

电涡流传感器自动校准系统中的进给装置设计

夏 睿, 蒋丽娜, 李艳芳, 陈俊志, 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18日; 录用日期: 2025年12月20日; 发布日期: 2025年12月31日

摘要

针对传统手动校准电涡流传感器的局限性, 本论文提出了一种自动校准电涡流传感器的方法, 研究设计了一套自动进给装置。首先, 介绍了电涡流传感器的基本工作原理及其校准的方法, 然后设计了进给机构的方案。介绍了各种进给机构的类型, 然后从众多进给机构中选取比较合适的进给机构作对比。通过对比分析进给机构的各项数据指标。最后完成了电涡流传感器自动校准系统中的进给装置的设计。

关键词

电涡流传感器, 静态校准, 进给机构, 结构设计

Design of Feeding Device in Automatic Calibration System for Eddy Current Sensors

Rui Xia, Lina Jiang, Yanfang Li, Junzhi Chen, Xiang Xu*

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

Received: November 18, 2025; accepted: December 20, 2025; published: December 31, 2025

Abstract

Addressing the limitations of traditional manual calibration of eddy current sensors, this paper proposes an automatic calibration method for eddy current sensors and designs an automatic feeding device. First, the basic working principle of eddy current sensors and their calibration methods are introduced. Then, a feeding mechanism scheme is designed. Various types of feeding mechanisms are introduced, and a suitable feeding mechanism is selected for comparison. The data indicators of the feeding mechanisms are analyzed through comparison. Finally, the design of the feeding device in the automatic calibration system for eddy current sensors is completed.

*通讯作者。

Keywords

Eddy Current Sensor, Static Calibration, Feeding Mechanism, Structural Design

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

在现代化生产过程中，电涡流传感器作为一种重要的检测元器件得到了广泛的应用。电涡流传感器是一种非接触式检测传感器，在使用过程中由于组成元器件的老化等因素，其检测精度会发生变化，因此为了保证电涡流传感器的检测精度，需要定期地对电涡流传感器进行校准，一般校准周期为一年。目前对于电涡流传感器的静态校准很多都还停留在手动校准阶段，校准效率低，容易出错。本文设计开发了一套电涡流传感器自动校准系统中的进给装置，能够有效地提高电涡流传感器校准的效率与精度。

2. 研究背景和意义

电涡流传感器的工作原理如下：一块金属放置在一个扁平线圈附近，相互并不接触，如图 1 所示。当线圈中通过高频正弦交变电流时，线圈周围的空间就产生交变磁场，此交变磁场在邻近金属导体中产生电涡流。而此电涡流也产生交变磁场阻碍外磁场的变化。由于磁场的反作用，使线圈中电流和相位都发生变化，从而引起线圈的等效阻抗发生变化，线圈的电感量也发生变化[1]，因此可用线圈阻抗的变化来反映金属导体的电涡流效应。

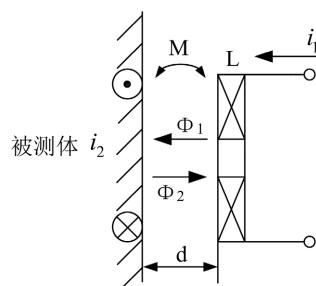


Figure 1. Schematic diagram of the working principle of the eddy current sensor

图 1. 电涡流传感器工作原理图

电涡流传感器的最大特点是非接触测量，这是它引起广泛兴趣的主要原因，其优点是灵敏度高、结构简单、抗干扰能力强、不受油污等介质的影响等。

在利用电涡流传感器测量位移时，激磁线圈与涡流体之间的距离的变化引起涡流强度的变化。对于金属涡流体(如铁块)，当线圈自由放置时，线圈中电感最大，谐振频率最低，输出最大。随着距离的减小，涡流逐渐增强，电感减小，从而使谐振频率增高，于是输出幅值下降。当距离减小为 0 时，根据涡流的趋肤效应，输出应该为 0。然而，由于被测物体表面的不平度，常常有一个零输出值。

测量位移的原理图如图 2 所示。电涡流传感器的金属导体可看作一个短路线圈，它与通电扁平线圈磁性相连。当两线圈间的距离变化时，其间的互感量与电感量都要发生变化，由涡流变换器(放大器、检波器、滤波器的组合)转换为电量输出。

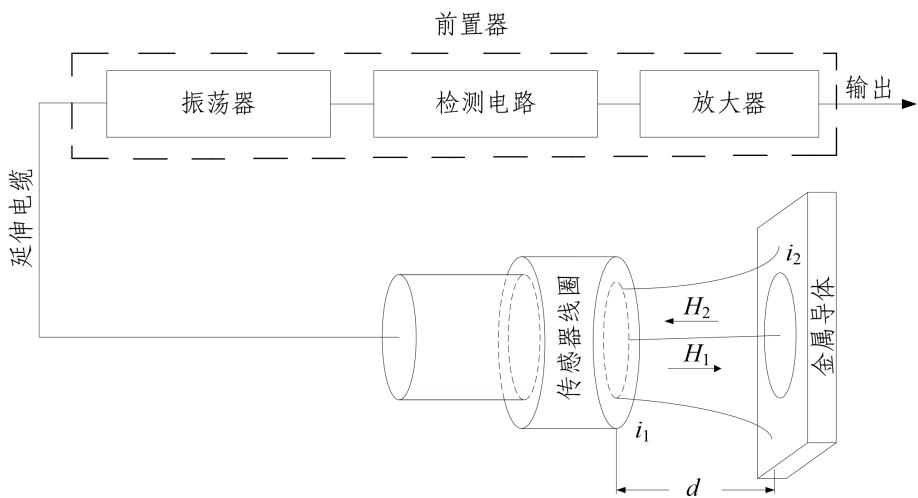


Figure 2. Displacement measurement principle of eddy current sensor
图 2. 电涡流传感器测量位移原理

利用电涡流传感器也可以测量振动、表面镀层厚度、表面不平度等。被测体的电导率、磁导率对传感器的灵敏度都有影响；若被测体表面有镀层，镀层性质和厚度不均匀也会影响测量精度；灵敏度还与被测体的大小和形状有关。因此，在利用电涡流传感器测量不同的量时，应采取不同的措施，提高测量的精度[1]。

3. 电涡流传感器静态校准

目前国内电涡流传感器生产厂家和技术监督部门都是采用人工标定，测试精度和效率有限，仅采用11个左右测试点，而线性段起点也全凭经验值确定。手动调节的缺点是：不能够保证移动准确的位移量；存在人为误差；校准的效率比较低。这样，就增大了校准的误差。如果校准误差过大，会使电涡流传感器在位移测量过程中失去其原有的作用，不能准确测量位移。

3.1. 手动校准

北京测振仪器厂电涡流传感器静态标定在静标台上进行，被测传感器固定，利用外径千分尺带动测试盘来实现手动微位移，加装导向键防止测试盘在移动过程中旋转，机械结构如图3所示。

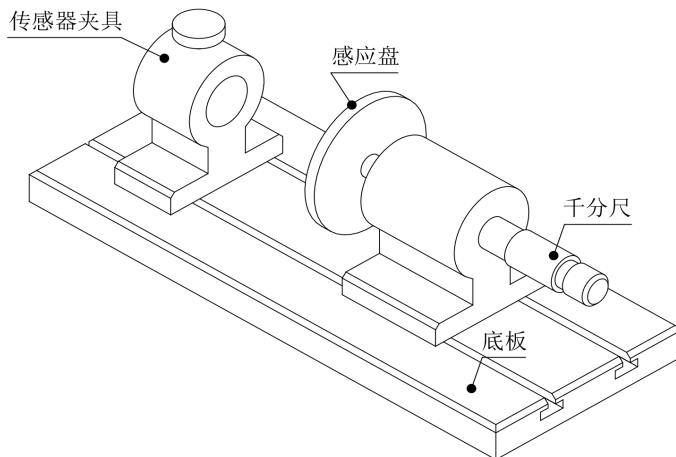


Figure 3. Schematic diagram of the manual calibration station
图 3. 手动校准静标台结构示意图

以 $\varphi 8$ (2 mm) 传感器为例, 传感器固定在支架上, 标定理论起始电压为 3 V, 将测试盘靠近传感器, 然后缓慢离开, 到输出电压值略大于 3 V, 作为标定起始“0”点, 记录对应电压值。

国家计量检定规程 JJG644-2003 对电涡流传感器的检测进行了规定。具体要求如下: 改变电涡流传感器位移以每 10% 量程为 1 个测量点, 在整个测量范围内, 包括上、下限值共测量 11 个点, 顺序在各个测量点测量传感器的输出电压和传感器的移动距离, 以上、下两个行程为一个测量循环, 称为一个测回。一共测量 3 个循环, 采用最小二乘法计算输出特性即电压与位移的比例值[2]。

为模拟传感器的实际工作环境, 我们在常温、连接电缆拉直的工况的环境下, 对其进行静态校准。

- (1) 将待校传感器固定在标定台上, 使传感器探头与被测物间距离 $d=0$, 对应的螺旋规刻度指示为零;
- (2) 连接好电缆及测试仪器后, 接通电源;
- (3) 记录 $d=0$ 时的电压表指示值, 然后旋动螺旋规, 使钢靶块沿轴向平移, 每移动 20 丝, 稳定 3 分钟后, 读取数字电压表值, 直至 d 增加, 而数字电压表值不变为止;
- (4) 为检查传感器有无滞止现象, 从位置开始, 往回移动靶块, 每移动 20 丝, 记录一次数字电压表值, 直至 $d=0$ 为止;
- (5) 计算电平, 并以此作线性拟合处理的基本数据, 根据, 通过计算机绘制出传感器校准曲线和线性方程, 以便于应用[3]。

3.2. 自动校准

北京化工大学的王天娜硕士提出了一种电涡流传感器的自动静校准方法[4]。该校准方法是建立在第一种手动校准装置的基础之上的, 最大的改进是在原有的基础之上把手动旋转千分尺的功能改为由步进电机来带动千分尺的旋转。该装置的结构原理图如图 4 所示。

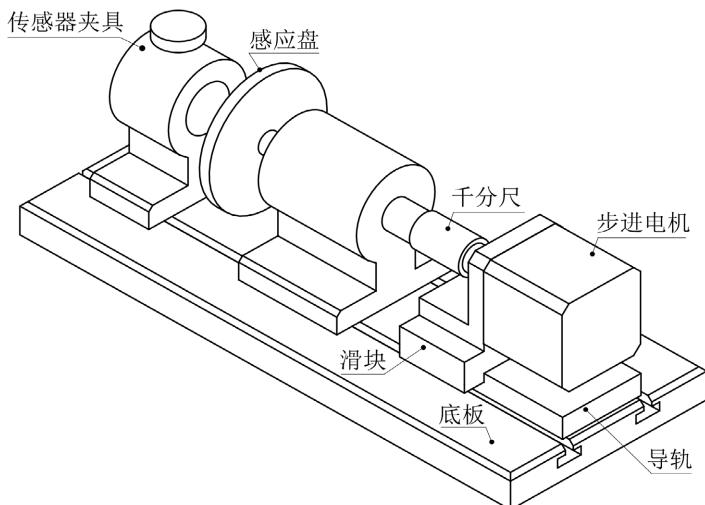


Figure 4. Automatic static calibration device for eddy current sensor

图 4. 电涡流传感器自动静校准装置

由于千分尺的旋钮在旋转时相对于固定基座会有轴向的移动, 所以该装置中设计了一个导轨滑块, 步进电机安装在滑块上, 这样步进电机在带动千分尺旋转时, 也会使自身相对于千分尺的基座做轴向的移动。在该装置中, 设计者选用了步距角为 1.5° 的步进电机, 步进电机在该装置中起驱动感应盘沿轴向运动的作用, 而对于位移量的读取依然需要从千分尺上读得。后来北京化工大学的丁美莹硕士在上述的步进电机驱动的基础之上, 又给步进电机增加了一个编码器, 使得对于位移量的读数直接可以从编码器上

读得,使电涡流传感器自动静态校准装置的研制更加前进了一步[5]。

4. 电涡流传感器自动校准系统中的进给装置的设计

电涡流传感器的静态校准过程目前采用人工操作、记录的方式进行,效率低、出错率高。这里是一种用于电涡流传感器的自动静态校准装置,工作原理见图5。本装置主要由机械系统(包括基座、导轨、滑台和滑块、试件、传感器支座等)、运动控制系统(包括伺服电机、控制器、光栅位移传感器及其二次仪表等)、测量系统(包括数字电压表(用户提供)、接口卡等)、计算机系统(包括测控软件)等。工作时,首先将电涡流传感器安装到紧贴试件位置上,然后由计算机系统控制运动控制系统将试件运动到离传感器探头合适位置,并控制光栅位移传感器上传精确的位移值,控制数字电压表读得被校传感器输出电压值,经计算机系统计算得到传感器的灵敏度指标。计算机系统中的控制软件可以根据用户设定的参数对被校传感器进行一系列自动校准,最后可将结果打印输出或保存文档。

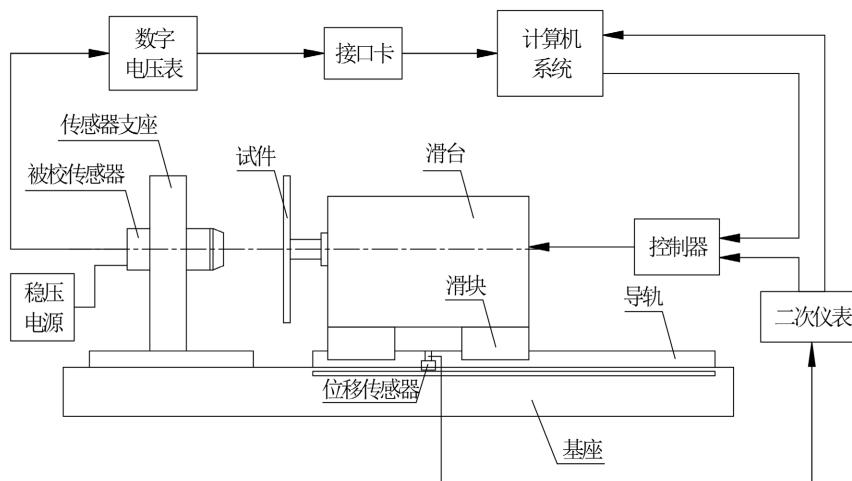


Figure 5. Schematic diagram of static calibration of eddy current sensor
图5. 电涡流传感器静态校准原理图

该进给装置有如下技术要求:(1) 实现平移台的行程达到 50 mm,其分辨率达到 0.01 mm;(2) 保证丝杆和滑块之间为 0 间隙配合;(3) 能够承受 4 KG 以上承载物的压力。

4.1. 导轨的选型

在摩擦力、定位精度、寿命、静态刚度、速度、维护和可靠性等方面,滚动式导轨及滑动式导轨都存在比较大的差异。表1是滚动式导轨及滑动式导轨一般特性的比较。

Table 1. Comparison of general characteristics of rolling guides and sliding guides
表1. 滚动式导轨及滑动式导轨一般特性的比较

| 性能项目 | 滚动式导轨 | 滑动式导轨 |
|------|---|---|
| 摩擦力 | <ul style="list-style-type: none"> 摩擦系数在 0.01 以下 静态和动态摩擦差异小 速度引起的变化小 | <ul style="list-style-type: none"> 摩擦大 静态和动态摩擦差异大 |
| 定位精度 | <ul style="list-style-type: none"> 空载小 卡死滑行小 亚微米尺寸定位容易 | <ul style="list-style-type: none"> 空载大 低速时的卡死滑行大 亚微米尺寸定位困难 |

续表

| | | |
|--------|---|--|
| 寿命 | <ul style="list-style-type: none"> 可预测寿命 | <ul style="list-style-type: none"> 寿命预测困难 |
| 静态刚度 | <ul style="list-style-type: none"> 一般较高 因施加预紧而无间隙 容易预测刚度 | <ul style="list-style-type: none"> 单向负载刚度大 有间隙 刚度预测困难 |
| 速度 | <ul style="list-style-type: none"> 可以在低~高速很宽的速度范围内使用 | <ul style="list-style-type: none"> 不适宜超低速、高速 |
| 维护和可靠性 | <ul style="list-style-type: none"> 简单的维护可保证长的寿命 | <ul style="list-style-type: none"> 导轨面劣化会严重降低精度 |

由于本文设计的平移台需要较高的刚度、导向精度以及定位精度，而经过上述比较，滑动式导轨已经无法满足本课题的需求，所以我们选用滚动式导轨。经过调查研究，我们选用 NSK 直线导轨。其具体尺寸要求为 $60 * 10 * 4 \text{ mm}$ 。

4.2. 驱动电机的选择

电涡流传感器的自动进给需要电机的驱动来完成。下面介绍一下伺服电机和步进电机，并对这两种电机作对比，以此选择出本系统所需的驱动电机。

伺服电机是指在伺服系统中控制机械元件运转的发动机，是一种补助马达间接变速装置。伺服电机可使控制速度、位置精度非常准确，可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象。伺服电机转子转速受输入信号控制，并能快速反应，在自动控制系统中，用作执行元件，且具有机电时间常数小、线性度高等特性，可把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。伺服电机分为直流和交流伺服电动机两大类，其主要特点是：当信号电压为零时无自转现象，转速随着转矩的增加而匀速下降。

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制的电机。在非超载的情况下，电机的转动、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，而不受负载变化的影响。当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度，称为“步距角”，它的旋转是以固定的角度一步一步运行的。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。

根据比较，步进电机的控制精度、过载情况和运动能力都满足了本课题设计的需要。就价格而言，步进电机要比伺服电机低得多。而且，一般来说，低负载、低速度的场合，高细分的步进电机性能比交流伺服电机要好。

综上所述，我们选择步进电机。本课题选用的是日本三洋的两相混合式步进电机。它在整步工作时每转一圈走 200 步，半步工作时每转一圈走步为 400 步。

4.3. 丝杆尺寸计算和设计

由于之前要求平移台位移的分辨率为 0.01 mm ，而两相混合式步进电机驱动每个脉冲所走的最小角度为：

$$c = c_0/n = 360^\circ/400 = 0.9^\circ$$

则丝杆的导程最小为：

$$d = 0.01 * 400 \text{ mm} = 4 \text{ mm}$$

由于平移台的运动行程为 50 mm ，则丝杆的行程需要比平移台的行程长，定为 55 mm 。又由于丝杆需要定位和安装，丝杆的总长需要加上这些尺寸，最终，丝杆的尺寸为： $\varphi 10 * 105 \text{ mm}$ 。丝杆的结构示意图如下图 6：

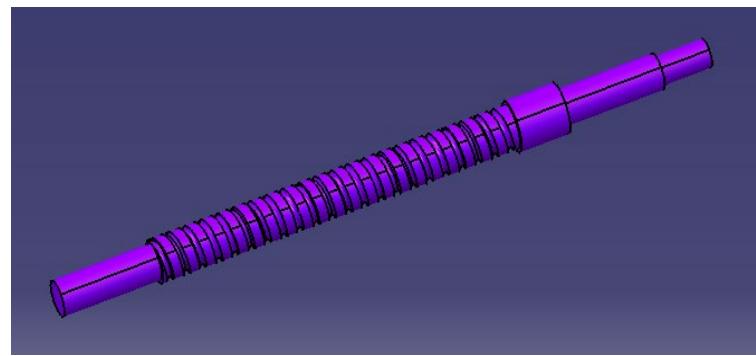


Figure 6. Schematic diagram of the lead screw structure

图 6. 丝杆结构示意图

4.4. 微进机构的搭建

经过了对滚动导轨、驱动电机和执行机构的选型和设计后搭建了电涡流传感器静态自动校准系统进给机构，其平台示意图如图 7 所示。

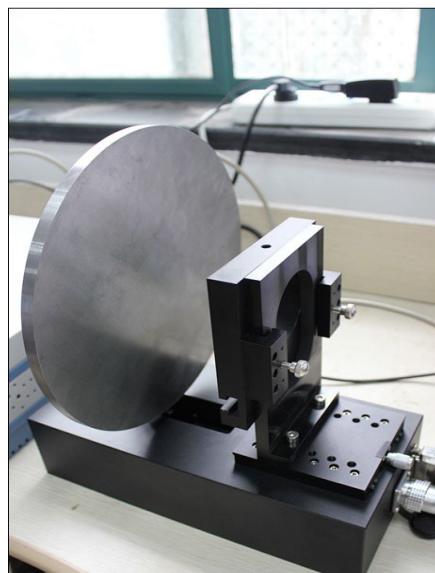


Figure 7. Schematic diagram of the feed mechanism of the static calibration system for the eddy current sensor
图 7. 电涡流传感器静态校准系统进给机构示意图

5. 结论

本文主要是设计电涡流传感器校准系统中的进给装置。主要完成了以下几点：

- (1) 介绍了电涡流传感器的工作原理和目前静态校准的方法；
- (2) 搭建了电涡流传感器静态自动校准系统平台；
- (3) 完成了电涡流传感器静态自动校准系统进给机构的设计，通过滚动导轨、驱动电机和执行丝杠的设计完成了平台的搭建。

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] 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.
- [3] 薛文瑞, 王晓靓, 汪群, 等. 壳体膨胀探头静态校准技术探讨[J]. 计量与测试技术, 2025, 51(6): 76-78.
- [4] 李莹, 吕勇, 王艳林. 电涡流传感器阻抗相位角的温度特性研究[J]. 传感器世界, 2025, 31(6): 1-8.
- [5] 宋冠儒, 刘冲, 李经民, 等. 电涡流传感器探头的结构优化[J]. 机电技术, 2021(4): 61-64.