

# 某高速受电弓上框架长期服役后模态特性研究

刘钊<sup>1</sup>,周宁<sup>1</sup>,刘大伟<sup>2</sup>,唐勇<sup>3</sup>,林康<sup>4</sup>,张卫华<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031; 2. 中车唐山机车车辆有限公司,河北 唐山 064000;  
3. 蜀道投资集团有限责任公司,四川 成都 610094; 4. 四川久远新方向智能科技有限公司,四川 成都 610095)

**摘要:** 高速列车在运行过程中速度、加速度的变化以及其他的一些诱因,会使受电弓在服役过程中产生共振,可能导致受流质量的降低和弓网离线等严重问题。对受电弓进行模态试验,获得其固有频率和模态振型,对受电弓的安装以及后续的优化设计有着重要的指导作用。针对某型高速受电弓,通过DHDAS软件平台,分别对长期服役后有、无裂纹的两个受电弓上框架进行模态试验,获得其固有频率和模态振型,试验结果表明:裂纹的产生对上框架的振动特性有一定的影响。

**关键词:** 高速受电弓;模态;弓网共振;裂纹

**中图分类号:** U26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2023)02-0119-04

## Study on Modal Characteristics of a High-speed Pantograph Frame after Long-term Service

LIU Zhao<sup>1</sup>, ZHOU Ning<sup>1</sup>, LIU Dawei<sup>2</sup>, TANG Yong<sup>3</sup>, LIN Kang<sup>4</sup>, ZHANG Weihua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
2. CRRC Tangshan Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Tangshan 064000, China;  
3. Shudao Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610094, China;  
4. Sichuan Jiuyuan New Direction Intelligent Technology Co., Ltd., Chengdu 610095, China)

**Abstract:** The variation of speed and acceleration and some other inducements in the running process of high-speed train will cause resonance of pantograph in the service process, which may lead to serious problems such as the reduction of current quality and the offline of pantograph catenary. The modal experiment of the pantograph is conducted to obtain its natural frequency and modal shape, which have an important guiding role for the installation of the pantograph and the subsequent optimization design. Based on a certain type of high-speed pantograph and through DHDAS software platform, modal experiments are carried out on two pantograph upper frames with cracks after long-term service to gain their natural frequencies and modal shapes. The experimental results show that the cracks have a certain impact on the vibration characteristics of the upper frame.

**Keywords:** high speed pantograph; modality; pantograph catenary resonance; crack

## 0 引言

随着高速列车的不断发展,在高速电气化铁路研究中,车辆系统的动力学问题是重要的研究方向之一,其中,弓网系统耦合振动问题也得到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。由于弓网系统的共振问题不仅会加剧受电弓和接触网之间的耦合振动,同时也可能导致弓网离线、受流质量恶化等问题<sup>[2]</sup>。因此,通过模态特性的研究掌握受电弓的固有频率和模态振型,对避免产生共振和后续的动力学性能优化设计有着重要的作用。

近年来,针对弓网模态的问题,国内外的学者也做了相应的试验与仿真研究,马思群等<sup>[3]</sup>以及周素霞等<sup>[4]</sup>对比了某高速受电弓仿真与试验的结果,并校验了其模型的准确性,得出受电弓上臂杆更容易发生垂向振动的结论。

也有学者分别从建模与仿真,不同工况条件以及模态试验几个方面对受电弓弓头部分的模态进行了研究<sup>[5-7]</sup>,而黄超等<sup>[8]</sup>进一步对受电弓弓头的碳滑板部分进行了试验和仿真计算。高文斌等<sup>[9]</sup>通过对比观察振型图,找出了较容易引起弓网脱离的频率。WILK A等<sup>[10]</sup>研究了不同的有限元网格密度等参数对模态分析结果精度的影响。同时,受电弓的裂纹问题也受到了越来越多的关注。裂纹的产生会影响弓网的稳定接触,甚至会危害列车行车安全。对此,一些学者也对受电弓裂纹的萌生及改进措施进行了研究。如,魏向东等<sup>[6]</sup>通过仿真找出了受电弓易产生裂纹的薄弱部位并计算其裂纹萌生寿命,但是对裂纹产生的原因未进行深入的研究。余胜林<sup>[11]</sup>对不同状况下的受电弓进行了仿真分析,找出受电弓框架易出现疲劳裂纹的原因。赵颖等<sup>[12]</sup>及陈明国等<sup>[13]</sup>针对受电弓上框架尾管和上框架顶管的开裂现象,采用了多种检测手段,进行裂纹

**基金项目:** 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(P2020J025)

**第一作者简介:** 刘钊(1997—),男,甘肃民勤人,硕士研究生,研究方向为交通运输工程、弓网温度场和弓网动力学。

失效分析并提出改进方案。从中可以看出,在长期复杂的服役环境下,受电弓的关键部件容易出现裂纹<sup>[14-15]</sup>。

高速受电弓的主要结构如图1所示,受电弓的上框架是其重要的支撑部件,它主要起到连接弓头与下框架的作用。在高速列车的实际运行中,由于长期服役,其上框架会承受较大的振动。大多数学者主要对服役前的受电弓

关键部件进行研究,而对长期服役后或产生裂纹故障的受电弓关键部件的研究并不多见。因此,对长期服役后产生裂纹的受电弓上框架进行模态分析,掌握其相应的模态特性,有利于避免共振产生的影响,且可对后续的动力学优化设计提供相应的指导意见。

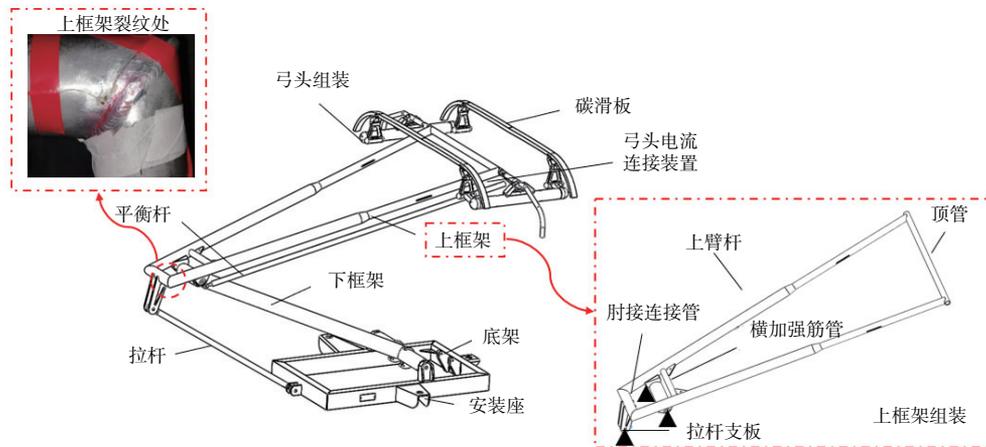


图1 受电弓主要结构及约束位置示意图

## 1 服役前上框架模态计算及验证

通过有限元软件对上框架模型进行建模,包括设置材料属性,边界条件以及网格划分。仿真计算中,各材料性质假设为线性弹性并满足胡克定律。受电弓上框架为铝合金材料,具体材料属性如表1所示。

表1 上框架材料基本属性

材料	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性 模量/Pa	泊松比	屈服 强度/MPa	强度 极限/MPa
铝合金	2.7	7×10 <sup>10</sup>	0.33	280	310

对于该模型,由于整个结构被等效为弹性体,具有多个自由度,因而动力学方程也不能写为简单形式,只能写为一般形式<sup>[16]</sup>:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为系统质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为系统阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为系统刚度矩阵; $\{\mathbf{F}\}$ 为系统外载矢量; $\{\ddot{\mathbf{u}}\}$ 为系统加速度矢量; $\{\dot{\mathbf{u}}\}$ 为系统速度矢量; $\{\mathbf{u}\}$ 为系统位移矢量。对系统的动力平衡方程进行拉氏变换<sup>[17]</sup>,导入模态坐标 $\{q\}$ ,得到

$$\{K_i - \omega_i^2 M_i + j\omega_i C_i\} q_i = \sum_{i=1}^N \varphi_i F_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中: $M_i$ 、 $C_i$ 、 $K_i$ 分别为系统的模态质量、模态阻尼和模态刚度; $N$ 为系统的多自由度系统的自由度数目; $\omega_i$ 、 $\varphi_i$ 为第 $i$ 阶特征值和模态振型。

结合上述内容,采用ANSYS有限元软件,分别计算了上框架的部分自由模态和约束模态。通过模态分析可以看出自由模态下,上框架的前6阶模态频率均为0或接近于0。这是由于上框架的前6阶为刚体运动模态,从第7阶开始上框架开始表现为弹性运动,见表2。

表2 上框架前10阶自由模态频率及振型描述

单位:Hz

阶次	频率	振型描述	阶次	频率	振型描述
1	0	上框架整体侧滚	6	2.10×10 <sup>-3</sup>	上框架整体侧滚
2	0	上框架整体向上转动	7	46.4	上框架垂向弯曲
3	1.50×10 <sup>-4</sup>	上框架整体点头运动	8	53.8	上框架上臂杆横向弯曲
4	2.70×10 <sup>-4</sup>	上框架整体垂向振动	9	53.3	上框架顶管侧滚
5	7.80×10 <sup>-4</sup>	上框架整体向下运动	10	61.9	上框架两上臂杆反相横向弯曲

仿真过程中,为保持仿真工况与试验设定工况一致,在上框架与下框架以及上框架和拉杆连接处施加固定约束,约束位置如图1三角标识部分所示。

对上框架的全柔性模型进行约束模态分析,能够更加

真实地反映出上框架在实际工作状态下的模态振型以及对应的模态频率,表3为上框架前10阶约束模态的模态频率以及振型描述。

表3 上框架前10阶约束模态频率及振型描述

单位:Hz

阶次	频率	振型描述	阶次	频率	振型描述
1	6.634	框架1阶整体横摆	6	61.358	框架1阶两上臂杆反相横向弯曲
2	8.316	框架1阶整体垂向摆动	7	67.248	框架1阶两上臂杆反相垂向弯曲
3	22.422	框架1阶整体侧滚	8	118.160	框架2阶垂向弯曲
4	48.299	框架1阶垂向弯曲	9	118.840	框架2阶横向弯曲
5	51.912	框架1阶横向弯曲	10	135.600	框架2阶两上臂杆反相垂向弯曲

通过上框架的约束模态分析结果,并对比上框架自由模态分析结果,发现在约束模态下,上框架不再有刚体运动模态,这与实际情况一致。图2给出约束条件下的前4阶模态振型图。

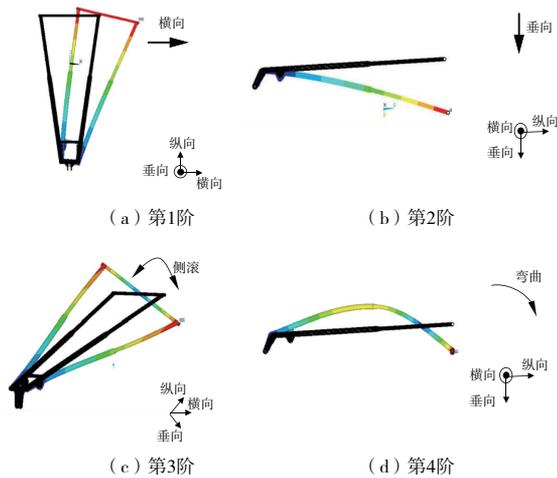


图2 约束条件下前4阶模态振型

模态的误差为计算值减去试验值的差值与试验值的比值<sup>[18]</sup>。同型号受电弓上框架的1阶垂向弯曲频率为50.60 Hz,上框架1阶横向弯曲频率为51.79 Hz,框架1阶两上臂杆反相横向弯曲频率为58.83 Hz<sup>[19]</sup>,与上述表2中对应的振型频率误差分别为-4.54%、-0.02%、-4.97%,均在5%以内,说明仿真计算结果与理论计算结果基本相吻合。因此,有限元仿真计算结果能够很好地逼近试验值,从而验证该有限元模型是准确的。

## 2 服役4 800 000 km 后上框架模态试验

本试验采用服役4 800 000 km后的某型高速受电弓的上框架结构,分别对具有相同型号、相同服役条件,但有、无产生裂纹的两个上框架进行模态试验。采用DHDAS软件平台,结合1节中对上框架的计算模态分析结果,来对上框架进行测点布置,通过获得其在冲击载荷下的加速度数据,进而确定上框架的模态频率与模态振型。为保证测得的模态振型较为光滑,采用150 mm左右的测点间隔,总共设置37个测点。测点布置除了BC段与IH段外,其余各段位置均以平均分布方式来设置测点,而BC段和IH段,各测点之间的间距依次为150 mm、150 mm、150 mm、200 mm、150 mm、150 mm,实际的布置情

况如图3所示。

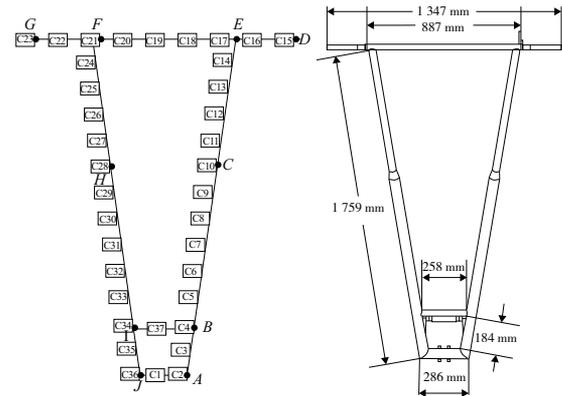


图3 受电弓上框架尺寸及布点图

试验时激励点的位置以及方向的选择都会影响试验所测得的结果,如果激励点位于某阶模态的节点上,测试时就会丢失该阶模态。由此,试验过程中为尽量避免激励点落在某阶模态的节点上,采用多点激励的方法,同时还通过改变激励的方向来确保各个方向的模态都能激发出来。本次试验分别选取C11、C20、C24和C29为激励点并分别进行横向以及垂向两个方向的激励。

通过试验前的多次敲击测试发现橡胶材质锤头和铝合金锤头不利于激发上框架模态,因此试验测试过程中,采用尼龙的锤头对上框架进行模态试验。图4为现场试验图。



图4 受电弓上框架现场试验图

## 3 结果分析

本次试验激励点位于C29(垂向)和C14(横向),锤头激励范围为480 N~550 N。通过多次的重复性测试,对试验结果的分析可知,本次试验共测出9阶模态,各阶振型图见图5。两个上框架振型所对应的试验模态频率及计算频率三者的对比见表4。

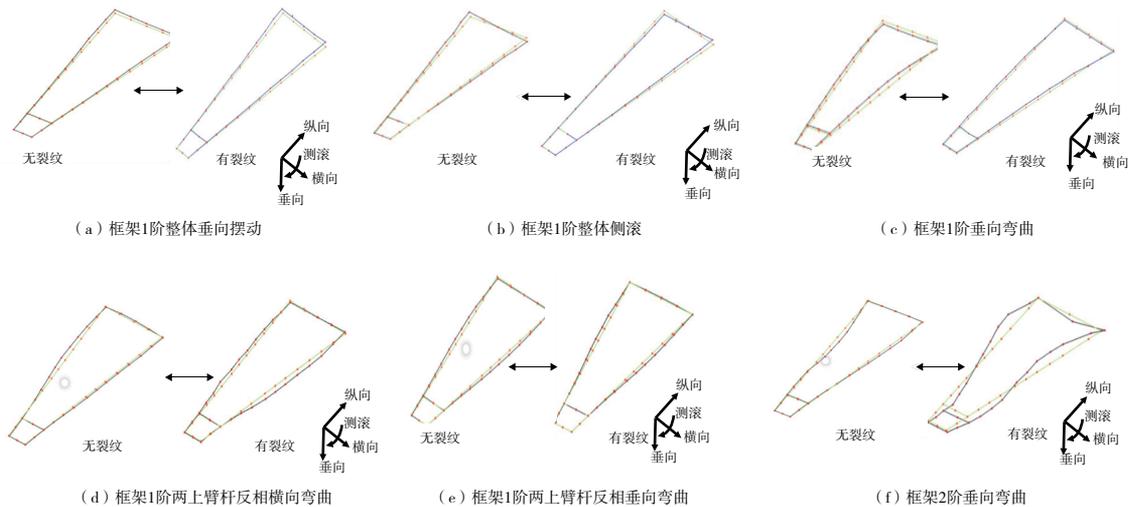


图5 受电弓有裂纹与无裂纹上框架部分试验模态振型对比图

表4 上框架振型对应的计算频率与试验频率对比

振型描述	计算频率	单位: Hz	
		无裂纹试验频率	有裂纹试验频率
框架1阶整体横摆	6.633	—	—
框架1阶整体垂向摆动	8.316	4.543	4.848
框架1阶整体侧滚	22.422	14.018	13.785
框架1阶垂向弯曲	45.229	29.533	30.581
框架1阶横向弯曲	51.912	—	—
框架1阶两上臂杆反相横向弯曲	61.358	54.939	58.972
框架1阶两上臂杆反相垂向弯曲	67.248	56.940	73.713
框架2阶垂向弯曲	118.156	80.194	118.884
框架2阶横向弯曲	118.839	—	—
框架2阶垂向反向弯曲	135.600	133.047	141.302
框架3阶垂向反向弯曲	191.511	164.895	198.312

受电弓经过长期服役后,对于两个上框架,试验都未能激发出上框架的1阶整体横摆模态,这是由于该阶模态接近于刚体模态,而且模态频率较低,通过力锤敲击测试未能激发出该阶模态信息,同样试验也未激发出1阶横向弯曲和2阶横向弯曲模态。

受电弓在经过长期服役后,对于同一振型,相对于计算值,两个上框架的试验模态频率在小于60 Hz的低频区域内较服役前出现了降低,这将会导致受电弓在更低的频率段出现共振现象,主要由于长期服役后其材料参数和结构参数等出现变化所导致;但是在试验模态频率大于60 Hz的高频区域内,相对于计算值,无裂纹上框架的模态频率同样低于服役前的模态频率,但是有裂纹上框架的模态频率高于服役前的模态频率,这主要是由于裂纹的产生导致。

长期服役后,两个上框架在同一振型时对应的试验模态频率在小于60 Hz的低频区域内差别不大,差距均不超

过4 Hz,且二者的振型图相差不大(图5(a)—图5(c));但是在试验模态频率大于60 Hz的区域中,产生裂纹的上框架的试验模态频率明显大于未产生裂纹的上框架的试验模态频率,且二者的振型图逐渐出现明显的差异化,且频率差值越大,振型图差异化越明显(图5(d)—图5(f)),差值在8~39 Hz以内。

## 4 结语

本文首先对受电弓上框架的自由模态和约束模态分别进行建模计算,验证了建模的有效性;继而对长期服役后的两个受电弓上框架(分别为有裂纹上框架和无裂纹上框架)进行模态试验,获得了200 Hz以内的各阶模态参数。试验表明:长期服役后,相对于计算值,两个上框架在模态频率小于60 Hz的区域内,模态频率都发生了明显的降低,但是在大于60 Hz的区域内,裂纹上框架的模态频率明显升高,甚至超过了服役前上框架的模态频率,这说明上框架的裂纹对于大于60 Hz模态频率的区域有明显的影 响,在后续的受电弓优化设计中应加以考虑。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵光伟. 高速受电弓结构特性仿真分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- [3] 马思群, 赵光伟, 牛小伟, 等. 基于模态试验的高速受电弓有限元模型验证[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(4): 11-15.
- [4] 周素霞, 徐鹏, 孙锐, 等. 受电弓模态分析及上臂杆疲劳裂纹萌生寿命预测[J]. 中国科技论文, 2018, 13(22): 2533-2537.
- [5] COLLINA A, LO CONTE A, CARNEVALEM. Effect of collector deformable modes in pantograph—catenary dynamic interaction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(1): 1-14.
- [6] 魏向东, 焦敬品, 吴荣平, 等. 高速受电弓固有振动特性的实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(1): 67-72.

(下转第141页)

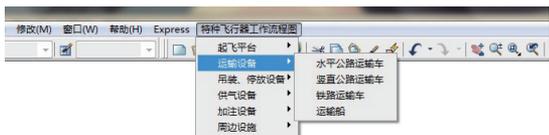


图5 界面设计

### 5 实测

在安装了 AutoCAD2010 的计算机上加载本应用程序,在命令行输入模块名称,如“飞行器”,根据后续提示进行颜色、线型及尺寸的设置。拖动鼠标将看到动态实时的图形显示,根据图样分布,点击鼠标左键拾取基点后即可完成所需图形的绘制。用户也可以通过菜单栏选项完成绘图。点击菜单栏“特种飞行器工作流程图”,出现下拉菜单,根据零部件的分类选择需要绘制的图形,例如选择“起飞平台”——“飞行器”,将出现一个人机交互对话框,设置各项参数,点击确定,拖动鼠标将看到动态显示的图形,拾取基点完成图形的绘制。最终形成的飞行器起飞状态图形如图6所示。

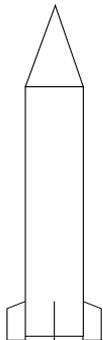


图6 参数化驱动飞行器图形形成

完成“飞行器”的绘制后,在下部绘制飞行器起飞平台,再合理选取特种飞行器的起始基点,就初步完成对特种飞行器预备发射状态的描述。

### 6 结语

本文以 C++ 为编程语言,利用 ObjectARX2010 对 AutoCAD2010 进行二次开发,形成一套功能完善、可参数化驱动、人机交互友好的飞行器工作流程演示图形库,大大降低了工程设计人员的工作量,提高了设计的效率,为提高飞行器工作流程的编制效率提供了有效途径。

#### 参考文献:

[1] 朱孔涛,郑忠俊,付进勇,等. 基于 Objectarx 的非标准件参数化 CAD 系统实例研究[J]. 机械制造与自动化,2008,37(4): 33-35.

[2] 张帆.ObjectARX 开发实例教程[EB/OL].北京智帆高科科技有限公司,(2007-07-15)[2021-08-10]. <https://www.docin.com/p-36862179.html>.

[3] 刘锐宁,梁水,李伟明,等. Visual C++开发实战 1200 例-第 I 卷[M]. 北京:清华大学出版社,2011.

[4] 陈文峰,刘祚秋,钟志辉,等. AutoCAD 二次开发在工程计算软件中的应用[J]. 科学技术与工程,2011,11(24): 5844-5848.

[5] 韦忠. 基于 ObjectARX. Net 的 Jig 技术及其应用研究[J]. 现代测绘,2010,33(3):45-47.

[6] 吴东庆,胡小健. 基于 Jig 技术的军事地图箭头绘制算法[J]. 中国制造业信息化,2011,40(15):47-50.

[7] 甘辉. 利用 ObjectARX 与 MFC 实现应用程序开发[J]. 通用机械,2007(1):85-87.

收稿日期:2021-10-21

(上接第 122 页)

[7] 李东阳. 受电弓振动特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[8] 黄超,王安斌,何宇,等. 受电弓碳滑板异常磨损与高频振动机理分析[J]. 铁道标准设计,2021,65(3):149-156,163.

[9] 高文斌,马果垒,马思群,等. DSA380 型高速列车受电弓模态分析[J]. 大连交通大学学报,2015,36(6):24-28.

[10] WILK A, JUDEK S, KARWOWSKI K, et al. Modal analysis of railway current collectors using Autodesk Inventor[J]. MATEC Web of Conferences,2018,180:04004.

[11] 余胜林. 交流受电弓框架疲劳特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[12] 赵颖,朱河,陈贞韬. TSG18 型受电弓上框架焊缝裂纹失效分析及改进[J]. 电力机车与城轨车辆,2020,43(6):84-87,108.

[13] 陈明国,冯叶,孙云嵩. 高速受电弓上框架裂纹故障分析与

改进[J]. 机车电传动,2017(4):105-109.

[14] 欧昌宇,钟源,吴积钦. 地铁车辆受电弓上框架疲劳裂纹成因分析[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(8):86-90.

[15] 龙木勇. 广州地铁三号线受电弓上框架裂纹原因分析及处理措施[J]. 机电工程技术,2012,41(7):197-200.

[16] 周宁,张卫华. 基于受电弓弹性体模型的弓网动力学分析[J]. 铁道学报,2009,31(6):26-32.

[17] 曹树谦. 振动结构模态分析:理论、实验与应用[M]. 天津:天津大学出版社,2001.

[18] 赵光伟. 高速受电弓结构特性仿真分析[D]. 大连:大连交通大学,2017.

[19] 周宁. 350 km/h 及以上弓网动态行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

收稿日期:2021-10-28