

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306502

# 一种利用电涡流效应的微孔直径和深度测量方法\*

牛国钰<sup>1,2</sup> 潘巧生<sup>1,2</sup> 万澳德<sup>1,2</sup> 陈立蔚<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009; 2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009)

**摘要:**为实现微孔直径和深度非接触式测量,提出一种利用电涡流效应的测量方法,由单层多匝线圈构成的测量线圈在目标体上方匀速经过被测微孔过程中,测量线圈电感值变化的时间与微孔的直径成正比;测量线圈电感峰值与微孔直径的二次方具有线性关系,该线性关系的斜率与微孔的深度成正比。根据等效涡流环模型,建立测量线圈电感值与微孔直径和深度之间的数学模型,利用COMSOL有限元仿真,分析测量过程中微孔直径和深度对测量线圈电感值的影响规律,仿真结果与等效涡流环模型分析结果一致。搭建微孔直径和深度的电涡流测量系统,实现直径1.5~5 mm,深度0.1~0.5 mm的微孔测量。当微孔直径大于3 mm,微孔深度大于0.3 mm时,微孔直径测量相对误差在 $\pm 2\%$ 内。微孔深度的测量分辨率为0.01 mm,在微孔直径大于2.5 mm时,微孔深度的测量误差小于0.02 mm。

**关键词:**微孔测量;电涡流效应;测量线圈

**中图分类号:** TM930.12; TN601

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 510.10

## Micro-hole diameter and depth measurement method utilizing eddy current effect

Niu Guoyu<sup>1,2</sup> Pan Qiaosheng<sup>1,2</sup> Wan Aode<sup>1,2</sup> Chen Liwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to identify non-contact measurement of micro-hole diameter and depth, this paper proposes a measurement method utilizing eddy current effect. The measuring coil, composed of a single-layer multi-turn coil, traverses evenly over the target body during the micro-hole measurement process. The time variation of the coil's inductance correlates directly with the micro-hole's diameter. A linear relationship exists between the peak value of the coil's inductance and the square of the micro-hole's diameter, where the slope of this linear relationship is proportional to the depth of the micro-hole. According to the equivalent eddy current ring model, a mathematical model was established between the coil's inductance value and the micro-hole's diameter and depth. The influence law of the micro-hole diameter and depth on the coil's inductance value during the measurement process was analyzed by COMSOL finite element simulation. The simulation results were consistent with the analysis of the equivalent eddy current ring model. The eddy current measurement system for micro-hole diameter and depth was established, achieving measurements for diameters of 1.5~5 mm and depths of 0.1~0.5 mm. When the micro-hole diameter is larger than 3 mm and depth greater than 0.3 mm, the relative error in the diameter measurement stays within  $\pm 2\%$ . The resolution of the depth measurement is 0.01 mm. When the diameter of the micro-hole exceeds 2.5 mm, the measurement error of depth is less than 0.02 mm.

**Keywords:** microporous measurement; eddy current effect; coil of measurement

## 0 引言

随着我国精密制造业的快速发展,各领域对精密测量需求越来越迫切,如发动机燃料喷嘴、制导系统毫米轴承以及集成电路中的精密测量,其测量水平对精密制造的加工精度影响巨大<sup>[1-5]</sup>。目前,零件外尺寸的测量精度可以达到 1 nm 甚至 0.1 nm<sup>[1]</sup>,相比之下内尺寸测量受限,远落后于外尺寸测量,微孔直径和深度的测量属于内尺寸测量,为解决此类难题国内外学者先后提出了微孔接触式测量<sup>[6-8]</sup>与非接触式测量<sup>[9-18]</sup>,其中接触式测量包括三坐标测量法<sup>[6-8]</sup>、尺寸线规法等,接触式测量由于测量力的存在导致测量结果不准确,对测量人员的技术要求较高,不适用于大规模的批量微孔测量。非接触式测量包括光学测量法<sup>[9-10]</sup>、气动测量法<sup>[11-12]</sup>、光纤测量法<sup>[13-14]</sup>与电容测量法<sup>[15-18]</sup>等。其中光学测量多应用于测量通孔,且对被测物表面镜面度有一定要求,因此应用场景受限。气动测量法对气源要求很高,供气系统体积庞大,装置不灵活,影响测量效率。光纤测量法成本较高,不利于生产中的应用。电容测量法在深入微孔测量时存在测量盲区,测量效率较低,且易受环境污染物影响,致使测量结果不准,且电容不满足工业生产中对微孔大规模批量测量的要求<sup>[18]</sup>。

近年来电涡流检测技术发展迅速,利用电涡流效应可以实现金属构件的无损检测<sup>[19-20]</sup>与高精度位移测量<sup>[21-23]</sup>,测量过程属于非接触式测量,测量结果不受测量力影响,电涡流测量装置具有简单易操作,测量成本低,测量效率高等优点。

文章提出利用电涡流效应实现微孔直径和深度测量的方法。详细介绍微孔直径和深度的测量过程,并分析测量过程中测量线圈电感值的特征点与微孔直径与深度的关系,设计了电涡流微孔测量系统,实验验证了电涡流效应的微孔直径和深度的测量方法的可行性。

## 1 工作原理

### 1.1 电涡流测量微孔直径和深度的原理

图 1 为微孔直径和深度的电涡流测量示意图,在带有微孔的金属材料目标体上方放置测量线圈,其中微孔的直径为  $D$ ,微孔的深度为  $h$ ,目标体以速度  $v$  由左向右运动,测量线圈是由漆包线绕制的平面单层多匝线圈,测量线圈距目标体的距离  $x$  为提高高度,测量线圈中通入频率  $f$  的正弦激励信号。

通有正弦激励信号的测量线圈会感应出交变磁场  $B_1$ ,在  $B_1$  范围内的目标体中将感应出电涡流,感应电涡流以涡流环的形式存在于导体中,导体中的电涡流会产

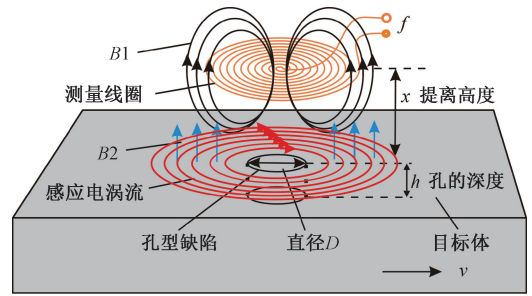


图 1 微孔直径和深度的电涡流测量示意图

Fig. 1 Eddy current measurement of micropore diameter and depth

生一个次生磁场  $B_2$ ,  $B_2$  的方向与  $B_1$  的方向相反,  $B_1$  与  $B_2$  相互作用会改变测量线圈的阻抗,当微孔到达测量线圈下方时,微孔会影响目标体中感应电涡流的密度以及分布情况,从而改变次生磁场  $B_2$  的强弱,进而影响到测量线圈的电感值。

测量线圈对微孔测量过程中,目标体内涡流环与微孔相对位置变化可分为 9 个时刻,如图 2(a)~(i)所示。图中圆环表示测量线圈在目标导体上产生的涡流环,直径为  $d$ ,直径为  $D$  的微孔初始位置如图 2(a)所示,此时涡流环与微孔未接触,小孔对测量线圈无影响。如图 2(b)涡流环开始与微孔接触时,微孔开始引起测量线圈电感值增加,当涡流环与微孔的相对位置经过图 2(c)到达图 2(d)的位置,微孔已全部处于涡流环上,由于涡流环上的电涡流密度值较大,此时测量线圈的电感值最大。当涡流环与微孔的相对位置关系由图 2(e)过渡到图 2(f),测量线圈的电感值逐渐减小,在图 2(f)位置达到最小,微孔出涡流环的过程与进涡流环的过程情况类似。

整个过程中测量线圈电感值的变化如图 3 所示,图 3 中的标号与图 2 测量过程中各个相对位置的标号相对应,从微孔开始进入涡流环到微孔恰好出涡流环的过程中,经历的时间为  $t$ ,测量线圈移动的距离为  $D + d$ ,因此可得:

$$v \cdot t = d + D \quad (1)$$

其中,  $v$  为目标体的运动速度。因此,可通过测量线圈电感值变化的时间及目标体通过的运动速度实现微孔直径测量。

此外,图 3 中  $d$  位置处的测量线圈电感峰值  $L_m$  的大小受微孔直径和深度共同影响,在微孔直径测量结束后,分析测量线圈电感峰值与微孔直径和深度的变化规律,将微孔直径和深度对测量线圈电感峰值的影响分离,通过研究微孔深度对测量线圈电感峰值的影响规律,实现微孔深度的测量。

### 1.2 等效涡流环模型分析

涡流环与测量线圈的电磁关系可以等效为两个线圈

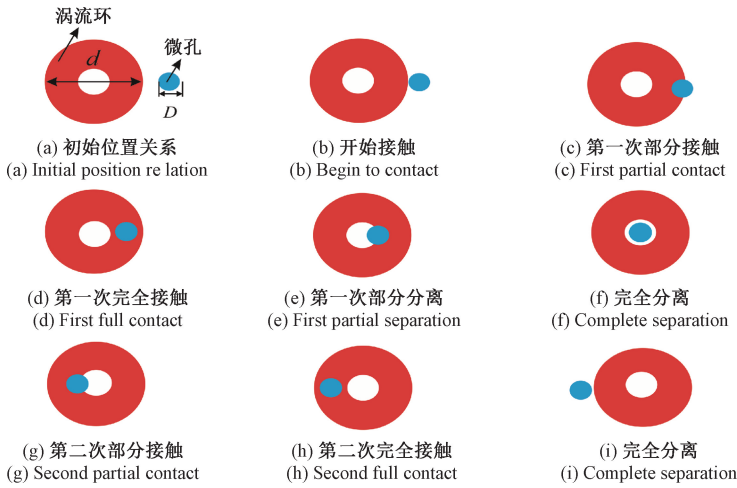


图 2 测量过程中目标体内涡流环与微孔的相对位置关系

Fig. 2 The relative position relation between eddy current ring within the target and microhole during the measurement process

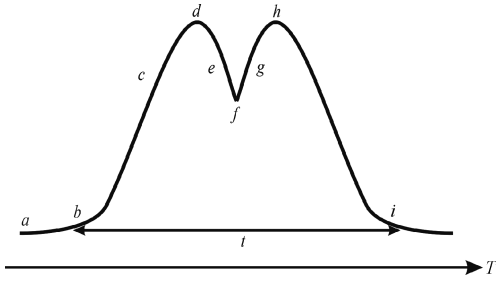


图 3 线圈测量微孔过程中电感值的变化  
Fig. 3 The change of inductance value when the coil measures the microhole

之间的电磁关系,建立涡流环等效模型,分析单匝涡流环等效线圈与单匝测量线圈之间的关系,如图 4 所示。

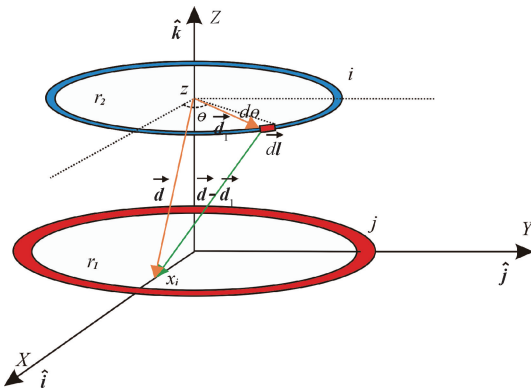


图 4 单匝线圈模型  
Fig. 4 Single turn coil model

图 4 中  $r_1$  代表第  $j$  匝涡流环等效线圈的半径,  $r_2$  代表第  $i$  匝测量线圈的半径,  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  分别代表  $X, Y, Z$  3 个坐标轴的方向向量, 当目标体无微孔时, 第  $i$  匝测量线圈上的微元  $d\vec{l}$  在  $x_i$  处产生的磁感应强度为:

$$\vec{dB}(x_i) = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times (\vec{d} - \vec{d}_1)}{4\pi |\vec{d} - \vec{d}_1|^2} \quad (2)$$

其中:

$$I d\vec{l} = -I r_2 \sin\theta d\theta \hat{i} + I r_2 \cos\theta d\theta \hat{j} \quad (3)$$

代入得:

$$\vec{dB}(x_i) = \frac{\mu_0 I \{r_2 z \cos\theta \hat{i} + (r_2^2 - r_2 x_i \cos\theta) \hat{k}\} d\theta}{4\pi \{(x_i - r_2 \cos\theta)^2 + r_2^2 \sin^2\theta + z^2\}^{3/2}} \quad (4)$$

其中,  $z$  表示两线圈圆心距离, 在  $x_i$  处的微元环的磁感应强度为:

$$\vec{B}_{\hat{k}(x_i)} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r_2^2 - r_2 x_i \cos\theta) \hat{k} d\theta}{\{(x_i - r_2 \cos\theta)^2 + r_2^2 \sin^2\theta + z^2\}^{3/2}} \quad (5)$$

该匝线圈在目标体表面产生的磁通量为:

$$\Phi_j = \int \vec{B}_{\hat{k}(x_i)} \cdot d\vec{S} = \int_0^{r_1} \vec{B}_{\hat{k}(x_i)} \cdot 2\pi x_i dx_i \quad (6)$$

测量线圈的总匝数为  $N_m$ , 则总磁通量为:

$$\Phi = \sum_1^{N_m} \Phi_j \quad (7)$$

设涡流环等效线圈的匝数为  $N_e$ , 线圈横截面圆半径为  $R_e$ , 流过该匝线圈的电流为:

$$I_{ej} = A(x) \cdot \pi R_e^2 \quad (8)$$

其中,  $A(x)$  表示该匝线圈所处区域的电涡流密度。

涡流环直径为:

$$D_e = 2N_e R_e + d_o \quad (9)$$

其中,  $d_o$  表示涡流环内圈直径, 涡流环等效线圈的第  $j$  匝线圈电感值为:

$$L_{2j} = \frac{\Phi}{I_{ej}} = \frac{\Phi}{\pi A(x_j) R_e^2} \quad (10)$$

涡流环等效线圈总电感值为:

$$L_2 = \sum_1^{N_e} L_{2j} \quad (11)$$

当目标体中带有微孔, 涡流环与微孔的相对位置如图 2(d) 时, 涡流环等效模型如图 5 所示。

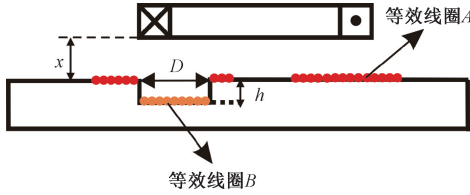


图 5 微孔测量时涡流环等效线圈模型  
Fig. 5 Vortex ring equivalent coil model for microporous measurement

此时微孔位于涡流环环内, 由于微孔的影响, 涡流环的等效线圈分为等效线圈 A 和等效线圈 B, 两者高度差为微孔深度  $h$ , 等效线圈 B 的直径为微孔直径  $D$ 。此时涡流等效线圈的电路模型如图 6 所示, 此时涡流环等效线圈电感值:

$$L_2 = L_{2A} + L_{2B} \quad (12)$$

其中,  $L_{2A}$  表示等效线圈 A 的电感值,  $L_{2B}$  表示等效线圈 B 的电感值。根据式 (11), 等效线圈电感值可以改写为等效线圈 A 各匝线圈电感值之和与等效线圈 B 各匝线圈电感值之和:

$$L_2 = \sum_1^{N_A} L_{2Ai} + \sum_1^{N_B} L_{2Bi} \quad (13)$$

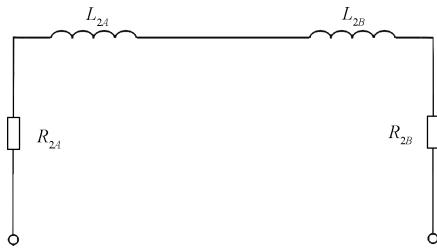


图 6 微孔测量时涡流环等效线圈电路模型  
Fig. 6 Circuit model of vortex ring equivalent coil for microporous measurement

如图 7 所示,  $A(x)$  表示涡流环电涡流密度实际分布,  $A'(x)$  表示等效的电涡流密度分布。等效后的电涡流密度在一定区域内不变, 因此等效线圈 B 每匝线圈电感值相同即:

$$L_{2B1} = L_{2B2} = L_{2B3} = \dots = L_{2Bi} \quad (14)$$

在微孔存在时可以将  $L_2$  的表达式修改为:

$$L_2 = L_{2A} + \frac{D}{4R_{eB}} L_{2B1} \quad (15)$$

其中,  $R_{eB}$  表示等效线圈 B 的横截面圆半径,  $D$  为微

孔直径。令  $L_{2A} = b_A$ ,  $\frac{L_{2B1}}{4R_{eB}} = K$  则式 (15) 可以改写为:

$$L_2 = KD + b_A \quad (16)$$

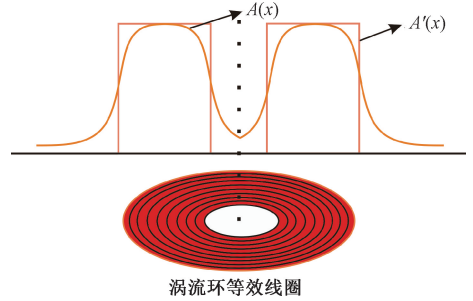


图 7 涡流环电涡流密度等效情况

Fig. 7 Equivalence of eddy current density in eddy current ring

根据 Wang 等<sup>[21-23]</sup>的工作, 通过电涡流效应的变压器模型可以得到测量线圈电感值  $L$  与涡流环等效线圈电感值之间的关系:

$$L = L_1 - \frac{(\omega L_2 / R_2)^2}{1 + (\omega L_2 / R_2)^2} L_1 k^2(x) \quad (17)$$

其中,  $L_1$  表示测量线圈初始电感值,  $L$  表示测量线圈在测量过程中的电感值,  $R_2, L_2$  表示涡流环等效线圈的电阻和电感值,  $k(x)$  与测量线圈与目标体之间的提高距离  $x$  有关,  $\omega L_2 / R_2$  为目标体内涡流效应等效线圈的  $Q$  值,  $Q < 1$ , 将式 (17) 采用泰勒公式展开后得:

$$L = L_1 - \frac{\omega^2 L_2^2}{R_2^2} L_1 k^2(x) + o\left(\frac{\omega^2 L_2^2}{R_2^2}\right)^2 \quad (18)$$

忽略高阶项得:

$$L = L_1 - \frac{\omega^2 L_2^2}{R_2^2} L_1 k^2(x) \quad (19)$$

将式 (16) 代入到式 (19) 中得到测量线圈电感值  $L$  与微孔直径  $D$  和提高高度  $x$  之间的方程为:

$$L = L_1 - L_1 \frac{\omega^2 k^2(x)}{R_2^2} (KD + b_A)^2 \quad (20)$$

微孔的深度会影响提高高度  $x$ , 因此得到在提高高度  $x$  和微孔深度  $h$  不变的情况下, 测量线圈电感  $L$  与微孔直径的平方  $D^2$  存在线性关系, 这种线性关系的斜率可以反映微孔深度  $h$  的大小, 从而实现微孔深度测量。

## 2 电涡流测量微孔直径和深度的有限元仿真

文章采用 COMSOL Multiphysics 5.4 仿真软件进行有限元仿真, 利用 COMSOL 软件中的三维磁场接口在频域下展开对线圈与测量目标体之间电磁场的仿真。仿真的

内容主要包括测量线圈参数仿真和测量线圈对不同微孔的测量结果仿真。

### 2.1 测量线圈参数仿真

建立测量线圈有限元仿真模型如图 8 所示。

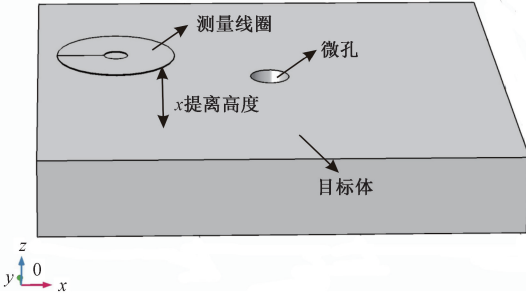


图 8 测量线圈仿真模型

Fig. 8 Measurement coil simulation model

测量线圈参数包括线圈的激励频率  $f$ 、提高高度  $x$ 、线圈的内径  $D_m$  和线圈的匝数  $N$ ，研究内容包括测量线圈激励频率  $f$  对目标体内感应电流密度的影响，提高高度  $x$  对目标体内感应电流密度的影响，测量线圈内径  $D_m$  和匝数  $N$  对微孔尺寸测量的影响。

#### 1) 激励频率 $f$ 对目标体内感应电流密度的影响

测量线圈在目标体上产生的感应电涡流密度值越大，测量过程中微孔对线圈的电感参数影响越大，利用有限元仿真软件仿真频率对目标体内感应电流密度的影响，仿真频率范围为 1 kHz~10 MHz，图 9 为有限元仿真扫描结果，当激励频率升高时，目标体内电流密度值先增加后减小，最高值出现在 1 MHz 左右。

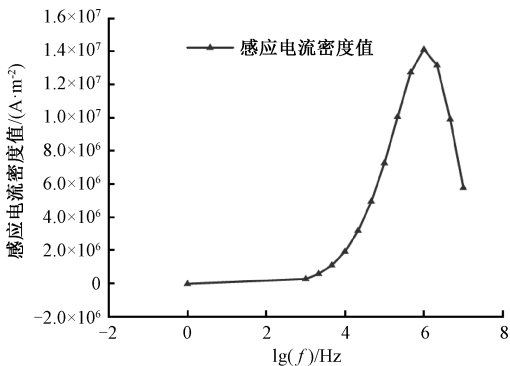


图 9 激励频率对铝合金构件感应电流密度值影响

Fig. 9 Influence of excitation frequency on induced current density of aluminum alloy component

#### 2) 提高高度 $x$ 对目标体内感应电流密度的影响

为了研究测量线圈与目标体之间的提高高度  $x$  对目标体内感应电流密度值的影响，通过 COMSOL 有限元仿真软件中改变提高高度  $x$ ，仿真目标体内感应电流密度的情况，在提高高度变化的情况下，目标体内不同扫描位

置的电涡流密度情况如图 10 所示。

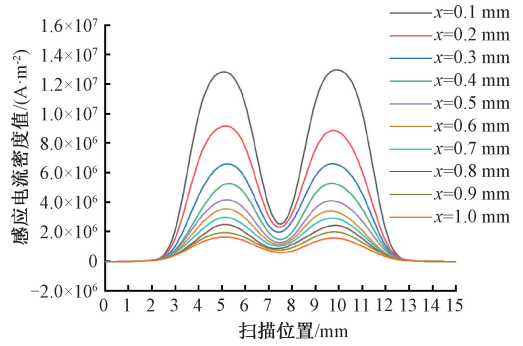


图 10 提高高度对铝合金构件内感应电流密度值的影响

Fig. 10 Effect of lifting height on induced current density in aluminum alloy component

目标体表面电涡流密度分布由涡流环中心向两边先增加后减小，呈现双峰状，峰值称之为感应电流密度峰值，提高高度  $x$  与感应电流密度峰值的关系如图 11 所示，目标体内感应电流密度峰值随提高高度增加而下降，当  $x > 0.5$  mm 时，目标体内感应电流密度峰值的变化趋势放缓。

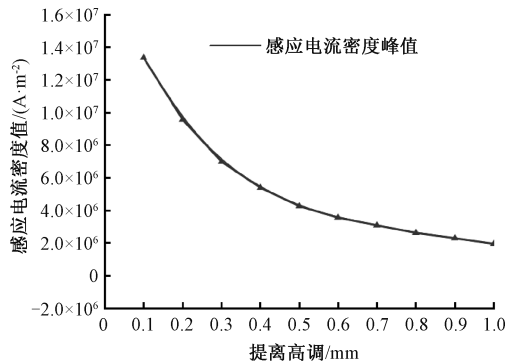


图 11 提高高度对感应电流密度峰值的影响

Fig. 11 Effect of lift height on peak induced current density

#### 3) 测量线圈参数对微孔尺寸测量的影响

通过仿真测量线圈的内径和匝数对微孔测量过程中线圈电感变化率的影响，分析测量线圈参数对微孔测量的影响。线圈电感变化率为  $(L_m - L_0) / L_0$ ，其中  $L_m$  为测量过程中线圈电感的峰值。利用测量线圈仿真模型，通过 COMSOL 的参数化扫描功能实现测量线圈对小孔沿  $x$  轴方向的扫描，记录扫描过程中测量线圈电感参数的变化，图 12 表示的是线圈内径  $D_m$  对线圈电感变化量的影响。

图 13 表示的是线圈匝数  $N$  对线圈电感变化量的影响，横坐标代表线圈匝数。通过仿真结果可以看出，随着线圈内径增加，线圈电感变化率先减小后增加后继续减小，随着线圈匝数增加，线圈电感变化率一直减小。结合

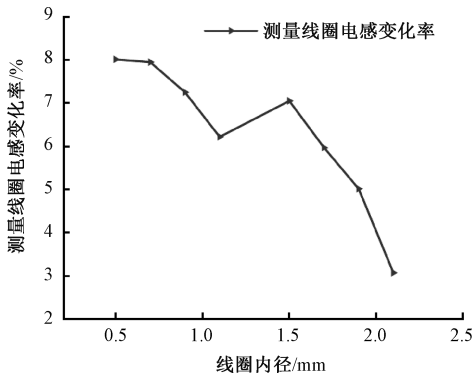


图 12 线圈内径对线圈电感变化量的影响

Fig. 12 Influence of coil inner diameter on coil inductance variation

仿真结果和线圈实际加工的要求,确定测量线圈的相关参数如表 1 所示。

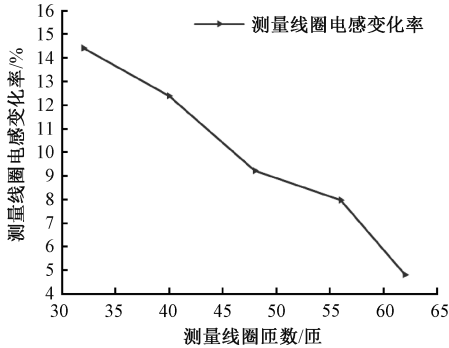


图 13 线圈匝数对线圈电感变化量的影响

Fig. 13 The influence of coil turns on coil inductance variation

表 1 测量线圈参数

Table 1 Measuring coil parameters

内径/mm	外径/mm	匝数	频率/MHz	幅值/V
1.5	7.5	48	1	1

### 2.2 测量线圈对不同尺寸下微孔的测量结果仿真

测量线圈与目标板之间的位置关系如图 14 所示,测量线圈与目标板之间的提高高度为 0.1 mm,目标板的材料为铝合金 7075,电导率为 20 °C (68°F) (%ACS):33,相对磁导率  $\mu_r = 1$ ,相对介电常数  $\epsilon_r = 1$ 。微孔直径系列为 1~5 mm,相邻微孔之间直径依次递增 0.5 mm,相邻微孔之间距离为 20 mm,同一行微孔的深度相同。使用 COMSOL 的参数化扫描功能将线圈沿 x 轴方向扫描微孔,步长为 1 mm,对一行的微孔扫描完成后,记录并保存线圈的电感值数据,将一行微孔的深度改变,继续上述过程,仿真结束后,对仿真得到的测量线圈电感值与微孔直径之间的数据进行处理。

对孔深 0.5 mm 的一行微孔进行扫描,得到在扫描过

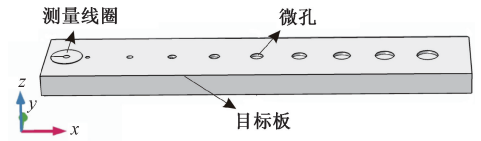


图 14 微孔测量的有限元仿真模型图

Fig. 14 Finite element simulation model diagram of microporous measurement

程中测量线圈电感值变化情况如图 15 所示,在孔的深度相同的情况下,孔的直径越大,线圈电感峰值  $L_m$  越大。改变微孔的深度,重复上述过程后,线圈电感峰值  $L_m$  与微孔直径  $D$  的关系如图 16 所示,当  $h > 0.5$  mm 时,曲线分布开始密集,测量线圈对微孔深度的测量能力相应变差,微孔深度的测量量程应小于 0.5 mm,观察线圈电感峰值  $L_m$  与孔的直径之间的关系非线性,根据第一章涡流环等效模型的理论引导,得到  $L_m$  与  $D^2$  之间的关系如图 17 所示。

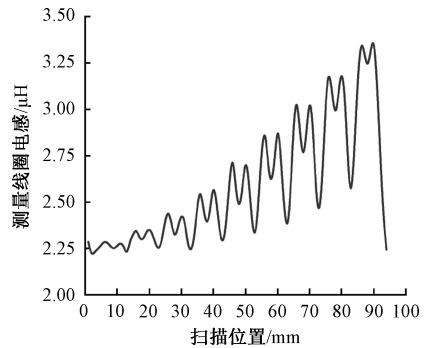


图 15 扫描过程中线圈电感变化

Fig. 15 Coil inductance changes during scanning

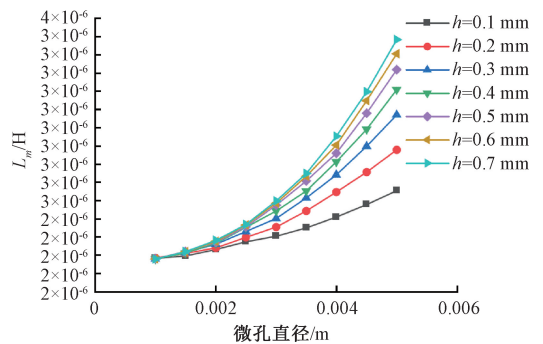


图 16 测量线圈电感峰值与微孔直径之间的关系

Fig. 16 Measure the relationship between the peak inductance of the coil and the diameter of the microhole

图 17 中所示数据规律显示  $L_m$  与  $D^2$  之间的关系呈线性关系。对数据进行线性拟合,拟合公式和  $R^2$  值如表 2 所示。

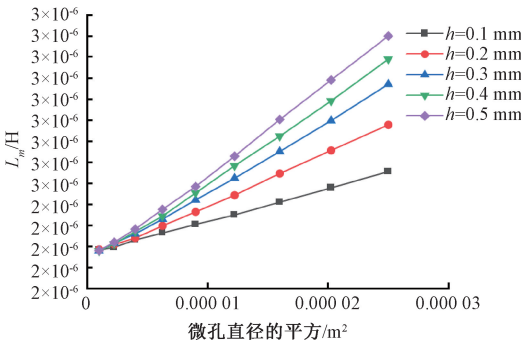


图 17 测量线圈电感峰值与微孔直径的平方之间的关系

Fig. 17 Measure the relationship between the peak inductance of the coil and the square of the diameter of the microhole

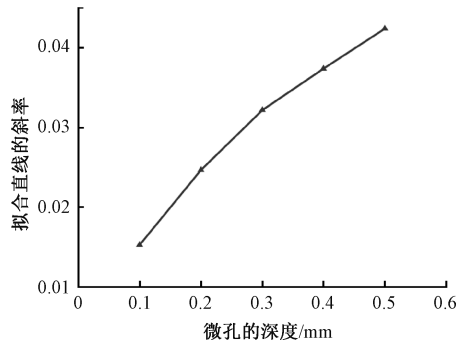


图 18 拟合直线斜率与微孔深度之间关系

Fig. 18 The relationship between the slope of the line and the depth of the microhole was fitted

表 2  $L_m$  与  $R^2$  的数据拟合结果

Table 2 Data fitting results of  $L_m$  and  $R^2$

孔深	拟合公式	$R^2$
0.1 mm	$L_m = 0.015 4D^2 + 2 \times 10^{-6}$	0.999 4
0.2 mm	$L_m = 0.025D^2 + 2 \times 10^{-6}$	0.998 5
0.3 mm	$L_m = 0.032 9D^2 + 2 \times 10^{-6}$	0.998 6
0.4 mm	$L_m = 0.038 2D^2 + 2 \times 10^{-6}$	0.998 6
0.5 mm	$L_m = 0.042 9D^2 + 2 \times 10^{-6}$	0.998 8

如图 17 所示,微孔的深度变化会引起拟合直线斜率的变化,且拟合直线均过一定点 ( $D_0^2, L_0$ ),根据数据之间的线性关系,可以得出孔的直径与线圈电感值的表达式:

$$L - L_0 = k(D^2 - D_0^2)$$

其中,  $L$  为线圈的电感值,  $D$  为微孔的直径,  $L_0, D_0$  分别为拟合直线过定点处的线圈电感值与孔的直径。在无微孔的情况下,由于线圈与目标体之间固定的电磁耦合关系,线圈此时有一固定的电感值,因此  $D_0 = 0, L_0$  为无微孔时,测量线圈的电感值。将拟合直线的斜率与微孔深度进行数据拟合,拟合之后的结果如图 18 所示,拟合的表达式为:

$$k = -0.079 3h^2 + 0.114 5h + 0.004 8$$

$$R^2 = 0.999 2$$

利用该模型可以实现对微孔深度的测量。

### 3 微孔直径和深度的测量实验

#### 3.1 测量系统设计

实验采用的目标板材料为 7075 铝合金,根据微孔直径和深度测量需求,设计了相应的电涡流测量系统,其中包括丝杆滑台,测量线圈,线圈电感采集电路,探头支架和带有微孔的铝合金构件,如图 19 所示,铝合金构件固定在丝杆滑台上,丝杆滑台由控制器控制运行的速度和方向。探头支架将测量探头固定于铝合金

构件上方,测量系统工作时,由丝杆滑台带动铝合金构件以恒定速度  $v$  运动,微孔经过测量线圈下方时测量线圈的电感值会发生变化,数据采集系统将其采集并传输到计算机。

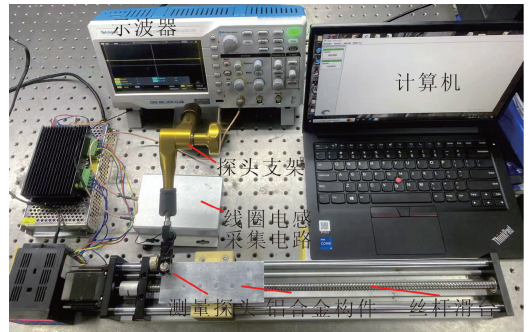


图 19 电涡流测量系统实物图

Fig. 19 Physical diagram of eddy current measurement system

#### 3.2 测量线圈电感采集电路的设计

采集电路由交流电桥,差动放大器  $G_1$ , 锁相放大器, 基准电压源  $U_r$ , 电压放大器  $G_2$ , 示波器和计算机组成,如图 20 所示,交流电桥中信号源  $V_1$  为正弦交流信号,频率为 1 MHz,  $L_2$  为参考线圈,  $R_4$  与  $R_2$  为采样电阻。差动放大器对交流电桥输出的微弱信号进行放大,锁相放大器解调代表线圈电感的电压信号  $U_L$ , 电压放大器对  $U_L$  进行放大输出。利用示波器观察线圈电感采集电路的输出信号,并将示波器采集数据传输到计算机,通过计算机对实验数据进行处理。

实验中采用的微孔直径尺寸如图 21 所示。

微孔直径由 1.5 mm 递增到 5 mm,相邻两孔之间距离为 20 mm,同一行孔的深度相同,不同行之间,孔深从 0.1~1 mm 递增,相邻两行孔深相差 0.1 mm。带有微孔的测量目标板由丝杆滑台驮载,随丝杆滑台由左向右匀速运动,按行对微孔进行测量,当前行测量完成切换下一行继续测量。

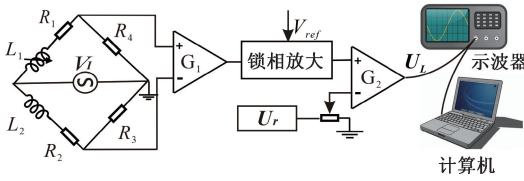


图 20 测量线圈电感采集电路

Fig. 20 Measurement coil inductance acquisition circuit

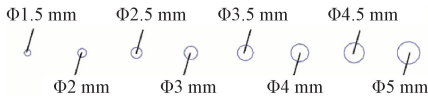


图 21 目标板上的微孔

Fig. 21 The microholes in the target plate

### 3.3 微孔直径测量实验

测量线圈依次对深度系列为 0.1~0.5 mm, 直径系列为 1.5~5.0 mm 的微孔进行测量, 不同微孔的直径与测量线圈电感变化过程中示波器的采样点数的关系如图 22 所示。

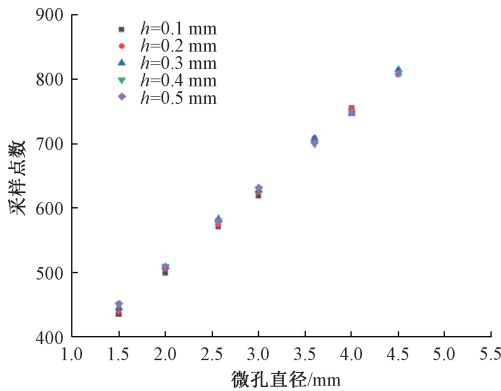


图 22 点数与微孔直径之间的关系

Fig. 22 The relationship between the number of samples and the diameter of the micropore

采用采样点数  $n$  代替时间  $t$ , 采样点数  $n$  是通过计数测量线圈电感值从  $L_0$  开始变化到测量线圈电感值停止变化并回到  $L_0$  这一过程中系统的采样点个数来确定。在速度  $v$  恒定的情况下, 得到微孔直径与采样点数之间的关系如图 22 所示, 采样点数  $n$  和微孔直径  $D$  的关系式为:

$$n = 120.06D + 269.97 \quad (21)$$

通过式 (21) 得到微孔直径的测得值如表 3 所示, 微孔直径测量相对误差如表 4 所示, 根据表 4 得到微孔直径测量相对误差分布图如图 23 所示, 可知当微孔直径  $D \leq 3$  mm, 微孔深度  $h \leq 0.2$  mm 时, 微孔直径的测量相对误差较大, 微孔直径的测量值与真值差距较明显, 当微孔直径  $D > 3$  mm, 微孔深度  $h \geq 0.3$  mm 时, 微孔直径的测量效果好, 测量相对误差在  $\pm 2\%$  以内。

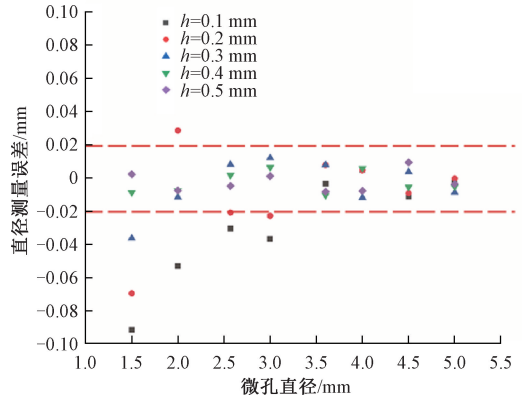


图 23 微孔直径测量相对误差分布图

Fig. 23 Micropore diameter measurement relative error distribution diagram

### 3.4 微孔深度测量

$U_L$  的电压峰值  $V_m$  与微孔直径  $D$  的关系如图 24 所示, 当孔深  $h > 0.5$  mm 时, 曲线分布开始密集, 测量线圈对孔的深度测量能力下降。选取微孔深度的测量量程为 0.1~0.5 mm。

表 3 微孔直径测量值

Table 3 Micropore diameter measurements

直径/mm	1.50	2.00	2.57	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
$h=0.1$	1.362	1.893	2.491	2.889	3.587	4.018	4.450	4.989
$h=0.2$	1.395	2.057	2.516	2.931	3.628	4.018	4.458	4.998
$h=0.3$	1.445	1.976	2.591	3.036	3.628	3.952	4.516	4.956
$h=0.4$	1.487	1.985	2.574	3.019	3.562	4.023	4.475	4.973
$h=0.5$	1.503	1.985	2.557	3.003	3.570	3.968	4.542	4.981

结合有限元仿真的数据处理方法, 得到  $\sqrt{V_m}$  与微孔直径  $D$  的关系如图 25 所示, 符合有限元仿真的结果, 对

图 25 的数据与有限元仿真的数据处理结果图 17 进行对比, 发现实验数据具有较好的线性关系。



表 4 微孔直径测量相对误差

Table 4 Relative error of micropore diameter measurement

直径/mm	1.50	2.00	2.57	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
$h=0.1$	-9.19%	-5.33%	-3.07%	-3.69%	-0.37%	0.46%	-1.12%	-0.21%
$h=0.2$	-6.97%	2.85%	-2.11%	-2.30%	0.78%	0.46%	-0.93%	-0.05%
$h=0.3$	-3.65%	-1.18%	0.80%	1.20%	0.78%	-1.21%	0.36%	-0.88%
$h=0.4$	-0.89%	-0.77%	0.16%	0.63%	-1.06%	0.57%	-0.56%	-0.55%
$h=0.5$	0.22%	-0.77%	-0.49%	0.10%	-0.83%	-0.79%	0.93%	-0.38%

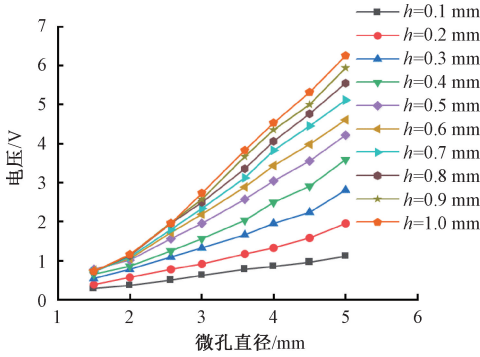


图 24 测量信号电压峰值与微孔直径之间的关系  
Fig. 24 Measure the relationship between the signal voltage peak and the diameter of the microhole

率  $k$  之间的关系如图 26 所示, 得到  $k$  与  $h$  的拟合结果为:

$$h = 2.3808k^2 + 0.7335k - 0.0618 \quad R^2 = 0.9992$$

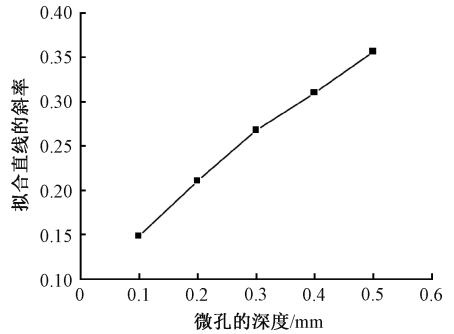


图 26 孔的深度与拟合直线斜率的关系  
Fig. 26 The relationship between the depth of the hole and the slope of the fitted line

对图 25 的数据进行线性拟合, 拟合得到的表达式与值如表 5 所示。

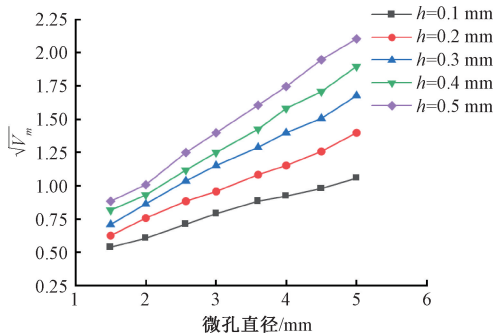


图 25  $\sqrt{V_m}$  与孔的直径之间的关系  
Fig. 25 The relationship between  $\sqrt{V_m}$  and the diameter of the hole

表 5  $\sqrt{V_m}$  与  $D$  的数据拟合结果

Table 5 Data fitting results of  $\sqrt{V_m}$  and  $D$

孔深/mm	拟合公式	$R^2$
0.1	$\sqrt{V_m} = 0.1486D + 0.3252$	0.9926
0.2	$\sqrt{V_m} = 0.2111D + 0.3239$	0.9968
0.3	$\sqrt{V_m} = 0.2676D + 0.3285$	0.9973
0.4	$\sqrt{V_m} = 0.3098D + 0.3272$	0.9979
0.5	$\sqrt{V_m} = 0.3564D + 0.3266$	0.9986

信号采集电路分辨的最小电压单位  $\Delta V = 0.005 \text{ V}$ , 则:

$$\Delta k_{\min} = \frac{\sqrt{V_m + \Delta V} - V_0}{D_{\max}}$$

$$\Delta h = 2.3808\Delta k_{\min}^2 + 0.7335\Delta k_{\min}$$

得到微孔深度测量的分辨率为  $0.01 \text{ mm}$ 。

根据以上实验结果对测量误差进行分析, 使用实验建立的测量模型对微孔进行测量, 微孔深度的测量结果如表 6 所示, 微孔深度测量误差分布如图 27 所示。

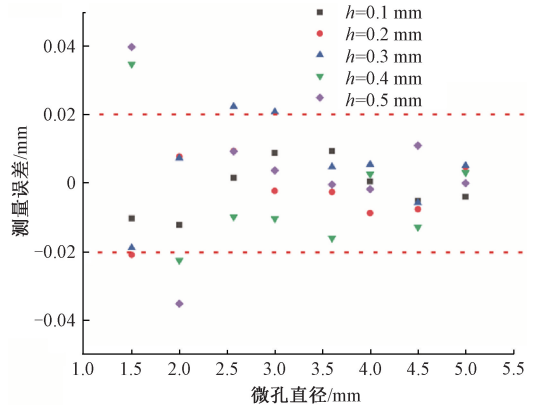


图 27 微孔深度测量误差分布

Fig. 27 Micropore depth measurement error distribution

根据表 5 的拟合结果确定孔的深度  $h$  与拟合直线斜

表 6 微孔深度的测量结果

Table 6 The measured results of the micropore depth

(mm)

微孔直径	微孔深度									
	0.1		0.2		0.3		0.4		0.5	
	测得值	误差	测得值	误差	测得值	误差	测得值	误差	测得值	误差
1.50	0.090	-0.010	0.179	-0.021	0.281	-0.019	0.435	0.035	0.540	0.040
2.00	0.088	-0.012	0.208	0.008	0.307	0.007	0.377	-0.023	0.465	-0.035
2.57	0.102	0.002	0.209	0.009	0.322	0.022	0.390	-0.010	0.509	0.009
3.00	0.109	0.009	0.198	-0.002	0.321	0.021	0.390	-0.010	0.504	0.004
3.60	0.109	0.009	0.197	-0.003	0.305	0.005	0.384	-0.016	0.500	0.000
4.00	0.100	0.000	0.191	-0.009	0.305	0.005	0.403	0.003	0.498	-0.002
4.50	0.095	-0.005	0.192	-0.008	0.294	-0.006	0.387	-0.013	0.511	0.011
5.00	0.096	-0.004	0.205	0.005	0.305	0.005	0.403	0.003	0.500	0.000

根据表 6 与图 27 可知,微孔深度测量误差大部分分布在  $(-0.02 \text{ mm}, 0.02 \text{ mm})$  的区间内,只有微孔直径  $D < 2.5 \text{ mm}$  的个别点在测量时,误差超出  $(-0.02 \text{ mm}, 0.02 \text{ mm})$  的范围,且随着微孔直径和深度增加,微孔深度测量的误差有减小趋势,因此可认为当  $D \in (2.5 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$  时,微孔深度测量误差  $|v_h| \leq 0.02 \text{ mm}$ 。

## 4 结 论

文章提出了利用电涡流效应进行微孔的直径和深度的测量,电涡流测量有着效率高、非接触等优点,适用于金属构件的微孔尺寸测量。文章利用有限元方法研究了微孔对测量线圈电感值的影响,分析了测量线圈测量微孔时的电感值特征,并对电感值特征进行量化分析,主要结论如下:

1) 微孔直径与微孔引起线圈电感值变化的时间成正比,在扫描速度一定的情况下,微孔的直径可以通过测量微孔引起线圈电感值变化的时间来确定,两者严格遵循线性关系,同时微孔引起线圈电感值变化的时间可以通过示波器的采样点数进行确定。

2) 在孔深相同的前提下,微孔的直径与测量线圈电感的峰值成二次关系。微孔直径的平方与测量线圈电感峰值成线性关系。通过线性拟合分析得到微孔直径的平方与测量线圈电感峰值之间的函数关系必过点  $(D_0^2, L_0)$ ,通过该点建立起微孔深度测量的方法,两者之间线性拟合直线的斜率  $k$  与孔的深度  $h$  有关。

3) 文章详细介绍了微孔直径和深度的测量方法,该方法默认微孔的截面是标准圆,未将微孔的圆度误差考虑在内,后续工作准备将微孔的圆度误差对测量线圈电感值的影响纳入研究范围。

## 参考文献

[ 1 ] 崔继文,谭久彬,宋传曦.精密微小内尺度测量技术研究进展[J].中国机械工程,2010,21(1):120-125.  
CUI J W, TAN J B, SONG CH X. Research progresses of precision measurement technique for micro-cavity[J].

China Mechanical Engineering, 2010, 21(1): 120-125.

[ 2 ] 冯冲,倪皓,孙艺嘉,等.超声振动复合电火花小孔加工系统设计及试验[J].光学精密工程,2022,30(14):1694-1703.

FENG CH, NI H, SUN Y J, et al. Design and experiment of ultrasonic vibration composite EDM small hole drilling system [ J ]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30( 14 ): 1694-1703.

[ 3 ] 王续跃,李建丽,周彪,等.分流法小孔电火花加工与试验[J].光学精密工程,2009,17(11):2730-2737.

WANG X Y, LI J L, ZHOU B, et al. Electrical discharge machining for small-holes by current dividing [ J ]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17( 11 ): 2730-2737.

[ 4 ] 杨世民,李书和,韩梅妹,等.膜片式盲小孔测头的设计与研究[J].计量学报,1998(2):64-68.

YANG SH M, LI SH H, HAN M M, et al. A study on a diaphragmatic probe for measuring blind small holes [ J ]. Acta Metrologica Sinica, 1998( 2 ): 64-68.

[ 5 ] 李瑞君,许鹏,唐师涛,等.高精度微孔测量探头[J].计量学报,2018,39(5):598-604.

LI R J, XU P, TANG SH T, et al. High-precision probe for measuring micro-holes [ J ]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39( 5 ): 598-604.

[ 6 ] SHI Y, SUN C, MA Y, et al. High-precision automatic online measurement system of engine block top surface holes[J]. Optical Engineering, 2012, 51(5):3604.

[ 7 ] 黄风山,刘恩福,方忆湘,等.基于智能三坐标测量机的零件位姿单目立体视觉识别[J].光学精密工程,2013,21(5):1326-1332.

HUANG F SH, LIU EN F, FANG Y X, et al. Single camera stereo vision recognition for Parts' pose based on intelligent three coordinate measuring machine [ J ]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 ( 5 ): 1326-1332.

[ 8 ] 袁道成,杨维川,李云飞,等.三维极坐标测量技术研究[J].计量学报,2011,32(5):3.

YUAN D CH, YANG W CH, LI Y F, et al. Research on

- the 3D polar coordinate measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(5):3.
- [9] 罗哉,赵洪楠,江文松,等. 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12):184-190.
- LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(12):184-190.
- [10] 汪石农,程志军,任超洋,等. 一种双臂激光测距系统设计和误差分析[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(10):18-25.
- WANG SH N, CHENG ZH J, REN CH Y, et al. Design and error analysis of a two-arm laser ranging system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10):18-25.
- [11] 刘旭葵,高凯,杨良明,等. 发动机缸孔气动在线测量系统[J]. 机械制造,2004(10):66-67.
- LIU X K, GAO K, YANG L M, et al. Pneumatic on-line measurement system for engine cylinder hole [J]. Machinery,2004(10):66-67.
- [12] NING H F, LI X, GONG J, et al. Research on five sections measuring model in process pneumatic measurement system for inner hole honing[J]. Advanced Materials Research, 2011, 317: 1342-1346.
- [13] 崔继文,谭久彬,刘洋. 基于双光纤耦合的微深孔测量方法[J]. 红外与激光工程,2009,38(1):106-109.
- CUI J W, TAN J B, LI Y. Measurement of micro-hole with high aspect ratio based on double optical fiber coupling [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1):106-109.
- [14] CUI J, LI L, LI J, et al. Fiber probe for micro-hole measurement based on detection of returning light energy[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 190:13-18.
- [15] ZHU L, WANG W, LU K, et al. Non-contact measurement for profile of different diameter micro/mini holes with capacitance sensor[C]. Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. SPIE, 2015, 9446: 431-435.
- [16] ZHAN L J, WANG B G, YE H Y. Research on high-precision automatic inner diameter measuring system for coaxial transmission line outer conductor[C]. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 130: 1205-1209.
- [17] 孙长库,王小兵,刘斌,等. 电容传感微小孔径的测量方法[J]. 纳米技术与精密工程,2006(2):103-106.
- SUN CH K, WANG X B, LIU B, et al. Capacitance sensor measurement method for micro-aperture [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2006(2):103-106.
- [18] 温银堂,尹申辉,王震宇,等. 阵列式电容传感器优化设计及灵敏特性分析[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(2):229-234.
- WEN Y T, YIN SH H, WANG ZH Y, et al. Optimal design and sensitivity analysis of array capacitance sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(2):229-234.
- [19] GARCÍA-MARTÍN J, GÓMEZ-GIL J, VÁZQUEZ-SÁNCHEZ E. Non-destructive techniques based on eddy current testing[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2525-2565.
- [20] RIFAI D, ABDALLA A N, ALI K, et al. Giant magnetoresistance sensors: A review on structures and non-destructive eddy current testing applications [J]. Sensors, 2016,16(3): 298.
- [21] WANG H, JU B, LI W, et al. Ultrastable eddy current displacement sensor working in harsh temperature environments with comprehensive self-temperature compensation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 211: 98-104.
- [22] WANG H, LI W, FENG Z. A compact and high-performance eddy-current sensor based on meander-spiral coil[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(9): 1-6.
- [23] WANG H, LIU Y, LI W, et al. Design of ultrastable and high resolution eddy-current displacement sensor system [C]. IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2014: 2333-2339.

## 作者简介



牛国钰,2022 年于合肥工业大学获得学士学位,现为合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向为微纳测量技术及系统。

E-mail: niu19966505257@163.com

**Niu Guoyu** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2022.

He is now a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include micro-nano measurement technology and systems.



潘巧生(通信作者),2016 年于中国科学技术大学获得博士学位,现为合肥工业大学副教授,主要研究方向为压电。

E-mail: 15209869371@163.com

**Pan Qiaosheng** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of

Science and Technology of China. He is now an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interest includes piezoelectric.