

电涡流传感器多路测试系统的开发

范思瑾, 角艺珍, 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14日; 发布日期: 2025年12月30日

摘 要

电涡流传感器是建立在电涡流效应上的新型传感器, 能非接触地测量出被测金属导体表面与传感器探头之间的距离。广泛应用于电力、冶金、石油、化工和航空等行业以及一些科研单位, 用来作为动力机械的监控装置或自动测试仪器。同时, 电涡流传感器能很好地完成对水轮机、压缩机、齿轮箱和压缩泵等大型旋转机械轴的径向振动、轴向位移、偏心、胀差和转速等参数的测量, 起到在线测量、在线监测、状态分析以及故障诊断的作用。电涡流传感器在长期使用时, 可能因为老化或者受客观环境的影响, 示值会出现很大的误差或者错误, 所以需要通过定期的校准, 发现并处理电涡流传感器存在的问题。校准时, 用感应盘代替实际工况中的金属导体, 并确保两者材料相同, 进而保证电涡流传感器校准的准确性, 一般校准周期为一年。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。本文通过设计一套能够同时进行四个电涡流传感器的夹具设计和对电涡流传感器的电涡流的仿真以及配套多路测试软件的开发, 完成了一套电涡流传感器多路测试系统, 在保证校准精度的前提下, 将电涡流传感器的校准效率提高了四倍。

关键词

电涡流传感器, 灵敏度, 多路测试, 校准系统

Development of a Multi-Channel Test System for Eddy Current Sensors

Sijin Fan, Yizhen Jiao, Cheng Li*

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

Received: November 10, 2025; accepted: December 14, 2025; published: December 30, 2025

Abstract

Eddy current sensors are a new type of sensor based on the eddy current effect, capable of non-

*通讯作者。

文章引用: 范思瑾, 角艺珍, 李澄. 电涡流传感器多路测试系统的开发[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 794-801.
DOI: 10.12677/iae.2025.134096

contactly measuring the distance between the surface of the tested metal conductor and the sensor probe. They are widely used in industries such as power, metallurgy, petroleum, chemical, and aerospace, as well as in some research institutions, serving as monitoring devices or automatic testing instruments for power machinery. Simultaneously, eddy current sensors can effectively measure parameters such as radial vibration, axial displacement, eccentricity, expansion difference, and rotational speed of shafts in large rotating machinery such as turbines, compressors, gearboxes, and compression pumps, playing a role in online measurement, online monitoring, condition analysis, and fault diagnosis. During long-term use, eddy current sensors may exhibit significant errors or inaccuracies in their readings due to aging or environmental influences. Therefore, regular calibration is necessary to identify and address any problems with the eddy current sensors. During calibration, an induction disk is used instead of the metal conductor in the actual working condition, ensuring that both are made of the same material to guarantee the accuracy of the eddy current sensor calibration. The typical calibration cycle is one year. Currently, most companies use the comparative method to calibrate eddy current sensors. When calibrating with sinusoidal excitation, multiple frequency points need to be calibrated step by step, which is quite time-consuming. This paper presents a multi-channel testing system for eddy current sensors, designed with a fixture capable of simultaneously testing four eddy current sensors, simulated the eddy currents of the sensors, and developed supporting multi-channel testing software. This system improves the calibration efficiency of eddy current sensors by four times while maintaining calibration accuracy.

Keywords

Eddy Current Sensor, Sensitivity, Multi-Channel Testing, Calibration System

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

任何传感器在制造、装配完成后,都需要根据原设计指标进行一系列严格的试验,以确定其实际工作特性,这就是标定。使用一段时间后(中国计量法规定一般为一年)或经过修理,也必须对其主要技术指标进行校准试验,以确保传感器的各项性能达到使用要求。

电涡流传感器是一种基于电涡流效应的新型传感器。其特点是长期工作可靠性好、灵敏度高、抗干扰能力强、非接触测量、响应速度快、不受油水等介质的影响,因而得到了广泛的应用。电涡流传感器的相对法校准包括静态校准和动态校准,其中动态校准时,通过采集电涡流传感器的输出,并与振动台上的标准传感器的输出进行对比,最终确定传感器的灵敏度、频率响应、幅值线性度等参数[1][2]。传统的校准过程是:用适合的支架将被检传感器固定在标准振动台台面垂直方向上的合适位置上,手动调节振动台功率放大器增益旋钮,通过读取标准传感器的输出电压来计算振动台的实时振级,到达设定振级后,人工读取被校电涡流传感器的输出电压,即可计算出该频率点的灵敏度。该校准过程需要大量人工干预,易出错且效率低。

2. 电涡流传感器多路测试软件的介绍

振动校准装置测控软件的主要功能和特点如下:

1. 提供一个电涡流传感器自动校准的软件平台和工具;
2. 能够同时实现对 1~4 个电涡流传感器的参考灵敏度、幅值线性、频响特性的比较法检定;
3. 测试结果以 Excel 表格的形式保存;

4. 测试数据将保存在 ACCESS 数据库中，并可以对其进行查询；
5. 可根据需要自动生成检定证书、校准证书或检定结果通知书，其证书形式完全符合计量单位要求；
6. 采用 LabVIEW 开发平台，缩短了应用程序的开发周期，降低了系统维护成本，提高了系统的设计效率和设计质量。

3. 电涡流传感器多路测试系统的设计

3.1. 多路动态校准夹具的结构设计

根据电涡流传感器多路测试系统的功能设置，首先应该进行多路动态校准夹具的设计，根据电涡流传感器的动态校准原理，在多路动态校准夹具的结构设计中需要注意以下几点：(1) 电涡流传感器动态校准时，应保证电涡流传感器和感应盘轴向平行，并且多个电涡流传感器要在感应盘区域内均匀分布。(2) 电涡流传感器的安装夹具要能够适应多个不同型号的传感器。(3) 夹具要实现对安装距离的调整，保证准确的电涡流传感器安装直流电压。(4) 在完成电涡流传感器安装距离的调整后能将校准夹具锁紧，确保传感器与振动台台体之间不会发生相对运动[3][4]。基于以上需求，确定电涡流传感器多路动态校准夹具的基本结构如图 1 所示，包括由标准振动台驱动产生振动的感应盘，传感器位置调节机构和校准夹具紧固机构三个主要部分。具体包括振动台、感应盘支座、标准加速度传感器、感应盘、校准夹具基座、调节螺钉、夹具支脚、支撑杆、下支座、上支座、传感器安装板、定位套等部分。感应盘支座固定在振动台的台面上，上端安装有感应盘，支座芯部装有标准加速度传感器。校准夹具基座与调节螺钉和夹具支脚一起，可以使传感器和感应盘轴线之间平行。支撑杆用来固定上支座和下支座，并具有调整传感器的位置调节机构和校准夹具紧固机构。传感器安装板上能够安装四个电涡流传感器，可以提高校准的效率。

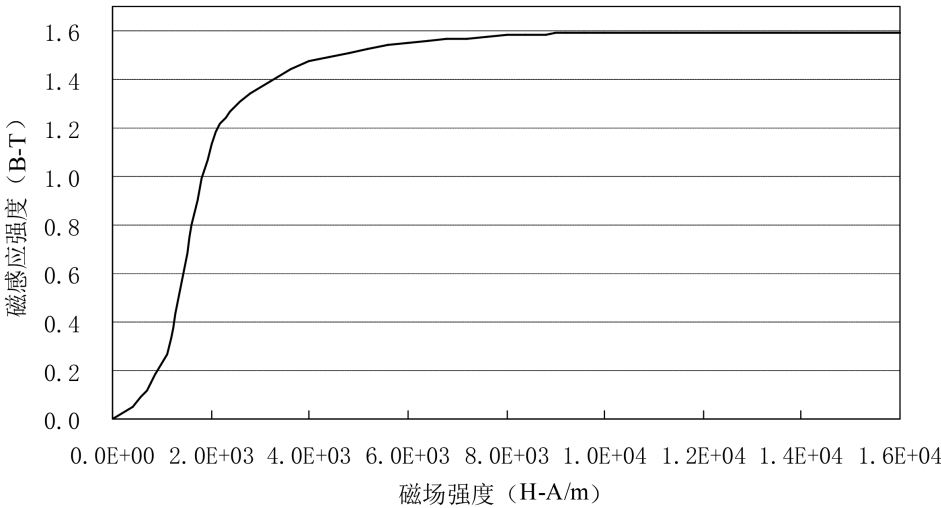


Figure 1. B-H curves of 42CrMo
图 1. 42CrMo 的 B-H 曲线

3.2. 感应盘的电涡流仿真与设计

Ansoft Maxwell 是进行涡流场分析的典型软件之一，本文利用 Maxwell 2D 进行涡流场仿真分析，分析对象为电涡流传感器的探头线圈和标定盘。在设计时标定盘要能适应对不同直径的传感器的校准，根据电涡流传感器探头线圈在感应盘上产生的电涡流的径向分布的情况，选择被校准传感器中直径最大的电涡流传感器进行仿真。电涡流传感器涡流场仿真模型的几何尺寸如表 1 所示[5]。

Table 1. Geometric parameters of the simulation model
表 1. 仿真模型几何参数

名称	大小	名称	大小
线圈内半径	10 mm	感应盘半径	60 mm
线圈外半径	20 mm	感应盘厚度	8 mm
线圈厚度	2 mm	距离 d	3.5 mm

在柱坐标系下建立电涡流传感器探头线圈和标定盘的有限元模型，传感器和标定盘的模型关于 Z 轴对称，鉴于此仅建立 1/2 的二维模型，涡流场有限元模型如下图所示，完成模型的建立以后通过 Eddy Current 求解器进行求解[6]。

在进行涡流场分析时其模型包含 3 种介质，涡流场分析是在一个空气的求解域中进行，线圈的材料属性为铜，电导率 $\gamma = 58000000 \text{ S/m}$ ，相对磁导率 $\mu_r = 0.999991$ 。设置感应盘的材料时，要考虑到电涡流传感器的工况，工况不同校准时使用的材料也不同，文中感应盘的材料为 45 号钢，该材料在材料库中无法找到，需要自定义材料属性，电导率取 $\gamma = 7576000 \text{ S/m}$ ，相对磁导率是非线性，如图 2 所示。

通过 Eddy Current 求解器进行求解。如图 2 所示，通过对涡流场的有限元仿真可得到电涡流传感器的磁力线分布，电涡流传感器在标定盘内产生的电涡流由于趋肤效应只分布在标定盘的表面，磁力线不会穿过标定盘；在线圈直径附近的磁力线密度最集中。

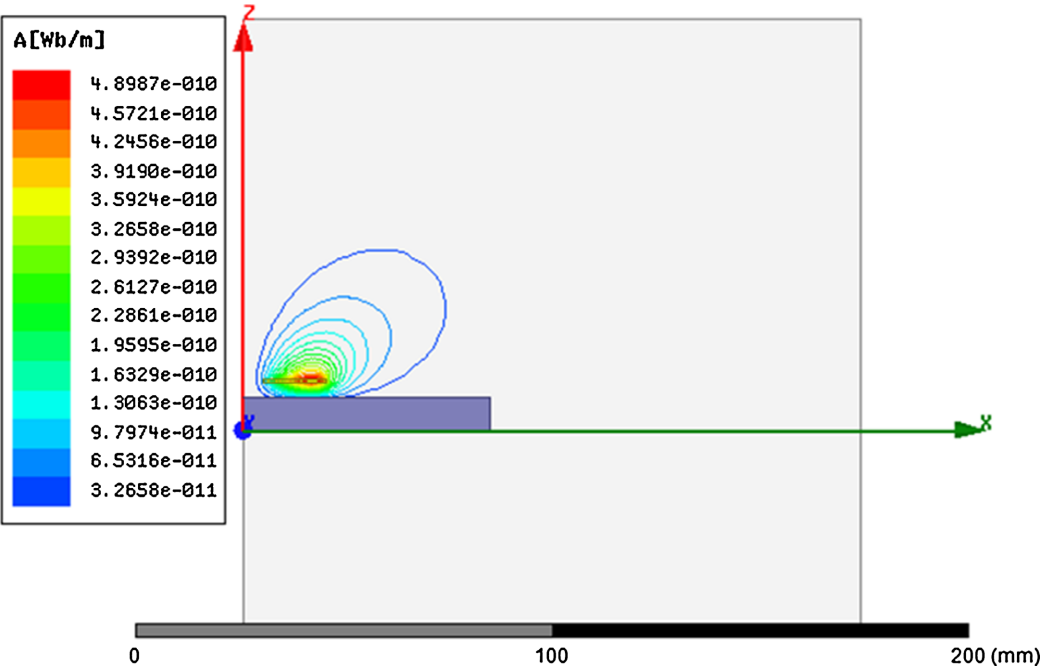


Figure 2. Simulation diagram of magnetic field line distribution of a single eddy current sensor
图 2. 单个电涡流传感器的磁力线分布仿真图

将感应盘中的涡流密度在表面路径映射，可以得到电涡流的密度沿感应盘表面径向的分布曲线，如图 3 所示。横坐标为感应盘上的点距线圈中轴线的径向距离，纵坐标为电涡流密度值。可以看到电涡流密度先随着径向距离的增大而快速增大，最大值出现在线圈的平均直径附近，当增大到最大值后开始慢慢变小，最终趋于零。

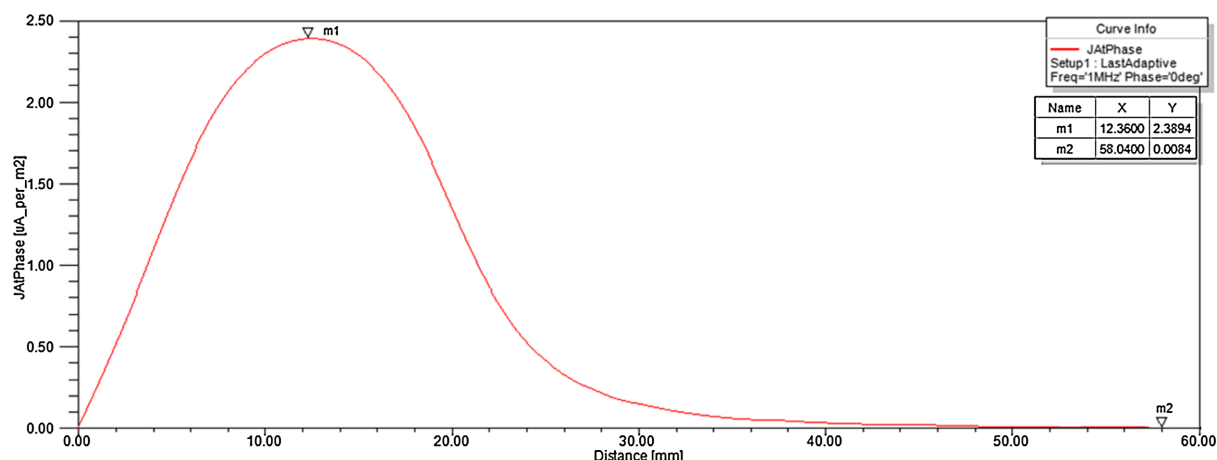


Figure 3. Distribution of eddy current density in the induction disk from the central axis of the coil

图 3. 感应盘中电涡流密度离线圈中心轴线距离的分布图

在完成点电涡流传感器的涡流场分析后,运用 Maxwell 3D 涡流场实现涡流场的仿真。如图 4 所示,与 Maxwell 2D 涡流场仿真的结果进行比较,三维仿真的结果能更加直观地显示磁力线的分布。结合图 5,图 6,可以看出最大直径的被校准电涡流传感器探头线圈在标定盘上产生的磁力线分布没有超出标定盘的范围,符合设计要求。

以上对电涡流在感应盘上分布规律的分析及仿真,能够为校准装置中的感应盘和传感器安装板的设计提供基础。在设计传感器安装板上安装孔的间距时,一方面要考虑感应盘上各个传感器电涡流的分布,另一边要保证操作空间,便于测试人员的安装调试。经过计算,在距线圈中轴线 35 mm 处电涡流密度已经衰减到很小,此时不同传感器所产生的电涡流之间的影响可以忽略,该距离为传感器的安全间隔。基于以上考虑将感应盘表面的直径取整为 200 mm,通过传感器的合理布置设计安全间隔为 38 mm,此时传感器之间的电涡流不会有相互影响,并且传感器和感应盘边界的距离也符合要求。另外根据电涡流密度的轴向分布,设计感应盘的厚度为 2 mm。根据图 6 设计传感器在感应盘的安装位置。安装孔 1 和

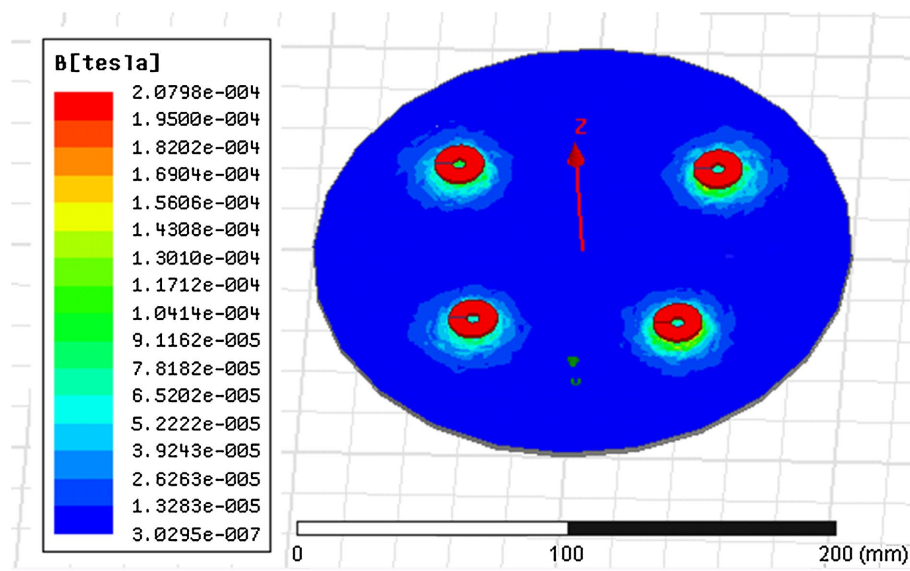


Figure 4. Magnetic induction intensity distribution on the induction disk

图 4. 感应盘上磁感应强度分布图

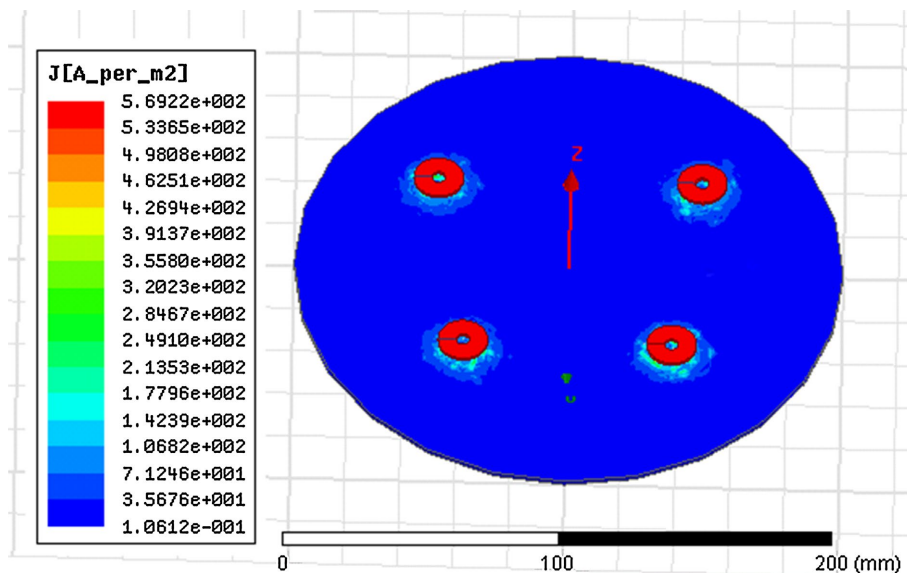


Figure 5. Eddy current density distribution on the induction disk

图 5. 感应盘上电涡流密度分布图

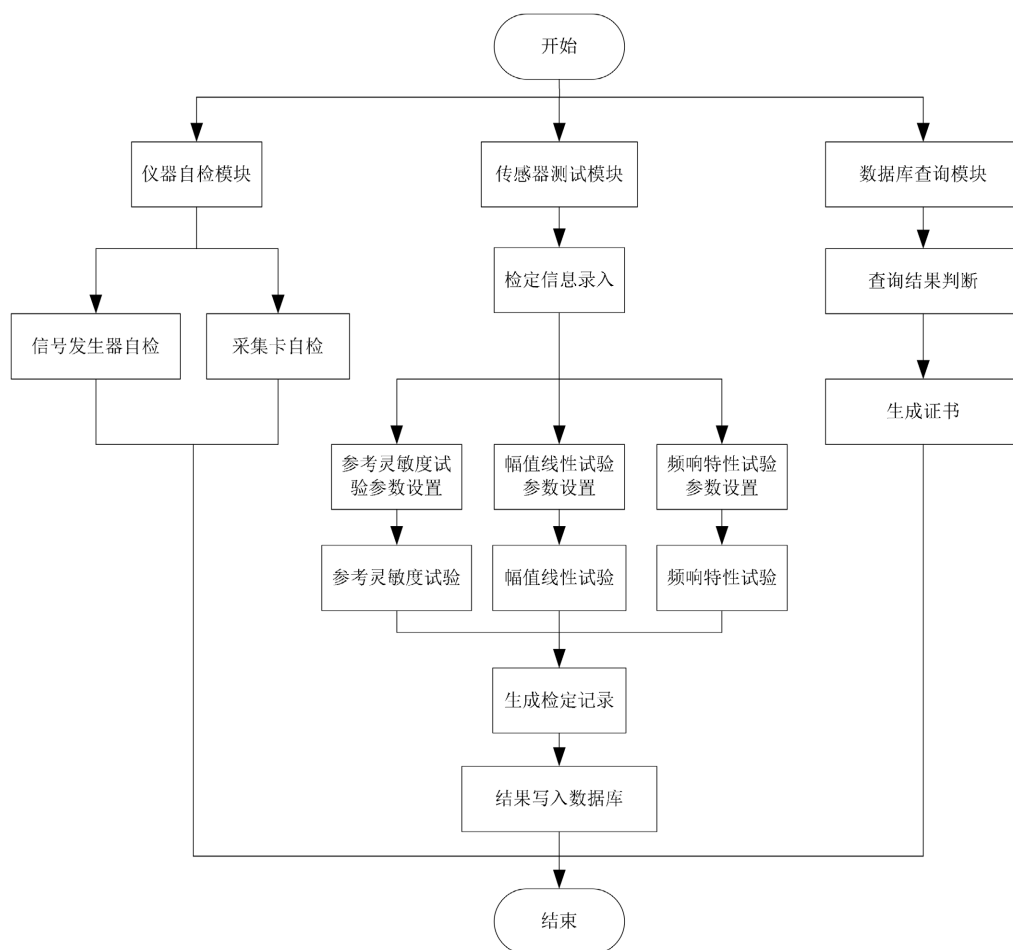


Figure 6. Block diagram of the calibration system

图 6. 校准系统结构框图

2 由于离联接孔较远, 设计两安装孔的距离为 76 mm, 安装孔 3 和 4 由于离联接孔比较近, 为了方便传感器的安装, 将两孔之间的距离设计为 96 mm, 同时将孔 1、2 和 3、4 连线之间的距离设计为 76 mm, 此时传感器安装孔 3 和 4 距离感应盘边缘的距离为 38.78 mm, 符合设计要求。

3.3. 电涡流传感器多路校准系统软件设计

电涡流传感器多路测试系统主要包括仪器自检模块、检定信息录入模块、试验参数设置模块、生成检定记录模块、结果写入数据库、数据库查询模块和生成证书模块[7]。电涡流传感器多路测试软件的结构框图如图 6 所示。

仪器自检模块主要功能是针对电涡流校准测控仪进行检查, 以保证信号发生器和数字采集卡功能均正常。检定信息录入: 传感器通道选择、录入送检单位、实验室环境参数、检定员、电涡流型号与编号等信息。试验参数设置, 依次设置电涡流传感器检定过程中的参考灵敏度、幅值线性和频响特性试验的具体参数。生成检定记录: 将“检定信息录入”中的信息与测试结果写入检定记录中, 并以 Excel 文档的形式自动保存到计算机硬盘中。结果写入数据库, 测试数据将保存在 ACCESS 数据库中, 并可以对其进行查询。数据库查询模块通过输入的查询条件, 查找出满足条件的检定记录, 并可以打开该检定记录。生成证书是根据国家计量检定规程中的标准, 自动判断出测试数据中是否有超差点, 并据此生成检定证书、校准证书或者检定结果通知书。

电涡流传感器多路测试系统的运行平台为 LabVIEW2009。操作系统采用 Windows 系统, 在 Windows 系统中对软件进行功能测试, 结果表明该测控软件能够完成电涡流传感器的校准任务。

4. 实验验证

电涡流传感器多路动态校准时, 每个传感器都会在感应盘上产生电涡流, 若多个电涡流相互之间有干涉, 会对灵敏度的校准精度有影响。在设计安装板上多个电涡流传感器的安装距离时, 已经考虑到电涡流相互之间的影响, 下面通过测试的手段来分析多个电涡流传感器之间有没有相互影响。从 40~160 Hz 逐点对传感器的频率响应进行测试, 实验数据如下表 2。

Table 2. Experimental data
表 2. 实验数据

频率/Hz	传感器 1	传感器 2	传感器 3	传感器 4	标准传感器	偏差/%
40	7.85	7.91	7.91	7.89	8.00	0.76
50	8.01	7.94	7.96	8.03	8.00	0.87
60	7.93	7.97	7.97	7.96	8.00	0.50
80	7.98	7.99	7.99	7.99	8.00	0.13
100	7.95	7.96	8.00	7.97	8.00	0.63
120	7.98	8.01	8.01	8.00	8.00	0.37
140	8.03	8.07	8.06	8.05	8.00	0.50
160	8.11	8.11	8.12	8.12	8.00	0.12

考虑到测试过程中的随机误差, 各个频率点多个电涡流传感器之间几乎没有影响, 最大偏差为 0.87%, 所以多路动态校准在提高校准效率的同时, 确保了校准精度。电涡流传感器多路动态校准系统的设计满足使用要求。

5. 结论

本文对电涡流传感器多路校准系统的夹具进行了设计, 单次可以安装四个电涡流传感器, 同时对感应盘的电涡流进行了仿真。对电涡流传感器的多路动态校准进行了实验研究。分析了多个传感器在校准过程中的相互影响, 研究了传感器倾斜安装后对灵敏度校准的影响。选取四个电涡流传感器, 安装在多路动态校准夹具上, 在设计频带内校准了传感器的灵敏度。实验结果表明校准夹具和多路动态校准软件的设计符合指标要求。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘艳华, 赵光, 李洪洲, 等. 加速度和电涡流传感器的现场动态校准[J]. 设备管理与维修, 2016(8): 47-47+56.
- [4] 徐祥, 周鑫, 周恒继. 电涡流传感器动态校准装置磁场分析[J]. 建模与仿真, 2018, 7(1): 1-7.
- [5] 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.
- [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.