

# 基于改进正弦和代理模型的防爬器 碰撞吸能可靠性分析

曹 阳<sup>1</sup> 梁晓珂<sup>1</sup> 张 越<sup>2</sup> 王 强<sup>1</sup> 姚成勇<sup>1</sup> 曲 通<sup>1</sup>

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京;  
2. 南京中车浦镇城轨车辆有限责任公司, 210031, 南京)

**摘 要** [目的] 为合理评估防爬器吸能可靠性指标, 提出了一种基于 ISSSM(改进正弦和代理模型) 的吸能可靠性分析方法。[方法] 首先, 建立防爬器碰撞有限元模型并对其碰撞过程进行仿真; 其次, 基于防爬器碰撞试验数据对有限元仿真模型合理性进行验证, 进而依据构建原理, 明确防爬器碰撞过程力-位移函数基本形式, 并根据吸能一致性准则, 构建防爬器吸能 ISSSM, 从而结合可靠性理论, 建立防爬器吸能可靠性分析模型; 最后, 以某型号防爬器为研究对象, 并对其吸能可靠性指标进行评估。[结果及结论] 构建的吸能 ISSSM 能够合理复现防爬器碰撞吸能过程的力学特性; 变异系数自 0.05 提升至 0.10 时, 吸能可靠性指标自 3.07 降低至 1.53。

**关键词** 轨道车辆; 防爬器; 碰撞; 可靠性; 正弦和函数; 优化

中图分类号 U270.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.014

## Reliability Analysis of Collision Energy Absorption for Anti-climber Devices Based on Improved Sum of Sine Surrogate Model

CAO Yang<sup>1</sup>, LIANG Xiaoke<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>2</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, YAO Chengyong<sup>1</sup>, QU Tong<sup>1</sup>

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China;  
2. Nanjing CRRC Puzhen Rolling Stock Co., Ltd., Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] To reasonably evaluate the energy absorption reliability index of anti-climber devices, a reliability analysis method based on ISSSM (improved sinusoidal and surrogate model) is proposed. [Method] Firstly, a finite element model for anti-climber device collision is established. Secondly, the rationality of the finite element simulation model is verified based on the collision test data of the anti-climber device. Then, based on the principles of sum of sine function construction, the basic form of the force-displacement function for the anti-climber device collision process is clarified. According to the energy absorption consistency criterion, the anti-

climber device energy absorption ISSSM is constructed. Combining reliability theory, a reliability analysis model for anti-climber device energy absorption is established. Finally, a specific model of anti-climber device is studied, and its energy absorption reliability index is evaluated. [Result & Conclusion] The constructed energy absorption ISSSM can reasonably reproduce the mechanical characteristics of the anti-climber device collision energy absorption process. When the coefficient of variation increases from 0.05 to 0.1, the energy absorption reliability index decreases from 3.07 to 1.53.

**Key words** rail vehicle; anti-climber; collision; reliability; sum of sine function; optimization

防爬器是城市轨道交通车辆重要的碰撞吸能元件, 是提升车辆被动安全防护性能的必要保证<sup>[1]</sup>。其吸能指标达到设计要求的可靠度将直接影响列车被动防护安全性指标。因此, 开展防爬器吸能可靠性研究, 探索吸能可靠性指标的变化规律, 对于提升列车运行安全性及可靠性具有重要工程价值。

目前, 大量学者针对防爬器结构特性及其碰撞性能开展了相关研究: 文献[2]针对刨削式防爬器的吸能平稳性提升问题, 分析了结构参数对防爬器吸能特性的影响, 并提出防爬器吸能平稳性行为优化方法; 文献[3]针对防爬器压缩力效率最大化问题, 结合四次响应面代理模型及优化设计方法, 对防爬器碰撞性能进行了改善; 文献[4]针对防爬器碰撞产生的屈曲问题, 结合有限元理论对防爬器碰撞过程进行分析, 为其性能改进奠定了基础; 文献[5-6]针对有轨电车防爬器的多种影响因素进行了分析, 并提出了多样的结构优化设计方案, 为防爬器结构的进一步改进提供了参考; 文献[7]结合仿真及试验分析方法, 分析了影响膨胀式防爬器吸能特性的主要因素, 深入探究了多种因素对碰撞性能的影响规律; 文献[8]针对防爬器兼顾稳定防爬及

大吸能条件下的高载荷效率需求,提出一种基于 Voronoi(沃罗诺伊)吸能管的防爬器设计方法,并通过仿真分析验证了该方案的优越性。上述研究充分分析了影响防爬器碰撞性能的主要因素,并为防爬器结构的改进提供了坚实的参考依据。但考虑到制造工艺水平的差异,不同批次产品的吸能特性存在一定偏差,为量化此波动特性对防爬器吸能性能的影响,对其开展吸能可靠性研究具有重要的工程应用价值。

本文以某型号防爬器为研究对象,在基于碰撞试验数据验证仿真模型合理性的基础上,确定防爬器吸能正弦和函数基本形式,并对防爬器吸能特性曲线进行初步拟合,进而结合吸能一致性准则及优化设计方法;构建防爬器吸能 ISSSM(改进正弦和代理模型),从而建立防爬器吸能可靠性模型,并对其吸能可靠性指标进行评估。其评估结果可为防爬器结构优化设计及制造提供参考。

## 1 基于 ISSSM 的吸能可靠性分析模型建立

### 1.1 防爬器吸能 ISSSM 建立

防爬器碰撞机理及试验数据表明,轨道车辆防爬器在碰撞过程中主要存在近似线性吸能阶段及波动吸能阶段。为合理复现防爬器碰撞力学性能,分别采用多项式函数及正弦和函数对各阶段力-行程曲线进行拟合。

SS(正弦和)函数是基于多个正弦波线性组合,实现对波动系统传递函数复现的技术,其目前在信号处理、数据挖掘等领域应用广泛<sup>[9]</sup>。对于波动吸能阶段,防爬器力-行程曲线的正弦和函数一般形式可表述为:

$$F = \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i S + c_i)$$

式中:

- $n$ ——正弦波叠加个数;
- $a_i, b_i, c_i$ ——正弦波参数;
- $S$ ——吸能行程;
- $F$ ——吸能力值。

在此基础上,为提高防爬器代理模型建立的合理性,采用多项式函数对近似线性吸能阶段进行拟合,则防爬器力-行程代理模型的基本形式为:

$$F = \begin{cases} \sum_{l=1}^k d_l S^l, & \text{近似线性吸能阶段} \\ \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i S + c_i), & \text{波动吸能阶段} \end{cases}$$

式中:

- $d_l$ ——多项式函数参数;
- $k$ ——多项式函数最高次数;
- $S^l$ ——吸能行程的  $l$  次幂。

由此可知,代理模型参数组合的适配性是确保系统传递函数合理性的必要前提,为明确参数的最佳适配形式,采用最小二乘法对其进行拟合,具体拟合原理为:

$$L^2 = \min \sum_{j=1}^m [F_{js} - F_j(a_i, b_i, c_i, d_l)]^2$$

式中:

- $L^2$ ——传递函数拟合残差;
- $F_{js}$ ——样本观测值;
- $F_j$ ——第  $j$  个样本的预测值;
- $m$ ——样本观测次数。

在此基础上,考虑防爬器碰撞吸能过程中的高度非线性信息传递过程,为进一步提升防爬器碰撞吸能性能描述的合理性,依据防爬器碰撞试验吸能指标,构建防爬器吸能一致性准则为:

$$G = y_p - \int F dS$$

式中:

- $y_p$ ——试验吸能指标。

据此,取吸能一致性准则为目标函数,同时为代理模型添加修正系数并取其为设计变量,赋予设计变量约束条件,构建防爬器吸能代理模型优化设计模型为:

$$\begin{cases} \text{find } \alpha_i, \lambda_l \\ \min G = y_p - \int F dS \\ \text{s. t. } \begin{cases} \alpha_{i,L} \leq \alpha_i \leq \alpha_{i,U} \\ \lambda_{l,L} \leq \lambda_l \leq \lambda_{l,U} \end{cases} \end{cases}$$

式中:

- $\alpha_i$ ——波动吸能阶段修正系数;
  - $\lambda_l$ ——近似线性吸能阶段修正系数;
  - $\alpha_{i,L}, \lambda_{l,L}$ ——修正系数取值下限;
  - $\alpha_{i,U}, \lambda_{l,U}$ ——修正系数取值上限。
- 据此,建立的防爬器 ISSSM 可表述为:

$$F = \begin{cases} \sum_{l=1}^k \lambda_l d_l S^l, & \text{近似线性吸能阶段} \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i \sin(b_i S + c_i), & \text{波动吸能阶段} \end{cases}$$

### 1.2 基于 ISSSM 吸能可靠性模型建立

为进一步分析批量防爬器吸能性能达到相关

标准的可靠性,结合防爬器吸能 ISSSM 及可靠性理论,建立防爬器吸能极限状态函数为:

$$Z = Y - \int F dS = \begin{cases} > 0, & \text{吸能失效状态} \\ = 0, & \text{吸能极限状态} \\ < 0, & \text{吸能可靠状态} \end{cases}$$

式中:

$Y$ ——许用吸能值。

据此,为实现防爬器吸能可靠性的量化,采用应力强度干涉模型对吸能极限状态函数进行求解,得到吸能可靠性指标为:

$$\beta = \frac{\mu_F - \mu_Y}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_F^2}}$$

式中:

$\mu_Y$ ——许用吸能均值;

$\mu_F$ ——试验吸能均值;

$\sigma_Y^2$ ——许用吸能方差;

$\sigma_F^2$ ——试验吸能方差。

综上,本文基于 ISSSM 的防爬器吸能可靠性分析技术路线如图 1 所示。

## 2 防爬器吸能性能分析及 ISSSM 建立

为验证防爬器吸能 ISSSM 建立的合理性,以某型号地铁列车包覆式防爬器为研究对象,并基于有限元理论,建立防爬器吸能碰撞仿真模型,依据 EN 15227—2020《铁路设施. 铁路车辆车身的防撞性要求》设置碰撞仿真边界条件。其中某型号防爬器结构组成如图 2 所示,防爬器碰撞仿真边界条件如图 3 所示。

为便于后续仿真结果合理性的验证,同时为利于防爬器吸能 ISSSM 建立合理性的评估,基于碰撞试验条件及相关试验平台对试验设备布置进行规划,具体设备布局如图 4 所示。

据此,采用 NAC HX-6E 系列高速摄像机记录防爬器碰撞变形过程,并将试验与仿真碰撞变形过程进行对比,对比结果如图 5 所示。

由图 5 可知,与试验碰撞过程相比,仿真碰撞过程各级蜂窝吸能变形的复现性较好,表明构建的有限元模型能够合理反映防爬器结构整体的碰撞力学特性,可为进一步分析防爬器碰撞可靠性提供一定理论支撑。

在此基础上,为直观展示防爬器在吸能过程中的动态力特性,基于试验数据采集结果,绘制防爬

器力-行程曲线如图 6 所示。

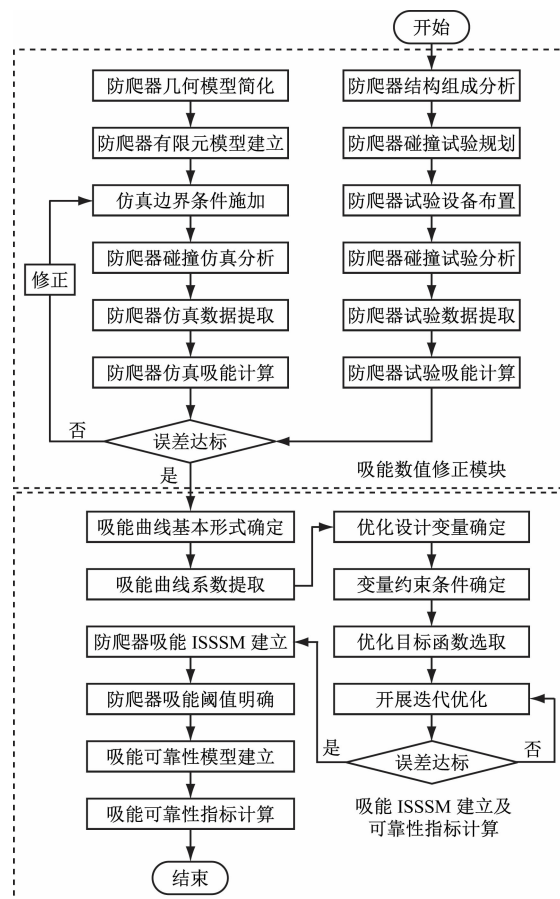


图 1 基于 ISSSM 的防爬器吸能可靠性分析技术路线

Fig. 1 Technical route of ISSSM-based anti-climber energy absorption reliability analysis

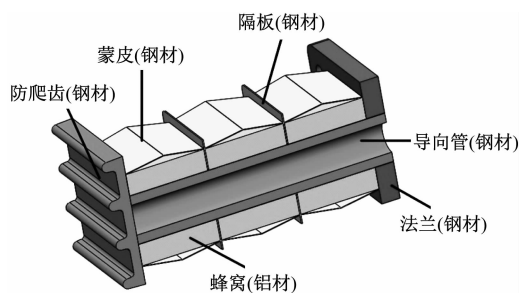


图 2 某型防爬器结构组成

Fig. 2 Structural composition of a type of anti-climber device

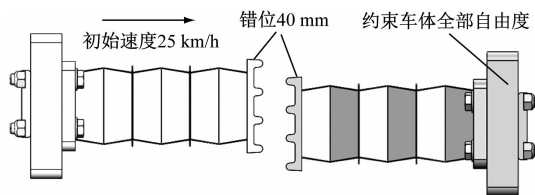


图 3 某型防爬器碰撞仿真边界条件

Fig. 3 Boundary conditions for collision simulation of a type of anti-climber device

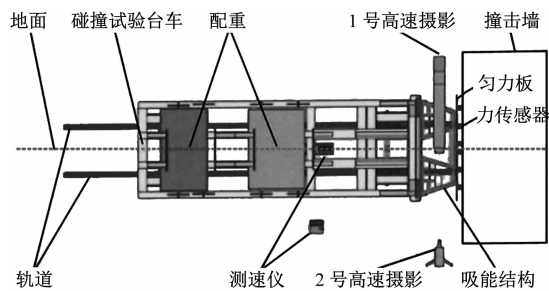


图4 防爬器碰撞试验设备布局图

Fig. 4 Layout diagram of anti-climber collision test equipment and devices

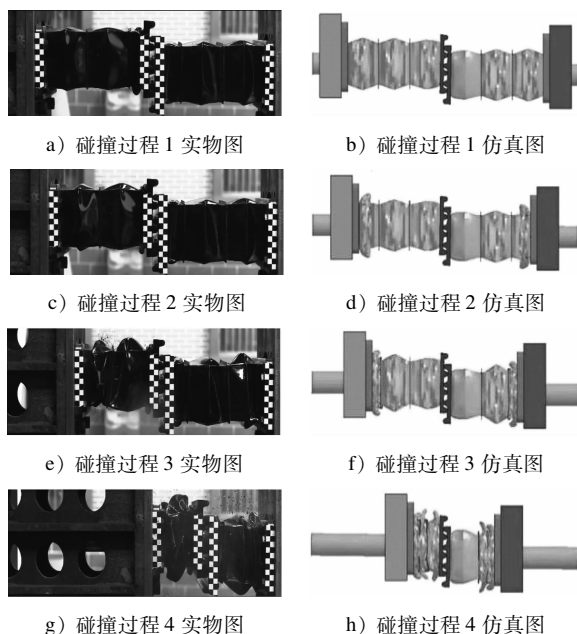


图5 防爬器试验及仿真碰撞过程对比

Fig. 5 Comparison of anti-climber test and simulation collision process

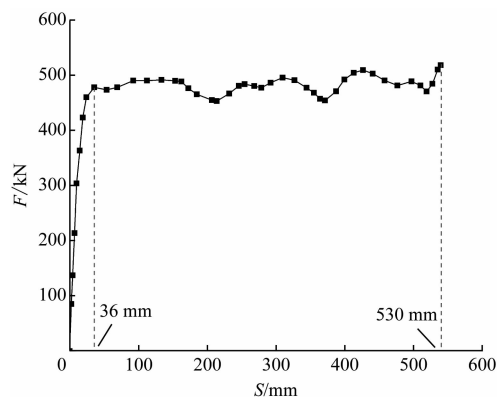


图6 防爬器力-行程曲线

Fig. 6 Force to stroke curve of anti-climber

由图6可知:当防爬器压缩量处于0~36 mm时,防爬器力-行程曲线近似处于线性状态;当防爬

器压缩量处于36~530 mm时,防爬器力-行程曲线处于波动状态;该原因在于当压缩量小于36 mm时,防爬器处于单蜂窝压缩状态,由于该阶段参与吸能的防爬器结构组成较为单一,因此呈现出近似线性变化的趋势;而当压缩量大于36 mm时,参与吸能的防爬器结构逐步转变为多蜂窝,此时各结构的吸能特性交互作用叠加效果逐步显著,因此呈现出波动趋势。

在此基础上,为便于防爬器吸能 ISSSM 的建立,同时为确保其能够合理量化实际结构的吸能指标,对试验测试数据进行积分,得到该型号防爬器试验吸能指标为248.97 kJ,并据此构建防爬器力-行程 ISSSM 优化模型为:

$$\begin{cases} \text{find } \alpha_i, \lambda_l \\ \min G = 248.97 - \int FdS \\ \text{s. t. } \begin{cases} -5 \leq \alpha_i \leq 5 \\ -5 \leq \lambda_l \leq 5 \end{cases} \end{cases}$$

据此,为搜寻最优参数组合,确保吸能 ISSSM 建立的合理性,采用优化算法对其进行求解,得到具体求解迭代过程如图7所示。

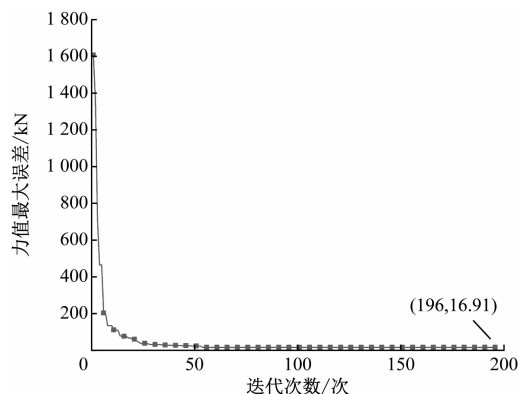


图7 防爬器 ISSSM 迭代过程

Fig. 7 Anti-climber ISSSM iteration process

由图7可知,当迭代次数达到196次时,力值最大误差逐渐收敛至16.91 kN。该结果表明优化算法能够有效探寻 ISSSM 的最优参数组合方式,能够对防爬器的冲击力学特性进行合理复现,为后续的吸能可靠性分析奠定了坚实的基础。

为进一步体现 ISSSM 的优良特性,并直观展示其迭代过程,取典型迭代曲线进行绘制,得到绘制结果如图8所示。

由图8可知,随着迭代次数的递增,迭代曲线变化趋势逐渐趋近试验数据曲线,当迭代次数达到20



次时逐渐逼近结构实际碰撞力学性能,该现象表明构建的 ISSSM 在各样本点处的拟合效果良好,同时对于各样本点间变化趋势能够进行合理复现。此外,随着迭代次数增加,拟合曲线与试验数据曲线间决定系数  $R^2$  值自 0.841 1 增加至 0.998 8,该结果进一步量化了 ISSSM 优良的拟合效果。

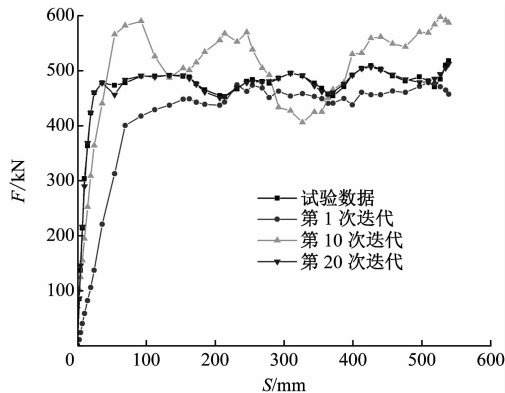


图8 防爬器 ISSSM 典型迭代过程曲线

Fig. 8 Typical iteration process curve of anti-climber ISSSM

为对防爬器碰撞力学曲线进行显式化表达,同时便于后续吸能可靠性分析的开展,结合 ISSSM 构建原理及基本形式,得到防爬器力-行程代理模型为:

$$F = \begin{cases} 0.0075S^3 - 0.9387S^2 + 37.46S - 3.95, & \text{近似线性吸能阶段} \\ 818.7\sin(0.0063S - 0.426) + \\ 405.6\sin(0.0120S + 0.942) + \\ 132.6\sin(0.0249S + 0.069) + \\ 119.7\sin(0.0328S + 0.879) + \\ 68.27\sin(0.0379S + 2.708) + \\ 1.133\sin(0.0613S + 0.337) + \\ 7.458\sin(0.0734S + 2.829) + \\ 1.610\sin(-0.0868S + 4.055), & \text{波动吸能阶段} \end{cases}$$

### 3 防爬器吸能可靠性分析

为进一步评估批量生产条件下的防爬器吸能可靠性指标,并为防爬器的批量生产工艺提供参考,依据 ISSSM 吸能可靠性模型构建原理,根据防爬器运用吸能技术条件,确定防爬器许用吸能值为 200 kJ,并赋予其变异系数为 0.1。为直观展示防爬器吸能可靠性指标几何含义,绘制了正态分布吸能曲线与阈值间分布关系如图 9 所示。

由图 9 可知:为实现对防爬器吸能可靠性指标的量化,依据可靠性指标计算原理,求得可靠性指标为 1.53;在变异系数为 0.1 时的吸能性能分布条件下,防爬器吸能可靠性指标可达到较高水平,失

效概率为 0.063 (图中阴影区域)。该原因在于结构吸能性能的离散性使部分防爬器吸能指标小于规定阈值,导致其在实际运行中未能达到规定吸能要求,造成该变异系数条件下,防爬器吸能性能存在一定失效概率。

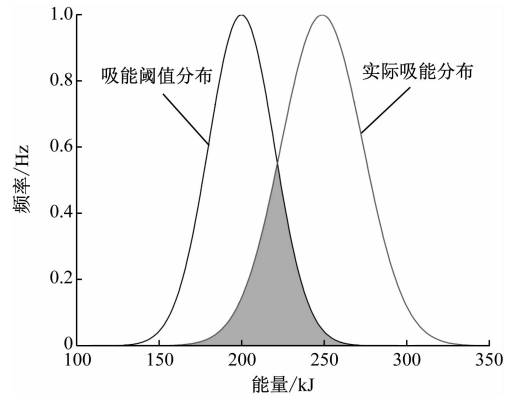


图9 防爬器吸能可靠性指标几何示意

Fig. 9 Geometric diagram of energy absorption reliability indicators for anti-climber devices

为深入探究可靠性指标与失效概率随变异系数的变化趋势,并为防爬器设计制造水平的改进提供参考,计算变异系数自 0.05 ~ 0.10 时的吸能可靠性指标及失效概率,并绘制变化趋势曲线如图 10 所示。

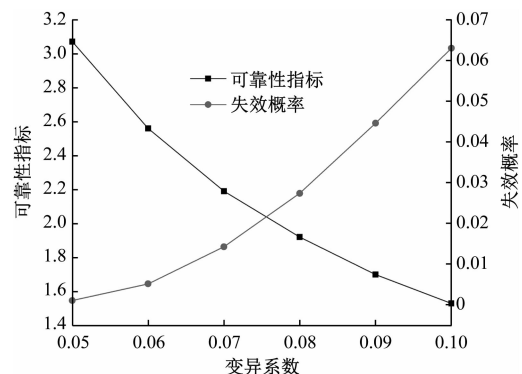


图10 可靠性指标及失效概率随变异系数变化趋势

Fig. 10 Trend of reliability indicators and failure probability changing with variation coefficient

由图 10 可知,伴随变异系数自 0.05 提升至 0.10,吸能可靠性指标自 3.07 降低至 1.53,失效概率自 0.001 增长至 0.063。该原因在于随着变异系数的增加,防爬器结构参数的不确定性水平不断提升,导致其实际吸收能量的离散性不断增加,从而引起防爬器吸能的失效概率增大。因此,为确保防爬器吸能可靠性处于较高水平,应在兼顾制造成本

及工艺水平条件下,缩减吸能性能变异系数。

## 4 结语

本文以某型号防爬器为研究对象,在依据碰撞试验数据对仿真结果合理性进行验证基础上,结合正弦和函数搭建原理,对防爬器力-行程曲线进行拟合,进而采用优化算法对函数表述精度进行提升,构建防爬器 ISSSM,进而结合可靠性理论,建立防爬器吸能可靠性分析模型,并对不同变异系数下的防爬器吸能可靠性进行分析。得到结论如下:

1) 基于有限元理论,建立防爬器碰撞仿真分析模型,并对碰撞压缩过程进行模拟,并将仿真结果与试验过程进行对比。对比结果表明仿真碰撞压缩过程与试验趋势一致,验证了仿真模型建立的合理性。

2) 基于防爬器碰撞力-行程样本数据,结合正弦和函数构建原理建立防爬器力-行程的 ISSSM,并采用优化算法对模型精度进行提升。研究结果表明优化后曲线决定系数自 0.841 1 增加至 0.998 8,验证了 ISSSM 构建的合理性。

3) 结合防爬器 ISSSM 及可靠性理论,构建防爬器吸能可靠性分析模型,并对不同变异系数条件下的吸能可靠性进行分析。分析结果表明随着变异系数自 0.05 提升至 0.10,吸能可靠性指标自 3.07 降低至 1.53,失效概率自 0.001 增长至 0.063,该结论可为防爬器的设计制造优化提供参考。

## 参考文献

- [1] 张云峰,杭志洲,方灵任. 刨削式与整体型蜂窝式车辆防爬器对撞性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 26.  
ZHANG Yunfeng, HANG Zhizhou, FANG Jiongren. Collision performance analysis of planing and integral honeycombing anti-climbs for vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(2): 26.
- [2] 许平,魏鲁宁,邢杰,等. 地铁列车刨削式防爬吸能结构冲击力平稳行为参数优化[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2023. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230632.  
XU Ping, WEI Luning, XING Jie, et al. Optimization of impact stability behavior parameters of metro vehicle planing type anti-climbing energy absorption structure[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230632.
- [3] 陈佳明,朱涛,肖守讷,等. 地铁车辆蜂窝式防爬器的结构设计及优化[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(5): 657.  
CHEN Jiaming, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Structure design and optimization of honeycomb anti-climbing device for subway vehicles[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(5): 657.
- [4] 周和超,包泽宇,徐世洲,等. 铁道车辆吸能式防爬器垂向屈曲研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 170.  
ZHOU Hechao, BAO Zeyu, XU Shizhou, et al. Study on the vertical buckling of railway vehicle's anti-climber[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(16): 170.
- [5] 吕元颖. 基于耐撞性的有轨电车防爬器结构优化设计方法[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊2): 87.  
LYU Yuaning. Structural optimization design method of tram anti-creep device based on crashworthiness[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S2): 87.
- [6] 马艳波. 有轨电车型轻防爬器结构优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 136.  
MA Yanbo. Optimum design of the tram light anticreeper structure[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 136.
- [7] 许钦华,高晓鹏,刘旭东,等. 膨胀式防爬器吸能特性研究[J]. 机车电传动, 2023(1): 51.  
XU Qinhua, GAO Xiaopeng, LIU Xudong, et al. Research on energy absorption characteristics of expanding anti-climber[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 51.
- [8] 朱宇,张乐乐,窦伟元,等. 基于 Voronoi 吸能管的新型全向防爬器设计与仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1813.  
ZHU Yu, ZHANG Lele, DOU Weiyan, et al. Design and simulation of a novel omnidirectional anti-climber with Voronoi energy absorption tube[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1813.
- [9] 雍龙泉,黎延海,贾伟. 正弦余弦算法的研究及应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(14): 26.  
YONG Longquan, LI Yanhai, JIA Wei. Literature survey on research and application of sine cosine algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(14): 26.

· 收稿日期:2023-10-09 修回日期:2024-12-01 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-10-09 Revised:2022-12-01 Published:2024-05-10  
· 通信作者:曹阳,助理工程师,caoyang785@126.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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821