支座参数对跨坐式单轨车辆运行平稳性的影响*

韩霄翰　池茂儒　吴兴文

（西南交通大学牵引动力国家重点实验室，610031，成都//第一作者，硕士研究生）

摘　要　为发展城市跨坐式轨道交通，提高旅客乘坐舒适度，有必要分析轨道梁支座对跨坐式车辆运行平稳性的影响。通过动力学仿真软件建立车桥耦合动力学模型，对轨道梁和支座的车辆动力响应进行仿真计算。利用有限元软件对轨道梁支座耦合振动进行谐响应分析，通过支座刚度和支座跨度与最大车体振动加速度的关系来探究改变支座参数对跨坐式轨道交通耦合振动的影响。研究得出支座参数对跨坐式车辆平稳性的关系曲线，可为指导设计新型轨道梁支座、选择合适的轨道梁支座刚度和支座跨度作参考。

关键词　跨坐式单轨；运行平稳性；动力学仿真；支座刚度；支座跨度；谐响应

中图分类号　U270.1+1；U232

DOI：10.16037/j.1007－869x.2019.04.011

Influence of Bearing Parameters on the Running Stability of Straddle Monorail

HAN Xiaohan，CHI Maoru，WU Xingwen

Abstract　In order to develop the urban straddle monorail and enhance the passenger ride comfort，it is necessary to analyze the influence of track beam bearing on the stability of straddle monorail. The dynamics simulation software is used to establish a vehicle-bridge coupling model for the simulation of track beam and bearing dynamics response. Then，the finite element software is used to analyze the harmonic response of track beam bearing，and the relationship between bearing stiffness，bearing span and the maximum car body vibration acceleration is explored，to study the influence of bearing parameters change on rail transit coupling vibration. Finally，the relationship curve of bearing parameters to the stability of straddle monorail is obtained，which provides a reference for the design of new type track rail beam bearing，and the proper selection of bearing stiffness and bearing span.

Key words　straddle monorail；dynamics simulation；bearing stiffness；bearing span；harmonic response；running stability

Author's address　Traction Power State Key Laboratory，Southwest Jiaotong University，610031，Chengdu，China

* 四川省科技支撑计划项目（2011GZ0090）

0　引言

跨坐式单轨作为新型轨道交通，其经济性好，对地形的要求较低，可适应小半径曲线，故受到越来越多的关注。其独特的胶轮-轨道梁走行部系统给研究传统钢轮-钢轨的科研人员带来了新的研究课题[1]。为改善跨坐式单轨的动力学性能，切实提高跨坐式单轨旅客的乘坐舒适性，以利于跨坐式单轨的普及，对跨坐式单轨动力学指标的提高及耦合振动的研究就变得非常迫切。

目前，对跨坐式单轨车辆的研究主要集中在车辆与轨道梁动力的相互作用上。文献[2]研究现有的车桥振动发现，运行在桥上的列车舒适性受车辆和线路的影响较大。文献[3]中，轨道梁刚度对旅客舒适性的影响关系研究比较完善。文献[4]对轨道梁支座的研究也仅仅限于在满足荷载要求的基础上，对其结构形式、养护安装及经济性等进行考虑，并没有把轨道梁支座放入跨坐式轨道交通耦合大系统动力学中进行考虑。

现有对车辆和轨道梁的研究表明，单轨交通车辆的舒适度受轨道梁的刚度影响很大[3]。而轨道梁支座对车辆的舒适度及平稳性影响的研究还较为匮乏。在我国，跨坐式单轨轨道梁支座刚度和支座中心间的距离（跨度）对平稳性的影响关系尚未确立。在满足荷载要求的情况下，本文通过有限元分析、动力学仿真，分析轨道梁支座刚度变化及跨度变化的影响，得出能保证旅客乘坐舒适性的支座刚度和跨度。

1　跨坐式单轨动力学模型

1.1　车辆动力学模型、车辆与轨道梁耦合振动模型

采用 UM（Universal Mechanism）软件，基于已有的车辆模型及其参数，以及轨道梁、轮胎相关数

据,建立了 3 节车辆模型(如图 1 所示)。

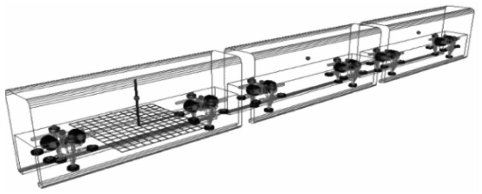


图 1　跨坐式单轨车辆动力学模型

该模型每节车辆简化为 1 个车体和 2 个转向架,共 3 个刚体。考虑每个刚体的沉浮、点头、摇头、侧滚及横移自由度,而忽略其纵向运动,故跨坐式单轨车辆振动分析模型中每节车辆有 15 个自由度。在动力学模型中,车辆匀速运行在轨道梁上,且轮胎与轨道梁表面紧密贴合,稳定轮和导向轮具有初始预应力,能模拟车体、转向架的浮沉、横移、侧滚、点头及摇头振动,也能模拟轮轨径向弹性接触关系,还能模拟导向轮、稳定轮的侧偏特性。

对于转向架,动力学模型将轮胎、空气弹簧、中心销、牵引拉杆、止挡视为为一系列的弹簧和阻尼元件的并联组合体,采用 UM 软件自带的 Spring 模型和 Bushing 模型。Bushing 模型能模拟任何弹性元件,可以设置 3 个方向的刚度及阻尼,以及 3 个方向的旋转刚度及旋转阻尼。车体质心处设置测点,以测定车体振动加速度。

跨坐式单轨车辆与轨道间的接触具有部分汽车轮胎的特征。在预紧力的作用下,驱动轮紧贴轨道梁顶部轨面,导向轮与稳定轮紧贴轨道侧面。驱动轮与轨面的法向接触力见式(1),导向轮、稳定轮与轨道梁侧部的法向接触力见式(2),稳定轮与轨面的法向接触力见式(3)。

$$F_1 = \frac{1}{4}\left[m_1 g\left(1 - \frac{l_{vx1}}{l_{vx}}\right) + m_2 g\right] + k_1 R_1 + c_1 \dot{R}_1 \quad (1)$$

$$F_2 = k_2 R_2 + c_2 \dot{R}_2 \quad (2)$$

$$F_3 = k_3 R_3 + c_3 \dot{R}_3 \quad (3)$$

式中:

m_1——车身质量;

m_2——转向架质量;

F_1——驱动轮与轮道梁顶部间的法向接触力;

F_2——导向轮与侧部轨面间法向接触力;

F_3——稳定轮与轨面的法向接触力;

l_1——车身质心到前空气弹簧距离;

l_2——前后空气弹簧距离;

k_1, k_2, k_3——分别为驱动轮、导向轮、稳定轮的垂向刚度;

R_1, R_2, R_3——分别为转向架质心到驱动轮、导向轮、稳定轮横向相对位移;

c_1, c_2, c_3——分别为驱动轮垂向、导向轮及稳定轮径向阻尼。

1.2　车辆与轨道梁及支座的耦合振动模型

跨坐式单轨交通由车辆、轨道梁、支座及车桥耦合部分组成[1]。对车辆与轨道梁耦合部分进行简化处理。一般认为,在小变形条件下,轮胎具有线性特性,故在建立车桥接触橡胶轮胎力学模型的过程中对轮胎力或力矩都做了线性化的处理,对于轨道不平顺输入 UM 软件的自带激励。然后分别对车辆的空间振动和预应力混凝土轨道梁的空间振动总势能进行推导。根据弹性系统动力学总势能不变原理及形成矩阵“对号入座”法则[6],建立车辆与轨道梁空间耦合振动方程。车桥耦合部分的总势能 $E_{p,d}$ 包括重力势能 $E_{p,g}$、弹性应变能 E_e 和阻尼力势能 E_d,其表达式为:

$$E_{p,d} = E_{p,g} + E_e + E_d \quad (4)$$

采用哈密顿原理,建立多自由度的大型复杂结构车辆系统动力学方程。

$$\delta\int_{t_2}^{t_1}(E_k - E_p)\,dt + \int_{t_2}^{t_1}\delta W\,dt = 0 \quad (5)$$

式中:

E_k——动能;

E_p——势能;

δW——系统保守力和非保守力所做虚功总和,δ 为变分符号。

现用 ANSYS 软件建立跨坐式单轨轨道梁及支座有限元耦合振动模型。轨道梁采用 SOLID45 单元,轨道梁支座采用 combine14 弹簧单元简化。轨道梁支座耦合振动模型如图 2 所示。

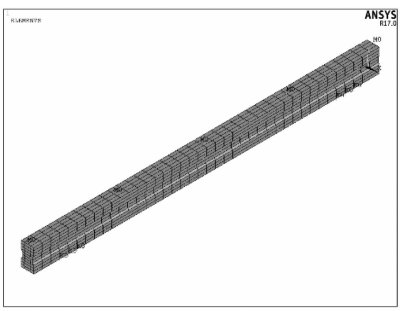


图 2　轨道梁及支座有限元模型

2 支座参数对支座动力响应的影响

建立有限元模型,利用模态分析,得出轨道梁自振特性,分析振动响应随频率的变化关系,通过测点输出支座参数与轨道梁测点处响应的变化关系。根据平稳性计算公式,首先,通过动力响应分析得出车辆的振动加速度;然后,通过谐响应分析得出车体与轨道梁耦合振动频率;最后,在轨道梁和支座满足载荷要求的基础上,可通过振动频率和振动加速度得到车辆的平稳性指标。

2.1 跨坐式单轨轨道梁自振特征分析

模态分析是对轨道梁及支座进行谐响应分析的前提。利用 Ansys 软件进行模态分析,并取前 10 阶模态计算出各阶轨道梁振动的固有频率。第一阶模态位移图如图 3。

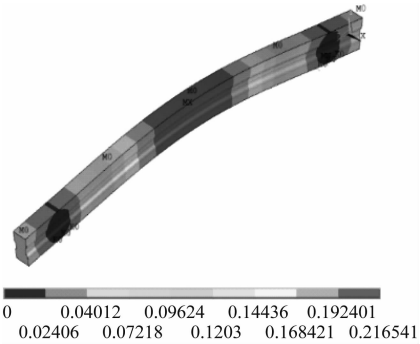


图 3 轨道梁一阶垂向弯曲模态

由模态分析得到,该轨道梁一阶垂向自振频率为 11.5 Hz,对于横向弯曲前 10 阶模态中只出现 1 次,而且自振频率越大,则结构的刚度越大。因此,轨道梁支座系统的垂向抗弯刚度较小,而结构的横向抗弯刚度很大。

2.2 支座刚度对支座动力响应的影响

根据模态分析的结果,对轨道梁动力响应的垂向变形进行动力学仿真,以保证轨道梁垂向位移满足标准。依据《铁路桥梁检定规范》(铁运函[2014]120 号)中的规定[9],预应力混凝土简支梁的垂向挠度限值应为 $L/1\ 800$(L 为计算跨度)。

由文献[3],垂向刚度只影响车辆垂向的加速度和乘坐舒适度,横向刚度只影响车辆横向加速度和乘坐舒适度。根据文献[3],当跨度为 22 m、车辆以 60 km/h 在平直线路上运行时轨道梁支座振动最剧烈。以该工况作为研究工况,进行仿真,可得到驱动轮垂向力如图 4 所示。

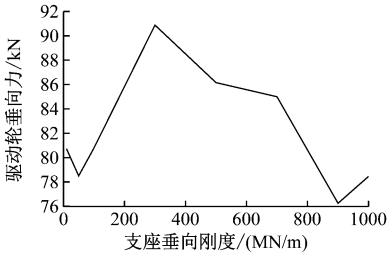
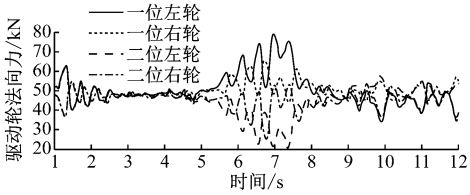
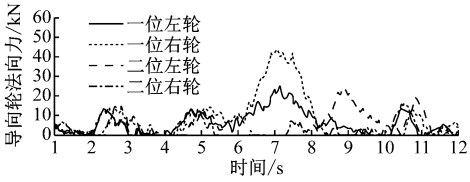


图 4 不同支座刚度下驱动轮垂向力变化

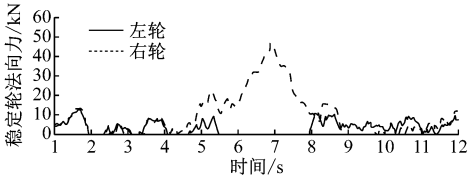
由图 4 可见,当支座刚度为 300 kN/m 时,轮轨接触力达到极值。支座刚度直接影响轨道梁支座的振动频率。根据频率的关系,当支座刚度为 300 MN/m 时,轨道梁支座系统的自振频率和车辆走行部的振动频率相近,二者产生的共振导致该支座刚度的轮轨接触力达到极值。支座刚度为 300 kN/m 时直线工况下的第二节车前转向架的轮轨接触力时程图见图 5。



a) 驱动轮



b) 导向轮



c) 稳定轮

图 5 支座刚度为 300 kN/m 时在直线工况下的轮胎力时程图

为得到在不同振动频率下的响应值与频率的关系曲线,观察峰值频率对应的加速度,对建立的有限元模型进行谐响应分析。通过 Ansys 软件进行谐响应分析。时程图中驱动轮垂向力近似为简谐变化,且最大值不超过 80 kN。谐响应分析进行载荷输入时,输入最大轮胎接触垂向载荷为 80 kN,横向载荷为 50 kN。得到轨道梁和简化车体输入的简谐激振力共振频率约为 10.0 Hz(如图 6 所示)。由

文献[6]可查得铁路车辆车体振动的频率范围。从而可得,在平稳性指标计算中,车体的振动频率值与轨道梁 1 阶垂向固有频率值均为 11.5 Hz。

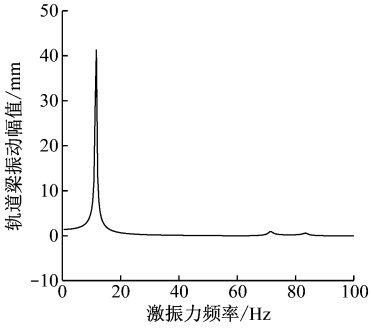
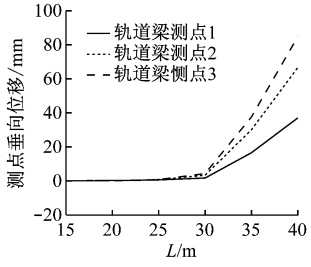


图 6　$L=22$ m 时激振力频率和轨道梁振动幅值关系图

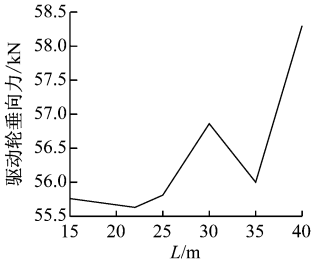
2.3　支座跨度对支座动力响应的影响

轨道梁各截面所受弯矩不同,导致产生的位移大小不同[8]。本研究取轨道梁的中间截面和两端截面的 3 个测点进行分析。

因为当轨道梁受到荷载时,跨中最不利截面的剪力和弯矩会因跨度变化而不同[3],故取不同跨度进行仿真计算。仿真计算结果见图 7。由图 7 可以看出,当跨度大于 30 m 时,轨道梁的位移响应明显增大。



a）测点垂向位移

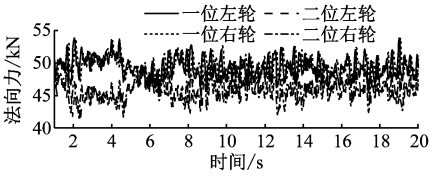


b）驱动轮垂向力

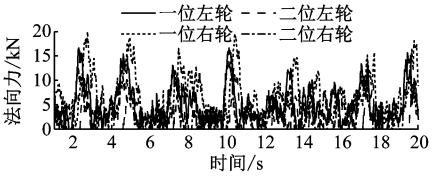
图 7　支座跨度对轨道梁动力响应

取跨度 $L=30$ m,列车以 60 km/h 的速度在平直线路上运行作为仿真研究工况,其动力学仿真计算得到首节车第一个走行部的轮胎力变化情况(见图 8)。

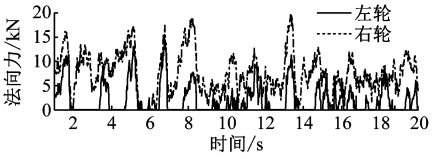
由图 8 可见,各轮垂向力不超过 55 kN,横向力不超过 25 kN。进行谐响应分析,得到激振力频率和轨道梁振动幅值关系图如图 9 所示。由图 9 可知,车体与轨道梁耦合振动频率仍为 10.0 Hz 左右,轨道梁振动幅值较图 6 有所降低。



a）驱动轮



b）导向轮



c）稳定轮

图 8　$L=30$ m 时各轮的法向力时程图

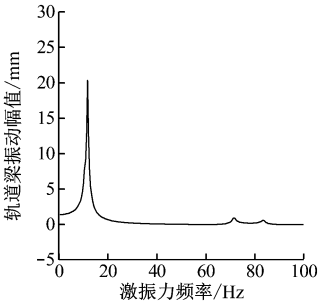


图 9　$L=30$ m 时激振力频率和轨道梁振动幅值关系图

3　支座参数对单轨车辆运行平稳性的影响关系

国际上通常用平稳性指标来评价车辆运行性能。本文基于 Spering 平稳性指标来评价车辆运行平稳性[9]。Spering 平稳性指标 W_z 的经验计算公式为:

$$W_z = 0.896\sqrt[10]{a_f^3/f} \tag{6}$$

式中:

f——振动频率,Hz;

a_f——频率为 f 时的振动加速度,cm/s^2。

可见,支座参数对单轨车辆平稳性的影响主要由 W_z 和 a_f 两方面确定。平稳性等级评定标准如表 1[10] 所示。

表 1　W_z 等级评定标准

平稳性等级	评定	W_z
1 级	优	<2.50
2 级	良好	$2.50\leqslant\cdot<2.75$
3 级	合格	$2.75\leqslant\cdot\leqslant3.00$

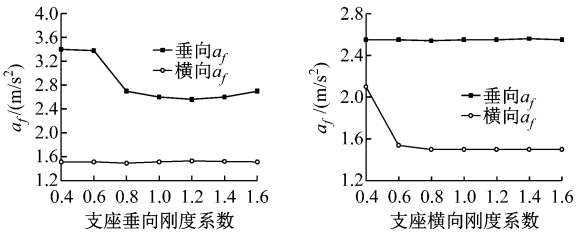
在高速铁路客车动力学性能评定中,参考国内外资料,我国车体振动加速度的舒适度标准可取为:垂向振动加速度不大于 3.63 m/s^2,横向振动加速度不大于 2.45 m/s^2[11]。

3.1　支座刚度系数

在满足载荷强度的前提下,根据前面动力响应分析的结果选择合适工况,分析平稳性与支座参数的关系。根据动力学计算及有限元分析的结果,以支座刚度值 100 MN/m 为基准刚度,在 0.6 ~ 1.5 范围内取 7 个支座刚度系数,作为不同工况进行计算。

根据模态分析和谐响应分析的结果,给轨道梁施加的简谐激励力激发了轨道梁第二阶模态振动。根据轨道梁的二阶模态自振频率可得,车辆的振动频率为 10 Hz 左右。

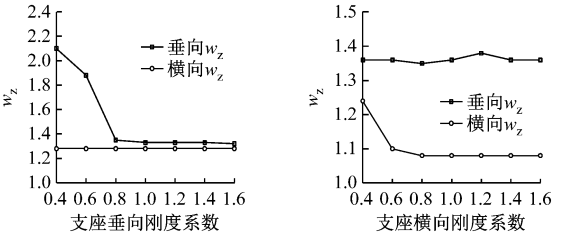
根据动力学仿真结果,列车在平直线路运行时,其车体最大垂向振动加速度出现在列车运行速度取 60 km/h 时。取该工况为最不利工况进行研究。通过动力学仿真试验分别计算出不同支座刚度工况下的 a_f,并由 f 及 a_f 得出 W_z。a_f、W_z 与支座刚度的关系如图 10 ~ 11 所示。



a）垂向刚度系数　　b）横向刚度系数

图 10　支座刚度对车体 a_f 的影响

由图 11 可见:当支座垂向刚度系数为 0.4 ~ 0.8时,车体的垂向 a_f 很大,而在垂向刚度系数大于 0.8 时 a_f 变化不大,随支座垂向刚度的变大,垂向 W_z 和 a_f 都呈现下降趋势;而支座垂向刚度系数对车体横向 a_f 没有影响。按高铁车体振动加速度值评价标准,当垂向刚度系数为 0.4 ~ 0.8 时,垂向 a_f 只能达到合格的标准;当垂向刚度系数为 0.8 ~ 1.6 时,a_f 能达到良好的标准。根据振动关系,当垂向刚度系数小于 0.8 时,支座的自振频率与车体振动频率接近,产生共振,导致振动加剧。



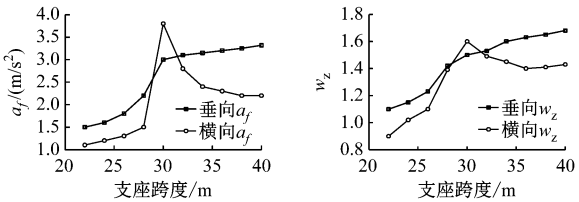
a）垂向刚度系数　　b）横向刚度系数

图 11　支座刚度对 W_z 值的影响

从图 11 中还可以看到:当支座横向刚度系数在 0.6 ~ 1.6 变化时,车体的垂向 a_f 和横向 a_f 基本保持不变,表明此时支座的横向刚度对车体的振动基本没有影响;当横向刚度系数为 0.4 时,横向 a_f 较大;当横向刚度系数在 0.6 以下时,车体横向 a_f 变化虽较大,却均能达到良好的标准。按照平稳性的评价标准,垂向和横向平稳性均能达到优。经分析,仿真试验的轨道梁截面较大,其自身横向刚度也很大,故支座的横向刚度系数在大于 0.6 时对车体振动影响有限;当支座的横向刚度系数小于 0.6 时,支座与车体发生共振,也导致振动加剧,和支座垂向刚度系数小于 8 时情况相同。

3.2　跨度

在 20 ~ 40 m 间取 10 种跨度进行分析。从图 12 可以看出:当 $L<30$ m 时,车体 a_f 评价都为优;当 $L=30$ m 时,车体在出现了最大横向 a_f,且车体垂向 a_f 大幅度增大;当 $L>30$ m 时,车体横向 a_f 又很快减小,而垂向 a_f 缓慢增大。当 $L=30$ m 时,横向 W_z 达到极大值,垂向 W_z 也增大较多;当 $L>30$ m 后,垂向 W_z 趋于平稳。经计算分析,当 $L=30$ m 时,支座的横向弯矩达到极值。而支座垂向弯矩随跨度增大而增大。



a）对加速度影响　　b）对平稳性的影响

图 12　支座跨度对车体加速度和平稳性的影响

根据动力响应曲线,以及支座刚度和跨度同平稳性的关系曲线,可选择合适的支座刚度,并避免将跨度设置为危险跨度。

4 结论

(1) 在动力学仿真中,当 $L > 30$ m 时,轨道梁的垂向位移响应迅速增大,驱动轮的垂向力达到极大值;当 $L > 35$ m 后,驱动轮垂向力又迅速增大。支座垂向刚度约为 300 MN 时,车辆的振动情况最为不利,驱动轮的垂向力达到极大值;当支座垂向刚度为 100 MN/m 和 800 MN/m 时,驱动轮垂向力达到极小值。

(2) $L = 30$ m 时,车辆的横向 a_f 及 W_z 达到极大值,垂向 W_z 随 L 的增大而增大。当 $L = 30$ m 时,轨道梁抗弯性能大幅度减弱。因此在实际工程中应该避免将跨度设置在 30 m 左右。

(3) 支座横向刚度基本对车体垂向和横向平稳性无影响。当横向刚度系数小于 0.6 时,对车体横向平稳性影响较大。支座垂向刚度对单轨车辆垂向平稳性影响较大。如垂向刚度系数低于 0.8,则车辆垂向平稳性较差,如垂向刚度系数高于 0.8,车辆垂向平稳性趋于稳定。

参考文献

[1] 赵甲荐. 胶轮轨道列车-桥梁系统空间振动响应研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.

[2] 刘羽宇. 跨坐式单轨交通车辆与轨道梁的动力相互作用研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.

[3] 刘国. 跨坐式单轨交通车桥系统振动影响因素及乘坐舒适性研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[4] 郭林. 跨坐式轻轨 PC 梁承拉柱面支座受力性能分析[D]. 成都:西南交通大学, 2013.

[5] 马继兵,蒲黔辉,夏招广. 跨坐式单轨交通系统车辆的乘坐舒适性性能测试与分析[J]. 都市快轨交通,2006,19(6):46.

[6] DIANA G, CHELI F. Dynamic interaction of railway systems with large bridge [J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 18(2):100.

[7] YAU J D, YANG Y B, KUO S R. Impact response of high speed rail bridges and riding comfort of rail cars[J]. Engineering Structure,2000,21(1):836.

[8] 王浩. 重庆轻轨应急轨道梁结构分析与研究[D]. 北京:北京交通大学. 2008.

[9] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥梁检定规范:铁运函[2004]120 号[S]. 北京:中国铁道出版社,2004.

[10] 任尊松. 车辆动力学基础[M]. 北京:中国铁道出版社,2009.

[11] CHANG Hun Lee, CHUL Woo Kim, et al. Dynamic response analysis of monorail bridges under moving trains and riding comfort of trains [J] Engineering Structures, 2005, 27(14):1999.

(收稿日期:2017-09-29)

(上接第 41 页)

4 结语

结合市郊铁路项目背景及功能定位,借鉴国内外市郊铁路设计及运营经验,论述了市郊铁路行车组织关键性问题,包括与 2 号线的衔接方式、列车最高运行速度、行车组织模式,以及线路的互联互通等问题,为其它市郊铁路设计提供借鉴。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2014.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通技术规范:GB 50490—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[3] 中铁二院工程集团有限责任公司. 郑州市轨道交通 2 号线一期工程初步设计[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2013.

[4] 北京城建设计发展集团有限公司. 郑州市城郊铁路工程可行性研究报告[R]. 北京:北京城建设计发展集团有限公司,2014.

[5] 北京城建设计发展集团有限公司. 郑州市城市轨道交通 9 号线二期工程总体设计[R]. 北京:北京城建设计发展集团有限公司,2017.

[6] 朱文明. 上海轨道交通 9 号线运营组织研究[J]. 城市轨道交通研究,2012(9):97.

[7] 郑翔. 佛山轨道交通线路及运营组织拆解方案研究[J]. 现代城市轨道交通,2014(3):76.

[8] 单宁. 上海轨道交通 2 号线运营组织探讨[J]. 地下工程与隧道,2005(3):1.

[9] 孙海燕. 广州地铁 14 号线快慢车运营组织研究[J]. 科技传播,2016(7):206.

[10] 温旭丽. 大城市市郊轨道交通运营组织模式研究[J]. 现代城市研究,2012(4):72.

(收稿日期:2018-02-22)