

复杂工况下受电弓升弓碰撞特性*

魏海飞¹ 周 宁¹ 李牧迪¹ 张卫华¹ 张 敏² 石长友³ 伍开洋⁴

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都; 2. 蜀道投资集团有限责任公司, 610095, 成都; 3. 成自铁路有限责任公司, 610299, 成都; 4. 中铁电气化局西南指挥部, 610052, 成都)

摘 要 [目的] 为研究多制式混合动力牵引模式下, 列车频繁升降受电弓所引起的动力学问题, 分析受电弓的碰撞特性。[方法] 以弓网系统为研究对象, 搭建弓网碰撞试验台, 通过试验研究受电弓升弓碰撞过程中的动力学特性, 建立对应的动力学模型; 通过试验数据验证了所提模型的有效性, 并分析了垂向碰撞接触力的变化规律。[结果及结论] 在弓网碰撞时, 碰撞速度与接触线拉出值对弓网垂向接触力最大值、标准差及动态系数均有较大的影响。随着碰撞速度的增大, 垂向接触力的标准差与最大值均随之增大, 动态系数先减小后增大, 当碰撞速度为 0.5 m/s 时, 动态系数存在最小值。随着拉出值的增大, 垂向碰撞接触力标准差有所减小。当碰撞速度较低时, 垂向碰撞接触力最大值随着碰撞速度的增大而减小; 反之, 则垂向碰撞接触力最大值先减小后增大, 并在拉出值为 200 mm 附近存在最小值。在任意速度工况下, 动态系数均表现为无拉出值时最大, 400 mm 拉出值附近最小。

关键词 齿轨列车; 弓网系统; 受电弓升弓; 动力学特性

中图分类号 U264.3⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.016

Pantograph Lifting Collision Characteristics under Complex Working Conditions

WEI Haifei¹, ZHOU Ning¹, LI Mudi¹, ZHANG Weihua¹, ZHANG Min², SHI Changyou³, WU Kaiyang⁴

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Shudao Investment Group Co., Ltd., 610095, Chengdu, China; 3. Chengzi Railway Co., Ltd., 610299, Chengdu, China; 4. Southwest Command Headquarters, China Railway Electrification Engineering Group Co., Ltd., 610052, Chengdu, China)

Abstract [Objective] To investigate the dynamics issues arising from the frequent lifting and lowering of pantographs in

multi-mode hybrid traction trains, the pantograph collision characteristics are analyzed. [Method] Taking the PC (pantograph-catenary) system as research object, a PC collision test bench is built to study the dynamics characteristics of pantograph collisions during the lifting process. A corresponding dynamics model is established and validated using experimental data. The variation patterns of vertical collision contact forces are also analyzed. [Result & Conclusion] During PC collisions, collision speed and contact wire stagger value both significantly affect the maximum value, standard deviation, and dynamic coefficient of PC vertical contact force. As the collision speed increases, both the standard deviation and the maximum value of the vertical contact force increase accordingly, while the dynamic coefficient initially decreases and then increases, reaching its minimum when the collision speed is 0.5 m/s. As the stagger value increases, the standard deviation of the vertical collision contact force decreases. At a lower collision speed, the maximum value of the vertical contact force decreases with the increasing collision speed. Conversely, at a higher speed, the minimum vertical contact force initially decreases and then increases, reaching a minimum around a stagger value of 200 mm. Across all speed conditions, the dynamic coefficient is highest when there is no stagger and reaches its lowest point around a stagger value of 400 mm.

Key words gear rail train; pantograph-catenary system; pantograph lifting; dynamics characteristics

随着我国经济的蓬勃发展, 旅游观光业的资金投入逐渐加大, 部分旅游观光列车采用混合动力牵引, 并安装了齿轮与轨道齿条, 这样的供能形式使得受电弓需要在不停车的同时频繁升降, 在交流与直流制式之间频繁切换^[1]。频繁的冲击载荷将严重影响弓网受流质量, 不稳定的弓网接触甚至会导致频繁燃弧、加剧弓网接触副的磨损、缩短弓网系

* 国家自然科学基金项目(52072319); 四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0066); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(K2021J004-B, P2021J003)

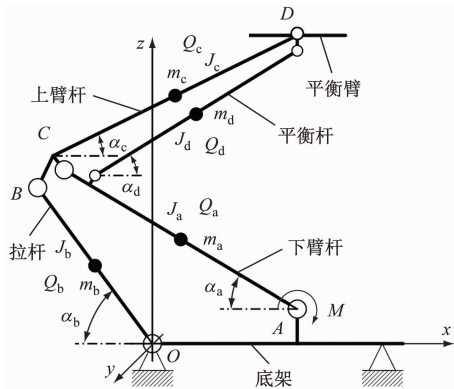
统关键部件寿命等^[2],此外,频繁的冲击载荷还会对弓网系统产生较大的损伤,增加吊弦断裂、定位器损坏、碳滑板剥离、框架裂纹等风险,严重影响行车安全与财产安全^[3]。受电弓作为列车获取电能的重要工具,其稳定的受流质量及可靠性是不可忽略的。目前,针对受电弓的研究大部分集中于受流质量及疲劳可靠性^[4-5],而弓网碰撞特性及碰撞带来的影响相关研究较少。

针对上述问题,本文以弓网系统为研究对象,建立弓网碰撞仿真模型,并搭建弓网碰撞试验平台,研究弓网的碰撞特性。本文研究可为多制式混合动力牵引模式下由频繁升降受电弓引起的动力学问题提供理论支撑。

1 考虑侧滚姿态弓网碰撞动力学模型

1.1 受电弓框架力学平衡方程

受电弓主要由框架部分与弓头部分组成,其中,框架由底架、下臂杆、拉杆、上臂杆、平衡杆与平衡臂组成,以拉杆与底架的铰接点为原点建立坐标系,受电弓框架模型示意图如图 1 所示。各杆件通过铰接关系形成双四连杆机构的平面单自由度系统,下臂杆为主动件。



注: m_a 、 J_a 、 Q_a 、 α_a 分别为下臂杆质量、下臂杆转动惯量、下臂杆质心、下臂杆与 x 方向夹角; m_b 、 J_b 、 Q_b 、 α_b 分别为拉杆质量、拉杆转动惯量、拉杆质心、拉杆与 x 方向夹角; m_c 、 J_c 、 Q_c 、 α_c 分别为上臂杆质量、上臂杆转动惯量、上臂杆质心、上臂杆与 x 方向夹角; m_d 、 J_d 、 Q_d 、 α_d 分别为平衡杆质量、平衡杆转动惯量、平衡杆质心、平衡杆与 x 方向夹角; M 为下臂杆扭矩。

图 1 受电弓框架模型示意图

Fig. 1 Diagram of pantograph framework model

各杆件的动能与势能可以表示为:

$$\begin{cases} T_i = \frac{1}{2} J_i \dot{\alpha}_i^2 + \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_{Qi}^2 + \dot{z}_{Qi}^2) \\ V_i = m_i g z_{Qi} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

T ——各杆件动能,单位 J;

V ——各杆件势能,单位 J;

m ——各杆件质量,单位 kg;

J ——各杆件转动惯量,单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

α ——各杆件与 x 方向的夹角,单位 rad;

x_{Qi} ——各杆件质心在 x 方向的坐标,单位 m;

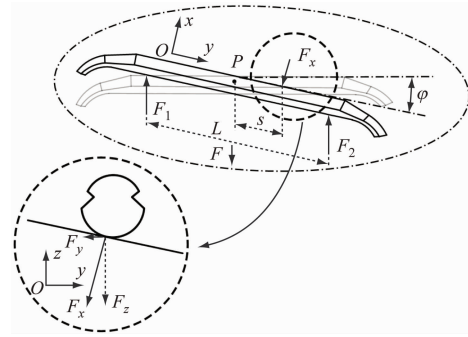
z_{Qi} ——各杆件质心在 z 方向的坐标,单位 m;

g ——重力加速度,单位 m/s^2 ;

i ——各杆件下标,可取为 a、b、c、d。

1.2 弓头力学平衡方程

由于本文研究的变量包含接触线拉出值,随着接触线拉出值的增大,碳滑板的侧滚角不可忽略,此时弓头运动形式为垂向与绕质心 P 转动的耦合运动。碳滑板受力与法向接触力局部示意图如图 2 所示。



注: F_x 为弓网法向接触力; F 为受电弓框架平衡臂支反力; F_1 为碳滑板左侧支反力; F_2 为碳滑板右侧支反力; F_z 为接触力垂向分量; F_y 为接触力水平分量; s 为拉出值; ϕ 为碳滑板侧滚角; L 为弹簧筒间距。

图 2 碳滑板受力与法向接触力局部示意图

Fig. 2 Local diagram of force on carbon slide plate and normal contact force

碳滑板姿态用平动与转动平衡方程共同描述,弓头力学平衡方程可以表示为^[6]:

$$\begin{cases} F_1 + F_2 - F_x \cos \phi = m_p \ddot{z}_p \\ (F_2 - F_1) \frac{L}{2} - s F_x \cos \phi = J_p \ddot{\phi} \\ F_1 + F_2 = F \end{cases} \quad (2)$$

式中:

m_p ——滑板质量,单位 kg;

z_p ——滑板质心垂向位移,单位 m;

J_p ——滑板转动惯量,单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

取接触力垂向分量与试验结果进行对比,垂向接触力分量可以表示为:

$$F_z = F_x \cos \varphi \quad (3)$$

1.3 接触线与弓网耦合建模

本文采用有限单元法对接触网进行建模,接触线、弹性吊索、承力索及定位装置采用欧拉-伯努利梁模拟,吊弦采用杆单元模拟,线夹使用集中质量单元模拟。接触网的动力学方程可以表示为:

$$m_1 \ddot{S} + I \dot{S} + KS = q \quad (4)$$

式中:

m_1 ——接触网质量矩阵;

I ——接触网阻尼矩阵;

K ——接触网刚度矩阵;

S ——接触网位移向量;

q ——接触网载荷向量。

接触网模型示意图如图 3 所示。受电弓与接触网的耦合是一个动态的接触过程,可利用罚函数法将接触非线性问题转换成材料非线性问题。根据 Hertz 接触理论,弓网法向接触力可以表示为^[7]:

$$F_x = K_{\text{con}} \delta^{n_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{n_2} \delta^{n_3} \quad (5)$$

式中:

K_{con} ——接触冲击刚度;

c ——接触冲击阻尼系数;

δ ——穿透深度;

n_1 ——刚度指数;

n_2 ——阻尼指数;

n_3 ——冲击穿透指数。

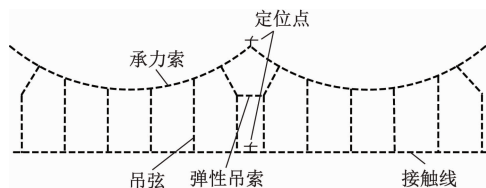


图 3 接触网模型示意图

Fig. 3 Diagram of catenary system model

弓网碰撞耦合模型由受电弓动力学模型、接触网模型及 Hertz 接触模型组成,其中:接触网模型为通过有限元软件 Ansys 建立的有限元模型;受电弓模型为通过多体动力学软件 Simpack 建立的多刚体模型,通过引入接触算法将两者耦合并进行求解。运动过程中产生的各项数据由 Simpack 软件中的 SODASRT 2 积分器求解^[8]。

2 模型验证

2.1 试验介绍

为了验证考虑弓头侧滚姿态的升弓碰撞动力

学模型的正确性,根据 EN 50317:2012 *Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line* 提供的接触力测试方法,则有:

$$F_x = \sum_{r=1}^{k_f} F_{\text{Sen},r} + \frac{m_{\text{abo}}}{k_a} \sum_{j=1}^{k_a} a_{\text{Sen},j} \quad (6)$$

式中:

$F_{\text{Sen},r}$ ——力传感器测得的弓头悬挂受力;

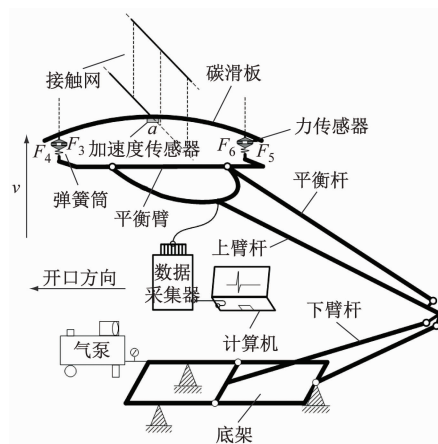
$a_{\text{Sen},j}$ ——加速度传感器测得的碳滑板垂向平动加速度;

m_{abo} ——弓头质量;

k_a ——加速度传感器个数;

k_f ——力传感器个数。

在实验室搭建 1:1 升弓碰撞试验台,弓网碰撞试验台示意图如图 4 所示。根据试验结果,分析不同拉出值与碰撞速度工况下,升弓各项指标的变化规律。本文共设置了 5 个速度等级,分别为 0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s、0.6 m/s、0.7 m/s;5 个拉出值等级,分别为 0、100 mm、200 mm、300 mm、400 mm,共 25 个工况。



注: F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 分别为 4 个力传感器数据; a 为滑板加速度传感器数据; v 为碰撞时弓头速度。

图 4 弓网碰撞试验台示意图

Fig. 4 Diagram of pantograph-catenary collision test bench

在标准 EN 50317:2012 中,式(5)等号右边含气动力项,但由于本试验属于静态升弓试验,因此不予考虑气动力,碰撞过程中产生的垂向力即视为接触力。

试验台由受电弓、接触网、压电式力传感器、加速度传感器、气泵、数据采集器、计算机等组成。其中,力传感器与加速度传感器均具有较高的灵敏度与较宽的频响范围,适用于冲击试验。在进行升弓

试验前,将气泵压力调整至碰撞速度工况所对应的压力,并将受电弓调整至对应接触线拉出值位置。试验时,快速打开气泵,当弓头滑板达到接触线位置时,二者发生碰撞,并在一段时间内振荡直至平稳。

2.2 模型计算结果与试验结果对比

以碰撞速度为 0.7 m/s、拉出值为 0 的工况为例进行分析,不同时间下,垂向接触力的模型计算结果与试验结果对比如图 5 所示。在升弓过程中,受电弓系统较为平稳,当滑板上升到接触线位置并与接触线碰撞时,接触力达到最大值。由于系统阻尼对能量有耗散作用,在碰撞约 3 s 后弓网系统趋于稳定。对比试验结果与模型计算结果可知,两者波动趋势与最终稳定结果基本一致。

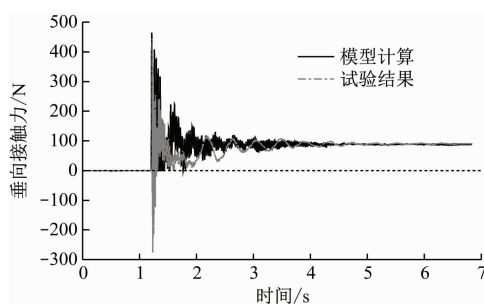


图5 不同时间下垂向接触力的模型计算结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of vertical contact force model calculation and experimental results at different times

以碰撞过程中垂向接触力最大值 F_{\max} 及弓网系统稳定后的稳态值 F_{stab} 为验证指标,并以试验结果为基准,计算其相对误差。在相同拉出值为 0、不同碰撞速度工况下, F_{\max} 与 F_{stab} 模型计算结果及试验结果误差分析如表 1 所示。 F_{\max} 试验最大值为 471 N,模型计算最大值为 466 N,相对误差为 -1.06%; F_{stab} 试验最大值为 85 N,模型计算最大值为 87 N,相对误差为 2.3%。由表 1 可知: F_{\max} 相对误差控制在 10% 以下, F_{stab} 相对误差控制在 5% 以下,因此,所提模型可较好地描述碰撞过程。

3 碰撞试验分析

3.1 垂向接触力最大值分析

升弓后,在受电弓与接触网碰撞前,受电弓具有较大的动量,弓网碰撞后垂向接触力最大值与稳态值的差异较大,不同碰撞速度与拉出值下,受电

表 1 不同碰撞速度下 F_{\max} 与 F_{stab} 模型计算结果及试验结果误差分析

Tab. 1 Error analysis of F_{\max} and F_{stab} model calculation and experimental results at different collision speeds

碰撞速度/ (m/s)	模型计算结果/N		试验结果/N		相对误差/%	
	F_{stab}	F_{\max}	F_{stab}	F_{\max}	F_{stab}	F_{\max}
0.3	31	284	30	300	3.3	-5.3
0.4	61	419	60	424	1.7	-1.2
0.5	71	369	70	386	1.4	-4.6
0.6	73	466	72	502	1.4	-7.3
0.7	87	462	85	471	2.3	-1.9

弓的垂向接触力最大值如图 6 所示。由图 6 a) 可知:随着碰撞速度的增加,垂向接触力最大值也随之增加。这是由于弓头速度越大,弓头的动量也随之增大,而碰撞时间基本保持不变,则受电弓垂向接触力亦随之增大。由图 6 b) 可知:当拉出值为 200 mm 时,垂向接触力有最小值,相比于无拉出值,弓头将产生侧滚力矩,使得垂向接触力有所减小。

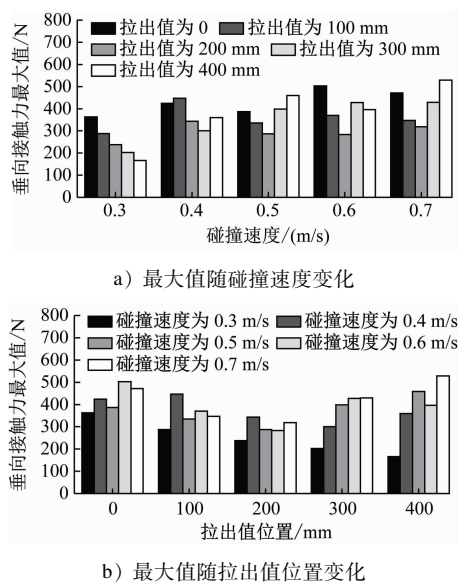


图 6 不同碰撞速度与拉出值下的受电弓垂向接触力最大值

Fig. 6 Pantograph vertical contact force maximum value under different collision speeds and stagger values

综上所述,当碰撞速度为 0.3 m/s 时,垂向接触力最大值随着拉出值的增大而逐渐减小,在拉出值为 400 mm 时达到最小,此时的垂向接触力为 165.60 N;当碰撞速度为 0.4 m/s 时,垂向接触力最

大值先增大后减小再增大,在拉出值为 300 mm 时达到最小,此时的垂向接触力为 300.03 N;其余工况垂向接触力最大值均先减小后增大,在碰撞速度为 0.6 m/s、拉出值为 200 mm 工况下,垂向接触力有最小值,此时的垂向接触力为 283.03 N。

3.2 垂向接触力动态系数

较大的载荷幅值是对弓网系统产生较大损伤的因素之一,为进一步描述在不同碰撞速度与拉出值工况下的升弓碰撞接触力幅值特性,本文提出与垂向接触力最大值、稳态值相关的量纲为一的量参数——垂向接触力动态系数 γ ,用于表征接触力幅值的变化情况,可以表示为:

$$\gamma = \frac{F_{\max} - F_{\text{stab}}}{F_{\text{stab}}} \quad (7)$$

动态系数越小,表明接触力幅值变化越小,弓网系统的结构损伤越小,反之则越大。不同碰撞速度与拉出值下,垂向接触力动态系数如图 7 所示。由图 7 可知:相较于无拉出值工况,有拉出值工况的垂向接触力动态系数均较大,且在碰撞速度为 0.4 m/s 时达到最大;随着拉出值的增大,垂向接触力动态系数呈逐渐减小的趋势;当拉出值为 0 或 100 mm 时,垂向接触力动态系数随着碰撞速度先增大后减小再增大,且在碰撞速度为 0.6 m/s 时达到最小,最小值为 5.15;其余工况下的垂向接触力动态系数均先减小后增大,存在明显拐点;在碰撞速度为 0.5 m/s、拉出值为 400 mm 工况下,垂向接触力动态系

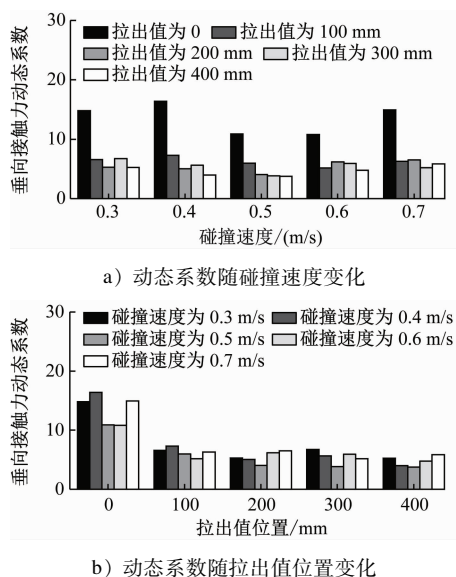


图 7 不同碰撞速度与拉出值下的垂向接触力动态系数

Fig. 7 Vertical contact force dynamic coefficient under different collision speeds and stagger values

数有最小值,最小值为 3.76。由此可知,在碰撞速度为 0.5 m/s、拉出值较大位置处,升弓碰撞所导致的弓网系统结构损伤较小。

3.3 垂向接触力标准差分析

不同碰撞速度与拉出值下,垂向接触力的标准差如图 8 所示。由图 8 a) 可知:垂向接触力标准差均随着碰撞速度的增大而增大;当碰撞速度小于 0.4 m/s 或大于 0.6 m/s 工况时,垂向接触力标准差的增幅较大;当碰撞速度为 0.4 ~ 0.6 m/s 时,垂向接触力标准差的增幅较小。由图 8 b) 可知:垂向接触力标准差均随着拉出值的增大而减小;当碰撞速度大于 0.3 m/s 时,拉出值对垂向接触力标准差的敏感程度均有所降低;当碰撞速度为 0.4 ~ 0.7 m/s、拉出值 ≥ 200 mm 时,垂向接触力标准差基本保持不变;当碰撞速度为 0.6 m/s、拉出值为 100 ~ 300 mm 时,垂向接触力标准差基本保持不变。从整体来看,垂向接触力标准差与碰撞速度呈正相关关系,与拉出值呈负相关关系。

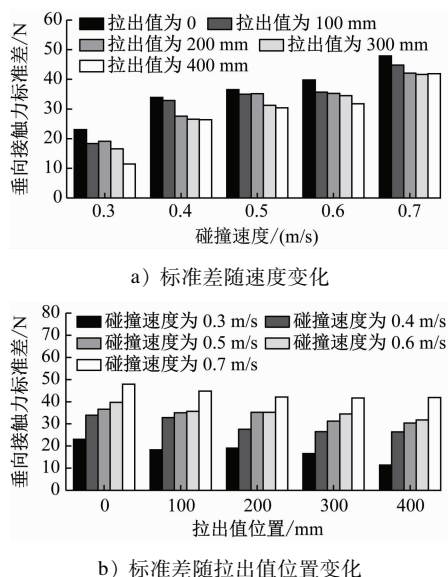


图 8 不同碰撞速度与拉出值下的垂向接触力标准差

Fig. 8 Standard deviation of vertical contact force under different collision speeds and stagger values

4 结语

本文搭建了 1:1 弓网碰撞试验台,对某型受电弓进行地面升弓碰撞试验,并建立了受电弓升弓碰撞模型,用于描述升弓过程中的接触力特性,主要获得以下几个结论:

1) 当碰撞速度为 0.3 m/s 时,在拉出值较大位

置处,垂向接触力最大值较小;当碰撞速度大于 0.3 m/s 时,拉出值为 200~300 mm 附近的垂向接触力最大值较小。

2) 当拉出值不为 0 时,升弓可以明显降低升弓碰撞接触力动态系数;在同一碰撞速度工况下,垂向接触力动态系数最大可降低 200%;当拉出值为 200~400 mm、碰撞速度为 0.5 m/s 时,垂向接触力动态系数较小,有利于减小升弓碰撞造成的结构损伤。

3) 在所有试验工况下,垂向接触力标准差与碰撞速度呈正相关关系,与拉出值呈负相关关系,在合适的碰撞速度与拉出值工况下,可有效减小垂向接触力的波动,降低结构损伤。

4) 当拉出值为 200~300 mm、碰撞速度为 0.3 m/s 时,存在较小的升弓碰撞接触力最大值与垂向接触力动态系数;当拉出值为 400 mm 且碰撞速度较低时,可以获得较小的垂向接触力标准差。

参考文献

- [1] 章玉伟,唐勇. 都四山地轨道交通关键技术创新研究[J]. 中国铁路, 2021(3): 101.
ZHANG Yuwei, TANG Yong. Research on innovations in key technology of Dujiangyan-Mt. Siguniang Mountain rail transit[J]. China Railway, 2021(3): 101.
- [2] 赵玮,范瑞栋. 基于高原弓网燃弧特征的接触线选型研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(增刊1): 16.
ZHAO Wei, FAN Ruidong. Study on catenary selection based on arcing characteristics of pantograph catenary in plateau[J]. Electric Railway, 2021, 32(S1): 16.
- [3] 张家玮. 高速接触网吊弦载荷及疲劳失效行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHANG Jiawei. Study on hanging string load and fatigue failure behavior of high-speed catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [4] 周宁,邹欢,邹栋,等. 城市轨道交通弓网系统仿真模型适应性研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 408.
ZHOU Ning, ZOU Huan, ZOU Dong, et al. Investigation on the applicability of pantograph and catenary model urban railway system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 408.
- [5] SONG D, ZHANG W, ZHOU N, et al. Fatigue lifetime design method and program development of pantograph V500 based on reliability[J]. Journal of Computers, 2012, 7(5): 1.
- [6] 赵晨. 考虑弓头运动姿态和接触形貌特征的弓网系统动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
ZHAO Chen. Study on dynamics of pantograph-catenary system considering the characteristics of pantograph's motion posture and contact morphology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 王江文,梅桂明,李瑞平,等. 弓网相互作用时受电弓关键部件动载荷研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 68.
WANG Jiangwen, MEI Guiming, LI Ruiping, et al. Dynamic load research of key components of pantograph in pantograph-catenary interaction[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 68.
- [8] YAO Y, 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.
- [7] YUAN W, TIAN J, HOU B. Image compressed sensing reconstruction algorithm based on attention mechanism[C]//International Conference on Computer Vision, Application, and Design (CVAD 2021). Sanya, China: SPIE, 2021: 40.
- [8] LIN X, HUANG Q, HUANG W, et al. Single image deraining via detail-guided efficient channel attention network[J]. Computers & Graphics, 2021, 97(2): 117.

· 收稿日期:2022-10-18 修回日期:2022-11-11 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-18 Revised:2022-11-11 Published:2024-12-10
· 第一作者:魏海飞,博士研究生,haifeiwei@my.swjtu.edu.cn
通信作者:周宁,副研究员,zhou_ningbb@sina.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 96 页)

- [4] ZHONG H S, WANG H, DENG Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. Science, 2020, 370(6523): 1460.
- [5] 汪小岳,李为民,王琳,等. 基于改进 YOLACT++ 的成熟芦笋检测-判别-定位方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 259.
WANG Xiaochan, LI Weimin, WANG Lin, et al. Method of detection-discrimination-localization for mature asparagus based on improved YOLACT++ algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 259.
- [6] PANT G, YADAV D P, GAUR A. ResNeXt convolution neural network topology-based deep learning model for identification and classification of Pedicularis[J]. Algal Research, 2020, 48(6): 101932.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-12-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-12-10
· 第一作者:于小四,正高级工程师,594734501@qq.com
通信作者:邓芳明,教授,2464@ecjtu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license