基于平面线圈线阵的直线时栅位移传感器*

武 亮,彭东林,鲁 进,汤其富,陈锡侯

(重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054)

摘 要:针对现有磁场式直线时栅位移传感器行波磁场产生过程中,齿槽的存在影响行波磁场的匀速性,提出基于平面线圈线 阵的直线时栅位移传感器。无齿槽的结构形式提高了行波磁场的匀速性,可实现大极距下的高精度测量。传感器将施加正交 信号的两相励磁线圈相间排列形成平面线圈线阵,产生的行波磁场通过磁场拾取线圈感应出电行波信号,处理后得到位移量。 通过电磁场分析软件对传感器进行建模仿真,根据仿真结果得到测量误差;通过理论分析对测量误差进行分析溯源,并根据分 析结果对传感器结构进行优化。基于分析和优化结果研制出传感器样机,并进行了精度实验。实验表明,传感器在240 mm 内 测量精度为±1 μm,实现了精密测量。

关键词:直线位移传感器;齿槽;平面线圈;时栅位移传感器;误差分析 中图分类号:TH7 ______文献标识码:A ______国家标准学科分类代码:460.40

Linear time grating displacement sensor based on linear array of planar coils

Wu Liang, Peng Donglin, Lu Jin, Tang Qifu, Chen Xihou

(Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming at the problem that in the generation process of travelling magnetic field in existing magnetic field linear time grating displacement sensor, the tooth and slot influence the velocity uniformity of travelling magnetic field, this paper proposes a linear time grating displacement sensor based on linear array of planar coils. The sensor structure without tooth and slot improves the velocity uniformity, can realize the high precision measurement under large polar distance. In the sensor, two phase exciting coils exerted with orthogonal signals are arranged alternately to form a linear array of planar coils, the generated travelling magnetic field is acquired by the pick-up coils to obtain electric travelling signal, and the displacement quantity is obtained after signal processing. The magnetic field finite element analysis software is used to conduct modeling simulation on the sensor, the measurement error is acquired from the simulation results; the measurement error is analyzed and traced through theoretical analysis, and the sensor structure is optimized based on the analysis result. A sensor prototype was developed according to the analysis and optimization results, and the accuracy experiment was conducted. The experiment results show that the measurement accuracy of the sensor is $\pm 1 \,\mu$ m in the range of 240 mm, and high precision measurement is achieved.

Keywords: linear displacement sensor; tooth and slot; planar coil; time grating displacement sensor; error analysis

1 引 言

随着信息技术和制造技术的快速发展,需要在大量 程条件下实现高精度测量,同时又要兼顾成本与测量环 境影响^[1]。目前直线位移测量方法有扫描探针显微法、 光学测量方法、电学测量方法等^[2]。其中扫描探针显微法 包括扫描探针显微镜和原子力显微镜,纵向分辨率可达到 0.01 nm,然而测量范围在 μm 级别^[34];激光干涉仪可在几 米内实现1×10⁻⁶的测量精度,但对光学介质敏感、体积大 且价格昂贵^[5];光栅能够在 500 nm 内实现 1 nm 的分辨 率,但是价格昂贵^[68];金属箔式应变片可达到23 nm的分

收稿日期:2016-07 Received Date: 2016-07

^{*}基金项目:国家自然科学基金(51405049,51505052)、重庆市科技研发基地能力提升计划(cstc2014pt-sy40002)项目资助

辦率,1% FSR(FSR 为满刻度, full scale range)的精度,但 是测量范围有限 10 ~500 μ m^[9]; 压阻传感器可在 1 ~ 500 μ m实现 0.49 nm 的分辨率和 1% FSR 的精度,但是绝 对精度受温度和非精确匹配影响较大^[10];电容传感器可在 10 μ m ~10 nm 实现 2.4 nm 的分辨率,精度为 0.1% FSR, 但受测量环境影响较大^[11]。

时栅位移测量方法通过构建匀速运动坐标系,将空间位移量转换为时间变化量,采用高频时钟脉冲作为测量基准对时间变化量实现高精度测量。现有的磁场式时栅位移传感器通过导磁体切槽内嵌励磁线圈的方式产生行波磁场,并以此作为匀速运动坐标系。而导磁基体的齿槽变化影响了行波磁场的运动匀速性,运动坐标系的非匀速性给测量结果带来了复杂多频次测量误差^[12-14]。

针对现有直线位移测量方法面临的问题,现有磁场 式时栅位移传感器存在的齿槽变化影响,提出一种基于 平面线圈线阵的直线时栅位移传感器,实现大量程范围 内的高精度测量。通过平面线圈线阵产生行波磁场,消 除齿槽效应;采用普通半导体加工工艺制造,易于实现且 成本低廉。

2 传感器工作原理

2.1 传感器结构

基于平面线圈线阵的直线位移传感器包含定尺和动 尺,如图1所示。定尺由导磁基体和正余弦励磁线圈线 阵组成,动尺由导磁基体和磁场拾取线圈组成。正弦励 磁线圈和余弦励磁线圈均由依次反向串联的"回"型线 圈构成,相间排列于定尺导磁基体上。磁场拾取线圈由 两个"回"型线圈反向串联而成。正余弦励磁线圈、磁场 拾取线圈的绕向和沿 X 轴方向的排列关系如图 2 所示, 相邻两个励磁线圈中心距为 0.25 倍节距 W,磁场拾取线 圈中两个"回"型线圈的中心距为 0.5 倍节距 W。







2.2 磁场产生与接收

当励磁线圈的"回"型线圈中通入电流 I_m 时,在线圈平面上方一定距离处场点P(x,y,z)的磁场为每匝线圈产生磁场叠加的结果,而每匝线圈产生的磁场由4段有限长通电直导线 l_{AB} 、 l_{BC} 、 l_{CD} 、 l_{DA} 通过毕奥-萨法尔定律求得^[15-16]。若单匝线圈沿 x 轴方向长度为 2a,沿 y 轴方向长度为 2b。导线 l_{AB} 产生的静态磁场磁感应强度如式(1)所示。



图 3 传感器励磁线圈计算模型 Fig. 3 Calculation model of the senor exiting coils

$$\overline{B_{AB}} = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi} \int_{AB} \frac{\mathrm{d} \vec{l} \times \overrightarrow{QP}}{|QP|^3} = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi |QP|^2} \int_{\theta_1}^{\pi - \theta_2} \sin\theta \mathrm{d}l$$
(1)

式中: μ_0 为真空磁导率, dl 为导线上 Q 点的线电流元, θ 为向量 \overrightarrow{QP} 与 d \overrightarrow{l} 之间夹角, θ_1 为线段 AP 与 AB 之间夹 角, θ_2 为线段 BP 与 AB 之间夹角。

将
$$l = Lctan \theta$$
 和 $|QP| = \frac{L}{\sin\theta}$ 代入式(1),如下:

$$\overline{B_{AB}} = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi L} \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi L} (\cos\theta_2 + \cos\theta_1) \quad (2)$$
式中: L 为场点 $P(x,y,z)$ 到导线段 AB 的距离, $L = \sqrt{(a-x)^2 + z^2}, \cos\theta_1 = \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2 + (a-x)^2 + z^2}},$



 $\cos\theta_2 = \frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2 + (a-x)^2 + z^2}}$

根据右手螺旋定则可知,通电导线 *l_{AB}* 产生的磁场垂 直于平面 *APB*。而作用于磁场拾取线圈的有效磁场为 磁场强度 *B_{AB}* 沿 *Z* 轴的磁场分量 *B_{ABZ}*。

$$\overline{B_{ABZ}} = B_{AB} \frac{d}{L} = \frac{\mu_0 I_m (a - x)}{4\pi [(a - x)^2 + z^2]} \cdot \frac{b - y}{\sqrt{(b - y)^2 + (a - x)^2 + z^2}} + \frac{b + y}{\sqrt{(b + y)^2 + (a - x)^2 + z^2}}$$
(3)

式中: d 为场点 $P \neq XOY$ 平面的投影到导线 AB 的距离; 同理可求得导线 l_{BC} 、 l_{CD} 、 l_{DA} 在场点 P(x,y,z) 的磁场强度 $\overline{B_{BCZ}}$ 、 $\overline{B_{CDZ}}$ 、 $\overline{B_{DAZ}}$ 。

$$\begin{split} \overline{B_{BCZ}} &= \frac{\mu_0 I_m (b-y)}{4\pi [(b-y)^2 + z^2]} \cdot \\ \left[\frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} \right] \\ (4) \\ \overline{B_{CDZ}} &= \frac{\mu_0 I_m (a+x)}{4\pi [(a+x)^2 + z^2]} \cdot \\ \left[\frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2 + (a+x)^2 + z^2}} + \frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2 + (a+x)^2 + z^2}} \right] \\ (5) \\ \overline{B_{DAZ}} &= \frac{\mu_0 I_m (b+y)}{4\pi [(b+y)^2 + z^2]} \cdot \\ \left[\frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} + \frac{a+x}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + z^2}} \right] \end{split}$$

闭合导电线圈 *ABCD* 在场点 *P*(*x*,*y*,*z*) 处沿 *Z* 轴的 磁场分量为:

$$\overline{B_{ABCDZ}} = \overline{B_{ABZ}} + \overline{B_{BCZ}} + \overline{B_{CDZ}} + \overline{B_{DAZ}}$$
(7)

多匝矩形导电线圈在场点 P(x,y,z) 的总磁感应强度如式(8)所示,以O为原点中心对称。当 $z = z_0$ 处的磁场拾取线圈沿 X 轴移动时,通过 k 匝磁场拾取线圈的磁通量在以 W 为节距呈现周期性变化,因此可通过傅里叶级数展开如式(9)所示。

$$\overline{B(x,y,z)} = \sum_{i=1}^{m} \overline{B_i(x,y,z)}$$

$$\overline{\varphi(x)} = \sum_{k=1}^{m} \int \overline{B(x,y,z_0)} \, \mathrm{d}s_k \int =$$

$$\overline{\varphi_0} + \sum_{j=1}^{\infty} \overline{\varphi_j} \cos(j\frac{2\pi}{W}x + P_j)$$
(9)

式中: m 为磁场拾取线圈匝数, j 为磁通量谐波分量频次, s_k 为第 k 匝磁场拾取线圈覆盖面积, φ_j 为总磁通量的第 j 次谐波分量幅值, P_j 为总磁通量的第 j 次谐波分量初相角。

由于正弦励磁线圈与余弦励磁线圈沿 X 轴相距 0.25W,因此产生的静态磁通量分别如下:

$$\overline{\varphi_s(x)} = \overline{\varphi_0} + \sum_{j=1}^{\infty} \overline{\varphi_j} \cos\left(j\frac{2\pi}{W}x + P_j\right)$$
(10)

$$\overline{\varphi_c(x)} = \overline{\varphi_0} + \sum_{j=1}^{\infty} \overline{\varphi_j} \cos\left[j\frac{2\pi}{W}(x+0.25W) + P_j)\right]$$
(11)

当正弦励磁线圈和余弦励磁线圈分别通入交变电流 $i_s = I_m \sin \omega t \ \pi i_c = I_m \cos \omega t \ \Pi, 在只考虑磁通量中基波分$ 量的情况下,磁场拾取线圈的感应电动势为正余弦瞬态磁通量共同作用的结果。

$$e = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(\sin\omega t \ \overline{\varphi_s(x)} + \cos\omega t \ \overline{\varphi_e(x)})}{\mathrm{d}t} = \omega\varphi_1 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}x + P_1\right)$$
(12)

感应电动势频率与励磁信号频率相同,相位随磁场拾取线圈移动发生周期性变化,称为电行波信号。电行波信号的行进速度与行波磁场的行进速度相同,为 $V = \frac{W\omega}{2\pi}$ 。将感应电动势经过放大、滤波、波形转换等处理后,转换成方波信号输入微处理器中。采用高频时钟脉冲实时测量与参考信号的时间差 Δt ,采用式(13)运算得到x。

$$x = V\Delta t = \frac{W\omega}{2\pi}\Delta t \tag{13}$$

式(12)中的感应电动势为只考虑磁通量基波成分的理想情况,电行波行进速度为匀速度 V。而在实际情况下,磁通量中的各次谐波分量影响电行波的行进速度,从而给测量结果带来非线性误差,需要进一步消除。

3 传感器建模仿真与误差分析

3.1 电磁场仿真

(6)

根据传感器测量原理,在 Ansoft Maxwell 软件中建立 模型进行仿真分析,模型各项参数如表1。在 $t = 5 \mu s$ 时 刻动尺和定尺的磁感应强度云图如图4所示,磁场沿 X轴方向呈现周期性变化。

	表1 仿真模型参数表
Table 1	Parameters of the simulation model

仿真模型参数	参数值
传感器节距	20 mm
励磁线圈中"回"型线圈匝数	5 匝
励磁线圈相邻"回"型线圈中心距	5 mm
磁场拾取线圈中"回"型线圈匝数	10 匝
磁场拾取线圈"回"型线圈中心距	10 mm
"回"型线圈线宽	0.1 mm
"回"型线圈 X 方向线距	0.4 mm
"回"型线圈 Y 方向线距	0.2 mm
"回"型线圈 Z 轴方向厚度	0.1 mm
励磁线圈和磁场拾取线圈之间间隙	0.1 mm
励磁电流频率	40 000 Hz
励磁电流幅值	100 mA



图 4 传感器模型磁感应强度云图 Fig. 4 Magnetic inductance intensity nephogram of the sensor model

磁场拾取线圈的感应电动势如图 5 所示,图中每一 条类正弦曲线为磁场拾取线圈在不同位置处一个时间周 期内的感应电动势,其初相角反映了不同的空间位置。 仿真初相角与理论初相角之间的差值即为不同位置的初 相角误差,经过换算后得到测量误差。理论初相角、仿真 初相角、初相角误差和测量误差如图 6 所示。将测量误 差经过傅里叶分解后可知,该种传感器结构在一个节距 范围内主要包含 4 次谐波误差成分。









3.2 误差分析

根据式(1)、(2)、(7)、(8)和表1中"回"型线圈各项参数,在MATLAB中建立单相励磁"回"型线圈在一个节距内的空间磁场分布,如图7所示。从图7中可以看出沿X轴方向,磁感应强度在一个节距范围内有3次变化。通过对多匝磁场拾取线圈范围内的磁感应强度沿X轴方向积分,得到各匝线圈磁通量变化曲线如图8所示,从外到内依次为Coil0~Coil9。对磁通量求和后进行傅里叶分解,磁通谐波分量主要包含基波和3次谐波。当正余弦励磁线圈分别施加正余弦励磁信号时,根据式(12),磁场拾取线圈的感应电动势包含有关于位移变化量的基波电动势和3次谐波电动势。



图 7 单相回型励磁线圈对极内模拟磁感应强度 Fig. 7 Calculated magnetic induction intensity within the paired poles of single phase exiting coils



Fig. 8 Calculated magnetic flux for multiple turn pick-up coils

基波电动势和3次谐波电动势的频率相同,但幅值 和相位均不相同,根据三角函数变换公式,合成的总行波 电动势如下:

$$A_1 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}x + P_1\right) + A_3 \cos\left(\omega t - 3\frac{2\pi}{W}x - P_3\right) =$$

$$\sqrt{(A_1 + A_3 \cos\alpha)^2 + (A_3 \sin\alpha)^2} \cdot \cos\left[\omega t + \frac{2\pi}{W}x + P_1 + \arctan\frac{A_3 \sin\alpha}{A_1 + A_3 \cos\alpha}\right]$$
(14)

式中: A_1 为基波电动势幅值, A_3 为3次谐波电动势幅值, P_1 为基波电动势初相角, P_3 为3次谐波电动势初相角, $\alpha = -4 \cdot \frac{2\pi}{W} x - P_3 - P_1$ 。

式(14)中 P_1 + arctan $\frac{A_3 \sin \alpha}{A_1 + A_3 \cos \alpha}$ 为行波电动势的 相位误差,分析可知在对极W内呈现4次变化。

将模拟磁通量的谐波分量参数代入式(14)计算, 理论初相角、模拟初相角、初相角误差和测量误差如 图9所示。对测量误差进行傅里叶分解,与仿真结果 的各主要磁通谐波分量对比如图10所示,可看出模 拟结果与仿真结果一致,误差频次集中表现为4次谐 波成分。



图 9 模拟感应电动势的初相角及误差





图 10 模拟测量误差与仿真测量误差谐波分量对比 Fig. 10 Harmonic component comparison of the calculated and simulated measurement errors

由于求导和积分过程具有线性性质,单相励磁线圈 沿 X 轴方向对极内磁场分布的 3 次谐波分量引起磁场拾 取线圈中磁通量的 3 次变化,从而产生行波电动势中的 3 次谐波电动势。而基波电动势和 3 次谐波电动势的合成 导致感应电动势相位的 4 次误差。

4 结构优化

根据误差分析结果,当单相励磁线圈作用时,磁场拾 取线圈 A 沿 X 轴方向移动 1 个节距,静态磁通量变化主 要包含基波和 3 次谐波成分,可表述为:

$$\overline{\varphi_{A}(x)} = \overline{\varphi_{1}} \cos\left(\frac{2\pi}{W}x + P_{1}\right) + \overline{\varphi_{3}} \cos\left(3\frac{2\pi}{W}x + P_{3}\right) \quad (15)$$

$$\operatorname{sch}: \overline{\varphi_{1}} \to \overline{4} \operatorname{sk} \to \overline{4} \operatorname{sk}$$

沿 X 轴方向相距 W/6 的另外一个各项参数相同的 磁场拾取线圈 B 的静态磁通量变化为:

从上式中可以看到, 磁通量变化中的 3 次谐波成分 完全抵消, 由此可削弱测量误差中的 4 次谐波。

将传感器磁场拾取线圈在 XOY 平面倾斜,确保上半部分与下半部分沿 X 轴方向中心距为 W/6,优化后的传感器模型如图 11 所示。其他各项参数与表 1 相同,磁场 拾取线圈的感应电动势与图 5 相比幅值变化较小。测量 误差及其傅里叶分解结果如图 12 和表 2 中"10 匝磁场 拾取线圈倾斜"所示。从表 2 可以看出,对极内 4 次误差 由优化之前的 0.12 mm 下降到 0.04 mm,减小为原来的 1/3。然而当磁场拾取线圈的最外匝线圈上下半部分沿 X 轴方向中心距为 W/6 时,其余线圈上下半部分沿 X 轴方向中心距均小于 W/6,且越往内匝中心距越小,因此无 法将磁通量变化中的 3 次谐波成分完全消除。

使磁场拾取线圈仅包含最外匝线圈且倾斜,对极内 的测量误差及其傅里叶分解结果如图 12 和表 2 中"单匝 磁场拾取线圈倾斜"所示。从结果中可以看出,对极内 4 次误差基本抵消。



图 11 优化后传感器仿真模型







表 2 模型优化前后测量误差谐波分量对比



频次	优化前	10 匝磁场 拾取线圈倾斜	单匝磁场 拾取线圈倾斜
0	-0.002 21	-0.002 45	-0.002 300
1	0.000 044	0.000 040	0.000 048
2	0.001 719	0.001 691	0.001 719
3	0.000 044	0.000 011	0.000 050
4	0.114 650	0.043 233	0.002 228
5	0.000 043	0.000 040	0.000 068
6	0.000 064	0.000 045	0.000 059
7	0.000 044	0.000 024	0.000 047
8	0.002 878	0.000 284	0.002 200
9	0.000 022	0.000 010	0.000 060

5 实 验

根据传感器结构优化结果,采用 PCB 刻划工艺加工 直线时栅位移传感器的励磁线圈和磁场拾取线圈,如图 13 所示,各项参数如表1 所示。导磁基体采用45 钢加工 而成,表面研磨并黏贴励磁线圈和磁场拾取线圈形成动 尺和定尺。



安装传感器并搭建实验平台如图 14 所示,直线时 栅、高精度光栅尺 LIP372(精度 ±0.5 μm)与滚珠丝杠并 行排列固定在大理石平台上。直线时栅的动尺、光栅读 数头与丝杠螺母刚性连接,伺服电机经联轴器带动滚珠 丝杠转动,使直线时栅动尺与光栅读数头共同运动。信 号处理电路同步采集直线时栅与光栅测量数据,经串口 发送到上位机进行比对。



图 14 实验平台及传感器安装图 Fig. 14 Experiment platform and sensor installation

图 15 所示的"动尺改进前"曲线为直线时栅动尺和 光栅读数头分别同时运动时栅1 个対极 20 mm 的静态测 量误差,误差峰峰值约为 100 μm。采用傅里叶分解测量 误差可知,误差频次主要为4 次。由于动尺的磁场拾取 线圈为10 匝,倾斜后内匝线圈无法完全消除合成磁通量 中的4次谐波成分。因此,改进后的动尺只保留外匝线 圈。同时为提高感应电动势强度,将多匝线圈绕制在倾 斜的导磁体上形成动尺。图15 中"动尺改进后"曲线为 结构改进后的动尺移动1 个对极20 mm 的静态测量误 差,误差峰峰值约为15 μm。采用傅里叶分解可知,对极 内仍然存在4次测量误差,主要由于动尺倾斜存在角度 偏差、动尺安装误差等原因引起。



图 15 动尺改进前后对极内静态测量误差对比 Fig. 15 Comparison of the static measurement errors within the paired poles before and after sensor head improvement

采用逐点修正方法对传感器满量程(240 mm 内)测量 结果进行数据拟合,拟合后进行多次重复测量。任意选取 3次测量误差曲线如图 16 所示,测量误差为±1 μm。



图 16 数据拟合后满量程静态测量误差 Fig. 16 Full scale range static measurement error after software data fitting

6 结 论

时栅位移传感器通过建立行波磁场作为匀速运动坐标系,将空间位移量转换为时间变化量,采用高频时钟脉冲对时间变化量进行精密测量。然而现有磁场式直线时

栅位移传感器采用导磁体开槽内嵌线圈的方式产生行波 磁场,齿槽的存在影响了行波磁场的匀速性,给测量结果 带来多频次误差。本文采用平面线圈线阵构造行波磁 场,通过多匝磁场拾取线圈产生感应电行波信号,经过运 算处理得到位移量。首先建立传感器测量模型,采用电 磁场有限元仿真软件对传感器进行建模仿真,对仿真结 果进行误差分析与溯源,根据分析结果对传感器进行结 构优化。搭建实验台开展精度实验,验证分析结果。根 据理论分析与实验验证,可得到以下结论:1)采用平面线 圈线阵构建行波磁场,可减小由导磁体切槽带来的行波 磁场运动速度波动,从而减小测量误差中包括4次误差 在内的各次谐波成分;2)测量结果中的4次谐波成分主 要由单相励磁线圈引起磁场拾取线圈磁通量,在一个对 极内呈现3次变化引起;3)通过磁场拾取线圈倾斜1/3 节距,可大大减小测量结果中的4次谐波成分。

本研究为基于平面线圈的磁场式直线时栅位移传感 器的设计开发提供了理论模型和误差分析,对进一步研 究磁场式直线时栅位移传感器有重要意义。

参考文献

- MISSOFFE A, CHASSAGNE L, TOPCU S, et al. New simple optical sensor: From nanometer resolution to centimeter displacement range[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012,176(4):46-52.
- [2] 刘小康,彭凯,王先全,等.纳米时栅位移传感器的 理论模型与误差分析[J].仪器仪表学报,2014, 35(5):1136-1142.

LIU X K, PENG K, WANG X Q, et al. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014,35(5):1136-1142.

- [3] SCHITTER G, THURNER P J, HANSMA P K. Design and input-shaping control of a novel scanner for high-speed atomic force microscopy [J]. Mechatronics, 2008 (18): 282-288.
- [4] BYKOV I V. Automatized methods for optimization of scanning probe microscope operation [C]. Strategic Technologies, 2008:179-180.
- [5] FLEMING AJ. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013,190(1):106-126.
- [6] LEE J Y, CHEN H Y, HSU C C, et al. Optical heterodyne grating interferometry for displacement measurement with subnanometric resolution [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007,137(1):185-191.
- [7] ZHAO SH SH, HOU CH L, ZHANG J, et al. A highresolution displacement sensor based on a grating interferometer with the phase modulation technique [J].

- [8] YOSHIMIZU N, LAL A, POLLOCK C R. Nanometrology using a quasi-periodic pattern diffraction optical ruler[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010,19(4):865-870.
- [9] FLEMING A J, LEANG K K. Integrated strain and force feedback for high performance control of piezoelectric actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 161(1-2):256-265.
- BARLIAN A A, PARK W T, MALLON J R, et al. Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems [J].
 Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3):513-552.
- [11] KIM M, MOON W, YOON E, et al. A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long range[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016(130-131):135-141.
- [12] 高忠华,彭东林. 直线时栅测量系统的误差研究[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(1):15-20.
 GAO ZH H, PENG D L. Study on error of linear time grating measurement system [J]. Journal of Electric measurement and instrument, 2013,27(1):15-20.
- [13] 彭东林,陈锡侯,张天恒,等. 直线式时栅位移传感器原理与结构[J]. 自动化仪表, 2012,33(6):73-75, 78.

PENG D L, CHEN X H, ZHANG T H, et al. Principle and structure of the linear Time Grating displacement sensor [J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(6):73-75, 78.

 [14] 高忠华,陈锡侯,杨继森,等.直线时栅传感器全误差模型与误差修正方法研究[J].传感器与微系统, 2012,31(8):87-89,93.

GAO ZH H, CHEN X H, YANG J S, et al. Study on total error model and error correction method for linear time grating sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012,31(8):87-89,93.

- [15] RAMADAN Q, SAMPER V, POENAR D, et al. Onchip micro-electromagnets for magnetic-based biomolecules separation [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004,281(2-3):150-172.
- [16] FAVA J O, RUCH M C. Calculation and simulation of impedance diagrams of planar rectangular spiral coils for eddy current testing[J]. NDT & E International, 2006, 39(5):414-424.

作者简介



武亮(通讯作者),2011 年于重庆理工 大学获得硕士学位,现为重庆大学在职博 士、重庆理工大学机械检测技术与装备教育 部工程研究中心助理研究员,主要研究方向 为精密测试技术及仪器。

E-mail:ant56@126.com

Wu Liang (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 2011 from Chongqing University of Technology; now, he is a doctoral candidate at Chongqing University, meanwhile he is a research assistant in Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology. His main research interest includes precision measurement technology and instruments.



彭东林,1992 年于重庆大学获得博士学 位,现为重庆理工大学教授、重庆大学和合 肥工业大学博士生导师,主要研究方向为精 密测试技术及仪器。

E-mail:pdl@cqut.edu.cn.

Peng Donglin received his Ph. D. degree

from Chongqing University in 1992. He is currently a professor in Chongqing University of Technology, and a doctoral supervisor in Chongiqng University and Hefei University of Technology. His main research interest mainly includes precision measurement technology and instruments.