

文章编号 1004-924X(2015)01-0191-07

## 线性测微电感的精化

石照耀\*, 刘吕亮

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要:**为提高测微电感传感器的测量精度,提出了基于赫姆霍兹线圈理论设计螺线管线圈的方法,改善了螺线管线圈内轴向上磁场的分布均匀性。首先,分析了螺线管线圈模型,建立了螺线管线圈参数与轴向磁场强度分布相互关系的广义函数模型。然后,通过线圈与磁芯的尺寸确定了系统轴向磁场强度分布函数模型,结合磁芯移动区间范围设置磁场均匀度最小误差目标函数,通过对目标函数寻优得到各螺线管线圈的各项参数。最后,搭建了测微电感传感器的测试系统,测试了传感器性能。实验结果表明:与传统线圈相比,改进型螺线管线圈在 100  $\mu\text{m}$  测量范围内的线性度由 0.46% 提高到 0.30%。实验显示通过对不同规格的螺线管线圈进行组合,可使得螺线管内轴向上磁场强度分布均匀,从而提高了测量精度。

**关键词:**测微电感;电感传感器;微位移测量;螺旋管线圈;接触扫描测头

**中图分类号:**TH822;TP212.13 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0191

## Improvement of precision for linear inductance micrometer

SHI Zhao-yao\*, LIU Lü-liang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronic Technology,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Abstract:** To improve the performance of a micrometer inductive sensor, a design method of solenoid coils was put forward based on the theory of Helmholtz coils to improve the uniformity of the axial magnetic field of a solenoid coil. Firstly, the model of the solenoid coil was analyzed and the generalized function model between the parameter of solenoid coil and the axial magnetic field intensity distribution was established. Then, the system function model for axial magnetic field intensity distribution was determined based on the parameters of the core and coil sizes, the minimum error objective function of the uniformity for the magnetic field was set from the core moving range, and the best parameters of solenoid coil by objective function optimization were obtained. Finally, a test system for the micrometer inductive sensor was established to get its detection performance. The test results show that modified solenoid coil improves the linearity from 0.42% to 0.25% in 100  $\mu\text{m}$  measurement range as compared with the original solenoid coil. It concludes that the modified solenoid coil uniforms the intensity distribution of the axial magnetic field and enhances the measurement accuracy.

**Key words:** inductance micrometer; inductive sensor; micro-displacement measurement; solenoid coil; contact scanning probe

收稿日期:2014-04-27;修订日期:2014-05-27.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04011-071)

## 1 引言

电感测微仪作为微位移测量装置在精密测量领域得到广泛应用,其测量精度的提升对精密测量有重要作用<sup>[1]</sup>。

电感测微仪通常由电感测头、信号采集与处理、显示等单元构成。对电感测微仪信号调理电路的改进设计一直是提高测微电感检测精度的主要途径。文献[2]介绍了一种改进的差分测量电路,通过降低寄生电容的影响提高测量精度;文献[3]提出了使用同步 A/D 与椭圆拟合算法同时提取输出信号幅值与相位的方法来识别位移,在不改变放大倍数的情况下提高了测量精度;文献[4]设计了一种采用集成信号调理的 A/D 转换电路来对测量信号进行高精度和宽动态范围采样。然而,与受广泛关注的对信号调理电路进行改进设计相比,对传感器线圈设计以及绕制方面的研究相对较少。这是因为理论上电感线圈的设计牵涉到较复杂的电磁场方程,实践上线圈绕制也缺乏相应的保障技术,难以绕制出理想线圈<sup>[5-7]</sup>。

本文根据赫姆霍兹线圈理论对不同规格的螺线管线圈进行组合,设计了改进型螺线管线圈。建立了各螺线管线圈参数与轴向磁场强度分布相互关系的广义函数模型,确定磁场均匀度最小误差目标函数对线圈进行优化设计,设计的螺线管线圈改善了线圈内磁场的均匀度,提高了测量精度。

## 2 改进螺线管模型

影响传感器测量精度的一个重要因素是电感线圈内部磁场不均匀,在理想匀强磁场中,磁芯的移动与电感线圈的电感值变化量存在线性关系。由于磁场的不均匀使得实际关系表现为非线性,因此改善线圈内磁场的均匀性是提高传感器性能的一个重要途径。

### 2.1 赫姆霍兹线圈理论

设单个载流圆线圈半径为  $R$ ,通过线圈的电流  $I$ ,产生的磁场在轴向成周对称分布,轴线上离圆心  $O$  距离为  $a$  处的磁场只有轴向分量  $B$ ,如图

1 所示。虚线表示模拟单个载流圆环线圈磁场分布,可以看到轴线上离圆环线圈圆心  $O$  处附近磁场分布是非均匀的,随着离圆心  $O$  距离增大,磁场强度急剧减小。

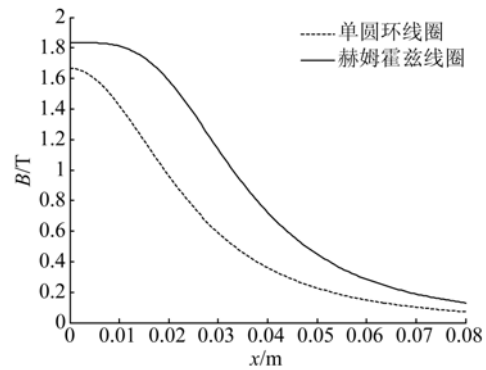


图 1 各线圈轴向磁感应强度

Fig. 1 Magnetic flux density

赫姆霍兹线圈如图 2 所示,两个轴线重合的圆线圈平行放置,设定圆心  $O$  点位于线圈的轴线上,并且与两线圈的中心距离相等。两圆线圈半径为  $R$ ,距离为  $a$ ,两线圈的电流强度均为  $I$ ,其方向相同。

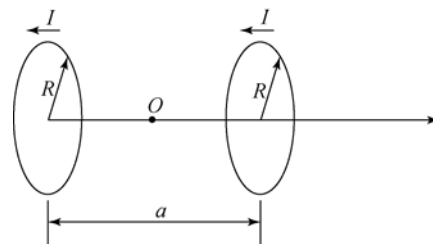


图 2 赫姆霍兹线圈

Fig. 2 Helmholtz coils

当两线圈中心距离  $a$  等于  $R$  时, $O$  点附近的磁场均匀度是 4 阶的,在  $O$  点附近产生的磁场是高度均匀的,这就是赫姆霍兹线圈。图 1 实线表示赫姆霍兹线圈轴向上的磁场强度分布,与单个载流圆环线圈磁场强度分布相比,赫姆霍兹线圈在圆点  $O$  附近磁场的变化相对平缓,磁场越平缓表示磁场的均匀度越高。同时可知具有平面对称的轴对称线圈,在其对称平面与对称轴的交点附近具有较高的磁场均匀度<sup>[8]</sup>。

### 2.2 螺线管线圈模型

电感传感器实质是一个带磁芯的螺线管线圈,螺线管线圈可以等效看成有限个圆环线圈的组合。通过对单个圆形线圈进行积分求和可以获得螺线管线圈在轴向上的磁场分布<sup>[9]</sup>。设螺线管长度为  $l$ ,半径为  $r$ ,线圈匝数为  $N$ ,通过电流为  $I$ ,螺线管轴线上中点为圆点  $O$ ,可以求得轴线上距离圆点  $x$  处附近磁场强度的大小为:

$$B(x) = \frac{\mu_0 NI}{2l} \left[ \frac{x+l}{\sqrt{r^2+(x+l)^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{r^2+(x-l)^2}} \right]. \tag{1}$$

图 3 所示为螺线管线圈轴向磁场强度分布,螺线管内轴向磁场强度分布曲线关于圆点  $O$  中心对称,在轴向方向上距离圆点  $O$  为  $\pm 0.6l$  的附近区域磁场强度变化较为平缓,传感器的磁芯工作在此区间内。电感传感器理想工作情况是当传感器测量时,其磁芯端部移动区间处在匀强磁场中<sup>[10]</sup>。从图 3 可知当磁芯在线圈内部移动时,磁芯移动位置区间  $\Delta s$  的磁场强度非均匀,  $\Delta s$  的大小由传感器的测量范围决定。由于此区间内磁场的不均匀使得测量的结果产生误差,影响了传感器测量的精度。

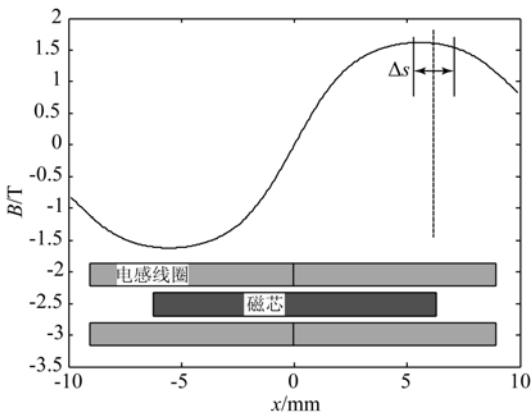


图 3 螺线管线圈轴向磁感应强度分布

Fig. 3 Axial magnetic flux density distribution of solenoid

### 2.3 基于赫姆霍兹线圈理论的改进螺线管模型

为了在一定区域内得到均匀磁场,可以利用赫姆霍兹线圈理论,对螺线管线圈进行组合来实现。用不同长度和不同半径的螺线管线圈进行拼装组合,使得新型线圈内部的磁场均匀度得到改善。比较常见的组合方式是外凹阶梯形螺线管线圈,图 4 所示为外凹阶梯形螺线管线圈剖面<sup>[11]</sup>。

图 4 所示为外凹阶梯形螺线管线圈剖面<sup>[11]</sup>。

设单个空心螺线管线圈的内半径为  $a_1$ ,外半径为  $a_2$ ,半长为  $b$ ,在轴线上距中心点  $O$  距离为  $z$  处产生的磁感应强度大小为:

$$B(a_1, a_2, b, z) = \frac{\mu_0 IN}{2b} \left[ \frac{b-z}{\sqrt{(b-z)^2+a^2}} - \frac{b+z}{\sqrt{(b+z)^2+a^2}} + \frac{2z}{\sqrt{b^2+a^2}} \right], \tag{2}$$

式中:  $a = \frac{a_1+a_2}{2}$  为线圈半径;  $\mu_0$  为空气磁导率。

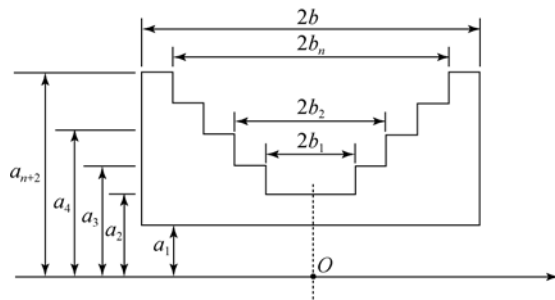


图 4 外凹阶梯形螺线管线圈剖面图

Fig. 4 Sectional view of outside concave stepped solenoid coil

根据磁场的可加性建立螺线管线圈参数与轴向磁场强度分布相互关系的广义函数模型,图 5 所示的螺线管线圈的点  $z_x$  处的磁感应强度为:

$$B(z_x) = B(a_1, a_{n+2}, b, z_x) - \sum_{i=1}^n B(a_{i+1}, a_{i+2}, b_i, z_x). \tag{3}$$

## 3 优化设计

对市面上某款电感传感器的线圈进行改进,通过绕制出匹配的阶梯形线圈来改善线圈内磁场的均匀性,提高传感器的性能。所选传感器参数为:磁芯长度 12.4 mm,线圈长度 9 mm,线圈内径 1.8 mm,骨架外径 3.8 mm,传感器测量范围  $\pm 500 \mu\text{m}$ 。这里主要分析磁芯端部移动区域内磁场的均匀性,也即轴线上距离中心  $O$  点 5.7~6.7 mm 内磁场强度。

图 4 所示外凹阶梯形螺线管线圈,其在一定的长度内,阶梯的数量越多,所能形成的磁场就越均匀。但由于绕制工艺和骨架尺寸的限制,阶梯

形螺线管线圈阶梯的数目不能无限增大。综合以上因素考虑,选定改进型螺线管线圈的阶梯数为 2,如图 5 所示。

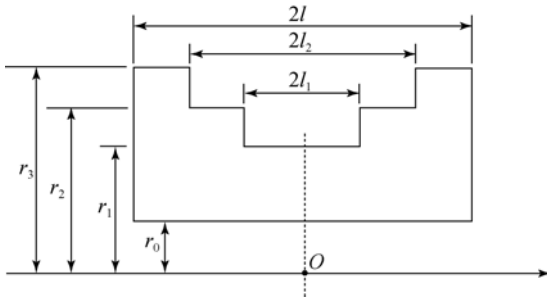


图 5 改进型螺线管线圈剖面图

Fig. 5 Sectional view of modified solenoid coil

由式(3)可得改进螺线管线圈的系统函数模型为:

$$B(z_x) = B(r_0, r_3, l, z_x) -$$

$$B(r_1, r_2, l_1, z_x) - B(r_2, r_3, l_2, z_x). \quad (4)$$

可知轴向磁感应强度的分布函数  $B(z_x)$  与螺线管中  $l, l_1, l_2, r_0, r_1, r_2, r_3, z_x$  等参数相关。由于  $r_0, r_3$  与  $l$  的数值可由骨架的尺寸确定,同时为了获得足够的电感值,  $r_1$  的数值不能过小,假定  $r_1 = 2.8 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 3.3 \text{ mm}$ , 则磁场强度分布函数就变成与  $l_1, l_2$  及  $z_x$  相关的函数:

$$B(z_x) = B_M(l_1, l_2, z_x). \quad (5)$$

分析磁芯端部移动区间 ( $z_x \in [5.7, 6.7]$ ) 内均匀性,分别求出在此区间内磁场强度的最大值  $B_{\max}(z_x)$  和最小值  $B_{\min}(z_x)$ , 设定目标函数  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{B_{\max}(z_x) - B_{\min}(z_x)}{B_{\min}(z_x)}, \quad z_x \in [5.7, 6.7], \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  代表磁场的均匀性,  $\epsilon$  越小表示磁场的均匀性越好。

设置  $l_1$  与  $l_2$  的取值区间,  $l_1, l_2 \in [1, 9]$ 。由于在圆点两边的磁场强度曲线是中心对称分布的,所以只需分析一端即可。图 6 所示通过仿真计算的  $l_1, l_2$  变化时目标函数值  $\epsilon$  的变化,找到 A 点为所求目标函数值最小的点, 即当  $l_1 = 3 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 6 \text{ mm}$  时,磁场的均匀性最好,此时  $\epsilon$  的值为 0.009。通过计算可得当  $l_1 = 0, l_2 = 0$  时(此时为传统线圈),  $\epsilon$  的值为 0.026 7,可知改进型线圈在  $z_x \in [5.7, 6.7]$  内的磁场较传统线圈均匀。

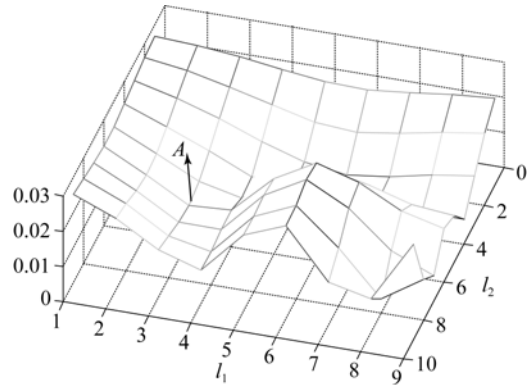


图 6 磁场均匀度

Fig. 6 Uniformity of magnetic field

## 4 试验与结果

目前在小尺寸范围内绕制非规则形状(截面为阶梯形)电感线圈存在一定困难,针对这一问题,提出了一种应用于电感传感器的阶梯形电感线圈绕制方法<sup>[12]</sup>。根据对目标函数所得的最优化结果,绕制出相应的阶梯形螺线管线圈,如图 7 所示。将线圈装入电感传感器测头内,建立由电感测头、测试工件、PI 纳米定位平台和阻抗分析仪组成的电感位移传感器检测实验装置,如图 8 所示。

对传统螺线管线圈与改进型螺线管线圈分别进行位移测试以获得各型线圈的检测性能。将被测工件固定在 PI 纳米定位平台上,使用 PI 纳米定位平台进行微位移进给,测微电感传感器的测头与工件接触感知工件的位移量,PI 纳米定位平台采用闭环控制,其定位精度可达 10 nm,满足实验要求。控制纳米定位平台每次给定工件 10  $\mu\text{m}$  位移,记录线圈电感值的变化,得到线圈电感值与传感器测头位移的变化曲线。受制于 PI 纳米定位平台的移动距离,实验进行了 100  $\mu\text{m}$  范围内测量的线性度。图 9、10 所示为传统线圈电感值与改进型线圈电感值随测头位移的变化。

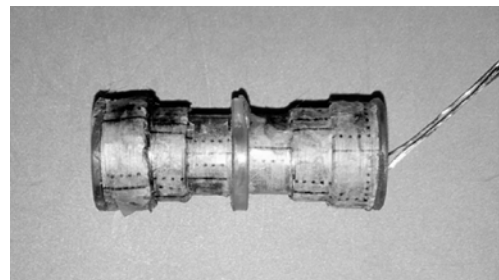
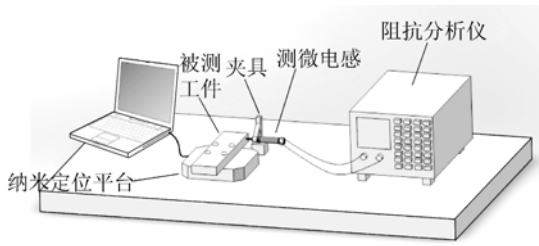


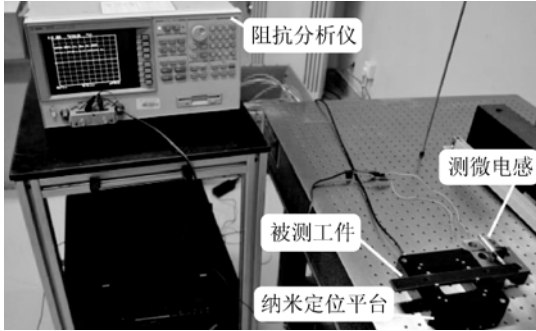
图 7 阶梯形线圈

Fig. 7 Stepped solenoid coil



(a) 测试实验示意图

(a) Schematic diagram of experiment



(b) 测试实验现场

(b) Photo of experiment field

图 8 实验测试平台

Fig. 8 Platform of experimental test

由图 9、10 可以看出传统线圈与改进型线圈在 100  $\mu\text{m}$  量程内均表现出很好的线性特性。通过对测得的线圈电感值进行线性拟合,可以得到测得的线圈电感值与线性拟合值相差最大的点,进而可计算线圈电感值随测头位移变化关系的线性度,可知传统型线圈线性特性为 0.42%,改进型线圈为 0.25%。为保证实验的可靠性,对两种线圈分别进行了 5 次实验,实验结果如表 1 所示。分别选取各型线圈最大的线性度值作为各型线圈进行 100  $\mu\text{m}$  测量时的线性特性,可知改进型线圈相对于传统型线圈线性特性有了一定的提高,其线性度从 0.46% 提高到 0.30%。

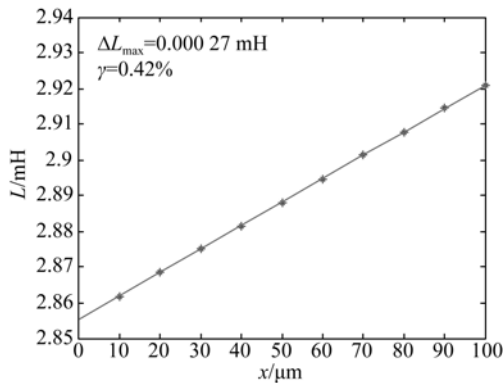


图 9 传统线圈检测性能曲线

Fig. 9 Detection performance curve of original coil

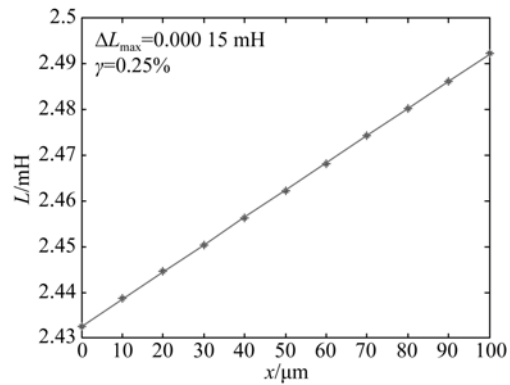


图 10 改进型线圈检测性能曲线

Fig. 10 Detection performance curve of modified coil

表 1 螺线管的线性度

Tab. 1 Linearity of solenoid

	传统线圈		改进型线圈	
	$\Delta L_{\max}/\text{mH}$	$\gamma/\%$	$\Delta L_{\max}/\text{mH}$	$\gamma/\%$
第 1 次	0.000 27	0.42	0.000 15	0.25
第 2 次	0.000 30	0.46	0.000 14	0.23
第 3 次	0.000 26	0.40	0.000 13	0.22
第 4 次	0.000 26	0.40	0.000 18	0.30
第 5 次	0.000 29	0.44	0.000 15	0.25

由图 9、10 可以看出传统型线圈的电感值比改进型线圈的电感值大,这是因为阶梯形线圈由于截面形状绕制的需要,在单位长度内线圈的匝数减少,从而产生的电感值减少。为解决电感值变小的问题,可以通过增加线圈骨架的尺寸或增大磁芯的磁导率等方法解决。

## 5 结 论

针对螺线管线圈内轴向上磁场分布不均匀的问题,提出利用赫姆兹线圈理论对螺线管线圈进行改进的方法。通过对不同规格的螺线管线圈进行组合,使得螺线管内轴向上磁场强度的分布均匀。在对螺线管进行优化组合的过程中,建立了螺线管线圈参数与轴向磁场强度分布相互关系的广义函数模型,结合螺线管实际参数建立系统函数模型,设置磁场均匀度最小误差目标函数,对其寻优求解得到螺线管内磁场均匀度最优的各尺寸参数,最后通过实验验证了改进型螺线管线圈的检测性能。实验结果表明:改进的螺线管线圈相较于传统的螺线管,在 100  $\mu\text{m}$  测量范围内的线性度由 0.46% 提高到 0.30%。改进型螺线管线圈改善了线圈内轴向磁场的均匀度,提高了测量精度。

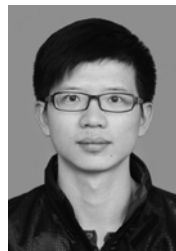
## 参考文献:

- [1] JOHN G. Advances in inductive position sensor technology [J]. *Sensor Review*, 2010, 30 (2): 142-147.
- [2] SATISH CH B, RAJAN S, MADAN B. Study of a Modified differential inductance measurement circuit as position transducer of a power cylinder [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2012, 51 (2): 530-538.
- [3] 王选择, 赵新泽, 谢铁邦. 电感式测微仪的直接数字化处理研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26 (12): 1248-1252.  
WANG X Z, ZHAO X Z, XIE T B. Research on direct digital process of inductance sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26 (12): 1248-1252. (in Chinese)
- [4] 刘晓, 赵辉, 刘伟文, 等. 深亚微米精度电感位移传感器及测量电路研究 [J]. *传感技术学报*, 2006, 19 (6): 2428-2431.  
LIU X, ZHAO H, LIU W W, *et al.*. Inductive displacement sensor and its circuit with deep-submicron accuracy [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(6): 2428-2431. (in Chinese)
- [5] 陈晓怀, 陈贺, 王珊, 等. 微纳测量机测头弹性结构的参数设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (10): 2587-2593.  
CHEN X H, CHEN H, WANG SH, *et al.*. Design of elastic structure parameters of probe in micro-nano CMM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (10): 2587-2593. (in Chinese)
- [6] 方东明, 周勇, 赵小林. 高性能螺线管微电感的制作 [J]. *半导体学报*, 2006, 27(8): 1422-1425.  
FANG D M, ZHOU Y, ZHAO X L. Fabrication of a high-performance solenoid microinductor [J]. *Journal of Semiconductors*, 2006, 27 (8): 1422-1425. (in Chinese)
- [7] 龙亮, 钟少龙, 徐静, 等. 微型光纤磁传感器的设计与制作 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (9): 2294-2302.  
LONG L, ZHONG SH L, XU J, *et al.*. Design and fabrication of fiber-optic magnetic sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2294-2302. (in Chinese)
- [8] 彭澜, 杨中海, 胡权, 等. 通电螺线管 2 维磁场有限元计算 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23 (8): 2151-2156.  
PENG L, YANG ZH H, HU Q, *et al.*. Finite element computation of 2-D magnetic field of solenoid with current [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 2151-2156. (in Chinese)
- [9] 王鹏, 丁天怀, 傅志斌. 微小平面电感线圈近场涡流效应模型 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009, 49 (5): 680-683.  
WANG P, DING T H, FU ZH B. Near-field eddy currents in small planar inductance coils [J]. *J. Tsinghua Univ: Sci & Tech.*, 2009, 49 (5): 680-683. (in Chinese)
- [10] 方允樟, 许启明, 郑金菊, 等. FeCo 基磁芯螺线管巨磁阻抗效应与磁芯长度关系的研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(12): 1-6.  
FANG Y ZH, XU Q M, ZHENG J J, *et al.*. Investigation on the relation between the length of magnetic core and the giant magnetoimpedance effect of solenoid with FeCo-based magnetic core [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60 (12): 1-6. (in Chinese)
- [11] VULTCHAN G, ZAHARINKA G, IVAN Y. Optimization of a linear displacement sensor using FEM and secondary model [J]. *IEEE*, 2009, 28 (5): 1266-1275.
- [12] 石照耀, 刘吕亮. 一种应用与电感传感器的阶梯形电感线圈绕制方法: 中国, ZL201310400680. 1 [P]. 2014.  
SHI ZH Y, LIU L L. A stepped coil winding method of inductive sensors: China, ZL ZL201310400680. 1 [P]. 2014. (in Chinese)

## 作者简介:



石照耀(1964—)男, 湖南岳阳人, 博士, 教育部长江学者特聘教授, 博士研究生导师, 2001 年于合肥工业大学获得博士学位, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn



刘吕亮(1988—)男, 湖南常德人, 硕士研究生, 2011 年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 主要研究方向为精密测试技术与仪器。E-mail: liliang324@126.com