

文章编号: 1001-4888(2020)01-0067-06

## 高速受电弓固有振动特性的实验研究<sup>\*</sup>

魏向东<sup>1,2</sup>, 焦敬品<sup>1</sup>, 吴荣平<sup>3</sup>, 张志奇<sup>2</sup>, 许向红<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190;  
3. 北京中车赛德铁道电气科技有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 高速列车行驶过程中, 弓网共振会增大受电弓与接触网振幅, 这可能导致弓网离线、受流质量降低, 甚至损坏受电弓和接触网。实验研究不同运行工况下受电弓的固有振动频率和模态振型, 规避弓网共振, 对于未来电气化铁路的弓网优化设计至关重要。本文针对 DSA380 型高速受电弓, 用自由和橡胶边界模拟受电弓的两种运行工况, 获得了弓头的固有振动频率和模态振型, 实验结果表明弓头振动特性与弓网接触状态密切相关。

**关键词:** DSA380 高速受电弓; 固有振动特性; 弓网接触状态

**中图分类号:** O39; U270

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-19-044

### 0 引言

随着高速列车运行速度的提升, 弓网耦合振动问题的研究备受关注<sup>[1]</sup>。在列车行驶过程中, 弓网共振是引起受电弓与接触网振幅增大的主要原因之一, 可能导致弓网离线、受流质量降低, 甚至损坏受电弓和接触网<sup>[2]</sup>。因此, 发展测量受电弓这一复杂机构振动特性的实验技术和方法, 获得不同运行工况下受电弓的固有振动频率和模态振型, 对于未来电气化铁路的弓网优化设计至关重要。

国内外公开报道的受电弓模态测试方面的结果较少。Collina 等<sup>[3]</sup>将弓头悬挂于两个刚度为 2.5 N/mm 的软弹簧上模拟弓头自由约束状态, 采用力锤法进行模态实验, 结果表明弓头弯曲模态频率较高, 在 60.1~437 Hz 内 ATR95 弓头有 7 阶弯曲模态, 在 81~476 Hz 内 DSA350S 弓头有 4 阶弯曲模态, 在 49.3~205.6 Hz 内 CX25 弓头有 8 阶弯曲模态。李东阳等<sup>[2,4]</sup>针对 DSA250 型受电弓, 在弓头处用激振器施加位移, 获得弓头的幅频特性曲线, 测得弓头在 1~12 Hz 范围内有 2 阶垂向振型。宋亚轻<sup>[5]</sup>将 DSA200 型受电弓底座固定, 调节气囊压力, 使得在升弓高度约 1 m 时弓头可自由悬浮, 用力锤法进行模态实验, 采用单点激励、多点拾振, 结果表明, 弓头在 2.4~7.5 Hz 内有 4 阶模态, 42~123 Hz 内有 5 阶模态, 153~275 Hz 内有 8 阶模态。高文斌等<sup>[6]</sup>针对 DSA380 型高速受电弓, 将底座固定, 升弓至 1600 mm, 对弓头施加竖直向下的 80 N 压力, 模拟接触线对弓头的作用, 用力锤法进行模态实验, 采用多点激励、多点拾振, 实验结果表明受电弓各部件在 4.3~15.0 Hz 范围内有 6 阶模态, 其中有 4 阶为垂向振动。马思群等<sup>[7,8]</sup>、赵光伟<sup>[9]</sup>的实验结果给出在 60 Hz 以内 DSA380 受电弓各部件约有 20 阶模态。

在受电弓实际运行中, 不同的弓网接触工况, 可等效为受电弓弓头处对应的边界约束。弓网离线时, 弓头处于自由悬浮状态; 弓网接触良好时, 弓头相当于有力边界的约束。本文针对 DSA380 型高速受电弓, 在 1600 mm 正常升弓高度下, 模拟受电弓的离线和接触两种工况, 实验研究了弓头边界约束对

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-04-22

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(11672297)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB22020000)资助

**通讯作者:** 许向红(1975—), 女, 博士, 副研究员。主要研究领域: 受电弓力学特性与结构优化、仿生微结构设计及 3D 打印。

Email: xxh@lnm.imech.ac.cn

弓头固有振动频率和模态振型的影响。

## 1 模态测试分析原理

基于力锤敲击法对 DSA380 受电弓弓头进行模态测试。实验时,锤击预设的敲击点,通过加速度传感器记录测点加速度信息,经过快速傅里叶变换,将激励信号与响应信号由时域转化为频域,通过输入自功率谱和输入-输出功率谱求解频响函数<sup>[10-13]</sup>。为减小实验误差,采用多次锤击降低偶然误差。敲击  $N$  次,记第  $i$  次敲击时的力信号为  $F_i(t)$ ,第  $j$  个通道的加速度时域信号为  $X_{ij}(t)$ ,通过快速傅里叶变换得到相应的频域信号  $X_{ij}(\omega)$  和  $F_i(\omega)$ ,则敲击信号与第  $j$  个通道输出信号的频响函数可表达为

$$H_j = \frac{G_{XF,j}}{G_{FF}} \quad (1)$$

式中,  $G_{XF,j}$  为敲击信号与第  $j$  个通道的输入-输出互谱;  $G_{FF}$  为敲击信号的输入自谱:

$$G_{FF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i(\omega) F_i^*(\omega) \quad (2)$$

$$G_{XF,j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij}(\omega) F_i^*(\omega) \quad (3)$$

式中,  $F_i^*(\omega)$  为  $F_i(\omega)$  的共轭函数。

基于频响函数矩阵,利用 PolyMAX 模态识别算法<sup>[14,15]</sup>进行参数估计,获得受电弓的固有振动频率、模态振型和阻尼比等参数。引入模态置信矩阵<sup>[12,16]</sup> (Modal Assurance Criterion, 简称 MAC) 评价模态向量的空间交角:

$$MAC_{rs} = \frac{|\{\phi_r\}^T \{\phi_s\}^*|^2}{(\{\phi_r\}^T \{\phi_r\}^*)(\{\phi_s\}^T \{\phi_s\}^*)} \quad (4)$$

式中,  $MAC_{rs}$  是第  $r$  阶和第  $s$  阶模态向量的相关系数,位于模态置信矩阵 MAC 的第  $r$  行第  $s$  列,  $\{\phi_r\}$  和  $\{\phi_s\}$  是由参数识别得到的两个模态向量;上标  $*$  和  $T$  分别代表向量的共轭和转置。若  $\{\phi_r\}$  和  $\{\phi_s\}$  为同一模态,则  $MAC_{rs}=1$ ;若二者是两个不同的真实物理模态,则  $MAC_{rs}=0$ ,即两个模态具有正交关系,模态振型完全独立。 $MAC_{rs}$  值介于 0~1 之间,两个振型独立性越好,  $MAC_{rs}$  值越接近 0;振型越相近,  $MAC_{rs}$  值越接近于 1。



图 1 受橡胶边界约束条件下高速受电弓实验布置图

Fig. 1 Experiment photograph of high-speed pantograph under rubber boundary constraint

## 2 实验方案及过程

实验测试所用的 DSA380 型高速受电弓,由北京中车赛德铁道电气科技有限公司设计生产。受电弓底座通过 3 个陶瓷绝缘子用螺栓固定于列车车体顶部,上框架与弓头间通过弓头弹簧连接,平衡杆用于调节弓头保持水平,安装在底座上的气动升弓装置产生气动力作用于下臂杆可实现升降弓。

本次实验针对受电弓的正常升弓高度状态进行锤击模态测试。受电弓正常工作时的升弓高度为 1600mm,包含受电弓底座绝缘子高度 400mm。实验时,用螺栓将受电弓底座与试验台固定,在两种弓头边界约束状态下,通过调节升弓气囊压力,实现升弓高度为

1600±2mm。第一种弓头约束状态为自由边界,此时滑板上方无任何约束,升弓气囊提供的升弓力矩与受电弓自身重力矩达到平衡;第二种弓头约束状态为橡胶边界(图 1),将钢管放置于前后滑板上表面中点处,用橡胶绳约束钢管中点,调节橡胶绳的拉力为 80N,模拟柔性接触网对弓头的作用。橡胶约束

情形下,升弓气囊提供的升弓力矩与受电弓自身重力矩和橡胶绳拉力矩之和达到平衡。

采用单点激励、多点拾振的方法对 DSA380 受电弓在 1600mm 升弓高度、自由和橡胶两种弓头边界约束状态下进行锤击模态测试。测试系统包括 DH5902N 型 32 通道高速数据采集仪、1A302E 三向加速度传感器、60kN 模态力锤及 DHDAS 测试分析软件。

考虑到传感器的附加质量会对结构的振动特性产生影响,采用分组测量的方法,各个部件的测点分组布置传感器。每根滑板上均匀布置 8 个传感器,共 16 个测点。分成两组测试。第一组为 No. 61、No. 63、No. 66、No. 68、No. 51、No. 53、No. 56 和 No. 58,第二组为 No. 62、No. 64、No. 65、No. 67、No. 52、No. 54、No. 55 和 No. 57(图 2)。在每两个测点间依次锤击,通过对比分析不同锤击点对应的各测点频响曲线,确定 No. 63 和 No. 64 中间点作为弓头模态测试的锤击点,在此处激励,既可以激励出合适频率范围的振动,同时也可以传递到所有测点。

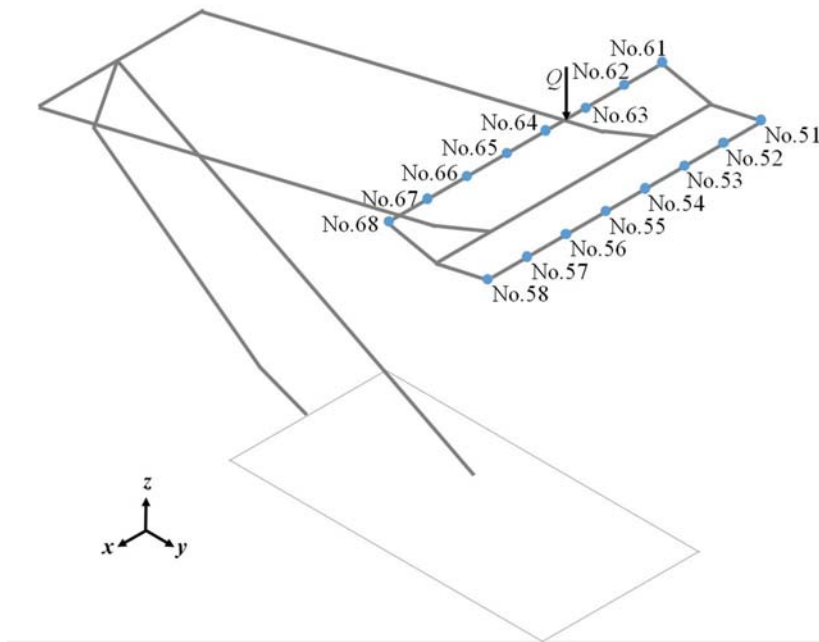


图 2 锤击点和测点示意图: 箭头 Q 示意锤击点; No. 51~No. 58、No. 61~No. 68 示意测点位置

Fig. 2 Schematic diagram of excitation point and measure points; Arrow Q indicates the hammer point; No. 51~No. 58 and No. 61~No. 68 indicate the positions of the measure points

### 3 实验结果分析

各测点  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向在 60Hz 范围内的频率响应函数曲线如图 3 所示。基于 PolyMAX 模态识别算法,求得 DSA380 弓头在 60Hz 以内的模态参数(表 1)。各阶模态的  $MAC_{rs}$  值见图 4,不同阶模态之间的  $MAC_{rs}$  介于 0~0.25,且小于 0.10 的占 79%,说明本文所得到的各阶模态是相互独立的。

在弓头自由和橡胶约束两种情形下,都先后出现了弓头俯仰(图 5(a))、弓头垂/纵向振动(图 5(b))、两滑板交叉侧滚(图 5(c))、两滑板相对错动(图 5(d))、弓头垂向一阶弯振(图 5(e))和两滑板垂向反相一阶弯振(图 5(f))等 6 阶振型。前 4 阶频率较低,为弓头的刚体振动,这主要是由弓头弹簧的柔性连接引起的。后 2 阶频率高于 40Hz,呈现为弓头的垂向弯曲振动,且最大位移均在滑板中心位置。相比于弓头自由约束情形,橡胶边界情形下弓头多了 3 阶刚体振动振型,分别为弓头横/垂向振动、弓头侧滚(图 5(g))和弓头水平面内小角度转摆并弓头垂向振动(图 5(h))。

对两滑板交叉侧滚和两滑板相对错动这 2 阶振型,自由边界情形的固有振动频率低于橡胶边界情形。而弓头俯仰等 4 阶振型,自由边界情形的固有振动频率均高于橡胶边界情形。同时,橡胶边界情形比自由边界情形多的 3 阶模态频率都是低频,小于 11Hz。

表 1 DSA380 型受电弓弓头的固有振动频率、阻尼比和振型描述  
Tab.1 Natural frequency, damping ratio and of vibration mode description of DSA380 pantograph head

| 弓头自由悬浮 |       |       |             | 弓头橡胶边界 |       |       |             |
|--------|-------|-------|-------------|--------|-------|-------|-------------|
| 阶次     | 频率/Hz | 阻尼比/% | 振型描述        | 阶次     | 频率/Hz | 阻尼比/% | 振型描述        |
| 1      | 3.75  | 1.32  | 弓头俯仰        | 1      | 2.91  | 5.83  | 弓头俯仰        |
|        |       |       |             | 2      | 4.81  | 1.01  | 弓头横/垂向振动    |
|        |       |       |             | 3      | 5.70  | 1.04  | 弓头侧滚        |
| 2      | 8.88  | 1.72  | 弓头垂/纵向振动    | 4      | 7.31  | 1.28  | 弓头垂/纵向振动    |
|        |       |       |             | 5      | 10.10 | 0.50  | 弓头水平面内小角度转摆 |
| 3      | 15.78 | 5.46  | 两滑板交叉侧滚     | 6      | 18.05 | 1.04  | 两滑板交叉侧滚     |
| 4      | 25.41 | 2.45  | 两滑板相对错动(三向) | 7      | 30.35 | 1.10  | 两滑板相对错动(三向) |
| 5      | 45.38 | 1.14  | 弓头垂向一阶弯振    | 8      | 44.21 | 0.82  | 弓头垂向一阶弯振    |
| 6      | 49.57 | 0.64  | 两滑板垂向反相一阶弯振 | 9      | 49.30 | 0.69  | 两滑板垂向反相一阶弯振 |

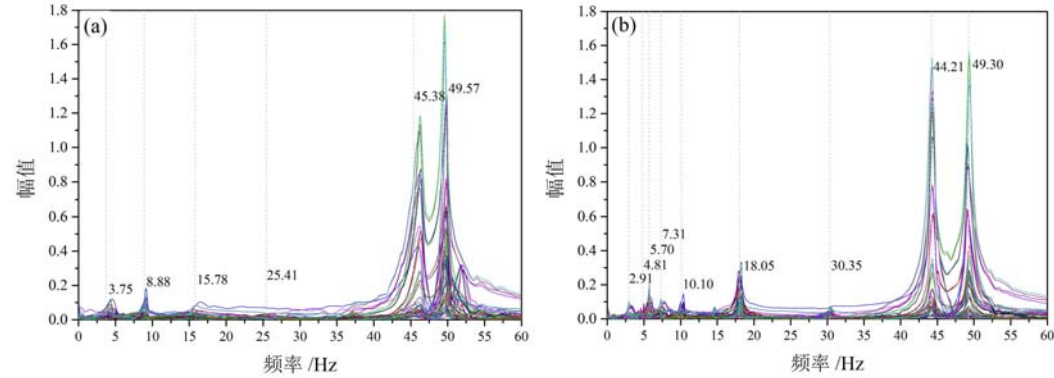


图 3 频率响应函数曲线：弓头约束状态分别为(a) 自由悬浮；(b) 橡胶边界  
Fig. 3 Frequency response function curves of the collectors; The constraint states of the pantograph head are (a) free suspension; and (b) rubber boundary, respectively

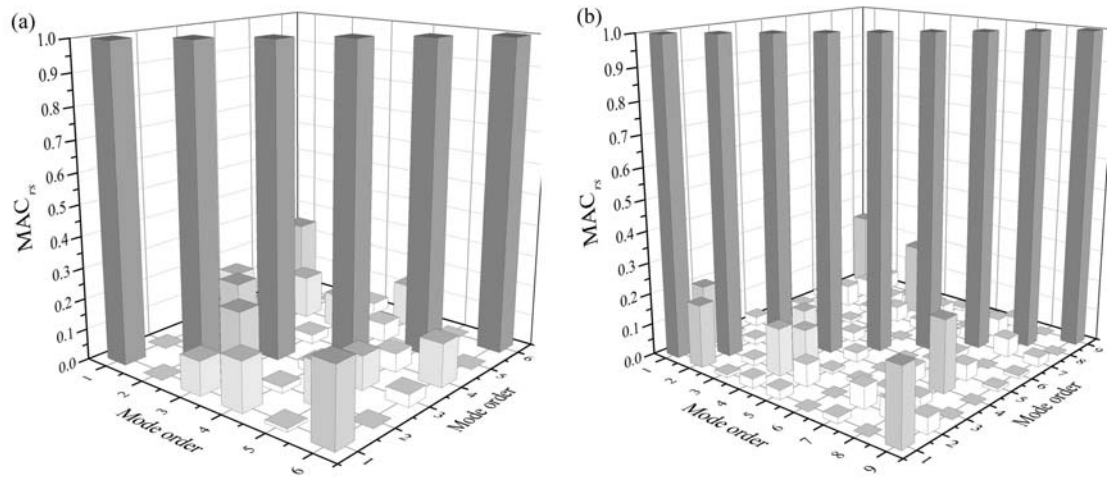


图 4 MAC 值：弓头约束状态分别为(a) 自由悬浮；(b) 橡胶边界  
Fig. 4 Modal assurance criterion (MAC) values; The constraint states of the pantograph head are (a) free suspension; and (b) rubber boundary, respectively

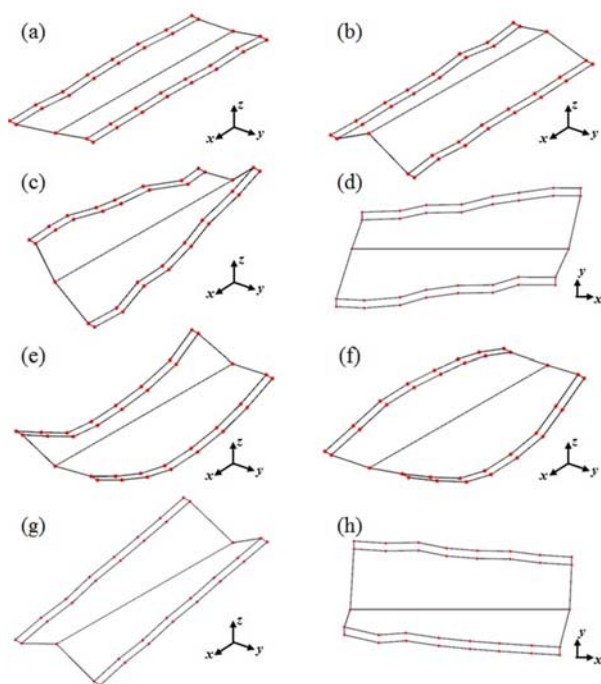


图5 DSA380型受电弓弓头振型图: (a) 弓头俯仰; (b) 弓头垂/纵向振动; (c) 两滑板交叉侧滚; (d) 两滑板相对错动(三向); (e) 弓头垂向一阶弯振; (f) 两滑板垂向反相一阶弯振; (g) 弓头侧滚; (h) 弓头水平面内小角度转摆、弓头垂向振动

Fig. 5 Vibration patterns of DSA380 pantograph head; (a) pitching motion of the pantograph head; (b) vertical/longitudinal vibration of the pantograph head; (c) cross side rolling of the two carbon strips; (d) relative slip of the two carbon strips; (e) first-order bending vibration in vertical direction of the pantograph head; (f) first-order reversed bending vibration in the vertical direction of the two carbon strips; (g) side rolling of the pantograph head; (h) small angle swing in horizontal plane and vertical vibration of the pantograph head

## 4 结论

用自由悬浮和橡胶边界模拟弓网离线和弓网接触两种工况下的受电弓弓头约束,采用力锤法对 DSA380 型高速受电弓进行模态实验,获得了 60Hz 以内的各阶模态参数。由于弓头弹簧的柔性连接作用,在 40Hz 以内弓头主要为刚体振动,40~60Hz 内出现滑板垂向弯曲振动。与自由边界相比,在滑板处施加 80N 压力的橡胶边界情形,丰富了受电弓在 11Hz 以内频率段的模态。弓头在低频范围内的刚体振动与弓头弹簧密不可分,且弓头约束状态会影响弓头的固有振动频率和模态振型,在弓头结构设计和应用中应加以考虑。

## 参考文献:

- [1] 吴积钦. 受电弓与接触网系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010 (WU Jiqin. Pantograph and catenary system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010 (in Chinese))
- [2] 李东阳. 受电弓振动特性试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012 (LI Dongyang. Experimental study on pantograph vibration characteristics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012 (in Chinese))
- [3] Collina A, Lo Conte A, Carnevale M. 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.
- [4] 李东阳, 吴积钦, 关金发. DSA250 型受电弓振动特性仿真与测试[J]. 电气化铁道, 2012, 23(4): 7-10 (LI Dongyang, WU Jiqin, GUAN Jinfa. Simulation and test of vibration characteristics of DSA250 pantograph[J]. Electric Railway, 2012, 23(4): 7-10 (in Chinese))
- [5] 宋亚轻. 受电弓基于振动测试的动力学建模及其非线性随机动力学特性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014

- (SONG Yaguang. Dynamic modeling based on vibration testing and nonlinear stochastic dynamic analyzing of pantograph system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese))
- [6] 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 (GAO Wenbin, MA Guolei, MA Siqun, et al. Modal analysis of DSA380 high-speed train pantograph[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(6):24—28 (in Chinese))
- [7] 马思群, 张鹏程, 胡越, 等. 基于模态相关性的高速受电弓静强度分析[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(5):23—27 (MA Siqun, ZHANG Pengcheng, HU Yue, et al. Static strength analysis of high-speed pantograph based on modal correlation[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(5):23—27 (in Chinese))
- [8] 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(4):11—15 (MA Siqun, ZHAO Guangwei, NIU Xiaowei, et al. Verification of finite element model of high-speed pantograph based on modal test[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017(4):11—15 (in Chinese))
- [9] 赵光伟. 高速受电弓结构特性仿真分析[D]. 大连交通大学, 2017 (ZHAO Guangwei. Structural characteristics simulation analysis of high-speed pantograph[D]. Dalian Jiaotong University, 2017 (in Chinese))
- [10] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析: 理论、实验与应用[M]. 天津大学出版社, 2001 (CAO Shuqian, ZHANG Wende, XIAO Longxiang. Modal analysis of vibration structures: theory, experiment and application [M]. Tianjin University Press, 2001 (in Chinese))
- [11] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海交通大学出版社, 2000 (FU Zhifang, HUA Hongxing. Theory and application of modal analysis[M]. Shanghai Jiaotong University Press, 2000 (in Chinese))
- [12] 刘斌. 基于模态的白车身结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011 (LIU Bin. Study on modal-based structural optimization of body-in-white[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011 (in Chinese))
- [13] 董小瑞, 杨世文. 复杂结构模态测试方法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(4):474—477 (DONG Xiaorui, YANG Shiwen. Research on modal testing methods for complex structures [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(4):474—477 (in Chinese))
- [14] Bart P, Herman V D A, Patrick G, et al. The PolyMAX Frequency-Domain Method: a new standard for modal parameter estimation? [J]. Shock and Vibration, 2004, 11(3-4):395—409.
- [15] Yu Wenwen, Tian Hao, Zheng Haiqi, et al. Tower modal parameters identification based on polymax method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 229-231:1823—1826.
- [16] Pastor M, Binda M, Harcarik T. Modal Assurance Criterion[J]. Procedia Engineering, 2012, 48(1):543—548.

## Experimental study on natural vibration characteristics of high-speed pantograph

WEI Xiang-dong<sup>1,2</sup>, JIAO Jing-pin<sup>1</sup>, WU Rong-ping<sup>3</sup>, ZHANG Zhi-qi<sup>2</sup>, XU Xiang-hong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Beijing CRRC Corporation Limited CED Railway Electric Tech. Co., Ltd, Beijing 100176, China)

**Abstract:** During the high-speed train travel, the pantograph-catenary resonance increases the amplitudes of the pantograph and the catenary, which may cause pantograph-catenary disconnection and decline in current-receiving quality, and even damage the pantograph and the catenary. Experimental studies on the inherent frequency and modal shape of the pantograph under different operating conditions to avoid the pantograph-catenary resonance are crucial for pantograph-catenary optimization design of future electrified railways. This work simulates two boundary conditions of DSA380 high-speed pantograph head by free and rubber boundaries to obtain the inherent frequency and modal shape of the pantograph head. The experimental results show that the natural vibration characteristics of the pantograph head are closely related to the pantograph-catenary contact state.

**Keywords:** DSA380 high-speed pantograph; natural vibration characteristics; boundary conditions of pantograph head