

基于希尔伯特—黄变换的控制阀气密性故障诊断研究

高群立, 马良威, 庞仁贵, 张国军
(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 以气动薄膜控制阀气室气密性故障为研究对象, 首先对控制阀阀位响应信号进行希尔伯特—黄变换, 通过经验模态分解方法检测故障的发生及发生时刻; 其次分析了解析所得各阶模态及其能量占比特性, 获得了气动控制阀气室气密性故障类别和强度的在线诊断; 最后通过模型仿真和实体阀实验验证了文章提出的检测及诊断方法的有效性和实用性; 研究首次将希尔伯特黄变换信号分析方法引入到非周期、非平稳过程故障诊断中来, 完整的实现了气动控制阀气室气密性故障的检测、诊断和强度识别。

关键词: 气动控制阀; 故障诊断; 气密性; 希尔伯特—黄变换; 模态分解

Research on Fault Diagnosis of Air Tightness of Control Valve Based on HHT

Shang Qunli, Ma Liangwei, Pang Rengui, Zhang Guojun
(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Taking the airtightness of the pneumatic diaphragm control valve chamber as the research object, the Hilbert—Yellow transformation of the control valve position response signal is firstly carried out, and the occurrence and timing of the fault are detected by the empirical mode decomposition method. Secondly, the decomposition is analyzed. The obtained modes and their energy ratio characteristics are obtained, and the online diagnosis of the air tight fault category and strength of the pneumatic control valve chamber is obtained. Finally, the validity and practicability of the proposed detection and diagnosis methods are verified by model simulation and solid valve experiments. For the first time, the Hilbert Huang transform signal analysis method is introduced into the fault diagnosis of non—periodic and non—stationary processes, and the detection, diagnosis and strength identification of the air tightness of the pneumatic control valve chamber are realized.

Keywords: pneumatic control valve; fault diagnosis; air tightness; Hilbert—Huang transform; modal decomposition

0 引言

控制阀作为工业控制系统的重要和关键组成部件, 工业过程控制的性能很大程度上受其影响。而气动调节阀作为其中的佼佼者, 应用最为普遍。薄膜气动控制阀的主要动力和控制源自于空气压缩机提供给薄膜气室的空气。通过智能阀门定位器控制薄膜气室的气压, 从而推动阀杆克服弹簧弹力和摩擦力上升或者下降; 最终通过连接阀杆的阀芯来控制流经阀体节流面介质的流量大小。然而气路漏气的发生会导致控制阀直接失去动力源, 使阀杆不能精确的响应设定信号, 轻则影响产品性能工艺, 重则造成设备和人员的损坏和伤亡^[1]。所以及时诊断出控制阀运行过程中的故障并且保证控制阀的正常平稳运行, 成为科研工作者研究的重中之重。

气密检测是衡量许多工业品密封性能的重要手段^[2], 然而国内对于气密性检测技术的研究相对落后, 传统上主要依靠人的主观感官去判断, 不确定因素较大。目前国内外较为常用的干式漏检法为差压漏检法^[3], 虽然应用广泛, 但也存在很多问题比如使用寿命和检测精度等^[4], 而基于信号处理分析的方法具有操作方便、精度高的优点。

1998年美国国家宇航局 Huang 等人提出了一种新的信号分析理论希尔伯特—黄变换 (Hilbert—Huang Transform 简称 HHT)^[5], 它包括经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition 简称 EMD) 和 Hilbert 变换 (HT) 两个主要步骤。HHT 是一种有效分析各类信号的时频分析方法。基于信号的自适应特性和局部特征, 解决了傅里叶变换不能有效处理的非线性、非平稳信号的难题。针对控制阀的相关信号的特征提取, 有效刻画了控制阀阀位响应信号的相关特性。然而在 HHT 方法问世之后 Huang 及以后的研究者多应用于地震、声学、地球物理学、海洋学、电机、齿轮、轴承等方面^[6-8]。但是在气动控制阀诊断应用领域的研究却相对较少。

本研究将希尔伯特黄变换方法引入到气动控制阀气室

收稿日期: 2018-06-08; 修回日期: 2018-07-31。

基金项目: 国家自然科学基金(61174108); 国家科技重大专项(2018ZX06005002-003-001)。

作者简介: 尚群立(1964-), 男, 陕西武功人, 博士, 教授, 主要从事控制阀所在控制系统的理论与应用方向的研究。

气密性故障诊断研究中,模拟了气室漏气,采用 EMD 对阀位信号进行分解,实现了对故障发生时刻的检测,计算模态能量值,通过对比控制阀是否漏气状态下的模态能量值达到了对故障的强度识别。

1 希尔伯特-黄变换算法

希尔伯特-黄变换由两个部分组成:首先是用经验模态分解(EMD)方法分解已采集到的初始信号 $X(t)$,分解并提取原信号中固有 IMF 分量;每个固有模态函数理论只含单一频率的信号成份^[8]。其次对于每个模态,作 Hilbert 变换,获得其表征频率、时间和幅值的希尔伯特谱 $H(\omega, t)$,通过对其积分获得希尔伯特边际谱 $h(\omega)$,从而得到信号分析处理的结果。该方法的简要流程如图 1 所示。

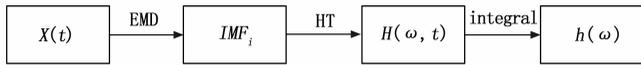


图 1 Hilbert-Huang 变换框图

1.1 经验模态分解 (EMD)

Huang^[9]详细的介绍了 HHT 的相关理论,该算法采用经验模态分解(EMD)解决了信号自适应分解的难题。EMD 将给定连续信号 $X(t)$ 自适应的分解为一个残余项及多个固有模态函数。

通过如图 2 所示的 EMD 分解流程框图即可得到各个固有模态分量;信号分解提取模态如下式,等号左边是原始信号 $X(t)$,经 EMD 分解得到等号右边 IMF 分量的累加及剩余分量 $r(t)$ 。即:

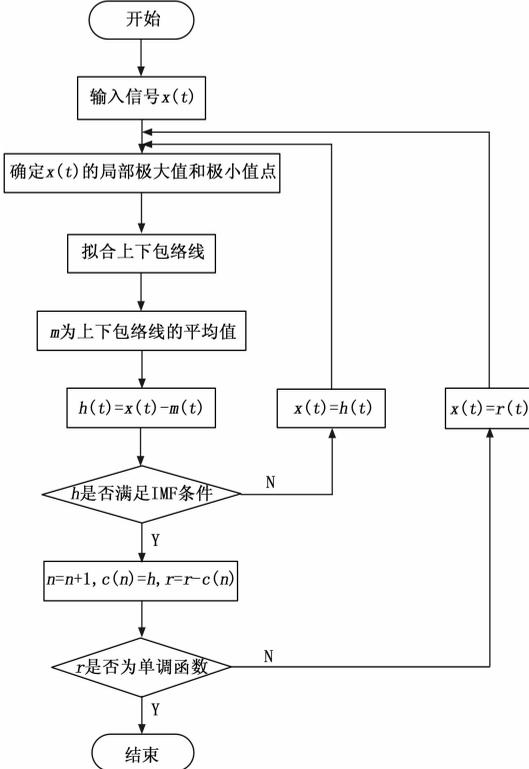


图 2 EMD 分解流程图

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i + r(t) \tag{1}$$

式中, n 为信号分解所得 IMF 的个数, $r(t)$ 是此分解过程最终产生的剩余分量。

从图 2 的 EMD 分解流程图及 (1) 式可知第 i 个 IMF 与第 $i-1$ 个相比有着较低的频率分布。即 IMF 分量的频率从高到低依次生成;不同的 IMF 代表着不同的时间尺度对应的原始信号特征^[10]。剩余分量 $r(t)$ 代表着 $X(t)$ 原始信号的整体趋势,在诸如海洋、气候等缓慢变化的信号中有着及其重要的利用价值。但是对于控制阀气室漏气造成的气压突变信号中,通常被去掉不用。

1.2 Hilbert 变换 (HT)

长期以来,采用傅里叶变换处理从时域变换到频率域上信号有着明显的效果,但是针对非平稳信号中存在的特殊频率成分,傅里叶变换的结果是该频率在此序列内一直存在。而 Hilbert 变换可以将时域信号 $X(t)$ 变换到相同域的信号 $y(t)$ 。这一时频分析方法被广泛的应用在许多实际信号的分析处理中。例如在声纳、雷达、地震信号、机械振动信号的应用中,验证了 Hilbert 变换在处理此类特征信号方面的有效性和优越性。

希尔伯特变换由德国数学家 Hilbert 提出来的,对于 $X(t)$ 在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的实函数,其希尔伯特变换交换定义为:

$$H(x(t)) = y(t) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{t-\epsilon} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du + \int_{t+\epsilon}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \right] \tag{2}$$

设 $\int_{-\infty}^{\infty} (x(t))^2 dt < \infty$, 则方程交换定义为:

$$H(x(t)) = y(t) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{x(u)}{t-u} du \tag{3}$$

其中: P 为柯西主值, $y(t)$ 为给定信号序列 $X(t)$ 的 Hilbert 变换,本质上是将 Hilbert 变换定义为给定信号 $X(t)$ 与时间倒数的卷积,它强调了 $X(t)$ 的局部特性。作为现代信号处理准则的基础之一,由实信号向复信号进行扩展^[11]。因此, $z(t)$ 可被定义为复解析信号:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \tag{4}$$

式 (4) 能有效的确定相关变量,以上定义时频表达式的基础,且更适用于分析信号频带宽度与信号持续时间相乘足够大的情况。

1.3 模态能量

模态能量法可以用来判断各阶模态频率下,模态能量在系统各个自由度分布。从能量这一重要特征信号,研究控制阀及其相关附件的故障类型特征。因此作为研究诊断控制阀薄膜气室漏气故障的重要方法。首先提取控制阀阀杆位置响应信号的能量特征,然后构建对应的特征向量。经验模态分解将原始信号分解成若干个不同频段范围的模态分量,当出现漏气相关故障时,不同频率范围的阀位响应信号相较于不漏气时会发生变化,从而引起相应频段内

的能量变化。因此^[12], 分别提取不漏气时信号与漏气时信号对应模态能量进行对比, 构建阀位响应信号的能量特征。由此定义控制阀阀位响应信号能量为:

$$E = \sum_{k=1}^n |x(t)|^2 \quad (5)$$

同时, 待检测信号与气密性良好状态下的阀位响应信号的模态分量的能量比为:

$$\delta = \frac{e_j}{E_j}, (j = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中, δ 表示待测阀位响应信号的能量特征, e_j 表示漏气状态下阀位响应信号 IMF 分量的能量值; E_j 表示正常状态下的阀位响应信号 IMF 分量能量值。

2 仿真分析

在控制阀故障诊断 MATLAB/Simulink 模型中进行仿真分析, 模拟膜头穿孔导致的气室气密性故障, 文献给出了其数学表达式如下: 式中 P_s 为气室气压, f_s 为故障强度^[13]。

$$P_{sf} = P_s(1 - 0.5f_s) \quad f_s \in (0, 1) \quad (7)$$

为了更好地模拟控制阀在实际工业生产中的状态, 保证能够实现在线应用, 本次选择的随机信号必须满足控制阀实际工况, 因此所用随机信号其频率设定不能超过待测阀的截止频率 (0.22 Hz), 时间在 400 s 以内。仿真所用的正弦设定信号均为:

$$y = 50 + 20 * \sin(2 * \pi * 0.05 * t) + 25 * \sin(2 * \pi * 0.1 * t), t \in (0, 400s);$$

2.1 EMD 经验模态分解

2.1.1 正弦信号测试

故障发生时间: 160 s

故障强度: 0.1

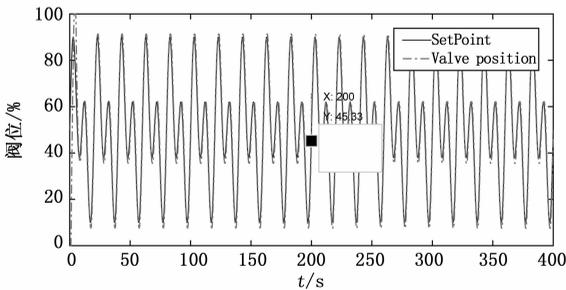


图 3 多正弦设定信号

2.1.2 随机信号

故障发生时间: 200 s

故障强度: 0.2, 如图 5~6 所示。

2.2 Hilbert 变换故障诊断

2.2.1 正弦信号测试

(1) 故障类型: 无 (正常状态)

故障强度: 0, 如图 7 所示。

对于上述信号, 经过模态分解后, 前两个模态的能量

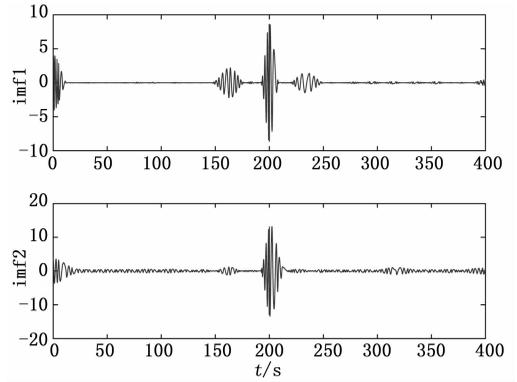


图 4 EMD 分解结果

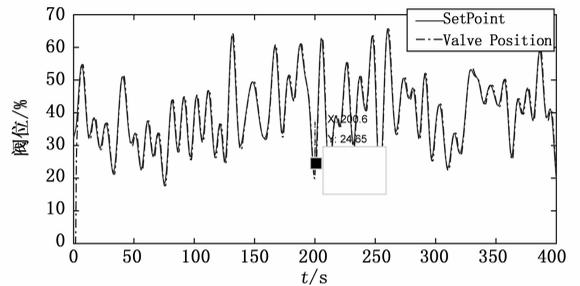


图 5 随机信号及阀位

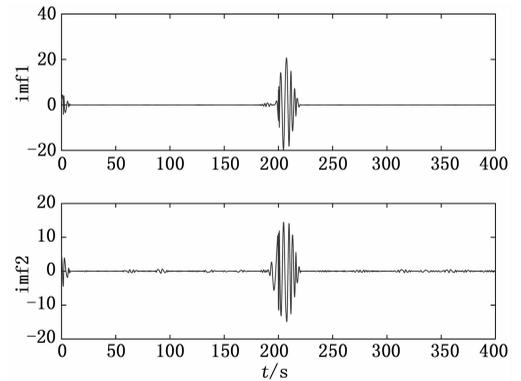


图 6 EMD 分解结果

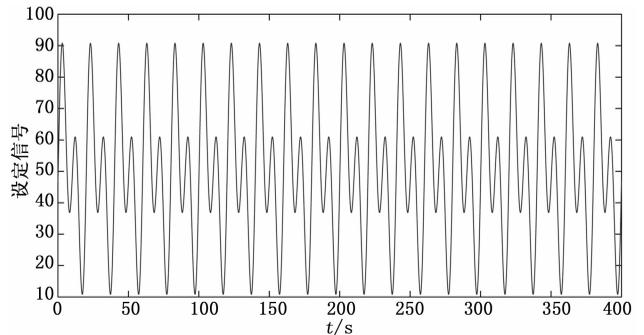


图 7 多正弦设定信号

占比如图 8 所示。

(2) 故障类型: 气室漏气

故障强度: 0.1 (微弱)

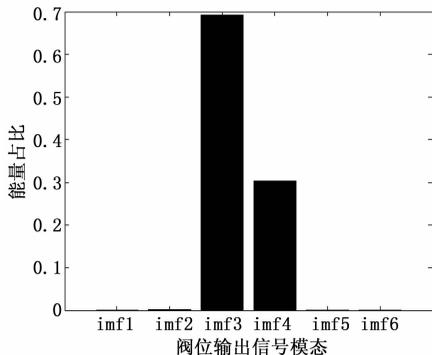


图 8 正弦信号正常状态阀位模式

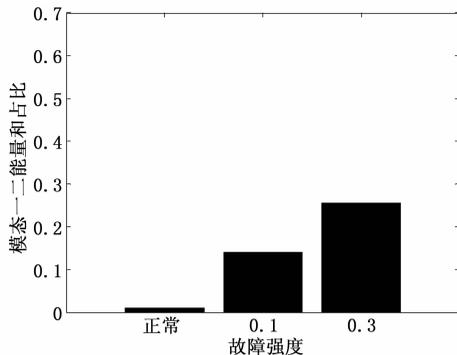


图 11 模式一、二能量和占比与故障强度的趋势图

故障开始时间: 160 s

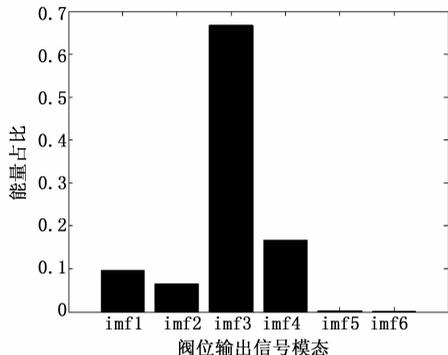


图 9 气室漏气故障微弱状态阀位模式

(3) 故障类型: 气室漏气

故障强度: 0.3 (较弱)

故障开始时间: 60 s

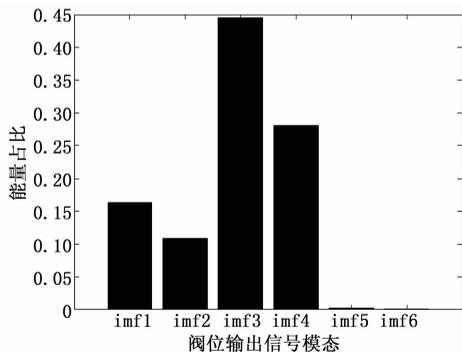


图 10 气室漏气故障较弱状态阀位模式

此设定信号下的前两个模式能量占比之和与故障强度的趋势如图 11 所示。

2.2.2 随机信号测试

(1) 正常状态测试

故障强度: 0, 如图 12~13 所示。

(2) 故障测试

故障强度: 0.1 (微弱), 如图 14 所示。

(3) 故障测试

故障强度: 0.3 (较弱), 如图 15 所示。

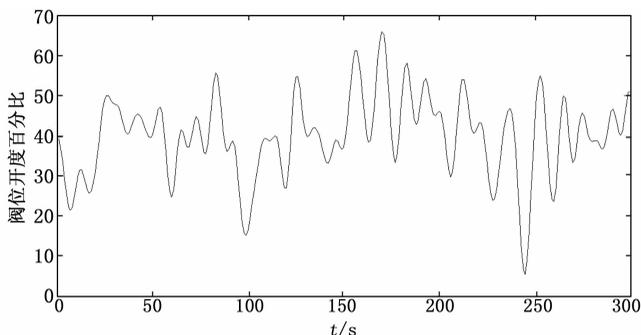


图 12 随机信号

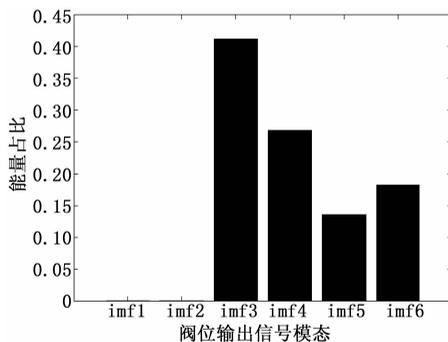


图 13 随机信号正常状态阀位模式

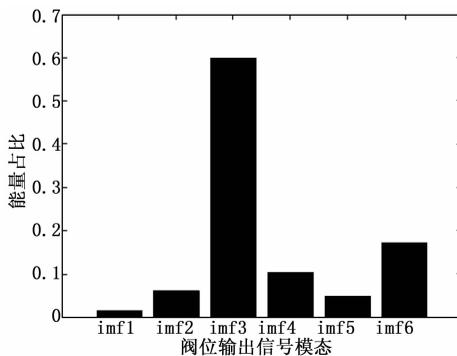


图 14 气室漏气故障弱状态阀位模式

该随机信号下的前两个模式能量占比和与故障强度的趋势如图 16 所示。

从仿真结果可以看出, 在 Simulink 搭建的控制阀故障

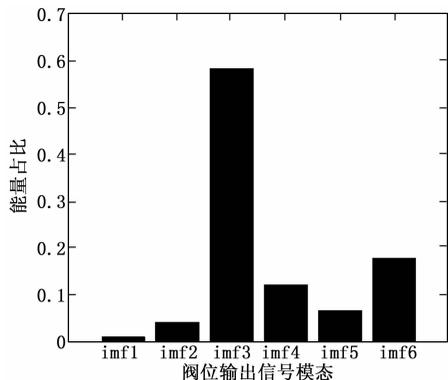


图 15 气室漏气故障较弱状态阀位模式

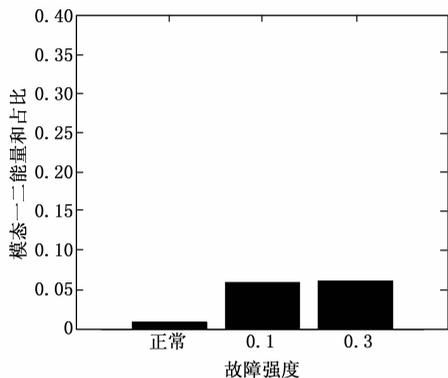


图 16 模式一、二能量和占比与故障强度的趋势图

诊断模型中, 通过希尔伯特—黄变换的方法能够有效分析各阶模态及其能量占比特性, 获得了控制阀气室气密性故障、故障强度的诊断。

3 实验平台与实验方案

3.1 实验平台

3.1.1 硬件实验平台介绍

搭建控制阀气室气密性故障检测硬件实验平台如图 17 所示。

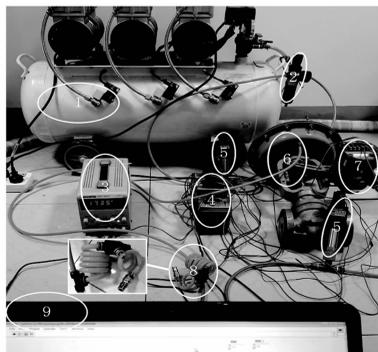


图 17 执行器故障诊断系统实验平台

其中 1 空气压缩机, 2 减压阀, 3 稳压电源, 4 机箱和板卡的组合, 5 压力传感器, 6 薄膜气动控制阀, 7 智能阀门定位器, 8 三通阀和小型手阀, 9 上位机及 LabVIEW 程序。

表 1 实验用控制阀的出厂参数

出厂参数	变量
薄膜有效面积/ mm^2	280
填料	聚四氟乙烯
作用方式	反
行程/ mm	16
弹簧范围/ KPa	20—100
供气压力/ KPa	400

3.1.2 LabVIEW 软件介绍

实验所用软件由美国国家仪器 (NI) 公司研制, 使用图形化编程语言 G 编写程序, 实现了对控制阀设定信号的发送、数据采集、报表生成、数据存储的功能, 如下图所示此 VI 项目主要实现了对控制阀设定信号 SP, 阀位响应信号 PV, 气室气压信号 P2, 气源气压信号 Ps, 通过转换将设定信号 SP 及阀位响应信号归一化至 0—100 的区间。LabVIEW 程序由上位机操控实现对硬件平台的有效控制。

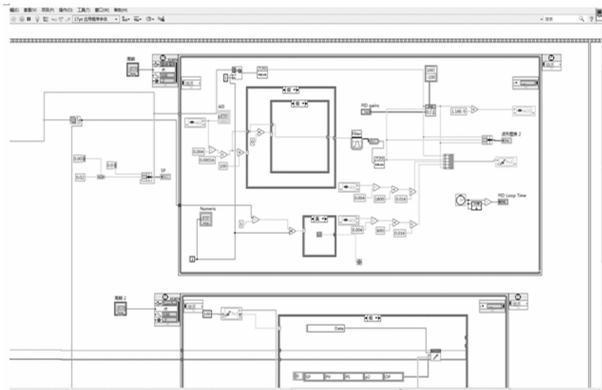


图 18 LabVIEW 程序框图后面板

3.2 实验方案

实验模拟气动调节阀常见的气密性故障, 例如接头、气管损坏或者螺栓松动、薄膜穿孔等常见故障类型。此故障发生时会引起薄膜气室气压的瞬间波动, 进而导致对对阀杆的振动冲击。最终引起高频模块振动加剧, 作为高频成分的前两个模态能量便会相应的变多。

实验操作步骤如下:

- 1) 首先, 按照图 17 所示硬件实验平台, 连接电路和管路, 通过上位机 LabVIEW 程序经 NI 板卡给智能阀门定位器发送不同的设定信号 SP。
- 2) 其次, 在控制阀跟随设定信号开始正常动作后, 选定时刻将图 17 第 8 个部件对应的小型手阀旋开一定圈数。来模拟薄膜气动调节阀的气密性故障。
- 3) 程序跟随设定信号运行完毕, 此时将小型手阀旋紧恢复到实验最初的旋紧状态。
- 4) 循环前 3 个步骤, 同时旋开小型手阀至其他开度, 模拟薄膜气动调节阀气密性故障的另一种强度。
- 5) 处理数据, 利用 MATLAB 工具将数据导入希尔伯

特一黄变换的算法程序中，加入经过 EMD 经验模态分解，选出与阀位响应信号系数最相近的 6 阶模态用于作出模态能量图的展示。

4 实体阀实验分析

为了验证该方法在实体阀工作中监测性能的有效性，对控制阀设置了不同的阀位信号和故障强度，模拟了不同强度的气室漏气故障。所用随机阀位设定信号均满足频率和时间如下， $f \in (0, 0.22 \text{ Hz}), t \in (0, 400 \text{ s})$ 。此次所用设定正弦信号为： $y = 50 + 10 * \sin(2 * \pi * 0.02 * t)$

4.1 EMD 分解故障检测

4.1.1 正弦信号测试

故障程度：小型手阀松 6 圈，故障发生时刻：205 秒，如图 19~20 所示。

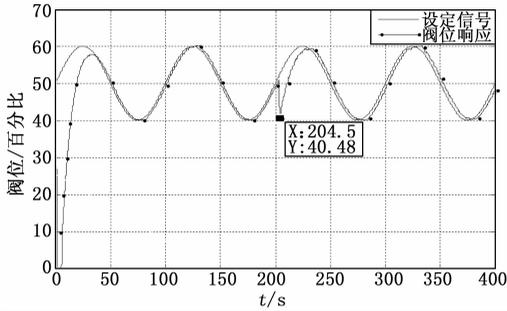


图 19 阀位响应曲线

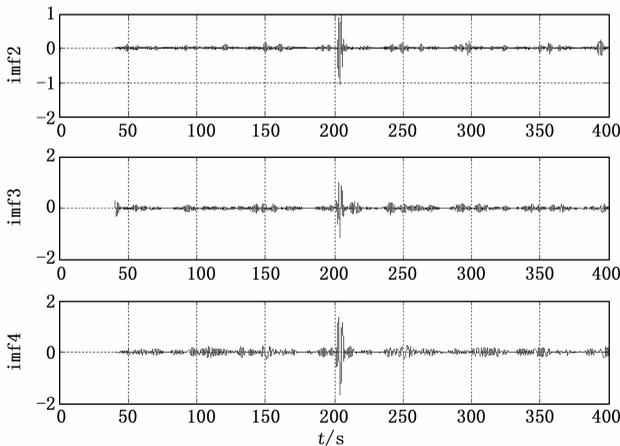


图 20 EMD 分解结果

4.1.2 随机信号测试

故障强度：小型手阀松 4 圈，故障发生时刻：230 秒，如图 21~22 所示。

以上几组实验，在不同强度漏气故障下，利用 EMD 对阀位响应信号进行分解，有效的检测出了阀位异常点即获得了漏气故障发生所对应的时刻，与我们的理论分析一致。实验采用工业生产中正弦信号以及测试用的随机信号来模拟控制阀在线实际工况，结果表明 EMD 分解都可较准确的监测出故障。验证了 EMD 方法的自适应强的效果，即可较好的分析非稳态信号，为实际应用中控制阀故障诊

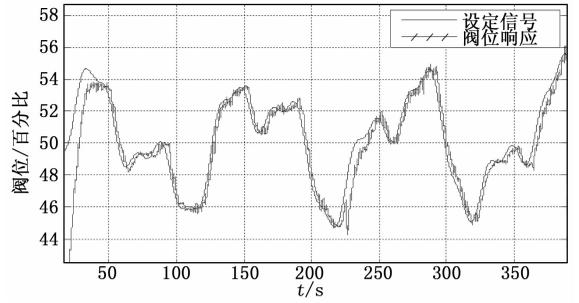


图 21 阀位响应曲线

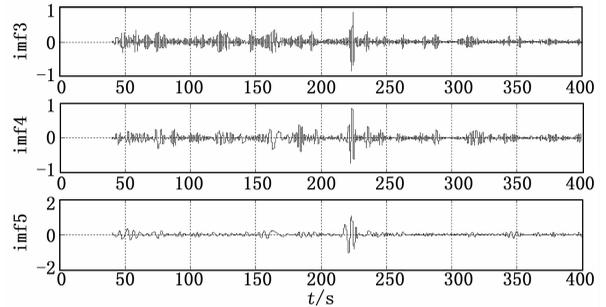


图 22 EMD 分解结果

断提供了可靠的理论和实验依据，为以后的工业应用打好了基础。

4.2 Hilbert 变换故障诊断

4.2.1 正弦信号诊断

(1) 故障类型：无（正常状态）

故障强度：0，如图 23~24 所示。

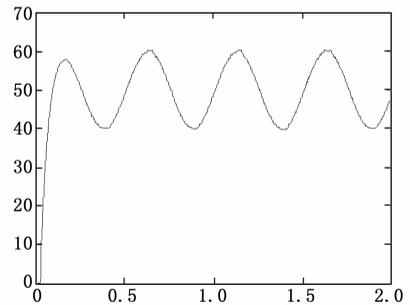


图 23 正弦阀位输出信号

(2) 故障类型：气室漏气

故障强度：小型手阀开度两圈（微弱），如图 25 所示。

(3) 故障类型：气室漏气

故障强度：小型手阀开度四圈（较弱），如图 26 所示。

此设定信号的气室漏气故障阀位模态一、二能量占比之和与故障强度的趋势图如图 27 所示。

4.2.2 随机信号诊断

(1) 故障类型：无（正常状态）

故障强度：0，如图 28~29 所示。

(2) 故障类型：气室漏气

故障强度：小型手阀开度两圈（微弱），如图 30 所示。

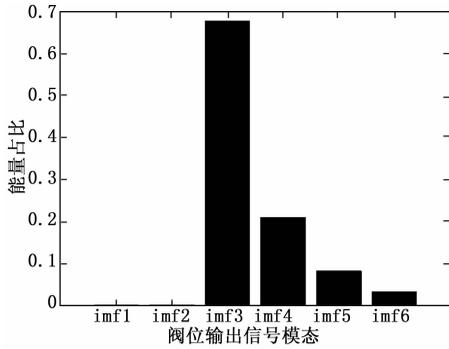


图 24 正弦信号正常状态阀位模式

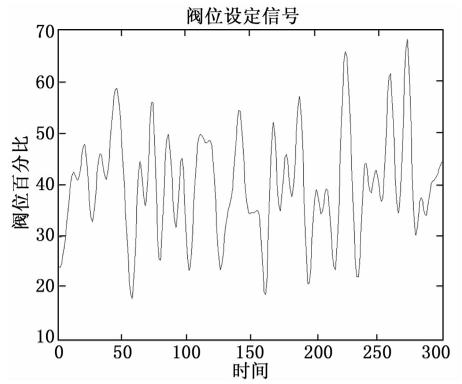


图 28 随机信号

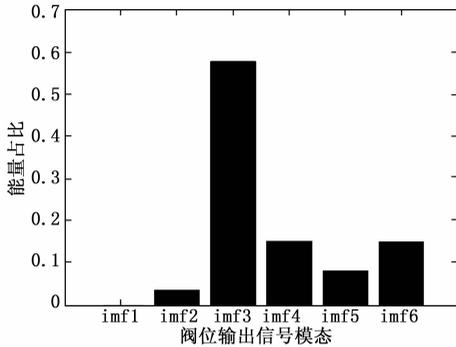


图 25 气室漏气故障微弱状态阀位模式

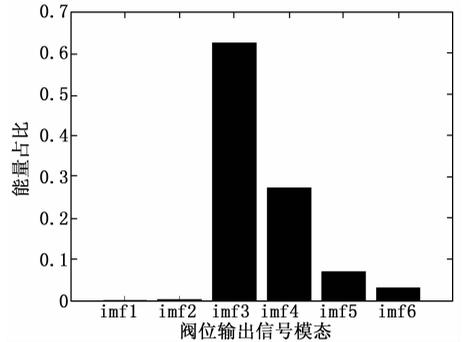


图 29 随机信号正常状态阀位模式

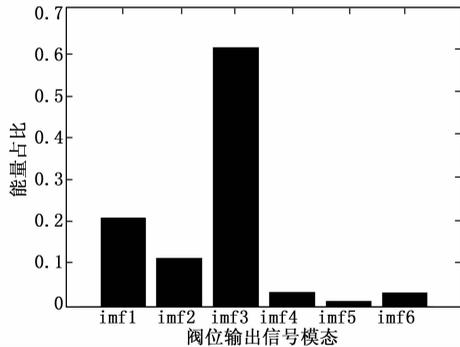


图 26 气室漏气故障较弱状态阀位模式

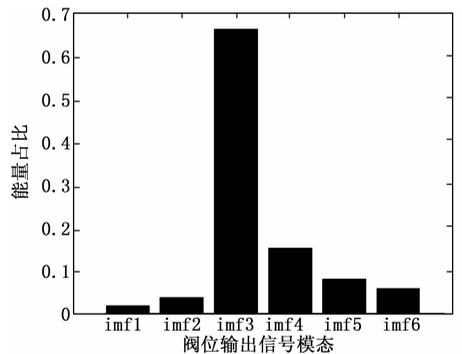


图 30 气室漏气故障弱状态阀位模式

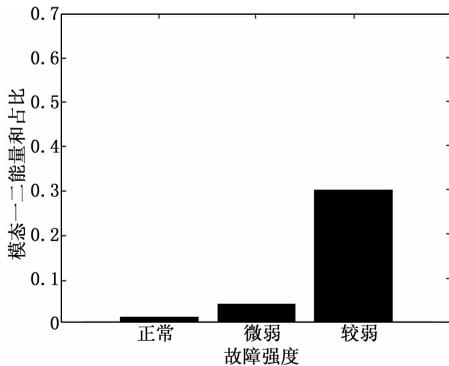


图 27 模式一、二能量和占比与故障强度的趋势图

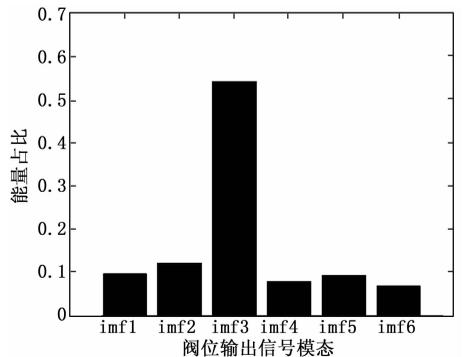


图 31 气室漏气故障较弱状态阀位模式

(3) 故障类型: 气室漏气
故障强度: 小型手阀开度四圈 (较弱), 如图 31 所示。

此设定信号的气室漏气故障阀位模式一、二能量占比之和与故障强度的趋势图如图 32 所示。

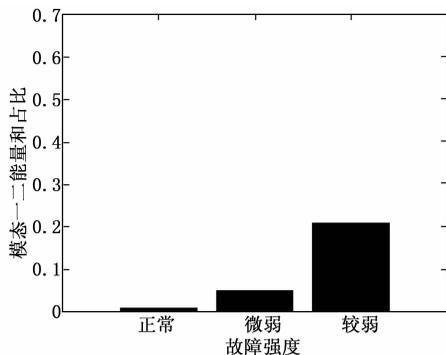


图 32 模态一、二能量和占比与故障强度的趋势图

4.3 实验结果分析

利用 MATLAB/Simulink 故障仿真模型的仿真分析和实验室气动薄膜单座直通阀的实验结果, 可得出:

1) 在气动控制阀正常运行状态下, 利用 HHT 方法对阀位响应信号做 EMD 模态分解、Hilbert 变换同时做出低阶模态能量占比图, 据此可看出控制阀阀杆正常运作时阀位响应信号低阶模态的能量占比较小, 而当控制阀出现漏气等气密性问题时, 低阶模态特征频带信号的能量占比会随之增大。

2) 研究主要针对的是控制阀气密性故障属于微弱强度的状态, 属控制阀故障诊断分类的早期故障诊断方式。观察不同阀位设定信号模态低阶能量和占比与故障强度的趋势图, 发现当气动控制阀气密性故障强度越大, 即漏气越严重时低阶模态的能量占比和会变得越来越来大。

3) 仿真和实验结果复现验证了前文的理论分析; 即: 气动薄膜单座调节阀的气密性故障对于薄膜气室的造成的气压瞬间波动从而对阀杆造成巨大的振动冲击, 最终引起控制阀阀位响应信号高频部分的振动加剧, 低阶模态的特征频带信号能量便会相应的增多。

5 结论

本文基于希尔伯特黄变换进行了薄膜气动控制阀气密性故障的诊断研究, 该方法通过对阀位相应信号进行分析, 研究了各阶模态及其能量占比特性, 使气动控制阀气密性

故障诊断变得简洁易行, 而且完整的实现了故障的在线的检测、诊断和强度识别。此方法的有效性通过模型仿真和实体阀实验得到了检验, 可以把此方法推广到气动执行器其他故障的诊断上。

参考文献:

- [1] 傅晓云, 杜经民, 李宝仁. 气密自动检测装置的研究 [J]. 液压与气动, 2005, 5: 35-37
- [2] 邓传福. 120-1 型货车空气控制阀主阀体组成气密性检测 [J]. 铁道机车车辆工人, 2007, 8: 1-4.
- [3] 王勇, 马凯. 气密性检测技术在发动机生产过程中的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2009, (7): 4-10.
- [4] Mohamed K, Arashivoiu M. Real gas simulation of hydrogen release from a high pressure chamber [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30: 903-912.
- [5] Huang N E, Shem Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Proc. R. Soc. Lond, 1998, A: 903-995.
- [6] Huang N E, Attoh-OKINE N O. Hilbert-Huang transform in engineering [M]. Singapore: World Scientific, 2005: 125-148.
- [7] Wu Z, Huang N E. Statistical significant test of intrinsic mode functions; in Hilbert-Huang transform: introduction and applications [M]. Singapore: World Scientific, 2005: 125-148.
- [8] 翟良强. 鼠笼式异步电机状态监测及故障诊断方法的研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2012.
- [9] 王树梁. 基于 HHT 的提升机天轮轴承故障诊断方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [10] 段华琼, 唐宾徽. 基于线性多尺度模型的计算机网络数据流量预测 [J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 3: 322-327.
- [11] 董良. 汽油发动机振动测试与隔振优化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [12] 魏巍, 彭涛. 基于 EMD 模态能量分析的滚动轴承故障特征提取 [J]. 湖南工业大学学报, 2012, 3: 58-62.
- [13] 刘玉东. 基于 SVM 的气动控制阀故障诊断 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.

(上接第 4 页)

参考文献:

- [1] 李文霁, 曾鸿, 任光杰, 等. 卫星并行测试中测控前端通用化设计 [J]. 航天器工程, 24 (6): 129-133.
- [2] 吴国强. 编队小卫星星间通信系统设计方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 2-3.
- [3] 程城, 仇梦宇. 面向批产化的小卫星自动化测试系统设计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 5-8.
- [4] 冯志强, 何涛, 封家鹏. 卫星测控系统多通道地面测试平台设计 [J]. 飞行器测控学报, 36 (4): 1-6.
- [5] 杨杰峰, 刘洋. 量子科学实验卫星通用化可配置地面测试平

- [6] 刘洋, 李家琦, 李宗德. 基于数据格式库的卫星通用测试软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2680-2683.
- [7] 赵瑞峰, 董房, 陆洋, 等. 卫星通用自动化测试系统体系结构研究 [J]. 信息技术, 2011 (4): 65-68.
- [8] 李腾, 王礼亮, 杨勇, 等. 卫星导航终端批量测试系统设计 [J]. 导航定位学报, 4 (2): 75-80.
- [9] 王建军, 陈逢田, 李培华. 卫星星座综合测试系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 7-13.
- [10] 肖川, 李立. 多星并行测试技术在环境减灾-1A、1B 卫星测试中的应用研究 [J]. 航天器工程, 18 (6): 110-117.