

基于LabVIEW的测振传感器多频混合校准系统的开发

周梦雪, 范思瑾, 杨能, 刘春明, 李澄*

红塔烟草(集团)有限责任公司, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年11月10日; 录用日期: 2025年12月13日; 发布日期: 2025年12月30日

摘要

随着现代工业快速发展, 传感器已成为现代工业测试中不可或缺的重要工具, 被广泛地在航空、航天、汽车、电力、地质勘测等领域。测振传感器作为测量振动量的传感器, 在工业测试以及计量领域得到了广泛的应用。传感器灵敏度是传感器输出电压信号的量值与输入给传感器机械信号量值的比值。在实际测量中, 通过传感器的输出电压信号量值与传感器灵敏度便可以确定输入到传感器的被测机械振动信号量值, 因此传感器灵敏度是衡量传感器性能的重要指标。由于生产过程存在着差异, 每个传感器的灵敏度不可能完全一致, 因此需要对传感器的灵敏度进行校准。传统的测振传感器校准主要是定频校准, 采用正弦信号激励传感器, 每次校准时, 都必须经过频率设置、振级调整和测试三个步骤, 而且只能进行一个频率的校准, 因此, 校准过程相当费时, 对环境的稳定性有较高要求。为了克服现有技术的不足, 我们编写了一套测振传感器多频混合校准系统软件, 能自动对测振传感器进行多频混合校准, 提高了校准效率。

关键词

传感器灵敏度, 多频混合, 校准系统, LabVIEW

Development of a Multi-Frequency Hybrid Calibration System for Vibration Sensors Based on LabVIEW

Mengxue Zhou, Sijin Fan, Neng Yang, Chunming Liu, Cheng Li*

Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Yuxi Yunnan

Received: November 10, 2025; accepted: December 13, 2025; published: December 30, 2025

*通讯作者。

Abstract

With the rapid development of modern industry, sensors have become an indispensable tool in modern industrial testing, widely used in aviation, aerospace, automotive, power, geological exploration, and other fields. Vibration sensors, as sensors for measuring vibration, are widely used in industrial testing and metrology. Sensor sensitivity is the ratio of the sensor's output voltage signal to the mechanical signal input to the sensor. In actual measurement, the magnitude of the mechanical vibration signal input to the sensor can be determined by the sensor's output voltage signal and sensor sensitivity; therefore, sensor sensitivity is an important indicator for evaluating sensor performance. Due to differences in production processes, the sensitivity of each sensor cannot be completely consistent, thus requiring sensor sensitivity calibration. Traditional vibration sensor calibration mainly involves fixed-frequency calibration, using sinusoidal signals to excite the sensor. Each calibration requires three steps: frequency setting, vibration level adjustment, and testing, and only one frequency can be calibrated at a time. Therefore, the calibration process is quite time-consuming and requires high environmental stability. To overcome the shortcomings of existing technologies, we developed a multi-frequency hybrid calibration system software for vibration sensors. This system can automatically perform multi-frequency hybrid calibration of vibration sensors, improving calibration efficiency.

Keywords

Sensor Sensitivity, Multi-Frequency Hybrid, Calibration System, LabVIEW

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着微电子、微细加工技术的应用，以及大功率、大型化、复杂化机器的发展，电涡流传感器在校准过程中的精度和效率要求越来越高。电涡流传感器作为一种涡流式的位移传感器，其动态特性的校准系统和一般振动传感器类似。标准振动台作为校准环节中的关键设备，测控系统作为传感器检测以及振动台各参数调节的控制中枢均发生了很大的变化。我国在测振传感器校准方面的研究较发达国家起步晚，为适应国家的发展需求，我国在 20 世纪 60 年代开始对振动计量标准进行研究，经过几十年的努力，在振动计量领域已达到国际领先水平。2002 年，浙江大学与中国地震局分析预报中心合作研制的“甚低频标准振动测试系统”，实现了在周期 5000 s 下位移失真度小于 1% 的指标，并采用比较法实现从 1 Hz 下沿到周期 5000 s 的甚低频段校准。2008 年，浙江大学与中国计量科学研究院合作研制了“超低频振动国家计量基准装置”，该装置在 0.002~160 Hz 工作频率范围内实现了激光绝对法幅相校准，且全频段加速度失真度小于 1%，位移最大峰峰值达到 1 m [1] [2]。

电涡流传感器作为一种非接触式测振传感器，其动态校准的方式和一般测振传感器类似。现阶段大多数企业采用比较法校准电涡流传感器，通过正弦激励进行校准时，需要对多个频点逐步校准，校准过程相当费时。在电涡流传感器大批量生产和应用时，该方法会影响质检的效率，因此研究如何提高电涡流传感器的校准效率很有必要。

2. 测振传感器多频混合校准系统功能介绍

2.1. 测振传感器多频混合校准软件的主要功能和特点

- (1) 提供了一个测振传感器多频混合校准的平台和工具;
- (2) 通过自动调整振级的方式, 实现了全自动校准, 提高了试验效率;
- (3) 利用 FFT, 快速完成了测振传感器的多频混合校准;
- (4) 能够以 Excel 表格形式保存实验结果;
- (5) 采用 LabVIEW 开发平台, 缩短了应用程序的开发周期, 降低了系统硬件成本, 提高了系统的设计效率和设计质量;
- (6) 本软件编写时, 以瀑布模型和并行工程为指导思想, 使软件功能得以充分实现。

2.2. 测振传感器多频混合校准软件的总体结构

图 1 展示了软件的总体框架图, 整个软件主要由试验参数设置和多频混合校准两部分组成。试验参数设置部分由“上限参数和传感器设置”和“多频参数设置”两部分构成, 主要实现传感器的设置以及测试频率点和振级设置[3][4]。多频混合试验包括信号发生模块、振级调整模块、数据采集模块、数据分析模块和报表模块。信号发生模块: 根据多频参数设置中的频率, 合成周期性多频信号, 由信号输出组件输出至功率放大器, 经功率放大后驱动振动台。振级调整模块: 在初始振动下, 采集标准传感器的信号, 经 FFT 变换求出信号的幅值谱, 计算各个频率点下的振级, 将得到的振级和设置的振级相比较, 进行逐次线性逼近, 直到各频率点的振级在允许的范围内。数据采集模块: 完成数据的采集, 与振级调整模块和数据分析模块嵌套使用, 构成了程序的架构。数据分析模块: 对采集的数据进行 FFT 变换, 得到信号的幅值谱, 并计算振动台的振级和被校传感器各频率点下的灵敏度。报表模块: 将振级和灵敏度以表格的形式表示, 最终以 Excel 的形式保存。

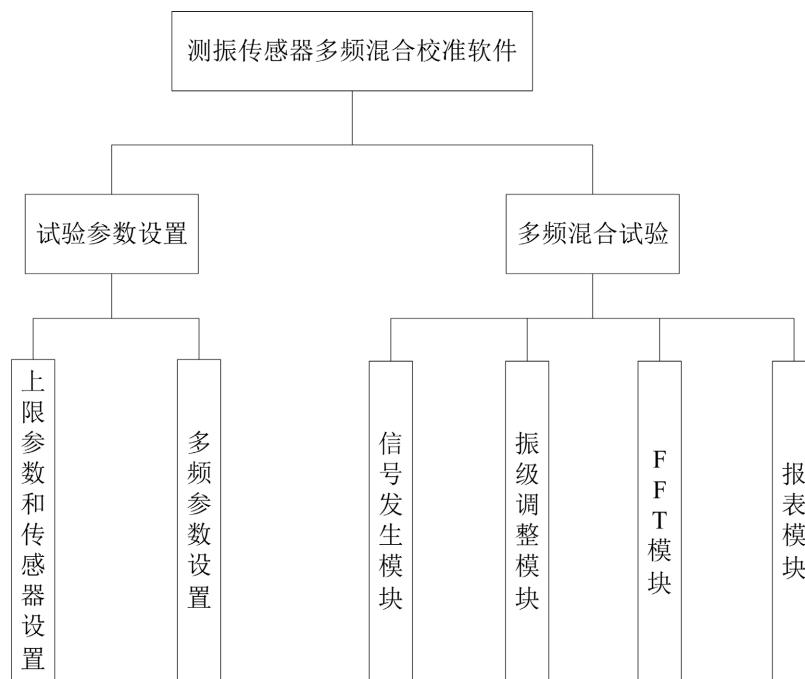


Figure 1. Overall framework of the multi-frequency hybrid calibration software

图 1. 多频混合校准软件的总体框架

3. 多频混合校准程序

程序流程如图 2, 在开始试验后, 程序控制信号输出组件输出初始激励信号驱动振动台, 在初始激励下, 振动台会产生初始振动, 由采集到初始振动的信号计算出振动台在各个频率点下的振级大小。初始激励下, 振动台的振级会与设定的振级有偏差, 此时循环进行振级逼近调整。振级调整是通过改变信号源的输出信号大小, 在当前电压的基础上增大或者减小信号的幅值, 从而达到改变振动台振级的目的[5] [6]。当振级调整完成后, 采集标准传感器和被校传感器的信号, 经过 FFT 变换后, 得到信号的幅值谱, 求出被校传感器的灵敏度。

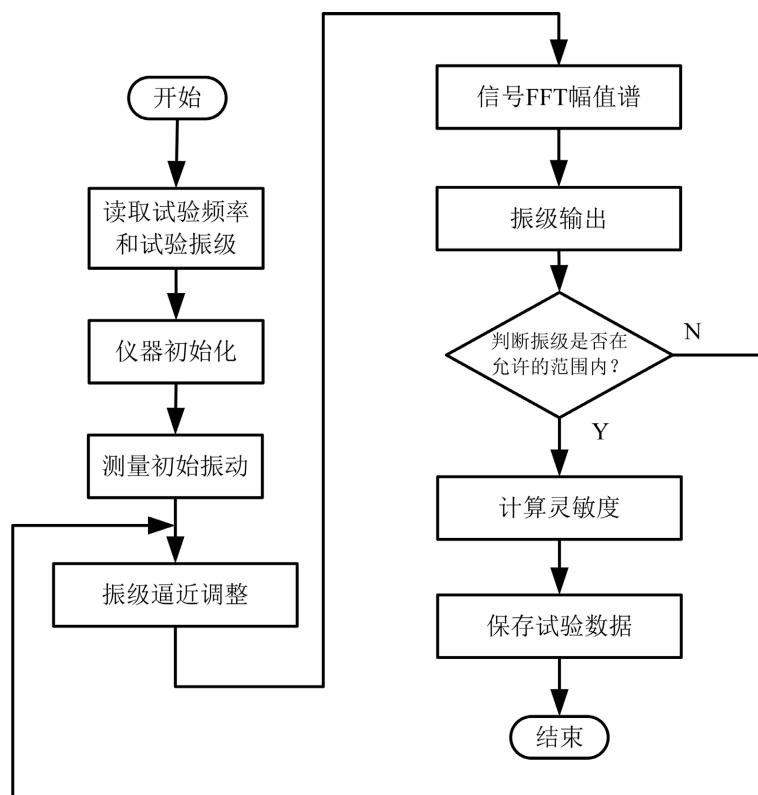


Figure 2. Flowchart of the multi-frequency hybrid calibration procedure
图 2. 多频混合校准程序流程图

4. 程序界面设计

多频混合校准程序主要完成信号发生、振级调整、数据采集、数据处理以及数据保存功能。程序界面中, 有多频信号波形和传感器频谱显示图形, 信号源的输出信号和传感器信号的幅值谱会实时显示在图形中。波形图下方为程序控制按钮, 分别为“开始试验”、“暂停试验”、“重新试验”、“结束试验”。框图右上方为振动台实时振动参数, 右下方为测试结果表格。程序框图如图 3 所示。

在进行校准时, 程序开始读取多频参数设置中的频率和振级, 合成周期性虚拟多频信号, 并优化出幅值最小的多频信号, 基于 LabVIEW 的 DAQmx 功能, 利用信号输出组件将多频信号输出至功率放大器, 经功率放大后驱动振动台。

振动台在初始激励下, 开始振动, 采集卡采集标准传感器输出信号, 经过 FFT 变换后除以标准传感器的灵敏度, 得到振动台的振动幅值谱, 将得到的振动幅值谱和设定的各频率点下的振级相对比, 得到

相应的逼近系数，并计算多频信号中各频率成分的幅值，重新生成调整后的多频信号，由信号发生组件输出。重复上述过程，直到得到的各频率下的振级在规定的范围内，振级调整完成。

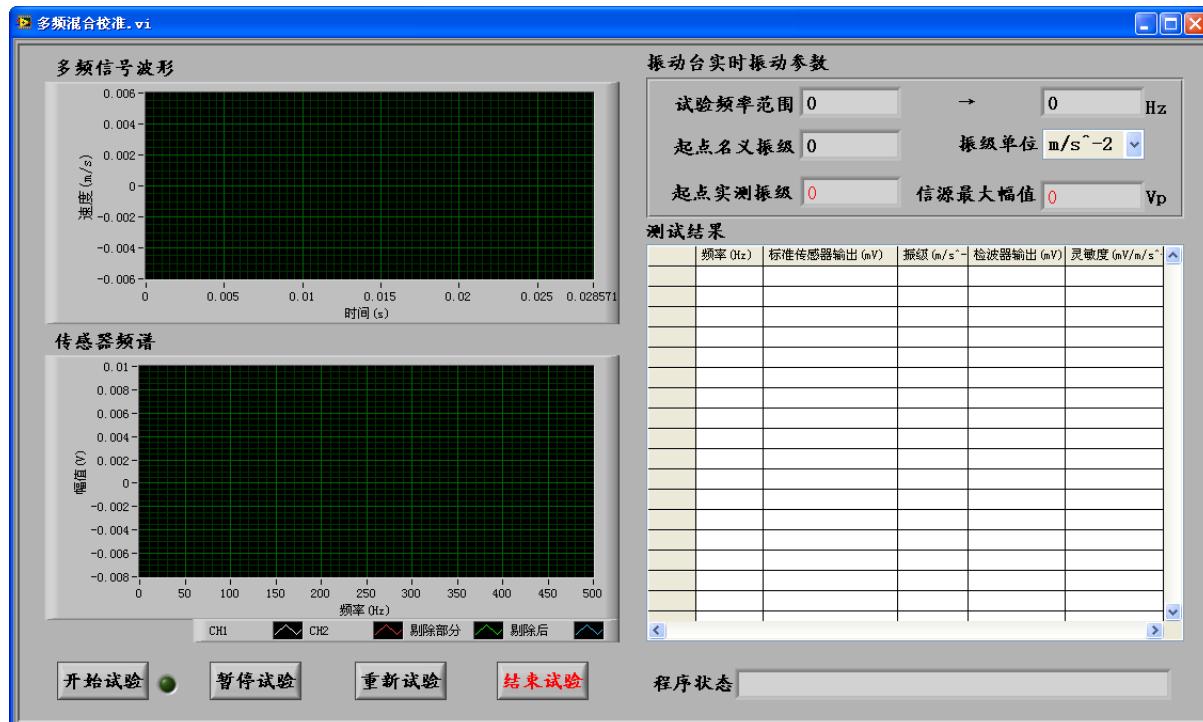


Figure 3. Flowchart of multi-frequency hybrid calibration procedure

图 3. 多频混合校准程序框图

振级调整完成后，采集标准传感器的信号和被校传感器的信号，经 FFT 变换得到标准传感器幅值谱和被校传感器的幅值谱，将标准传感器的幅值谱经数据运算后得到相应的振动幅值谱，最终计算被校传感器的灵敏度。采集的数据和计算的最终结果将以表格的形式显示。

报表模块的作用是把试验数据转换成试验报表，保存并能显示给用户查询，必要时要进行打印。利用 LabVIEW Report Generator 模块中的 Excel 子功能模块编程直接生成报表[7]。通过 LabVIEW 中的工具在标签处插入内容，其程序如图 4 所示。

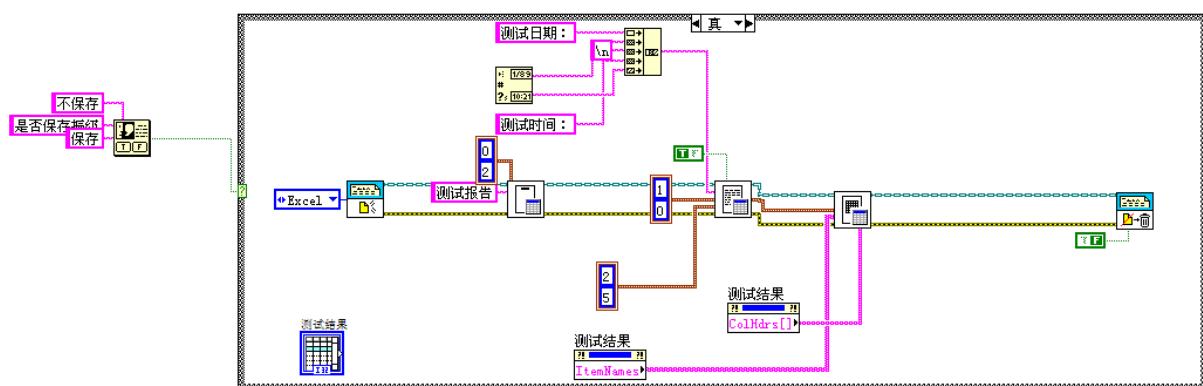


Figure 4. Report generation program flowchart

图 4. 报表生成程序框图

5. 实验验证

利用 LabVIEW 软件中的混合单频信号发生器函数产生复合频率信号。在软件中输入初始频率、幅值和相位后, USB4431 信号卡输出信号, 经过功率放大器驱动振动台振动, 利用加速度传感器检测振动台的实时振动, 通过 FFT 变化计算出加速度波形的幅值和相位, 再计算出此时的位移幅值和相位。

复合频率校准后, 可以通过电涡流传感器在各个频率点的单一频率校准来验证复合频率校准的精度。结果如表 1 所示, 表中给出了复合频率校准和单一频率校准时的灵敏度, 并计算了两者的偏差。计算公式为

$$ei = \frac{|S_i - S_d|}{S_d} \times 100\%$$

式中, S_i - 电涡流传感器复合频率校准时第 i 个频点的灵敏度; S_d - 电涡流传感器单一频率校准时灵敏度。

Table 1. Experimental data

表 1. 实验数据

频率/HZ	标准输出	实测振级	被较输出	复合频率校准灵敏度	单一频率校准灵敏度	偏差
10	5.49	19.67	74.38	5.35	5.37	0.37
20	22.42	20.08	76.48	5.39	5.44	0.92
30	50.57	20.13	76.73	5.39	5.42	0.55
40	91.36	20.46	78.76	5.42	5.47	0.91
50	143.04	20.50	78.10	5.39	5.45	1.10
60	205.35	20.43	78.47	5.43	5.40	0.56
70	280.97	20.54	78.40	5.40	5.42	0.37
80	365.17	20.44	77.03	5.33	5.38	0.93
90	465.76	20.60	70.99	4.87	4.86	0.21
100	573.22	20.53	86.55	5.96	6.06	1.65

从测试结果可以看出, 复合频率校准得到的灵敏度与单一频率校准的偏差在 2% 以内, 并且趋势相同, 偏差在允许范围内, 该软件在保证校准精度的同时, 实现了多个频率点同时校准的功能。单一频率实验时, 校准 10 个频率点共需 6 分钟, 复合频率校准时, 校准 10 个频率点共需 1 分钟。所以, 电涡流传感器复合频率校准模块节约了 83% 的校准时间, 提高了校准效率。

6. 结论

本文通过基于 LabVIEW 的电涡流传感器复合频率校准系统的研究, 选取一组试验频率, 通过相位优化和振级调整完成振动台复合频率振动的调幅处理。对电涡流传感器的频率响应进行了复合频率校准, 并与单一频率校准比较, 证明复合频率校准在保证校准精度的同时, 校准的效率提高了 83%, 实验结果符合设计要求。

参考文献

- [1] 金子迪. 电涡流传感器多路复合频率校准技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [2] 徐祥. 电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2015.

-
- [3] 王炳, 彭欣, 谢非儒, 等. 基于 LabVIEW 的电涡流传感器自动校准系统[J]. 计量与测试技术, 2024, 51(7): 41-43.
 - [4] 郑建忠. 电涡流振动位移传感器自动检定技术方案研究[J]. 中国仪器仪表, 2022(8): 79-83.
 - [5] 王炳, 翟国栋, 魏金实, 等. 电涡流传感器动静态一体化自动校准装置设计[J]. 中国计量, 2024(8): 86-91.
 - [6] 高峰, 施亮. 基于电感式触控传感器的激励信号源频率自校准方法研究[J]. 传感器世界, 2022, 28(2): 24-29.
 - [7] 陈小丽, 张波, 李杰, 等. 非接触电感式角位移传感器的设计与校准[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 36-42.