

基于LabVIEW的电涡流传感器动静态一体化校准系统开发

姜 涵, 唐泽坤

云南中烟物资(集团)有限责任公司, 云南 昆明

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月18日; 发布日期: 2025年12月30日

摘要

电涡流传感器在长期使用过程中, 可能会因为老化或者受客观环境的影响, 指示值会出现很大的误差甚至错误, 所以需要根据电涡流传感器的性能定期地对其进行动态或者静态校准, 及时发现并处理电涡流传感器存在的问题, 校准时, 感应盘使用被校准传感器实际工况中所感应的金属导体材料制成, 这样来保证电涡流传感器测量结果的准确性, 校准周期一般不超过一年。对于电涡流传感器的校准, 主要分静态校准和动态校准。本文基于LabVIEW软件开发以标准振动台作为执行机构, 采用绝对法, 进行电涡流传感器的静态和动态校准。经过实验证电涡流传感器动静态一体化校准系统位移控制精度优于 $5 \mu\text{m}$, 位移测量精度优于 $3 \mu\text{m}$, 电压测量精度优于0.1%。标准加速度计套组灵敏度校准不确定度在160 Hz内小于0.5%。

关键词

电涡流传感器, 动静态校准, 一体化设计, LabVIEW

Development of an Integrated Dynamic and Static Calibration System for Eddy Current Sensors Based on LabVIEW

Han Jiang, Zekun Tang

Yunnan Tobacco Materials (Group) Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: November 11, 2025; accepted: December 18, 2025; published: December 30, 2025

Abstract

During long-term use, eddy current sensors may experience significant errors or even erroneous

文章引用: 姜涵, 唐泽坤. 基于LabVIEW的电涡流传感器动静态一体化校准系统开发[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 826-839. DOI: 10.12677/iae.2025.134100

readings due to aging or environmental influences. Therefore, regular dynamic or static calibration is necessary to identify and address any issues. During calibration, the induction plate is made of the same metal conductor material as the sensor under actual operating conditions to ensure the accuracy of the measurement results. The calibration cycle is generally no more than one year. Eddy current sensor calibration is mainly divided into static and dynamic calibration. This paper develops an integrated dynamic and static calibration system for eddy current sensors based on LabVIEW software, using a standard vibration table as the actuator and employing the absolute method for static and dynamic calibration. Experimental results verify that the displacement control accuracy of the integrated dynamic and static calibration system is better than 5 μm , the displacement measurement accuracy is better than 3 μm , and the voltage measurement accuracy is better than 0.1%. The sensitivity calibration uncertainty of the standard accelerometer kit is less than 0.5% within 160 Hz.

Keywords

Eddy Current Sensor, Dynamic and Static Calibration, Integrated Design, 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

电涡流传感器校准分为静态校准和动态校准，根据国家计量检定规程 JJG 644-2003，对电涡流传感器的静态校准方法如下：① 在电涡流传感器静态校准装置上完成电涡流传感器的安装。② 电涡流传感器的推荐电压处作为其安装位置，以安装位置为中点，在其量程范围内上下各选择 5 个测量点。③ 在各测量点处分别测量电涡流传感器的输出及其位移，并进行 3 个循环的测量。④ 通过对电涡流传感器输出及其位移数据的处理计算其静态灵敏度、静态幅值线性度、回程误差、幅值重复性和零值误差等，完成对电涡流传感器的校准[1][2]。电涡流传感器的校准主要是通过振动校准的方式来实现的，目前完成振动校准的主要途径是使用动校仪或者标准振动台来实现。标准振动台对电涡流传感器的校准是国家计量检定规程 JJG644-2003 规定的对位移传感器的校准的标准方法，分为比较法和绝对法两种。

2. 校准系统组成

电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置的总体设计是实现电涡流传感器静态校准与动态校准一体化，并结合计算机技术和虚拟仪器技术实现校准过程的自动化。装置的总体设计思路是以机械系统作为电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置的执行机构，通过上位机软件系统根据被校准传感器的技术指标，设置参数并且生成和发送相应的控制指令至下位机控制系统中，下位机控制系统控制运动部件的运动和信号的采集等，并将采集的数据传送至上位机软件系统中进行处理与保存[3]。

基于以上的分析，将电涡流传感器静/动态校准系统分为机械系统部分、下位机控制系统和上位机软件系统三个主要模块。其总体结构如图 1 所示。

3. 校准系统控制程序设计

在本设计中使用了 LabVIEW 来完成上位机软件的编写。基于 LabVIEW 的上位机软件的功能主要分为指令的发送与数据的接收、对测量数据进行修正、对采集数据的处理和保存。其中指令的发送和数据

的接收主要是实现对下位机运行模式的选择, 同时接收下位机传递的测量数据; 对控制指令进行修正主要是通过比较校准系统控制指令和标准仪器测量数据, 对校准仪器的控制指令进行必要的修正; 数据处理部分主要是完成对下位机测量数据的记录、运算和保存[4]。上位机软件系统的组成及工作流程分别如图 2 和图 3 所示。

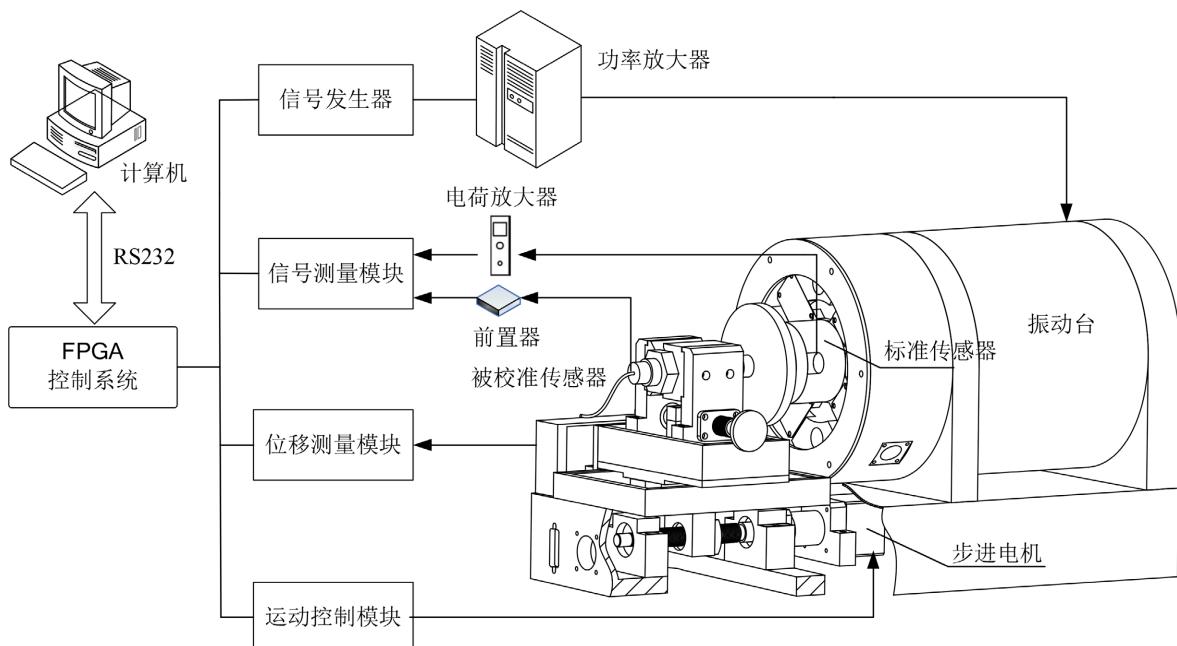


Figure 1. Schematic diagram of the calibration system

图 1. 校准系统组成示意图

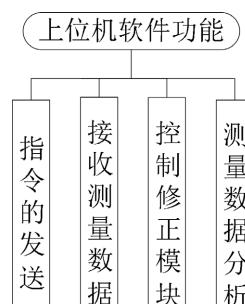


Figure 2. Composition of the host computer software system of the integrated automatic calibration device for dynamic and static characteristics of eddy current sensors

图 2. 电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置上位机软件系统的组成

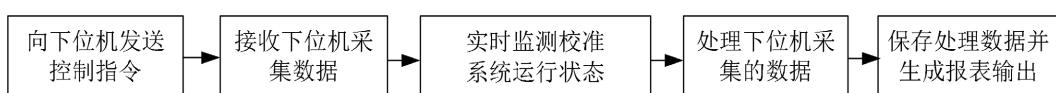


Figure 3. Workflow of the host computer software system

图 3. 上位机软件系统工作流程

根据电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置的工作原理, 上位机软件需要完成以下工作内容:

- (1) 数据的发送。在传感器静动态校准中上位机需要针对不同型号的传感器设置的参数, 并以一系列指令的形式发送给下位机来控制校准装置的运动状态、控制系统的工作状态等。

(2) 接收数据。接收下位机采集的位移和传感器输出信号, 进而完成对电涡流传感器静动态校准的信号采集。

(3) 对控制指令的修正。为了保证校准装置的控制精度, 需要通过标准仪器对校准装置控制精度进行修正, 通过比较标准仪器测量数据与校准装置的指令, 在上位机软件中对校准装置的控制指令进行修正。

(4) 数据处理。上位机软件系统需要对采集的位移信号和电涡流传感器输出信号按照国家计量检定规程中规定的电涡流传感器动静态校准所需检定的指标进行处理并保存。

3.1. 数据发送与接收模块

数据发送与接收模块需要完成上位机与下位机控制系统的信号传递, 在上位机软件系统中通过调用 VISA 函数完成上位机数据的发送与接收。VISA 函数包括 VISA 打开函数、串口配置函数、VISA 写入函数, VISA 读取函数和 VISA 关闭函数。通过 VISA 打开函数配置 PC 的串口名; 串口配置函数主要用于串口的初始化, 定义波特率、数据比特、奇偶校验位、停止位、流控制、终止符等; VISA 写入函数从写缓冲器中写入写数据至 VISA 打开函数配置的 PC 机串口中; VISA 读取函数完成从 VISA 打开函数配置的 PC 机串口中读取数据至读缓冲区中; VISA 关闭函数用于关闭已经打开的串口[5]。典型的串口读写程序框图如图 4 所示。

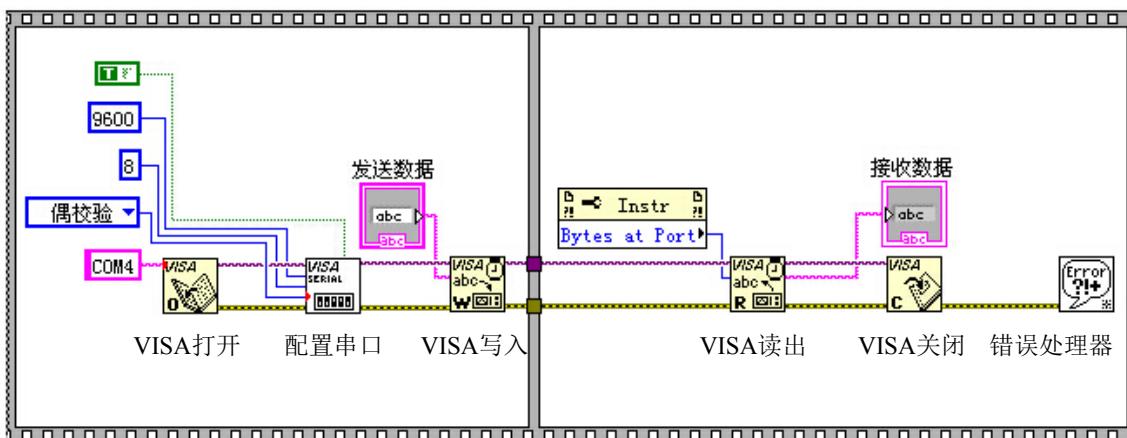


Figure 4. Serial port read/write program flowchart

图 4. 串口读写程序框图

(1) 数据发送模块的设计

数据发送模块实现向下位机发送指令, 在电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置的上位机指令主要有动态/静态校准指令、方向控制指令、运动模式控制指令、位移量选择指令等, 这些指令要有效地传递给下位机需要与下位机约定一定的通讯协议, 对于动态/静态校准指令、方向控制指令、运动模式控制指令等分配 1 个字节长度的指令区, 位移量的选择指令由于运动机构的最小分辨率为 $0.08 \mu\text{m}$, 总行程为 50 mm, 所以需要的最大数据量大约为 625,000 个, 因此给位移量大小选择功能分配了 3 个字节长度的指令区, 即占 24 位的数据量。

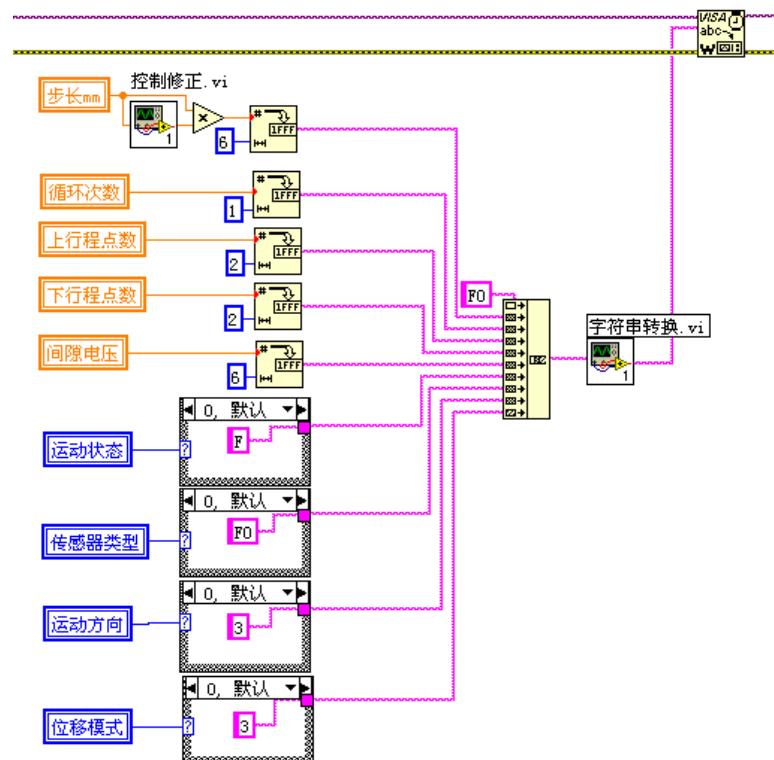
为了方便下位机控制程序对上位机控制指令的读取, 在设计时, 将动态校准指令位数设置的与静态校准相同, 由于电涡流传感器动态校准中的控制指令相对简单, 因此在动态校准的控制指令中添加了一段空指令, 从而使得两种工作模式下给下位机控制程序的指令位数一致[6]。表 1 和表 2 分别为静态校准和动态校准的通讯协议指令。静态校准指令的组成和转换程序框图分别如图 5 所示。

Table 1. Static calibration communication protocol instructions
表 1. 静态校准通讯协议指令

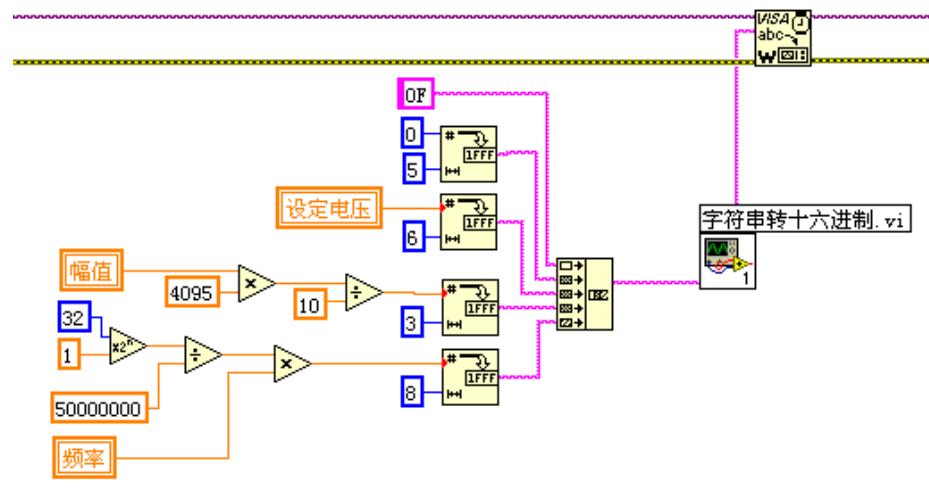
功能块	静态校准	位移量	循环次数	上行程点数	下行程点数
	F0	0~100 mm 000000- FFFFFF	0~15 0-F	0~256 00-FF	0~256 00-FF
数据位	88~95	64~87	60~63	52~59	44~51
	设定电压	运动状态	传感器类型	运动方向	位移模式
		开始 F	电流型 0F		辅助模式 3
功能块	0~24 V 000000- FFFFFF	停止 0	电压型 F0	上行 3	中点模式 5
		暂停 6	电流/压型 FF	下行 C	端点模式 C
					电压模式 9
数据位	20~43	16~19	8~15	4~7	0~3

Table 2. Dynamic calibration communication protocol commands
表 2. 动态校准通讯协议指令

	频率(Hz)	幅值(mm)	设定电压	空指令	动态校准
功能块	1~500 Hz	-2 mm~2 mm	000000~FFFFFF	—	0F
数据位	0~31	32~43	44~67	68~87	88~95



(a) 静态校准转换程序框图



(b) 动态校准转换程序框图

Figure 5. Flowchart of static and dynamic calibration command composition and conversion procedure
图 5. 静动态校准指令组成与转换程序框图

(2) 数据接收模块的设计

数据接收模块的作用是接收下位机控制系统信号采集模块采集的位移信号及电涡流传感器输出信号。由于接收的数据为 ASCII 码, 在 LabVIEW 的软件中用到的是十六进制的字符串, 再次用到了字符串转换模块将 ASCII 码数据转换为十六进制的数据, 字符串转换程序框图如图 6 所示。在传感器静态校准中上位机需要接收的数据为直线光栅尺测量的位移数据和 ADS1271 采集的电涡流传感器输出信号; 在传感器的动态校准中上位机需要接收的数据为 ADS1271 采集的被校准传感器和标准传感器两路信号。在本模块的设计中通过调用 VISA 函数的读取函数实现对数据的读取[7]。数据接收流程图如图 7 所示。

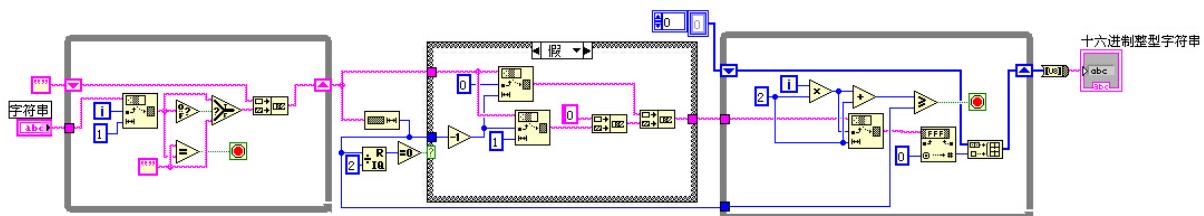


Figure 6. String conversion flowchart
图 6. 字符串转换程序框图

3.2. 控制修正模块

在完成校准装置的设计后, 为了保证装置的测量精度, 需要对校准装置的测量数据进行修正, 传感器信号使用 Agilent-34410A 的六位半数字电压表进行同步的比对修正, 对位移信号使用的是 OPTODYNE 的 MCN-5005 激光干涉仪。对测量数据的修正采用的是逐点修正法, 控制修正模块的程序框图如图 8 所示, 具体修正步骤如下:

(1) 对传感器输出信号的修正

① 使用 Agilent-34410A 的六位半数字电压表和校准装置将传感器测量范围细分为间隔密集的各个测量点, 在各测量点处对被校准传感器的输出值进行测量, 记录两装置的测量数据。

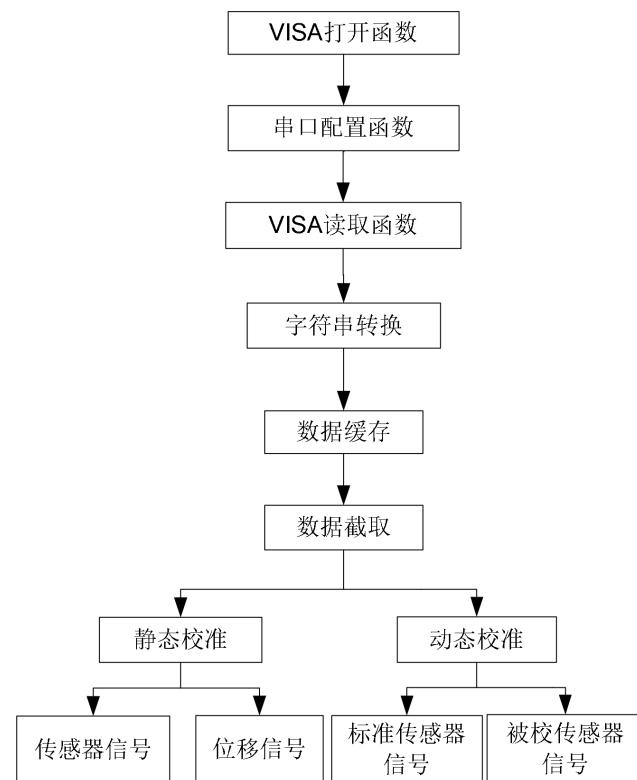
**Figure 7.** Data reception flowchart

图 7. 数据接收流程图

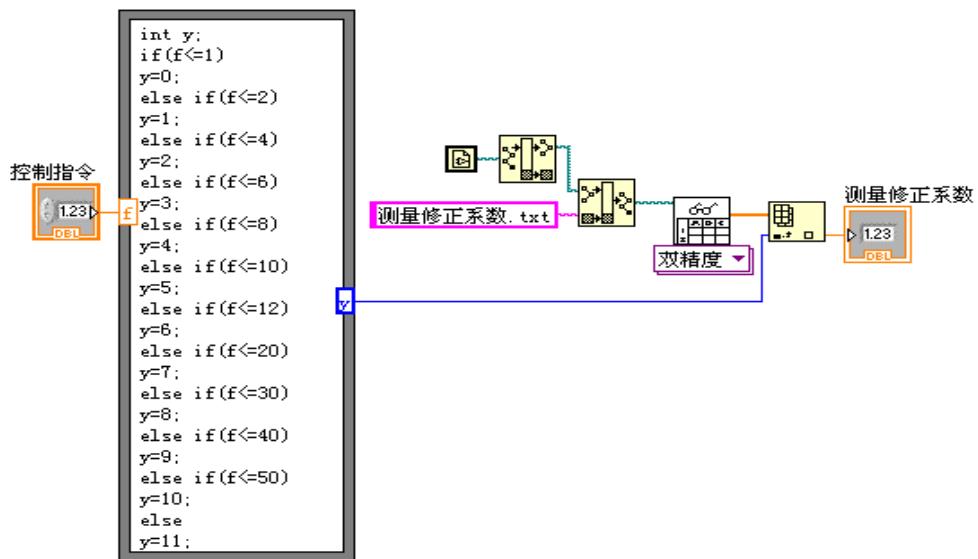
**Figure 8.** Flowchart for calculating static sensitivity and amplitude linearity

图 8. 静态灵敏度和幅值线性计算框图

- ② 比较两组测量数据, 计算出数字电压表测量数据与校准装置测量数据的比值。
- ③ 在上位机软件中用数字电压表测量数据与校准装置测量数据的比值对校准装置测量的数据进行补偿, 完成传感器测量数据的修正。

(2) 对控制指令的修正

- ① 将校准装置量程细分为间隔密集的各个测量点, 通过控制指令控制被校准传感器移动到各测量点处, 使用 OPTODYNE 的 MCN-5005 激光干涉仪被校准传感器的位移值进行测量, 记录激光干涉仪测量的数据及控制指令的数值。
- ② 比较激光干涉仪测量数据与控制指令数值, 计算出激光干涉仪测量数据与控制指令数值的比值。
- ③ 在上位机软件中用 OPTODYNE 的 MCN-5005 激光干涉仪测量数据与校准装置控制指令的比值对控制系统中赋予的位移进给指令进行修正。

4. 数据处理模块

数据处理模块需要完成的任务是当上位机接受完下位机控制系统信号采集模块的数据后, 根据国家计量检定规程对电涡流传感器动静态校准所需检定的指标进行运算, 将结果以报表的形式输出并保存。

下面详细地介绍静态和动态指标的测量和计算方法。

静态灵敏度的测量和计算: 将上、下行程中采集到的以每 10% 量程为间隔点的测量数据归纳为 1 组, 即三个来回的量程共取 3 组, 再采用最小二乘法对数据进行计算。假设线性回归方程为

$$\hat{U}_i = U_0 + SL_i \quad (1)$$

式中, \hat{U}_i ——电涡流传感器输出信号的回归值; U_0 ——截距; S ——电涡流传感器的灵敏度; L_i ——测量的位移值。

根据测得的位移值 L_i 和电涡流传感器相应的信号输出值 U_i , 按照最小二乘法可以得到线性回归方程中的灵敏度 S 为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n L_i U_i - \bar{L} \sum_{i=1}^n U_i}{\sum_{i=1}^n L_i^2 - \bar{L} \sum_{i=1}^n L_i}, \quad (2)$$

线性回归方程中的截距 U_0 为

$$U_0 = \frac{\bar{U} \sum_{i=1}^n L_i^2 - \bar{L} \sum_{i=1}^n L_i U_i}{\sum_{i=1}^n L_i^2 - \bar{L} \sum_{i=1}^n L_i}, \quad (3)$$

式中, \bar{U} ——位移量对应的电涡流传感器输出信号的平均值($\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i$); n ——测量次数($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

\bar{L} ——测得的位移量的平均值($\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$)。

静态幅值线性度的测量和计算: 选取包括上下限值在内的 3 次上行程测量数据值, 用公式(4)计算出 U_i 和 \hat{U}_i 之间的最大偏差值 δ_{\max}

$$\delta_{\max} = (U_i - \hat{U}_i)_{\max}, \quad (4)$$

用公式(5)计算出幅值线性度 δ_l

$$\delta_l = \frac{\delta_{\max}}{U_N} \times 100\%, \quad (5)$$

式中, U_N ——最大量程处电涡流传感器的信号输出值。

回程误差的测量和计算: 回程误差 δ_{hi} 按照公式(6)来计算

$$\delta_{hi} = \frac{|\bar{U}_{iu} - \bar{U}_{id}|}{U_N} \times 100\%, \quad (6)$$

式中, δ_{hi} ——第 i 个测量点处的回程误差; \bar{U}_{iu} ——3 次上行程第 i 个测量点处电涡流传感器信号输出值的算术平均值; \bar{U}_{id} ——3 次下行程第 i 个测量点处电涡流传感器信号输出值的算术平均值; U_N ——最大量程处电涡流传感器的信号输出值。

幅值重复性的测量和计算: 选取 3 次循环测量中同一行程方向上的同一个测量点处的 3 个传感器信号输出值, 然后计算出 3 个数据之间的最大差值 $|\Delta_{di}|$, 再按照公式(7)计算出幅值重复性

$$\delta_{ri} = \frac{|\Delta_{di}|}{U_N} \times 100\%, \quad (7)$$

式中, δ_{ri} ——第 i 个测量点处的幅值重复性; U_N ——最大量程处电涡流传感器的信号输出值。静态校准中静态灵敏度、幅值线性、幅值重复性和回程误差的计算框图分别如图 9 和图 10 所示。

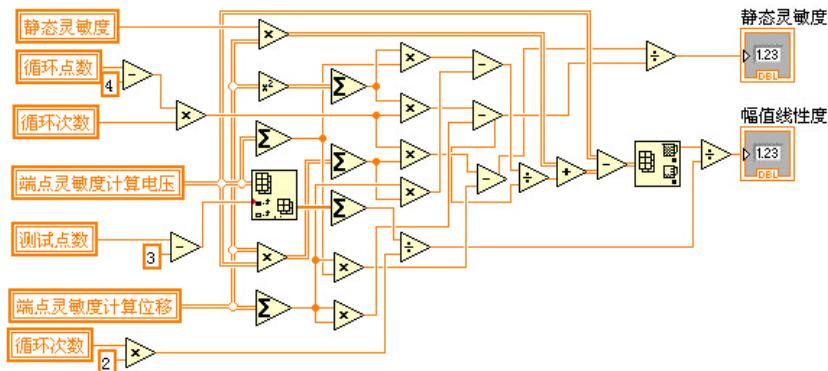


Figure 9. Calculation block diagram for static sensitivity and amplitude linearity
图 9. 静态灵敏度和幅值线性计算框图

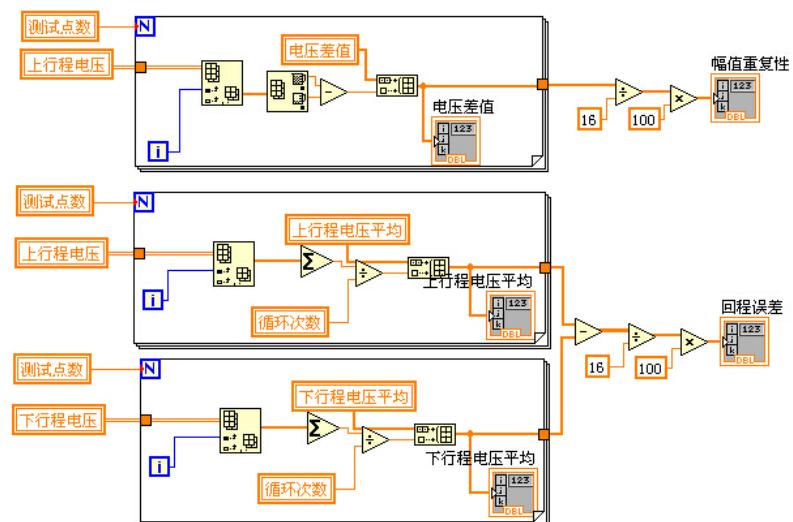


Figure 10. Calculation block diagram for amplitude repeatability and hysteresis error
图 10. 幅值重复性和回程误差计算框图

用标准加速度计监控振动台, 在被检传感器的动态范围内, 选取某一实用的频率值和某一指定的位移值进行检定, 其被检传感器的输出值与振动台的位移值之比为该传感器的动态参考灵敏度。动态参考灵敏度按式(8)计算:

$$S_d = \frac{U}{D}, \quad (8)$$

式中, S_d ——位移传感器的动态参考灵敏度; U ——参考点处传感器的输出值; D ——参考点处的振动位移值。

在被校准电涡流传感器的动态范围内, 等间隔地选取若干个频率值, 保证振动台位移恒定, 测量各频率点传感器的输出值, 并计算出各点的动态位移灵敏度, 然后按式(9)计算各测量点灵敏度与动态参考灵敏度的相对偏差, 软件中程序框图如图 11 所示。

$$\delta_{fi} = 20 \lg \left| \frac{S_{di}}{S_d} \right|, \quad (9)$$

式中, δ_{fi} ——第 i 个频率点的动态灵敏度与动态参考灵敏度的相对偏差; S_{di} ——第 i 个频率点的动态灵敏度; S_d ——动态参考灵敏度。

在被校准电涡流传感器的频率范围内选取某一实用的频率值, 并在校准振动台可达到的振动位移幅值内选取 5 个位移值进行激振, 分别测量各位移点的传感器输出值和振动台的位移幅值, 计算出各测量点传感器的动态位移灵敏度, 然后按式(10)计算各测量点灵敏度与动态参考灵敏度的相对偏差, 软件中程序框图如图 12 所示。

$$\delta_{dri} = \frac{S_{di} - S_d}{S_d} \times 100\%, \quad (10)$$

式中, S_{dri} ——第 i 个位移点的动态灵敏度与参考动态灵敏度的相对偏差; S_{di} ——第 i 个位移点的动态位移灵敏度; S_d ——参考动态灵敏度。

动态校准中幅值线性度偏差和频率响应偏差计算框图分别如图 11 和图 12 所示。

从下位机中读取的数据经过上述的运算之后, 可以直接在控制面板的显示控件中显示出来, 最终完成所有的测量工作。

综上所述, 本模块的设计, 主要是完成了控制指令的发送, 对下位机采集数据的接收并处理保存, 同时在对校准装置的控制精度进行检测时, 具有控制修正的功能。

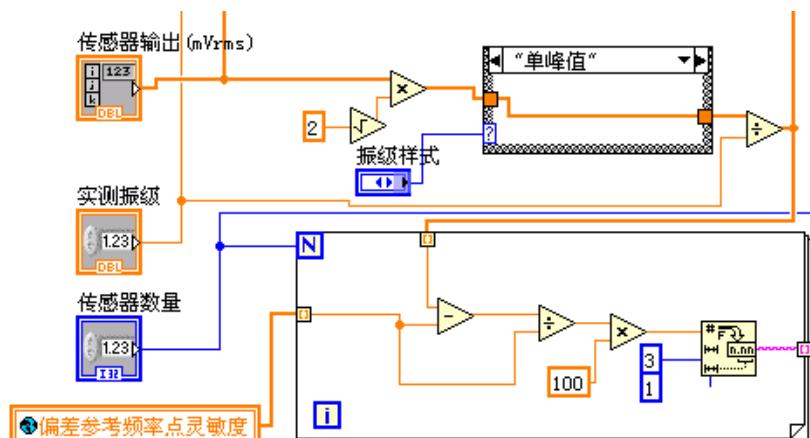


Figure 11. Calculation block diagram for amplitude linearity deviation

图 11. 幅值线性偏差计算框图

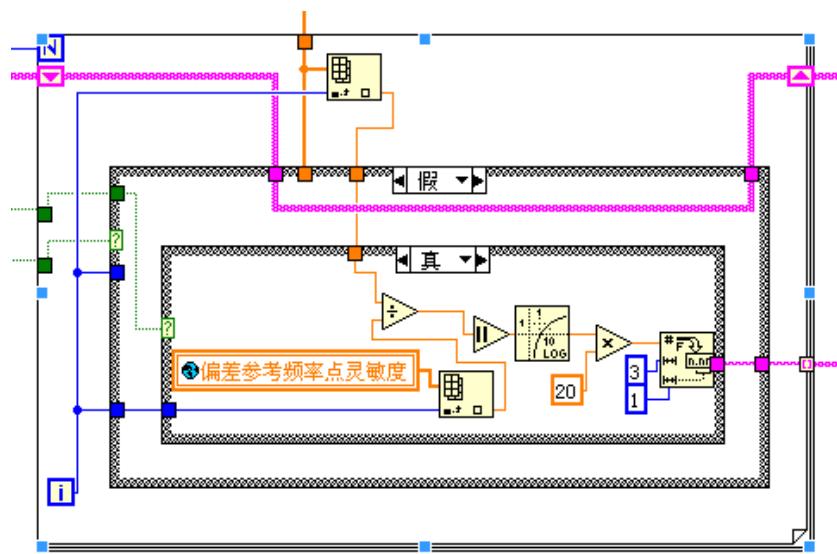


Figure 12. Calculation block diagram for frequency response deviation

图 12. 频率响应偏差计算框图

5. 信号采集模块的实验研究

在电涡流传感器静态校准和动态校准中都涉及到对传感器输出信号的采集，对传感器输出信号采集的验证本文使用了标准电压源和标准信号发生器的输出分别代替静态和动态被校准传感器输出进行的实验。

5.1. 位移测量模块的实验研究

位移测量模块是电涡流传感器静态校准的重要组成部分，对位移测量模块的实验主要包括对步进电机控制的研究和测量、控制精度的研究

对步进电机的控制主要验证步进电机驱动传感器的运动方向是否与上位机发送的指令一致。在确保能实现对步进电机的正确控制后，使用 OPTODYNE 的 MCN-5005 激光干涉仪对校准装置的位移控制精度和位移测量精度进行研究。

在校准装置 50 mm 的量程范围内，以 5 mm 为间隔依次选取 10 个测量点，并且按照国家计量检定规程要求测量 3 个循环。**表 3** 记录了控制指令、位移测量模块测得的位移值和 MCN-5005 激光干涉仪测量的位移值，从实验结果可以看出，最大的控制偏差在 5 μm 以内，测量偏差均在 3 μm 以内，说明校准装置的位移测量模块的设计满足要求。

Table 3. Displacement values measured by the displacement measurement module**表 3.** 位移测量模块测得的位移值

位移设定值 (mm)	上行程				下行程			
	激光测量值 (mm)	装置测量值 (mm)	控制误差 (μm)	测量误差 (μm)	激光测量值 (mm)	装置测量值 (mm)	控制误差 (μm)	测量误差 (μm)
5	4.9981	4.9998	3.9	0.2	4.9964	5.0001	3.6	0.1
10	9.9965	9.9990	3.5	1.0	9.9963	10.0004	3.7	0.4
15	14.9966	14.9997	3.4	0.3	14.9965	15.0006	3.5	0.6
20	19.9964	19.9990	3.6	1.0	19.9967	20.0001	3.3	0.1

续表

25	24.9956	24.9989	4.4	1.1	24.9958	25.0004	4.2	0.4
30	29.9956	29.9995	4.4	0.5	29.9959	30.0003	4.1	0.3
35	34.9968	34.9997	3.2	0.3	34.9970	35.0003	3.0	0.3
40	39.9980	39.9996	2.0	0.4	39.9982	40.0004	1.8	0.4
45	44.9998	44.9993	0.2	0.7	44.9998	45.0008	0.2	0.8
50	50.0015	49.9999	1.5	0.1	50.0015	49.9999	1.5	0.1

5.2. 静态校准部分电压测量模块的实验研究

对静态校准中采集模块的实验是通过 QJ3003SIII 直流稳压电源模拟电涡流传感器输出进行实验, 静态校准数据采集如表 4:

Table 4. Voltage measurement tables for Agilent-34410A and measurement module
表 4. Agilent-34410A 和测量模块的电压测量表

电压参考值(V)	Agilent (V)	测量模块 CH1(V)	误差%	测量模块 CH2 (V)	误差%
1	1.0087	1.0082	0.0496	1.0084	0.0297
2	2.0030	2.0035	0.0250	2.0024	0.0300
3	3.0063	3.0045	0.0599	3.0059	0.0133
4	4.0043	4.0016	0.0674	4.0039	0.0100
5	5.0076	5.0046	0.0599	5.0054	0.0439
6	6.0053	6.0059	0.0100	6.0048	0.0083
7	7.0032	7.0037	0.0071	7.0042	0.0143
8	8.0030	8.0032	0.0025	8.0029	0.0012
9	9.0022	9.0020	0.0022	9.0018	0.0044
10	10.0074	10.0071	0.0030	10.0069	0.0050
11	11.0028	11.0025	0.0027	11.0027	0.0009
12	12.0042	12.0038	0.0033	12.0035	0.0058
13	13.0036	13.0029	0.0054	13.0026	0.0077
14	14.0034	14.0027	0.0050	14.0038	0.0029
15	15.0047	15.0039	0.0053	15.0052	0.0033
16	16.0040	16.0029	0.0069	16.0051	0.0069
17	17.0089	17.0085	0.0024	17.0095	0.0035
18	18.0068	18.0072	0.0022	18.0080	0.0067
19	19.0068	19.0075	0.0037	19.0059	0.0047
20	20.0034	20.0052	0.0090	20.0061	0.0135
21	21.0016	20.9999	0.0081	21.0020	0.0019
22	22.0047	22.0037	0.0045	22.0053	0.0027
23	23.0036	23.0032	0.0017	23.0043	0.0030
24	24.0034	24.0039	0.0021	24.0036	0.0008

表4为电压测量模块的两个数据采集通道测量的电压值和Agilent-34410A数字电压表测量的电压数据,计算两者的相对误差可以看出,误差值都小于0.1%,说明静态校准部分电压测量模块测量精度达到了领先的技术指标和精度要求。

5.3. 动态校准部分正弦电压采集模块的实验研究

对动态校准部分正弦电压采集模块进行试验研究,主要对采集模块的幅值线性和频率特性进行实验研究。动态校准数据采集如表5:

Table 5. Amplitude linearity test data of the sinusoidal voltage acquisition module

表5. 正弦电压采集模块幅值线性测试数据

幅值(Vpp)	数字电压表(mVRms)	CH1 (mVRms)	CH1 测量误差(%)	CH2 (mVRms)	CH2 测量误差(%)
19	6713.75	6713.420	0.049	6712.991	0.113
18	6360.51	6359.747	0.120	6360.002	0.080
17	6007.58	6007.273	0.051	6006.894	0.114
16	5654.42	5654.149	0.048	5653.787	0.112
15	5300.71	5300.514	0.037	5300.180	0.100
14	4945.78	4945.526	0.051	4945.200	0.117
13	4592.94	4592.679	0.057	4592.381	0.122
12	4249.76	4249.536	0.053	4249.265	0.116
11	3902.42	3902.223	0.050	3901.969	0.116
10	3549.67	3549.478	0.054	3549.251	0.118
9	3192.28	3192.099	0.057	3191.890	0.122
8	2832.60	2832.482	0.042	2832.302	0.105
7	2473.29	2473.211	0.032	2473.041	0.101
6	2120.15	2120.028	0.058	2119.881	0.127
5	1767.60	1767.515	0.048	1767.289	0.176
4	1412.43	1412.330	0.071	1412.233	0.139
3	1062.18	1062.105	0.071	1062.033	0.138
2	706.34	706.325	0.021	706.274	0.093
1	354.60	354.602	0.006	354.577	0.065
0.8	283.15	283.168	0.064	283.146	0.014
0.5	176.74	176.672	0.385	176.656	0.475
0.2	70.514	70.506	0.113	70.503	0.156
0.100	35.409	35.406	0.085	35.402	0.198
0.080	28.262	28.261	0.035	28.257	0.177
0.050	17.672	17.669	0.170	17.669	0.170
0.020	7.044	7.043	0.142	7.041	0.426
0.01	3.480	3.477	0.862	3.479	0.287
0.008	2.769	2.767	0.722	2.767	0.722
0.005	1.700	1.700	0.000	1.699	0.588

从表中数据可以看出正弦电压采集模块采集信号的误差在 1% 以内, 满足设计要求。

6. 结论

本文基于 LabVIEW 软件开发以标准振动台作为执行机构, 采用绝对法, 进行电涡流传感器的静态和动态校准。经过实验验证电涡流传感器动静态一体化校准系统位移控制精度优于 $5 \mu\text{m}$, 位移测量精度优于 $3 \mu\text{m}$, 电压测量精度优于 0.1%。标准加速度计套组灵敏度校准不确定度在 160 Hz 内小于 0.5%。

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.