

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002916

球化率音频检测的激励点有限元优化研究^{*}

徐从裕¹ 胡宗久¹ 洪 军² 朱庆宝²

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 合肥 230009; 2. 安徽海立精密铸造有限公司 马鞍山 238101)

摘 要:在球化率音频检测过程中,激励点的选取直接影响到各阶模态频率响应的值,特别对于相邻的模态频率响应,还会导致测量结果的差异。为提取关注的模态频率,抑制非关注的模态频率,提出了一种基于有限元的激励点优化方法。以汽车零部件飞轮为例,通过 ANSYS 对球墨铸铁待测件进行模态分析,结合各阶振型特点、固有频率以及模态激励理论,确定优化激励点,通过 MATLAB GUI 程序对激励点的音频信号进行分析验证。实验结果表明,该方法可对此飞轮结构所关注的模态振型做到有效激励,验证了相邻模态频率响应与激励点的选择有着密切关系,并可通过激励点的调整,有效区分相邻频率的模态振型。

关键词:激励点;模态;固有频率;有限元;音频

中图分类号: TG143. 5; O242. 21 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 99

Research for exciting position in spheroidization rate audio detection based on finite element optimization

Xu Congyu¹ Hu Zongjiu¹ Hong Jun² Zhu Qingbao²

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Haili Precision Casting Co., Ltd., Maanshan 238101, China)

Abstract:In the process of spheroidization audio detection, the selection of exciting position directly affects the amplitude of the modal frequency response of each order directly. For similar modal frequency responses, it is likely to affect the measurement results. In order to extract the modal frequencies of interest and suppress the modal frequencies of no-concern, a finite element-based optimization method for exciting position is proposed. Taking the car's part flywheel as an example, modal analysis is performed on the spheroidal graphite cast iron test piece through ANSYS, combining the characteristics of each order mode, natural frequencies and modal excitation theory to determine the optimal excitation point, and the audio signal of the exciting positions is analyzed by MATLAB GUI verification. The experimental results show that this method can effectively stimulate the modal shapes required for the observation of the flywheel structure. It is verified that the close modal frequency response is closely related to the choice of the exciting position. Effectively distinguishing modal shapes of similar frequencies has strong practicability.

Keywords:exciting position; modal; natural frequency; finite element; audio

0 引 言

球墨铸铁(spheroidal graphite cast iron, SGI)作为应用越来越广泛的金属材料较其他铸铁具有更好的强度、韧性、硬度、塑性等机械性能,综合性能接近于钢。影响球墨铸铁质量的一个重要因素就是其内部石墨分子的形态和分布情况,即球化率^[1-3]。SGI 在质量不达标的情况

下被应用到工程中,对企业运营和人们生活安全有着潜在威胁。因此,提高 SGI 球化率的检测等级有着非常重要的意义^[4]。目前球化率检测方法有金相法、热分析法、超声波检测法和音频检测法等^[5]。音频检测法在在线测量、测量精度和测量步骤简易程度上有着独特优势。方法以弹性模量为渠道,建立 SGI 待测件固有频率与球化率的关系,其关键在于如何获取有效激励点^[6-8]。

目前的研究中激励点的优化方法如下:1)以驱动点

留数为指标,判断每个激励点对各阶固有频率贡献度的驱动点留数方法^[9],此方法需在选取驱动点的前提下依次观察,较难分辨相近的密集模式;2)对各测点对目标模态矩阵的独立性的贡献进行排序,依次删除对秩贡献最小的待选测点的有效独立方法^[10],此方法目前应用较为广泛,所需测点较多以保证精确;3)使用驱动点留数对有效独立系数进行加权处理的有效独立-驱动点数法^[11],此方法是对驱动点留数法和有效独立方法的一种综合,激励点效果评价更为客观,但在激励点选取上与有效独立法基本无区别;4)对振型矩阵进行正交三角分解,在分解后的正交矩阵 Q 中选择前 S 列对应位置布置测点的 QR 分解法^[12],此方法通常针对于机床一类大型待测物且需分布多个测点。可以看出,目前的激励点优化方法,在明确待测件的模态矩阵时,进行预测性评估有着一定优势,但需选取多个驱动点且较难分辨相近的模式,从而造成混叠或遗漏。

本文提出的有限元激励点优化方法,针对目前激励点优化方法存在的问题和音频球化率检测方法中激励点选取的任意性和部分相邻阶固有频率差距较小致无法有效分辨的问题,通过 ANSYS 有限元分析了 SGI 待测件的模态振型,结合各阶振型特点、固有频率及模态激励理论,选取优化激励点,有效提取出关注的模态频率和分辨相邻模态频率,为音频球化率在线检测的激励点选取提供了新的理论依据。

1 有限元激励点优化方法

1.1 SGI 待测件有限元模态分析理论

SGI 铸件的一点受到激励时,被激励表层受到激励力的作用而产生压缩,对次表层部位产生压力,形成弹性波的传递^[13-14]。激励消失时,由于弹性作用,产生自振^[15]。将待测件划分为有限个离散单元,建立对应的质量矩阵、刚度矩阵与阻尼矩阵,得到振动动力学方程:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

所有模态振型按照一定的权重叠加,可得到结构实际振动情况,运动响应为:

$$X = \Phi q \quad (2)$$

式中: Φ 为坐标变化矩阵,即模态振型矩阵; q 为模态坐标。将式(2)代入式(1)可得:

$$M\Phi\ddot{q} + C\Phi\dot{q} + K\Phi q = F$$

$$\Phi^T M\Phi\ddot{q} + \Phi^T C\Phi\dot{q} + \Phi^T K\Phi q = \Phi^T F \quad (3)$$

$$M_p\ddot{q} + C_p\dot{q} + K_p q = F_p$$

当方程得到完全解耦时,有:

$$\Phi^T M\Phi = M_p = \begin{bmatrix} m_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

计算后有:

$$M_p \Phi^{-1} M^{-1} K \Phi = K_p$$

$$K \Phi = M \Phi M_p^{-1} K_p \quad (5)$$

$$K \Phi = M \Phi \Lambda$$

其中:

$$\Lambda = M_p^{-1} K_p = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_N \end{bmatrix}$$

$$\lambda_i = \omega_i^2 = \frac{k_i}{m_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

进行分块矩阵乘法,有:

$$\begin{cases} K\phi_1 = \lambda_1 M\phi_1 \\ K\phi_2 = \lambda_2 M\phi_2 \\ \vdots \\ K\phi_N = \lambda_N M\phi_N \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)对应的特征方程组,可得到模态频率 ω , 通过 λ_i 即可求出 SGI 待测件模态振型矩阵 Φ 。

1.2 SGI 待测件有限元分析结果

飞轮具有较大转动惯量。汽车的发动机各个缸的做功是非连续的,故发动机转速也是变化的。当转速增高时,飞轮的动能增加,贮蓄能量;当发动机转速降低时,飞轮动能减少,释放能量。飞轮可用来减少发动机运转过程的速度波动。本文以某汽车飞轮作为 SGI 待测件进行实验分析,模型如图 1 所示。

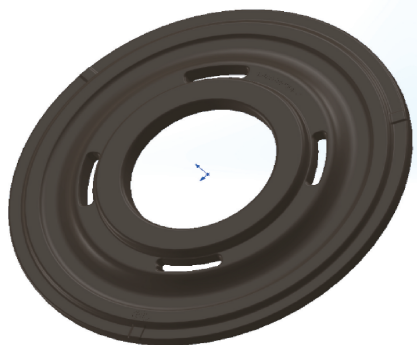


图 1 SGI 飞轮待测件

Fig. 1 SGI flywheel test piece

通过 SolidWorks 建立的三维模型,导入 ANSYS workbench 中。材料设置密度为 $7\ 100\ \text{kg/m}^3$,泊松比 0.25,弹性模量 160 GPa。对其进行网格预划分后,再对实际应用受力面的网格进行细化处理,保证计算精度,划分后的网格如图 2 所示,整体平均质量为 0.872,符合计算要求。通过不加约束来观察其理想自由模态。显然,模型具有 6 个刚体运动方向,故前六阶固有频率基本为 0

即刚体模态,在此不做考虑(故将第 7 阶称为第 1 阶,依次类推)。前 9 阶模态振型云图和固有频率如表 1 所示。

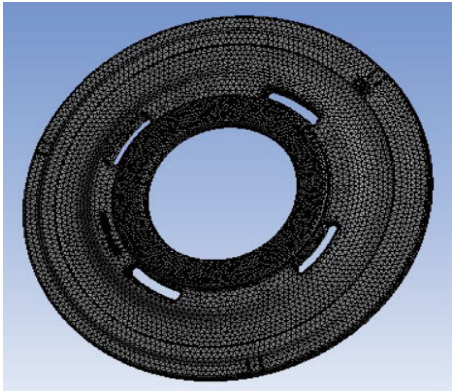


图 2 SGI 飞轮待测件网格
Fig. 2 SGI flywheel test piece's mesh

此 SGI 待测件为对称结构,通过对振型分析可知,振型 1~5 为沿对称轴的“压缩和拉伸”振型;振型 6~9 为“扭折弯曲”振型。于 0 激励而言,前者较后者,模态参与度较高,且更易激励出。对于第 1、2 阶振型,其在信息中幅度偏低,故第 3~5 阶为实验时优先考虑的振型。就固有频率而言,第 3 阶和第 4 阶固有频率十分接近,而第 5 阶无相近阶固有频率。就振型而言,第 3、4 两阶处于近似“相反”的振型,除 Z 轴中心区域同为节点区域以外,模态 3 的振幅最大处对应着模态 4 的节点位置,反之亦然。

1.3 SGI 待测件激励点优化

通常对于模态激励系统^[16],考虑模态参与时,有:

$$W_{qi} = \sum_{p=1}^{N_o} |A_{pqi}| \tag{8}$$

$$A_{pqi} = \phi_{pi} \phi_{qi} \tag{9}$$

表 1 前 9 阶模态云图与固有频率
Table 1 Cloud chart and natural frequency of the first 9 modes

模态云图			
固有频率	541.61 Hz	548.45 Hz	1 361.6 Hz
模态云图			
固有频率	1 362 Hz	1 679.6 Hz	2 195 Hz
模态云图			
固有频率	2 196 Hz	2 376.5 Hz	2 377 Hz

$$V_q = \frac{\sqrt{\text{var}(W_{qi})}}{E(W_{qi})} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_m} (W_{qi} - \overline{W_{qi}})^2}{N_m - 1}}}{\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} (W_{qi})} = \frac{\sqrt{\text{var}(\sum_{p=1}^{N_o} |\phi_{pi} \phi_{qi}|)}}{E(\sum_{p=1}^{N_o} |\phi_{pi} \phi_{qi}|)}$$

$$q = 1, 2, \dots, N_i \quad i = 1, 2, \dots, N_m \tag{10}$$

式中: p 表示输出自由度; q 表示输入自由度; i 表示模态

数; N_o 表示输出点总数; N_i 表示输入点总数; N_m 表示模态总数; A_{pqi} 表示留数; W_{qi} 表示第 q 个激励点对于激发第 i 阶模态的效果; ϕ_{pi} 和 ϕ_{qi} 分别为模态矩阵中的第 (i, p) 和 (i, q) 项; E 表示期望; var 表示方差计算。 V_q 用来表征激励点质量特征,值越小,该 q 激励点激发第 i 阶模态或关心的几阶模态期望值越高。

有限元分析结果表明,第 3~5 阶模态振型中振幅最

大处主要集中在结构自由端。在此振幅最大处激励即将激励点设置在振幅最大处时,模态动能最大,拥有足够的能量传递到结构的每个部分。故响应中 $|A_{pq}|$ 值较其他位置更大也更稳定, $|A_{pq}|$ 的标准差始终较小,即 V_q 值较理想,从而保证对期望的模态的有效激励。

在模态 4 和模态 5 振幅最大处取激励点 1,在模态 3 和模态 5 振幅最大处取激励点 2,同时,在激励点 1 直线距离 1 cm 处设置激励点 3 作为其比对激励点,如图 3 所示。

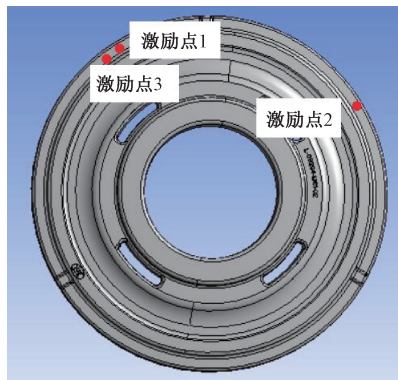


图 3 激励点分布

Fig. 3 Exciting position distribution

2 实验平台搭建

实验硬件平台如图 4 所示,主要包括上位机、SGI 待测件、激励器、USB 控制的继电器、支架和托盘。实验通过 USB 控制的 4 路继电器来控制激励器的激励动作,以 MATLAB 为平台,向串口发送吸合的数据帧时,继电器常开端口接通,激励器激励,经过 0.05 s 的延时后,再向串口发送断开的帧数据,继电器常开端口断开,激励器回程。同时,为使实验模式更加接近有限元计算模态,在支撑方式上,采用海绵作为软支撑材料。激励时, MATLAB 控制麦克风和声卡对音频信号进行采集,并在上位机中进行处理,包括时域中的加窗、补零,及 FFT 后在频域中的去噪滤波。MATLAB GUI 操作界面如图 5 所示。

以有限元的模态分析作为激励点优化的理论基础,通过实验观察模态 5 是否被有效激励、激励点的选择对相邻模态频率即模态 3 和模态 4 的影响和与未知振型时的随机激励点的响应差别以验证方法的有效性。

3 实验与验证

3.1 激励点优化验证

分别对激励点 1~3 进行激励,对获取的音频信号进行分析验证,关注模态 3~5 的固有频率稳定性。频谱如图 6~8 所示。

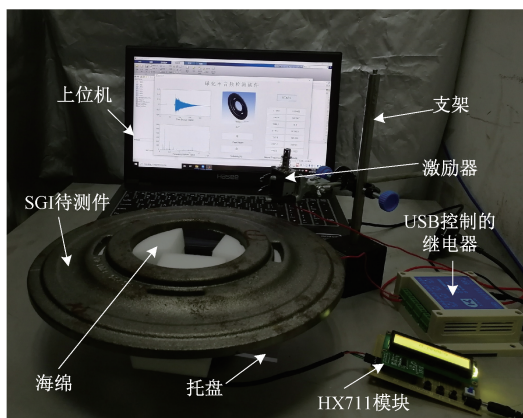


图 4 实验硬件平台

Fig. 4 Experimental hardware platform

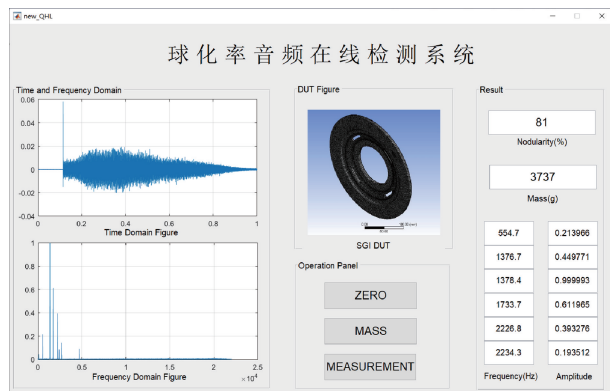


图 5 MATLAB GUI 操作界面

Fig. 5 MATLAB GUI operation interface

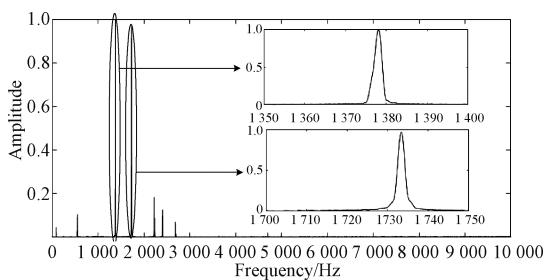


图 6 激励点 1 频域

Fig. 6 Exciting position 1 frequency domain

观察可知,激励点 1 的响应信号中,关注的模态 4 和模态 5 被有效激励,非关注的模态 3 被有效抑制。激励点 2 的响应信号中,关注的模态 3 和模态 5 被有效激励,非关注的模态 4 被有效抑制,在模态 3 谱线附近的旁瓣,幅度较小,易被干扰信号“同化”,若提取,易产生辨识误差。激励点 3 的响应信号中,关注的模态 4 和模态 5 均被有效激励,对非关注的模态 3 的抑制稍小。这也为后续研究提供新思路,在关注所需提取的模态为模态 3 和

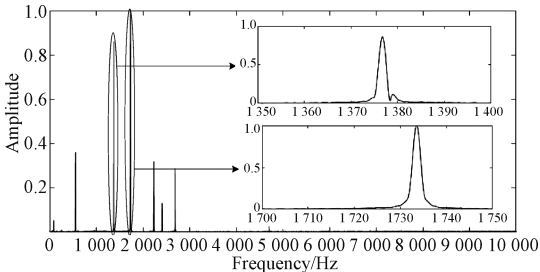


图 7 激励点 2 频域

Fig. 7 Exciting position 2 frequency domain

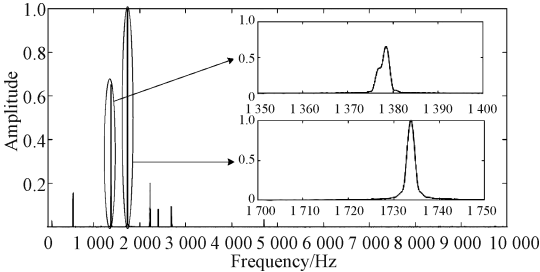


图 8 激励点 3 频域

Fig. 8 Exciting position 3 frequency domain

模态 4 时,可通过激励点的适当调整,使两者在误差允许范围内均被有效激励。

对 3 个激励点进行了 10 次的重复实验,验证模态 3~5 频率的稳定性。如图 9~11 所示。

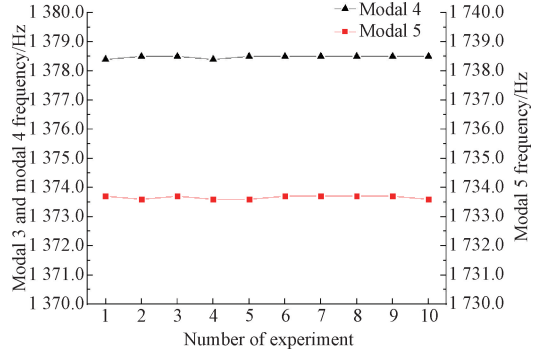


图 9 激励点 1 重复实验

Fig. 9 Exciting position 1 repetition experiments

重复实验验证了模态 3~5 在各激励点下响应的准确性和稳定性。

3.2 随机激励点对比验证

在未知待测件的模态振型时,通常根据工程经验或随机选取激励点,利用响应推测可能存在的模态阶数,对于相近的模态频率易产生混叠或遗漏。为验证基于有限元的激励点优化方法的有效性,在待测件上随机选取 10 个激励点作为驱动点,观察其模态 3~5 的频率响应,数

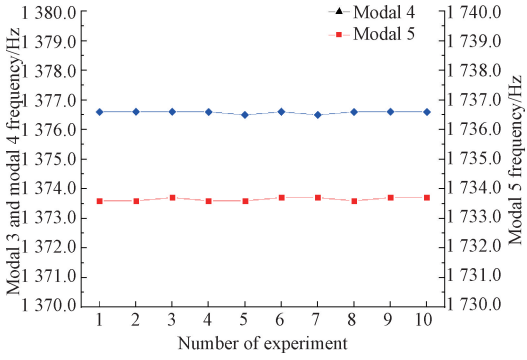


图 10 激励点 2 重复实验

Fig. 10 Exciting position 2 repetition experiments

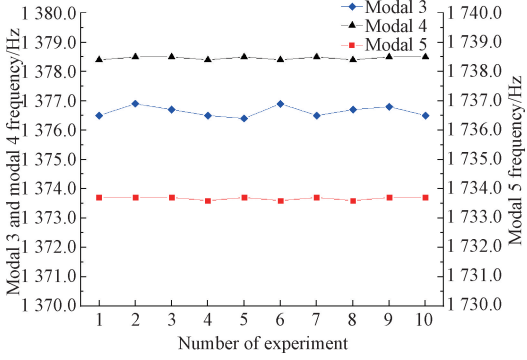


图 11 激励点 3 重复实验

Fig. 11 Exciting position 3 repetition experiments

据如表 2 所示。

表 2 驱动点频率响应

Table 2 Driving points frequency response

驱动点序号	模态 3 频率/Hz	模态 4 频率/Hz	模态 5 频率/Hz
1	—	1 378. 4	1 733. 7
2	1 376. 9	1 378. 5	—
3	—	—	1 733. 7
4	1 376. 5	1 378. 4	1 733. 6
5	—	1 378. 7	1 733. 7
6	1 376. 9	—	1 733. 6
7	—	1378. 5	1 733. 7
8	1 376. 7	1378. 8	1 733. 6
9	1 376. 8	—	—
10	—	1 378. 6	1 733. 7

从表 2 数据可以看出,激励位置不同,响应也会存在差异。在 SGI 待测件振型未知时,由于模态 3 和模态 4 频率相近,且部分激励点响应中只有其中一个,导致难以分辨。对比于基于有限元的激励点优化方法,其通过对待测件模型进行模态分析获取各阶振型特点,结合各阶固有频率和模态激励理论有效激励出需关注的模态,且对于相近的模态频率能做到有效辨识,精度和稳定性也有所提高。

4 结 论

基于有限元分析的球化率音频检测的激励点优化方法通过对球墨铸铁待测件的有限元模态分析,结合各阶振型特点、固有频率以及模态激励理论,确定优化激励点,验证了相邻模态频率响应与激励点的选择有着密切关系,实现通过激励点的调整有效区分相邻频率的模态振型。此方法为音频球化率检测的激励点的选取提供了新的依据,并有效提高检测精度和稳定性。

参考文献

- [1] CHIH PIN C, DILEEP S, PETER K, et al. Application of X-ray computed tomography for the characterization of graphite morphology in compact-graphite iron [J]. *Materials Characterization*, 2018, 141: 442-449.
- [2] JESUS A, BASURTO H, PEREZ S, et al. A new approach to modeling the ductile cast iron microstructure for a finite element analysis [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44: 1221-1231.
- [3] DANIEL E P. Determining percent of nodularity for gray and ductile iron [J]. *Foundry Management & Technology*, 2018, 146(9).
- [4] 刘冰,陈诚,王勇,等.某型复合加工机床床身动态特性分析与结构优化[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(3): 72-77.
LIU B, CHEN CH, WANG Y, et al. Dynamic characteristic analysis and structure optimization of compound machine tool bed [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(3): 72-77.
- [5] FERNANDINO D O, CISILINO, ADRIÁN P, et al. Determination of effective elastic properties of ferritic ductile cast iron by computational homogenization, micrographs and microindentation tests [J]. *Mechanics of Materials*, 2015, 83: 110-121.
- [6] DI C V, IACOVIELLO D, IACOVIELLO F, et al. Graphite nodules influence on SGIs mechanical properties: Experimental and numerical investigation [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 109: 135-143.
- [7] 徐从裕,王诗豪,吴晓凤.基于超声波 A/D 采样法的相位差位移测量方法 [J]. *计量学报*, 2016, 37(6): 559-562.
XU C Y, WANG SH H, WU X F. Phase difference displacement measurement method based on ultrasonic A/D sampling method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37(6): 559-562.
- [8] 李国龙,赵君,刘小旭,等.基于有限元分析的滚齿 SLD 构建 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27(17): 2286-2292.
LI G L, ZHAO J, LIU X X, et al. Construction of SLD in gear hobbing process based on FEA [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(17): 2286-2292.
- [9] 任明仑,宋月丽,褚伟.灰铸铁抗拉强度预测的局部加权线性回归建模 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(3): 65-71.
REN M L, SONG Y L, CHU W. Locally weighted linear regression modeling for tensile strength prediction of gray cast iron [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(3): 65-71.
- [10] 徐从裕,胡宗久,杨雅茹,等.基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(5): 180-186.
XU C Y, HU Z J, YANG Y R, et al. Method of ultrasonic phase difference detection based on FFT and IFFT [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(5): 180-186.
- [11] 隆勇,郭瑜.基于加窗振动分离和变分模态分解的行星轮故障特征提取 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(2): 18-24.
LONG Y, GUO Y. Fault feature extraction of the planet gear based on windowed vibration separation and variational mode decomposition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2): 18-24.
- [12] 袁宇焜,顾春阳,闫广鹏,等.超薄曲面镜力学性能及模态分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 64-72.
YUAN Y K, GU CH Y, YAN G P, et al. Mechanical property and modal analysis of ultra-thin mirrors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 64-72.
- [13] 张红,张方,蒋祺,等. RV 减速机关键件及整机固有模态分析 [J]. *电子测量技术*, 2018, 41(21): 54-58.
ZHANG H, ZHANG F, JIANG Q, et al. Natural modal analysis of key parts and whole machine of RV reducer [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(21): 54-58.
- [14] 朱梦,张方,秦远田,等. RV 减速器的模态仿真及实验 [J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(12): 5-9.
ZHU M, ZHANG F, QIN Y T, et al. Modal simulation and experiment of RV reducer [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(12): 5-9.
- [15] 刘苹,张小平,匡斯建,等.电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(8): 173-178.
LIU P, ZHANG X P, KUANG S J, et al. 3D finite element model mesh division method in motor temperature field analysis [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(8): 173-178.
- [16] 汪茹,田瑾,吴飞,等.一种基于有限元法的超高压输

电线路三维电场计算方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 103-110.

WANG R, TIAN J, WU F, et al. Three-dimensional electric field calculation method for EHV transmission line based on finite element method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4): 103-110.

作者简介



徐从裕, 分别在 1982 年、2008 年于合肥工业大学获得学士学位和博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要从事测量、微纳米驱动与控制技术。

E-mail: ahhf-xcy@163.com

Xu Congyu received B. Sc. and Ph. D.

both from Hefei University of Technology in 1982 and 2008, respectively. Now he is a professor at Hefei University of Technology. His main research interest includes measurement technology and micro/nano-actuation and control technology.



胡宗久, 2017 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为球化率在线检测和光栅纳米测量。

E-mail: 18356075828@163.com

Hu Zongjiu received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes spheroidization detection and grating nano-measurement.