多,本文主要是从

现状交通发展评估的角度进行研究并提出政策建

议,下一步应结合用地开发、交通设施发展等规划

因素进行更为深入的研究,以满足公交的近远期发

展要求。

参考文献

[1] 深圳市规划国土发展研究中心. 2010 年深圳市居民出行调查及分析报告[R]. 深圳:深圳市规划国土发展研究中心,2011.

[2] 深圳市规划国土发展研究中心. 2016 年深圳市居民出行调查成果分析报告[R]. 深圳:深圳市规划国土发展研究中心,2017.

[3] 中华人民共和国交通运输部. 公交都市考核评价指标体系(交运发[2013]387 号)[EB/OL]. (2013-07-23)[2019-06-25]. [http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/ysfws/201307/t20130723\\_2978380.html](http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/ysfws/201307/t20130723_2978380.html).

[4] 张泉慧. 两步聚类法在考试作弊答案分类中的应用[J]. 中国考试, 2010(6):34.

[5] 上海市人民政府. 上海市城市交通白皮书[M]. 上海:上海人民出版社,2002:4.

[6] 深圳市人民政府. 深圳市综合交通 2030 发展策略[M]. 深圳:深圳市人民政府,2015:17.

(收稿日期:2019-09-06)

(上接第 62 页)

[6] 洪俊青,刘伟庆. 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击,2006(4):142.

[7] 夏倩,屈文俊. 地铁振动对既有砌体结构影响规律及因素分析[J]. 振动与冲击,2014(6):189.

[8] 王田友,丁洁民,楼梦麟,等. 地铁运行所致建筑振动的传播规律分析[J]. 土木工程学报,2009(5):33.

[9] DEGRANDE G, SCHEVENEL M, CHATTERJEE P, et al. Vibrations due to test train at variable speeds in a deep bored tun-

nel embedded in London[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5):626.

[10] 金浩,刘维宁,周顺华,等. 地铁运行对单层砌体结构的动力影响[J]. 铁道科学与工程学报,2017(2):325.

[11] FORREST J A, HUNT H E M. Ground vibration generated by train in underground tunnels [J]. Journal Sound and Vibration, 2006, 294(4-5):706.

(收稿日期:2019-07-11)