

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415318

## 基于轴向电涡流效应的高精度长位移传感器\*

徐笠杰 王艳林 陈青山

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

**摘要:** 为了实现大行程精密光学调焦组件的高精度实时检测,研究基于轴向电涡流效应的高精度长位移传感器。建立了长位移电涡流探头仿真模型进行线性度测试,搭建电涡流传感器测试系统进行精度实验,并将长位移电涡流传感器接入精密光学调焦组件。实验结果表明:在可测量位移达到 24 mm 的同时,线性度优于 1%,分辨率优于 0.5  $\mu\text{m}$ ,精度优于 1  $\mu\text{m}$ ,高精度长位移电涡流传感器符合精密光学调焦组件的需求。

**关键词:** 电涡流传感器;轴向电涡流效应;精密光学调焦组件;长位移;高精度

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.080400

High-precision long-displacement sensor based on  
axial eddy current effect

Xu Lijie Wang Yanlin Chen Qingshan

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to realize high-precision real-time detection of large-stroke precision optical focusing components, high-precision long-displacement sensors based on axial eddy current effect are studied. A long-displacement eddy current probe simulation model is established for linearity testing, an eddy current sensor test system is built for accuracy experiments, and the long-displacement eddy current sensor is connected to the precision optical focusing assembly. The experimental results show that while the measurable displacement reaches 24 mm, the linearity is better than 1%, the resolution is better than 0.5  $\mu\text{m}$ , the accuracy is better than 1  $\mu\text{m}$ , and the high-precision long-displacement eddy current sensor meets the requirements of the precision optical focusing assembly.

**Keywords:** eddy current sensor; axial eddy current effect; precision optical focusing component; long-displacement; high-precision

## 0 引言

精密光学调焦组件是光学系统的重要组成部分。精密光学调焦组件通过步进电机或直线电机控制凹面镜轴向移动,在物面位置改变时,使其仍能成像在光学系统原位置上。精密光学调焦组件内部空间小,且需要高精度、长位移的传感器对凹面镜的位移进行测量<sup>[1]</sup>。光电式位移传感器具有高精度、高分辨率等优点,但测量范围较小,对环境要求较高,易受环境中灰尘、油污及水汽等因素影响<sup>[2]</sup>。霍尔式位移传感器的频率响应较快,但精度较低,线性度较差<sup>[3]</sup>。电容式位移传感器结构简单、精度较高,但测量范围较小,响应速度慢<sup>[4]</sup>。光栅式位移传感器具有测量范围大、

分辨率高等特点,但其体积较大,易受灰尘、油污等环境因素影响<sup>[5]</sup>。电涡流传感器(eddy current sensor, ECS)是一种常用的位移传感器,因其具有较高的精度和分辨率,环境适应性强等特点,广泛应用在位移测量中<sup>[6-7][8]</sup>。然而,传统的端面型电涡流传感器在达到 24 mm 量程时,探头线圈直径达到 50 mm<sup>[9]</sup>。而精密光学调焦组件由于其内部空间较小,大体积的探头线圈无法安装。徐琳等<sup>[10]</sup>通过研究 ECS 的探头线圈尺寸,提高了传感器的精度和灵敏度。崔奇等<sup>[11]</sup>设计差动式电涡流传感器,提高了传感器的测量精度。孙凯等<sup>[12-13]</sup>通过二维有限元法研究了线圈结构对 ECS 性能的影响,提高了 ECS 的精度与灵敏度。宋冠儒等<sup>[14]</sup>研究了阵列式电涡流传感器探头,增加了 ECS 的测量范围。

收稿日期:2024-01-10

\* 基金项目:光电信息控制和安全技术重点实验室项目(202105509)资助

姜锐等<sup>[15]</sup>设计了差分结构的大间隙变面积电涡流传感器,将传感器的量程增加到 5 cm,但线圈面积达到 150 cm<sup>2</sup>。Liu 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于线性调整的高精度校准方法,显著提高了测量精度。陈阳等<sup>[17]</sup>研究发现被测面半径不足探头线圈半径 3 倍条件下,ECS 的性能显著下降。

上述研究中的端面型电涡流传感器无法同时满足小体积、高精度、长位移的需求,无法应用在精密光学调焦组件中。针对以上问题,提出一种基于轴向电涡流效应的高精度长位移传感器。

### 1 结构及原理

精密光学调焦组件主要由 ECS、步进电机、支撑平面、支撑结构和凹面镜等部分组成,如图 1 所示。其中步进电机转动臂表面带有螺纹,支撑平面内部带有螺纹孔,当转动臂转动时,支撑平面随之进行轴向平移。凹面镜座与支撑平面连接,因此当步进电机转动时,凹面镜进行轴向移动,达到调焦的目的,最终将入射的光线汇聚到一个点上,由上位机对目标信息进行采集。现有的精密光学调焦组件不满足较长位移的调焦需求,为增加精密光学调焦组件测量以及调焦范围,研究一种基于轴向电涡流效应的高精度长位移传感器,其在满足小体积的同时,具有高精度、长位移的特点。

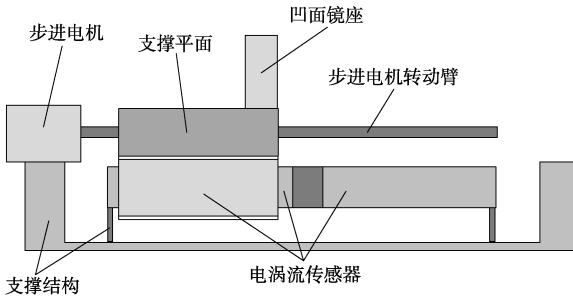


图 1 精密光学调焦组件示意图

ECS 的原理采用的是一种非接触式测量方法,无器件磨损,有较强的产品优势,被广泛应用在测量位移、测量厚度、测量振动和无损探伤等方向。

端面型电涡流效应如图 2 所示,被测物金属置于线圈下方,当线圈通入交变电流  $I_1$  时,线圈的周围会产生交变磁场  $B_1$ 。被测物金属接近或远离线圈时,磁通量  $\Phi_1$  改变。根据法拉第电磁感应定律变化的磁场会在闭合导体表面产生感应电涡流  $I_2$ ,在感应电涡流  $I_2$  内部会形成新的磁场  $B_2$ ,由楞次定律可知,  $B_1$  和  $B_2$  的方向相反,磁场  $B_2$  会与磁场  $B_1$  相互抵消部分,从而导致传感器阻抗  $Z$ 、品质因数  $Q$  变化。再由硬件电路对线圈两端电压进行采集,从而实现位移的测量。然而,在使用端面型 ECS 时,要求被测侧面半径大于线圈半径 3 倍,极大限制了 ECS 在精密光学调焦组件中的应用。

不同于上述端面型电涡流传感器,基于轴向电涡流效应的传感器将线圈置于空心金属圆柱内部,如图 3 所示。

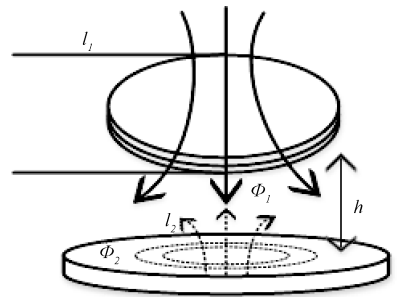


图 2 端面型电涡流效应示意图

线圈截面产生的涡流效应,如图 4 所示。当线圈通入交变电流  $I_1$ ,在线圈与金属导体之间会产生垂直于截面向内的磁场  $B_1$ ,当金属导体垂直于截面方向移动时,磁通量会随金属导体位置的改变而改变。根据法拉第电磁感应定律变化的磁场会在闭合导体表面产生感应电涡流  $I_2$ ,在感应电涡流  $I_2$  内部会形成新的垂直于截面向外的磁场  $B_2$ ,由楞次定律可知,  $B_1$  和  $B_2$  的方向相反,磁场  $B_2$  会与磁场  $B_1$  相互抵消部分,从而导致传感器阻抗  $Z$ 、品质因数  $Q$  变化。随着被测体沿线圈轴向移动,线圈两端电压发生变化,从而实现位移的测量。不同于端面型 ECS,基于轴向电涡流效应的传感器使用空心金属圆柱代替被侧面,减少了对空间的需求,满足精密光学调焦组件对于长位移、小体积、高精度的需求。

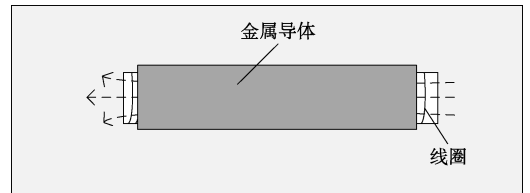


图 3 ECS 结构示意图

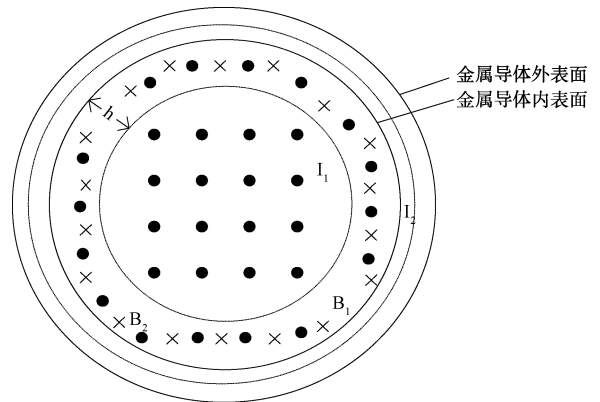


图 4 轴向涡流效应示意图

ECS 可以等效为如图 5 所示的电路图。把形成的涡流看作短路环中的电流,线圈和金属导体形成耦合电感。耦合电感的互感系数  $M$  受线圈与金属导体之间的距离  $h$  影响,随着  $h$  减小而增大。

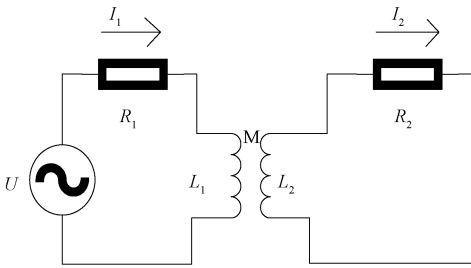


图5 电涡流的等效电路

由基尔霍夫定律得到下列方程:

$$\begin{aligned} R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 &= U \\ R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 - j\omega M I_1 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  为电阻;  $L_1$ 、 $L_2$  为电感;  $I_1$ 、 $I_2$  为电流;  $M$  为互感系数;  $j$  是虚数单位;  $\omega$  是角频率;  $U$  为闭合回路电压。

方程解得等效阻抗为:

$$\begin{aligned} Z = \frac{U}{I} &= (R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) + \\ j\omega(L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,等效电阻:

$$R = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (3)$$

等效电感:

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (4)$$

## 2 仿真计算

ECS 等效模型如图 6 所示。其中探头线圈由圆柱体表示,被测物由空心圆柱体表示。

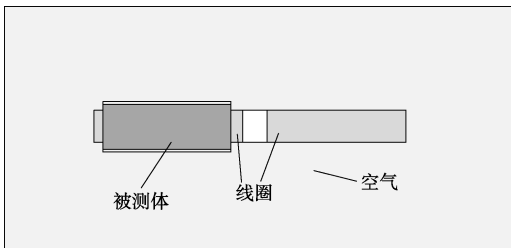


图6 ECS 等效模型

探头线圈的材料选择铜,选取材料铝为被测体,空气域的材料选择空气,主体框架材料选择铝。所选择的材料电导率、磁导率、相对介电常数如表 1 所示。

表1 材料参数表

材料	电导率/ ( $S \cdot m^{-1}$ )	磁导率/ ( $H \cdot m^{-1}$ )	相对介电常数/ ( $F \cdot m^{-1}$ )
空气	0	1	1
铜	$5.998 \times 10^7$	1	1
铝	$3.774 \times 10^7$	1	1

添加磁场作为物理场。在磁场中添加 2 组线圈作为探头  $X_1$ 、 $X_2$ , 探头  $X_1$ 、 $X_2$  使用均匀多匝模型由电流激励,线圈所使用导线直径为 0.15 mm,激励源设置为 0.1 A 的电流源。

模型的网格划分如图 7 所示。对主要研究对象被测物及探头线圈使用细化三角形进行划分,网格较小;对空气域进行较粗化三角形划分,网格较大。此时仿真贴近实际情况,在保证仿真效果的同时,减少仿真需要的时间。

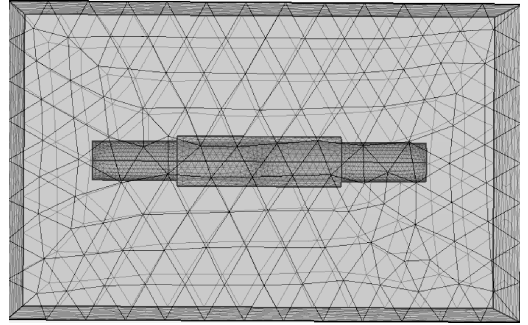


图7 模型的网格划分图

对 ECS 被测物的位移设置参数  $a$ , 的范围为  $-12$  mm 到  $12$  mm。使用参数化扫描,改变被测体的位移,记录各点电压值和位移值,研究 ECS 的线性度。各点电压值和位移值如表 2 所示。

表2 两探头线圈电压值与位移量关系表

位移/mm	$X_1$ 电压/V	$X_2$ 电压/V
-12	2.629	6.391
-9	2.976	5.877
-6	3.404	5.365
-3	3.871	4.857
0	4.357	4.358
3	4.857	3.871
6	5.364	3.405
9	5.877	2.977
12	6.391	2.629

被测体位移与探头线圈输出电压的变化情况如图 8 所示。

由图 8 可以看出,被测体沿  $X$  轴移动从  $-12$  mm 移动到  $12$  mm 时,探头线圈  $X_1$  两端的电压不断增大,  $X_2$  两端的电压不断减少。当被测体移动到  $12$  mm 时,探头线圈  $X_1$  两端的电压达到最大值,  $X_2$  两端的电压达到最小值。当被测体接近探头线圈时,探头线圈两端电压不断减小;当被测体远离探头线圈时,探头线圈两端电压不断增大;当被测体在  $0$  mm 时,探头线圈  $X_1$  与  $X_2$  与被测体距离相等,此时电压值也相等。

两探头线圈电压差与位移的变化情况如图 9 所示。

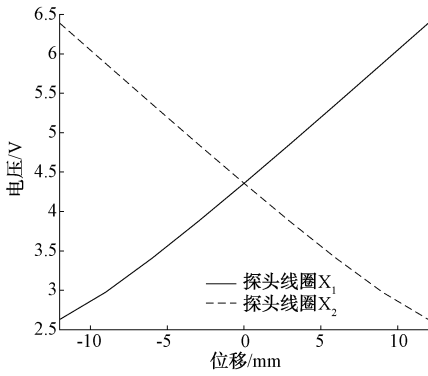


图 8 被测体位移与探头线圈输出电压的关系

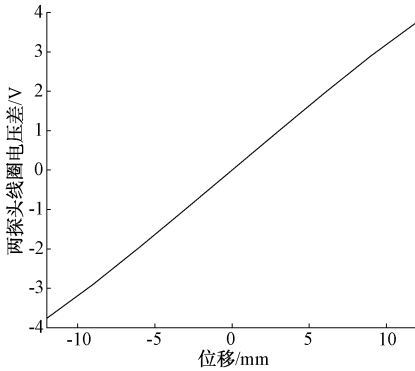


图 9 被测物位移与两探头线圈输出电压差的关系

线性度又被称作为非线性误差,是传感器原始曲线和拟合直线之间的最大差值与满量程位移之比。

$$\gamma = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\gamma$  为涡流传感器的线性度;  $\Delta Y_{\max}$  为位移最大误差;  $Y$  为满量程位移量。

根据式(5)计算出线性度为 0.791%。ECS 探头线圈的线性度符合要求。

### 3 实验测试

搭建 ECS 测试系统,如图 10 所示。使用步进电机控制支撑平面移动,进而使聚焦镜座随之移动。通过激光干涉仪测量铝板真实位移,通过内部支撑平面下方 ECS 读取 AD 值。

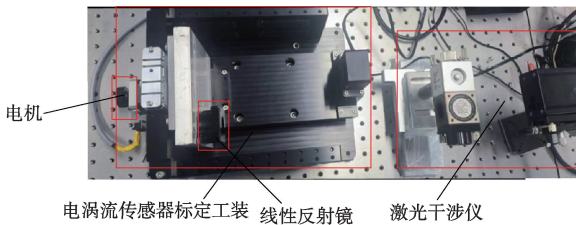


图 10 ECS 测试实验现场

励信号的激励电路;接受并处理敏感信号的感应信号解调电路;为各个模块提供工作电压的电源电路;模数转换电路采用 20 位 AD 芯片,对接收到的感应信号进行采样,并将采样后的信号发送给主控芯片。主控电路使用 STM32H743 作为主控芯片,其主频可达 400 MHz,接收模数转换电路发送的信号并通过接口电路与上位机通信。

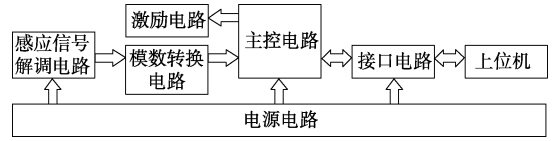


图 11 ECS 结构框架

使用高精度激光干涉仪对被测物位移进行测量,将被测物沿从 -12 mm 移动到 12 mm,每隔 1 mm 进行一次测量,记录长位移 ECS 的 AD 值以及激光干涉仪的测量值,共取 25 组数据。实验结果如表 3 所示。

表 3 位移与 AD 值的关系

位移/mm	AD 值
-12	-506 088
-11	-461 544
-10	-41 5240
-9	-369 992
-8	-325 832
-7	-282 456
-6	-239 576
-5	-197 112
-4	-154 552
-3	-112 056
-2	-72 472
-1	-35 080
0	168
1	33 288
2	71 208
3	110 792
4	153 256
5	195 816
6	237 912
7	280 424
8	323 432
9	367 224
10	411 400
11	456 280
12	502 216

将以上数据放入 MATLAB,并使用 MATLAB 拟合工具箱进行多项式拟合:

$$f(x) = p_1 \times x^5 + p_2 \times x^4 + p_3 \times x^3 + p_4 \times x^2 + p_5 \times x + p_6 \quad (6)$$

多项式拟合参数如表4所示。

表4 多项式拟合参数

拟合参数	参数值
$p_1$	$4.296 \times 10^{-29}$
$p_2$	$9.702 \times 10^{-26}$
$p_3$	$-2.105 \times 10^{-17}$
$p_4$	$1.392 \times 10^{-13}$
$p_5$	$2.644 \times 10^{-05}$
$p_6$	-0.013 17

多项式拟合曲线图如图12所示。

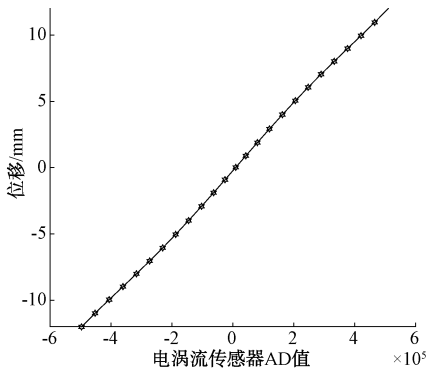


图12 拟合曲线

精度表示测量值与真实值的接近程度,是传感器经过标定后采集的初始数据和真实值之间的最大差值。

$$\epsilon = \max |X - \bar{X}| \quad (7)$$

式中: $\epsilon$ 为涡流传感器的精度; $X$ 为传感器标定后采集的位移值; $\bar{X}$ 为真实位移值。

分辨率是传感器能够可靠地检测到的最小位移量,是评价传感器性能的重要指标。

$$\sigma = \frac{RMSE(AD)}{\Delta AD} \times Y \quad (8)$$

式中: $\sigma$ 为涡流传感器的分辨率; $RMSE(AD)$ 为AD的均方根误差; $\Delta AD$ 为AD的最大变化量; $Y$ 为满量程位移量。

使用标定后的ECS对位移进行测量,并使用高精度激光干涉仪对实际位移进行测量,其中误差为测量值与实际值之差。测量结果如表5所示。

根据式(7)和(8)计算出ECS的精度为 $0.889 \mu\text{m}$ 和分辨率为 $0.475 \mu\text{m}$ ,分辨率优于 $0.5 \mu\text{m}$ ,精度优于 $1 \mu\text{m}$ ,满足精密光学调焦组件的精度要求。端面型电涡流传感器在量程达到 $24 \text{ mm}$ 时,其线圈面积达到 $40 \text{ cm}^2$ ,精度达到 $1 \mu\text{m}$ 。相较于端面型ECS,基于轴向电涡流效应的传感器精度达到 $1 \mu\text{m}$ 的情况下,占用空间小于 $4 \text{ cm}^3$ ,满足精密光学调焦组件对于ECS小型化的要求。

在精密光学调焦组件中接入高精度长位移ECS,增大

表5 测量结果

实际值/mm	误差/ $\mu\text{m}$
12	-0.856
9	-0.584
6	-0.391
3	-0.188
0	0.019
-3	0.304
-6	0.462
-9	0.724
-12	0.889

了对位移的测量范围,进而增加调焦范围,实现步进电机在大行程移动过程中对镜面位置的精确测量,从而使步进电机对镜面位置的调节更加准确,使用光学系统上位机采集红外图像。光学系统采集的红外图像如图13所示。经过精密光学调焦组件调焦后,光学系统采集的图像清晰,满足光学系统的成像要求。

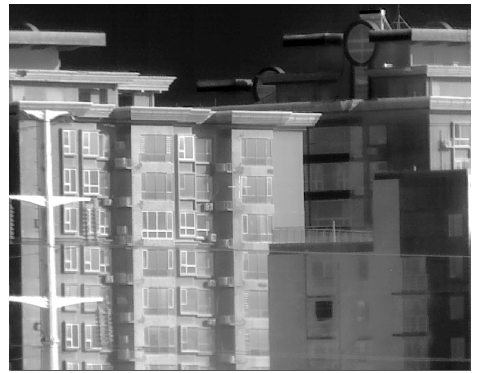


图13 光学系统采集的红外图像

## 4 结 论

为了解决ECS在空间受限的条件下测量范围以及精度不足的问题,阐述了轴向电涡流原理,建立了占用空间较小的长位移ECS仿真模型,研究ECS的线性度,并对其进行精度测试。

实验结果表明,基于轴向电涡流效应的高精度长位移传感器在达到 $24 \text{ mm}$ 量程时,线性度优于 $1\%$ ,分辨率优于 $0.5 \mu\text{m}$ ,精度优于 $1 \mu\text{m}$ ,将ECS接入精密光学调焦组件后,图像清晰,满足调焦组件的精度需求,可在精密光学调焦组件中使用。

## 参考文献

- [1] 单秋莎,谢梅林,刘朝晖,等.制冷型长波红外光学系统设计[J].中国光学,2022,15(1):72-78.
- [2] 杨帆.一种基于光电位移传感器位移实时监测系统[J].中国科技信息,2019(7):81-82.
- [3] 钦志伟,卢文科,左锋,等.霍尔效应式位移传感器的温

- 度补偿[J]. 传感技术学报, 2019, 32(7):1040-1044.
- [4] 崔小强. 电容式绝对编码角位移传感器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [5] 亓杰. 基于光栅自成像效应的高分辨小型化位移传感器研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [6] 杨露露. 电涡流位移传感技术的研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [7] 郑水华, 于磊, 王艳丽. 基于有限元法的电涡流传感器探头线圈设计[J]. 水电自动化与大坝监测, 2014, 38(2):28-31.
- [8] 姚灵, 王欣欣. 电涡流传感技术的原理与应用[J]. 仪表技术, 2022(5): 1-4, 12.
- [9] 徐磊, 韩彬, 石洪, 等. PCB型平面电涡流式角度传感器的误差及其抑制方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(5):10-15, 21.
- [10] 徐琳, 王恒, 黄祯, 等. 基于 COMSOL 有限元法的电涡流传感器仿真[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(12): 1097-1104.
- [11] 崔奇, 赵君辙, 吴瑕. 差动式电涡流传感器在摆式加速度计中的应用[J]. 计测技术, 2010, 30(2):29-31.
- [12] 孙凯. 环形结构涡流传感器的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [13] 孙凯, 卢荣胜, 张勇. 基于 COMSOL Multiphysics 的仿真和设计[J]. 中国仪器仪表, 2010(4):63-66.
- [14] 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.
- [15] 姜锐, 窦峰山. 基于差分结构的大间隙变面积电涡流式传感器[J]. 兵工自动化, 2011, 30(4):53-55, 71.
- [16] LIU W, LIANG B, JIA Z, et al. High-accuracy calibration based on linearity adjustment for eddy current displacement sensor[J]. Sensors, 2018, 18(9).
- [17] 陈阳, 吕勇, 刘力双. 空间强约束条件下电涡流传感器特性影响分析[J]. 仪表技术与传感器, 2023(8):26-30.

### 作者简介

**徐笠杰**, 硕士研究生, 主要研究方向为电涡流传感器的性能研究。

E-mail:1027059731@qq.com

**王艳林**(通信作者), 副教授, 主要研究方向为精密电子电路研究。

E-mail:wangyanlin@bistu.edu.cn