

文章编号:1001-8360(2010)06-0096-05

基于虚拟样机的机车黏着控制研究

姚 远, 张红军, 罗 赞, 金鼎昌

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 为了抑制轮对空转并最大限度利用轮轨黏着能力, 需要开发基于虚拟样机和现代控制理论的机车黏着控制技术。建立了大功率机车牵引列车及电气牵引传动系统的机电一体化动力学模型, 考虑到了大蠕滑率时轮轨黏着负斜率特性、电机磁饱和及转矩机械特性, 对机车驱动过程进行仿真研究。提出通过检测同一转向架内不同轴之间的最大角速度差和角加速度差, 实时计算轮轨黏着度, 并采用模糊控制策略的黏着控制方法。仿真结果表明: 在不同轨面及运行工况下, 黏着控制使得轮轨有效黏着系数保持在黏着峰值, 提高了机车的牵引性能; 轮对的蛇行运动使得黏着控制中产生波动现象, 波动频率与蛇行运动频率一致; 针对不同结构参数机车和运行工况, 黏着控制参数需要优化以达到最大的轮轨黏着利用率。

关键词: 黏着控制; 黏着度; 大功率机车; 虚拟样机

中图分类号: TP273. 4; U260. 11 **文献标志码:** A doi:10. 3969/j. issn. 1001-8360. 2010. 06. 016

Adhesion Control of Locomotive Based on Virtual Prototype

YAO Yuan, ZHANG Hong-jun, LUO Yun, JIN Ding-chang

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to restrain idling of the wheel-set and to maximize the utilization of the wheel-rail adhesive capacity, we need to develop adhesion control technology of locomotive on the basis of the virtual prototype and modern control theory. The electro-mechanic dynamic model of the train system consisting of the electric system and high power hauling locomotive is established and the driving process is simulated. The model considers the negative slope characteristic of wheel-rail adhesion at large slippage rates, magnetic saturation and torque mechanical property of the pulling motor. The adhesion control method is put forward, by which the maximum difference of the angular velocities and that of the angular acceleration rates of different axes in the same bogie are detected, the real time wheel-rail adhesiveness is calculated and the fuzzy control strategy is applied. The simulation results are as follows: Adhesion control keeps the effective wheel-rail adhesive coefficient at its peak value so that the locomotive traction performance is improved with different rail surfaces and under different running conditions; hunting of wheel-sets causes fluctuations to adhesiveness, the fluctuating frequencies being identical to the hunting frequencies; the adhesion control parameters need to be optimized so as to achieve the maximum utilization ratio of wheel-rail adhesion with locomotives of different structural parameters and under different operating conditions.

Key words: adhesion control; adhesiveness; high-power locomotive; virtual prototype

随着铁路高速及重载运输的发展, 机车牵引功率的增加受到轮轨间的有效黏着利用限制, 如何充

分利用轮轨间的黏着力是一项具有实际工程价值的课题。当轮轨滑动量较大时, 轮轨黏着存在不稳定区, 引起车轮空转从而导致黏着力降低和轮轨损伤等一系列的问题。为了充分利用轮轨牵引力而又不出现空转现象, 机车及高速动车都装有黏着控制装置。黏着控制包括两个问题, 一是抑制车轮空转, 二

收稿日期: 2009-05-25; 修回日期: 2010-11-4
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075339); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2008TPL_T05)
作者简介: 姚 远(1983—), 男, 安徽宿松人, 讲师, 博士。
E-mail: yyuan8848@163. com

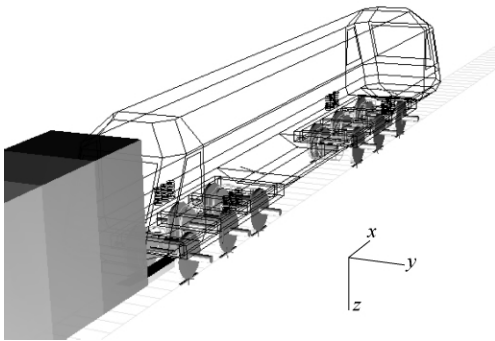
是最大限度地利用轮轨黏着力,因此控制机车黏着力保持在峰值稳定地运行是机车黏着控制的目标。传统的黏着装置采用的是校正法,即检测到轮对打滑时,降低牵引电机力矩从而恢复黏着。而实际上,很难确定合适的电机力矩降低值以达到轮轨最大黏着,因而需要先进的控制策略来达到轮轨黏着最优化。机车作为复杂的机电系统,由于轮轨间强的时变非线性特征,基于精确的数学模型的控制方法难以满足要求。文献[1-3]提出了采用估计轮轨蠕滑力,通过计算黏着曲线的斜率识别黏着峰值的方法;文献[4-5]提出加速度微分空转识别并采用模糊控制等一系列轮轨黏着控制方法。这些方法大都基于简单的单轮力学模型,由于机车轮对一系定位刚度、传动系统悬挂刚度、扭转刚度、轮对蛇行和轮轨不平顺引起系统的激励,简化力学模型并不能反映黏着的动态特征,有些控制方法并不适用于实际工程。

本文通过多刚体动力学软件 SIMPACK 建立列车系统动力学模型,利用 SIMULINK 建立电气传动及控制模块,黏着控制采用模糊控制策略,组建机车机电、控制一体化系统的虚拟样机,可以很好地对机车黏着控制进行仿真研究。

1 机械系统模型

1.1 列车系统模型

建立机车牵引 10 节车辆的列车系统动力学模型,包括机车完整的传动系统^[6],如图 1 所示。考虑列车



牵引重量,单节车辆利用沿轨道方向单自由度质量块模拟,通过车钩力连接,机车及车辆轴重分别为 23 t 和 21 t。机车为 C₀-C₀ 轴式,单轴功率为 1 600 kW,传动装置为承载式齿轮箱整体式结构,采用抱轴悬挂方式,一端通过吊杆悬挂在构架横梁下面,如图 2 所示。模型中包括电机、齿轮箱、电枢、吊杆、小齿轮和大齿轮(轮对一体),其自由度见表 1。大功率机车传动系统电枢与小齿轮间采用挠性联轴器连接,其扭转刚度为 13.6 MN·m/rad。

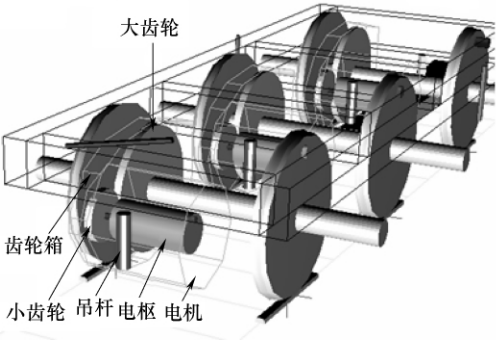


图 2 传动系统动力学模型

考虑到列车运行环境,列车运行时受到基本阻力和坡道附加阻力。当机车牵引力与阻力平衡时,列车匀速运行。列车单位重量阻力 w 为(单位: N/kN)

$$w=a+b \cdot v+c \cdot v^2+i \tag{1}$$

式中, a, b, c 为阻力系数; v 为列车运行速度; i 为坡度, %。

采用美国五级轨道谱,踏面为 JM3 型磨耗型踏面,轨头采用 60 kg/m 钢轨。动力学模型可以模拟大功率机车实际牵引运行的动态过程,相比简单的单轮力学模型而言,更能涵盖黏着控制过程中的不确定因素。

表 1 大功率机车动力学模型的自由度

部件名称	纵向	横移	垂向	侧滚	点头	摇头
车体	X_c	Y_c	Z_c	Φ_c	θ_c	Ψ_c
构架	X_{fi}	Y_{fi}	Z_{fi}	Φ_{fi}	θ_{fi}	Ψ_{fi}
电机(齿轮箱)					θ_{mj}^*	
吊杆				Φ_{rj}	θ_{rj}	
电枢					θ_{mj}	
小齿轮					θ_{gj}	
轮对(大齿轮)	X_{wj}	Y_{wj}	Z_{wj}^*	Φ_{wj}^*	θ_{wj}	Ψ_{wj}
车辆	X_{vk}					

注:表中上角标“*”表示非独立自由度; $i=1,2$; $j=1,2,\cdots,6$; $k=1,2,\cdots,10$ 。

1.2 轮轨黏着特征

由于轮轨摩擦热及钢轨表面粗糙度^[7],较大蠕滑率引起轮轨黏着系数降低,即黏着曲线的负斜率特性。不同的轨面条件下,黏着曲线不同。这些不同包括最大黏着系数、最大黏着系数对应的蠕滑率(称为临界蠕滑率)、靠近原点线性段斜率和滑动时曲线负斜率。

把轮轨摩擦系数作为随接触斑滑动速度变化的函数^[8],则有

$$f=\frac{f_s}{1+Fv_c} \tag{2}$$

式中, f_s 为静摩擦系数; F 为动摩擦影响系数; v_c 为接触斑滑动速度。

根据式(2)改进非线性小自旋轮轨蠕滑力计算程序,得到不同轮对前进速度下对应不同蠕滑率的黏着系数曲线,如图3所示。可见,随着速度的增大,较大蠕滑率对应的黏着曲线负斜率越大,不同速度对应的临界蠕滑率基本一致。另外,文献[9-10]表明,通过改变 Kalker 权重系数 K 和动摩擦影响系数 F ,可体现黏着曲线 4 要素,得到不同形状的黏着曲线。

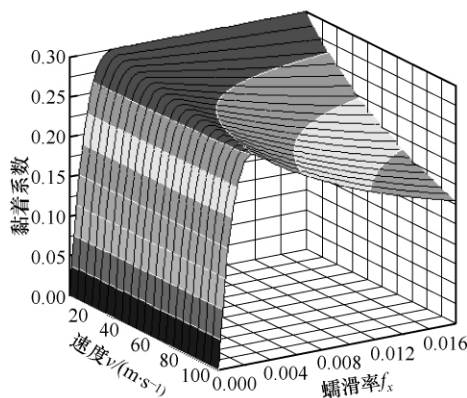


图3 不同速度对应的轮轨黏着曲线

2 电气传动及控制

由于交流电机单位体积功率较大和较硬的机械特性曲线等优点,大功率机车采用“交-直-交”牵引传动方式,目前,主流大功率机车采用异步电机及矢量控制方式。转子磁链定向矢量控制通过矢量变换将定子电流在两个垂直方向解耦,分解为磁场电流分量和力矩电流分量并分别加以控制,从而具有类似直流电机较好的调速控制性能^[11]。

3 轮轨黏着控制

3.1 黏着控制方法

由于轮轨黏着曲线大滑动量时的负斜率特性,当机车打滑时轮轨黏着控制不稳定,如传统的PI控制不能很好满足控制要求^[1]。本文采用模糊控制方法进行黏着控制。模糊控制不需要精确的数学模型,并且具有强的自适应和鲁棒性,使得在不同黏着状况的轨道上可以达到很好的控制效果。模型中机车黏着控制为单转向架控制方式,即检测到空转发生时同一转向架各轴力矩降低相同,单转向架控制相对整车控制具有较高的黏着性能。为了量化轮对的黏着状态,利用黏着度 Adl 表示轮对的黏着程度。在同一转向架中,通过计算同一时刻3个车轴的角速度 $V_{\omega 1}$ 、 $V_{\omega 2}$ 、 $V_{\omega 3}$ 和角加速度的最大值 $A_{\omega \max}$ 与最小值 $A_{\omega \min}$ 之差 Δv 和 Δa ,经过滤波(LPF)后分别放大 G_1 和 G_2 倍,并采用模糊推理表实时地计算适合路面状态的 Adl ,将此值乘以

转矩值,从而实施恢复黏着控制^[12],控制框图如图4所示。图中 T_s 为信号延迟时间。

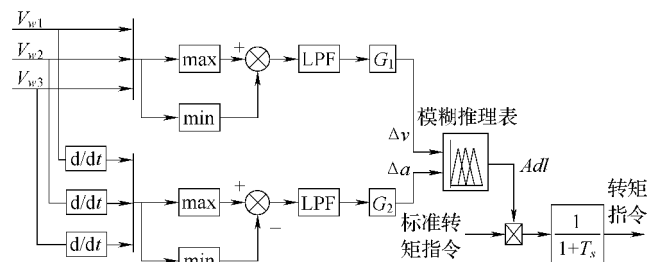


图4 单转向架黏着控制框图

Adl 通过模糊推理表得到,见图5。当轮对未出现打滑时,各轴角速度和角加速度基本一致, Δv 和 Δa 为一较小数值,对应的 Adl 为一较大数值,当车轮出现滑动和空转时, Δv 和 Δa 增大,对应的 Adl 较小,电机力矩降低,从而恢复黏着。 Adl 可以是一个大于1的数,即在轨面黏着状况良好的情况下,增大电机力矩以获得更大的轮轨黏着力。 Δv 和 Δa 数值较小时,增大曲面梯度使得黏着控制更加灵敏。

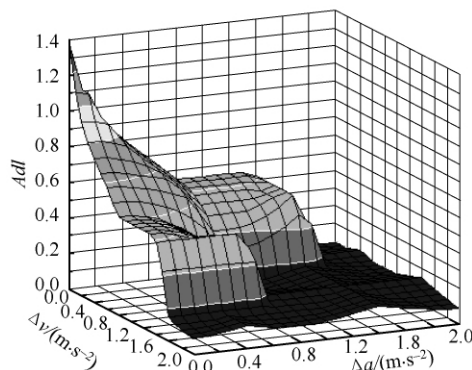


图5 模糊推理表

3.2 黏着控制仿真及分析

实际测试表明,轮轨最大黏着系数与列车运行速度有关,速度越大,最大黏着系数降低。模型中通过改变轮轨接触的静摩擦系数(静摩擦系数对应轨道的最大黏着系数),实现不同工况与轨面条件的最大黏着系数。分别对机车起动和高速运行两种工况进行黏着控制仿真。图6为不同工况对应的静摩擦系数。计算中,降低轨面黏着条件使得轮对出现滑动。

图7为高速运行工况时,未实施黏着控制情况下第一轮对的计算结果。轨面摩擦系数降低后,轮对出现了空转,蠕滑率增大,蠕滑力下降,对应的电机力矩降低,直到电枢转速增大到最大值,蠕滑率才停止增大并保持在最大值。当轨面摩擦系数增大时,并不能恢复到黏着状态。图8为实施黏着控制后,第一轮对对蠕滑率、蠕滑力和电机力矩的仿真结果。当轨面摩擦系

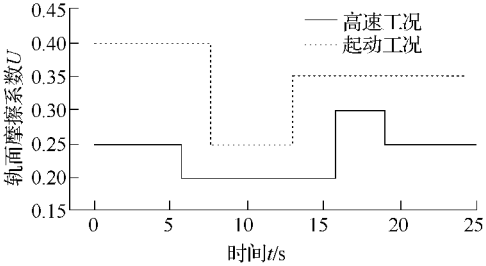


图 6 计算工况轨面静摩擦系数

数减小时,电机力矩减小,轮对蠕滑力保持在较大值,并未出现空转现象。起动工况与此类似,当轨面黏着条件变差时,施加黏着控制后抑制了轮对空转。图 9 为黏着控制后轮轨有效黏着系数(未考虑轨道不平顺),在不同轨面条件下,轨面黏着系数分布在对应的黏着峰值附近,轮轨黏着控制效果明显。

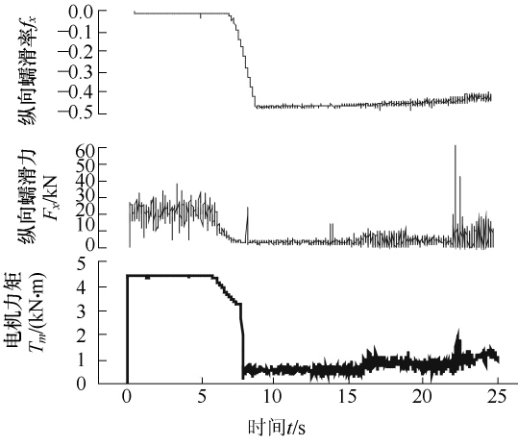


图 7 高速工况未实施黏着控制的仿真结果

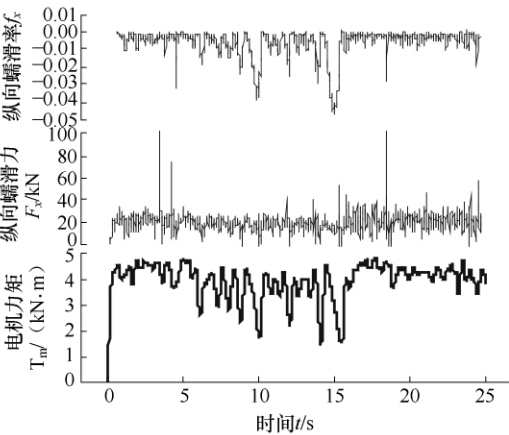


图 8 高速工况实施黏着控制的仿真结果

图 10、图 11 分别为起动工况和高速运行工况施加黏着控制时,前后转向架轮对的角速度差。当轨面黏着条件恶劣时,该角速度差增大,使得前后转向架降低,如图 12、图 13 所示,对应电机力矩减小,机车轮对恢复黏着。但是轮对蛇行运动使得轮对一侧角速度和角加速度波动,引起黏着控制中周期性的波动。图中黏着度波动频率分别与两种工况轮对蛇行频率一致。

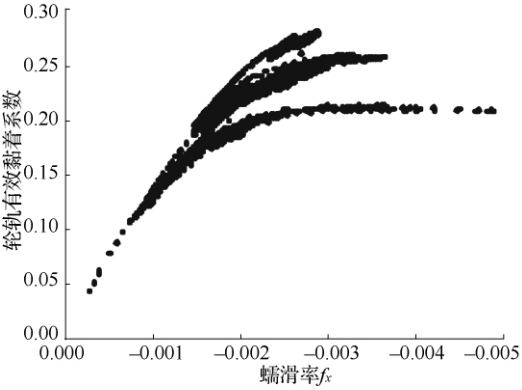


图 9 轮轨有效黏着系数

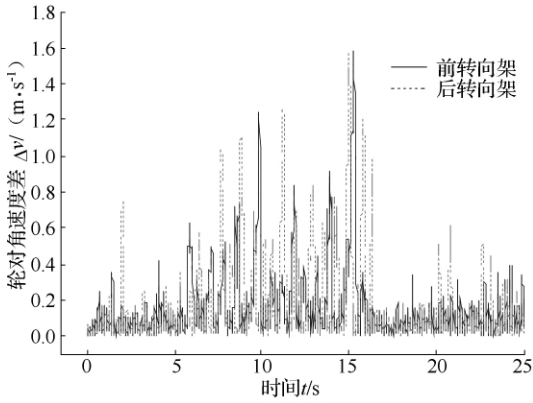


图 10 高速工况轮对角速度差

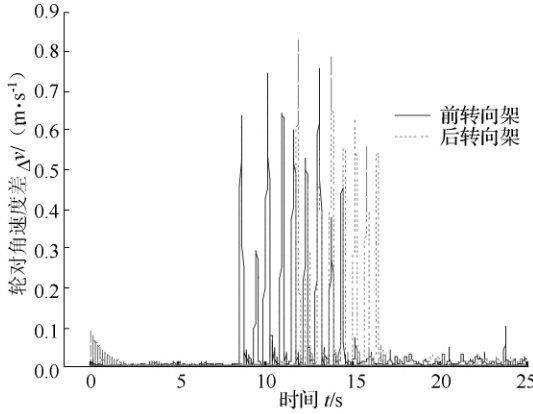


图 11 起动工况轮对角速度

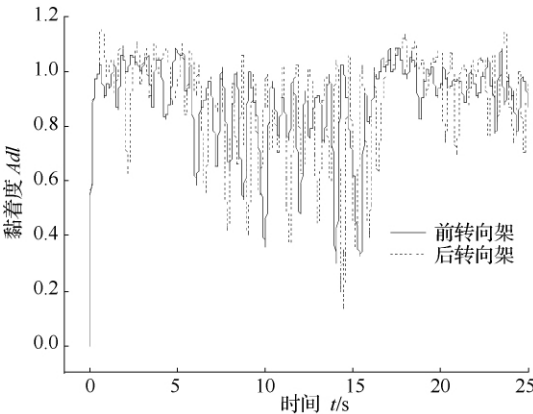


图 12 高速工况前后转向架黏着度

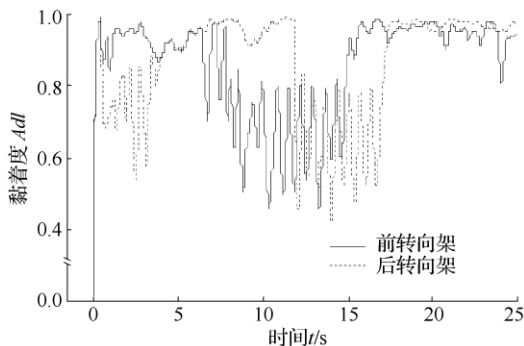


图 13 启动工况前后转向架黏着度

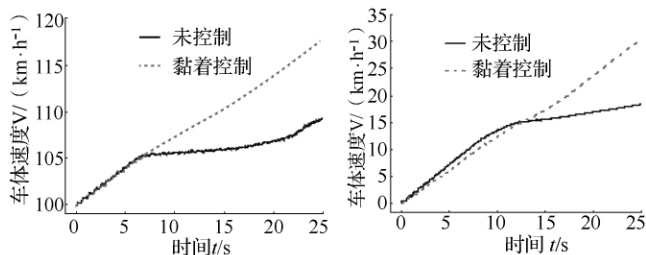


图 14 高速工况车体速度

图 15 启动工况车体速度

图 14、图 15 分别为高速工况和启动工况时,施加黏着控制和未施加黏着控制机车的运行速度。图 15 中,轨面黏着条件较好时,施加黏着控制时机车运行速度比未经黏着控制时要小,说明黏着控制过于灵敏,控制参数存在进一步优化的空间。针对不同结构参数的机车和运行工况,需要优化黏着控制参数,以达到最大的轮轨黏着利用率。

4 结论

建立列车系统机电一体化虚拟样机,模型中考虑到轮轨黏着负斜率特性、电机磁饱和以及机械特性。通过检测同一转向架不同轴的最大角速度差和角加速度差,进行黏着度推理计算,采用模糊控制策略对电机电矩进行控制,仿真结果表明:

(1) 在不同轨面黏着条件及运行工况下,不仅能有效抑制轮对空转,并且可以使轮轨有效黏着系数保持在黏着峰值,提高了机车的牵引性能。

(2) 轮对的蛇行运动使得黏着控制中产生波动现象,波动频率与蛇行运动频率一致。

(3) 针对不同结构参数的机车和运行工况,黏着控制参数需要优化,以达到最大的轮轨黏着利用率。

参考文献:

[1] Ohishi K, Ogawa Y. Adhesion Control of Electric Motor Coach Based on Force Control Using Disturbance Observer [C]//IEEE/IES AMC'2000, Nagoya, 2000; 328-328.
[2] Ohishi K, Nakano K, Miyashita I. Anti-Slip Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer [C]//

IEEE/AMC'98, Coimbra 1998; 580-585.

- [3] Sun K, Uk H, Hak K, et al. Re-adhesion Control with Estimated Adhesion Force Coefficient for Wheeled Robot Using Fuzzy Logic [C]//IEEE/IECON'2004, Pusan 2004; 2530-2535.
[4] 王辉,肖建. 机车模糊黏着控制及其仿真研究[J]. 机车电传动, 2002, 27(3): 19-23.
WANG Hui, XIAO Jian. Fuzzy Adhesion Control of Locomotive and Its Simulation Study [J]. Electric Drive for Locomotives, 2002, 27(3): 19-23.
[5] 黄景春,肖建. 基于二维云模型的机车黏着控制及其仿真研究[J]. 机车电传动, 2007, 32(1): 11-14.
HUANG Jing-chun, XIAO Jian. Adhesion Control of Locomotives Based on Two-dimension Cloud Model and Its Simulation Study [J]. Electric Drive for Locomotives, 2007, 32(1): 11-14.
[6] 姚远,张红军,罗赞. CRH5 型动车万向轴扭转振动[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 82-85.
YAO Yuan, ZHANG Hong-jun, LUO Yun. Torsional Vibration of Cardan Drive System on CRH5 [J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 82-85.
[7] POLACK O. Influence of Locomotive Tractive Effort on the Forces Between Wheel and Rail [J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(sup.): 7-22.
[8] 金学松,张立民. 高速机车单轮对牵引力矩数值分析[J]. 机械工程学报, 1999, 35(6): 56-60.
JIN Xue-song, ZHANG Li-min. Numerical Analysis of the Driving Torque Applied to a Single Wheelset of Locomotive with High Speed [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(6): 56-60.
[9] 姚远,张红军,罗赞. 机车打滑时轮对纵向振动研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 56-60.
YAO Yuan, ZHANG Hong-jun, LUO Yun. Longitudinal Vibration Analysis of Wheel Set on Locomotive Under Slippage [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 56-60.
[10] 姚远,张红军,陈康. 机车打滑时传动系统的自激扭转振动[J]. 西南交通大学学报(自然科学版), 2008, 43(6): 762-766.
YAO Yuan, ZHANG Hong-jun, CHEN Kang. Self-excited Torsional Vibrations of Drive System on Locomotive Under Slippage [J]. Journal of Southwest Jiaotong University (Natural Science), 2008, 43(6): 762-766.
[11] LEVA S, Morando A P, Colombari P. Dynamic Analysis of a High-speed Train [J]. Vehicular Technology, 2008, 57(1): 107-119.
[12] 宋雷鸣. 动车组传动与控制 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 211-212.

(责任编辑 武晓明 聂清立)