DOI: 10.3901/JME.2019.04.118

牵引与桥梁上拱激励下城轨列车动力学性能研究*

杨建伟^{1,2} 刘 传^{1,2} 王金海^{1,2,3} 孙 冉^{1,2} 祝赫锴^{1,2}

(1. 北京建筑大学城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室 北京 100044;

2. 北京建筑大学机电与车辆工程学院 北京 100044;

3. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 城轨列车的实时变速工况是极为普遍的运行状态,若仅以匀速工况替代,无法得到贴近实际的研究结论。为此,提出一种新的考虑内外耦合激励的动力学模型。建立单节车体模型及编组城轨列车模型,综合考虑牵引工况以及城轨列车通过高架线路时的桥梁徐变上拱长波不平顺,研究在该内外耦合激励下的车辆动力学性能。基于微元法思想,计算得到城轨列车牵引工况下的电机转矩及基本阻力转矩与运行时间的关系,得到合理的综合工况下的运行状态。研究结果表明,在变速工况下车辆的轮对磨损数、垂向平稳性指标及轮重减载率均有所上升;在桥梁长波不平顺激励下,车辆垂向平稳性指标有所下降、轮重减载率升高,而对车辆横向平稳性指标影响较小。

关键词: 城轨列车; 变速工况; 徐变上拱; 动力学性能

中图分类号: U270

Research on Dynamic of Urban Rail Vehicle of Variable Speed and Long-wave Excitation Conditions

YANG Jianwei^{1,2} LIU Chuan^{1,2} WANG Jinhai^{1,2,3} SUN Ran^{1,2} ZHU Hekai^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Performance Guarantee on Urban Rail Transit Vehicles,

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044;

2. School of Mechanical-electronic and Automobile Engineering,

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044;

3. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Real-time variable speed conditions of urban rail trains are extremely common operating conditions, if only to uniform conditions instead, it cannot get a satisfactory conclusion. To this end, a new dynamic model considering coupled internal and external excitation is proposed. Based on the traction condition and the bridge creep on the elevated rail line, the vehicle dynamics performance under the coupling of the internal and external are studied. Based on the idea of micro - element method, the relationship between the torque and the running torque of the traction condition of the city rail is calculated, and the running condition is obtained under the reasonable comprehensive condition. The results show that the number of wheel wear and the vertical stability of the vehicle are increasing under the variable speed condition. Under the long wave irregularity of the bridge, the vertical stability index of the vehicle decreases, while the lateral stability Indicators have less impact.

Key words: urban rail vehicle; variable speed condition; concrete creep; dynamic performance

0 前言

现如今,城市的迅速发展,城市轨道交通日益成为都市人出行的首选。城轨列车的运行平稳性及安全性成为轨道交通行业内研究的重要方向

之一。本文以某型城轨列车为对象,对其单节车体及六节编组列车的临界速度、磨损、平稳性及安全性进行了研究。在研究过程中,综合考虑城轨列车的牵引工况及高架桥梁长期徐变上拱而产生的激励。通过分析得到该内外激励对车辆动力学的影响情况,研究结果可以作为优化行车品质的理论依据。

国内外学者在对高速列车及地铁列车动力学方

* 国家重点研发计划课题资助项目(2016YFB1200402)。20180520 收到初稿,20180920 收到修改稿

面进行了诸多研究,且取得了丰硕的结果。GARCIA 等^[1]使用对不同结构的径向转向架与普通转向架的动力学性能进行了研究。POLACH^[2]分析了一种等效轴箱定位刚度在自导向转向架中的应用,并优化了其在车辆动力学方面的性能。北京建筑大学孙晨龙等^[3]深入研究了减振器及车轮磨耗对高速列车动力学性能的影响。北京交通大学李慧乐等^[4]主要研究了车辆与桥梁耦合的动力学性能分析,该团队通过建立模型,并融入弹性有限元理论得到了桥梁单元动应力,进而提出了列车与桥梁之间的动力相互作用。西南交通大学的李永乐等^[5]研究了刚柔耦合下的联合车桥耦合动力学性能研究,通过建立耦合的有限元与多体动力学模型,分析了车辆的安全性、舒适性及桥梁行走性。相比于传统列车恒定速度的研究,对于城轨列车变速的整体动力学影响方面研究并不很多。西南交通大学学者曹亚博^[6]建立了重载列车-轨道的动力学耦合模型,研究了列车变速运行时的动态行为,得到了牵引制动时的车轨动态作用力。由于牵引工况与惰行工况的频繁转换是城轨列车最突出的工作特点,在对城轨列车进行仿真分析时,需要将该工况考虑进去。因此,不能在仿真时直接赋予车辆一个整体速度,而需要考虑变速工况。

本文首先建立单节车辆与六节完整编组列车,并分别验证其临界速度,对比分析其结果。其次,通过微元法得到了电机牵引工况下的转矩一时间曲线,将该工况作为车辆内部激励进行研究,同时考虑列车通过桥梁时的徐变上拱长波不平顺、高架线轨道谱两种外部激励。最后,分析了不同因素对列车车磨耗、平稳性及安全性的影响。

1 城轨列车仿真模型建立

根据车辆系统拓扑图(图 1),建立了某型城轨列车整车动力学模型(图 2)。单节车体模型包括四条轮对、八个锥形叠层橡胶弹簧轴箱定位、两个构架和

图 1 城轨列车系统拓扑图

车体组成,共 50 自由度。整车模型通过车钩将两单节车体模型连接在一起,六节编组的列车模型共 330 自由度。

图 2 城轨列车动力学模型

2 非线性临界速度分析

2.1 计算方法

临界速度分为线性以及非线性临界速度两种方式,其中线性临界速度普遍比非线性临界速度高出 10%~28%^[7]。因此,对临界速度的计算只需要对非线性进行仿真。

非线性临界速度仿真需提供车辆一个初始速度,同时给予车辆恒定的减速度,让车辆通过一小段的横向轨道激励,随后取消激励,使其在平滑直线上继续减速运行。判断临界速度的方法为,在后处理中查看轮对横移量是否收敛,轮对横移量曲线的最小收敛时的速度即为车辆非线性临界速度。

2.2 结果分析

仿真选取远远大于实际运行速度的 210 km/h 作为模型初始运行速度。图 3 所示为单节车体的仿真结果,图 4 为六节编组全列车仿真结果。

图 3 单节车模型非线性临界速度

从图 3 可以看出,单节车体模型中四个轮对的横向偏移量在 ± 15 mm 以内^[8],各轮对的横移量收敛速度基本相同。表明对于单节车体模型来说,其非线性临界速度约为 206 km/h。

图4 各车厢横移量收敛速度

如图4所示,其中图4a~4f分别为六节编组的1~6车。由于多节车辆编组运行,每个轮对的临界速度相对于单节车模型均有不同。六节编组列车的3、4车收敛速度相对较快,其临界速度为201.5 km/h。虽然较其余四节车辆临界速度更高,但相对于单节车模型依然略有下降。而列车两端的车厢收敛速度较慢,其表征的非线性临界速度也非常相近,约为160 km/h。

对于编组列车而言,除轮轨相互作用以及悬挂参数对车体动力学的影响以外,车间相互作用与车钩缓冲装置密切相关。城轨列车在运行过程中,车间的相对位移和相对速度决定了车钩力的大小和方向。与此同时,由于车钩将相邻两节车体连接在一起,二者在运行当中也相互影响。因此,通过车钩力来分析列车车间相互作用是非常有必要的。

如图5所示为车钩力与车钩力的收敛时间。从中可以看出,车钩力最小的为3号车钩,最大的为1号车钩。其中1号车钩的车钩力约为12 kN,5号车钩的车钩力约10 kN,其余三个车钩力均小于10 kN。其数值相差约16.6%。而车钩力的大小可以直接反映出每一节车厢受到其他车厢影响的程度,也

图5 车钩力及车钩力收敛时间

正因为如此,2、3号车钩以及3、4号车钩相连的3车和4车所受到的影响最小,其车钩力收敛稳定的时间也最短,其非线性临界速度更高。

通过单节车模型及全列车的仿真结果对比分析可以说明,城轨列车临界失稳速度的确定需要使用全列车的模型进行计算,若仅使用单车体模型进行计算,其结果也会偏离实际情况甚远。在这种情况下,该型号的城轨列车非线性临界速度实际应为160 km/h。

3 城轨列车激励分析

3.1 变速激励

城轨列车在实际运营当中的行驶速度是实时变化的,包括两个部分:一是电机提供的一个牵引转矩;二是由于轮轨接触摩擦产生的各种阻力及附加阻力。在仿真过程中需要对不同的变速激励进行考虑。在本研究中,使用时变转矩来模拟城轨列车的牵引工况,并要求得牵引转矩以及阻力矩。

列车的运行中影响基本阻力的因素非常复杂,在实际运用当中很难用纯理论公式进行计算。因此,通常使用大量试验总结出的经验公式作为基础,采用单位基本阻力等于列车运行速度的一元二次方程形式表达^[9]。通常城轨列车的基本运行阻力如式(1)所示。再通过式(2)将基本阻力换算成扭矩。

$$W = 2.27 + 0.00156v^2 \quad (1)$$

$$T_r = \frac{Wr_w m_w g}{1000} \quad (2)$$

式中, W 为列车运行基本阻力, N/kN; m_w 为轮对负载质量, kg; r_w 为轮对名义滚动圆半径, m; T_r 为基本阻力对轮对作用后产生的阻力矩, N·m。

城轨列车会经历频繁的加速过程,在列车牵引的同时,还需要克服基本阻力所做的负功。城轨列车采用交流异步电机作为驱动,工作转速区间如图6所示分为两部分:恒转矩区及恒功率区。

图6 电机牵引特性曲线

当电机工作在恒转矩区时,电机转矩不变,转

速工作于电机启动转速与同步转速之间;当电机工作在恒功率区时,电机功率不变,电机转速在同步转速以上,并且转矩与转速成反比例关系。因此,可以将牵引转矩描述为一个分段函数式(3)

$$T_d = \begin{cases} T_r & n \leq n_s \\ \frac{9550P_r}{n} & n > n_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_r 为电机额定转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; P_r 为电机额定功率, kW ; n_s 为电机同步转速, r/min 。

在该工况下,列车受到牵引转矩 T_d 作用而加速,同时也受到阻力矩 T_r 的作用,列车此时的减速度

$$a = \frac{(T_d - T_r)}{r_w m_w} \quad (4)$$

将式(1)~(3)代入式(4)中可得到式(5)、(6)。

电机工作在恒转矩区时,列车加速度可表示为

$$a = \frac{\left[T_r i_g - \frac{(2.27 + 0.00156v^2)r_w m_w}{1000} \right]}{r_w m_w} \quad (5)$$

电机工作在恒功率区时,列车加速度可表示为

$$a = \frac{\left[\frac{9550P_r i_g}{n} - \frac{(2.27 + 0.00156v^2)r_w m_w}{1000} \right]}{r_w m_w} \quad (6)$$

同样使用微元法,通过如图7所示的流程图,可得到牵引工况下的合转矩时间历程关系。

图7 合力矩-时间历程计算程序

3.2 轨道激励

轮轨系统的激励会使得列车在运行过程当中产生一定的振动。轨道不平顺在对列车系统的激励是一种强迫振动,这种振动对于列车的运行性能有非常明显的影响作用。这些不平顺主要是随机产生的,即为非确定性激励,在动力学仿真时,可以将

耦合的轨道不平顺^[9]分解为高低不平顺、方向不平顺等。

根据线路条件,对于轨道不平顺激励输入采用高架地铁无砟轨道谱^[10]。该高架地铁无砟轨道谱采用七参数模型作为拟合模型,通过改进的 Levenberg-Marquardt 方法进行拟合,最终得到其功率谱密度函数,如式(7)所示

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G} \quad (7)$$

式中, $S(f)$ 为功率谱密度($\text{mm}^2 \cdot \text{m}$); f 为空间频率($1/\text{m}$); A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 为七个轨道谱特征参数。

功率谱密度函数中的各系数如表1所示。

表1 德国高速高干扰轨道谱参数值

参数	左轨高低	右轨高低	左轨轨向	右轨轨向
A	0.006 390	0.007 274	0.004 441	0.003 697
B	-0.019 168	0.027 833	-0.228 750	0.451 391
C	0.019 576	0.009 484	0.183 941	0.008 160
D	-0.114 000	-0.141 457	-0.094 515	-0.176 151
E	0.008 237	0.010 868	0.003 988	0.013 327
F	-0.000 138	-0.000 253	0.000 026	-0.000 367
G	0.000 008	0.000 007	0.000 028	0.000 006

3.3 桥梁激励

无砟轨道桥梁徐变效应^[11]指的是在无砟轨道建设完成后,桥梁工程主梁产生徐变变形。混凝土在应力作用的当时产生瞬时弹性应变 ε_d 。随载荷作用时间的延续(t),徐变变形 $\varepsilon_c(t, \tau)$ 不断增长,待恢复后仍有残留的永久变形,称流动变形 ε'_c 。根据规定,桥梁长期徐变限值为 10 mm ^[12]。

对于高架线路城轨列车,列车长时间运行在连续的无砟轨道桥梁上。由于城轨列车的高架线路单跨跨度小,徐变终值较大。跨径 L_b 分别为 25 m 和 30 m ;弹性模量 E_b 为 35 GPa ;徐变终值约为 8.7 mm 以及 8.3 mm 。

因此,需要在仿真时加入桥梁徐变上拱而产生的长波不平顺,如图8所示。

图8 桥梁徐变上拱引起的轨道长波不平顺

4 城轨列车动力学响应分析

以某型城轨列车为例,使用电机转矩参数对车辆进行牵引,最终得到在考虑基本阻力情况下的城轨列车牵引工况曲线如图 9 所示。其最高运行时速为 80 km/h,在牵引工况下平均时速为 57 km/h。本研究的牵引工况均基于该加速曲线进行分析及研究。

图 9 城轨列车牵引工况速度曲线

4.1 磨耗分析

在牵引工况下,对编组列车通过有长波不平顺及无长波不平顺激励的轨道进行仿真。图 10 为轮对总磨耗数曲线;图 11 为轮对总磨耗功率曲线;图 12 为总磨耗功率的包络曲线。

图 10 轮对磨耗数

从图 10 中可以看出,电机工作在恒转矩区时,在有桥梁不平顺激励情况下,轮对总磨耗数从 12 N 缓慢上升至 16 N,其在恒转矩区末尾达到最高值。在无桥梁不平顺时,轮对总磨耗数始终保持在 10~16 N 范围内平稳波动;电机在进入恒功率区后,磨耗数快速下降至 2 N 以下。加速过程中,轮对总磨耗数出现许多尖点,其原因是轮对通过桥梁上拱转

角时的冲击。当车辆加速度减小并进入最终的匀速阶段以后,磨耗数达到最小值,在恒转矩区的磨耗数最大值是在恒功率区的磨耗数最大值的 3 倍。

图 11 轮对磨耗功率

图 12 磨耗功率包络图

从图 11 中可以看出,车轮轮对总磨耗功率呈现先上升,后下降的趋势。在转矩恒定时,随速度增高,磨耗功率快速上升;当电机进入恒功率区,电机转矩开始下降,虽然车辆运行时速继续升高,但磨耗功率逐渐下降。其证明车轮的磨耗趋势与传递到车轮上的牵引转矩直接相关。

从图 12 的中可以看出,在长波不平顺激励下,车轮轮对总磨耗功率的波动幅值较无长波不平顺激励时更大。在有桥梁激励下,其曲线的方差为 1 436、标准差为 38,而无桥梁激励的曲线方差为 1 107、标准差为 33。桥梁徐变上拱产生的长波不平顺激励会对车轮轮对的运行状况产生显著影响,会造成更为剧烈的轮轨磨耗。

4.2 横向及纵向平稳性分析

平稳性的评判要同时考虑振动的加速度、振动持续时间、振动幅度、振动频率和人体对振动感应的灵敏程度等。Sperling 平稳性指标是通过大量试验而规定的用于评判车辆本身的运行品质和乘坐舒

适度,运行品质由车辆自身的参数决定,该指标也是 GB5599-85 中所规定的运行平稳性评判标准。

平稳性指标 W_s 可以表示为^[13]

$$W_s = 0.896 \sqrt{\frac{a^3}{f} F(f)} \quad (8)$$

式中 a ——振动加速度, cm/s^2 ;

f ——振动频率;

$F(f)$ ——考虑人体对各种频率振动敏感程度的修正系数。

对于 Sperling 指标,其 $W_s \leq 2.5$ 为优秀等级、 $W_s \leq 2.75$ 为良好等级、 $W_s \leq 3.0$ 为合格等级。

4.2.1 垂向平稳性分析

图 13 是在匀速工况下,桥梁长波不平顺对垂向平稳性系数的影响。图 14 是在牵引工况下,桥梁长波不平顺对垂向平稳性系数的影响。图 15 是在有桥梁长波不平顺激励下,不同速度工况的垂向平稳性指标对比,图 16 是无桥梁长波不平顺激励下,不同速度工况的垂向平稳性指标对比。

图 13 匀速工况下桥梁激励对垂向平稳性的影响

图 14 牵引工况下桥梁激励对垂向平稳性的影响

从图 13 中可以看出,在匀速工况下,考虑桥梁长波不平顺激励时,车辆的垂向平稳性系数均低于无桥梁激励的情况。可见,桥梁的徐变上拱激励对

车辆垂向平稳性指标是有一定的优化作用,桥梁长波不平顺对平稳性指标改善的效果不超过 16.5%。从图 14 中可以看出,在列车行驶速度较低时,桥梁长波不平顺激励会提升垂向平稳性;列车进入到 30~40 km/h 时速区域时,平稳性数值有所下降,从叠加的牵引速度曲线图中可以发现,是由于电机从恒转矩区进入恒功率区所造成的影响,电机转矩的下降造成垂向平稳性有所优化;车速超过约 40 km/h 后,电机进入恒功率区,电机牵引扭矩所造成的影响逐渐超过桥梁长波不平顺能提供的有益帮助,随着速度的增加,平稳性指标逐渐升高。

图 15 不同工况下长波不平顺对垂向平稳性指标影响

图 16 不同工况下长波不平顺对垂向平稳性指标影响

从图 15、16 中均可以看出,牵引工况下的平稳性指标曲线均在匀速工况下平稳性指标曲线的上方。牵引工况下的垂向平稳性指标比匀速工况下的垂向平稳性指标高 2%~20%。由此可以证明电机的牵引转矩对垂向平稳性指标有不利影响。

4.2.2 横向平稳性分析

图 17 是四种不同混合工况和激励下的横向平稳性指标对比。从图 17 当中可知,若有桥梁长波不平顺激励下,牵引和匀速工况对车辆横向平稳性指标的影响较小。在无长波不平顺激励时,牵引工况相对匀速工况其横向平稳性指标略有优化,优化幅

度在 11% 以内。

图 17 横向平稳性指标

4.3 安全性分析

4.3.1 轮重减载率分析

图 18 和图 19 分别为城轨列车各个不同速度的匀速工况和牵引工况下, 不同外部激励对城轨列车轮重减载率的影响。从图 18 可以看出, 在各个不同速度下, 其轮重减载率均未超过限值, 并且轮重减载率会随着速度上升而增加。而在有桥梁长波激励时, 列车在各个时速下的轮重减载率均高于无桥梁长波激励的情况。如图 19 所示亦可以证明, 在有桥梁长波激励时, 列车的轮重减载率在整个牵引过程

图 18 匀速工况下轮重减载率

图 19 牵引工况下轮重减载率

当中均大于无桥梁长波激励的情况。并且从牵引初期逐渐增大, 最后稳定。

对比图 18 和图 19, 可以看出在牵引过程当中, 轮重减载率较匀速工况下更小。其主要原因在于轮周牵引力会对车辆横向稳定性有利影响, 也同样验证了在第 4.2 节当中的结论。

4.3.2 脱轨系数

如图 20 所示为从 0~80 km/h 匀速行驶的整个牵引过程中, 城轨列车脱轨系数曲线。从图中可以看出, 两种工况下列车的脱轨系数基本重合。由此可以认为, 桥梁长波激励并不会对列车的脱轨系数有所影响。

图 20 桥梁长波激励下脱轨系数

5 结论

(1) 在计算城轨列车的非线性临界速度时, 若使用单车体模型其计算结果与编组列车模型结果相差较大, 而全列编组列车的临界速度更接近与实际情况。因此, 在仿真时需使用全列车模型进行计算, 更符合实际情况。

(2) 牵引工况下, 电机恒转矩区的轮对磨耗较恒功率区的磨耗更为明显; 轮对磨耗功率的峰值出现在电机转速达到同步转速的时刻, 且磨耗功率呈现先上升后下降的趋势。

(3) 桥梁长波不平顺及牵引工况可在一定程度上优化列车垂向平稳性; 桥梁长波不平顺对横向平稳性指标影响较小, 而电机牵引工况对横向平稳性影响较大。

(4) 城轨列车轮重减载率受桥梁长波不平顺的影响较大; 在牵引工况下, 桥梁长波激励对列车脱轨系数影响较小。

参考文献

- [1] GARCIA J F, OLAIZOLA X, MARTIN L M, et al.

- Theoretical comparison between different configurations of radial and conventional bogies[J]. Foreign Rolling Stock, 2000, 33(4): 233-259.
- [2] POLACH O. Curving and stability optimization of locomotive bogies using interconnected wheelsets[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 2004, 41: 53-62.
- [3] 孙晨龙, 周素霞, 秦震, 等. 车向纵向减振器特性参数对高速动车组动力学性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24): 170-176.
- SUN Chenlong, ZHOU Suxia, QIN zhen, et al. Research on influence of the characteristic parameter of inter-vehicle longitudinal damper on dynamic performance of high speed EMUs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24): 170-176.
- [4] 李慧乐, 夏禾, 张楠, 等. 基于车桥耦合动力分析的钢桥疲劳损伤与剩余寿命评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(1): 104-110.
- LI Huile, XIA He, ZHANG Nan, et al. Assessment of fatigue damage and remaining life of steel bridges based on train-bridge coupling dynamic analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1): 104-110.
- [5] 李永乐, 强士中, 廖海黎. 风-车-桥系统空间耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 61-64.
- LI Yongle, QIANG Shizhong, LIAO Haili. 3-D coupled vibration of wind-vehicle-bridge system[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 61-64.
- [6] 曹亚博. 重载货车系统动力学建模及仿真分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- CAO Yabo. Dynamics modeling of heavy haul wagon system and simulation analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [7] 秦震, 周素霞, 孙晨龙, 等. 减振器特性参数对高速动车组临界速度的影响研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 138-144.
- QIN Zhen, ZHOU Suxia, SUN Chenlong, et al. Influence of hydraulic shock absorber characteristic parameters on the critical speed of high-speed trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 138-144.
- [8] 曾京, 郭平波. 减振器橡胶节点刚度对铁道客车系统临界速度的影响[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 94-98.
- ZENG Jing, WU Pingbo. Influence of the damper rubber joint stiffness on the critical speed of railway passenger car system[J]. China Railway Science, 2008, 29(2): 94-98.
- [9] 王月明. 城市轨道交通列车制动[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- WANG Yueming. Braking performances of urban rail trains[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [10] KALKER J J. Survey of wheel-rail rolling contact theory[J]. Vehicle System Dynamics, 1979, 5: 317-358.
- [11] 何越磊, 李再伟, 盛春玲, 等. 不同地铁线路条件下轨道谱的特性分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(7): 99-104.
- HE Yuelei, LI Zaiwei, SHENG Chunling, et al. Characteristic analysis of track spectrums of different subway line conditions[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(7): 99-104.
- [12] 刘沐宇, 卢志芳. 混凝土桥梁时变性和不确定性下的收缩徐变分析[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(10): 116-120.
- LIU Muyu, LU Zhifang. Shrinkage creep analysis of concrete bridges with time variation and uncertainty considered[J]. Journal Huazhong Univ. of Sci. & Tech, 2011, 39(10): 116-120.
- [13] 向俊, 赫丹, 曾京. 高速列车作用下不同类型无砟轨道振动响应分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 29-35.
- XIANG Jun, HE Dan, ZENG Jing. Investigation on dynamic responses of different type ballastless tracks under high-speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 29-35.
- [14] 戚壮, 李芾, 黄运华, 等. 高速动车组空气弹簧垂向动态特性研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 129-136.
- QI Zhuang, LI Fu, HUANG Yunhua, et al. Study on the vertical dynamic characteristics of air spring used in high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 129-136.

作者简介: 杨建伟, 男, 1971年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆系统失效建模和安全性分析、监测技术与故障诊断、车辆系统动力学及控制。
E-mail: yangjianwei@bucea.edu.cn