

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518295

# 基于电磁感应的涂镀层厚度同步测量方法<sup>\*</sup>

谢金鹏 滕玉林 李辉 王晨山 赵朝友

(甘肃电力科学研究院技术中心有限公司 兰州 730070)

**摘要:** 本研究基于电磁感应原理,具体为涡流法和磁性法,结合有限元仿真技术,对线圈阻抗及基体表面磁感应强度进行了仿真分析,验证了检测方法的可行性。根据研究,基体表面的镀锌层和涂层厚度对线圈阻抗及磁感应强度具有显著影响。基于此,本研究设计并开发了针对铁磁性基体表面镀锌层和涂层厚度的测量电路、算法及检测设备。实验结果表明,该设备在铝基表面涂层厚度测量中的误差小于1%,在铁基表面涂镀层厚度测量中的误差小于6%,在绝缘子铁帽厚度测量中的误差亦小于6%。本研究所开发的涂镀层检测仪能够同步地高效、精确地测量镀锌层和涂层厚度。

**关键词:** 涡流;磁性法;涂镀层;有限元仿真

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Synchronous measurement method of coating thickness based on electromagnetic induction

Xie Jinpeng Teng Yulin Li Hui Wang Chenshan Zhao Chaoyou

(Gansu Electric Power Research Institute Technology Center Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** This paper, based on the principle of eddy electromagnetic induction, specifically the eddy current method and the magnetic method, combined with finite element simulation technology, simulates and analyzes the coil impedance and magnetic induction strength of the substrate surface, and verifies the feasibility of the inspection method. According to the study, the galvanized layer and coating thickness of the substrate surface have a significant effect on the coil impedance and magnetic induction strength. Based on this, this paper designs and develops the measurement circuit, algorithm and detection equipment for the thickness of galvanized layer and coating on the surface of ferromagnetic substrate. The experimental results show that the error of this equipment is less than 1% in the measurement of coating thickness on aluminum base surface, less than 6% in the measurement of coating thickness on iron base surface, and less than 6% in the measurement of insulator cap thickness. The coating layer detector developed in this paper can measure the thickness of the galvanized layer and the coating layer simultaneously, efficiently and accurately.

**Keywords:** eddy current; magnetic method; galvanized layer and coating thickness; finite element simulation

## 0 引言

随着工业领域的快速发展,金属材料的需求持续增长,对其性能的要求亦日趋严格。在此背景下,材料表面处理技术,尤其是涂镀层技术,成为了研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。涂镀层的厚度及其分布均匀性,是衡量其品质及效能的重要参数。因此,对金属材料涂镀层厚度进行精准测量不但是保证产品质量的必要条件,也是评估产品耐用性的重要步骤。

近年来,厚度测量技术发展迅速,如王雅婷等<sup>[3]</sup>基于激

光扫描干涉实现了玻璃厚度的亚微米级测量,但是该方法依赖材料的透光性,难以应用于金属基体;李弘义等<sup>[4]</sup>利用太赫兹量子级联激光器实现了微米级无损检测,但是设备成本高昂,难以广泛推广。除此之外,传统的涡流和磁性法虽然成本较低,但普遍存在两大局限:其一仅能单独测量钢/铁等磁性材料表面的非磁性层厚度,或者测量铜/铝等非磁性材料表面的非导电层厚度;其二,依赖复杂的振荡电路。华国环等<sup>[5]</sup>利用磁感应和电涡流原理配合振荡电路,实现了对铁基和铝基表面涂镀层厚度的测量,并且在测量

收稿日期:2025-03-10

\* 基金项目:甘肃省电力科学研究院技术中心有限公司(JS2X-HT.1-2023-67)项目资助

精度和重复性方面取得了显著成果。饶增仁等<sup>[6]</sup>利用改良的环形振荡器,实现了对不锈钢表面的涂层厚度的测量,并在涂层厚度不超过 1 000 μm 的范围内,达到了高精度测量效果。可见,当前学者对单独测量涂层和镀层厚度的研究分析较为广泛,但是缺乏对磁性基体表面涂层和镀层厚度的同步检测研究。

因此,本研究提出一种基于涡流和磁性法的同步检测方案,通过简化电路设计,实现铁磁性基体表面涂层和镀层厚度的同步高效检测。

## 1 工作原理及仿真

### 1.1 涡流原理

针对非导电涂层的特点,采用涡流法进行评估<sup>[7-8]</sup>。涡流检测(eddy current testing, ECT)是一种基于电磁感应原理的无损检测技术,其基本原理如图 1 所示。根据法拉第电磁感应定律,当激励线圈中通过交变电流时,会在其周围产生一个交变的磁场。这个交变磁场会穿透被检测材料,并在材料内部引发相应的磁通量变化。被检测材料的电磁特性将对此磁通量变化作出反应,产生与材料的电磁性质、几何形状、厚度及电导率等参数密切相关的涡流和次级磁场。这些次级磁场会对原检测线圈周围的磁场分布产生影响,进而导致检测线圈的等效阻抗发生变化<sup>[9-10]</sup>。

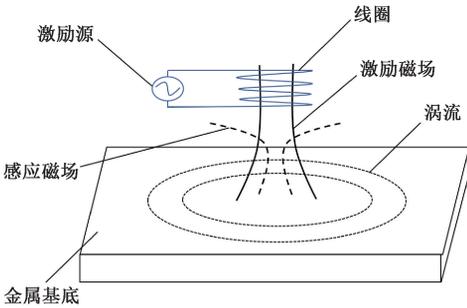


图 1 ECT 原理

Fig. 1 Principle of eddy current testing

涡流测厚技术的本质在于利用提离效应:涡流的强度受到试件的电阻率、厚度、磁导率、线圈与试件之间的距离以及线圈激励电流的角频率的影响<sup>[11]</sup>。只要确保其他参数恒定不变,就可以依据涡流的强度来测量线圈与试件之间的距离  $x$ :

$$Z = f(x) \quad (1)$$

为计算等效阻抗,可将涡流原理等效成图 2 的电路<sup>[12-13]</sup>。其中,  $R_1$ 、 $L_1$  分别为检测线圈的电阻和电感,  $R_2$ 、 $L_2$  分别为被测试件的电阻和电感,  $I_1$ 、 $I_2$  为交变电流。根据基尔霍夫电压电流定律,可得:

$$I_2 R_2 + j\omega I_2 L_2 - j\omega I_1 M = 0 \quad (2)$$

$$I_1 R_1 + j\omega I_1 L_1 - j\omega I_2 M = 0 \quad (3)$$

其中,  $M$  为检测线圈和被测试件之间的互感系数,  $\omega$  为交变电流角频率。计算可得  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j[\omega L_1 - \omega L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}]} \quad (4)$$

再通过对上式进行计算,最终可以得到等效阻抗  $Z$  为:

$$Z = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j(\omega L_1 - \omega L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}) \quad (5)$$

当检测线圈与被检测工件之间的距离发生变化时,线圈的等效电感以及检测线圈与工件之间的互感系数  $M$  也会相应改变,最终导致等效阻抗  $Z$  的变化<sup>[14]</sup>。因此,通过测量工作状态下检测线圈的等效阻抗  $Z$ ,并分析等效阻抗  $Z$  随提离效应距离  $x$  的变化规律,可以对等效阻抗  $Z$  与距离  $x$  之间的关系进行曲线拟合,建立相应的数学模型,从而实现涂层厚度的精确测量。

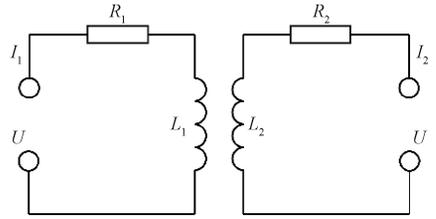


图 2 ECT 原理等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of eddy current principle

### 1.2 磁性法原理

针对非磁性镀层的特点,采用磁性法进行检测<sup>[15]</sup>。磁性法的基本原理如图 3 所示,当检测探头接近磁性基体时,探头内的永久磁铁会使磁性基体局部磁化。磁化后的基体所产生的磁场与永久磁铁的磁场相互作用,共同改变空间中的磁场分布<sup>[16-17]</sup>,特别是磁感应强度。镀层的存在会改变磁力线的路径和分布模式,使得镀层表面的磁感应强度低于磁性基体表面的磁感应强度。因此,通过测量表面处的磁感应强度,可以推算出镀层的厚度信息。

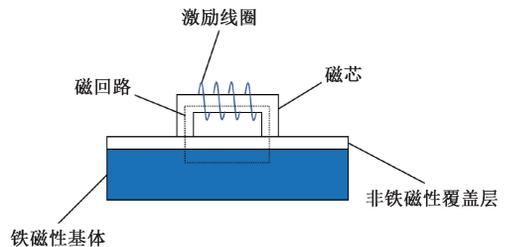


图 3 磁性法检测原理

Fig. 3 Principle of magnetic detection

### 1.3 仿 真

本研究采用有限元软件 Comsol 对原理进行仿真分析,将关注于镀层厚度和涂层厚度对线圈阻抗以及磁感应强度的影响,仿真模型结构如图 4 所示,包括线圈、涂层、镀

锌层、铁磁性基体和空气域。模型参数和仿真参数分别如表1、2所示。

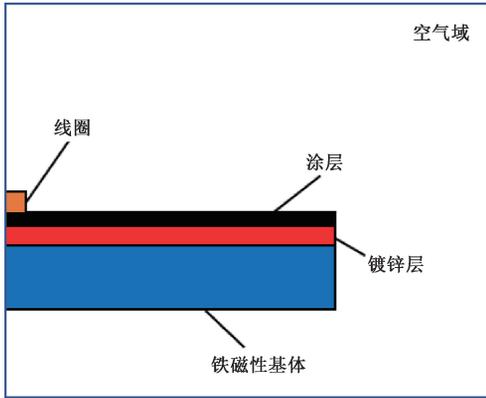


图4 仿真模型结构

Fig. 4 Simulation model structure

表1 模型参数

Table 1 Model parameter

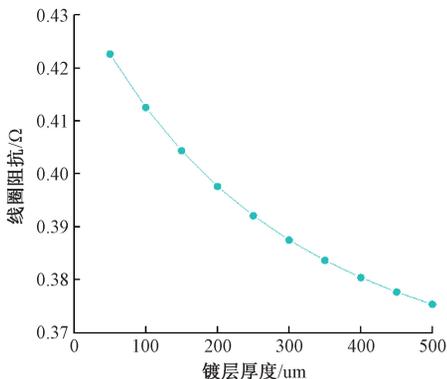
名称	长/mm	宽/mm
线圈	1	1
涂层	60	0.1
镀锌层	60	0.05
铁磁性基体	60	50
空气域	100	100

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

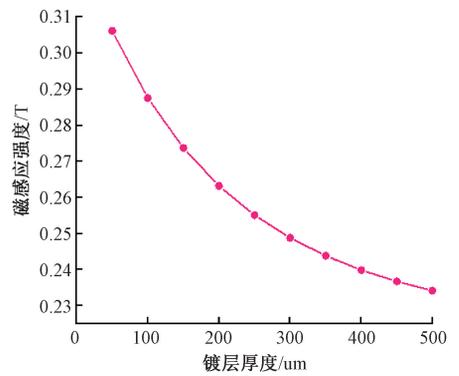
名称	值
线圈匝数	400
激励信号频率	1 000 Hz
镀锌层厚度范围	50~500 $\mu\text{m}$
涂层厚度范围	100~1 000 $\mu\text{m}$

图5(a)和(b)分别展示了镀层厚度对线圈阻抗和磁感应强度的影响。一方面,由于镀层的导电性能劣于下方的



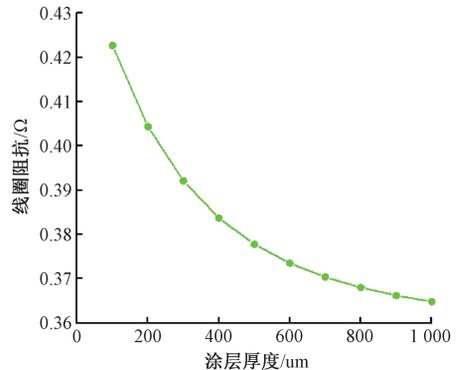
(a) 镀层厚度对线圈阻抗的影响

(a) The influence of galvanized layer thickness on coil impedance



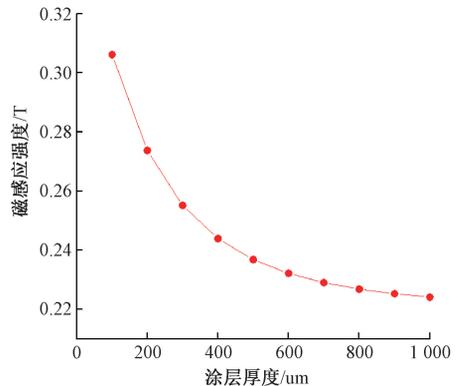
(b) 镀层厚度对磁感应强度的影响

(b) The influence of galvanized layer thickness on magnetic induction intensity



(c) 涂层厚度对线圈阻抗的影响

(c) The influence of coating thickness on coil impedance



(d) 涂层厚度对磁感应强度的影响

(d) The influence of coating thickness on magnetic induction intensity

图5 仿真结果分析图

Fig. 5 Plot of simulation result analysis

铁磁性基体,并且伴随着涡流损耗,导致线圈阻抗随着镀层厚度的增加而呈现下降趋势;另一方面,由于镀层是非磁性的,它在一定程度上阻碍了磁回路的形成,从而使得磁感应强度随着镀层厚度的增加而减弱。

图5(c)和(d)则分别展示了涂层厚度对线圈阻抗和磁感应强度的影响。鉴于涂层不具备导电性和铁磁性,这导致了线圈阻抗与磁感应强度均随涂层厚度的增加而减少。

同时可以发现,磁感应强度与镀层厚度、线圈阻抗与涂

层厚度都呈负相关关系。因此,在镀层涂层厚度检测的过程中,可以采用多项式拟合的方法,换算出镀层和涂层厚度。通过上述仿真结果可以得知,涡流法及磁性法对涂镀层的厚度检测具有可行性。

## 2 电路及软件设计

### 2.1 涡流法测厚电路设计

在 1.1 节中介绍了测量检测线圈的等效阻抗,来得到涂层厚度,但实际上用式(5)计算阻抗是十分困难的,因此本研究设计了不依赖于检测线圈阻抗变化的涡流测厚电路,与振荡电路相比,该电路结构更加简洁,涡流法测厚电路如图 6 所示。

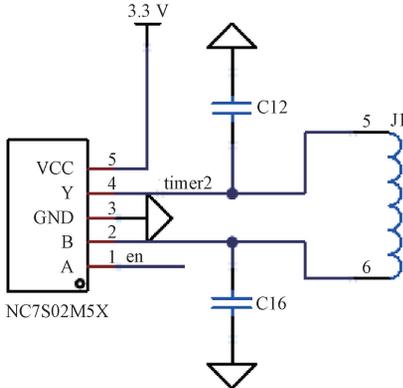


图 6 涡流测厚电路

Fig. 6 Eddy current thickness measurement circuit

在直流电路中,电流是恒定的,没有变化,不会产生电磁感应效应,因此,电感两端的电压几乎为零,相当于短路。在该条件下,将或非门(NC7S02M5X)的输出和一路输入用电感连接起来,导致或非门输出电平一直翻转,理论上翻转的频率就是芯片的工作频率。

当探头与导电基体接触时,导电基体表面会产生涡流,涡流引起的电流变化和感应磁场将会影响电感,进而影响或非门输出电平的翻转频率,涡流越强对翻转频率的影响越强。当导电基体表面存在非导电涂层时,电感受到的影响就会变小,涂层越厚,电感受到的影响越小。因此,非导电涂层厚度与或非门输出电平的翻转频率形成关联,只需采集或非门输出电平的翻转频率,即可测量涂层的厚度。

采用图 6 电路获取的涂层厚度与翻转频率关系如图 7 所示,并对曲线进行拟合:

$$d_1 = 0.00712f^2 - 140.33683f + 691187.33816 \quad (6)$$

其中,  $f$  代表翻转频率,  $d_1$  代表涂层厚度。

### 2.2 磁性法测厚电路设计

根据 1.2 节已知,磁感应强度与非磁性材料厚度相关,因此只需获得磁感应强度就能确定非磁性材料的厚度。为了获取磁感应强度,本研究选取霍尔传感器作为磁性法的传感器元件。

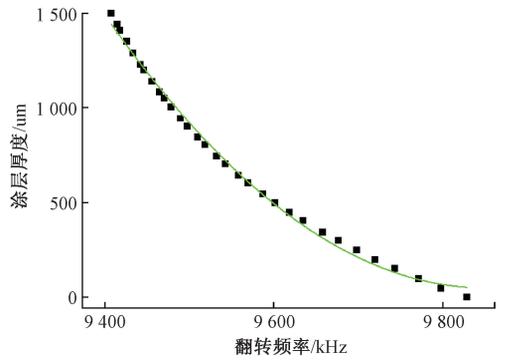


图 7 涂层厚度与翻转频率关系

Fig. 7 Relationship between coating thickness and turnover frequency

霍尔传感器是基于霍尔效应的磁场传感器,它能够将在磁场的变化转换为电信号。霍尔效应示意图如图 8 所示,当电流垂直于外加磁场通过导体时,载流子会经历侧向偏转并在导体的相对两侧累积,由此在与电流和磁场均垂直的方向上产生一个额外的电场。这一过程导致导体两端形成电势差,这种现象被定义为霍尔效应。所形成的电势差通常被称为霍尔电势差或霍尔电压<sup>[18]</sup>。

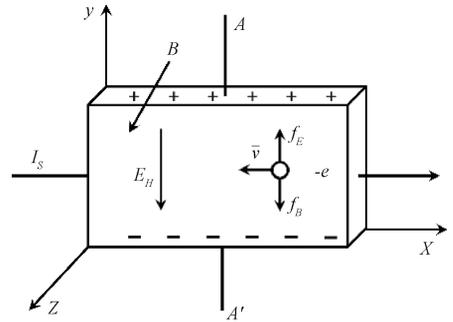


图 8 霍尔效应示意图

Fig. 8 Hall effect diagram

霍尔电压  $U$  的大小一般表示为:

$$U = K \frac{I_s B}{d} \quad (7)$$

其中,  $I_s$  为导体内电流强度,  $B$  为磁感应强度,  $d$  为导体的厚度,  $K$  为霍尔系数。由此可以看出,霍尔电压与磁感应强度成正比关系,因此可以采用霍尔传感器检测磁感应强度。磁性法测厚电路如图 9 所示,采用该电路获取的非磁性层厚度与磁感应强度的关系如图 10 所示。

最后根据图 10 曲线进行拟合:

$$d_2 = 383.399B^2 - 6997.351B + 31987.994 \quad (8)$$

其中,  $B$  代表磁感应强度,  $d_2$  代表非磁性层厚度。

### 2.3 软件设计

在完成了硬件电路的设计后,本节将从软件部分进行说明。软件的步骤如图 11 所示。

步骤 1) 在系统初始化之后,选择工作模式,针对不同

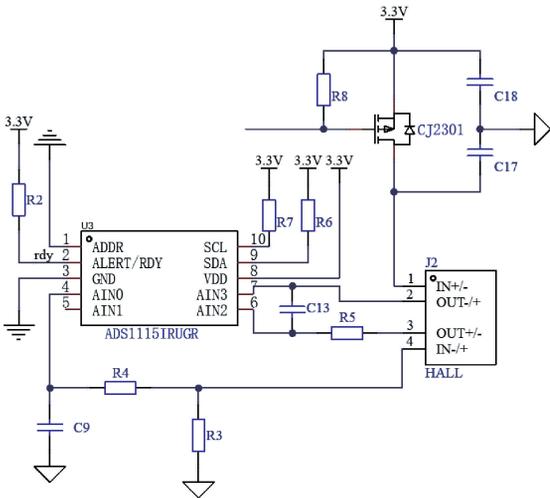


图9 磁性法测厚电路

Fig. 9 Magnetic thickness measurement circuit

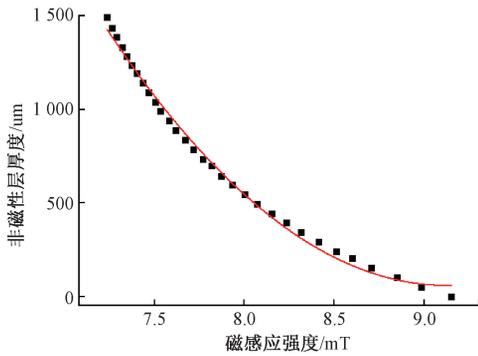


图10 非磁性层厚度与磁感应强度关系

Fig. 10 Relationship between thickness of non-magnetic layer and magnetic induction intensity

的材料,实现磁性法测厚和涡流法测厚的切换,需要注意的是,选中磁性法测厚也就是意味着进入到复用工作模式。

步骤2)获取原始数据,为了兼顾数据稳定性和测量速度,一般需要获取40~70个数据。

步骤3)判断数据是否超出阈值,若获取的数据波动较大,则重新获取。

步骤4)取这组数据中末尾的数据来计算切尾均值,这是由于末尾的数据一般比其他的数据更加稳定。

步骤5)由于探头所获取的数据会随着外界温度的变化而变化,因此需要进行温度校准或者温度补偿。温度校准的原理如图12所示。

当探头离开基体较远(相互作用很弱)时,认为已经达到无穷远点。当温度为 $T_1$ 时,无穷远点的采样值 $F_1^*$ ,零点(探头直接接触基体)的采样值 $F_1$ ;当温度为 $T_2$ 时,无穷远点的采样值 $F_2^*$ ,零点的采样值 $F_2$ 。在测试温度处于 $T_1 \sim T_2$ 之间时,采样值与涂镀层厚度的函数曲线处于 $T_1, T_2$ 曲线之间,并基本与 $T_1, T_2$ 平行,通过 $F_3$ 与 $F_1, F_2$ 的

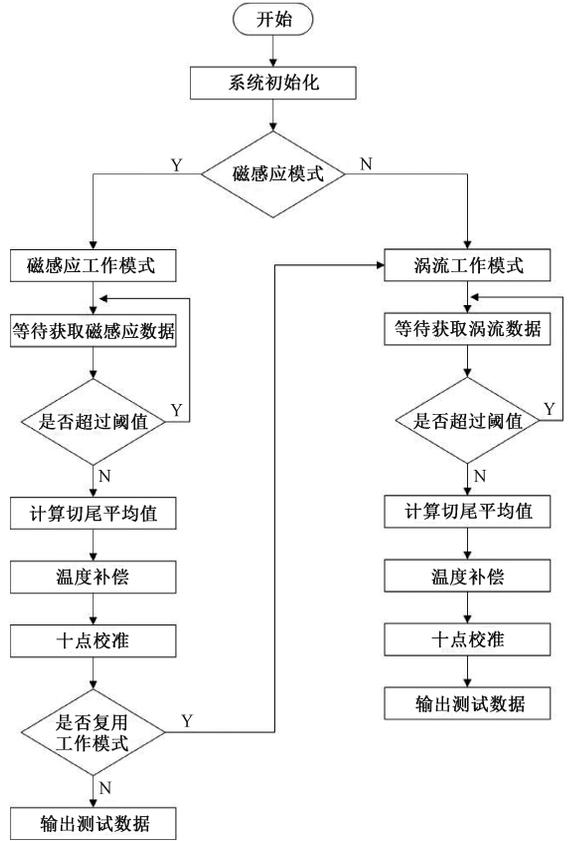


图11 软件流程图

Fig. 11 Software flow pattern

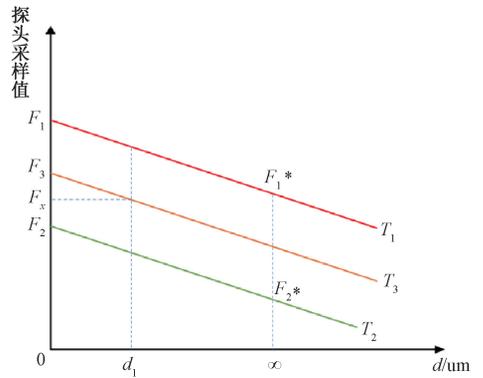


图12 温度校准原理

Fig. 12 Temperature calibration principle

比例关系,计算出温度系数,从而确定曲线 $T_3$ 。每次测量的时候利用无穷远点因为温度变化造成的偏移,再结合温度系数,确定该温度下采样值与涂镀层厚度的函数曲线 $T_3$ ,从而根据测量结果 $F_x$ 处理得到厚度 $d_1$ 。

步骤6)将温度校准后的数据进行十点校准,所谓十点校准就是将数据以一定的比例放到厚度曲线中。若数据在设定的十个范围内,则通过下列公式进行校准转化:

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \quad (9)$$

其中,  $x$  为十点校准前的数据,  $y$  为十点校准后的数据,  $x_0, x_1$  分别为厚度曲线中一段区间的两端,  $y_0, y_1$  分别为  $x_0, x_1$  两端所对应的值。最后根据工作模式, 将  $y$  带入式(6)的  $f$  或式(8)的  $B$ , 即可获得厚度值。

步骤 7) 若为复用工作模式, 将在磁性法工作完成后再进行涡流法工作。磁性法的测量得到厚度  $d$  代表着涂镀层总厚度信息, 此时无法区分涂层和镀层的厚度, 因此在磁性法结束后进行涡流测量, 得到  $d_1$  代表涂层厚度信息, 此时只要将厚度  $d$  减去厚度  $d_1$  即可得到镀层厚度( $d_2$ )信息, 如此一来就可以同时进行镀层厚度测量和涂层厚度测量。

### 3 实验检测

基于第 2 节的电路和软件设计, 开发了涂镀层检测仪, 如图 13 所示。其正面拥有 LCD 屏幕和 9 个按钮; 背面则以 MCU(STM32L431)、测厚电路、涡流探头接口以及磁性法探头接口为主, 两种探头接口之间做了电气隔离, 以防止相互串扰。

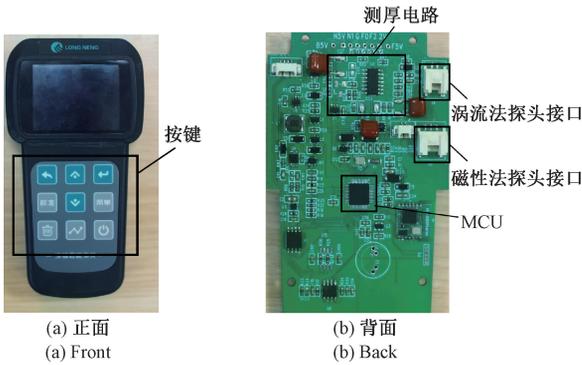


图 13 涂镀层检测仪  
Fig. 13 Coating detector

实验器材如图 14 所示, 分别由机器、探头、锌片、标准片、铁基和铝基组成。其中, 铁基代表绝缘子的铁帽, 标准片代表涂层, 锌片代表镀层, 铝基代表其他非磁性金属基体。为了验证测量精度和稳定性, 将选取不同厚度的锌片和标准片进行测试。锌片厚度分别为 80、100 和 160  $\mu\text{m}$ ; 标准片厚度分别为: 50、99、247、501 和 988  $\mu\text{m}$ , 自有厚度误差为  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。实验将重点测试铁基表面涂层和镀层的厚



图 14 实验器材  
Fig. 14 Experimental equipment

度, 用以验证同步测量涂镀层的准确性, 同时也会对基体表面单一的材料层厚度进行测量、与其他文献的对比测试以及绝缘子铁帽测量。

#### 3.1 铁基表面涂镀层厚度检测

利用磁性法对铁基表面标准片厚度进行检测, 检测结果如表 3 所示。测量标准片厚度的平均误差为有 0.27%, 表明该方法对铁基表面涂层厚度测量的高精度。

表 3 铁基表面涂层厚度检测  
Table 3 Thickness detection of non-conductive coating on iron-based surface

标准片厚度/ $\mu\text{m}$	测量值/ $\mu\text{m}$	误差/ %	平均误差/ %
50	49.5	-0.80	
99	98.9	-0.10	
149	148.2	-0.54	
247	245.7	-0.05	
297	298.3	0.44	
346	348.2	0.66	0.27
501	498.1	-0.06	
551	549.7	-0.24	
600	600.1	0.02	
747	746.5	-0.01	
988	982.7	-0.05	

采用磁性法对铁基表面锌片厚度进行检测, 检测结果如表 4 所示。测量锌片厚度的平均误差为 0.958%, 表明该方法对铁基表面镀层厚度测量的高精度。

表 4 铁基表面镀层厚度检测

Table 4 Thickness detection of non-magnetic coating on iron-based surfaces

锌片厚度/ $\mu\text{m}$	测量值/ $\mu\text{m}$	误差/%	平均误差/%
80	80.3	0.375	
100	100.7	0.7	0.958
160	163	1.8	

采用复用工作模式对铁基表面锌片和标准片(标准片叠放于锌片上方)厚度进行检测, 检测结果如表 5 所示。以锌片厚度为组别来看: 锌片厚度为 80  $\mu\text{m}$  组别, 标准片的平均误差为 1.56%, 锌片的平均误差为 1.90%, 两者的平均误差均在 6% 以内; 锌片厚度为 100  $\mu\text{m}$  组别, 标准片的平均误差为 1.76%, 锌片的平均误差为 2.03%, 两者的平均误差均在 6% 以内; 锌片厚度为 160  $\mu\text{m}$  组别, 标准片的平均误差为 2.25%, 锌片的平均误差为 5.09%, 两者的平均误差均在 6% 以内。3 个组别的锌片平均误差和标准片平均误差均在 6% 以内, 表明该方法对铁基表面涂镀层厚度测量的高精度。

再从整体来看可以发现,标准片的最大误差均出现在50 μm厚度处,可能是硬件设计的原因,使得在标准片厚度非常小的情况下灵敏度较低。而锌片在160 μm组别的测量误差明显高于其他组别的误差,可能是由测量信号衰减较大所致。这些问题为后续的改进方向提供了有价值的线索。

表5 铁基表面涂镀层厚度检测

Table 5 Thickness detection of non-conductive and non-magnetic coating layers on iron-based surfaces

标准片厚度/ μm	锌片厚度/ μm	标准片测量值/ μm	锌片测量值/ μm	标准片平均 误差/%	锌片平均 误差/%
50	80	45.8	83.1		
99	80	100	81.7		
149	80	147.8	81.3		
247	80	247.1	82.8		
297	80	302.2	81.6		
346	80	353.5	82.1	1.56	1.9
501	80	505.1	81		
551	80	553.7	80.8		
600	80	602.3	81.5		
747	80	752.8	80.8		
988	80	992.8	81.6		
50	100	47.4	99.5		
99	100	97.1	100.3		
149	100	147.7	101.4		
247	100	254.7	101.1		
297	100	301	100.7		
346	100	353.2	101.2	1.76	2.03
501	100	507	101.9		
551	100	552.4	100.8		
600	100	603.8	102.1		
747	100	751.6	103.5		
988	100	1 009	101.6		
50	160	54.4	162.2		
99	160	101.3	166.2		
149	160	153.1	166.2		
247	160	251.9	167.4		
297	160	304.6	167.4		
346	160	353.6	164.3	2.25	5.09
501	160	505.3	167		
551	160	557.9	170.9		
600	160	603.6	170.7		
747	160	752.4	172.3		
988	160	995	175		

3.2 铝基表面涂层厚度检测

由于铝基为非铁磁性基体,无法利用磁性法对铝基表面的镀锌层厚度进行测量,因此只能采用涡流法对铝基表面的标准片厚度进行检测,检测结果如表6所示。铝基表面标准片厚度测量准确,平均误差为0.488%,表明该方法对铝基表面涂层厚度测量的高准确度。

表6 铝基表面涂层厚度检测

Table 6 Thickness detection of non-conductive coating on aluminum substrate surface

标准片厚度/μm	测量值/μm	误差/%	平均误差/%
50	50.5	1	
99	99.3	0.3	
149	150.7	1.2	
247	248.4	0.57	
297	298.5	0.51	
346	347.8	0.52	0.488
501	502.5	0.3	
551	550.1	-0.16	
600	598.7	-0.22	
747	746	0.13	
988	992.5	0.46	

3.3 对比测试

本研究对比了同样是基于涡流法和磁性法技术的类似研究:基于铁磁性基底的厚度测量的研究<sup>[6]</sup>和基于铁磁性和非铁磁性基底的分体厚度测量的研究<sup>[5]</sup>。由于以上文献均没有同步的对涂层和镀层的厚度进行测量,因此没有做该项对比。

基于铁磁性基底的对比检测结果如表7所示。可以看到,本研究的测量误差在100 μm和500 μm条件下均优于基于同等检测方法下的类似研究<sup>[5]</sup>,且和应用了环形振荡电路进行改良的磁性法下的研究<sup>[6]</sup>相似。但本研究在50 μm厚度测量时误差较为显著,这一现象主要归因于硬件设计在低厚度范围内灵敏度不足,导致测量精度有所下降。后续研究将通过优化硬件设计,进一步提升低厚度范围内的检测灵敏度,以改善测量精度。

表7 基于铁磁性基底的对比检测

Table 7 Contrast detection based on ferromagnetic substrates

厚度/ μm	文献[5] 误差/%	文献[6] 误差/%	本研究 误差/%
50	0	0.4	-0.8
100	0.5	0.1	-0.1
500	0.6	-0.06	-0.06

基于非铁磁性基底的对比检测结果如表8所示。可以看到,除了在50 μm标准厚度下的测量结果相同,其他标

准厚度,包括 100、250、500  $\mu\text{m}$  和 1 000  $\mu\text{m}$  下的测量误差均要比同检测方法下的类似研究<sup>[5]</sup>要小。说明了本研究在涡流法检测下具有较高的精确度。

表 8 基于非铁磁性基底的对比检测

Table 8 Contrast detection based on non-ferromagnetic substrates

厚度/ $\mu\text{m}$	文献[5]	文献[5]	本研究	本研究
	测量结果/ $\mu\text{m}$	平均误差/ %	测量结果/ $\mu\text{m}$	平均误差/ %
50	50.5		50.5	
100	100.0		99.7	
250	252.0	0.66	251.3	0.514
500	504.0		501.6	
1 000	1 007.0		1 004.3	

除此之外,为了进一步验证本研究所采用的检测方法的优点,选取了 3 种当前的主流技术作为对比。一种是对基于太赫兹无损检测方法的自润滑滑动轴承涂层厚度测量的研究<sup>[19]</sup>,其测量精度最高可以达到 0.18  $\mu\text{m}$ ,虽然测量精度比本研究提到的测量方法要高,但是太赫兹技术所需要的设备复杂,成本高昂。另一种是对基于多频涡流分层检测技术的多层导电涂层厚度测量的研究<sup>[10]</sup>,该检测技术能支持多层导电涂层的厚度测量,但是需要复杂的信号处理电路,设备成本大大提高。最后一种是对基于脉冲涡流技术的金属保护层厚度测量的研究<sup>[20]</sup>,该技术能够在穿透较厚涂层的情况下具有较高的检测精度,但是其设备较为复杂,且在金属保护层为镀锌层时产生的涡流效应会明显影响检测精度。本研究提出的同步测量涂层和镀层厚度的检测方法,是以上 3 种技术均无法实现的。

3.4 绝缘子的铁帽检测

本研究检测的绝缘子如图 15 所示。通常,合格的铁帽表面存在 120  $\mu\text{m}$  厚度的镀锌层。使用复用工作模式,对图中铁帽 4 个点位依次进行检测,检测结果如表 9 所示。

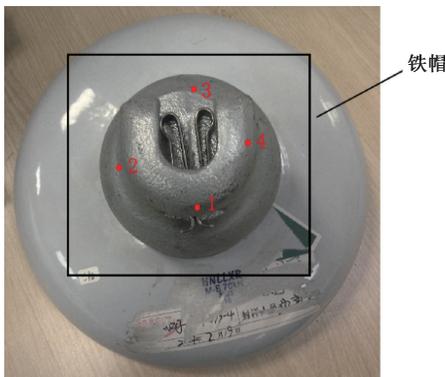


图 15 绝缘子  
Fig. 15 Insulator

表 9 绝缘子的铁帽检测

Table 9 Iron cap inspection of insulators

检测点位	检测厚度/ $\mu\text{m}$	误差/%	平均误差/%
1	124.6	3.8	4.975
2	126.8	5.4	
3	129.5	7.9	
4	123.3	2.75	

根据表 9 的数据分析结果,4 个检测点位的平均误差为 4.975%。尽管该值略高于铁基表面镀层厚度的检测误差,但仍保持在 6% 的误差阈值以内,表明其能够满足绝缘子铁帽厚度检测的精度要求。

从图 15 可以看出,铁帽表面的曲面结构导致检测探头无法实现完全贴合,这是造成检测误差偏大的主要因素。针对这一问题,建议从以下两个方面开展后续研究:其一,优化探头结构设计,提高其与曲面表面的贴合度;其二,开发曲面补偿算法,以修正曲面效应对检测结果的影响。通过上述改进措施,有望进一步提升检测精度,满足更高标准的工程应用需求。

3.5 不同曲率半径的铁棒检测

为了验证探头表面贴合度对检测结果的影响,本研究对不同曲率半径( $R=60\text{ mm}$ 、 $50\text{ mm}$ 、 $35\text{ mm}$ )的圆柱形铁棒分别进行检测,采用的标准片厚度为 50  $\mu\text{m}$ ,如图 16 所示。

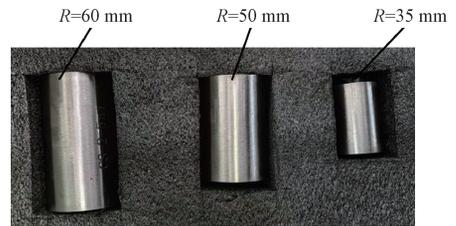


图 16 不同曲率半径的铁棒  
Fig. 16 Iron rods with different radii of curvature

对不同曲率半径的铁棒进行多次检测,分别检测 10 次,检测结果如表 10 所示。根据该表的结果可以看到,随着曲率半径的逐渐减小,厚度检测的误差在逐渐增大,其中在曲率半径为 60 mm 的时候,误差最小。出现该种情况的原因可能是随着曲率半径的减小,探头同待测物的贴合度减小,从而影响到检测结果。为了能够在不同曲率半径下得到较小的检测误差,需要做曲率补偿。

根据表 10,在不同的曲率半径下检测时,其多次测量的结果较为稳定,但是需要对不同的曲率半径分别进行曲率补偿,该曲面补偿算法如下:

$$d_{corrected} = d_{measured} \cdot \left(1 + \frac{k}{R}\right) \quad (10)$$

其中, $d_{measured}$  为检测值, $d_{corrected}$  为经过曲率补偿后的值, $R$  为曲率半径, $k$  为曲面补偿的系数。不同的曲率半径

表10 不同曲率半径的铁棒检测结果

Table 10 Test results of iron rods with different curvature radii

检测次数	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $R=60\text{ mm}$ )	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $R=50\text{ mm}$ )	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $R=35\text{ mm}$ )
1	49.8	68.9	115.2
2	50.3	68.3	115.5
3	50.3	68.3	115.3
4	49.8	68.6	115.5
5	49.2	68.9	115.5
6	49.5	68.3	115.8
7	49.8	68.6	115.7
8	50.0	68.3	115.2
9	50.2	68.5	115.3
10	49.6	68.7	115.3

有不同的曲面补偿系数,本研究中补偿系数和曲率厚度的对应值为:曲率半径 60 mm,补偿系数 0;曲率半径 50 mm,补偿系数 -13.5;曲率半径 35 mm,补偿系数 -19.8。曲面补偿算法的加入,为本研究提到的设备在复杂环境下的检测提供了准确度上的保证。

### 3.6 不同粗糙度的铁基标准片厚度检测

为了研究待测件表面粗糙度对磁性法检测的影响,本研究对不同粗糙度( $Ra=1.6\ \mu\text{m}$ ,  $3.2\ \mu\text{m}$ )的铁基分别进行检测,采用的标准片厚度为  $50\ \mu\text{m}$ ,如图 17 所示。



图 17 不同表面粗糙度的铁基

Fig. 17 Iron-based materials with different surface roughness

对不同表面粗糙度的铁基分别进行 10 次测量,测量的结果如表 11 所示。从表 11 可以发现,随着表面粗糙度的增大,磁性法检测的误差逐渐增大,这可能是由于表面粗糙度的增大引起了磁路的不连续,从而导致磁感应强度的衰减。

### 3.7 不同粗糙度的铝基镀锌片厚度检测

本研究除了验证不同表面粗糙度对磁性法的影响,还对不同粗糙度对涡流法造成的影响进行了验证。同样的,采用  $Ra$  值为  $1.61.6\ \mu\text{m}$  和  $3.2\ \mu\text{m}$  的铝基作为待测件,采用的镀锌片为  $80\ \mu\text{m}$ ,以涡流法作为检测方法,如图 18 所示。

对不同表面粗糙度的铝基分别进行 10 次检测,测量结果如表 12 所示,从中可以发现随着表面粗糙度的增大,所检测的厚度值误差逐渐增大,这可能是由于随着表面粗

表 11 不同表面粗糙度的铁基检测结果

Table 11 Test results of iron-based materials with different surface roughness

检测次数	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $Ra=1.6\ \mu\text{m}$ )	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $Ra=3.2\ \mu\text{m}$ )
1	56.5	67.9
2	56.2	67.3
3	56.3	67.3
4	56.8	68.2
5	55.5	67.6
6	56.5	67.5
7	55.8	68.8
8	55.2	68.6
9	56.0	67.0
10	56.3	67.5



图 18 不同表面粗糙度的铝基

Fig. 18 Aluminum bases with different surface roughness

表 12 不同表面粗糙度的铁基检测结果

Table 12 Test results of iron-based materials with different surface roughness

检测次数	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $Ra=1.6\ \mu\text{m}$ )	厚度/ $\mu\text{m}$ ( $Ra=3.2\ \mu\text{m}$ )
1	54.8	64.6
2	53.2	64.9
3	54.4	64.0
4	54.5	63.8
5	53.6	64.2
6	53.0	64.1
7	53.1	64.6
8	54.2	63.5
9	53.8	64.1
10	53.6	63.2

糙度增大,铝基表面的局部凹凸直接影响到了涡流密度分布,增加了电流分布的不均匀性,引起信号波动。

## 4 结 论

本研究针对铁磁性基体上的涂镀层厚度同步测量问题,提出了一种基于涡流和磁性法的同步测量方法。通过有限元仿真验证了镀层厚度与磁感应强度、涂层厚度与线

圈阻抗的负相关关系,为电路设计提供了理论依据。设计的涡流法和磁性法测厚电路简洁高效,避免了传统振荡电路的复杂性,提高了检测效率和准确性,同时引入了曲面补偿算法,在曲面检测环境下提升了检测的准确度。实验结果表明,该方法在铁基和铝基表面的涂层及镀层厚度测量中,平均误差分别低于 6% 和 1%,满足绝缘子铁帽的检测要求。

## 参考文献

- [1] MAO X F, LEI Y Z. Thickness measurement of metal pipe using swept-frequency eddy current testing[J]. *NDT & E International*, 2016, 78: 10-19.
- [2] 李冬,熊婧,许贵平,等. 一种非铁磁性金属上非铁磁性金属涂镀层厚度的测量方法[J]. *无损检测*, 2018, 40(2):12-14.  
LI D, XIONG J, XU G P, et al. A method of measuring the thickness of non-magnetic metallic coatings on non-magnetic metallic basis [J]. *Nondestructive Testing*, 2018,40(2): 12-14.
- [3] 王雅婷,孔明,华杭波,等. 基于激光扫描干涉测距系统的玻璃厚度测量方法[J]. *应用激光*, 2024, 44(7): 120-126.  
WANG Y T, KONG M, HUA H B, et al. Measurement method of glass thickness based on laser sweep interferometric ranging system [J]. *Applied Laser*, 2024, 44(7): 120-126.
- [4] 李弘义,谭智勇,万文坚,等. 基于 4.3 THz 量子级联激光器的微米级无损厚度测量[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(3): 356-360.  
LI H Y, TAN ZH Y, WAN W J, et al. Non-destructive thickness measurement with micron level accuracy based on a 4.3 THz quantum-cascade laser [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43 (3): 356-360.
- [5] 华国环,张文锋,邱立争. 基于 STM32F103 的涂镀层测厚仪[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(8):40-43.  
HUA G H, ZHANG W F, QIU L ZH. Coatinglayer thickness gauge based on STM32F103[J]. *Instrumentation Technology and Sensor*, 2020(8): 40-43.
- [6] 饶增仁,赵洁,郭明超,等. 环形振荡器在金属涂层精密测厚中的应用[J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(10): 205-206,209.  
RAO Z R, ZHAO J, GUO M CH, et al. Application of ring oscillator in precision thickness measurement of metal coating [J]. *Automation and Instrumentation*, 2017(10): 205-206,209.
- [7] ANSARI Z A, ABU-NABAH B A, ALKHADER M, et al. Experimental evaluation of nonmagnetic metal clad thicknesses over nonmagnetic metals using apparent eddy current conductivity spectroscopy [J]. *Measurement*, 2020,164:108053.
- [8] 张智超,沈常宇,朱周洪,等. 漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021(4): 150-159.  
ZHANG ZH CH, SHEN CH Y, ZHU ZH H, et al. Magnetic flux leakage combined with eddy current for non-ferromagnetic metal materials damage detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021(4): 150-159.
- [9] GE J H, YUSA N, FAN M B. Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness measurement using a multi-gene genetic programming algorithm [J]. *NDT & E International*, 2021, 120: 102423.
- [10] WEN D, WANG S L, XUE Z G, et al. Coating thickness measurement of multilayer ferromagnetic samples based on pulsed eddy current testing technology [J]. *Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring*, 2023, 65(2): 72-79.
- [11] ZHANG D J, YU Y T, LAI C, et al. Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multifrequency eddy current techniques [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, 31(3): 191-208.
- [12] XIA Z H, HUANG R C, CHEN Z Q, et al. Eddy current measurement for planar structures [J]. *Sensors*, 2022, 22: 8695.
- [13] MENG X, LU M, YIN W, et al. Inversion of lift-off distance and thickness for nonmagnetic metal using eddy current testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-8.
- [14] HUANG P, LI Z, LONG J, et al. Measurement of lift-off distance and thickness of nonmagnetic metallic plate using pulsed eddy current testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-10.
- [15] 戢沁楠,周斌,钟景阳,等. 基于超宽带步进频 GPR 和 EMI 的钢筋检测[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(5): 34-40.  
JI Q N, ZHOU B, ZHONG J Y, et al. Reinforcing bar detection based on ULTRA-wideband stepped frequency GPR and EMI [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(5): 34-40.
- [16] ANGANI C S, RAMOS H G, RIBEIRO A L, et al. Lift-off point of intersection feature in transient eddy-current oscillations method to detect thickness

- variation in stainless steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6): 1-8.
- [17] LI J, WU X J, ZHANG Q, et al. Measurement of lift-off using the relative variation of magnetic flux in pulsed eddy current testing [J]. NDT & E International, 2015, 75: 57-64.
- [18] 吴振成,张丽攀,周丰镞,等. 碳纤维复合材料涂层厚度的涡流测量[J]. 无损检测, 2015, 37(2): 5-9.  
WU ZH CH, ZHANG L P, ZHOU F L, et al. Eddy current measurement of carbon fiber composite coating thickness[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(2): 5-9.
- [19] 黄永林,黄异,钟舜聪,等. 自润滑滑动轴承涂层厚度的太赫兹无损检测[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2024, 63(4): 640-648.
- HUANG Y L, HUANG Y, ZHONG SH C, et al. Terahertz non-destructive testing of coating thickness of self-lubricating sliding bearings [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2024, 63(4): 640-648.
- [20] 李超月,王璇,牛卫飞,等. 金属保护层对脉冲涡流检测影响实验研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(14): 24.  
LI CH Y, WANG X, NIU W F, et al. Experimental study on the influence of metal protective layer on pulsed eddy current testing [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(14): 24.

### 作者简介

谢金鹏(通信作者),工程师,硕士研究生,主要研究方向为电网设备技术。

E-mail: 1101178341@qq.com