

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.044

弓网系统动态升弓问题关键影响因素研究

李牧迪,周宁,魏海飞,陈鸿明,程尧,张卫华

(西南交通大学 牵引动力国家重点试验室,四川 成都 610031)

摘要:以铁路车辆系统中弓网系统为研究对象,针对列车运行过程中不同供电制式(AC/DC)切换时产生的动态升降弓问题,建立弓网系统升降弓接触动力学模型,并结合升降弓地面试验验证该模型的准确性。基于弓网系统升降弓接触动力学模型,利用正交实验方法研究影响升弓动力学的关键因素以及考虑接触线拉出值条件下动力学性能变化规律,得到了弓网系统合理的升弓参数范围。结果表明:升弓条件下,影响弓网动力学关键因素为弓头质量、升弓速度和接触线拉出值位置。

关键词:铁路车辆;受电弓;供电制式;动态升弓;接触线拉出值

中图分类号:U264.3⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0209-05

Research on Key Influence Factors of Dynamic Pantograph Lifting in Pantograph-catenary System

LI Mudi, ZHOU Ning, WEI Haifei, CHEN Hongming, CHENG Yao, ZHANG Weihua

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

Abstract: Taking the pantograph-catenary system in railway vehicle system as the research object, and with the aim at the dynamic problem of pantograph lifting caused by AC/DC switching during train operation, this paper establishes a contact dynamic model of pantograph-catenary system, and verifies the accuracy of the model by ground test. Based on this model, the orthogonal experiment method is applied to explore the key factors affecting the dynamics of pantograph lifting and the regularity of the dynamic performance under the condition of stagger of contact wire, and reasonable parameters range of pantograph lifting in pantograph-catenary system is obtained. The results show that pantograph head quality, pantograph lifting speed and contact wire stagger position are the key factors affecting pantograph-catenary dynamics under pantograph lifting.

Keywords: railway vehicle; pantograph; power supply mode; dynamic pantograph lifting; contact wire stagger

0 引言

目前,我国城际铁路和干线铁路的供电制式主要为 25 kV 的交流牵引供电系统,而城市轨道交通采用的主要是 1.5 kV 的直流牵引供电。随着我国轨道交通的发展,城际轨道与城市轨道交通相互连接、跨线运行的问题日益剧增^[1]。弓网系统作为能量供给的主要设备,在供电制式切换的情况下,受电弓需要进行升降弓操作,这一过程产生的弓网系统动力学响应会影响弓网受流质量及弓网系统疲劳寿命等问题。若升弓速度过小,会导致滑行距离较长,升弓速度过大会引起剧烈震荡,受流质量下降,甚至会产生接触线断裂、碳滑板脱落及拉弧^[2]等问题。因此探究动态升弓关键影响因素,选取适当的升弓参数至关重要。近年来,随

着多制式供电列车广泛应用^[3],已有学者针对升弓时的动力学^[4]、气动噪声^[5]、升降弓时间、电磁瞬变、电特性、电磁辐射^[6-8]等问题展开研究,但目前就动态升弓关键影响因素关注较少。

为深入研究动态升弓的问题,通过建立升降弓动力学模型,搭建试验台进行模型验证,设计正交实验分析影响升弓特性的关键因素,同时对接触线偏载下升弓动力学规律进行研究,为实际线路中受电弓升弓参数提供参考。受电弓切换过程如图 1 所示。

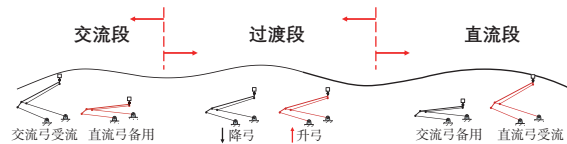


图 1 供电制式转换下受电弓切换过程

基金项目:国家自然科学基金项目(52072319);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(P2021J003, K2021J004-B);中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KSNQ2020056)

第一作者简介:李牧迪(1997—),男,天津人,硕士研究生,研究方向为弓网动力学、弓网在线监测,876601369@qq.com。

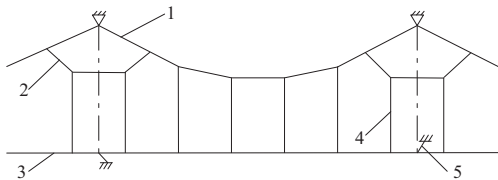
1 弓网系统升弓动力学模型

1.1 接触网建模

接触网是电力采集系统的重要组成部分,本文以弹性链型悬挂接触网系统为例展开研究。接触网系统主要由承力索、吊弦、辅助吊弦、接触线、吊杆、夹具、定位装置、腕臂等组成,如图2所示。采用梁单元模拟接触线、承力索、辅助承力索、定位器和定位杆,杆单元模拟吊弦,质量单元模拟线夹等附加零部件。通过建立有限元模型,得到接触网系统的质量、刚度和阻尼矩阵,建立运动微分方程^[9]:

$$M_c \{\ddot{q}_c\} + C_c \{\dot{q}_c\} + K_c \{q_c\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: M_c 为接触网的质量矩阵; C_c 为接触网的阻尼矩阵; K_c 为接触网的刚度矩阵; $\{q_c\}$ 为节点位移向量; $\{\dot{q}_c\}$ 为节点速度向量; $\{\ddot{q}_c\}$ 为节点加速度向量; $\{F(t)\}$ 为节点载荷向量。



1—承力索;2—辅助承力索;3—接触线;4—吊弦;5—定位器。

图2 接触网示意图

1.2 受电弓建模

本文需要考虑受电弓升弓过程,且需要设计多组工况进行分析,因此选用受电弓多刚体模型进行仿真。单臂式受电弓结构示意图如图3所示。

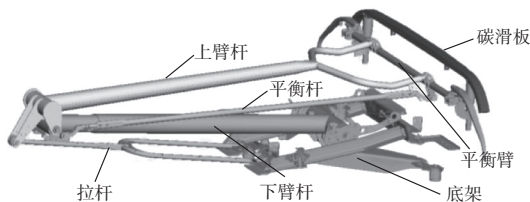


图3 单臂式受电弓结构示意图

1.3 弓网接触建模

考虑滞回阻尼的接触力模型可用于计算弓网系统间的法向力。罚函数法可将接触非线性问题转化为材料非线性问题。根据赫兹理论,法向接触力可以表示为

$$F_N = k\delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (2)$$

式中: k 为接触冲击的刚度; c 为接触冲击的阻尼系数; δ 为浸润深度; m_1 为刚度指数; m_2 为阻尼指数; m_3 为接触冲击的浸润指数。

2 地面试验简介及验证

2.1 试验设备

为验证仿真模型,进行了受电弓升弓试验,如图4所示,将 Faiveley-CX 型受电弓固定在轨道上,试验台的外框尺寸为 18 m×2 m×4 m。接触线采用 CTM-150 型,承力索采用 JTM-150 型,接触线和承力索的两端固定在实验平台的外框架上,之间用吊弦连接。利用螺杆芯轴升降机可模拟接触网的实际 Z 字形滑动接触。

受电弓升降弓试验台由受电弓、接触网、气泵、传感器、采集仪器及计算机等组成。其中,受电弓安装在轨道上,接触力使用压力传感器测量,振动加速度由加速度传感器测量。

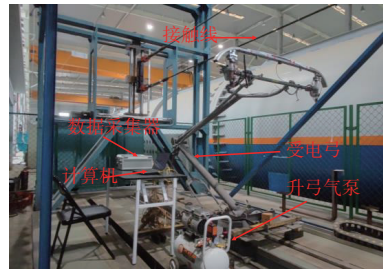


图4 受电弓接触网系统升降弓动力学地面试验

2.2 试验工况与验证

根据欧洲标准 EN50318,应在配有压力传感器的受电弓上进行接触力的测量。因此,试验在弓头和弹簧筒之间分别安装了4个压力传感器,在弓头下方碳滑板的中点处安装1个加速度传感器,如图5所示。

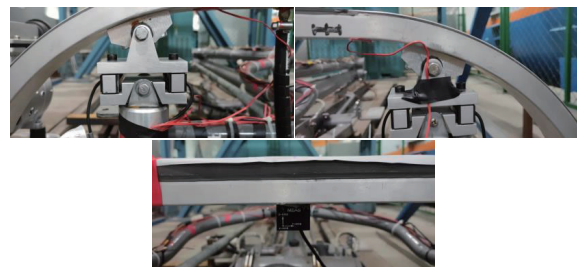


图5 力传感器与加速度传感器布置方式

根据欧洲标准 EN50317,接触力按照式(3)计算,实际接触力由力传感器测得的接触力、弓头的

惯性和修正后的气动力组成,地面试验中无气动力产生,因此忽略了气动力的影响。

$$F_c = \sum_{i=1}^{k_f} F_{\text{Sensor},i} + \frac{m_{\text{above}}}{k_a} \cdot \sum_{i=1}^{k_a} a_{\text{Sensor},i} + F_{\text{corr,aero}} \quad (3)$$

式中: F_c 是接触力; $F_{\text{Sensor},i}$ 是第*i*个压力传感器测得的力; m_{above} 是接触点和力传感器之间的质量; k_f 是压力传感器的数量; $a_{\text{Sensor},i}$ 是第*i*个加速度传感器测得的加速度; k_a 是加速度传感器的数量; $F_{\text{corr,aero}}$ 是校正后的空气动力。

将受电弓升弓试验和仿真模型的结果进行比

较,试验工况为不同升弓速度下受电弓与接触线接触位置在碳滑板中点处以及拉出值为 200 mm 时的沿碳滑板中心位置横向偏离 200 mm 处。得到的弓头加速度与接触力如图 6 所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。不同工况下弓头振动衰减幅度差异较小,但得到的最大值差异明显,而弓网动力学评价标准中,最大值作为重要指标之一,本次升弓试验主要考虑以接触力与加速度的最大值作为依据,数值统计如表 1 所示,仿真与试验结果误差较小,复杂的升弓工况可以由仿真模型进行模拟。

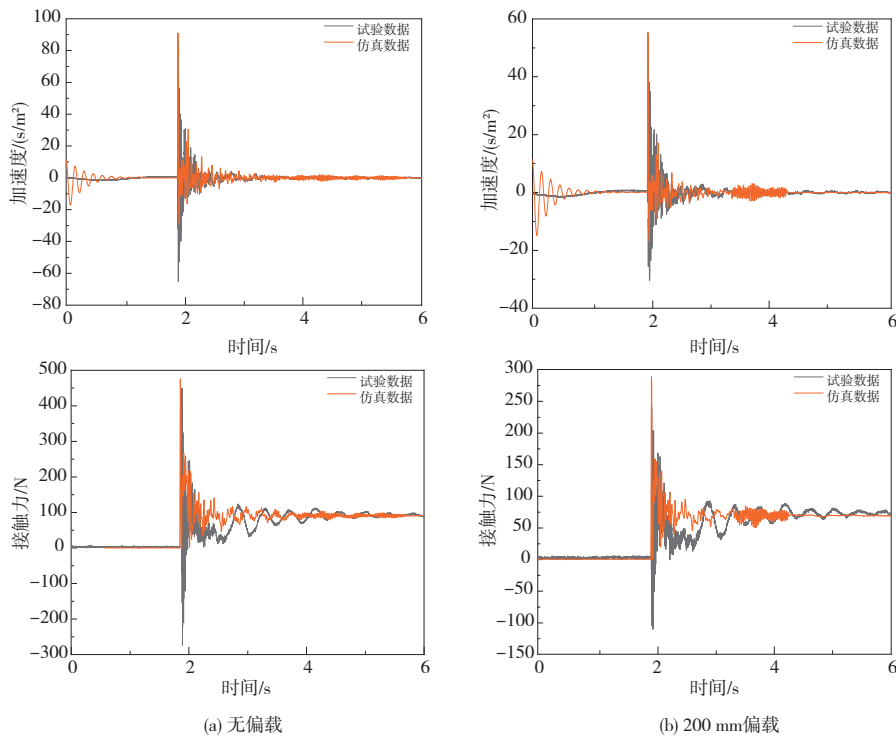


图 6 试验数据与仿真数据对比

表 1 试验数据与仿真数据数值统计表

工况	加速度			接触力		
	试验数据/(m/s ²)	仿真数据/(m/s ²)	误差/%	试验数据/N	仿真数据/N	误差/%
无偏载	86.69	91.15	5.14	476.05	449.11	-5.66
200 mm 偏载	54.86	55.40	0.98	275.57	289.08	4.90

3 升弓条件下弓网系统动力学关键影响因素

3.1 正交实验设计

实际线路中受电弓升弓时,影响接触力的因素是多方面的,如弓头质量、悬挂刚度、悬挂阻尼、运行速度、升弓速度等。其中升弓速度作为重要影响因素已得到验证^[10],且如果不考虑气动力的

影响,车辆的运行速度基本不会影响升弓动力学特性^[11],但实际中由于不同受电弓之间存在差异,以恒定的升弓速度作为唯一指标不能满足复杂工况下的要求。本文为探究不同工况下受电弓升弓动力学关键影响因素,利用正交实验设计方法,研究弓头质量、悬挂刚度、悬挂阻尼、下臂杆刚度、升弓速度同时变化对弓网系统升弓动力学的

影响,选取其中较为关键的因素作为指标。

根据受电弓基本结构参数范围进行正交试验设计,选取共5个因素,每个因素选取5个水平,如表2所示。结合正交表性质,相应的正交表应选用 $L_{25}(5^6)$ 试验方案,该正交表需要做25组试验,将每组参数输入到所建立的升弓模型中,获得弓网接触力等仿真结果并统计特征值,依次进行此过程,最终获得所有仿真结果。

表2 正交试验因素水平表

水平	因素				
	弓头质量 m_1/kg	悬挂刚度 $k_1/(\text{N}/\text{m})$	悬挂阻尼 $c_1/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	下臂杆刚度 $k_2/(\text{N}/\text{m})$	升弓速度 $v/(\text{m}/\text{s})$
1	5	6 000	0	80	0.6
2	3	1 000	30	20	0.3
3	8	4 000	50	60	0.4
4	12	12 000	70	120	0.5
5	16	16 000	90	160	0.7

表3 正交试验直观分析表

平均指标	因素					
	弓头质量 m_1/kg	悬挂刚度 $k_1/(\text{N}/\text{m})$	悬挂阻尼 $c_1/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	下臂杆刚度 $k_2/(\text{N}/\text{m})$	升弓速度 $v/(\text{m}/\text{s})$	
\bar{a}_1	235.75	255.93	260.49	265.06	310.01	
\bar{a}_2	203.02	255.49	261.58	270.60	153.35	
F_m \bar{a}_3	263.44	257.32	254.38	255.18	210.18	
\bar{a}_4	288.10	263.77	254.36	249.67	256.91	
\bar{a}_5	301.78	259.59	261.29	251.58	361.64	
极差 R	98.76	8.28	7.22	20.93	208.29	

根据表中极差的大小可知主次顺序为 $v > m_1 > k_2 > k_1 > c_1$ 。升弓速度与弓头质量对评价指标影响较大,其余因素对评价指标影响程度均不大。为直观观察各因素不同水平与评价指标的关系,以各因素下不同水平为横坐标,接触力最大值为纵坐标绘制在同一图中,如图7所示。

3.2 试验结果分析

直观分析法将表中的试验结果统计换算后,获得以接触力最大值为评价指标下各因素的极差和主次关系,如表3所示。在直观分析法中, n 意味着其中第 n 个因素; A_i 代表各因素下第 i 个水平的 F_m 之和; \bar{a}_i 为 A_i 的响应均值; $t(i1) \sim t(i5)$ 代表各因素下第 i 水平下 1—5 的试验,如式(5)所示; R 为该评价指标某因素下的极差,即响应均值的最大值与最小值之差,如式(6)所示。极差大小反映了该因素下的水平对评价指标的影响程度,可以反映出各因素的主次关系,得到关键影响因素。

$$A_i = \sum_{n=t(i1)}^{t(i5)} (F_m)_n \quad (4)$$

$$\bar{a}_i = A_i / 5 \quad (5)$$

$$R = \max(\bar{a}_i) - \min(\bar{a}_i) \quad (6)$$

综上,通过探究对不同因素下的受电弓升弓动力学影响进行正交试验,将试验结果进行直观分析,得到升弓条件下弓网接触力最大值受各因素的影响程度,确定了弓头质量与升弓速度为升弓条件下弓网系统动力学的关键影响因素。

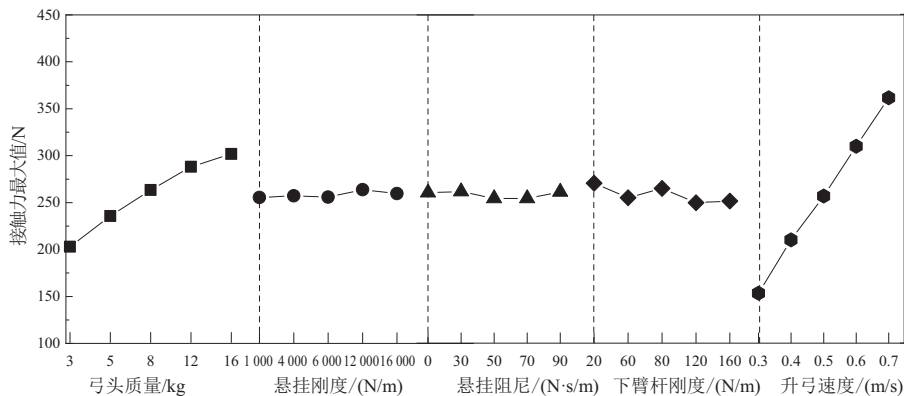


图7 各因素下不同水平对指标的影响

4 升弓位置对弓网动力学的影响

受电弓碳滑板为双弹簧筒支撑结构,接触位置的不同会导致接触力产生一定的变化。为探究不同偏载位置对接触力的影响规律,将接触线沿不同偏载位置作为唯一变量,距碳滑板中点处每隔 100 mm 偏载做一次仿真分析,接触力变化规律如图 8 所示。随着偏载位置的增加,接触力最大值具有明显的变化趋势,但接触之后的振动趋势及缓冲趋势无明显变化。

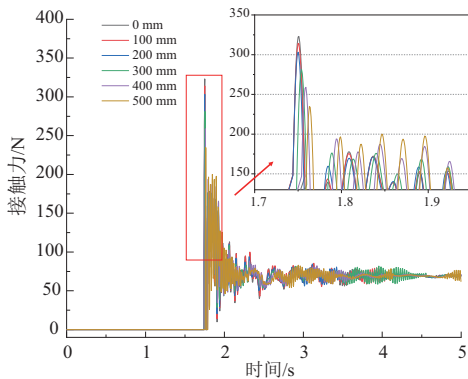


图 8 接触线沿不同偏载位置下弓网接触力对比

为了进一步观察接触力随接触线偏载位置引起的变化规律,以碳滑板横向分布中不同偏载位置为横坐标,以接触力最大值为纵坐标建立分布图,如图 9 所示。当接触网与受电弓的接触位置恰好在碳滑板中点时,接触力最大值是最大的,达到了 322.94 N,即此时引起的弓网接触状态最差;随着接触线偏载位置的增大,接触力最大值呈逐渐减小趋势,且变化趋势较明显,最小达到 234.69 N,即接触位置离碳滑板中心距离越远,接触力最大值越小,引起的弓网接触状态越好。

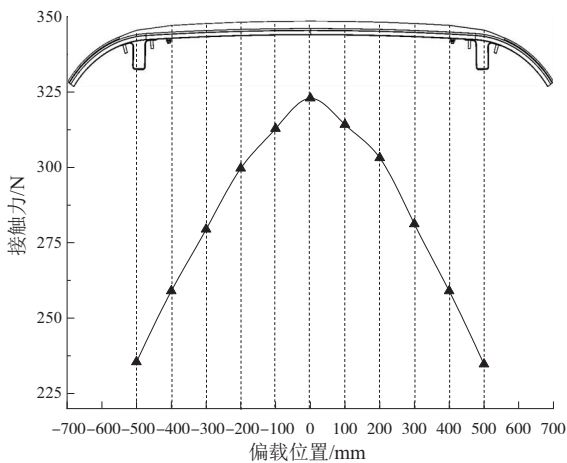


图 9 不同偏载位置下接触力沿碳滑板横向分布规律

5 升弓条件下弓网系统升弓参数范围

结合上述分析,升弓条件下弓网动力学的关键影响因素为弓头质量、升弓速度和弓网接触位置,由于列车在运行过程中,存在不同的运行速度及接触网的拉出值设定,受电弓在升弓过程中与接触网接触的横向位置是不可预测的。因此,为保证弓网接触力在合理范围内,取其中影响最大的结果,即拉出值为 0 mm 时的弓网接触力,建立接触力等高线图,如图 10 所示。

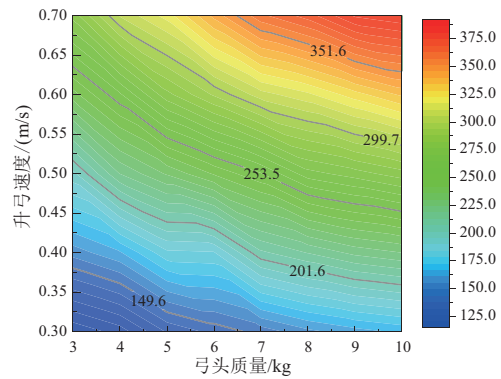


图 10 不同弓头质量与升弓速度下的接触力等高线分布

基于不同受电弓具有不同的弓头质量,以本文采用的 Faiveley-CX 型受电弓为例,其弓头质量为 5 kg,若根据 EN50318 中规定的指标为基准(接触力最大值不超过 250 N),可根据图 10 中接触力为 250 N 的等高线找到合理的升弓速度大致为 0.55 m/s 以下,在保证弓网接触力的条件下实现更快升弓,缩短过渡距离。

6 结语

本文建立了升降弓条件下受电弓与接触网动力学耦合模型,结合地面试验验证了模型的准确性,并基于正交试验与单变量分析得到了影响升降弓动力学的关键因素以及以下结论:

1) 不同的受电弓参数对升降弓过程中弓网振动衰减幅度差异较小,但对接触力最大值的影响有明显差异,其中弓头质量与升弓速度对接触力最大值影响较大;

2) 由拉出值导致的接触线位置变化对升降弓条件下弓网接触力最大值影响较大,且拉出值为 0 mm 时接触力最大值最大,随着拉出值增大,接触力最大值逐渐减小,但由于运行速度与升弓速度的差异,升弓时弓网接触位置不可控;

(下转第 270 页)

操作,操作时间如表 1 所示。

表 1 实验操作所需时间 单位:min

实验序号	所需时间	实验序号	所需时间
1	25	6	13
2	15	7	12
3	12	8	10
4	11	9	16
5	14	10	11

为了便于计算,实验数据取整处理,去掉最高和最低值,平均时间为 13 min,即本气囊封堵设备可以代替人工下井,封堵时间为 13 min 左右,大约等于人工封堵的时间,由此验证了所设计的系统能够有效地解决人工下井封堵气囊的困境。

5 结语

本文设计了一套气囊封堵机器人系统,完全代替人工下井进行封堵,具有颠覆性的意义。其自动化程度高,减少恶劣的工作环境造成的安全

事故。该系统具有技术成熟、价格低廉、功能齐全等特点,并且操作界面交互性强,简单明了,解决了人工下井封堵气囊的困境。该设计改变了我国管道封堵人工必须下井的现状,具有广泛的社会价值。

参考文献:

- [1] 尹泽远,雷泽勇,雷洁瑜,等. 基于 PLC 的地浸机械式管道清洗装置控制系统的设计[J]. 机械研究与应用,2020,33(6):153-156,160.
- [2] 胡云成,唐磊,何祥,等. 基于倍福 PLC 的 779 型条盒包装机烟包制动系统的改造[J]. 包装工程,2021,42(11):227-232.
- [3] 邹鑫,何文雪,牛杰. 基于 SIMATIC S7-1500PLC 的电梯监控系统设计[J]. 机械制造与自动化,2022,51(2):216-219.
- [4] 于丽丽,雷声媛. 基于 PLC 控制的红枣无损自动分拣系统设计[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):215-218.

收稿日期:2022-09-27

(上接第 213 页)

3) 影响升弓动力学的关键因素为弓头质量、升弓速度和弓网接触位置,由于接触位置不可预测,故以影响程度最大为基准建立接触力等高线图,对于不同受电弓具有不同的弓头质量,根据等高线图可以找到合适的升弓速度,可在实际工程应用中作相应的技术指导。

参考文献:

- [1] 谢维达. 多流制列车及其在我国的应用前景[J]. 城市轨道交通研究,2010,13(3):
- [2] 吴延清. 电气化铁路接触网故障原因及其防护措施分析[J]. 自动化应用,2019(3):120-121,131.
- [3] 杨春燕. 电力机车与城轨车辆双制式牵引供电系统的研究[D]. 大连:大连交通大学,2009.
- [4] YAO Y M, ZHOU N, ZOU D, et al. Collision dynamics analysis of lifting the pantograph[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,2021,235(4):450-462.
- [5] 秦登,李田,张继业,等. 升弓高度对列车受电弓气动

性能的影响[J]. 中国科学(技术科学),2020,50(3):335-345.

- [6] 王庆峰,刘伊宁,李相强,等. 城际列车升降弓电磁辐射特性研究[J]. 电力电子技术,2022,56(2):43-45,55.
- [7] 郭凤仪,王喜利,胡兴邦,等. 弓网电弧电磁辐射噪声仿真研究[J]. 系统仿真学报,2017,29(1):83-90.
- [8] 刘伊宁. 弓网离线与升降弓过程电磁骚扰特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [9] 周宁. 350km/h 及以上弓网动态行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [10] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [11] YAO Y M, ZHOU N, MEI G M, et al. Analysis of collision dynamics of lifting the pantograph during vehicle operation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,2022,236(7):793-802.

收稿日期:2022-10-11