第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0164-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
© 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:张亚建, 毛虎平, 杨育光, 等. 基于 LabVIEW 的模态参数识别方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 164—168
Zhang YaJian, Mao Huping, Yang Yuguang, et al. Identification method of modal parameters based on LabVIEW[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 164—168

一般工业技术

基于 LabVIEW 的模态参数识别方法

张亚建[1]　毛虎平[1*]　杨育光[1]　王瀚岑[1]　程　意[2]
(中北大学能源动力工程学院[1],机械工程学院[2],太原 030051)

摘　要　为了降低机构模态参数识别门槛,结合声辐射模态理论,提出了基于 LabVIEW 等工具进行非接触式模态参数识别新方法。该方法结合使用 LabVIEW 软件工具和高精度麦克风、工业声卡等硬件设备实现了声音信号采集、快速傅里叶变换(FFT)、模态参数识别等功能。以某连杆大头为例,使用本方法进行模态参数识别试验,并通过 ANSYS 软件对连杆大头进行仿真,结果表明:基于 LabVIEW 等工具的模态参数识别结果与仿真结果相比误差不超过 3%,验证了该模态参数识别新方法的可行性。

关键词　模态　　声辐射　　FFT　　LabVIEW
中图法分类号　TB532;　　**文献标志码**　A

传统结构模态测试方法是锤击法,锤击法由于测试所需加速度传感器、采集仪及振动分析系统等装置的成本居高,并且加速器传感器的放置一定程度上影响了结构的固有模态,因此存在着一定的缺陷[1]。

自 1990 年 Borgiotti[2] 首次提出声音辐射模态的概念,学者对声辐射模态进行了大量的研究,Williams[3] 和 Touronor 等[4] 通过声压测量阵列来实现结构表面振动响应的重建,但其尚未对结构的模态进行分析;赵坚等[5] 结合模态理论对结构振动与声辐射关系进行研究,从理论上证明了振动模态与声压模态与之间的关系;郭建平等[6] 在上述理论基础上使用声压传感器对小型电路板的模态参数成功识别;Prezelj 等[7] 利用表面近场的测量声压实现了振动结构模态重构,证明近场声压模态反应结构模态更加准确;Zhu 等[8]、Pierro 等[9] 使用有限元方法建立声固耦合的动力学方程,验证了利用声压识别结构模态的可行性,夏茂龙等[10] 建立辐射声压与激振力之间的声压频响函数矩阵,提出一个基于测量声音识别结构模态参数的新思路。

2018 年 6 月 17 日收到　　国家自然科学基金(51275489)和山西省自然科学基金(201701D121082)资助
第一作者简介:张亚建(1993—),男,汉族,山西大同人,硕士研究生。E-mail:549729445@qq.com。
*通信作者简介:毛虎平(1974—),男,汉族,山西临汾人,博士,副教授。E-mail:1138880952@qq.com。

上述研究表明利用声音信号进行模态识别理论上完全可以实现,但是使用 LabVIEW 等工具对机构辐射声音信号进行精确的自动化采集、快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)处理以及实现频谱分析得出机构模态参数的案例尚未实现。本文在传统锤击法的基础上,提出了基于 LabVIEW 等工具采集机构辐射声音信号,实现非接触式模态试验新方案。该方案使用成本较低的 LabVIEW 软件和高精度麦克风、工业声卡等硬件设备实现了声音信号采集、FFT、模态参数识别等功能。

1　理论分析

声辐射模态理论是研究结构在主振动(模态振动)下声辐射特性的问题,反映了声辐射特性和振动结构固有模态之间的关系,论证用声辐射模态参数表述结构声辐射固有特性的合理性[11]。

根据声学理论,对于稳态单频率 k 振动,结构声辐射面是封闭光滑曲面(或分片光滑曲面)S,满足有限条件和辐射条件的情况下,设曲面 S 上的法向振速分布函数 $u(x,t)$,由格林函数方法可建立辐射面 S 上的 Helmholtz 积分方程:

$$P(y,t) = \frac{1}{4^c}\iint_S P(x,t)\frac{\partial}{\partial n}G(x,y)\,\mathrm{d}s(x) + \frac{\mathrm{j}dk}{4^c}\iint_S u(x,t)G(x,t)\,\mathrm{d}s(x) \tag{1}$$

式(1)中:$P(x,t)$、$P(y,t)$ 分别为辐射面 x、y 点的

声压分布函数; $G(x,y) = \frac{e^{-jkr}}{r}$ 为格林函数; $k = \frac{k}{c}$ 为波数, c 为波速; $r = r(x,x)$ 表示 S 面上任意两点 x 和 y 之间的距离; $\frac{\partial}{\partial n}$ 为法向导数。

对于镶在无穷大障板上的平板单元结构向半空间辐射噪声,可由式(1)导出声学瑞利(Rayleigh)积分公式为

$$P(y,t) = \frac{jdk}{2^c}\iint_S u(u,t)G(x,y)ds(x), \quad x,y \in S \quad (2)$$

根据式(2)可知,当结构以某阶模态频率发生主振动时,辐射面辐射的声学量将以相同的频率进行变化,因此可以通过声学量信号频率来确定结构模态频率,这与文献[12]用加速度传感器和声压传感器测得结构模态频率几乎相同的结论相一致,正是基于以上理论来进行模态参数识别。

2　模态参数识别方案

2.1　硬件平台

模态测试方法是对传统锤击法的一个改进和延伸,在保证测量结果的前提下,将成本浓缩到最小,整套测试设备主要包括力锤、橡皮筋、工业声卡、高精度麦克风以及电脑。测试方案如图 1 所示。

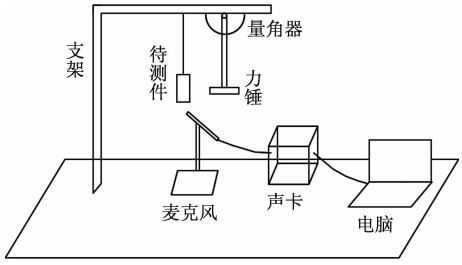

图 1　测试方案示意图

Fig. 1　Test schematic diagram

支架　支架设计成 L 形,其中横向力臂和纵向立柱可调伸缩长度,有利于试验时寻找最佳激励位置、最佳悬挂位置及最佳测试位置。

量角器　常规半圆形量角器,试验时测量力锤拉起一定角度,近似保证重复试验时的激励力。

悬挂橡皮筋　为了尽量不影响待测零件的震动,满足设定自由模态的需求,悬挂待测物体所需的细线选用细且弹性好的橡皮筋。

工业声卡　声音信号通过声卡转换为数字信号,计算机就可以对数据信号进行识别处理。市面常见声卡采样频率有 16、22.05、37.8 kHz 等几类,数据转化精度有 16 或 24 位两类。选用录音棚专用的 AKAI EIE PRO 声卡,这块声卡性价比高,采集声音信号稳定,数据转换精度为 24 位,提供四个数据通道传输数据,可以同时接入四个高精度麦克风的采集信号。

高精度麦克风　由于声音信号实质由机构振动产生,所以可以使用压电、电容、电感、电磁等原理对声音进行采集,本文录音棚专用的 AKAI EIE PRO 型麦克风基于驻极体电容原理设计的一款高精度传感器,与其他传感器相比,不但精度高、而且动态响应性能好、频率响应平直、在高频时仍然保持稳定工作。

电脑　需可以正常使用 MATLAB 软件。

敲击力锤　选用带有橡胶头的敲击力锤,橡胶头在敲击时可以减少锤头产生噪音,锤头质量要求大于 0.5 倍的待测机构,避免力锤激励不足。

2.2　软件设计

LabVIEW 是目前现有的强大的数字信号分析处理软件[13],以结构辐射声音信号为依据实现机构模态参数识别的关键在于对信息精确分析处理,因此机构模态参数识别选择 LabVIEW 软件作为的声音信号分析处理工具。LabVIEW 编程语言是图形化编程语言,也称为 G 语言,用户往往通过调用或者编写不同种类流程图就可以实现软件设计。根据实际需求进行声音信号的采集处理程序程序编写,主要包括声音信号采集模块、信号的 FFT 处理模块及结果显示等模块,声音信号的采集处理程序如图 2 所示。

2.3　应用

以某连杆大头为例进行模态识别方案的试验,搭建如图 3 所示的试验平台。

试验时将力锤拉起至与垂线成 30°位置,松手使其绕与量角器同心的轴自由下摆,近似地实现了对机构的定力激励。零件受到激励产生一定的声音信号,通过固定在待测机构正下方的麦克风进行声音信号采集,通过声卡将声音信号转化为数字信号输入到电脑。最后使用 LabVIEW 软件对数字信号进行采集和处理,在 LabVIEW 中显示结果如图 4 所示。图 4 中左侧为波形图为时域信号图,可以得到敲击时间和敲击次数等信息;图 4 右侧为频谱图,频谱图的横坐标为频率,共振位置振幅较大,即为连杆大头模态频率,读取结果如表 1 所示。

为了验证测试结果的稳定性,再次重复上述试验,结果如图 5 所示。由左侧时域信号图可以看到,敲击时间和次数没有变化,这是因此两次敲击力锤拉起角度是一致的;由频谱图可以看到频谱图中各峰值大小产生变化,这可能是因为第二次敲击位置略有改变所致,但各峰值所对应的横坐标,即模态频率没有改变。综上,本模态识别方案可以稳定识别机构的模态参数。

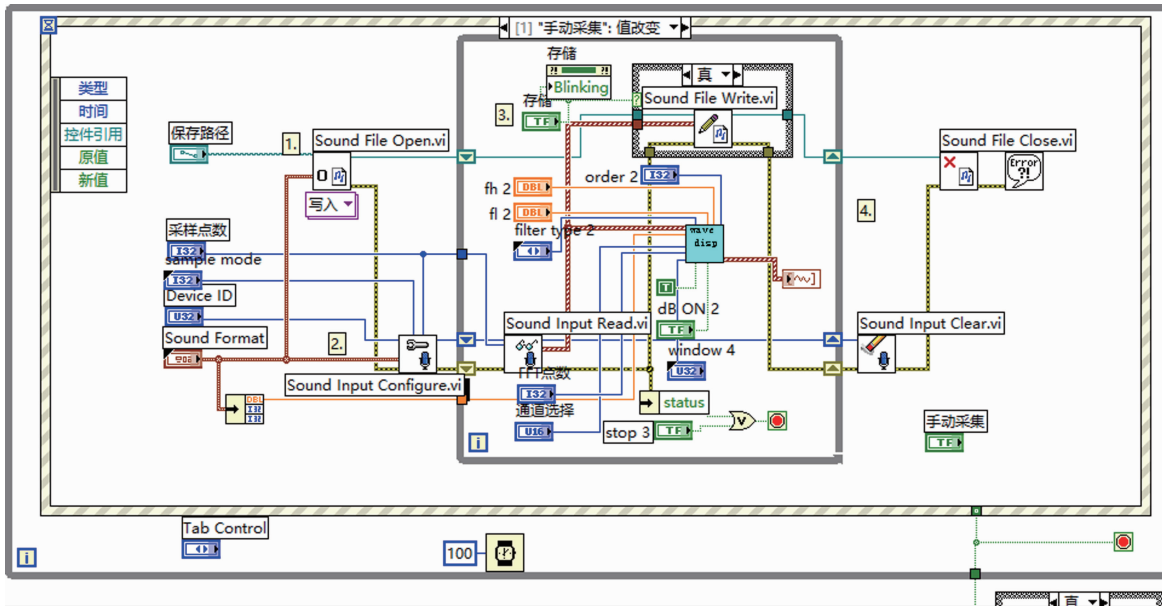

图 2 声音信号的采集处理程序框图

Fig. 2 Block diagram of the acquisition and processing program for sound signals



图 3 试验方案实物照片

Fig. 3 Picture of test scheme

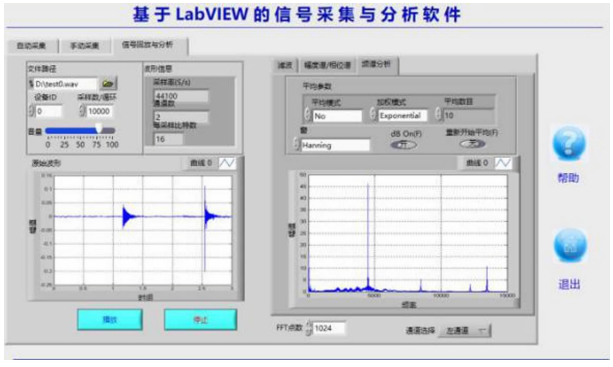

图 4 连杆大头模态参数识别结果

Fig. 4 Identification result of modal parameter of connecting rod large head

表 1 连杆大头试验模态结果

Table 1 Experimental modal results of connecting rod large head

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
模态频率/Hz	4 311	8 284	12 210	13 470

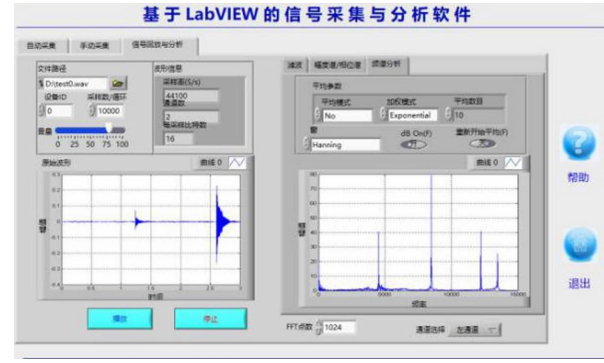

图 5 重复连杆大头模态参数识别试验结果

Fig. 5 Test results of modal parameters identification for large head of repetitive connecting rod

3 仿真验证

为了验证上述基于 LabVIEW 模态参数识别方案的可行性,使用 ANSYS 软件建立连杆大头有限元模型,进行模态分析。连杆大头所用的材料为40Cr,其密度为 7 870 kg/m^3,弹性模量为 2.11×10^{11} N/m^2,泊松比为 0.277。仿真模型是三维模型,采用 solid185 单元进行网格划分,所建立的连杆大头有限元模型如图 6 所示。

采用 block lanczos 模态提取方法计算,结果如图 7 所示,由图 7 可得前 4 阶有效模态分别是 4 262.56、8 100.03、12 000.72、13 392.7 Hz。

将连杆大头试验模态结果与仿真模态结果进行对比分析,发现两种结果较为接近,并且最大误差不超过 3%(表 2)。由于仿真过程中,有限元模型的建立和计算过程中也存在一定误差,因此近似认为,

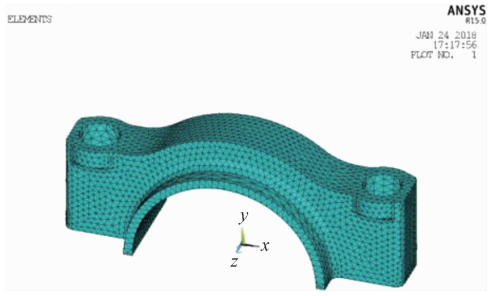

图 6　连杆大头有限元模型

Fig. 6　Finite element model of connecting rod large head

表 2　验模态结果与仿真模态结果对比

Table 2　Comparison between modal test results and simulation modal results

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
试验模态/Hz	4 311	8 284	12 210	13 470
仿真模态/Hz	4 262. 56	8 100. 03	12 000. 72	13 392. 7
相对误差/%	1. 12	2. 22	1. 71	0. 57

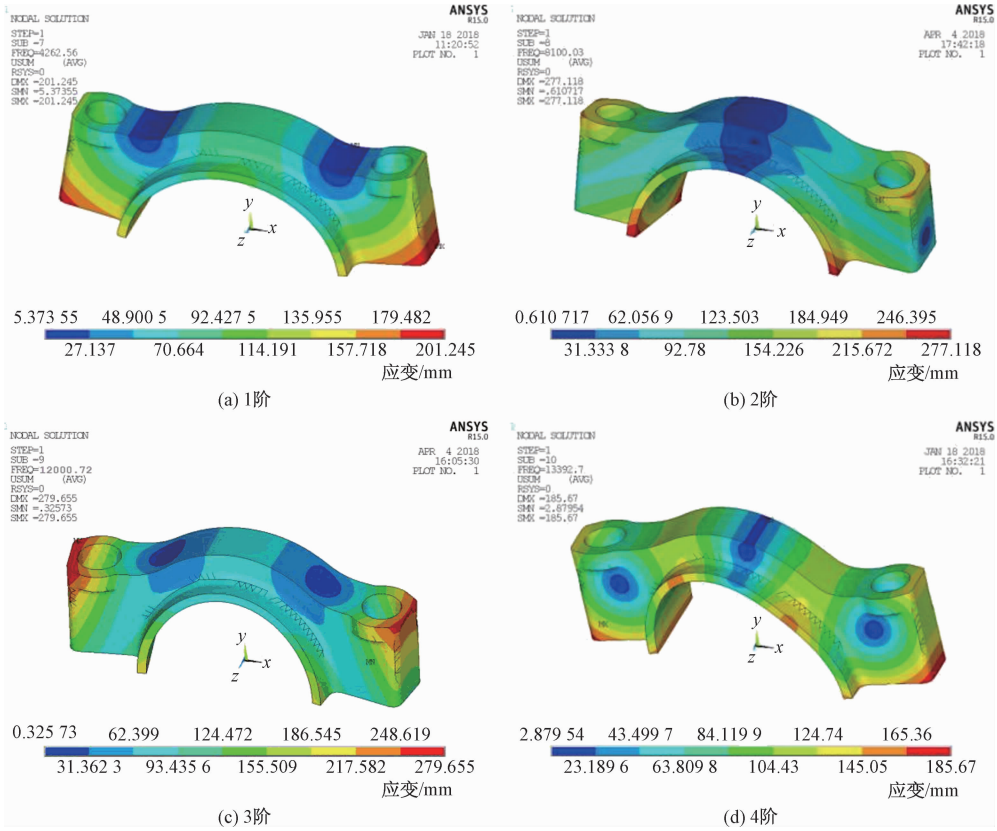

图 7　连杆大头仿真振型

Fig. 7　A simulation pattern of a large head of a connecting rod

基于 LabVIEW 等工具采集机构辐射声音信号,进而实现模态参数识别的方案较为合理。

4　结论

为了降低模态参数识别门槛,在锤击法的基础上提出一种利用声音信号进行模态测试的新方案。该方案以声辐射模态理论为依据,基于 LabVIEW 等工具,通过采集分析某连杆大头振动所产生的声音信号,实现对某连杆大头的模态参数的识别。该方案使用工业声卡、高精度麦克风以及 LabVIEW 软件代替传统锤击法的加速度传感器、采集仪及振动分析系统等装置,因此大大压缩了试验成本。

虽然通过仿真对某连杆大头进行模态参数计算,一定程度上验证了基于 LabVIEW 等工具实现机构模态参数识别方案的可行性,但是尚未使用更多的零件进行实例验证,因此有待更进一步完善和研究。

参　考　文　献

1　李智劳, 李晓东, 刘　凡. 基于锤击法的复材结构模态试验研究. 现代制造, 2017;(15):62—63
Li Zhilao, Li Xiaodong, Liu Fan. Modal test study of composite structure based on hammer method. Modern Manufacturing, 2017;(15): 62—63

2　Borgiotti G V. The power radiated by a vibrating body in an acoustic fluid and its determination from boundary measurements. Journal of the Acoustical Society of America, 1990; 88(4):1884—1893

3 Williams E G. Regularization methods for near-field acoustical holography. Journal of the Acoustical Society of America, 2001; 110(4): 1976—88

4 Tournour M, Cremers L, Guisset P, *et al.* Inverse numerical acoustics based on acoustic transfer vectors. Journal of the Acoustical Society of America, 2000; 12(1): 1—3

5 赵 坚, 于 明. 航空发动机涡轮盘振动模态与声模态分析研究. 兵工学报, 2010;31(增刊1): 179—183
Zhao Jian, Yu Ming. Vibration modal analysis and acoustic mode analysis of aero engine turbine disk. Journal of Ordnance Industry, 2010;31(1): 179—183

6 郭建平, 杨洁, 杨明明,等. 基于声压传感器的电路板试验模态分析. 机械工程师, 2012;(6):81—83
Guo Jianping, Yang Jie, Yang Mingming, *et al.* Experimental modal analysis of printed circuit board based on sound pressure sensor. Mechanical Engineer, 2012;(6): 81—83

7 Prezelj J, Lipar P, Belšak A, *et al.* On acoustic very near field measurements. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013; 40(1): 194—207

8 Zhu W D, Liu J M, Xu Y F, *et al.* A modal test method using sound pressure transducers based on vibro-acoustic reciprocity. Journal of Sound Vibration, 2014; 333(13):2728—2742

9 Pierro E, Mucchi E, Soria L, *et al.* On the vibro-acoustical operational modal analysis of a helicopter cabin. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009; 23(4):1205—1217

10 夏茂龙, 黎 胜. 基于声压测量的结构模态参数辨识. 振动与冲击, 2017; 36(22):232—238
Xia Maolong, Li Sheng. Identification of structural modal parameters based on sound pressure measurement. Vibration and Shock, 2017; 36(22):232—238

11 彭晓东, 李俊宝. 结构声辐射模态分析. 山西矿业学院学报, 1996; (3):226—232
Peng Xiaodong, Li Junbao. Structural acoustic radiation modal analysis. Journal of Shanxi Institute of Mining Technology, 1996; (3): 226—232

12 刘文峰, 应怀樵, 李俊宝,等. 通过声音识别平板结构模态的测试方法研究. 全国振动, 2000; (3): 8—12
Liu Wenfeng, Ying Huaiqiao, Li Junbao, *et al.* Research on the testing method of modal structure by sound recognition. National Vibration, 2000; (3): 8—12

13 赵树忠, 李书娜. 在 Labview 下实现数字信号处理. 华北理工大学学报(自然科学版), 2017; 39(3):88—92
Zhao Shuzhong, Li Shuna. Digital signal processing under Labview. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science), 2017; 39(3): 88—92

Identification Method of Modal Parameters Based on LabVIEW

ZHANG Ya-jian[1], MAO Hu-ping[1*], YANG Yu-guang[1], WANG Hanchen[1], CHENG Yi[2]

(School of Energy and Power Engineering[1], School of Mechanical Engineering[2], North University of China, Taiyuan 030051, China)

[**Abstract**] In order to reduce the threshold of mechanism modal parameter identification, a new non-contact modal parameter identification method based on LabVIEW and other tools is proposed. This method combines LabVIEW software tools with high-precision microphone, industrial sound card and other hardware devices to achieve sound signal acquisition, fast Fourier transformation (FFT), modal parameter identification and other functions. Finally, taking a connecting rod head as an example, the modal parameter identification experiment is carried out using this method, and the simulation results are carried out by ANSYS software. The results show that the error between the modal parameter identification results based on LabVIEW and the simulation results is less than 3%, which verifies the feasibility of the new modal parameter identification method.

[**Key words**] modal acoustic radiation FFT LabVIEW