

# 机载方波供电压力传感器相移特性可靠校准方法\*

马靖杰<sup>1</sup> 姚贞建<sup>1</sup> 赵宇星<sup>1</sup> 史博<sup>2</sup>

(1. 武汉工程大学电气信息学院 武汉 430205; 2. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100095)

**摘要:**为解决方波信号在方波供电压力传感器相移特性校准中的干扰,提出一种基于正弦激励的机载方波供电压力传感器相移特性可靠校准方法。基于希尔伯特变换算法,辨识方波供电压力传感器校准输出信号的正弦响应信号,针对正弦响应信号的非平稳偏移问题,采用鲁棒局部均值分解和模糊熵指标,实现正弦响应信号偏移趋势消除,并根据对消除偏移趋势的正弦响应信号进行正弦拟合,估计方波供电压力传感器初始相位,结合参考压力传感器初始相位,实现机载方波供电压力传感器相移特性可靠校准。分别通过仿真实验和正弦校准实验验证该方法对于方波供电压力传感器相移特性校准的性能。仿真实验结果表明,该方法在不同频率的正弦压力激励条件下相移特性校准相对误差均值为0.594%,优于经验模态分解、极值包络法等传统方法,其相对误差均值分别为24.543%和1.553%。正弦校准实验证明了该方法可有效解决校准过程中正弦激励信号、方波供电信号和干扰噪声的耦合问题,实现了机载方波供电压力传感器相移特性可靠校准。

**关键词:** 压力传感器; 相移特性; 校准; 包络提取; 正弦拟合

**中图分类号:** TH701; TN98

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 460.40

## Reliable calibration method for phase shift characteristic of airborne square-wave powered pressure sensor

Ma Jingjie<sup>1</sup> Yao Zhenjian<sup>1</sup> Zhao Yuxing<sup>1</sup> Shi Bo<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China)

**Abstract:** To solve the interference of square-wave signals in the phase-shift characteristic calibration of square-wave powered pressure sensors, a reliable calibration method for the phase-shift characteristics of airborne square-wave powered pressure sensors based on sinusoidal excitation is proposed. With the Hilbert transform envelope extraction algorithm, the sinusoidal response signal is identified first from the output of the pressure sensor. Then, the zero offset of the sinusoidal response signal is eliminated by combining robust local mean decomposition algorithm and fuzzy entropy index. Finally, the initial phase of the pressure sensor is estimated based on the four-parameter sinusoidal fitting algorithm, and the phase shift characteristic is calibrated according to the initial phase of the reference pressure sensor. The calibration performance of the proposed method is evaluated by simulation and sinusoidal pressure calibration experiments. The simulation results show that the average relative error of the phase shift characteristic obtained by the proposed method under sinusoidal pressure excitation of different frequencies is about 0.594%, which is less than that obtained by traditional methods such as empirical mode decomposition (24.543%), and extremum envelope method (1.553%). The calibration experiments prove that this method can effectively solve the coupled problem of modal interference caused by sinusoidal excitation signal and square-wave powered signal, leading to inaccurate extraction of sinusoidal responses signal, and achieves reliable calibration of phase shift characteristic of airborne square-wave powered pressure sensors.

**Keywords:** pressure sensor; phase shift characteristic; calibration; envelope extraction; sinusoidal fitting

## 0 引言

动态压力是航空航天领域需要测量和控制的关键参数,压力传感器作为测量动态压力的核心器件,其动态特性的可靠校准是实现动态压力准确测量的前提<sup>[1]</sup>。相移特性是表征压力传感器在实际测量中响应滞后问题的关键参数,通常基于标准正弦压力发生装置和参考压力传感器,采用比较法对其进行可靠校准<sup>[2-3]</sup>。方波供电压力传感器相较于直流或交流供电的压力传感器,其有效的减少能量损耗并提高系统的响应速度,降低电磁干扰对传感器信号的影响。同时由于方波驱动电路结构简单、可靠性高,可通过占空比优化可实现功耗与动态响应的最佳平衡,因此常应用于工作频率为 0.1~5 Hz 的航空起落架液压系统监测和 5~30 Hz 的航空发动机燃油压力测量等典型工况<sup>[4]</sup>。然而,在方波供电压力传感器校准过程中,由于方波供电信号、正弦激励信号和干扰噪声不可避免存在耦合问题,导致相移特性校准结果不准确。因此,如何实现正弦激励下方波供电压力传感器校准信号的多模态解耦,是提高其相移特性校准精度的关键,也是提高航空飞机动态压力测量的基础<sup>[5]</sup>。

近年来,对于基于正弦激励的压力传感器相移特性校准研究已取得系列进展。常用的相移估计方法可分为信号分解法和包络法<sup>[6-7]</sup>。信号分解法首先将压力传感器校准输出信号分解为一系列不同时频特征的模态分量,然后通过构建模态聚类指标,提取正弦相关分量并对其进行正弦拟合,实现压力传感器相移特性校准<sup>[8]</sup>。常用的信号分解算法主要有小波分解、变分模态分解、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、局部均值分解等<sup>[9-13]</sup>。小波分解和变分模态分解需要根据压力传感器输出信号分别预先设定合适的小波基函数、分解层数等参数,无法实现压力传感器相移特性自适应校准。EMD 和局部均值分解可实现压力传感器输出信号的自适应分解,但由于经常存在模态混叠<sup>[14]</sup>,输出信号中正弦相关分量的提取结果易出现畸变问题,影响了压力传感器相移特性的校准可靠性。

包络法通过提取压力传感器输出信号包络,对包络信号进行正弦拟合,实现相移特性估计。常用包络法主要包括极值包络法和希尔伯特变换<sup>[15]</sup>。极值包络法根据压力传感器输出信号的极值提取其包络,计算过程简单,但当压力传感器输出信号受噪声干扰出现幅值突变问题时,无法实现包络的有效提取。希尔伯特变换根据压力传感器输出信号的时频特征提取包络信号,可避免噪声干扰导致信号幅值突变的影响,广泛应用于非平稳信号的包络提取。包络法在一定程度上可以减小方波供电和噪声对压力传感器相移特性校准结果的耦合影响,

可有效提升校准输出信号相位估计精度。然而,在基于正弦激励的方波供电压力传感器校准实验中,由于正弦压力的不稳定问题,传感器输出信号包络存在零点漂移,导致直接采用正弦拟合算法建立包络信号的正弦函数模型存在偏差,限制了方波供电压力传感器相移特性校准可靠性的提升。

为了减小方波供电信号、正弦压力响应信号和噪声信号的耦合问题对压力传感器校准的影响,本文提出了一种方波供电压力传感器相移特性可靠校准方法。该方法结合希尔伯特变换,求取校准输出信号包络,并根据鲁棒局部均值分解,实现正弦响应辨识,可有效减小方波电信号和非平稳偏移趋势的影响。采用四参数正弦拟合法建立正弦响应信号拟合模型,实现方波供电压力传感器相移特性的可靠校准。

## 1 压力传感器相移特性校准原理

压力传感器通常可用单输入单输出的线性时不变系统进行表征,用高阶常系数线性微分方程<sup>[16]</sup>表示为:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \dots + b_0 x(t) \quad (1)$$

式中:  $x(t)$  和  $y(t)$  分别为压力传感器输入输出信号;  $t$  为时间;  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  和  $b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$  为模型参数。

当压力传感器用二阶系统表示时,其数学模型为:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (2)$$

由式(2)可知,当采用正弦压力激励对压力传感器进行动态校准,在不考虑传感器的响应滞后时,其输出信号与输入信号具有相同的频率和相位<sup>[17]</sup>,即:

$$y(t) = Kx(t) = KAsin\omega t \quad (3)$$

式中:  $x(t) = Asin\omega t$  为正弦压力信号,  $A$  为幅值,  $\omega$  为数字角频率,  $t$  为时间,  $K$  为压力传感器灵敏度。

然而,在受到正弦压力激励时,压力传感器的输出信号存在响应滞后问题,此时输出信号表示为:

$$y(t) = KAsin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

式中:  $\varphi$  为相位。

在压力传感器校准中,根据标准压力传感器 A 与被校准压力传感器 B 的输出信号,通过正弦拟合得到不同频率激励下的相位分别为  $\theta_{Aij}$  与  $\theta_{Bij}$ , 其中  $i$  对应于激励频率为  $f_i$ ,  $j$  为同一激励频率下的重复校准次数。

则压力传感器相移特性随激励频率  $f_i$  变化的估计结果为:

$$\phi(f_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\theta_{Bij} - \theta_{Aij}) \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中:  $n$  为校准频率组数;  $m$  为重复校准次数。

## 2 方波供电压力传感器相移特性校准方法

在基于正弦激励的方波供电压力传感器校准过程中,其输出信号为方波信号、正弦信号和噪声的混合信号,方波和噪声的耦合干扰导致压力传感器输出信号出现多模态混叠问题,降低了压力传感器相移特性的校准可靠性。为了解决上述问题,本文提出了一种方波供电压力传感器相移特性可靠校准方法,主要包括正弦响应信号辨识、非平稳偏移趋势消除和相移特性估计3个步骤。

### 2.1 压力传感器正弦响应信号辨识

由于方波供电条件下的压力传感器输出信号本质上是由多个谐波分量组成的调制信号,其有效信息主要包含在信号的包络特征中。传统的时域分析方法难以有效提取其非线性调制特征,而频域分析则存在分辨率受限问题。基于此,本文采用希尔伯特变换的解析信号构造方法,通过构建原始信号的解析表示,可以精确提取信号的瞬时幅值信息,从而实现压力传感器正弦响应信号的准确辨识。对于压力传感器校准输出信号  $y(t)$ , 其希尔伯特变换定义<sup>[18]</sup>为:

$$\hat{y}(t) = y(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

式中:  $\hat{y}(t)$  为  $y(t)$  经希尔伯特变换的信号;  $\tau$  为时间常数; “\*” 为卷积算子。

因此经希尔伯特变换后  $y(t)$  的解析信号为:

$$g(t) = y(t) + j\hat{y}(t) \quad (7)$$

$g(t)$  的幅值即为  $y(t)$  的包络,即压力传感器正弦响应信号,表示为:

$$y_c(t) = \sqrt{[y(t)]^2 + [\hat{y}(t)]^2} \quad (8)$$

### 2.2 正弦响应信号非平稳偏移趋势消除

由于压力传感器输出信号幅值不稳定且受噪声干扰,希尔伯特变换包络提取算法得到的正弦响应信号中存在非平稳偏移趋势,会增大正弦响应信号拟合误差,进而降低压力传感器相移特性校准可靠性<sup>[19]</sup>。因此,引入正弦响应信号自适应分解方法,消除正弦响应信号的非平稳偏移趋势,步骤如下。

步骤1) 采用鲁棒局部均值分解 (robust local mean decomposition, RLMD) 对正弦响应信号  $y_c(t)$  进行自适应分解<sup>[20-21]</sup>, 得到  $m$  个乘积函数 (product function, PF) 分量和1个残余分量 (Res) 之和, 即:

$$y_c(t) = \sum_{p=1}^m PF_p(t) + Res \quad (9)$$

步骤2) 不同 PF 分两种含有原始信号的特征信息不

同,为准确提取  $y_c(t)$  的非平稳偏移趋势,引入模糊熵指标计算各分量的复杂度,通过对分量信号复杂程度进行量化,实现 PF 分量的有效筛选<sup>[22]</sup>。对各 PF 分量分别进行相空间重构得到时间序列  $y_c$  为:

$$y_c(i) = [PF_p(i), PF_p(i+1), \dots, PF_p(i+q-1)] - \frac{1}{q} \sum_{j=0}^{q-1} PF_p(i+j) \quad (10)$$

式中:  $q$  为嵌入维度。

计算每个 PF 及其相空间重构序列  $y_c$  的距离:

$$d_p = \max | [PF_p(i+k) - y_c(i)] - [PF_p(j+k) - y_c(j)] | \quad (11)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, N - m + 1; j = 1, 2, \dots, N - m + 1; k = 0, 1, \dots, q - 1$ 。

引入模糊隶属函数,定义两个时间序列间相似度:

$$D_p = e^{-d_p^2/r} \quad (12)$$

式中:  $r = 0.2 \text{std}[PF_p(i)]$  为相似容限度<sup>[23]</sup>,  $\text{std}[\cdot]$  为标准差算子。

则每个乘积函数的模糊熵可表示为:

$$A_p(q, r) = \lim_{K \rightarrow \infty} [\ln \psi^q(r) - \ln \psi^{q+1}(r)] \quad (13)$$

式中:  $\psi^q(r) = \frac{1}{K - q + 1} \sum_{i=1}^{K-q+1} \left( \frac{1}{K - q_j - 1} \sum_{j \neq i} D_p \right)$ 。

步骤3) 计算各个 PF 分量的模糊熵值为  $A_p(m)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $M$  为 PF 分量的个数。设置模糊熵阈值  $r_{limit}$ , 即当  $A_p(m) < r_{limit}$  时,表明该 PF 分量可识别为非平稳偏移趋势,予以消除<sup>[24]</sup>;对剩余的 PF 分量进行求和重构,即可得消除偏移趋势的正弦响应信号,记为  $\hat{y}_c(t)$ 。

### 2.3 基于四参数正弦拟合的相移特性估计

采用四参数正弦拟合算法对正弦响应信号  $\hat{y}_c(t)$  进行拟合得到压力传感器的相移特性<sup>[25]</sup>。正弦拟合函数定义为:

$$\hat{y}_c(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_0) + c = a \sin(2\pi ft + \varphi_0) + b \cos(2\pi ft + \varphi_0) + c \quad (14)$$

式中:  $A$  为幅值;  $\varphi_0$  为初相位;  $f$  为正弦频率。

在区间  $[0, T]$  内,正余弦信号离散化结果表示为:

$$\begin{cases} H_1(n) = \sin(2\pi ft + \varphi_0) \\ H_2(n) = \cos(2\pi ft + \varphi_0) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $n = 1, 2, 3, \dots, N, N = Tf_s$  为区间  $[0, T]$  内信号长度,  $f_s$  为采样频率。

结合式(14)和(15)可建立  $N$  维方程组,并采用最小二乘法求解为:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1(1) & H_1(2) & \dots & H_1(n) \\ H_2(1) & H_2(2) & \dots & H_2(n) \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

压力传感器校准输出信号的初相位可计算为:

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (17)$$

则方波供电压力传感器相移特性校准结果<sup>[26]</sup>为:

$$\zeta = \varphi_0 - \varphi_r \quad (18)$$

式中:  $\varphi_r$  为参考压力传感器初相位。

### 3 校准实验与结果分析

#### 3.1 仿真实验

为验证本文方法对方波供电压力传感器相移特性的校准性能,采用 MATLAB 仿真方波供电压力传感器校准输出信号,由正弦信号、方波信号和附加噪声信号合成得到,如图 1 所示。方波信号幅值为 0.15 V, 占空比为 0.5, 频率为 1 kHz; 正弦信号由函数  $2\sin(2\pi ft + \theta) + 6$  生成, 其初相位  $\theta = 60^\circ$ ; 附加噪声为高斯白噪声, 加入噪声后仿真信号的信噪比为 25 dB。需要说明的是采用高斯白噪声模拟校准信号附加噪声的原因是, 方波供电压力传感器校准实验采用国家标准正弦压力发生装置, 在实验室环境下开展, 其附加噪声主要来源于装置的微小振动和正弦压力产生过程引入的随机干扰。信号采样频率为 10 kHz。

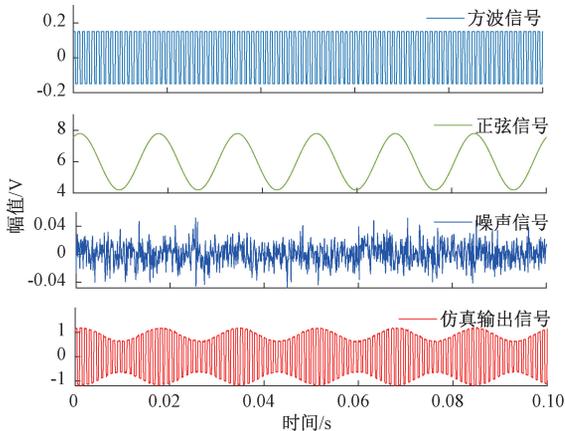


图 1 仿真输出信号

Fig. 1 The simulated output signal

为减小方波供电对相移特性校准的影响, 首先对仿真输出信号进行希尔伯特变换, 得到其上包络和下包络。为了方便叙述, 后续处理过程仅展示上包络提取结果, 即压力传感器正弦响应信号, 如图 2 所示。

为了消除正弦响应信号的非平稳偏移趋势, 采用 RLMD 对正弦响应信号进行自适应分解, 得到 6 个 PF 分量和 1 个 Res, 如图 3 所示。可以看出, PF5、PF6、PF7、PF8 和 Res 分量的模糊熵分别为 0.002 4、0.001 3、0.000 5、0.001 3 和 0.000 1, 均小于 0.01, 且明显小于前

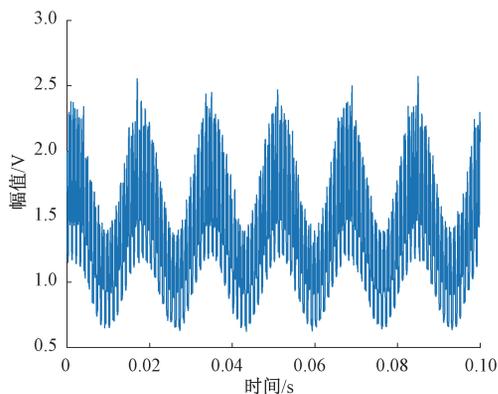


图 2 正弦响应信号

Fig. 2 Sinusoidal response signal

4 个 PF 分量的模糊熵, 因此将 PF5、PF6、PF7、PF8 和 Res 分量之和认定为非平稳偏移趋势, 予以剔除。对其余 4 个 PF 分量进行求和, 得到消除非平稳偏移趋势的正弦响应信号, 如图 3 所示。

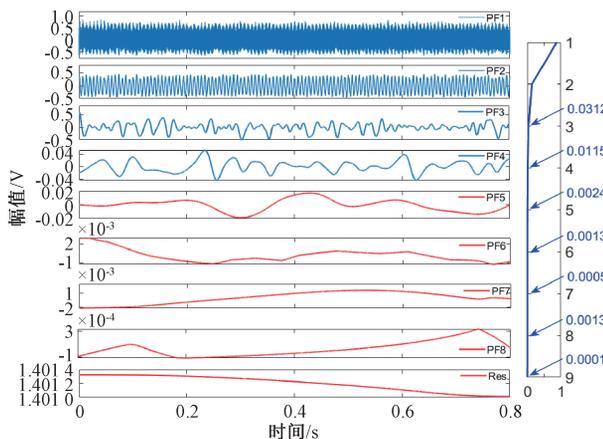


图 3 RLMD 结果及其模糊熵

Fig. 3 RLMD results and the fuzzy entropy

对去除非平稳偏移趋势的正弦响应信号, 使用四参数正弦拟合法进行建模, 拟合结果如图 4 所示。估计模型参数并提取拟合后模型中的相移取值为  $60.275^\circ$ , 因此得到仿真的方波供电压力传感器相移特性校准结果的相对误差为 0.46%。

为进一步证明本文方法对于方波供电压力传感器相移特性校准的优越性和鲁棒性, 分别采用 EMD、极值包络法和本文方法对不同信噪比、不同频率正弦激励条件下进行相移特性校准, 其中正弦频率分别为 5、10、20、30、60、80、100 和 120 Hz; 仿真信号信噪比从 10 dB 增加到 35 dB, 步长为 5 dB, 3 种方法相移估计相对误差如图 5 所示。从图 5(a) 可以看出, 当正弦频率小于 20 Hz 或大于 80 Hz 时, EMD 方法的相移特性估计相对误差明显大于

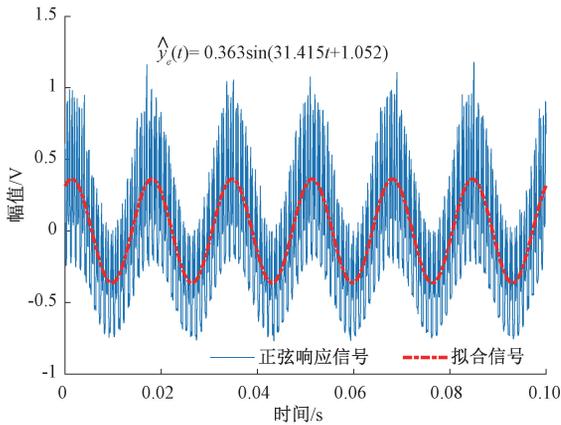


图 4 消除非平稳偏移趋势的正弦响应信号及拟合结果  
Fig. 4 The sinusoidal response signal without zero offset and the fitting result

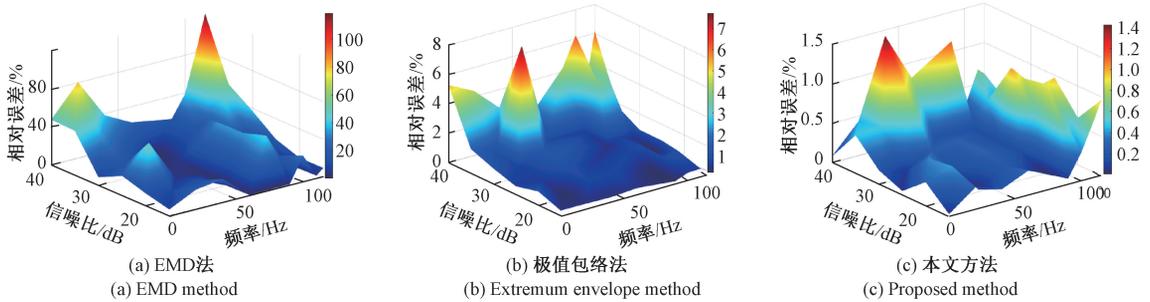


图 5 相移校准相对误差  
Fig. 5 Relative error of the phase-shift calibration results

0.594%, 明显优于 EMD 和极值包络法, 其校准平均相对误差分别为 24.543% 和 1.553%。

### 3.2 方波供电压力传感器相移特性校准实验

采用标准正弦压力发生装置对某型号方波供电压力传感器进行动态校准, 该装置由北京长城计量测试技术研究所构建, 如图 6(a) 所示, 主要由正弦压力发生器、压力调节系统、频率调节系统、信号调理器、数据采集系统、参考压力传感器和被校准压力传感器组成。通过压力调节系统调节气源输入, 控制正弦压力发生器主机气体压力; 频率调节系统控制正弦压力发生器主机转盘转速, 在正弦压力发生器腔体内产生不同频率正弦压力。参考压力传感器和被校准方波供电压力传感器对称安装在正弦压力发生器两侧, 受相同正弦压力激励。两个压力传感器的输出端连接经信号调理器和数据采集系统, 得到输出信号, 采样频率为 10 kHz, 校准系统结构如图 6(b) 所示。

其中, 正弦压力发生器产生的正弦压力频率分别为 5、10、20、30、60、80、100 和 120 Hz, 得到被校准方波供电压力传感器输出信号如图 7 所示。

分别采用 EMD、极值包络法和本文方法对压力传感

其他频率条件下的估计结果。其原因是压力传感器输出信号分解易出现模态混叠问题, 尤其当正弦频率较低或者较高时, 解调困难的问题更为严重, 并且在正弦相关模态分量选取时存在不确定性, 此时难以从压力传感器输出信号准确提取正弦响应分量, 导致相移特性校准误差增大。

由图 5(b) 和 (c) 可知, 基于信号包络的相移特性校准方法的精度显著优于信号分解方法。其中极值包络法在信号信噪比低于 20 dB 时, 压力传感器相移特性校准相对误差较大, 说明该方法受噪声干扰大, 无法实现强噪声干扰下的相移特性可靠校准。本文方法基于希尔伯特变换包络提取辨识压力传感器正弦响应信号, 并结合 RLMD 消除正弦响应信号的非平稳偏移趋势, 通过正弦拟合实现了相移特性的高精度估计, 平均相对误差为

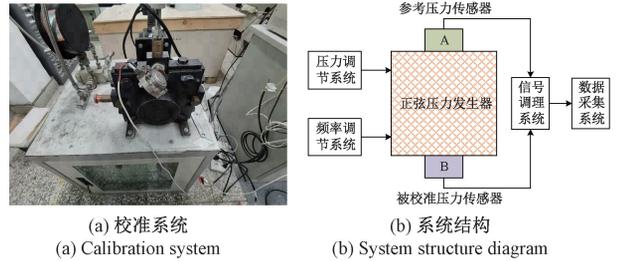


图 6 实验装置  
Fig. 6 The experimental device

器相移特性进行估计, 采用四参数正弦拟合方法对参考压力传感器输出信号进行拟合, 得到标准正弦信号作为参考, 各频率条件下的校准结果如图 8 所示。

从图 8 可以看到, EMD 无法准确从压力传感器输出信号中提取正弦分量, 其原因在于信号分解方法在辨识正弦分量、方波分量和噪声分量时, 单个模态分量中含有不同时间尺度的信号或相同时间尺度的信号出现在不同的模态分量中, 导致正弦分量提取结果出现混叠问题, 进而降低了正弦拟合精度。以 60 Hz 正弦压力激励下方波供电压力传感器输出信号的 EMD 结果分解得到两个相

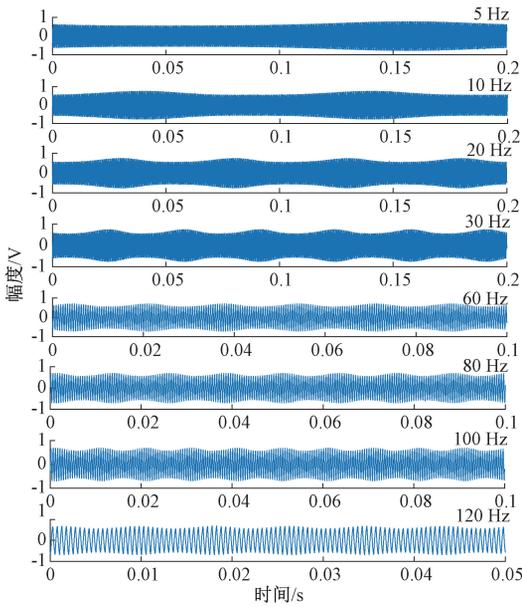


图 7 压力传感器输出信号

Fig. 7 Output signal of the pressure sensor

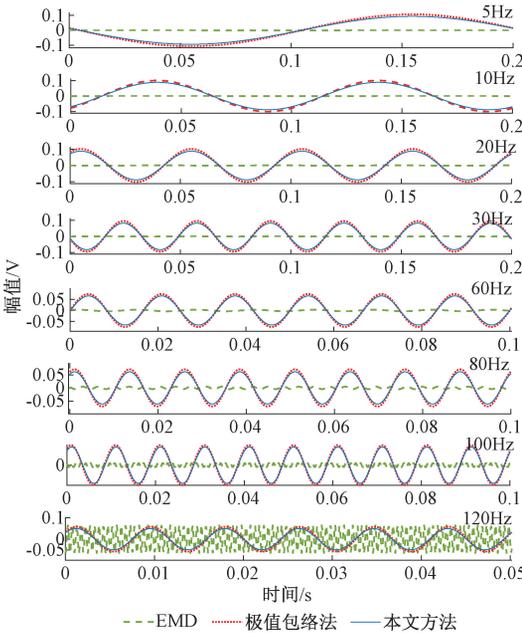


图 8 相移校准结果对比

Fig. 8 Comparison of calibration results of the phase shift

邻分量频谱如图 9 所示。

从图 9 可以看到,两个分量均包含频率为 60 和 85 Hz 的特征信息,且 IMF6 中还包含了频率低于 10 Hz 的低频成分,说明该分解结果存在显著的混叠问题。而基于包络提取的方法有效减小了方波信号和噪声对正弦拟合结果的影响,其正弦拟合结果更可靠。

表 1 为在不同正弦压力激励条件下 3 种方法对 6 次

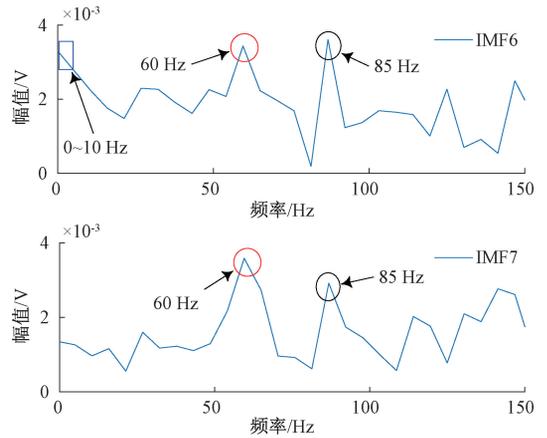


图 9 相邻 IMF 分量频域图

Fig. 9 Frequency spectrums of the adjacent IMFs

重复实验中方波供电电压传感器相移特性校准结果的均值。为了进一步验证本文方法的优越性,3 种方法对于方波供电电压传感器相移特性校准结果的标准差如图 10 所示。其中由于 EMD 方法在不同激励频率条件下校准得到的相移校准结果的标准差均大于 20°,因此在图 10 未给出。此外,本文方法得到的相移特性校准结果标准差均小于 0.02°,尤其在正弦激励频率大于 60 Hz 时,本文方法明显优于其他方法。需要指出的是,当正弦激励频率小于 10 Hz 时,本文方法得到的校准结果标准差稍大于极值包络法。极值包络法通过识别信号中的局部极值构建包络信号,随着正弦激励频率的增加,提取的包络信号会出现失真,导致校准结果产生较大偏差。而当正弦频率与方波供电频率相差很大时,正弦分量的包络受方波供电信号影响很小,采用极值包络法可准确提取正弦包络,而此时本文方法由于引入了信号分解过程,导致多次重复实验校准结果有所偏差。

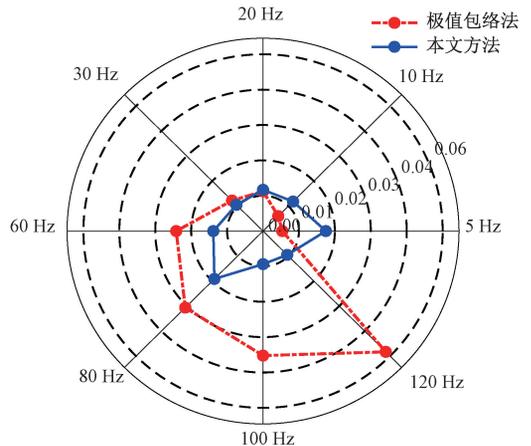


图 10 重复实验相移校准结果标准差  
Fig. 10 Phase-shift standard deviation of the repeated experiments

表 1 重复实验中相移校准结果的均值

Table 1 Mean of the phase shift calibration results in the repeated experiments

正弦激励频率/Hz	参考相位/(°)	EMD 方法		极值包络法		本文方法	
		相位/(°)	相移校准结果/(°)	相位/(°)	相移校准结果/(°)	相位/(°)	相移校准结果/(°)
5	139.956	62.957	-76.999	139.693	-0.263	139.739	-0.217
10	-168.329	-273.238	-104.909	-168.725	-0.396	-168.599	-0.270
20	142.409	275.879	133.470	141.423	-0.986	141.813	-0.596
30	56.809	-65.189	-121.998	54.821	1.988	56.505	-0.304
60	-23.004	34.097	57.101	-21.177	1.827	-22.787	0.217
80	-44.610	-162.382	-117.772	-48.472	-3.862	-44.009	0.601
100	53.216	-102.519	-155.735	49.177	-4.039	51.509	-1.707
120	38.526	103.528	65.002	33.106	-5.420	38.583	0.057

## 4 结 论

针对机载方波供电压力传感器相移校准受方波供电和噪声感染导致校准结果不可靠问题,提出了一种基于校准信号包络正弦拟合的相移特性高精度校准方法,通过仿真实验和实际校准实验验证了该方法的有效性和优越性,得到如下结论。

1) 采用希尔伯特变换包络提取辨识压力传感器正弦响应信号,有效减小了方波供电对压力传感器相移特性估计结果的影响。通过结合鲁棒局部均值分解和模糊熵模态聚类指标,消除了正弦响应信号非平稳偏移趋势干扰,提高了方波供电压力传感器相移特性校准可靠性。

2) 仿真实验验证了本文方法对于方波供电压力传感器相移特性校准的可靠性和优越性,结果表明本文方法在不同频率的正弦压力激励条件下相移特性校准平均相对误差为 0.594%,明显小于其他传统方法,如经验模态分解法和极值包络法的相移特性校准平均相对误差分别为 24.543% 和 1.553%。

3) 通过方波供电压力传感器相移特性校准实验得到,本文方法可有效避免传统信号分解方法的模态混叠问题,在 5、10、20、30、60、80、100 和 120 Hz 的正弦压力激励下 6 次重复校准实验得到相移特性校准结果的标准差小于 0.02°,验证了本文方法的优越性和鲁棒性。

## 参考文献

[ 1 ] 张龙赐,周国方,蓝镇立. 钛合金纳米薄膜压力传感器非线性及灵敏度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 153-159.  
ZHANG L C, ZHOU G F, LAN ZH L. Study for the nonlinearity and sensitivity of the titanium alloy nano film pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 153-159.

[ 2 ] 姚贞建,王中宇,王辰辰,等. 压力传感器动态特性参数不确定度评定[J]. 北京航空航天大学学报,

2018, 44(8): 1672-1681.

YAO ZH J, WANG ZH Y, WANG CH CH, et al. Uncertainty evaluation for dynamic characteristic parameters of pressure sensors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1672-1681.

[ 3 ] 黄汝金,索春光,张文斌,等. 基于阻抗变换的非接触电压测量自校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 137-145.

HUANG R J, SUO CH G, ZHANG W B, et al. A self-calibration method of non-contact voltage measurement based on impedance transformation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 137-145.

[ 4 ] 蔡菁. 航空发动机喘振测量系统动态校准研究[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 167-171.

CAI J. Research on dynamic calibration of aero-engine surge measurement system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 167-171.

[ 5 ] 高丽敏,姜衡,葛宁,等. 正弦波型高频动态压力光学校准系统及其应用[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123667.

GAO L M, JIANG H, GE N, et al. A high frequency dynamic pressure optical calibration system based on sinusoidal wave and its application [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 123667.

[ 6 ] 何怡. 心音信号的 U-net 分割算法与分类研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

HE Y. Research on U-net segmentation algorithm and classification of heart sound signal [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[ 7 ] 张军,潘泽鑫,郑玉新,等. 振动信号趋势项提取方法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(1): 22-28.

ZHANG J, PAN Z X, ZHEN Y X. et al. Research on vibration signal trend extraction [J]. Acta Electronica

- Sinica, 2017, 45(1): 22-28.
- [ 8 ] 谢奥扬. 基于 FPGA 的振动校准数据信号处理系统研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- XIE AO Y. Research on FPGA-based vibration calibration data signal processing system [ D ]. Beijing: Beijing University of Technology, 2024.
- [ 9 ] 陶唐飞, 周文洁, 况佳臣, 等. 融合多小波分解的深度卷积神经网络轴承故障诊断方法[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(5): 31-41.
- TAO T F, ZHOU W J, KUANG J CH, et al. Bearing fault diagnosis method of deep convolutional neural network based on multiwavelet decomposition [ J ]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(05): 31-41.
- [ 10 ] AKHAND R, UPADHYAY S H. A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings [ J ]. Tribology International, 2016, 96: 289-306.
- [ 11 ] 张征, 崔伟成. 基于混合插值与多项式修正的局部特征尺度分解端点效应抑制方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 181-186.
- ZHANG ZH, CUI W CH. Method for restraining the end-effect of local characteristic-scale decomposition based on the mixed interpolation and polynomial correction [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 ( 22 ): 181-186.
- [ 12 ] YAO ZH J, LIU X J, YANG W J, et al. A coarse-to-fine denoising method for dynamic calibration signals of pressure sensor based on adaptive mode decompositions [ J ]. Measurement, 2020, 163, 107935.
- [ 13 ] LI G H, BU W J, YANG W J. Noise reduction method for ship radiated noise signal based on modified uniform phase empirical mode decomposition [ J ]. Measurement, 2024, 227, 114193.
- [ 14 ] 张旭龙, 王维民, 李天晴, 等. 变转速工况下叶尖计时信号趋势项解析及验证[J]. 航空学报, 2023, 44(5): 310-323.
- ZHANG X L, WANG W M, LI T Q, et al. Analysis and verification of trend term for tip timing signal under variable speed condition [ J ]. Act Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(5): 310-323.
- [ 15 ] IHOR J, ROMAN Y, OLEH L, et al. Hilbert transform for covariance analysis of periodically nonstationary random signals with high-frequency modulation [ J ]. ISA Transactions, 2024, 144: 452-481.
- [ 16 ] 丁义凡, 姚贞建, 李永生. 压力传感器幅频特性不确定度评定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 9-17.
- DING Y F, YAO ZH J, LI Y SH. Study on uncertainty evaluation method of pressure sensor amplitude-frequency characteristics [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 30(10): 9-17.
- [ 17 ] 李博, 杨军, 黄楠, 等. 基于激光干涉测量的高频液体正弦压力校准[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 216-222.
- LI B, YANG J, HUANG N, et al. High frequency liquid sinusoidal pressure calibration based on laser interferometry [ J ]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(5): 216-222.
- [ 18 ] 张晓琳, 冯晓媛, 于航, 等. 基于 HHT 的转动惯量测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 38-45.
- ZHANG X L, FENG X Y, YU H, et al. Research on measuring technology of moment of inertia based on HHT [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 38-45.
- [ 19 ] 莫宏毅, 徐振洋, 刘鑫, 等. 基于 SSA-VMD 的爆破振动信号趋势项去除方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(11): 304-312, 330.
- MO H Y, XU ZH Y, LIU X, et al. Trend removal method of blasting vibration signal based on SSA-VMD [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(11): 304-312, 330.
- [ 20 ] 徐轟钊, 许昕, 潘宏侠. 基于 RLMD 与 BAS-BP 的柴油机故障诊断研究 [ J ]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 1-6.
- XU H ZH, XU X, PAN H X. The research of diesel engine fault diagnosis based on RLMD and BAS-BP [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 1-6.
- [ 21 ] LIU Z, JIN Y, ZUO M, et al. Time-frequency representation based on robust local mean decomposition for multicomponent AM-FM signal analysis [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 95: 468-487.
- [ 22 ] 张学军, 万东胜, 孙知信. 基于 LMD 和模糊熵融合 CSP 的脑电信号特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 226-234.
- ZHANG X J, WAN D SH, SUN ZH X. EEG signal feature extraction method based on LMD and FE combined with CSP [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 226-234.
- [ 23 ] CHEN W, WANG Z, XIE H, et al. Characterization of

surface EMG signal based on fuzzy entropy [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 15(2): 266-272.

- [24] 张立国, 李盼, 李梅梅, 等. 基于 ITD 模糊熵和 GG 聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2624-2632.

ZHANG L G, LI P, LI M M, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on ITD fuzzy entropy and GG clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2624-2632.

- [25] 梁志国. 四参数正弦曲线拟合的快速算法[J]. 计量学报, 2024, 45(4): 586-593.

LIANG ZH G. The fast algorithm of sine wave curve-fitting[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(4): 586-593.

- [26] 沈艳林, 周利坤, 李明, 等. 非半周期采样信号相位差估计的相位校正相关法[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 145-150.

SHEN Y L, ZHOU L K, LI M, et al. Phase correction correlation-based phase difference estimation method for non-half period sampled signals [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(4): 145-150.

## 作者简介



马靖杰, 2023 年于武汉工程大学获得学士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生, 主要研究方向为压力传感器动态特性校准  
E-mail: 543287248@qq.com

**Ma Jingjie** received his B. Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Wuhan Institute of Technology. His main research interest includes the calibration of the dynamic characteristics of pressure sensors.



姚贞建(通信作者), 2013 年于燕山大学获得学士学位, 2018 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为武汉工程大学博士生导师, 主要研究方向为动态压力测试计量、超声检测技术与信号处理。

E-mail: yao\_buaa@126.com

**Yao Zhenjian** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2013, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2018. He is currently Ph. D. supervisor at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include dynamic pressure measurement, ultrasonic detection technology and signal processing.