

高寒地区高速列车轮轨粘着特性研究及应用

陈哲明¹, 喻洋¹, 张峻岭²

(1. 重庆理工大学车辆工程学院, 重庆 400054;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为了探讨高寒地区恶劣条件下轮轨接触状态特性, 确保列车运行安全, 研究了运营速度 400 km/h 的高速列车在俄罗斯高寒地区轮轨接触的粘着特性, 首先建立了相应的整车动力学模型及轮轨滚动接触模型, 然后在此基础上, 研究了高寒地区轮轨接触粘着系数的主要影响因素, 求解出相关的峰值粘着曲线和粘着曲面, 最后在保证轮轨良好粘着状态的前提下, 充分利用粘着条件设计了列车制动减速度曲线, 并验证了该曲线的正确性、合理性、有效性。

关键词: 高寒地区; 轮轨接触; 粘着系数; 高速列车; 制动减速度曲线

中图分类号: U292.91⁺4; U260.11⁺5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.018

Research and Application of Wheel/Rail Adhesion Properties of High-speed Train in Frigid Area

CHEN Zheming¹, YU Yang¹, ZHANG Junling²

(1. Vehicle Engineering Institute, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: In order to grasp the wheel/rail contact state in frigid area harsh conditions and ensure the safe of the train's operation, this paper studied the wheel/rail contact adhesion properties of the high-speed train which could reach 400 km/h in frigid area, in Russia. The related vehicle dynamics model and the wheel/rail rolling contact model were established. On the basis of above, the main influence factor of wheel/rail contact adhesive coefficient in frigid area was researched, and the correlative peak of adhesion curve and adhesion surface was obtained. Combined with project, under the premise of good wheel/rail contact state and with full use of adhesion conditions, the braking deceleration curve of the train was designed and verified with the correctness, rationality and validity.

Keywords: frigid area; wheel/rail contact; adhesion coefficient; high-speed train; braking deceleration curve

0 引言

由于轨道机车具有独特的运行方式, 对轮轨接触的相关研究成为保证轨道机车安全稳定运行的重要环节, 所以, 国内外的研究人员一直在研究这方面的课题^[1-10]。本文正是基于俄罗斯高寒地区列车恶劣行驶条

件以及轨面复杂多变条件, 对高寒地区高速列车轮轨粘着特性及应用进行研究。

1 轮轨粘着机理

高速列车在行驶过程中的轮轨接触关系是极其复杂多变的, 这种关系通常以轮轨粘着特性的形式进行研究, 同时引入粘着系数来反映车轮与钢轨间的粘着状态, 粘着系数的大小直接体现了轮轨接触关系的好坏。定义车轮圆周方向上的切向力 F 与车轮垂直载荷

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-05-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51205433); 中铁二院科学技术项目(KYY2015073(15-16))

F_n 之比称为切向力系数, 切向力系数的最大值称为粘着系数^[1]。

粘着系数:

$$\mu = \max\left(\frac{F}{F_n}\right) \quad (1)$$

式中: F 为车轮圆周方向的切向力; F_n 为接触面上的法向力 (车轮垂直载荷)。

2 高速列车动力学模型

本次研究对象是高寒地区 0~400 km/h 的高速列车轮轨粘着特性, 首先要对高寒地区轮轨粘着系数的影响因素进行分析, 研究模型是根据俄罗斯方面提供的整车参数搭建的整车动力学模型, 包括 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对、8 个轴箱等, 具有 50 个自由度, 所建模型及其自由度分别见图 1 和表 1。

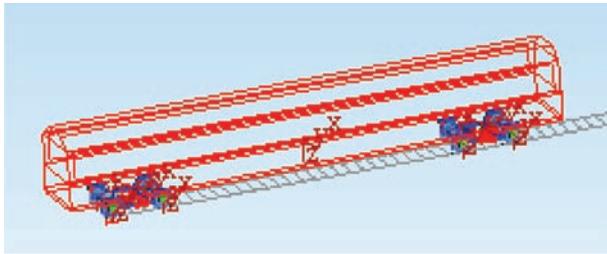


图 1 整车动力学模型

表 1 整车自由度

刚体	自由度						备注
	伸缩	横移	沉浮	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}	i 为 1~2
轮对	x_{wi}	y_{wi}	(z_{wi})	(φ_{wi})	θ_{wi}	ψ_{wi}	i 为 1~4
轴箱					θ_{ai}	-	i 为 1~8

注: 带 () 的为非独立自由度。

2.1 轮轨滚动接触模型

在研究轮轨粘着问题中, 轮轨接触模型显得至关重要, 研究学者已经应用的模型包括赫兹弹性接触模型、半赫兹接触模型、Kalker 三维非赫兹接触模型等。本研究采用的是相对成熟和稳定的赫兹弹性接触模型, 基于轮轨之间的接触是一个椭圆形接触斑, 并且轮对和钢轨间在接触斑内的曲率是一个常数, 其数学描述如下所示^[5]:

$$A+B = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_t}\right) / 2 \quad (2)$$

$$B-A = \sqrt{\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_w}\right)^2 + \left(-\frac{1}{R_t}\right)^2} + 2\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_w}\right)\left(-\frac{1}{R_t}\right)\cos(2\theta) \quad (3)$$

$$k_1 = (1-v_1^2) / (\pi E_1) \quad (4)$$

$$k_2 = (1-v_2^2) / (\pi E_2) \quad (5)$$

$$a = m^3 \sqrt{\frac{3\pi F_n (k_1 + k_2)}{4(A+B)}} \quad (6)$$

$$b = n^3 \sqrt{\frac{3\pi F_n (k_1 + k_2)}{4(A+B)}} \quad (7)$$

式中: A 、 B 为轮轨间的相对曲率, 并且其值的大小取决于轮轨间的几何特征和接触关系; R 为车轮滚动圆半径; R_w 为车轮接触点曲率半径; R_t 为轨道接触点曲率半径; θ 为轮对摇头角, 本次研究中取 0; F_n 为车轮载荷; k_1 、 k_2 为与轮轨材料有关的常数; v_1 、 v_2 分别为轮、轨泊松比; E_1 、 E_2 分别为轮、轨弹性模量; m 、 n 为赫兹接触系数, 用样条插值计算求得; a 、 b 分别为轮轨接触椭圆斑的长、短半轴, 如图 2 所示。

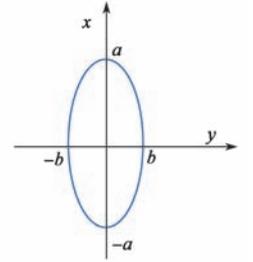


图 2 轮轨赫兹接触椭圆斑

轮轨接触斑计算参数见表 2。

表 2 轮轨接触斑计算参数表

参数名称	数值
车轮滚动圆半径 R	0.430 m
车轮接触点曲率半径 R_w	0.975 m
轨道接触点曲率半径 R_t	0.300 m
轮、轨泊松比 v_1 、 v_2	0.300
轮、轨弹性模量 E_1 、 E_2	2×10^{11} Pa
车轮载荷 F_n	$39\,740 \times 9.8$ N
赫兹接触系数 m 、 n	插值 mn 系数表

通过将上述接触斑公式编写成计算程序, 输入已知参数, 计算得到接触斑的长短半轴分别为 $a=0.013$ m, $b=0.0081$ m。

2.2 粘着力模型

在上述列车模型和轮轨接触斑的基础上轮轨粘着力模型采用 Oldrich Polach 粘着力计算模型, 选用的原因在本人之前所著的论文中^[5]已有相关说明, 具体数学模型如下^[2]:

$$F = \frac{2F_n f}{\pi} \left[\frac{K_A \xi_1}{1 + (K_A \xi_1)^2} + \tan^{-1}(K_S \xi_1) \right] \quad (8)$$

$$\xi_1 = \frac{2C\pi a^2 b}{3F_n} \cdot \frac{s}{f} \quad (9)$$

$$C = \frac{3G}{8a} \cdot C_{jj} \quad (10)$$

$$f = f_0 [(1-A)e^{-B\theta_s} + A] \quad (11)$$

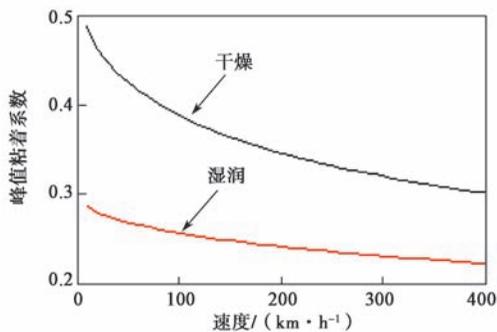
式中: F_n —车轮载荷; K_A 、 K_S —Polach 调节参数; G —刚性模量; f_0 —轮轨间最大摩擦系数; A 、 B —摩擦系数调节参数; C_{jj} —Kalker 系数。

3 粘着系数主要影响因素

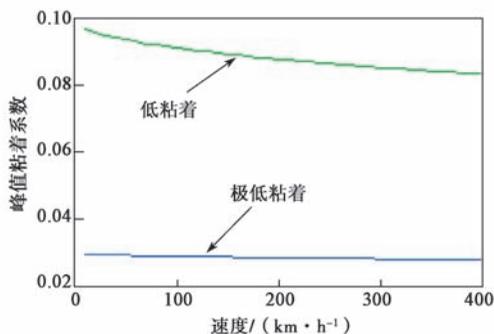
本次研究主要是针对在高寒地区运营的高速列车，其行驶速度范围在 0~400 km/h，这超过了国内高速列车的速度限制，为提高该列车的行驶安全性和稳定性，很有必要研究高寒地区影响轮轨粘着系数的主要因素，以及在不同粘着条件下它们对列车动力学特性的影响。

3.1 行车速度对粘着系数的影响

在之前学者研究的基础上，结合本次研究的实际情况，分别研究在列车行驶过程中常用的几种轨面条件下，通过记录分析不同车速下粘着系数的变化，发现列车行车速度对轮轨粘着系数具有显著影响。如图 3 所示，列车在任一轨面上伴随运行速度的逐渐提高，轮轨粘着系数在逐渐减小，反映出轮轨接触特性在逐渐变差，这是因为同一轨面条件下，速度提高时车轮对轨道的冲击也会增大，造成轮轨接触关系恶化、不稳定区域增大，使得车轮纵向和横向蠕滑速度增大，造成粘着系数减小。同时速度的增加会使轮轨接触产生的热量增多造成接触斑附近的轮轨表面温度升高^[7]，材料本身的分子抗剪切强度降低，亦使得轮轨接触的粘着状态变差，粘着系数降低。



(a) 一般粘着下条件



(b) 低粘着条件下

图3 行车速度对粘着系数的影响

3.2 轮轨表面条件对粘着系数的影响

轨道机车独特的运营方式以及轮轨表面的状态条件复杂多变都直接影响轮轨接触状态进而影响粘着系数的变化，在高寒地区显得尤为复杂。高寒地区钢轨表面主要有“干燥”、“湿润”、“冰霜”、“冰雪”这几种状态，同时钢轨表面的油污、砂石、锈斑对轮轨粘着特性都是有影响的。当车轮和钢轨表面干燥且

清洁时，轮轨粘着系数明显变大；当钢轨表面有砂石、锈斑时，轮轨粘着系数明显变大；当轮轨表面湿滑，或表面又布有霜雪和油污时，轮轨接触的粘着系数又将会显著减小；当轮轨表面出现结冰状况，根据冰面厚度、结冰面积、分布区域的不同，可能出现低粘着和极低粘着的情况。本文主要研究干燥、湿润、低粘着和极低粘着这 4 种轨面条件对粘着系数的影响，为了更加明显地展示不同轨面条件下的粘着特性，将列车运行速度取为某一定值，具体仿真轨面条件如表 3 所示，仿真结果如图 4 所示。

表3 轨面条件参数

模型参数	干燥	湿润	低粘着	极低粘着
K_A	1	1	1	1
K_S	0.40	0.40	0.40	0.40
f_0	0.55	0.30	0.10	0.03
A	0.40	0.40	0.40	0.40
B	0.60	0.20	0.20	0.10

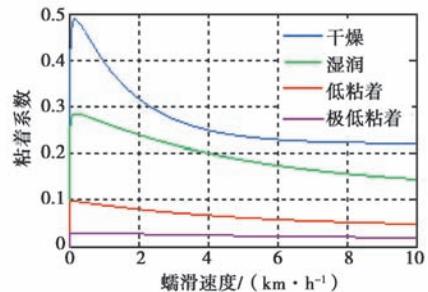


图4 不同轨面条件对粘着系数的影响

从图 4 能够看到同一行车速度下轨面条件的变化对粘着系数的显著影响，这主要是因为伴随轮轨接触条件的恶化，相同的蠕滑速度造成的影响越来越大，体现在粘着系数的降低。

3.3 粘着曲面

为了更好地掌握轮轨在不同轨面条件、不同速度条件下的粘着特性，根据本文采用的 Polach 接触力模型^[2]，结合研究车辆的实际参数，综合考虑了速度和轨面条件对粘着系数的影响，获得了不同轨面条件、不同行驶速度下的轮轨粘着特性曲面图，如图 5~ 图 8 所示。

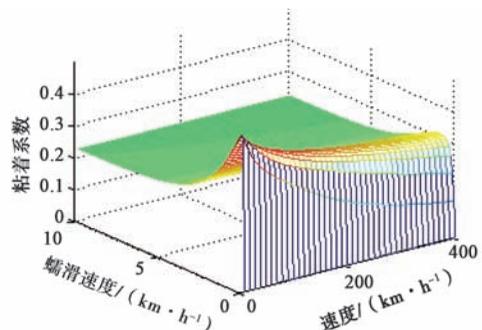


图5 干燥轨面粘着面

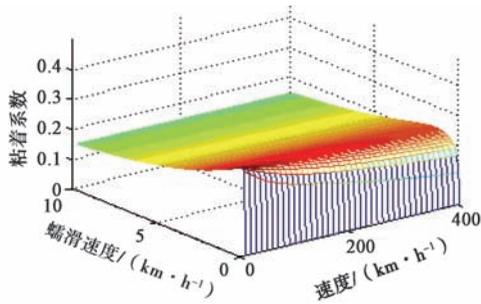


图 6 湿润轨面粘着曲面

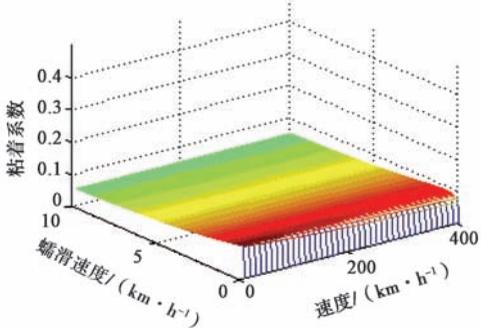


图 7 低粘着轨面粘着曲面

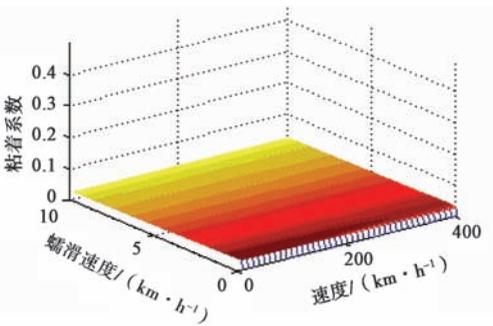


图 8 极低粘着轨面粘着曲面

4 低粘着轨面条件下制动减速度曲线设计

4.1 制动减速度曲线的设计

在俄罗斯高寒地区的轨面上经常会出现冰雪或者污渍而使轮轨处于一种低粘着状态, 同时本次研究受项目委托方的要求, 需要研究运营速度达到 400 km/h 的高速列车的制动特性, 于是在分析研究国内外高速列车减速度设计的基础上^[3, 6-10], 又考虑了实际粘着利用的情况^[4], 以充分利用粘着、尽量减少制动距离为目标, 根据上述轮轨在低粘着条件下的特性曲面, 制定了列车由 400 km/h 制动减速至 0 km/h 的制动减速度曲线, 并且分别针对紧急制动和常用制动这两种工况制定了不同的减速度曲线, 如表 4、表 5 和图 9、

表 4 紧急制动减速度曲线

速度区间 / (km·h ⁻¹)	0~200	200~300	300~400
减速度 / (m·s ⁻²)	0.95	0.90	0.85

表 5 最大常用制动

速度区间 / (km·h ⁻¹)	0~150	150~250	250~400
减速度 / (m·s ⁻²)	0.85	1.225-0.0025 × V	0.9332-0.001333 × V

注: V 为当前车速。

图 10 所示。

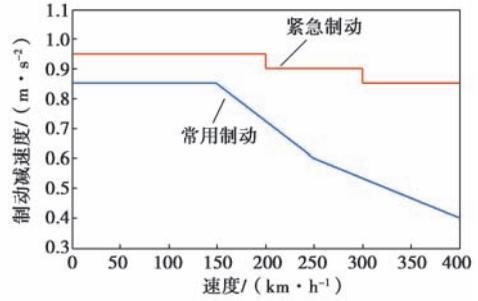


图 9 制动减速度曲线

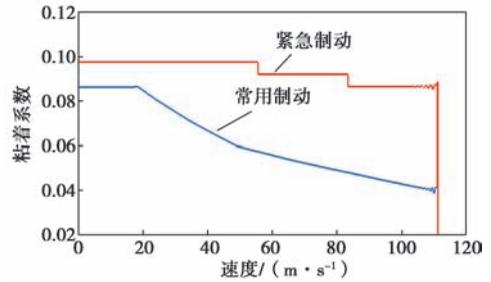


图 10 实际制动轮轨粘着曲线

表 4 和表 5 分别展示了本次设计的紧急制动和常用制动在不同速度区间所采用的减速度的取值, 切换速度是由俄罗斯铁道部门出台的相关法规规定的紧急制动在 200 km/h 和 300 km/h 切换, 常用制动在 150 km/h 和 250 km/h 切换。图 9 绘制了 2 种工况下所设计的制动减速度曲线。图 10 是采用图 9 所示的曲线在进行制动仿真时, 不同工况下随制动减速度变化所获得的轮轨接触粘着系数曲线, 红色为紧急制动, 蓝色为常用制动。从图右往左看明显可以看出从 400 km/h (111.111 m/s) 减速到 0 时, 2 种工况的粘着系数都在速度切换点以后有所增大, 这是因为随着速度降低粘着系数的峰值也在增大 (参看图 3 中的低粘着曲线), 那么能利用的减速度最大值也能有所增大。本次设计的中心思想就是在保证轮轨良好接触状态的前提下, 让制动减速度曲线尽可能地接近理论轮轨接触特性曲线, 提高轮轨的粘着利用率, 尽可能地缩短有效制动距离, 图 10 中实际轮轨粘着曲线平稳, 未见不规则波动, 且均未超过轮轨的摩擦系数 0.1, 说明在整个制动过程中, 轮轨一直保持在良好粘着状态, 无明显拖滑现象, 体现了本次设计对粘着特性的充分、合理利用。

4.2 设计制动减速度曲线的验证

基于本文设计的减速度曲线, 将其应用在高速列车模型上, 并进行动力学仿真试验, 通过仿真结果来验证所设计的减速曲线是否满足相关法规对列车制动的要求, 图 11、图 12 为从 400 km/h 开始制动到停车时的制动距离、列车行驶速度的特性曲线, 其中红色曲线为紧急制动工况, 蓝色曲线为常用制动工况, 将以此来进行分析验证。

表 6 不同初速度下的制动距离

制动初速度 / (km·h ⁻¹)	常用制动距离 / m	紧急制动距离 / m
400	12 520.80	7 946.98
350	8 690.56	6 001.80
300	5 815.84	4 315.96
250	3 669.79	2 968.70
200	2 162.58	1 866.30
150	1 177.00	1 054.21
100	528.61	474.05

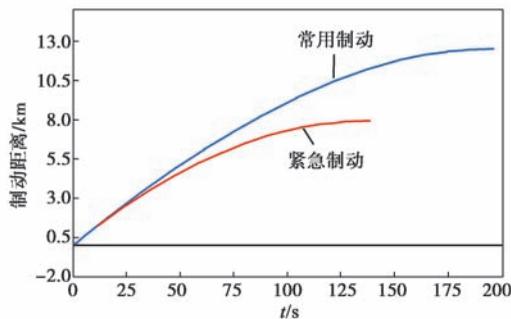


图 11 实际制动距离时域图

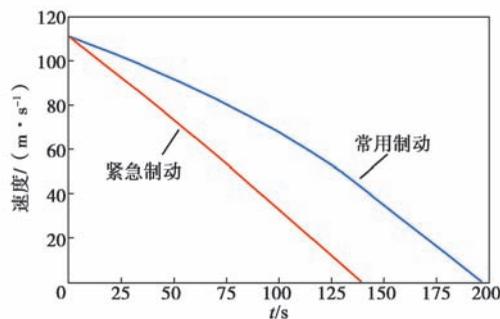


图 12 实际制动速度时域图

对于列车制动减速到停车，任何一个制动方案首先都必须满足法规对制动距离的要求，本文中项目委托方规定从初速度 400 km/h 紧急制动时的有效制动距离必须在 8.1 km 以内，常用制动的有效制动距离必须在 13 km 以内。表 6 列举出了采用本文设计的制动减速度曲线时，不同制动初速度下的有效制动距离，其中 400 km/h 的实际有效制动距离完全符合制动法规的要求。图 11 整个制动过程的制动距离曲线亦能很好地证明该方案的合理性、有效性。从图 12 可以看出 2 种工况的列车速度都在稳定下降，紧急制动下降更为快速，以便能及时减速停车；常用制动减速过程更为平缓，在低粘着轨道上面能够取得这样的制动效果，实属不易，再次证明了本次研究设计的制动减速度曲线对轮轨粘着系数的充分利用。

5 结论

①采用赫兹弹性接触模型求解轮轨接触斑大小（长短半轴分别为 $a=0.013$ m, $b=0.008$ 1 m），用 Oldrich Polach 粘着力计算模型，求解高寒地区轮轨接触在各种条件下的粘着系数。

②随着列车运行速度的增大，轮轨接触的峰值粘着系数会逐渐减小，因为随着速度的增大车轮对轨道的冲击增大，使接触斑中不稳定区域增大，蠕滑速度增大，同时轮轨表面温度亦随车速的增大而升高影响材料特性，进而影响粘着系数。

③轨面条件的变化，对粘着系数具有显著影响，主要是因为伴随轮轨接触条件的恶化，导致粘着系数减小，接触条件改善则粘着系数增大。

④基于轮轨接触粘着特性研究提出的 0~400 km/h 的制动减速度曲线，充分利用低粘着轨面条件下的粘着特性，既保证了轮轨接触在整个制动过程保持良好接触状态，又满足相关法规对制动距离的规定。

参考文献:

- [1] 陈哲明. 高速列车驱动制动动力学及其控制研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [2] Polach. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit [J]. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 2005, 258(7/8): 992-1000.
- [3] 徐丽秀, 刘汝让. 德国高速列车的几种制动方式及特性 [J]. 国外铁道车辆, 2000(2): 44-46.
- [4] 李云峰. 基于最优蠕滑率的粘着控制方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [5] 陈哲明, 曾京, 罗仁, 等. 高速列车电空联合制动控制研究 [J]. 电气传动, 2010(5): 3-7.
- [6] 张建柏, 彭辉水, 倪大成, 等. 高速列车制动技术综述 [J]. 机车电传动, 2011(4): 1-4.
- [7] 杨连宇, 王俊勇. HXD2 电力机车制动控制系统用新型中继阀 [J]. 机车电传动, 2010(6): 12-15.
- [8] 鲁进军, 刘寅虎, 杨磊. 轨道车辆制动控制单元的仿真技术研究 [J]. 机车电传动, 2016(1): 20-24.
- [9] 韩永春, 唐宋. 广州地铁直线电机列车防滑控制系统研究及改进 [J]. 机车电传动, 2016(4): 108-110.
- [10] 张红江, 吴冬华, 张安, 等. 广州地铁 4 号线直线电机车辆紧急制动优化研究 [J]. 机车电传动, 2010(6): 60-62.

作者简介: 陈哲明 (1978-), 男, 博士研究生, 副教授, 从事车辆动力学及控制研究。