

基于FPGA的电涡流传感器静动态校准控制系统设计

李 迪, 王文浩, 徐 祥*

红塔烟草(集团)有限责任公司, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月15日; 发布日期: 2025年12月30日

摘 要

电涡流传感器作为一种非接触检测传感器被广泛的应用于工业生产。当使用一段时间后, 电涡流传感器可能会因为老化或者其他环境因素的影响, 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, 以保证电涡流传感器的检测精度。目前国内对于电涡流传感器的静态校准和动态校准均是独立研究, 且校准自动化程度低。本文运用FPGA软件设计了一套电涡流传感器静动态一体化校准控制系统, 有效地实现了电涡流传感器静态校准与动态校准的集成, 提高了电涡流传感器校准的效率。

关键词

电涡流传感器, 静态校准, 动态校准, FPGA

Design of Static and Dynamic Calibration Control System for Eddy Current Sensor Based on FPGA

Di Li, Wenhao Wang, Xiang Xu*

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

Received: November 11, 2025; accepted: December 15, 2025; published: December 30, 2025

Abstract

Eddy current sensors are widely used in industrial production as non-contact detection sensors.

*通讯作者。

文章引用: 李迪, 王文浩, 徐祥. 基于 FPGA 的电涡流传感器静动态校准控制系统设计[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 802-808. DOI: 10.12677/iae.2025.134097

After a period of use, eddy current sensors may experience significant errors or even erroneous readings due to aging or other environmental factors. Therefore, regular dynamic or static calibration is necessary to ensure the detection accuracy of eddy current sensors. Currently, static and dynamic calibration of eddy current sensors in China are conducted independently, and the degree of automation is low. This paper designs an integrated static and dynamic calibration control system for eddy current sensors using FPGA software, effectively integrating static and dynamic calibration and improving the efficiency of eddy current sensor calibration.

Keywords

Eddy Current Sensor, Static Calibration, Dynamic Calibration, FPGA

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

随着微细加工技术和自动化控制的广泛应用和发展,对于加工与控制过程中的检测精度提出了更高的要求。电涡流传感器作为一种被广泛应用的检测工具,对其校准的精度和效率的要求也越来越高。国内外对电涡流传感器静态与动态的自动校准系统做了很多相关的研究。目前国内外对电涡流传感器动静特性一体化自动校准方面的研究都取得了很大的进展,国外在电涡流传感器的静态校准与动态校准的技术都相对成熟,自动化程度和校准精度较高,但国外对电涡流传感器静态校准方面的研究主要集中在高精度、小量程范围内的校准,并且静态校准与动态校准在各自独立的装置上实现,不利于校准效率的提高。国内在电涡流传感器静态校准和动态校准方面的研究逐步地实现从手动向自动化水平发展,校准精度方面也逐步的接近并达到国际先进水平[1],但同样,国内对电涡流传感器静态校准和动态校准在各自独立的校准装置上完成。

2. 电涡流传感器校准装置工作原理

电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置需要完成电涡流传感器的静态校准和动态校准,校准装置的静态与动态工作模式可由上位机根据具体的被校传感器类型进行选择,如图1所示。

电涡流传感器静态校准部分由步进电机及其控制模块、滚珠丝杠、滚动导轨、传感器夹具、光栅尺、传感器信号采集模块和上位机软件系统组成[2]。进行电涡流传感器静态校准时,首先通过上位机设置电涡流传感器的推荐电压/电流及测试点等参数,下位机控制系统根据上位机设定的传感器的推荐电压/电流值,自动地找到被校准传感器的最佳安装位置,并对校准装置进行清零。下位机控制系统以直线光栅尺的位移信号作为反馈对步进电机进行控制,并以被校准传感器的安装位置为校准起始点,在传感器测量范围内通过直线光栅尺和传感器输出采集模块分别对各个测试点传感器的位移和输出进行测量。通过上位机软件系统对测量的位移和传感器输出信号进行处理计算被校准传感器的静态灵敏度、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,其具体工作流程如图2(a)所示。

电涡流传感器动态校准部分由标准振动台、标准加速度计套组、信号发生器、功率放大器、数据采集器、数据存储器和上位机软件系统组成。进行电涡流传感器动态校准时,首先通过上位机设置电涡流传感器的推荐安装电压/电流及信号发生器的频率和幅值等参数,下位机控制系统根据上位机设定的传感器的推荐电压/电流值,自动地找到被校准传感器的最佳安装位置,并对校准值进行清零。信号发生器产

生指定频率和幅值的正弦信号输出给功率放大器，缓慢地调节功率放大器的增益，并实时地通过标准传感器的输出，计算振动台的振级，使振动台的振级逐步达到目标振级。信号采集模块同步采集标准传感器的输出和被校准传感器的输出，通过比较被校准电涡流传感器与标准传感器的输出来计算被校准电涡流传感器的灵敏度。电涡流传感器具体工作流程如图 2(b)所示。

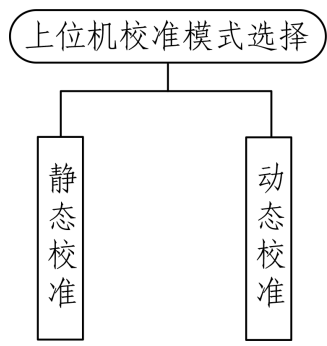


Figure 1. Selection of calibration mode for eddy current sensor
图 1. 电涡流传感器校准模式的选择

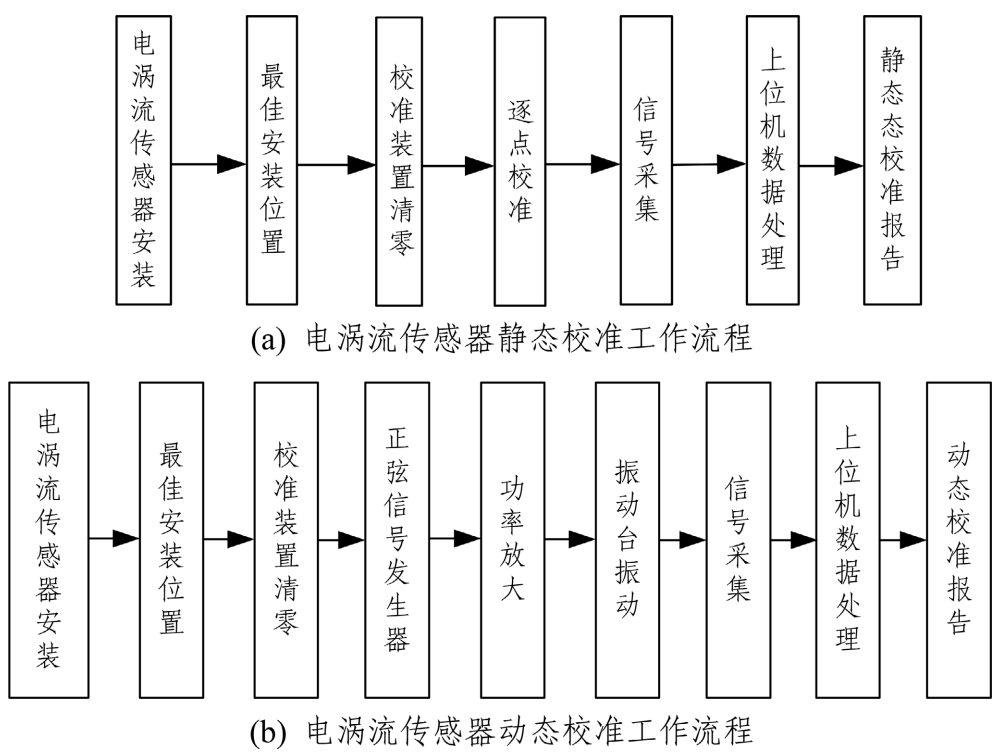


Figure 2. Workflow of the lower-level control system for the integrated automatic calibration device for the dynamic and static characteristics of eddy current sensors
图 2. 电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置下位机控制系统工作流程

3. 校准装置的组成

机械系统部分、下位机控制系统和上位机软件系统组成了电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置的总体结构。其中机械系统其主要功能是作为电涡流传感器动静特性一体化自动校准的执行机构，在静态校准中保持感应盘静止，传感器有规律的运动，动态校准中保持传感器静止，感应盘做标准正弦

振动，因此机械系统包括静态校准结构和动态校准结构。下位机控制系统的功能是完成运动的控制和信号的采集，包括步进电机控制模块、位移测量模块、信号发生器、数据采集器、数据存储器 and 通讯模块。上位机软件系统的功能是实现与下位机控制系统的通讯，完成指令的发送，数据的接收、处理及保存，同时可实现对控制精度的修正和装置运行状态的监测[3]。下位机软件系统主要包括数据发送模块、数据接收模块、控制修正模块和数据处理模块。校准装置的组成如图 3 所示。

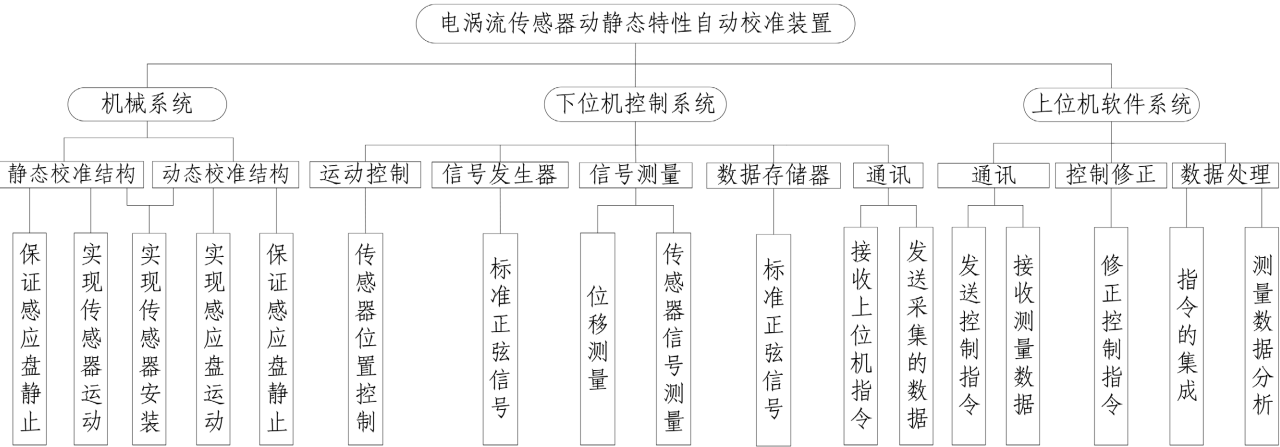


Figure 3. Composition and structure of the integrated automatic calibration device for the dynamic and static characteristics of eddy current sensors
图 3. 电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置组成结构

4. 校准装置控制系统设计

要提高电涡流传感器静态与动态校准的自动化程度，需要为校准装置设计一个下位机控制系统。下位机控制系统主要完成的功能是实现与上位机软件系统的通讯，控制步进电机运行，对传感器位移信号和输出信号的测量，以及对数据的存储，最后将数据传送给上位机。根据下位机控制系统所需完成的不同功能，完成了步进电机控制模块、位移采集模块、信号发生器模块、数据采集模块、数据存储器以及通讯模块的设计。本章围绕着对控制系统各功能模块的设计展开。

4.1. 控制系统总体结构

电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置的控制系统中各模块组成的总体结构框图如图 4 所示。传感器位置控制通过对步进电机驱动器的控制来实现。通过对步进电机驱动器脉冲信号和方向信号的控制实现对被校准传感器位置的控制。信号发生器通过 FPGA 的 NCO (数字控制振荡器) IP 核产生所需的数字信号，经过数模转换芯片 DAC8820 获得所需的模拟信号。信号采集由于在动态校准过程中数据量大、数据采集的速率高，因此选用 24 位高精度的 ADS1271 芯片完成。通过 ADS1271 采集的数据由于速率过高，通过普通的串口无法实时地将数据传送给计算机，因此设计了一个 SDRAM 数据存储器，该存储器是基于 HY57V641620 芯片完成的。通讯模块选用的是简单可靠的 RS232 串口通讯来实现。

4.2. 静态校准控制系统的设计

电涡流传感器静态校准部分下位机控制系统主要完成步进电机的控制和被校准传感器位移测量。

(1) 步进电机控制

在电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置的设计中，步进电机主要用于在静态校准中驱动被

校准传感器按照国家计量检定规程 JJG 644-2003 规定的运动规律做直线运动。步进电机控制模块是通过
对步进电机驱动器的控制来实现运动控制的。步进电机驱动器的控制信号为步进脉冲信号、方向控制信
号和电机使能信号。电机使能信号在电机上电后一直有效，因此只需对步进脉冲信号和方向信号进行控
制来实现对驱动器的控制。将步进电机控制模块的设计分为计数比较器中、分频器、计数器和计时器的
设计[4]，其组成如图 5 所示。

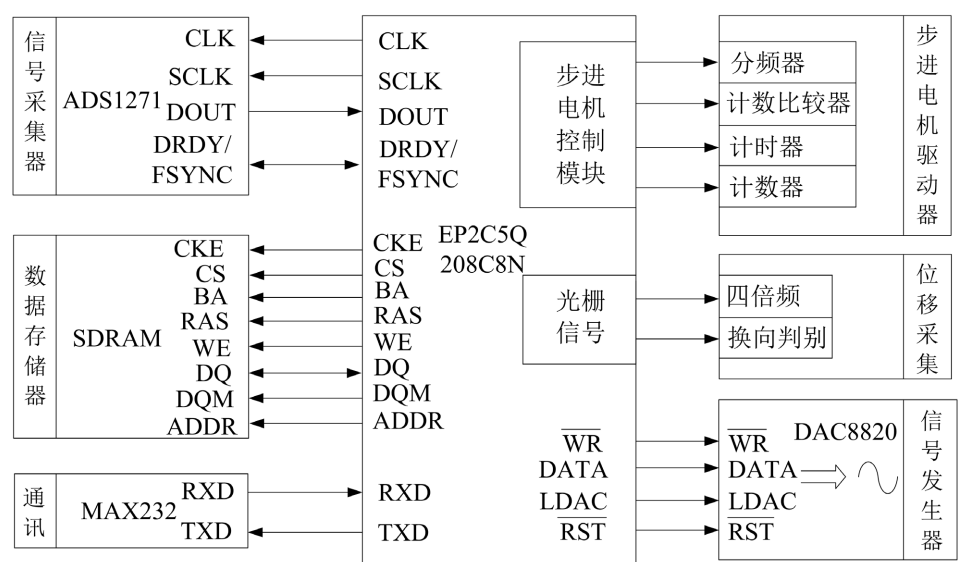


Figure 4. Overall structural block diagram of the lower-level control system
图 4. 下位机控制系统总体结构框图

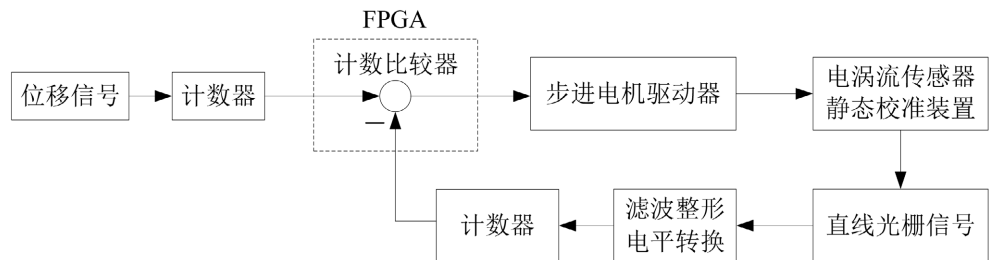


Figure 5. Block diagram of the fully closed-loop control system
图 5. 全闭环控制系统原理框图

(2) 位移测量模块设计

被校准传感器的位移信号是其实现校准的主要参数，同时需要作为步进电机控制模块的反馈信号，
因此对其精度具有较高的要求，本设计中选用了位移分辨率为 0.1 的直线光栅传感器，以满足本装置中 5
的位置控制精度和 3 的位移测量精度要求。

4.3. 动态校准控制系统的设计

电涡流传感器动态校准部分下位机控制系统的设计主要包括标准振动台振级的控制技术、频率和幅
值可调的正弦信号发生模块的设计、数据采集模块的设计、数据存储模块的设计以及与上位机实现通讯
的串口通讯模块的设计。本装置采用的是比较法实现电涡流传感器的动态校准，标准加速度计套组选用
国际通用的 B&K 公司的 3506 套组，包括标准加速度计 8305 以及电荷放大器 2525，该套组在完成绝对

法校准后可以满足技术指标的要求[5]。电涡流传感器动态校准的组成如图6所示。

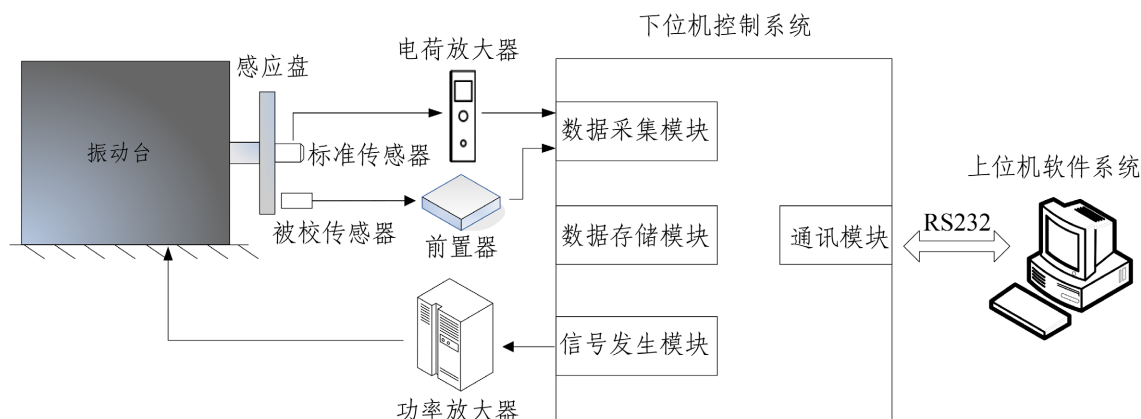


Figure 6. Composition of the dynamic calibration system for the eddy current sensor

图6. 电涡流传感器动态校准系统组成

电涡流传感器动态校准是通过振动校准实现的, 根据国家振动与冲击计量标准的要求, 振动传感器的校准需要在规定的频率和振级范围内进行, 以保证校准结果的一致性和精度。所以, 在设计自动校准系统的时候, 需要解决如何把振动台调整到规定的频率和振级的问题。解决这一问题, 需要对振级调整的控制算法进行研究。本文采用逐次逼近法实现对标准振动台振级的控制[6]。其基本控制流程如图7所示。具体调整过程如下:

- (1) 设定试验振级和试验频率, 并给信号发生器设定初始频率和电压。
- (2) 信号发生器产生的初始正弦信号经功率放大器放大后驱动标准振动台振动。

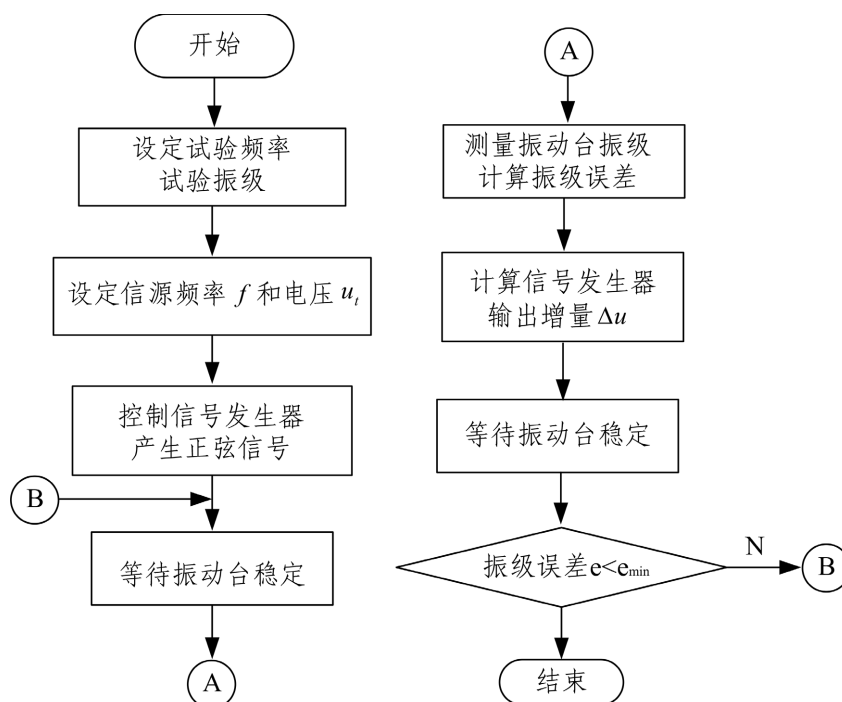


Figure 7. Flowchart of vibration table vibration level adjustment

图7. 振动台振级调整流程图

(3) 等待标准振动台稳定后,通过标准传感器输出得到振动台当前振级。并比较当前振级与设定振级的偏差。

(4) 以设定步长逐次递增信号发生器发出信号的幅度,直到振动台稳定在预定振级。

5. 结论

本文对电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置控制系统进行设计,论述主要按照下位机控制系统的各功能模块的设计展开,完成的主要工作有:

(1) 设计了电涡流传感器动静特性一体化校准装置的下位机控制系统总体结构框架,包括静态校准部分,动态校准部分控制系统和与上位机实现通讯的通讯模块设计。

(2) 设计了静态校准部分下位机控制系统。设计了步进电机控制模块和位移测量模块。

(3) 设计了动态校准部分控制系统。介绍了标准振动台振级调整方法和电涡流传感器动态校准系统的组成。

参考文献

- [1] 王志鹏. 超低频振动校准装置自动测控系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [2] 李根. 数显式测振仪自动校准系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [3] 王春宇. 超低频标准振动台相关设计理论及运动控制技术的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] 李大社. 基于 Quartus II 的 FPGA/CPLD 设计实例精解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 154-156.
- [5] 刘东华. Altera 系列 FPGA 芯片 IP 核详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 265-266.
- [6] 李海平, 孔祥成. FPGA 的 UART 设计和实现[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(2): 199-203.