

# 基于模态实验的单滑板受电弓全柔模型修正方法<sup>1)</sup>

许向红<sup>\*,2)</sup> 罗 羿<sup>\*,†</sup> 张颢辰<sup>\*,†</sup> 周 睿<sup>\*,†</sup> 吴孟臻<sup>\*</sup> 黄思俊<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(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)

<sup>†</sup>(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

<sup>\*\*</sup>(北京中车赛德铁道电气科技有限公司, 北京 100176)

**摘要** 动车组通过受电弓从接触网上获取电能, 良好的弓网接触是列车受流的重要保障. 随着列车速度的提高, 弓网动态特性问题日益突出. 受电弓在高速或更高速运行时, 接触网不平顺、气动效应等高频激励, 将激发受电弓的高频弹性模态及富有高频成分的弓网相互作用力. 只考虑受电弓 3 个垂向自由度的三质量块模型不再适用于高频弓网动力学分析, 为进行更高速下的受电弓动力学参数设计和弓网受流质量评估, 需建立反映结构弹性模态的受电弓全柔模型. 文章提出基于模态实验的受电弓全柔模型的修正方法. 首先, 开展一款新型单滑板高速受电弓的模态实验, 获得 260 Hz 以内的两阶垂向耦合振动模态参数和 6 阶垂向弹性模态参数. 然后, 进行受电弓模态频率对材料参数的灵敏度分析, 研究得到弓头、上臂和下臂的弹性模量和密度及弓头弹簧刚度, 对受电弓的 8 阶垂向模态频率的影响显著, 确定了模型修正的参数. 最后, 利用粒子群优化算法, 获得与模态实验结果吻合度较高的修正全柔模型, 其与实验结果的误差仅为 5.2%. 此外, 提出基于模态置信度的振型识别方法, 实现了迭代寻优过程中正确率为 100% 的模态自动识别.

**关键词** 受电弓, 模态实验, 全柔模型, 模型修正

中图分类号: U264.3<sup>+4</sup> 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-063

## FULL FLEXIBLE MODEL UPDATING OF SINGLE-STRIP PANTOGRAPH BASED ON MODAL TEST<sup>1)</sup>

Xu Xianghong<sup>\*,2)</sup> Luo Yi<sup>\*,†</sup> Zhang Haochen<sup>\*,†</sup> Zhou Rui<sup>\*,†</sup> Wu Mengzhen<sup>\*</sup> Huang Sijun<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>†</sup>(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>\*\*</sup>(Beijing CRRC CED Railway Electric Tech Company Limited, Beijing 100176, China)

**Abstract** Since electric multiple units obtain electricity from the catenary through the pantograph, a good pantograph-catenary contact is essential for ensuring current collection quality for the train. With the increase of the running speed of the train, the issue of the pantograph-catenary dynamic characteristics becomes increasingly noticeable. As the traveling speed increases, the elastic modes of the pantograph and the high-frequency interaction between the pantograph and catenary will be excited by high-frequency excitation such as catenary irregularity and aerodynamic effects. The three lumped mass model that only considers the three vertical free degree of the pantograph is no longer suitable for high-

2023-02-28 收稿, 2023-06-08 录用, 2023-06-09 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11672297).

2) 通讯作者: 许向红, 副研究员, 主要研究方向为受电弓力学特性与结构优化、仿生微结构设计及 3D 打印. E-mail: xxh@lnm.imech.ac.cn

引用格式: 许向红, 罗羿, 张颢辰, 周睿, 吴孟臻, 黄思俊. 基于模态实验的单滑板受电弓全柔模型修正方法. 力学学报, 2023, 55(8): 1753-1760

Xu Xianghong, Luo Yi, Zhang Haochen, Zhou Rui, Wu Mengzhen, Huang Sijun. Full flexible model updating of single-strip pantograph based on modal test. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(8): 1753-1760

frequency pantograph-catenary dynamics analysis. In order to design the dynamic parameters of pantographs at higher speed and evaluate the current collection quality of the pantograph-catenary system, a full flexible model of the pantograph that reflects the structural elastic modes is required. In this paper, an updating method based on the full flexible model of pantographs is proposed. Firstly, a new single-strip high-speed pantograph was tested, and modal characteristics of two vertical coupled vibration modes and six vertical elastic modes within 260 Hz were obtained. Then, an analysis on the sensitivity of the modal frequency of the pantograph to material parameters was conducted. It was found that the elastic modulus and density of the strip, upper arm and lower arm, and the spring stiffness of the pan head, have a significant influence on the eight vertical frequencies of the pantograph, and thus the model parameters to be updated were determined. Finally, by using particle swarm optimization, an updated full flexible model was obtained, which was in good agreement with the experimental results, with a deviation of only 5.2%. In addition, a modal identification method based on modal assurance criterion was proposed, which can achieve automatic modal identification in the process of model updating with 100% accuracy.

**Key words** pantograph, modal test, full flexible model, model updating

## 引言

动车组通过受电弓从接触网上获取电能,良好的弓网接触是列车受流的重要保障.随着列车速度的提高,弓网动态特性问题日益突出<sup>[1]</sup>.320 km/h 及以下的中低速运行时,受电弓受到的激励频率主要为其通过接触网定位器和吊弦的频率,这将会激发受电弓在 20 Hz 以下的耦合振动模态<sup>[2-5]</sup>及低频弓网动力学<sup>[6-7]</sup>.高速或更高速运行时,受电弓受到的激励频率更高,包括接触网不平顺<sup>[8-9]</sup>、气动效应<sup>[10]</sup>等,这将会激发受电弓的高频弹性模态及弓网间的包含高频成分的相互作用力<sup>[11-12]</sup>.

现有弓网动力学参数的设计和弓网受流质量的评估,通常基于弓网动力学建模和仿真分析,这对受电弓模型与这一复杂机构在服役工况下动力学行为的吻合度提出了极高的要求.数十年来,学者们一直致力于建立受电弓的动力学模型,以刻画实际服役边界下弓网系统的耦合动力学行为.主要的受电弓模型包括反映受电弓耦合振动模态的三质量块模型<sup>[7,13-14]</sup>、关注受电弓机构运动自由度的多刚体模型<sup>[8,15-16]</sup>、考虑受电弓滑板高阶弹性模态的弓头柔性模型<sup>[11,17-20]</sup>以及综合考虑弓头和框架弹性模态的全柔模型<sup>[8,12,21]</sup>等.

遗憾的是,由于受电弓的专用性及复杂性,基于模态实验的整弓柔性动力学建模尚未见公开报道.现有工作主要围绕 3 个方面.其一,弓头柔性模型建模及实验校验. Collina 等<sup>[11,18-19]</sup>和 Liu 等<sup>[17]</sup>建立了弓头柔性-框架 1 质量块模型, Ambrosio 等<sup>[12]</sup>建立

了弓头柔性-框架多刚体模型.其中, Collina 等<sup>[11,19-20]</sup>针对用两个弹簧模拟悬挂的弓头,实验辨识了弓头的高阶弹性固有频率和振型,并对弓头柔性模型进行了校验.其二,仅进行整弓模态参数的实验测试分析.关于整弓 20 Hz 以内的 1~3 阶耦合振动频率的实验,已有报道的弓型包括 DSA250<sup>[22]</sup>, DSA380<sup>[23]</sup>, HEMU-430 X<sup>[2]</sup> 和某型号<sup>[3-5]</sup>,但均因拾振点数过少未给出振型. Nāvīk 等<sup>[9]</sup>实验测得了 Dozler 测试弓在 200 Hz 以内的 16 阶低频耦合振动频率和高阶弹性振动频率.其三,基于受电弓数字模型建立全柔模型.保留弓头、上臂、上导杆、下臂、下导杆和底座,一些学者建立了某型号<sup>[8]</sup>、160 EC<sup>[21]</sup> 受电弓的全柔模型,计算了 0~25 Hz 的耦合振动模态及固有频率.

由于模型简化近似、材料参数等效等,结构全柔模型的模态参数与原结构常存在误差.基于实验数据的模型修正则可以有效降低模型误差<sup>[24-33]</sup>,包括通过灵敏度分析确定对模型模态频率影响较大的材料参数,以模态参数的计算值与实验值的相对误差最小为优化目标,选择合适的优化算法得到材料参数的最优解,得到修正全柔模型.

本文针对受电弓的常规工作高度 1600 mm 和弓头自由情形,实验测得了新型单滑板高速受电弓 260 Hz 以内的 8 阶垂向目标模态.通过灵敏度分析确定了对目标模态频率有显著影响的 7 个材料参数,基于粒子群优化算法进行了受电弓的全柔模型修正,其模态参数与实验结果吻合度较高.此外,提出了基于模态置信度的振型识别方法,实现了寻优

搜索过程中目标模式的自动辨识.

### 1 实验模态测试与分析

实验测试所用的新型单滑板高速受电弓, 由北京中车赛德铁道电气科技有限公司设计生产. 在弓头自由悬挂下, 通过调节气囊压力, 实现工作高度  $1600 \pm 2$  mm. 此时, 气囊提供的升弓力矩与受电弓自身重力达到力系平衡.

采用单点激励、多点拾振的方法, 对受电弓进行锤击模态测试 (图 1(a)). 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、60 kN 模态力锤以及 DHDAS 测试分析软件. 在滑板、上臂和下臂均匀布置 14, 12 和 12 个拾振

点 (图 1(b)), 并在分叉管、交叉管和拉杆上分别均匀布置 10, 9 和 6 个拾振点以辅助识别振型. 考虑到弓头弹簧对激励信号的衰减, 遍历锤击任意两个拾振点的中点, 通过对比分析所有拾振点的频响曲线, 确定在弓头和框架处各设置一个锤击点  $Q1$  和  $Q2$ . 这样可以激励出合适频率范围的振动, 并传递到所有拾振点. 采用弓头 2 组和框架 3 组的分组测量, 以避免传感器附加质量影响结构的模态振型.

基于实验测得的频响曲线, 利用 PolyMAX 模态识别算法<sup>[34]</sup>, 求得受电弓在 260 Hz 以内的 8 阶目标模态参数 (图 2 第 1 列和表 1 第 1~2 列). 12.5 Hz 及以下有两阶与弓头弹簧相关的垂向耦合振动模态, 包括弓头垂振 R1 和弓头侧滚 R2, 它们的模态频

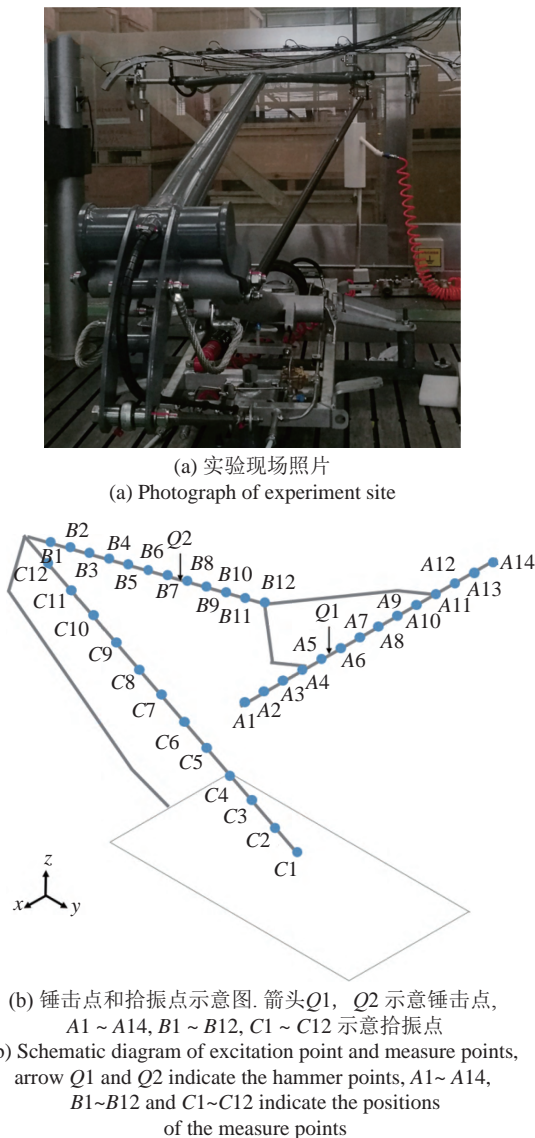


图 1 单滑板高速受电弓模态实验  
Fig. 1 Modal test of single-strip high-speed pantograph

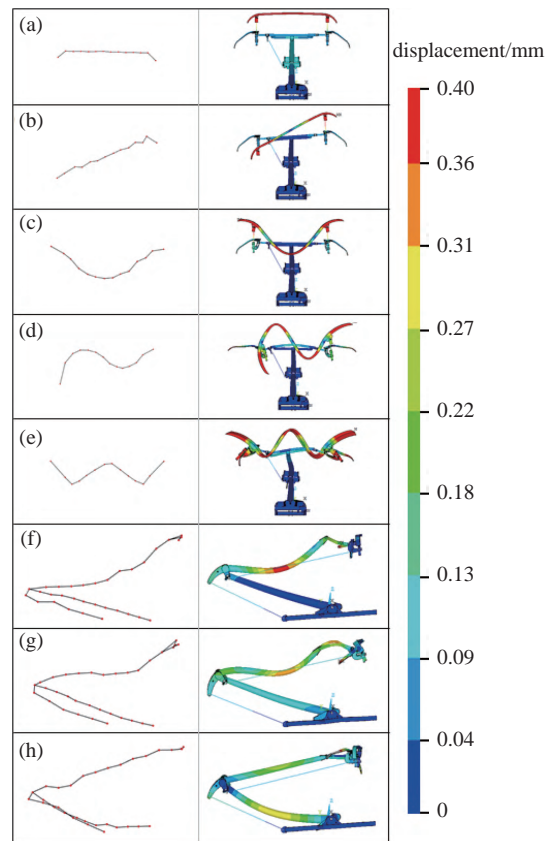


图 2 目标模式的振型. (a) 弓头垂振 R1; (b) 弓头侧滚 R2; (c) 弓头垂向一阶弯振 F1; (d) 弓头垂向二阶弯振 F2; (e) 弓头垂向 3 阶弯振 F3; (f) 上臂垂向一阶弯振 F4; (g) 上臂垂向二阶弯振 F5; (h) 下臂垂向一阶弯振 F6. 其中, 第 1 和 2 列分别为实验和计算结果

Fig. 2 Modal shapes of the target modes. (a) Vertical vibration of the pan head R1; (b) Side rolling of the pan head R2; (c) Vertical 1st bending vibration of the pan head F1; (d) Vertical 2nd bending vibration of the pan head F2; (e) Vertical 3rd bending vibration of the pan head F3; (f) Vertical 1st bending vibration of the upper arm F4; (g) Vertical 2nd bending vibration of the upper arm F5; (h) Vertical 1st bending vibration of the lower arm F6. Columns 1 and 2 show the experimental and calculated results, respectively

表 1 目标模态的频率

Table 1 Modal frequency of the target modes

Mode	Initial full flexible model		Updating full flexible model	
	frequency/Hz	frequency/Hz	frequency/Hz	$e_r/\%$
R1	10.0	8.5	9.0	-15.8
R2	12.5	13.6	13.8	8.2
F1	48.4	50.2	50.6	3.8
F2	128.5	119.2	123.2	-7.2
F3	213.0	203.7	213.0	-4.3
F4	127.7	164.4	133.4	28.7
F5	247.6	245.4	232.4	-0.9
F6	114.2	105.8	117.2	-7.4
$re(x)$		9.6		5.2

率分别为 10.0 Hz 和 12.5 Hz. 48.4 Hz 及以上有 6 阶与结构弹性变形相关的垂向弹性模态, 包括弓头垂向 1~3 阶弯振 F1~F3、上臂垂向 1~2 阶弯振 F4~F5 及下臂垂向 1 阶弯振 F6, 它们的模态频率分别为 48.4 Hz, 128.5 Hz, 213.0 Hz, 127.7 Hz, 247.6 Hz 和 114.2 Hz. 下文称这 8 阶模态为目标模态.

## 2 受电弓的全柔模型修正

### 2.1 初始全柔模型

基于受电弓的三维几何模型, 利用 CATIA 软件得到简化模型. 保留弓头部分的滑板、弹簧筒、弓角和 C 型片, 框架部分的上臂、平衡杆、下臂和拉杆, 以及底座等主体部件, 删减螺栓、螺母等零件. 将滑板重构为实心矩形截面梁, 其弹性模量  $E_3 = 18.0$  GPa, 密度  $\rho_3 = 2020.0$  kg/m<sup>3</sup>. 上臂的弹性模量  $E_2 = 210.0$  GPa, 密度  $\rho_2 = 7800.0$  kg/m<sup>3</sup>, 下臂的弹性模量  $E_1 = 72.4$  GPa, 密度  $\rho_1 = 2680.0$  kg/m<sup>3</sup>. 利用 HYPERMESH 软件, 采用实体单元划分弓头、上臂、下臂和底座, 杆单元划分平衡杆和拉杆. 释放部件间八处铰接节点 (图 3 中 ①~⑧) 沿轴向的转动自由度. 用弹簧单元模拟连接滑板与上臂的弓头压簧, 两个弹簧的总刚度  $k_3 = 10980.0$  N/m. 底部施加全频率约束, 弓头保持自由悬浮. 由此建立了受电弓的初始全柔模型. 经过有限元离散, 结构自由度为 961 335.

受电弓的无阻尼自由振动方程可表达为<sup>[35]</sup>

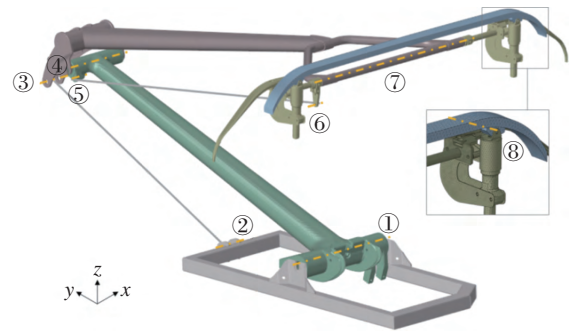


图 3 受电弓的全柔模型

Fig. 3 Full flexible model of pantograph

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{M}$  为质量矩阵,  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵. 无阻尼受电弓系统的自由振动为简谐运动, 位移向量  $\mathbf{u}$  可表达为

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中,  $\boldsymbol{\varphi}$  为振型向量,  $\omega$  为固有频率,  $\theta$  为相位角. 将式 (2) 代入式 (1), 得

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{0} \quad (3)$$

全柔模型结构复杂, 相应质量阵  $\mathbf{M}$  和刚度阵  $\mathbf{K}$  的阶数巨大, 采用数值方法求解式 (3), 可得受电弓的振型向量及固有频率.

基于 ANSYS 有限元商业软件的 Lanczos 算法, 进行初始全柔模型的模态分析. 与目标模态的实验振型比对, 观察识别出初始全柔模型的 R1, R2, F1~F6 (图 2 第 2 列), 它们模态频率的计算值见表 1 第 3 列. 定义第  $r$  ( $r = 1, 2, \dots, 8$ ) 阶目标模态频率的计算值  $f_{\text{FEM}r}$  与实验值  $f_{\text{Expr}}$  的相对误差  $e_r$  和全柔模型的误差  $re(x)$

$$e_r = (f_{\text{FEM}r} - f_{\text{Expr}}) / f_{\text{Expr}} \quad (4)$$

$$re(x) = \sum_{r=1}^8 |e_r| / 8 \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{x}$  为归一化映射后的全柔模型材料参数向量. 从表 1 可以看出, 初始全柔模型的误差较大, 达 9.6%, 其中, R1 和 F4 模态频率的相对误差分别达 -15.8% 和 28.7% (表 1 第 4 列).

### 2.2 全柔模型的参数修正

进行全柔模型的参数修正, 得到目标模态频率接近实验值的修正全柔模型 (图 4), 包括基于灵敏度分析确定作为决策向量的材料参数, 优化决策向量



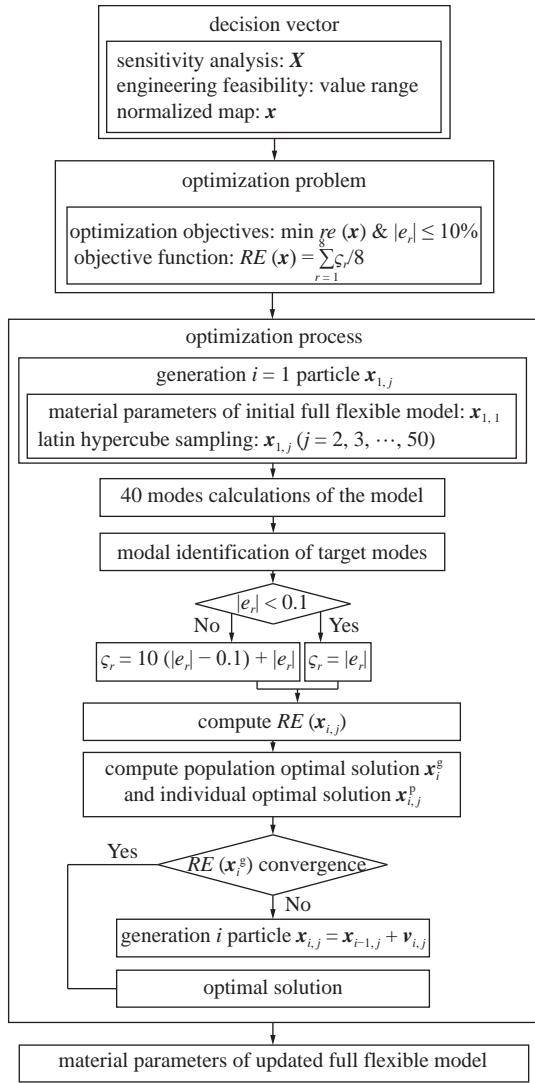


图 4 模型修正流程  
Fig. 4 Model updating process

以减小全柔模型的误差。

利用差分法, 计算目标模态频率对弓头、上臂和下臂的材料参数的灵敏度<sup>[36]</sup>, 即目标模态频率的相对改变量与材料参数的相对改变量的比值。图 5 给出了材料参数相对改变量为 5% 时的灵敏度。可以看出, 灵敏度较高的情形有 R1 和 R2 的模态频率对弓头弹簧刚度  $k_3$  和滑板密度  $\rho_3$ , F1, F2 和 F3 的模态频率对  $\rho_3$  和滑板弹性模量  $E_3$ , F4 和 F5 的模态频率对上臂的弹性模量  $\rho_2$  和密度  $E_2$ , 以及 F6 的模态频率对下臂的密度  $\rho_1$  和弹性模量  $E_1$ 。因此, 下文将针对受电弓全柔模型的 7 个材料参数进行修正, 即决策向量  $\mathbf{X} = \{k_3, E_3, \rho_3, E_2, \rho_2, E_1, \rho_1\}^T$ 。

考虑工程可行性设定各决策变量的取值范围, 其中,  $E_3, \rho_3, E_2, \rho_2, E_1$  和  $\rho_1$  的下限和上限分别为其初始值的 0.5 和 1.5 倍,  $k_3$  的下限为 0 N/m、上限为

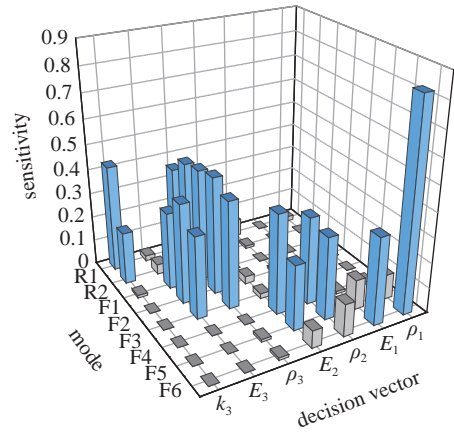


图 5 目标模态频率对决策变量的灵敏度  
Fig. 5 Sensitivity of target modal frequency to decision variables

其初始值的 2 倍。采用归一化方法<sup>[37]</sup>, 将所有决策变量映射到区间  $[0, 1]$  内, 得到映射后的决策向量  $\mathbf{x}$ 。

模型修正的目的是寻找最优决策向量, 优化目标是全柔模型的误差  $re(\mathbf{x})$  取最小值, 同时各阶目标模态的相对误差的绝对值  $|e_r|$  不高于 10%。设定目标函数为

$$RE(\mathbf{x}) = \sum_{r=1}^8 S_r/8 \quad (6)$$

式中

$$S_r = \begin{cases} |e_r|, & \text{if } |e_r| < 0.1 \\ 10(|e_r| - 0.1) + |e_r|, & \text{if } |e_r| > 0.1 \end{cases} \quad (7)$$

采用粒子群优化算法<sup>[38]</sup>, 得到  $\mathbf{x}$  的最优解。将初始全柔模型的材料参数向量作为第 1 代的第 1 个粒子, 用拉丁超立方抽样法<sup>[39]</sup> 得到其余 49 个粒子。基于 ANSYS 有限元商业软件, 进行  $\mathbf{x}_{1,j}$  ( $j = 1, 2, \dots, 50$ ) 对应的全柔模型的模态计算。基于 MATLAB 商业软件, 编写模态实时识别程序, 进行 8 阶目标模态的识别。计算  $RE(\mathbf{x}_{1,j})$ , 其最小值即第 1 代目标函数的最优值, 对应第 1 代的群体最优解  $\mathbf{x}_1^g$ 。记每个粒子的个体最优解为  $\mathbf{x}_{1,j}^p$ 。在参数空间内生成第  $i$  ( $i = 2, 3, \dots$ ) 代粒子

$$\mathbf{x}_{i,j} = \mathbf{x}_{i-1,j} + \mathbf{v}_{i,j} \quad (8)$$

式中, 移动速度

$$\mathbf{v}_{i,j} = w\mathbf{v}_{i-1,j} + a_1\zeta_1(\mathbf{x}_{i-1,j}^p - \mathbf{x}_{i-1,j}) + a_2\zeta_2(\mathbf{x}_{i-1}^g - \mathbf{x}_{i-1,j}) \quad (9)$$

式中,  $\zeta_1$  和  $\zeta_2$  为  $[0, 1]$  中的随机数, 学习因子  $a_1 =$

$-2i/40 + 2.5$  和  $a_2 = 2i/40 + 0.5$ <sup>[40]</sup>, 惯性因子<sup>[41]</sup>

$$w = \begin{cases} 0.2 + \frac{0.2(RE(x_{i,j}) - RE(x_i^g))}{\sum_{j=1}^{50} RE(x_{i,j})/50 - RE(x_i^g)}, \\ \text{if } RE(x_{i,j}) \leq \sum_{j=1}^{50} RE(x_{i,j})/50 \\ 0.4, \text{ if } RE(x_{i,j}) > \sum_{j=1}^{50} RE(x_{i,j})/50 \end{cases} \quad (10)$$

进行  $x_{i,j}$  对应的全柔模型的模态计算及目标模态识别, 计算  $RE(x_{i,j})$ , 得到第  $i$  代的群体最优解  $x_i^g$  以及每个粒子的个体最优解  $x_{i,j}^p$

$$\left. \begin{aligned} x_{i,j}^p &= x_{i,j}, & \text{if } RE(x_{i,j}) < RE(x_{i-1,j}^p) \\ x_i^g &= x_{i,j}, & \text{if } RE(x_{i,j}) < RE(x_{i-1}^g) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

若  $RE(x_i^g)$  收敛, 停止迭代, 得到最优解; 反之, 生成下一代粒子, 继续迭代.

图 6 给出了  $RE(x)$  随迭代次数的变化趋势.  $RE(x_i^g)$  随代数增加而降低, 且第  $i = 17 \sim 30$  代的  $RE(x_i^g)$  相同, 说明目标函数已收敛, 停止迭代. 为避免陷入局部最优, 将  $x_{30}^g$  与随机生成的 49 个粒子作为第 31 代的粒子, 目标函数在第 61 代再次收敛. 将  $x_{70}^g$  与随机生成的 49 个粒子作为第 71 代的粒子, 再次迭代至第 90 代,  $RE(x_i^g)$  不再改变, 说明已搜寻到最优解.

最优解  $\{19776.1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}, 2629.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, 26.2 \text{ GPa}, 7208.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, 128.3 \text{ GPa}, 2097.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, 93.5 \text{ GPa}\}^T$ , 即为修正全柔模型的材料参数向量. 修正全柔模型的误差为 5.2%(表 1 第 6 列), 仅为初始全柔模型误差的 54%. 其中, R1 及 F4 模态频率的相对误差为

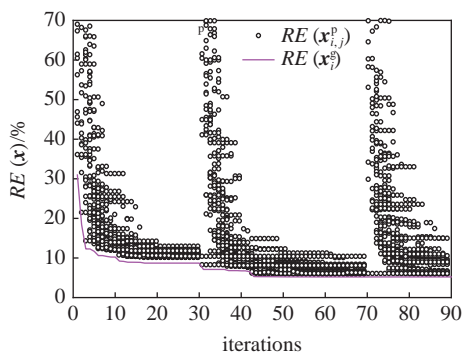


图 6 收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve

-10.0% 和 4.5%, 比修正前分别减小了 6% 和 24%.

### 2.3 基于模态置信度的振型识别

上述的寻优过程, 需要在迭代进行中, 判断 4500 个全柔模型的前 40 阶模态与初始全柔模型 8 阶目标模态的接近程度, 共计 144 万次振型识别. 显然, 采用肉眼观察法识别振型不可行. 本文发展了基于模态置信度的振型自动识别方法, 简称振型法.

记观察法识别的第  $r$  ( $r = 1, 2, \dots, 8$ ) 阶目标模态, 在初始全柔模型模态计算结果中的阶次为  $A_0(r)$ . 提取模型某阶模态在 3 个方向的节点位移, 得到振型向量, 包括初始全柔模型的第  $A_0(r)$  阶模态的振型向量  $\Phi_r$ , 第  $t$  个模型的第  $s$  ( $s = 1, 2, \dots, 40$ ) 阶模态的振型向量  $\Psi_s^t$ . 计算这两个振型向量的空间交角, 即模态置信度<sup>[42]</sup>

$$MAC_{rs}^t = \frac{(\Phi_r^T \Psi_s^{t*})^2}{(\Phi_r^T \Phi_r^*) (\Psi_s^{t*T} \Psi_s^{t*})} \quad (12)$$

式中, 上标\*和 T 分别代表向量的共轭和转置.  $\Psi_s^t$  与  $\Phi_r$  的振型越相近, 取值介于 0 ~ 1 之间的  $MAC_{rs}^t$  越接近 1. 计算  $MAC_{rs}^t$  ( $s = 1, 2, \dots, 40$ ) 的最大值, 将其对应的  $s$  值, 作为振型法识别的第  $r$  阶目标模态在第  $t$  个全柔模型的模态计算结果中的阶次  $B'(r)$ .

为避免其它部件对这 8 阶目标模态识别的干扰, 仅提取滑板、上臂和下臂的关键节点上的模态位移. 将滑板、上臂和下臂 16 等分, 两端面位于铰接处; 在滑板侧面中线、及上臂和下臂的上表面最高点连线的临近区域, 选取距离等分面或端面最近的节点, 得到 17 个关键节点 (图 7).

用拉丁超立方抽样法, 随机生成 100 个粒子. 计

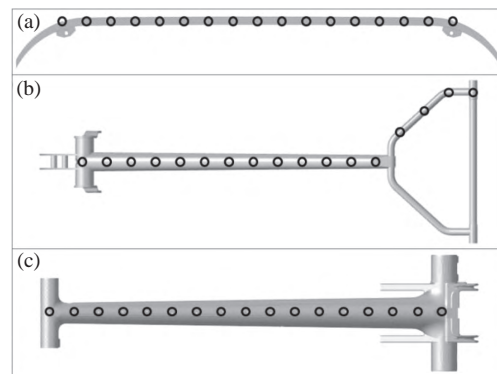


图 7 (a) 滑板、(b) 上臂和 (c) 下臂处的关键节点

Fig. 7 Key nodes of (a) strip, (b) upper arm (c) and lower arm

算第  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, 100$ ) 个粒子对应的全柔模型前 40 阶的模态振型及频率, 提取振型向量  $\Psi_s^t$ . 采用观察法和振型法, 得到第  $r$  阶目标模态在第  $t$  个全柔模型的模态计算结果中的阶次, 分别记为  $B'_0(r)$  和  $B^t(r)$ . 当  $B^t(r) - B'_0(r) = 0$  时, 识别正确; 反之, 不正确. 对 100 个全柔模型 8 阶目标模态识别的数据统计表

明, 振型法识别的正确率为 100%. 图 8 给出了其中一模型的前 40 阶模态与初始全柔模型的 8 阶目标模态的模态置信度矩阵. 目标模态 R1, R2, F1 ~ F6 在该模型模态计算结果中的阶次向量, 肉眼观察识别的结果为  $\{3, 5, 9, 17, 27, 25, 33, 19\}^T$  (图 8 中符号  $\star$ ), 振型法识别的结果与此相同 (图 8 中符号  $\blacklozenge$ ).

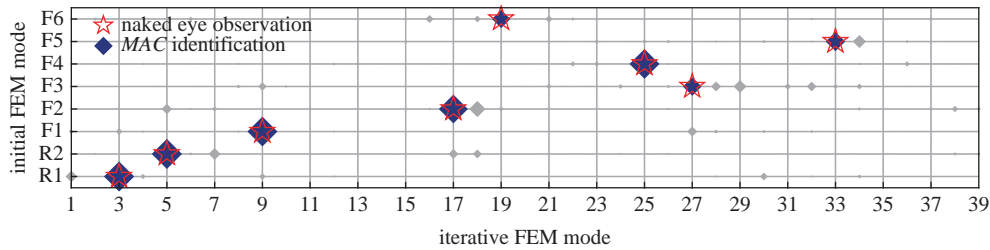


图 8 模态置信度矩阵

Fig. 8 Modal assurance criterion matrix

### 3 结论

本文进行了新型单滑板高速受电弓在工作高度 1600 mm、弓头自由情形下的模态实验, 获得了 260 Hz 内受电弓的垂向固有频率和模态振型, 包括 12.5 Hz 及以下的与弓头弹簧相关的垂向耦合振动模态和 48.4 Hz 及以上的与结构柔性变形相关的垂向弹性模态.

仅结合三维数字模型及原始材料参数建立的初始柔性模型, 与受电弓实际的动力学性能存在较大偏差. 对受电弓垂向模态影响显著的弓头、上臂和下臂的弹性模量和密度, 及弓头弹簧刚度等进行参数优化, 可以得到与实验结果更为接近的修正全柔模型.

进一步地, 可以采用本文提出的方法处理其他类型的受电弓, 只需要修改相应的输入文件, 包括建立该受电弓的初始有限元模型、材料参数取值范围、目标模态及关键节点坐标等.

### 参 考 文 献

- 1 Bruni S, Bucca G, Carnevale M, et al. Pantograph-catenary interaction: recent achievements and future research challenges. *International Journal of Rail Transportation*, 2018, 6(2): 57-82
- 2 Lee JH, Park TW, Oh HK, et al. Analysis of dynamic interaction between catenary and pantograph with experimental verification and performance evaluation in new high-speed line. *Vehicle System Dynamics*, 2015, 53(8): 1117-1134
- 3 Ambrósio J, Pombo J, Pereira M. Optimization of high-speed railway pantographs for improving pantograph-catenary contact. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2013, 3(1): 013006
- 4 Vieira R. High Speed Train Pantograph Models Identification. Técnico Lisboa, 2016
- 5 Zhu M, Zhang SY, Jiang JZ, et al. Enhancing pantograph-catenary dynamic performance using an inertance-integrated damping system. *Vehicle System Dynamics*, 2022, 60(6): 1909-1932
- 6 EN 50317. Railway applications-current collection systems-requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012
- 7 EN 50318. Railway applications-current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2018
- 8 Massat JP, Laurent C, Bianchi JP, et al. Pantograph catenary dynamic optimisation based on advanced multibody and finite element co-simulation tools. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(sup1): 338-354
- 9 Návík P, Derosa S, Rønquist A. On the use of experimental modal analysis for system identification of a railway pantograph. *International Journal of Rail Transportation*, 2020, 9(2): 132-143
- 10 Boccione M, Resta F, Rocchi D, et al. Pantograph aerodynamic effects on the pantograph-catenary interaction. *Vehicle System Dynamics*, 2006, 44(sup1): 560-570
- 11 Collina A, Lo Conte A, Carnevale M. Effect of collector deformable modes in pantograph-catenary dynamic interaction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2009, 223(1): 1-14
- 12 Ambrósio J, Rauter F, Pombo J, et al. A flexible multibody pantograph model for the analysis of the catenary-pantograph contact. In: *Multibody Dynamics: Computational Methods and Applications*, 2011: 1-27
- 13 Eppinger SD, O'Connor DN, Seering WP, et al. Modeling and experimental evaluation of asymmetric pantograph dynamics. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*, 1988, 110(2): 168-174
- 14 Bruni S, Ambrósio J, Carnicero A, et al. The results of the panto-

- graph-catenary interaction benchmark. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 53(3): 412-435
- 15 Bautista A, Montesinos J, Pintado P. Dynamic interaction between pantograph and rigid overhead lines using a coupled FEM-multibody procedure. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 97: 100-111
- 16 Yao Y, Zhou N, Zou D, et al. Collision dynamics analysis of lifting the pantograph. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2021, 235(4): 450-462
- 17 Liu Z, Jönsson PA, Stichel S, et al. Implications of the operation of multiple pantographs on the soft catenary systems in Sweden. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(3): 971-983
- 18 Collina A, Bruni S. Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction. *Vehicle System Dynamics*, 2002, 38: 261-291
- 19 Tuissi A, Bassani P, Casati R, et al. Application of SMA composites in the collectors of the railway pantograph for the Italian high-speed train. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18: 612-619
- 20 Song Y, Rönquist A, Jiang T, et al. Identification of short-wavelength contact wire irregularities in electrified railway pantograph-catenary system. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 162: 104338
- 21 Szeląg A, Wilk A, Judek S, et al. Modal analysis of railway current collectors using Autodesk Inventor//13th International Conference Modern Electrified Transport. 2018: 108
- 22 李东阳, 吴积钦, 关金发. DSA250 型受电弓振动特性仿真与测试. *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. *Electric Railway*, 2012, 23(4): 7-10 (in Chinese))
- 23 高文斌, 马果垒, 马思群等. DSA380 型高速列车受电弓模态分析. *大连交通大学学报*, 2015, 36(6): 24-28 (Gao Wenbin, Ma Guolei, Ma Siqun, et al. Study on the pantograph modal test of type DSA380 for high-speed train editorial. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2015, 36(6): 24-28 (in Chinese))
- 24 Mottershead JE, Link M, Friswell MI. The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(7): 2275-2296
- 25 Ozelik O, Misir IS, Yucel U, et al. Model updating of Masonry courtyard walls of the historical Isabey mosque using ambient vibration measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2022, 12(5): 1157-1172
- 26 Fatahi L. Surrogate-based sensitivity analysis and finite element model updating of welded plates. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(23): 3447-3461
- 27 Girardi M, Padovani C, Pellegrini D, et al. A finite element model updating method based on global optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 152: 107372
- 28 Svendsen BT, Petersen ØW, Frøseth GT, et al. Improved finite element model updating of a full-scale steel bridge using sensitivity analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 19(3): 315-331
- 29 Li D, Zhang J. Finite element model updating through derivative-free optimization algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 185: 109726
- 30 Qin S, Yuan Y, Han S, et al. A novel multiobjective function for finite-element model updating of a long-span cable-stayed bridge using in situ static and dynamic measurements. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 28(1): 04022131
- 31 He L, Castoro C, Aloisio A, et al. Dynamic assessment, FE modeling and parametric updating of a butterfly-arch stress-ribbon pedestrian bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(7): 1064-1075
- 32 Zhu H, Li J, Tian W, et al. An enhanced substructure-based response sensitivity method for finite element model updating of large-scale structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 154: 107359
- 33 Xu H, Qin D, Liu C, et al. An Improved dynamic model updating method for multistage gearbox based on surrogate model and sensitivity analysis. *IEEE Access*, 2021, 9: 18527-18537
- 34 Peeters B, Van der Auweraer H, Guillaume P, et al. The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation? *Shock and Vibration*, 2004, 11(3-4): 395-409
- 35 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学. 王光远等译. 第 2 版 (修订本), 北京: 高等教育出版社, 2006: 1-581 (Ray Clough, Joseph Penzien. *Dynamics of Structures*. Wang Guangyuan trans. Revision 2. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1-581 (in Chinese))
- 36 Borgonovo E, Plischke E. Sensitivity analysis: A review of recent advances. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(3): 869-887
- 37 Munkhdalai L, Munkhdalai T, Park KH, et al. Mixture of activation functions with extended min-max normalization for forex market prediction. *IEEE Access*, 2019, 7: 183680-183691
- 38 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, 1995, 1942-1948
- 39 Loh WL. On latin hypercube sampling. *The Annals of Statistics*, 1996, 24(5): 2058-2080
- 40 Ratnaweera A, Halgamuge SK, Watson HC. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 240-255
- 41 Dong W, Kang L, Zhang W. Opposition-based particle swarm optimization with adaptive mutation strategy. *Soft Computing*, 2017, 21(17): 5081-5090
- 42 Allemang RJ. Investigation of some multiple input/output frequency response function experimental modal analysis techniques. [PhD Thesis]. University of Cincinnati, 1980