

基于铸件模态分析的音频检测信息提取

徐从裕¹, 王 标¹, 洪 军², 朱庆宝²

(1. 合肥工业大学含山产业研究院, 安徽合肥 230009; 2. 安徽海立精密铸造有限公司, 安徽马鞍山 238101)

摘要: 研究球墨铸铁和蠕墨铸铁在外部激励下的音频检测信息提取方法, 用有限元对铸件的振动方程进行模态分析, 获取铸件的振动模态云图, 并根据振动模态云图, 分析了铸件的各阶振动模态的特点以及激励与音频响应信号之间的输入输出关系, 为球墨铸铁和蠕墨铸铁在线检测的音频检测信息的准确提取提供了科学依据。试验以某种型号的汽车飞轮球墨铸铁为例, 进行了模态分析, 并实测了20件样品, 实测结果与模态分析结果高度吻合。

关键词: 模态分析; 振动模态云图; 音频信号; 信息提取

铸件通过敲击激励产生音频信号, 音频信号中包含很多不同阶的共振频率, 共振频率与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、机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蠕化率或球化率^[1-5], 因此音频检测是铸件蠕化率或球化率在线检测的重要手段。由于音频响应与激励点有关, 不同的激励点产生的各阶共振频率的幅值会有很大的变化, 甚至有些共振频率的幅值被淹没在背景噪声中, 因此如何提取音频检测信息就成为本研究的重点。

1 铸件的振动方程

铸件在外部激励下, 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, 当外部激励消失时, 铸件在弹性波作用下产生各阶共振。铸件在外部激励下的振动方程如式(1)所示。

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

式中: M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, F 为外部激励矩阵, X 为位移响应矩阵。

一般地, 铸件在外部激励下的第 i 阶的共振频率 f_i , 可以用式(2)来表示。

$$f_i = k_i \sqrt{\frac{g \times E}{\rho}} \quad (2)$$

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。

由式(2)可以看出, 第 i 阶共振频率 f_i 与弹性模量 E 存在正相关, 而弹性模量 E 又主要取决于铸件内部石墨的形状、大小、数量和分布。由此可见, 通过音频信号中的共振频率的信息提取就可以预测铸件的蠕化率或球化率。

2 有限元模态分析

对式(1)的铸件振动方程进行求解, 采用的是数值求解方法, 其中有限元模态分析是式(1)振动方程最典型的数值求解方法。有限元模态分析法首先通过对铸件的网格化划分, 在微小区域对铸件的振动模态进行求解, 再利用有限元网格的边界条件得到铸件的振动模态云图, 从振动模态云图上能够更加清晰地给出铸件的

作者简介:

徐从裕(1960-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无损检测技术。E-mail: ahhf-xcy@163.com

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)05-0571-06

基金项目:

含山县-合肥工业大学产业引导资金项目(JZ2019YDZJ0445)。

收稿日期:

2020-12-07 收到初稿,
2021-02-16 收到修订稿。

各阶振动模态的振动规律及其对应的共振频率。在研究具体结构的铸件时，需要根据所用的材料参数，修改有限元模态分析对应的参数，以获取给定铸件的理论振动模态云图。下面以某种型号的球墨铸铁汽车飞轮（图1所示）为例，说明有限元模态分析的方法和结果。

在众多的音频信号中，单纯用试验的方法来提取所需要音频检测信息是无法知道音频检测信息的性质，如提取的音频检测信息属于铸件的独立振动模态下的共振频率值还是属于铸件的对称振动模态下的共振频率值；另外，铸件的激励与音频信号之间的输入输出关系也无法确定，这将直接影响到所需要的音频检测信息的准确提取。本文通过有限元软件对铸件的振动模态进行分析，给出铸件的振动模态云图以及对应的振动模态频率，从模态分析的理论角度上，为铸件在线检测的音频检测信息的准确提取提供科学依据。

2.1 模态分析参数

在模态分析参数中，设置三种材料参数：材料密度Density；杨氏模量Young's Modulus；泊松比Poisson's Ratio。本例中根据给定的球墨铸铁汽车飞轮铸铁材料，设置了相应的三种材料参数，如图2所示。

2.2 网格化划分

模态分析是在铸件网格化划分后进行的，网格化划分的粗细与模态分析精度有关，一般在网格化划分时，需要综合考虑模态分析精度和计算时间的因素。本例中采用的是四面体网格化划分，网格划分尺度为5 mm，如图3所示。

2.3 模态云图

经过上述铸件的网格划分后，有限元通过计算得

到铸件的各阶模态云图，其中1阶至6阶为铸件的三维平动和转动模态云图，6阶以上则是铸件的振动模态云图，在铸件的音频检测信息中，需要关注的是6阶以上的振动模态云图。为论述方便起见，称7阶模态云图为第一阶振动模态云图，以此类推，图4给出的是前七阶振动模态云图。

2.4 模态云图分析

模态云图是分析铸件在激励下的各阶模态所属振型、共振频率以及激励与音频信号之间关系的重要手段。上述的第一阶振动模态至第七阶振动模态，反映的是铸件的不同振型、振型的振幅分布图以及在此振型下的共振频率大小，在振型振幅最大位置上进行共振，该振型的振幅响应就大，反之振幅响应就小。

2.4.1 振动模态及共振频率

由铸件的振动模态云图可知，图1的汽车飞轮包含有独立振动模态和对称振动模态，图4中的第五阶为独立振动模态，其余两两组成对称振动模态，如第一阶和第二阶、第三阶和第四阶、第六阶和第七阶等。每一阶振动模态都有一个共振频率与之对应，如表1所示。



图1 汽车飞轮实物图

Fig. 1 Physical picture of automobile flywheel

Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7100	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	1.7E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0.25	
10	Bulk Modulus	1.1333E+11	Pa
11	Shear Modulus	6.8E+10	Pa

图2 模态分析中的参数设置

Fig. 2 Parameter setting in modal analysis

由表1可以清晰地看出，独立振动模态的共振频率与其他振动模态的共振频率相距较远，如表1中的第五阶独立振动模态的共振频率与相邻的共振频率之间相差有300 Hz至500 Hz左右；但对于对称振动模态而言，两个对称模态的共振频率相距很近，有的相距有几Hz，有的相距甚至不到1 Hz，加上频谱分析存在频谱泄露问题和相互干扰问题，因此对于两个相距很近的对称模态共振频率，如何在频谱图上进行有效辨识，以及提取其中之一共振频率而抑制另外一个共振频率的干扰，是铸件音频检测信息提取需要解决的关键问题。

2.4.2 激励与音频检测信息的提取

从振动模态云图可以看出，铸件的音频信号包含了各阶振动模态在激励下产生的信号，激励点不同，音频信号中所包含的各阶振动模态响应幅值会有所变化，甚至有些振动模态的响应幅值太小而被淹没在背景噪声之中。为清晰说明振动模态云图的激励与音频信号之间的关系，以具有对称模态的第一阶和第二阶振动模态云图为例加以论述，如图5所示。

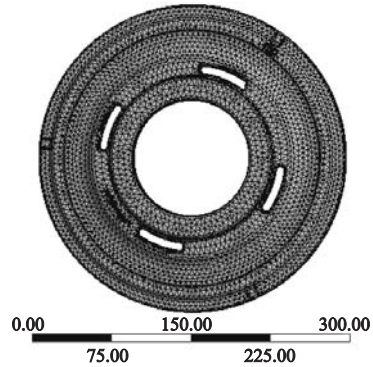


图3 四面体网格划分图

Fig. 3 Tetrahedral mesh graph

表1 振动模态及共振频率
Table 1 Vibration mode and resonance frequency

模态阶数	独立振动模态/Hz	对称振动模态/Hz
第一阶、第二阶		558.48 565.5
第三阶、第四阶		1 401.0 1 404.3
第五阶	1 732.2	
第六阶、第七阶		2 264.8 2 265.6

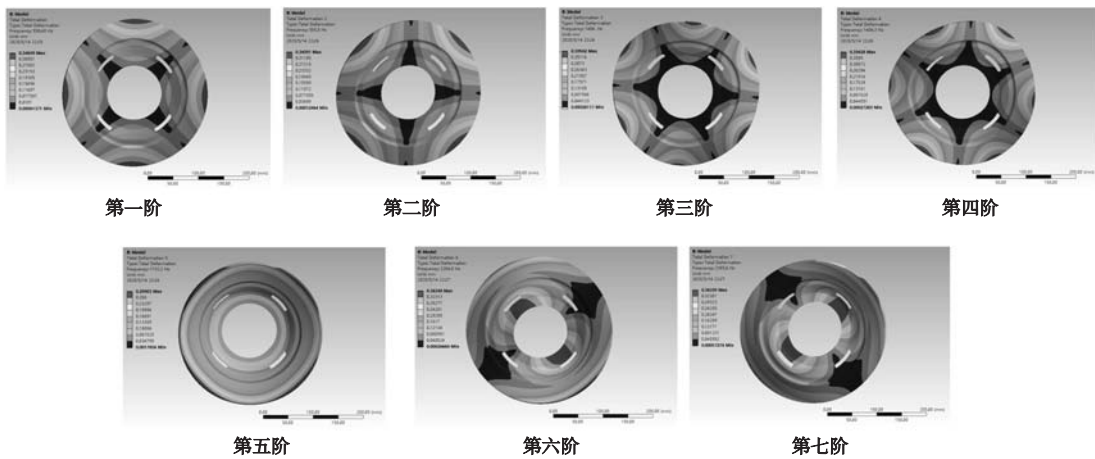


图4 振动模态云图

Fig. 4 Vibration mode nephogram

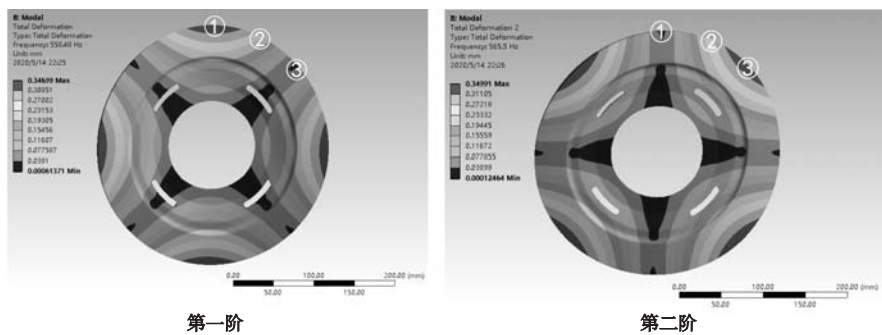


图5 激励点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of excitation

在铸件边缘取三个特殊点作为激励点，三个激励点分别标注为1号激励点、2号激励点、3号激励点，根据图5振动模态云图的第一阶和第二阶振型的振幅大小分布，第一阶振动模态和第二阶振动模态对1号激励点、2号激励点、3号激励点的响应关系可以用表2的关系来表示。

由表2可知，若选取第一阶振动模态的共振频率作为音频检测信息，需要对1号激励点进行激励，避免第二阶对称振动模态对音频检测信息的干扰；同理，若选取第二阶振动模态的共振频率作为音频检测信息，需要对3号激励点进行激励，避免第一阶对称振动模态对音频检测信息的干扰，该方法适用所有具有对称模态的音频检测信息的提取。对于独立振动模态，其共振频率与其他各阶振动模态的共振频率相距较远，只要在独立振动模态云图上，选取该振型的振幅较大的位置上进行激励，就可以准确提取到所需的音频检测信息。

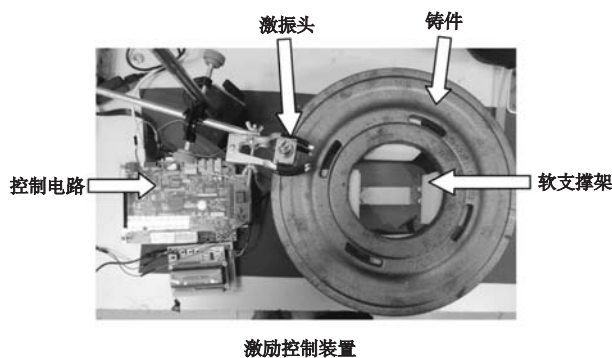
3 试验和采样数据验证

上面对图1的汽车飞轮模型进行了有限元模态分析，得到了该铸件的各阶振动模态云图与对应的共振频率，分析了独立振动模态和对称振动模态的激励与音频信号的响应关系，为准确提取音频检测信息提供了科学依据。

3.1 试验条件

为验证上述有限元模态分析的正确性，如对称振动模态验证、独立振动模态验证、共振频率验证、激励点与音频检测信息准确提取的验证等，都需要由实际铸件的试验数据作为支撑，试验条件如下：

- (1) 选取图1的汽车飞轮20件；
- (2) 根据图4的振动模态云图，在铸件选取5个激励点；
- (3) 每个激励点独立采样数据5次；
- (4) 搭建简易的试验装置，如图6所示。



试验条件(2)的5个激励点选取，主要目的是将图4中的铸件第一阶振动模态至第七阶振动模态全部激励出来，并准确提取出各阶的共振频率。在实际的在线检测中，由于提取的音频检测信息量有限，一般在铸件上只需设置1个激励点即可。

3.2 采样数据的模态验证

表3为对5个激励点的采样进行整理后的数据。由表3数据可知，20件汽车飞轮的实测结果与有限元模态分析结果完全一致，即第一组和第二组、第三组和第四组、第六组和第七组的采样数据分别对应着第一阶和第二阶、第三阶和第四阶、第六阶和第七阶对称振动模态；而第五组采样数据对应着第五阶独立振动模态，且每组的音频检测频率与模态分析的共振频率相吻合。

3.3 激励点的模态响应验证

以图5设置的3个激励点为例，对实际的铸件进行激励，以验证不同激励点对音频检测信息提取的影响。3个激励点分别激励的模态响应如图7所示。图7的幅值为对最大响应值进行归一化处理后的相对幅值，用于观察不同激励点对第一阶、第二阶模态响应的变化规律。

由图7的模态响应来看，不同的激励点对音频检测信息提取的影响与模态分析结果完全一致。在实际的铸件中，存在很多阶的对称振动模态，对称振动模态的两个共振频率又非常接近，通过激励点的科学选取，可有效避免对称振动模态中的两个共振频率对音频检测信息提取的相互干扰。

表2 激励点与音频响应的关系

Table 2 Relationship between excitation point and audio response

振动模态	音频响应幅值		
	1号激励点	2号激励点	3号激励点
第一阶	高	中	低
第二阶	低	中	高

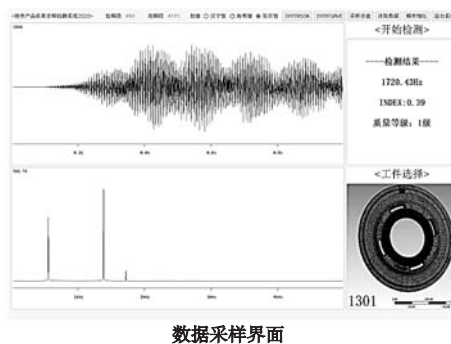


图6 试验装置图

Fig. 6 Experimental device diagram

表3 音频信号采样数据
Table 3 Audio signal sampling data

序号	实测的铸件音频检测频率/Hz						
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组
1	559.21	565.21	1 396.83	1 398.63	1 705.73	2 212.84	2 229.64
2	559.01	565.21	1 395.63	1 397.43	1 700.93	2 211.64	2 220.34
3	558.71	565.11	1 393.93	1 395.83	1 695.13	2 202.44	2 213.24
4	554.51	559.91	1 384.23	1 386.13	1 696.73	2 200.44	2 204.24
5	559.01	564.81	1 396.13	1 396.13	1 698.93	2 206.94	2 220.64
6	555.61	561.91	1 391.63	1 391.63	1 715.73	2 223.44	2 232.14
7	556.91	563.11	1 395.13	1 395.13	1 717.23	2 227.44	2 234.74
8	558.41	564.51	1 394.43	1 396.13	1 701.23	2 206.04	2 223.34
9	555.81	562.01	1 390.73	1 392.53	1 713.53	2 222.94	2 227.04
10	551.31	558.01	1 383.43	1 383.43	1 720.43	2 222.34	2 230.44
11	554.51	561.01	1 388.23	1 390.13	1 716.93	2 222.14	2 233.24
12	555.71	561.61	1 389.33	1 391.13	1 709.53	2 216.14	2 225.64
13	560.21	566.01	1 397.63	1 397.63	1 688.73	2 198.34	2 209.94
14	558.41	564.11	1 395.63	1 395.63	1 705.83	2 216.54	2 223.74
15	554.81	560.51	1 388.43	1 390.03	1 715.63	2 223.04	2 230.64
16	560.11	565.41	1 396.43	1 398.33	1 690.43	2 200.74	2 211.54
17	553.71	559.21	1 385.03	1 387.23	1 715.03	2 217.74	2 228.04
18	553.21	559.01	1 384.43	1 386.33	1 714.83	2 216.84	2 227.14
19	558.01	563.61	1 392.13	1 393.83	1 696.73	2 202.84	2 214.64
20	553.31	558.61	1 385.03	1 385.03	1 712.93	2 217.74	2 222.74

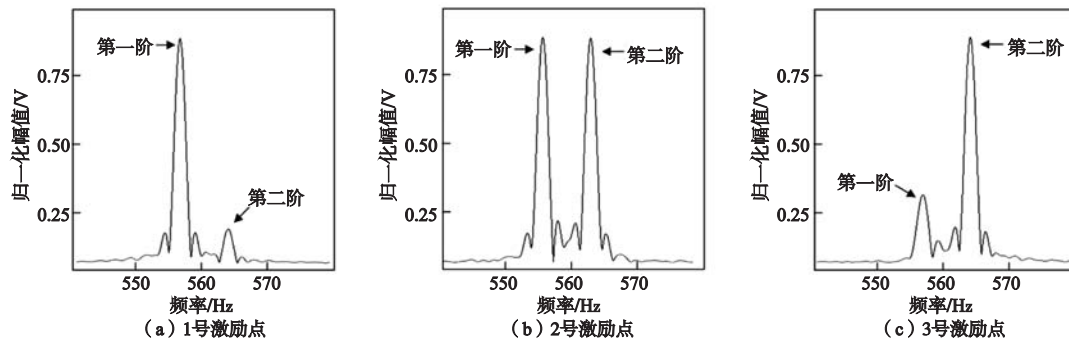


图7 激励点模态响应

Fig. 7 Modal response of excitation point

4 结束语

(1) 敲击产生的音频信号中包含有铸件产品的质量信息,是铸件在线检测的重要信息来源。音频信号中的各阶共振频率是由铸件的结构、材料以及石墨的形状、大小、数量和分布决定的,通过模态分析,能有效地分析出铸件各阶振动模态的性质,如独立振动模态、对称振动模态以及各阶振动模态的共振频率;再通过铸件的振动模态云图,分析出铸件各阶振动模态的振型、振型的振幅分布以及输入输出的

关系,这些模态分析结果为铸件的在线检测的参数设置、激励点布局、音频检测信息的准确提取提供丰富的科学依据。

(2) 选取了某种型号的球墨铸铁汽车飞轮进行了模态分析,并对20件铸件样品进行了试验验证,试验验证结果与模态分析结果高度吻合,这也充分证明了铸件模态分析在音频检测信息准确提取方面的重要作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王泽华, 徐飞龙, 张欣, 等. 关于球墨铸铁球化率评定方法的初步探讨 [J]. 铸造, 2017, 66 (4): 248-254.
- [4] 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.
- [5] 邬冠华, 林俊明, 任吉林, 等. 声振检测方法的发展 [J]. 无损检测, 2011, 33 (2): 35-41.

Audio Detection Information Extraction Based on Casting Modal Analysis

XU Cong-yu¹, WANG Biao¹, HONG Jun², ZHU Qing-bao²

(1. Hanshan Industrial Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Anhui Haili Precision Casting Co., Ltd., Maanshan 238101, Anhui, China)

Abstract:

The audio detection information extraction method for ductile iron and vermicular cast iron under the external excitation was studied, the finite element modal analysis on the vibration equation of the casting was carried out and the vibration modal cloud of casting was obtained. According to the vibration modal cloud, the features of vibration modal of the castings as well as the input/output relation between the external excitation and response of audio signal were analyzed, on which a scientific basis was provided for accurate extraction of online audio detection information of ductile iron and vermicular cast iron. The modal analysis of a certain type of automobile flywheel ductile iron was carried out, and as many as 20 samples were measured. The measured results are in good agreement with the modal analysis results.

Key words:

modal analysis; vibration mode cloud; audio signal; information extraction
