

基于声信号的故障检测方法 在运载火箭上的应用

刘育玮¹, 张 航², 张振臻², 杨述明¹, 程玉强¹

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410008;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于声信号的故障检测可以通过非接触式的传感器采集部件工作时的声音信号, 经过处理, 声信号可以有效的表征部件的工作状态, 进而实现故障检测。随着声信号在设备故障检测方面的应用日益成熟, 声信号开始用于对火箭的发动机和其他部件的故障检测, 并已经取得了一些研究成果。概述了基于声学信号的故障检测的一般方法过程, 分析了基于声信号的故障检测方法在运载火箭健康状态监控领域的应用现状, 最后对该领域未来的发展进行了展望。

关键词: 声学信号; 信号处理; 故障检测; 运载火箭; 健康监控

中图分类号: V431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)03-0001-07

Application of fault detection method based on acoustic signal in launch vehicle

LIU Yuwei¹, ZHANG Hang², ZHENG Zhenzhen², YANG Shuming¹, CHENG Yuqiang¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of

Defense Technology, Changsha 410008, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The fault detection based on acoustic signal can collect the sound signal of working components through the non-contact sensor. Through the signal acquisition and signal processing, the acoustic signal can effectively characterize the working status of components, and then realize the fault detection. With the continuous development of acoustic signals in equipment fault detection and diagnosis, the acoustic signal has begun to be used for rocket fault detection to detect the state of rocket engines and other components, and some research results have been achieved. This paper summarizes the general method of fault detection based on acoustic signal, analyzes the application status of fault detection method based on acoustic signal in the field of launch vehicle health monitoring, reviews the related technologies of fault detection method based on acoustic signal in the field of rocket health monitoring, and finally looks forward to the main development trend.

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51206181)

作者简介: 刘育玮(1995—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭健康监控。

通信作者: 程玉强(1979—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究领域为大型液体火箭发动机动力学与健康监控。

Keywords: acoustic signal; signal processing; fault detection; launch vehicle; health monitoring

0 引言

声音,是由物体振动产生的声波,其中包含有丰富的信息。人类生活在一个充满声音的世界,声音无处不在,是人类熟悉的传递信号方式之一。基于声信号的故障检测方法是一种无损检测方法,可以通过非接触式的传感器采集部件工作时的声信号,通过信号采集、去噪和故障特征提取等手段对被测对象进行故障检测。

声信号故障检测已经被广泛应用于航空发动机、动车、船舶汽轮机等大型机械设备之中。尽管基于声信号的故障检测方法发展日新月异,但是在运载火箭方面的工程应用较少,特别是对该领域缺乏系统的总结和分析。本文首先介绍了基于声信号的故障检测方法的一般原理和实现方法,接着总结了该类方法在运载火箭健康监控领域的研究现状,最后对该领域的发展前景进行了展望,为进一步深入研究声信号故障监测在运载火箭上的应用和拓展其范围提供了有力支持。

1 技术层面

根据声音的性质,通过对声压、声强和声压级等声学参数进行声学分析,能够基于声信号实现对机械设备的故障检测。下面分别介绍常用的声学参数和基于声信号的故障检测系统的一般组成。

1.1 声信号故障检测参数

基于声信号的故障检测一般通过对声压、声强和声压级等声学参数的测量、分析,实现故障检测^[1]。

声压是指声波在介质中传播产生的压强与无声波在介质中传播时的大气压之间的最大差。其表达式为

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1)$$

式中:下标 e 为有效值; T 为平均时间, s; p 为声压, Pa。

声强是指在单位时间和单位面积上,垂直于声波传播方向所通过的所有能量,其表达式为

$$I = \frac{p_e^2}{\rho c} \quad (2)$$

式中: ρ 为介质密度, kg/m³; c 为声音在该介质中的传播速度, m/s; I 为声强, W/m²。

声压级是为了便于人们根据人耳对声音强弱变化响应的特性,引入的一个数量。其表达式为

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

式中: L 为声压级, dB; I_0 为 10^{-12} W/m²。

1.2 声信号故障检测系统

基于声信号的故障检测系统一般由待测声源、声信号采集模块、声信号处理模块和故障检测模块组成^[2-5],如图1所示。待测声源发出的声信号经由声信号采集模块和处理模块后,提取声信号中能够反映系统运行状态的信号成分或特征,最终由故障检测算法对系统工作状态做出判断。



图1 声信号故障检测系统

Fig. 1 Acoustic signal fault detection system

1.2.1 信号采集

对于声信号的采集,目前使用的有麦克风^[6-10]和声矢量传感器^[11-13]。对于前者有的为了避免声信号混叠而采用麦克风阵列^[14-19],后者因为是通过声波先后经过两根铂金丝进行换热对声信号进行采集,具有指向性,能有效避免信号混叠。

1.2.2 信号处理

声信号处理方法主要有小波变换、经验模态分解法和神经网络等方法。

文献[20]中指出,小波变换概念在1984年由Morlet首先提出。小波变换的时域和频域分辨率与频率有关,在高频段,小波变换能达到高时域分辨率,而频域分辨率较低;对低频段则刚好相反^[21]。因此,小波变换在一定程度上克服了时间分辨率和频率分辨率精度的矛盾,使得小波变换能在一定程度上对信号进行自适应处理。小波变换能将时域

与频域共同进行处理,但是需要人为的选取小波基函数,而不同基函数分析得到的结果质量也不同。

与小波变换不同,经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)不需要选定基函数,它能在特征时间尺度上把信号自适应地分解为有限的本征模态分量(intrinsic mode function, IMF)和剩余残余分量^[22]。EMD 方法处理信号时,首先要寻找信号的所有局部极值点,得到上下包络线,求出信号均值,得到 IMF,并判断其是否满足 IMF 的条件,计算 EMD 分解停止准则值,判断得到的残余分量是否满足停止准则;若满足,则 EMD 分解结束。在 EDM 方法基础上,经过改进,发展出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)算法^[23],完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)算法^[24]和自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with A noise, CEEMDAN)算法^[25]等。

神经网络以神经元作为基础单位,以不同的神经元之间的连接作为信息传递的载体,是一种由众多神经元构成的网络结构,其中在声信号故障检测中使用较多的是 BP 神经网络^[26-32]和小波神经网络^[33-36]。BP 神经网络能够把相似模式的特征值提取出来,并映射到连接权值上^[37]。同时 BP 神经网络具有很强的非线性映射能力,使其在求解内部机理复杂的问题时具有优势。而小波神经网络是在 BP 神经网络的基础上,用离散小波变换中的系数代替神经网络权值而构成^[38],小波神经网络比 BP 神经网络学习速度更快,并且能够避免模型陷入局部极小。

此外,李宏亮等人使用 MATLAB 设计线性相位有限冲击响应数字滤波器并结合 Hilbert 变换,对滚动轴承的声信号进行了分析^[39],并通试验数据分析,验证了方法的适用性。申博文等运用基于自适应噪声的 CEEMD 和最大相关谱峭度解卷积(maximum correlated kurtosis deconvolution, MCKD)对轴承声信号进行处理,通过实验验证了该方法能够更加准确地进行故障诊断^[40]。

1.2.3 故障诊断

目前,基于声信号的故障诊断方法主要可以分为 4 类:

1) 主观评价和经验估计法:主观评价法是最直接、最原始的声信号故障检测方法,需要故障诊断人员有丰富的经验,通过听觉和经验判断设备是否存在故障或异常,然后停机查找故障发生的位置和类型。这种故障诊断方法完全取决于诊断人员的主观判断,难以实现对故障的准确定位和对故障程度的定量评估。

2) 近场测量方法:在被测设备上安装多个声学传感器,根据声学传感器显示的数值大小来确定故障声源的位置。这种方法虽然简单方便,但是测量准确度有限^[41]。传感器测得的声压级数值主要来源于距传感器最近的声源,根据声学理论可知,其他噪声源对测量数值的影响很小或可忽略不计^[42]。由于传感器与声源之间的距离远近是相对的,在背景噪声较大或者较多的情况下,也可能存在噪声掩盖的现象。因此该方法只能大概判断声源的位置,无法对设备故障诊断提供准确的数据。

3) 声强法:声强具有矢量性。为了减小周围环境因素等的影响,一般使用两个或多个声传感器进行信号采集。通过传感器测得的设备中不同部件的声强,从而判断出主要声源,实现故障定位。

4) 频谱分析法:根据测得的声信号频谱图中的峰值和设备的故障特征频率的比较结果来进行故障诊断。例如齿轮箱的声信号频谱中包括齿轮啮合频率、内圈故障频率、外圈故障频率等固有频率,可以对其进行故障诊断。

2 应用层面

声信号在运载火箭上的应用方面,国外研究的较早,声学环境监测可以及时发现运载火箭结构失效问题。美国 NASA 在 1950 年左右开始了早期的声学模型测试,针对单一的振幅标度与推力的关系、自身噪声与马赫噪声的关系、声能与排气的动能比例关系等方面开展了大量研究,并进行了运载火箭的专用声学尺度模型测试。由于噪声的产生、传播和测量的关键特性都可以按比例缩放,根据这一特性,通过假设建立运载火箭声学比例模型,并通过计算分析来验证模型的有效性。为了对运载火箭的声学模型的效果进行评估,几十年来,NASA 一直用比例模型来模拟发射环境,如图 2 所示。并用声学相阵对声信号进行采集,如图 3 所示。经过

不断的试验,促进了实验人员对发射台几何形状对噪声影响和噪声缓解效果的认识,还了解了材料脆裂与声压的关系、随飞行器高度的上升,噪声频率的变化关系等。



图2 NASA早期声学测试比例模型

Fig. 2 Scale model of NASA early acoustic test

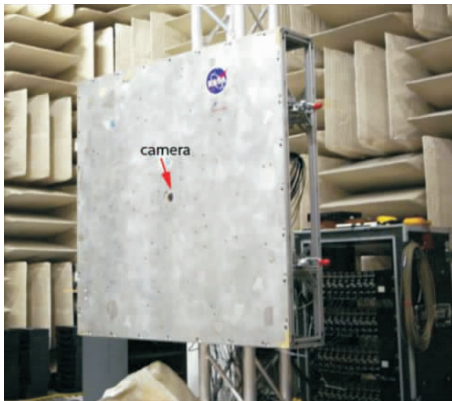


图3 NASN 麦克风相阵

Fig. 3 NASA microphone array

声荷载是由于发动机排气的紊流混合而在飞行器表面上产生的随空间和频率而变化的声压波动。运载火箭在其推进系统的运行期间,会受到大量外部脉动压力载荷的影响。特别是运载火箭飞行阶段的升空声学(lift off acoustics, LOA)会产生一些最高频率,并被认为是运载火箭研制中的一个关键设计因素。过大的声荷载会导致运载火箭的机械或电子部件故障以及结构疲劳,对这一特定阶段的声荷载进行全面分析,对于预测运载火箭所承受的振动载荷以及为其制定振动试验规范提供必要依据是至关重要的。NASA持续致力于改进声学载荷预测,为振动声学分析工作制定相关标准,以生成可靠的火箭部件的鉴定环境。

对于运载火箭来说,升空阶段会在较宽的频率范围内产生较高的声荷载。而这些声荷载可以作为对火箭内部的振动情况的预测。美国现有的火箭声环境预测方法是利用比例模型试验获得的平稳数据,生成1/3倍频程声压级谱。为了提高升空声荷载预测的精度和准确性,他们还对Area I-X的非平稳飞行数据进行计算机信号处理。并且,在MATLAB中开发了火箭声环境预测(prediction of acoustic vehicle environments, PAVE)程序,以便使用半经验方法有效地预测声压级PAVE程序框架和用户界面,如图4所示。

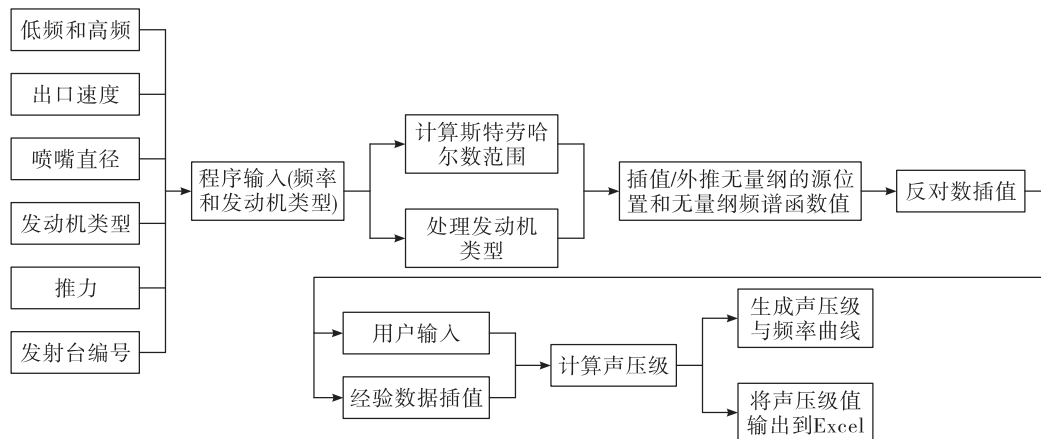


图4 PAVE 程序框架

Fig. 4 PAVE program framework

除了对整个箭体做了声学研究之外,国外的Farinholt K M等人,提出了一种具有执行器边界条件的锥形壳体的声学建模与控制^[43]。将声阻抗与电动和机械作动器动力学耦合,生成系统的耦合状态空间模型。对声阻抗的分析表明,当圆锥截面的长度比从顶点到执行器边界条件的距离变大时,会发生极零点对消。该模型预测前4个共振频率在实验测量值的1.75%以内。并给出了驻波波形,并与执行器边界条件的影响有关。在实验台上实现了一个反馈控制器,最后实验结果表明,采用单反馈通道可以实现整体声衰减。在与火箭发动机相关的部件上,Parrondo J等人,提出了一个考虑了任意位置和特性的理想声源的简单声学模型来估计常规蜗壳离心泵的低频压力脉动场^[44]。在该模型中,假设理想声源沿叶轮通道、蜗壳和出口扩压器辐射平面声波。蜗壳被认为是由一系列的切片组成,每个切片相当于一个线性的三端口声学系统,具有各自的声透射系数和反射系数。通过实验验证了声学模型的预测值与实验数据和技术文献^[45-46]中的数据吻合得很好。

国内的北京强度环境研究所针对发射噪声预示问题,通过常温空气超声音速喷管研究相似准则,提出了基于模拟发动机比例模型试验的运载火箭喷射流噪声预示方法^[47-49]。北京宇航系统研究所和中国运载火箭技术研究院提出了一种基于声学监测的发动机状态检测与诊断系统及实现方法^[50]。该方法使用声像仪等设备采集信号,并在传感外侧安装风球以消除环境的影响。通过建立的系统获得声场数据,然后基于声场数据建立声源评估模型。在实时性的验证方面,在火箭发动机点火后,利用声源评估模型与在发射台附近采集的实时数据进行对比,来判断发动机是否存在异常。

不同于上面针对整个箭体的声学信号故障检测方法,西安航天动力试验技术研究所的张少博等人对液体火箭发动机试验中的推进剂供应系统的阀门进行了声压检测试验^[51]。通过声压测量技术,分析了阈值检验法和标准偏差检验法,提取出阀门出现故障时的特征信号,从而可以简单有效地检测出阀门故障。上海交通大学的Zhang Z L等人设计并搭建了预混预蒸发(lean premixed pre-evapora-

tion, LPP)模型燃烧室振荡燃烧试验台,开展了利用声信号检测LPP燃烧室热声振荡的实验研究,通过测量稳定工况和过渡工况下的声学信号与压力信号,并进行分析,结果显示声信号的倍频性比压力信号的倍频性更明显,说明声信号所受干扰较小^[52]。在过渡状态下,点火后声信号的脉冲能量明显增加。从稳定燃烧到振荡燃烧,当工况开始变化时,主频能量增加。当工况开始由振荡变为稳定燃烧时,主频能量降低。在熄火过程中,振荡能量从高频区开始衰减。由于声学信号的干扰比压力信号小,在振荡和过渡状态下可以得到与压力信号相同的结果,因此声学诊断可以作为一种辅助手段。

3 讨论与展望

综上所述,基于声信号的故障检测方法已经在火箭健康监控方面开展了一些应用研究,并取得了一定的成果。但整体而言,该领域仍处于发展初期,存在诸多亟待解决的问题,如模型通用性差、故障检测能力有限等。大多数方法和技术尚处于试验阶段,距离实际工程应用还有一定差距。

基于声信号的运载火箭故障检测方法是一个新兴的工程技术领域,未来还有诸多课题值得进一步探索:

- 1)通过建立火箭的通用声学模型,探究火箭振动与声压的关系和喷管几何分布与噪音的影响等,并建立火箭声学通用比例模型。开发火箭声环境测试程序,配合专用传感器实时采集声学信号进行火箭故障检测。

- 2)对火箭主要部件的声信号进行分析,如整流罩、涡轮泵、管路的声学特性进行研究分析,得到主要部件的故障声学特性,设计适当的特征提取方法,进行故障诊断。

- 3)发展基于声信号与其他信号(如振动、温度信号)的多信息融合的火箭故障检测方法,可以结合接触测量方法与非接触测量方法的优点,有望提升故障诊断的准确率。

- 4)发展声信号的数据处理方法和滤波方法,如自适应小波滤波、EMD、深度学习方法等,并将声信号故障检测融入现有的健康监测系统,实现自动报警、冗余备份、紧急关机等。

参考文献:

- [1] 孙少军. 重型车用发动机振动与噪声控制的理论与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [2] 武孟, 张小辉. 铁路客车空调通风机常见振动故障诊断[J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(5): 71-73.
- [3] 沈阳阳. 基于振动信号分析的风力发电机轴承故障诊断[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [4] 高星星. 基于循环平稳的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.
- [5] 潘静. 行程开关早期故障诊断研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
- [7] PARK J, KIM S, CHOI J H, et al. Frequency energy shift method for bearing fault prognosis using microphone sensor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107068.
- [8] 于华森, 黄民. 滚动轴承声信号故障诊断[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(6): 72-76.
- [9] 郝洪涛, 倪凡凡, 丁文捷. 基于声音信号的托辊故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 187-192.
- [10] 张郑武, 冯志鹏, 陈小旺. 基于高阶同步压缩变换的行星齿轮箱声音信号共振频带特征提取[J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 1048-1054.
- [11] BASTEN T G H, BREE H E D, DRUYVESTEYN W F, et al. Multiple incoherent sound source localization using a single vector sensor[C]//16th International Congress on Sound and Vibration. Krakow, Poland: [s. n.], 2009.
- [12] JING W Q, COMESAA D F, DAVID P C. Sound source localization using a single acoustic vector sensor and multi-channel microphone phased arrays[Z]. 2014.
- [13] KOTUS J. Multiple sound sources localization in free field using acoustic vector sensor[J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, 74(12): 4235-4251.
- [14] 赖少将, 李舜酩. 基于近场声阵列的旋转机械噪声源识别[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 122-126.
- [15] 马超, 王少红, 徐小力. 基于 EEMD 的声阵列滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1379-1384.
- [16] 卢显达. 基于 SWT 与麦克风阵列的滚动轴承声学诊断方法[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- [17] 王宁. 基于麦克风阵列的机电设备故障声源定位系统[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [18] 宁培培. 基于麦克风阵列的机械故障诊断研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [19] 马波, 于功也, 闫戈. 基于麦克风阵列的机车车辆转向架跑合试验的故障监测研究[J]. 机车电传动, 2019(6): 95-99.
- [20] 王鑫. 基于小波变换的机械轴承磨损故障特征提取方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [21] 彭志科, 褚福磊. 小波变换在故障诊断中的应用综述与展望[C]//2002 年全国振动工程及应用学术会议. 北京: 中国振动工程学会, 2002.
- [22] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [23] LEE D H, AHN J H, KOH B H. Fault detection of bearing systems through EEMD and optimization algorithm[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2477.
- [24] CHEN L, CHEN G C, ZHU Z Q. Harmonic analysis method based on CEEMD-HT algorithm[J]. Electric Power and Engineering, 2017, 33(1): 61-66.
- [25] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Prague, Czech Republic: IEEE, 2011.
- [26] 李春雷, 董志学, 王新杰. 发电机声音检测与故障诊断研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 201-208.
- [27] 赵殿全, 李金龙, 谢蓓敏. 基于阀厅智能巡检机器人的设备声音故障识别算法[J]. 电子设计工程, 2016, 24(21): 63-65.
- [28] 朱星明. 基于 FFT 和 BP 神经网络的变压器振动噪声特征识别[J]. 科学技术创新, 2018(29): 34-36.
- [29] 李倩. BP 神经网络的舰船辐射噪声识别[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(24): 22-24.
- [30] 余长厅, 黎大健, 汲胜昌, 等. 基于振动噪声及 BP 神经网络的变压器故障诊断方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 256-261.
- [31] WANG Y S, LIU N N, GUO H, et al. An engine-fault-diagnosis system based on sound intensity analysis and wavelet packet pre-processing neural network[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 94: 103765.
- [32] 江毓, 郑燕萍, 张新, 等. 基于改进 BP 神经网络的电机异音诊断[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(1): 242-246.
- [33] 王万俊. 装甲车发动机故障诊断系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

- [34] 高瑞鹏,尚春阳,江航. 遗传算法结合小波神经网络的列车车轮扁疤故障检测方法[J]. 西安交通大学学报, 2013,47(9): 88-91.
- [35] 刘龙. 基于小波神经网络的带式输送机托辊故障检测研究[J]. 大科技, 2019(4): 204.
- [36] 杭州安脉盛智能技术有限公司. 一种基于改进小波包和深度学习的变压器声音异常检测方法: CN201911315352.5 [P]. 2020-06-09.
- [37] 杜设亮,傅建中,陈子辰,等. 基于BP神经网络的齿轮故障诊断系统研究[J]. 机电工程, 1999, 16(5): 81-83.
- [38] 马志远,王洪波,孙晴. 基于EEMD样本熵与小波神经网络的汽车关门声品质预测[J]. 噪声与振动控制, 2019,39(3): 122-127.
- [39] 李宏亮,黄民,高宏,等. 基于声信号的滚动轴承故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(7): 86-88.
- [40] 申博文,王华庆,唐刚,等. 基于MCKD与CEEMDAN的声信号故障特征提取方法[J]. 复旦学报(自然科学版), 2019,58(3): 385-392.
- [41] 李静娇. 基于声学信号的滚动轴承故障诊断及应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- [42] 高阳. 螺杆压缩机噪声控制措施的研究[J]. 机电信息, 2011(6): 3.
- [43] FARINHOLT K M, LEO D J. Acoustic modeling and control of conical enclosures[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(1): 2-11.
- [44] PARRONDO J, PÉREZ J, BARRIO R, et al. A simple acoustic model to characterize the internal low frequency sound field in centrifugal pumps[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(1): 59-64.
- [45] PARRONDO-GAYO J L, GONZÁLEZ-PÉREZ J, FERNÁNDEZ-FRANCOS J. The effect of the operating point on the pressure fluctuations at the blade passage frequency in the volute of a centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 784-790.
- [46] PARRONDO J, BARRIO R, GONZALEZ J, et al. Discrete noise sources in a centrifugal pump operating at partial load[C]// 12th International congress on sound and vibration. Lisbon, Portugal: [s. n.], 2005.
- [47] 任方,张正平,李海波,等. 运载火箭起飞噪声环境缩比模型试验方法[J]. 宇航学报, 2015, 36(3): 344-350.
- [48] 黄怀德. 振动工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.
- [49] 张正平,任方,冯秉初. 飞机噪声技术研究: 工程解决方法[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1207-1212.
- [50] 北京宇航系统工程研究所. 基于声学监测的发动机状态监测与诊断系统及实现方法: CN201910219292.0 [P]. 2019-07-09.
- [51] 张少博,王乃世,陈海峰,等. 基于声压测量的阀门故障检测方法研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(4): 100-104.
- ZHANG S B, WANG N S, CHEN H F, et al. Method of valve fault detection based on sound pressure measurement[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(4): 100-104.
- [52] ZHANG Z L, ZANG S S, GE B, et al. Acoustic diagnostics applications in the study of the oscillation combustion in lean premixed pre-evaporation combustor [C]// ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S. l.]: ASME, 2017.