

基于ANSYS的电涡流传感器静动态自动校准系统设计

王文浩, 李迪, 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16日; 发布日期: 2025年12月30日

摘要

电涡流传感器实现距离的测量是基于法拉第电磁感应的原理。根据法拉第电磁感应原理, 置于磁场中的金属表面在磁通量发生变化时, 金属表面会产生感应电流以抵抗该金属表面磁通的变化, 此感应电流称作为电涡流, 这一现象称为电涡流效应, 电涡流传感器就是利用该效应, 将被测的非电量转换成电参数。在长期使用过程中, 电涡流传感器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的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。目前的电涡流传感器静动态校准存在校准精度差、量程短、自动化程度低等问题。为了提高电涡流传感器静动态校准精度, 在进行校准装置的设计时采用ANSYS软件对其零部件进行仿真优化, 同时引入自动化设备提高校准的自动化水平。

关键词

电涡流传感器, 静动态校准, ANSYS, 自动校准

Design of an Automatic Static and Dynamic Calibration System for Eddy Current Sensors Based on ANSYS

Wenhai Wang, Di Li, Xiang Xu*

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

Received: November 11, 2025; accepted: December 16, 2025; published: December 30, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王文浩, 李迪, 徐祥. 基于 ANSYS 的电涡流传感器静动态自动校准系统设计[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 809-816. DOI: 10.12677/iae.2025.134098

Abstract

Eddy current sensors are used for distance measurement based on the principle of Faraday's electromagnetic induction. According to Faraday's principle of electromagnetic induction, when the magnetic flux of a metal surface placed in a magnetic field change, an induced current is generated on the metal surface to resist the change in magnetic flux. This induced current is called an eddy current, and this phenomenon is called the eddy current effect. Eddy current sensors utilize this effect to convert the measured non-electrical quantity into an electrical parameter. During long-term use, eddy current sensors may experience significant errors or even erroneous readings due to aging or the influence of the objective environment. Therefore, it is necessary to periodically perform dynamic or static calibration on the eddy current sensors according to their performance to promptly identify and address any problems. Current static and dynamic calibration methods for eddy current sensors suffer from poor calibration accuracy, short measurement range, and low automation. To improve the static and dynamic calibration accuracy of eddy current sensors, ANSYS software was used to simulate and optimize the components during the design of the calibration device. Simultaneously, automated equipment was introduced to enhance the automation level of the calibration process.

Keywords

Eddy Current Sensor, Static and Dynamic Calibration, ANSYS, Automatic Calibration

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

电涡流传感器能够非接触式地测量被测金属导体与传感器探头表面之间的相对位移，是一种非接触的线性化计量工具。相比于相同功能的其他传感器，电涡流传感器以其可靠性好、灵敏度高、分辨率高、响应速度快、测量范围宽、抗干扰力强、不受油污等介质的影响、结构简单等优点，广泛应用于电力、石油、化工、冶金等行业以及一些科研单位，分别用于对水轮机、压缩机、齿轮箱和压缩泵等高速旋转机械以及往复式运动机械的振动、位移信号的测量、在线监测、状态分析以及故障诊断等[1][2]。

电涡流传感器根据其线圈激励电流的频率，一般分为高频反射式和低频透射式两种。前者线圈的激励电流频率高，涡流的趋肤效应显著，穿透深度小，主要用于位移的测量；后者则线圈的激励电流频率低，穿透深度大可以用来测量厚度[3]。

电涡流传感器的校准分为静态校准和动态校准，目前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，但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. 总体结构

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。

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。

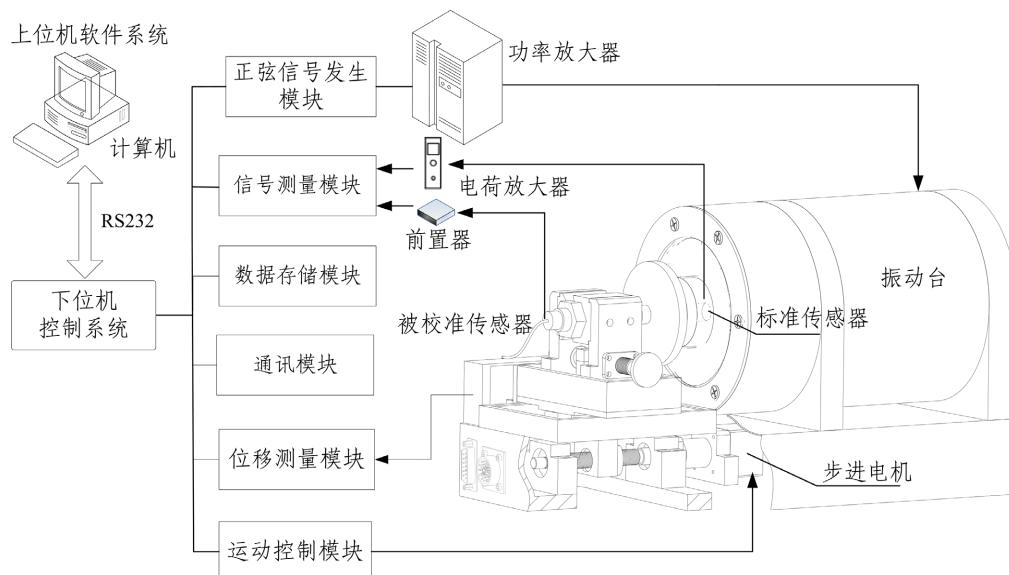


Figure 1. Overall structure of the integrated automatic calibration device for the dynamic and static characteristics of eddy current sensors

图 1. 电涡流传感器动静特性一体化自动校准装置的总体结构

3. 校准平台零部件的设计优化

3.1. 感应盘静力学分析

考虑到感应盘的正确安装对电涡流传感器的校准精度具有很大的影响，这里对感应盘安装后，其在自身重力作用下盘面的倾斜角度进行静力学分析，运用 ANSYS 软件[4]，通过模型的建立、材料属性的定义、单元网格的划分及仿真计算得到感应盘盘面的上下端面处相对于盘面中心发生了沿轴向发生近 5.52 的相对形变，静力学分析结果如图 2 所示。经计算可得端面与竖直面发生 10.35° 的偏转。这个偏转角度对电涡流传感器静态校准几乎不产生影响，因此感应盘的安装满足设计要求。

3.2. 感应盘谐响应分析

在进行电涡流传感器感应盘的设计时，为了验证感应盘在校准过程中其不均匀度满足设计要求，需要在感应盘使用频率范围内对其进行谐响应分析，分析时正弦激励信号集中分布于线圈周围，模拟运动部件在其工作频率的集中分布于线圈周围的正弦激励作用下，感应盘盘面各点在 X 方向的位移。由于在低频段感应盘盘面各点振动几乎是同步的，各点振动的不均匀度很小，对动态校准的精度几乎没有影响，因此进行谐响应分析时选择频率范围为 100~500 Hz，在该频段，运动部件的振幅很小，其支撑弹簧片对运动部件的谐响应分析的影响可以忽略，因此建立运动部件的谐响应分析模型如图 3 所示。

根据振动不均匀度随激励频率的变化规律，在最高频率点处感应盘的不均匀度是否满足要求是感应盘结构满足不均匀度要求的关键，在最大校准频率 500 Hz 时的谐响应分析结果得到各映射点数据如图 4 所示。经计算，该频率下感应盘的不均匀度约为 0.73%，其振动形状如图 5 所示。

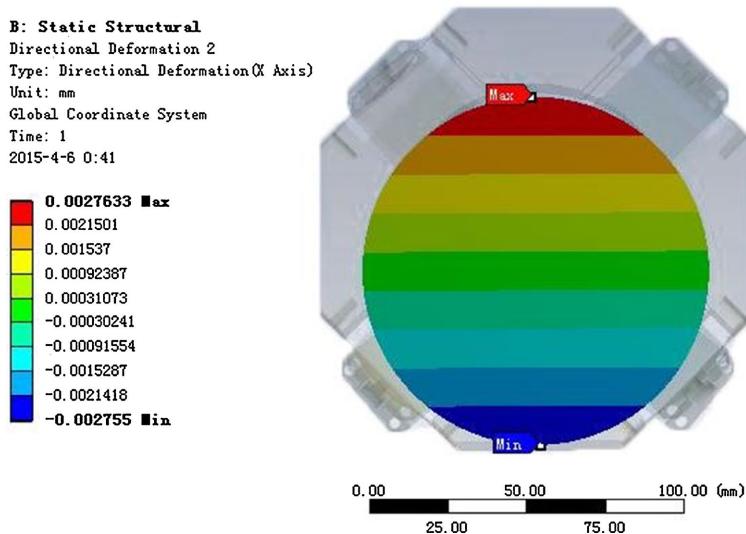


Figure 2. Schematic diagram of static analysis of the induction plate
图 2. 感应盘静力学分析示意图

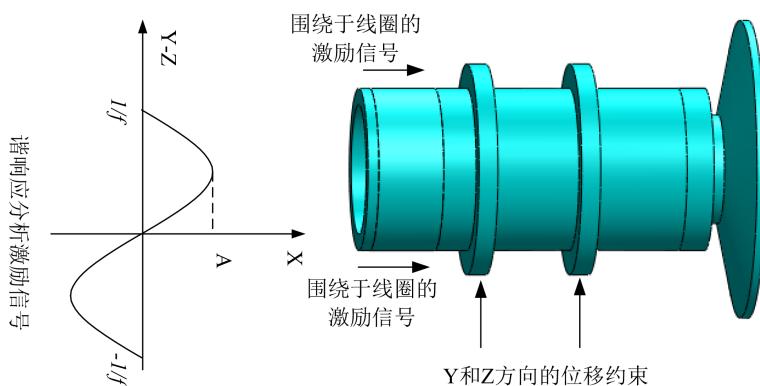


Figure 3. Harmonic response analysis model of moving parts
图 3. 运动部件的谐响应分析模型

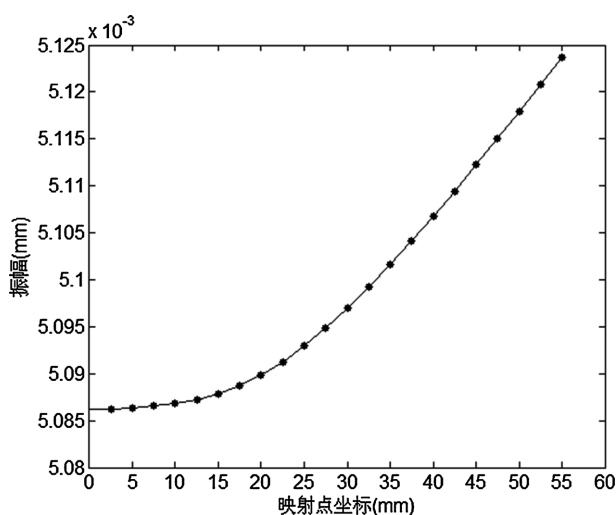


Figure 4. Schematic diagram of the mapping point results for the 500 Hz harmonic response analysis
图 4. 500 Hz 谐响应分析映射点结果示意图

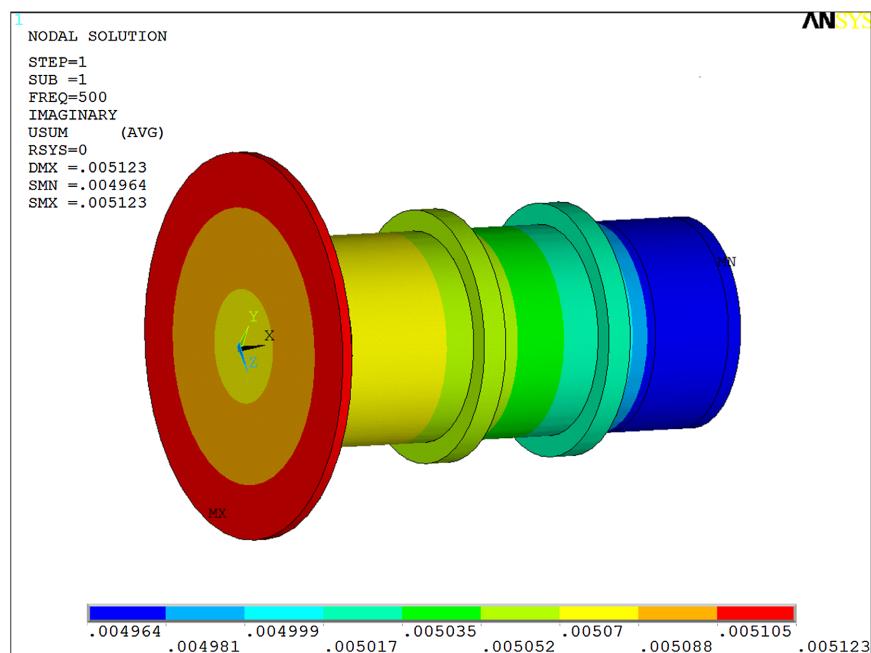


Figure 5. Vibration shape from the 500 Hz harmonic response analysis
图 5. 500 Hz 谐响应分析的振动形状

4. 校准装置检测、驱动装置设计

4.1. 检测装置设计

为了提高校准装置的校准精度，在进行静态校准装置设计时，选用光栅尺作为位移检测元器件，其结构示意图如图 6 所示：

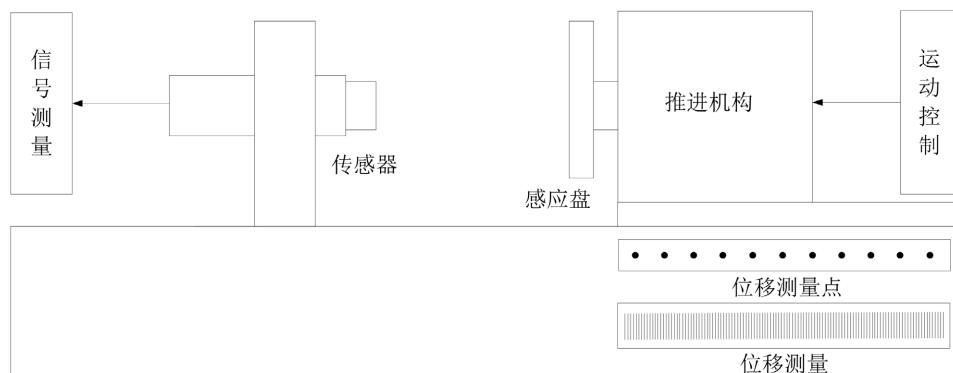


Figure 6. Schematic diagram of static calibration grating detection for eddy current sensor
图 6. 电涡流传感器的静态校准光栅检测示意图

4.2. 驱动装置设计

在工业控制系统中通常采用的驱动部件有步进电机、直线电机和伺服电机等。直线电机占据空间大，型号匹配困难，同时价格昂贵，伺服电机相对于步进电机增加了旋转编码器，可实现半闭环控制，考虑到运动的控制是由以直线光栅尺的输出信号作为反馈的全闭环控制系统来实现，因此选择体积小，控制简单，价格低廉的步进电机更加合适。

(1) 步进电机的工作原理

图 7 为二相反应式步进电机原理图, 定子有四齿, 各齿上装有控制绕组, 每一个相对的齿组成一组, 转子有四齿, 无绕组。当 A 相通电时, 磁通如图中虚线所示, 通过定转子磁路, 转子齿 1, 3 由于反应转矩的作用与 A 相定子齿对齐。当 A 相断开 B 相接通时, 转子 2, 4 转到与 B 相定子齿对应的位置。如此按照 A-B-A-B……方式不断接通与断开控制绕组时, 电机便进入连续工作状态。在图示情况转子每次转过角度 $\alpha = \frac{360^\circ}{kmp} = \frac{360^\circ}{1 \times 2 \times 2} = 90^\circ$, 其中 k 为通电方式系数, m 为绕组数, 即相数, p 为极对数, 即齿对数。如果按照 A-AB-B-BC-C-CA-A……方式励磁, 步距角减小一半, $\alpha = 45^\circ$ 。

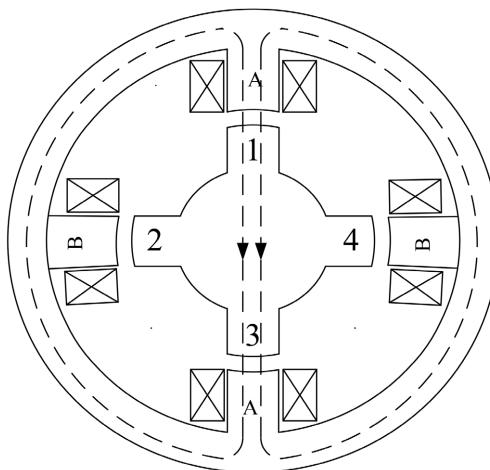


Figure 7. Schematic diagram of a two-phase reactive stepper motor
图 7. 二相反应式步进电机原理图

(2) 步进电机细分原理

由步进电机的工作原理可知, 如果单纯地通过各相电路的顺序通断来完成步进电机的控制显然达不到精确控制的目的, 步进电机在使用时需要对其进行细分控制。步进电机的驱动力矩与旋转磁场的强度成正比, 步距与旋转磁场相邻两状态的磁场矢量的夹角相等, 因此对步进电机的细分实质是对步进电机的励磁绕组中通电电流的控制, 使得各绕组的电流产生的合成磁场是一个大小恒定, 且匀速转动的旋转磁场, 从而控制步进电机按照所需要的步距角匀速转动[5] [6]。图 7 为两相步进电机细分驱动的原理图。从图中可以看出如果按照①→⑤→⑨……的次序通断电, 磁场的步距角为 90° , 如果按照①→③→⑤→⑦→⑨……的次序通电, 磁场的步距角为 45° , 相当于完成了步进电机的二细分, 同理 A、B 按照①→②→③→④→⑤……的大小关系通电时, 步距角为 22.5° , 也就实现了步进电机的四细分, 此时 A 相、B 相绕组的通电电流的变化如图 8 所示。由图 8 可以看出要想得到幅值恒定, 转角均匀变化的磁场, A 相电流的变化规律接近 $A = I\cos\theta$, B 相电流的变化规律接近 $B = I\sin\theta$, 同时由图 9 也可以看出对步进电机的细分数越大, A、B 相电流越逼近正余弦变化。如果通过控制 A 相、B 相电流按照 $A = I\cos\theta$, $B = I\sin\theta$ 的规律变化, 可以获得幅值恒等, 转角均匀变化合成磁场。这即是步进电机细分驱动的原理。

根据以上的参数要求, 选择 SST42C1065 型号步进电机, 以及相对应的 XNQ240MA 型号步进电机驱动器, 该步进电机步距角 0.9° , 最大细分数 64, 结合丝杠的导程为 2 mm , 当细分数达到 64 时, 直线运动的最小分辨率为

$$\delta = \frac{0.9}{360} \times 2 \text{ mm} \div 64 \approx 0.078 \mu\text{m} \quad (1)$$

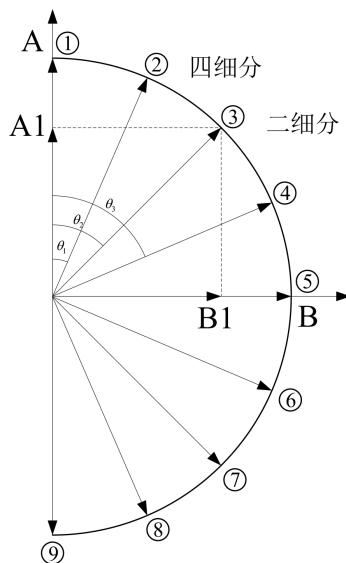


Figure 8. Schematic diagram of microstepping drive for a two-phase stepper motor
图 8. 两相步进电机细分驱动的原理图

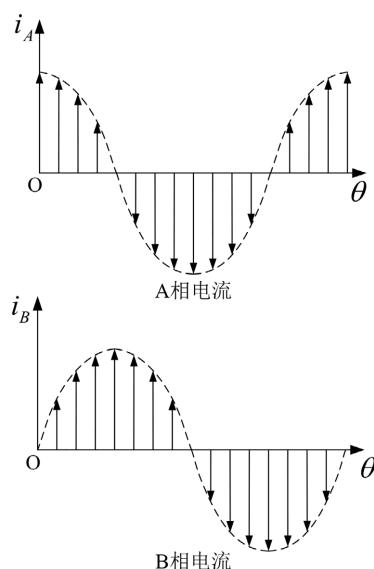


Figure 9. Schematic diagram of two-phase current microstepping
图 9. 两相电流细分示意图

满足设计要求。

5. 结论

本文根据校准装置需要完成的运动特点，对机械系统部分的各零部件的结构进行设计和选型主要工作有：

- (1) 完成了电涡流传感器动静态特性一体化自动校准装置的总体结构的设计。
- (2) 完成了感应盘的静力学分析，分析了感应盘在自身重力作用下产生倾斜对静态校准的影响。
- (3) 通过谐响应分析求解了感应盘在动态校准中盘面的不均匀度，确保感应盘在其工作频率范围内盘面振动不均匀度符合设计要求。对电涡流传感器产生的电涡流在感应盘上的径向分布规律进行理论分

析，并通过对电涡流传感器涡流场仿真进行验证。

(4) 完成了驱动部件和检测部件的选型。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王光庆. 改善振动校准系统性能相关技术问题的研究及其实现[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [3] Wang, A.Y., Pan, H.X. and Liu, H.L. (2013) Study on Fault Feature Extraction of High-Speed Automaton. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, **11**, 5867-5875.
<https://doi.org/10.11591/telkomnika.v11i10.3417>
- [4] Lv, D. and Zeng, D.J. (2012) Finite Element Modal Analysis of V8 Enginecrankshaft Based on ANSYS Workbench. *Machinery Design & Manufacture*, **18**, 11-13.
- [5] 智超, 王宏, 林国强, 等. 实现异步冲击的自动冲击装置: 一种针对操作过程中模态测试的实用方案[J]. 浙江大学学报, 2018(19): 452-460.
- [6] 刘鑫, 孙蓓蓓, 李烈, 等. 基于振动传递的结构连接部非线性识别与表征[J]. 东南大学学报, 2018(34): 36-42.