DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.015

铸件多模态音频检测模型与在线学习优化

徐从裕[1],王　标[2],刘善林[2],洪　军[3],朱庆宝[3]

(1. 合肥工业大学 含山产业研究院,安徽 合肥 230009;2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009;3. 安徽海立精密铸造有限公司,安徽 马鞍山 238101)

摘　要:铸件敲击产生的共振频率与铸件尺寸变化有关,通过共振频率来预测铸件的球化率或蠕化率必然产生较大的偏差。为解决这一问题,提出了由多个共振频率组成的多模态音频检测模型,模型系数由音频检测数据通过在线学习获得。结果表明,多模态音频检测模型能够有效辨识出铸件的弹性模量变化及变化规律,而与铸件尺寸变化无关。模型系数可以通过铸件产品质量的提升及在线学习得到进一步优化。以某种型号的铸件为例,实测了 20 件样品,通过多模态音频检测模型,提取出了反映铸件产品质量变化的模型值及波动范围,为铸件产品的在线检测及质量划分提供了依据。

关键词:铸件;检测模型;振动模态;在线学习

中图分类号:TG115.28　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)10-0895-04

Multimodal Audio Detection Model for Casting and Online Learning Optimization

XU Congyu[1], WANG Biao[2], LIU Shanlin[2], HONG Jun[3], ZHU Qingbao[3]

(1. Hanshan Industrial Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Haili Precision Casting Co., Ltd., Maanshan, 238101, China)

Abstract: The resonance frequency generated by casting percussion is related to the the change of casting size. It is necessary to predict the spheroidization rate or verminization rate of the casting by resonance frequency. To solve this problem, this paper proposes a multi-mode audio detection model composed of multiple resonant frequencies, and the model coefficients were obtained from the audio detection data through online learning. The results show that the multi-modal audio detection model can effectively identify the change of the elastic modulus of the casting and the change law, and has nothing to do with the the change of casting size. The model coefficient can be further optimized through the improvement of casting quality and online learning. In some types of casting as an example, the measured 20 samples, by multimodal audio detection model, extract the model values to reflect the actual changes in quality of casting products and range, for casting products provide a basis for the online detection and quality classification.

Key words: casting; detection model; vibration mode; online learning

音频检测是铸件球化率或蠕化率在线检测的一种非常重要的检测手段[1-4]。以往的铸件球化率或蠕化率在线检测提取铸件的一个振动模态的共振频率作为检测值,这种在线检测方法具有检测信息提取简单的特点,但采用单一振动模态的共振频率作为检测值,需要对铸件的共振频率与铸件的球化率或蠕化率的定量关系进行系统的标定,涉及到的标定工作量非常繁重。由于铸件的共振频率与铸件尺寸变化有关,对于铸件尺寸变化,之前的标定数据都需要进行修正或推倒重来。

本文作者在铸件模态分析的基础上,提出了一种多模态的音频检测模型,模型系数由铸件音频检测数据通过在线学习获得,可为铸件产品的在线检测及产品质量划分提供手段。

1　振动模态与音频检测模型

铸件通过敲击激励产生音频信号,音频信号中包含有很多不同阶振动模态的共振频率。铸件的共振频率与铸件的弹性模量存在正相关,而弹性模量又主要取决于铸件内部石墨的形状、大小、数量和分布。在铸件材料化学成分、基体组织相对稳定的条件下,可以通过音频信号中的共振频率的信息提取来预测铸件的球化率或蠕化率。一般地,铸件在外部激励下的第 i 阶振动模态的共振频率 f_i,可以用式(1)

收稿日期:2021-03-06

基金项目:含山县-合肥工业大学产业引导资金项目(JZ2019YDZJ0445)

作者简介:徐从裕(1960—),安徽合肥人,博士,教授.研究方向:无损检测技术.电话:13615512572,Email:ahhf-xcy@163.com

来表示。

$$f_i=k_i\sqrt{\frac{gE}{\rho}} \tag{1}$$

式中，k_i 为第 i 阶共振频率对应的振动模态系数，g 为重力加速度，ρ 为铸件的密度，E 为铸件的弹性模量。

1.1 音频检测模型建立

式(1)是目前铸件球化率或蠕化率音频在线检测所依据的原理[2-4]，即通过提取铸件音频信号中的某一阶振动模态的共振频率来预测铸件的球化率或蠕化率。正如前面所述，采用单一共振频率作为检测值，需要对铸件的共振频率与球化率或蠕化率对应的定量关系进行系统标定，涉及到的标定工作十分繁重，而且受到铸件尺寸变化影响，检测结果与标定数据之间存在着较大的不确定性，这也是采用单一共振频率作为检测值存在的主要问题之一。

为消除铸件尺寸变化的影响，在对铸件的各阶振动模态进行深入研究的基础上，提出了基于铸件的多模态音频检测模型 P，如式(2)所示。

$$Q=P(f_1,f_2,\cdots A_1,A_2,A_3\cdots) \tag{2}$$

式中，f_1、f_2…分别为各阶振动模态的共振频率值；A_1、A_2、A_3…分别为模型中对应各阶振动模态的系数或常数，是待确定的参数；Q 是模型检测值。

一般地，检测模型 P 为线性表达式，如式(3)所示。

$$Q=A_1f_1+A_2f_2+A_3f_3+\cdots+A_nf_n+A_n+1 \tag{3}$$

在应用中，通常取两个振动模态的共振频率 f_i 和 f_j 代入式(3)，则式(3)表达式可简化为式(4)表达式。

$$Q_{ij}=A_if_i+A_jf_j+A_{ij} \tag{4}$$

式中，正整数值 i 和 j 为振动模态的阶数，且 $i\neq j$；A_i 和 A_j 分别为振动模态的共振频率 f_i 和 f_j 的系数，A_{ij} 为对应的 i 阶和 j 阶振动模态的模型常数，Q_{ij} 为对应的 i 阶和 j 阶振动模态的模型检测值。

1.2 模型系数在线学习

由式(4)可知，共有 3 个系数和常量需要求解。为进一步简化，对式(4)进行修改，修改后的模型为式(5)，则只需求解系数 A 和常数 D 两个量即可。

$$Q_{15}=Af_5-f_1+D \tag{5}$$

在下面的论述中，为与实例一致，选取第 1 阶和第 5 阶振动模态的共振频率 f_1 和 f_5，讨论模型系数的在线学习方法。

式(5)中模型值 Q_{15} 在铸件产品质量一致的条件下具有最小值。本文采用最小二乘法求解式(5)中的模型系数 A 和 D。

设 f_{1i} 和 f_{5i} 为铸件第 1 阶和第 5 阶振动模态采样的第 i 个共振频率值，i=1,2,3……N，则有：

$$A=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(f_{1i}f_{5i}-N\bar{f}_1\bar{f}_5\right)}{\sum_{i=1}^{N}\left(f^2_{5i}-N\bar{f}^2_5\right)} \tag{6}$$

$$D=\bar{f}_1-A\bar{f}_5 \tag{7}$$

式(6)和式(7)中的 $\bar{f}_1$ 和 $\bar{f}_5$ 分别为第 1 阶和第 5 阶振动模态采样的 N 个共振频率的平均值。

2 模态分析与仿真研究

2.1 模态分析

以某型号的球墨铸铁汽车飞轮为例(如图 1)进行模态分析与仿真研究，汽车飞轮的本体重为 3 850 g。选用 Workbench 软件中的 Modal 模块进行模态分析，模态分析的参数设置为：材料密度 7 100 kg/m^3，泊松比 0.25，弹性模量 160 GPa。采用的是四面体网格化划分，网格划分尺度为 5 mm。



图 1 汽车飞轮铸件

Fig.1 Automobile flywheel castings

图 2 为上述模态分析的前六阶振动模态云图。

振动模态云图是分析铸件在外部激励下的各阶振动模态所属振型、共振频率以及激励与音频响应信号关系的重要手段，其中不同振型下的振幅分布图以及共振频率为铸件在线检测的激励点选择和音频信息的提取提供了理论依据[5-6]。

2.2 仿真研究

仿真研究的目的和步骤如下：

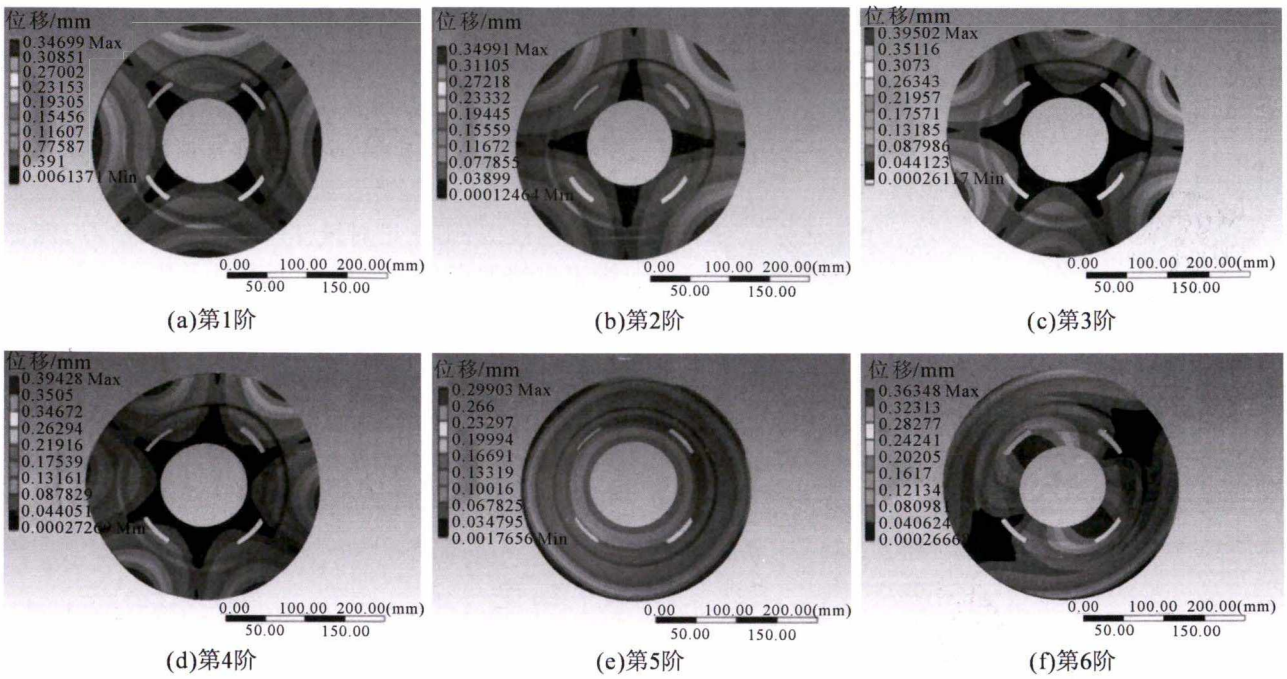
(1)模拟铸件尺寸变化，获取铸件第 1 阶和第 5 阶模态振动的共振频率仿真样本值。

(2)将仿真样本值代入式(6)、式(7)进行在线学习，求解模型系数 A 和 D。

(3)模拟铸件弹性模量的变化量，获取模型值仿真结果。

(4)通过上述仿真，验证本文提出的多模态音频检测模型的有效性。

表 1 为铸件尺寸的第 1 阶和第 5 阶振动模态的共振频率仿真数据，即通过改变铸件的厚度尺寸来



(a)第1阶　(b)第2阶　(c)第3阶

(d)第4阶　(e)第5阶　(f)第6阶

图 2 飞轮前六阶振动模态云图

Fig.2 Vibration mode nephogram of the first six orders for flywheel

表 1 铸件尺寸仿真

Tab.1 Simulation of casting size

序号	弹性模量 E/GPa	铸件厚度尺寸增量 /mm	第 1 阶共振频率 /Hz	第 5 阶共振频率 /Hz	铸件本体重量 /g	模型值 /Hz
1	160	-0.10	540.82	1 673.6	3 831.4	-0.04
2	160	-0.08	540.96	1 674.7	3 835.6	-0.02
3	160	-0.06	541.11	1 675.8	3 839.7	-0.01
4	160	-0.04	541.26	1 677.0	3 843.9	0.01
5	160	-0.02	541.38	1 678.0	3 848.0	0.03
6	160	0	541.54	1 679.2	3 852.2	0.04
7	160	0.02	541.74	1 680.5	3 856.3	0.03
8	160	0.04	541.93	1 681.8	3 860.5	0.02
9	160	0.06	542.13	1 683.0	3 864.6	-0.01
10	160	0.08	542.32	1 684.3	3 868.8	-0.01
11	160	0.10	542.52	1 685.5	3 872.9	-0.04
12	161	0	543.82	1 685.7	3 852.2	-0.98
13	162	0	545.18	1 691.0	3 852.2	-1.92

模拟实际铸件尺寸变化。其中，表 1 的第 1 组数据至第 11 组数据的弹性模量 E=160 GPa，第 12 组和第 13 组数据的弹性模量 E 分别为 161 GPa 和 162 GPa。

表 1 的铸件尺寸仿真数据通过在线学习后，再由音频检测模型就可得到模型值仿真结果，如表 1 最右侧一列所示。

由表 1 的模型值仿真结果可知，模型值仅与铸件的弹性模量有关，而与铸件尺寸变化无关。这也验证了第 1 阶和第 5 阶模态振动的共振频率仿真样本值，通过式(6)和式(7)在线学习后得到的模型值仿真结果，能够有效辨识出铸件弹性模量的变化及变化规律。

仿真研究表明，模型值与铸件弹性模量的变化量成线性关系，由此可以通过模型值得到铸件的弹性模量，如式(8)所示。

$$E=E_0+kQ_{15} \tag{8}$$

参见表 1 可知，E_0=160 GPa，k=-1.04 GPa/Hz，由此可以通过对铸件弹性模量的精确检测，来提高铸件球化率或蠕化率的预测精度。

3 实验研究

本文实例提取的音频检测信息是铸件的第 1 阶和第 5 阶振动模态的共振频率，根据振动模态云图的第 1 阶和第 5 阶振动模态的振幅分布图，选择的激励点位置如图 3 所示。

图 3 的激励点位置既落在第 1 阶振动模态的振幅最大区域内，同时也落在第 5 阶振动模态的振幅最大区域内，表明在同一激励点的位置上进行敲击激励，能够同时激励出铸件的第 1 阶和第 5 阶振动模态，且响应的共振频率幅值具有很高的信噪比。

表 2 为实验用的 20 件球墨铸铁汽车飞轮的音频信号采样数据和对应的模型值。

由表 2 可以看出，对于第 1 阶共振频率相同的两件铸件，如 f_1=554.51 Hz，两件铸件的第 5 阶共振频率也可能是不同的，如 $f_{5\text{-}1}$=1 696.73 Hz 和 $f_{5\text{-}2}$=1 716.93 Hz，获得的模型值也是不同的；同



(a)第1阶　　(b)第5阶

图 3 第一阶和第五阶激励点的位置

Fig.3 Excitation locations of the first and the fifth order

表2 音频信号采样数据

Tab.2 Audio signal sampling data

序号	第 1 阶共振频率 /Hz	第 5 阶共振频率 /Hz	模型值 /Hz
1	559.21	1 705.73	-2.50
2	559.01	1 700.93	-1.31
3	558.71	1 695.13	0.20
4	554.51	1 696.73	4.07
5	559.01	1 698.93	-0.89
6	555.61	1 715.73	-0.98
7	556.91	1 717.23	-2.59
8	558.41	1 701.23	-0.77
9	555.81	1 713.53	-0.72
10	551.31	1 720.43	2.34
11	554.51	1 716.93	-0.13
12	555.71	1 709.53	0.21
13	560.21	1 688.73	0.03
14	558.41	1 705.83	-1.72
15	554.81	1 715.63	-0.16
16	560.11	1 690.43	-0.22
17	553.71	1 715.03	1.07
18	553.21	1 714.83	1.61
19	558.01	1 696.73	0.57
20	553.31	1 712.93	1.90

样，对于第 5 阶共振频率相同的两件铸件，如 f_5=1 696.73 Hz，两件铸件的第 1 阶共振频率也可能是不同的，如 $f_{1\text{-}1}$=554.51 Hz 和 $f_{1\text{-}2}$=558.01 Hz，获得的模型值也是不同的。这说明了无论取自第 1 阶共振频率还是取自第 5 阶共振频率，当受到铸件尺寸变化等影响时，采用单一共振频率预测球化率或蠕化率就会出现较大偏差；而采用本文提出的多模态音频检测模型，则通过对铸件产品的在线学习，能够辨识出铸件产品出现的微小质量差别，也为下一步的应用研究打下了良好的基础。

综上所述，本文提出的音频检测模型能够有效辨识出与铸件球化率或蠕化率有关的弹性模量的变化及变化规律，而与铸件尺寸变化无关，从而为下一步的铸件球化率或蠕化率的精确预测提供了量化条件。

4 结论

(1)提出的音频检测模型，可消除铸件尺寸变化对模型检测值 Q 的影响，并能有效辨识出铸件的弹性模量变化及变化规律，为下一步的铸件球化率或蠕化率的精确预测提供了量化条件。

(2)音频检测模型的系数可以通过铸件产品质量的提升及在线学习得到进一步优化。

参考文献：

[1] Richard W.Bono，赵光. 全方位共振检测技术的应用[J]. 中国设备工程，2013，306(1)：13-14.

[2] 徐振宇，李大勇，王利华. 球墨铸铁球化孕育效果评价方法研究进展评述[J]. 铸造，2014，63 (3)：237-244.

[3] 周飞. 音频技术在蠕墨铸铁检测中的应用 [J]. 铸造技术，2019，40 (6)：573-576.

[4] 姜爱龙，刘庆义，臧加伦，等. 蠕墨铸铁蠕化率检测技术现状[J]. 铸造，2018，67 (3)：225-230.

[5] 徐从裕，胡宗久，洪军，等. 球化率音频检测的激励点有限元优化研究[J]. 电子测量与仪器学报，2020，34 (7)：196-202.

[6] 徐从裕，王标，洪军，等. 基于铸件模态分析的音频检测信息提取[J]. 铸造，2021，70 (5)：571-576.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1 铸铁件均衡凝固与有限补缩；2 铸铁件冒口补缩设计及应用；3 压边浇冒口系统；4 浇注系统大孔出流理论与设计；5 铸件均衡凝固工艺；6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7 浇注系统当冒口补缩设计方法；8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 13991824906，技术咨询：13609155628