

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107540

# 基于 Preisach 模型的磁致伸缩位移传感器迟滞补偿方法\*

郑文轩<sup>1</sup>, 唐志峰<sup>2</sup>, 杨昌群<sup>3</sup>, 马 舜<sup>4</sup>, 吕福在<sup>1</sup>(1. 浙江大学机械工程学院 杭州 310027; 2. 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院 杭州 310027;  
3. 国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司 广州 510180; 4. 杭州市特种设备检测研究院 杭州 310051)

**摘 要:**迟滞是磁致伸缩位移传感器测量误差的主要来源之一,减小迟滞可以显著提高传感器的测量精度。根据铁磁材料的磁滞特性分析了位移迟滞的形成过程。针对磁致伸缩位移传感器在短行程中仍存在较大迟滞的问题,将传感器整体视为迟滞系统并通过 Preisach 模型描述其输入输出关系,然后在此基础上提出了一种软件层面上的迟滞补偿方法,将迟滞曲线分段线性化以计算迭代初始值并根据稳态误差确定收敛值的搜索范围。为解决理论模型在磁环转向后的一小段距离内与实际偏差较大的问题,在转向点附近对迭代过程中的收敛条件进行调整,有效提高了补偿方法在该区域内的准确性。实验结果表明,该方法所需的迭代次数较少,且经过补偿后,传感器的迟滞降低至原先的 1/3 左右,非线性度也得到了小幅度提升。在不改动现有传感器结构的前提下,该方法可快速、有效地降低传感器的位移迟滞,为磁致伸缩位移传感器的迟滞补偿提供了一种新的方案。

**关键词:**磁致伸缩位移传感器;Preisach 模型;迟滞补偿;分段线性化

中图分类号: TH711 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## A hysteresis compensation method of magnetostrictive displacement sensor based on the Preisach model

Zheng Wenxuan<sup>1</sup>, Tang Zhifeng<sup>2</sup>, Yang Changqun<sup>3</sup>, Ma Shun<sup>4</sup>, Lyu Fuzai<sup>1</sup>(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
3. South China Branch of National Oil & Gas Piping Network Corporation, Guangzhou 510180, China;  
4. Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** Hysteresis is one of the main sources of measurement errors for magnetostrictive displacement sensors (MDS). The measurement accuracy of the sensor can be significantly improved by reducing hysteresis. According to the hysteresis characteristics of ferromagnetic materials, the formation process of the displacement hysteresis is analyzed. To address large hysteresis in the short stroke of MDS, the Preisach model is used to describe the input-output relationship of hysteresis system which represents MDS. Then, a software compensation method for hysteresis on this basis is proposed, which linearizes the hysteresis curve piecewise to calculate initial iteration value. The search range of convergence value is determined according to the steady-state error. To solve the problem of the large deviation between the theoretical model and reality within a short distance after the magnetic ring turns, the convergence condition is adjusted near the turning point to improve the accuracy of the compensation method in this area. Experimental results show that the method requires only a few iterations. After compensation, the hysteresis of MDS is reduced to about 1/3 of the original value. The nonlinearity is also slightly improved. Without changing the existing sensor structure, this method can quickly and effectively reduce the displacement hysteresis of the sensor. It provides a new solution for the hysteresis compensation of MDS.

**Keywords:** magnetostrictive displacement sensors; Preisach model; hysteresis compensation; piecewise linearization

收稿日期: 2021-02-26 Received Date: 2021-02-26

\* 基金项目: 浙江省重大科技专项(2019C03112)、浙江省市场监管系统科研计划项目(20190118)资助

## 0 引 言

磁致伸缩位移传感器是基于铁磁材料的磁致伸缩效应和逆效应的一种非接触式绝对位移传感器,因其精度高、重复性好、可靠稳定、无需定期标定等优势,被广泛应用于具有冲击振动、污染等恶劣条件下的工控领域<sup>[1]</sup>,如冶金行业里的厚板轧机、制造行业里的铸锻机床、工程机械中的混凝土泵车等。在高精度应用场合中,如多液压缸同步运动控制<sup>[2]</sup>,为满足控制精度要求,磁致伸缩位移传感器必须具有较小的迟滞以精确反映活塞在往复运动过程中的位置信息。由于铁磁材料的磁滞特性,磁致伸缩位移传感器在正常工作时存在迟滞且难以消除,迟滞大小因生产厂家和型号系列而异。如美国 MTS 公司研制的 MH 系列磁致伸缩位移传感器在 50~2 500 mm 量程范围内的迟滞为 $\pm 0.1$  mm, R 系列传感器的迟滞则可控制在 10  $\mu\text{m}$  以内。相较之下,国内同类产品的迟滞普遍处于 100  $\mu\text{m}$  左右,在短行程中将严重影响传感器的测量精度。

针对磁致伸缩位移传感器存在的迟滞问题,已有一些学者开展了相关研究并提出了相应的解决方案。Seco 等<sup>[3]</sup>利用双铜环集中激励线圈产生磁场在波导管中的空间分布,有效抑制了磁致伸缩位移传感器的迟滞现象,但采用线圈在波导管中激励导波的方式会导致移动单元的体积增大且不适合与处于振动状态中的运动构件进行固联。Wakiwaka<sup>[4]</sup>采用双极性脉冲电流作为传感器的激励信号,通过其中的负脉冲对波导丝进行去磁化以降低材料的磁滞特性对测量的影响。由于负脉冲同样会在波导丝中激发导波并最终在接收线圈中产生干扰信号,因此传感器采用双极性脉冲时的测量频率将降低至采用单极性脉冲的一半。谢新良等<sup>[5]</sup>固定磁环位置,采用接收线圈代替磁环进行直线移动以避免磁环移动时对波导丝反复磁化,从而有效降低了由此造成的位移迟滞。但由于磁致伸缩位移传感器大多应用于条件恶劣的工控环境,在考虑防护性的前提下移动线圈并保证线圈与信号处理电路的连接质量是一大难题。此外,波导丝的磁致伸缩系数、磁滞、热弹系数等材料参数的改进也可提高磁致伸缩位移传感器的性能<sup>[6]</sup>,但由于波导丝的参数指标与制备过程中的材料配比、冶炼、加工、热处理等多个环节密切相关且作用机理仍有待研究,通过材料改进大幅降低迟滞较为困难,国内产品所用波导丝仍需依赖进口<sup>[7]</sup>。目前,减小位移迟滞的相关研究主要集中于传感器结构、波导丝材料等硬件方面,而从软件层面对磁致伸缩位移传感器进行迟滞补偿的研究很少。Preisach 模型是一个描述迟滞行为的唯象模型,它仅从数值关系上描述迟滞系统中输入量与输出量之间存在的迟滞现象,而不关心产生迟滞的物理机制<sup>[8]</sup>,因而被广泛应用于非线性迟滞系统的建模及

控制,如压电微定位平台、超磁致伸缩作动器(giant magnetostrictive actuator, GMA)等。

为减小磁致伸缩位移传感器在磁环移动过程中存在的迟滞,本文提出了一种基于 Preisach 模型的迟滞补偿方法。首先分析了磁致伸缩位移传感器产生迟滞的主要原因,然后根据 Preisach 模型建立磁环位移与传感器输出值之间的迟滞关系。将迟滞曲线分段线性化以确定迭代初始值和收敛值的搜索范围,通过减小迭代次数来提高补偿的实时性。在确定迭代过程中的收敛条件时考虑磁环转向对补偿值的影响,减小了由转向引起的示值跳变与理论模型偏差较大而造成的补偿误差。最后在 MATLAB 中将该方法应用于传感器的迟滞补偿以验证有效性。

## 1 传感器的测量原理及迟滞分析

液压缸是磁致伸缩位移传感器的典型应用场合之一,使用前将传感器固定于缸体的安装孔,磁环则通过螺钉固定在活塞上并与其一起运动,如图 1(a)所示。传感器的结构如图 1(b)所示,主要包含波导丝、磁环、带材、线圈、护套管和阻尼元件等。护套管中同轴安置波导丝,避免磁环与波导丝直接接触。波导丝两端设有阻尼元件,用于减小端面回波对线圈接收信号的干扰。

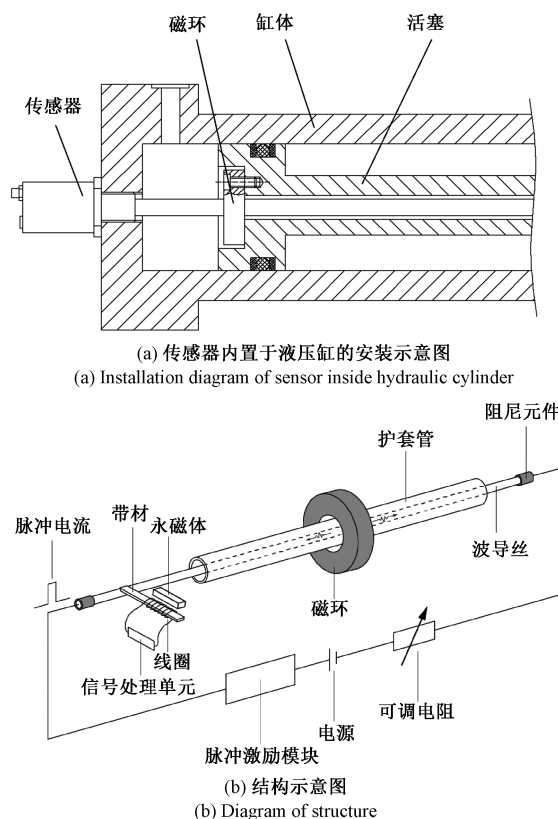


图 1 磁致伸缩位移传感器

Fig. 1 Magnetostrictive displacement sensor



传感器的测量原理与铁磁材料的磁致伸缩效应密切相关。当波导丝未被外磁场磁化时,各磁畴随机排列,磁矩矢量和为 0,如图 2(a) 所示。由于波导丝的长径比很大,波导丝内部在磁环的磁化作用下近似形成轴向磁场  $H_a$ , 此时磁畴的排列状态如图 2(b) 所示。当传感器测量磁环的位移时,向波导丝通入脉宽一定的高频脉冲电流  $I_c$ , 由该电流产生的周向磁场  $H_c$  集中于波导丝表面<sup>[9]</sup>, 此时由  $H_a$  和  $H_c$  叠加形成的合成磁场使磁畴发生偏转并移动磁畴壁, 如图 2(c) 所示。在这些磁畴和磁

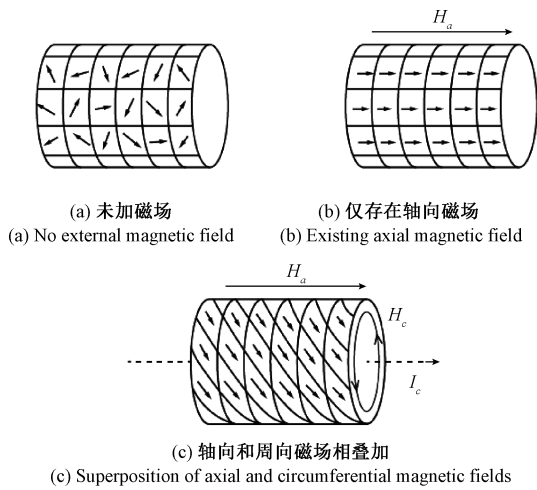


图 2 波导丝中磁畴在不同磁场作用下的排列状态  
Fig. 2 Arrangement of magnetic domains in the waveguide wire under different magnetic fields

畴壁的共同作用下,宏观上使波导丝表面发生微小的扭转应变,从而激发出以周向位移为主的  $T(0,1)$  模态<sup>[10]</sup> 扭转波并以一定速度向两端传播。

当扭转波从磁环位置传播至带材时,由振动引起带材内部的应力状态发生改变。根据 Villari 效应,此时带材内部的磁感应强度随应力变化而发生改变,从而引起线圈产生相应的感应电压。将该电压信号进行放大、滤波等处理后,通过阈值检测电路将其整形为方波脉冲(终止脉冲)<sup>[11]</sup>, 然后根据起始脉冲和终止脉冲计算时间差,最终以时间差与扭转波波速的乘积作为磁环的位移值。

磁致伸缩位移传感器的迟滞现象与波导丝材料、测量电路系统误差、线圈所受的电磁干扰等方面有关,其中铁磁材料的磁滞特性为主导因素。磁环沿护套管作往复直线运动过程中,对其内部的波导丝进行反复磁化。由于波导丝材料的磁滞特性,导致由磁致伸缩效应引起的应变滞后于磁场变化,两者之间的关系如图 3(d) 所示<sup>[3]</sup>。

为了便于分析,将磁环简化为条形磁铁并取 a、b、c 3 点来表征波导丝在磁铁移动过程中磁场和应变量的变化情况,其中 a、c 两点关于 b 点对称且具有相同的磁场强度  $H_{ac}$ , 如图 3(b) 所示。如图 3(a)、(d) 所示,当磁铁从位置 1 向右移动至位置 3 时,  $a_3$  点的磁场强度由  $H_b$  递减至  $H_{ac}$ , 对应的应变量沿下降曲线由  $\varepsilon_1$  降至  $\varepsilon_2$ ;  $b_3$  点的磁场强度由  $H_{ac}$  增大到  $H_b$ , 应变量由  $\varepsilon_3$  上升至  $\varepsilon_1$ ;  $c_3$  点的磁场上升至  $H_{ac}$ , 对应的应变量上升至  $\varepsilon_3$ 。同理,当磁铁从位置 2 向左移动至位置 3 时,  $a_3$  点的磁场强度上

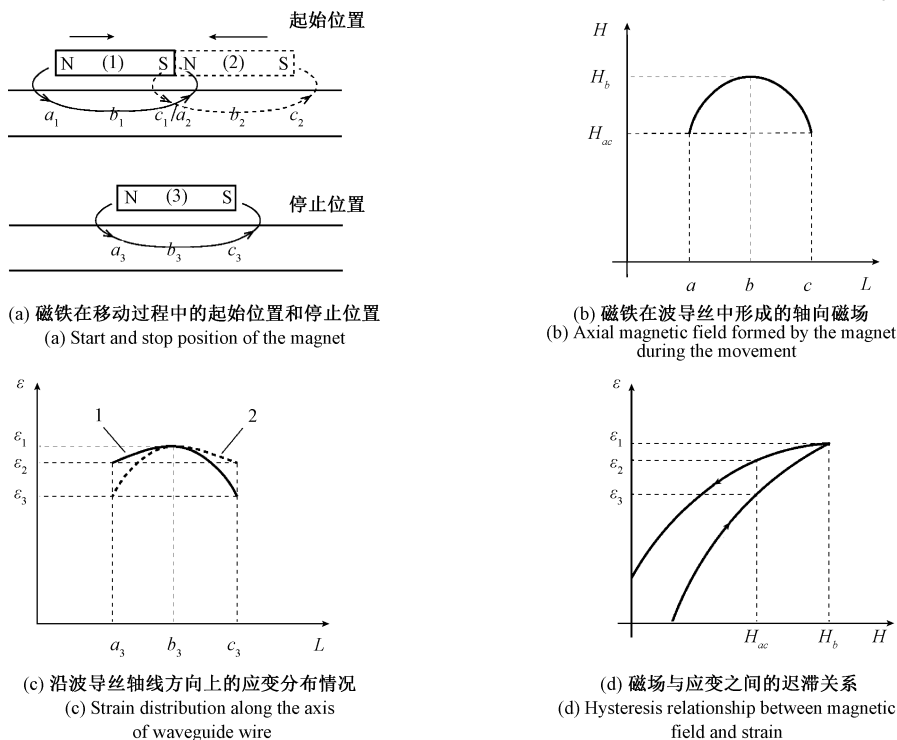


图 3 位移迟滞的形成过程分析

Fig. 3 An explanation for the formation process of displacement hysteresis

升至  $H_{ac}$ , 此时该点的应变量为  $\varepsilon_3$ ;  $b_3$  点的磁场强度由  $H_{ac}$  上升至  $H_b$ , 此时该点的应变量为  $\varepsilon_1$ ;  $c_3$  点的磁场强度由  $H_b$  递减至  $H_{ac}$ , 此时该点的应变量为  $\varepsilon_2$ 。

图 3(c) 中的曲线 1、2 分别表示磁环从起始位置 1、2 移动至停止位置 3 时磁致伸缩应变在波导丝轴线方向上的分布情况。从图 3(c) 中可以看出, 即使停止于同一位置, 波导丝的应变分布也因磁铁的移动方向不同而存在差异。

根据文献[12], 线圈中的感应电动势可表示为:

$$\varepsilon = -\frac{4\pi Nl\alpha(B_0)}{R} \cdot \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

式中:  $N$  为线圈匝数;  $l$  为永磁体在带材中形成的主磁通经过的有效长度;  $\alpha(B_0)$  为带材在磁感应强度  $B_0$  时所对应的磁致伸缩应力常数;  $R$  为漏磁通通过的气隙磁阻;  $S$  为带材中的应变;  $t$  为时间。

由式(1)可知, 线圈的感应电压与单位时间内带材的应变呈正比, 而带材的应变与到达带材的扭转波信号强度呈正相关。由于波导丝中的应变分布与磁环前一时刻的移动方向有关, 导致脉冲电流通入波导丝时激励产生的扭转波信号也随磁环移动方向不同而存在差异, 从而使线圈输出的电压波形发生变化。磁致伸缩位移传感器内部的高精度计时电路对受材料磁滞效应影响的检测电压波形较为敏感<sup>[5]</sup>, 因此采用固定阈值对检测电压进行整形并计算时间差的方式将导致传感器产生位移迟滞。

## 2 Preisach 模型

迟滞系统一般具有两个特征<sup>[13]</sup>: 1) 多映射。在迟滞系统中, 相同大小的输入量可能对应多个不同大小的输出量。2) 记忆性。迟滞系统的瞬时输出量不仅与当前时刻的输入量有关, 还与该时刻之前输入量的历史变化过程有关。

为了描述迟滞系统, 经典 Preisach 模型引入具有上下阈值的迟滞单元, 并将系统的输出量表示为多个迟滞单元加权叠加后的结果, 数学表达式如下:

$$f(t) = \iint_S \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u(t)] d\alpha d\beta \quad (2)$$

式中:  $u(t)$  和  $f(t)$  分别为迟滞系统的输入和输出量;  $\mu(\alpha, \beta)$  为  $S$  平面内的密度函数;  $\gamma_{\alpha\beta}[u(t)]$  为模型的迟滞单元;  $S$  为 Preisach 平面;

式(2)中的迟滞单元如图 4(a) 所示, 可表示为:

$$\gamma_{\alpha\beta}[u(t)] = \begin{cases} 1, & u(t) > \alpha \\ \xi, & \beta \leq u(t) \leq \alpha \\ -1, & u(t) < \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别为迟滞单元的上阈值和下阈值;  $\xi$  为当输入量的方向发生改变时, 前一时刻迟滞单元的取值。

如图 4(b) 所示, Preisach 平面为由  $\alpha = u_{\max}$ ,  $\beta = u_{\min}$  和  $\alpha = \beta$  所围的等腰直角三角形区域, 图 4 中边界线对应的输入量按  $u_{\min} - u_1 - u_2 - u_3 - u_4 - u$  过程变化。其中, 划分 Preisach 平面的边界线顶点与输入量的历史极值相关。边界线的划分规则为: 1) 当输入量递增至  $u_1$  时, 边界线为平行于  $\beta$  轴并向  $\alpha$  轴正向移动的直线  $\alpha = u_1$ ; 2) 当输入量递减至  $u_2$  时, 边界线为平行于  $\alpha$  轴并向  $\beta$  轴负向移动的直线  $\beta = u_2$ ; 3) 当输入量超过历史极值(某时刻的输入值大于历史极大值或小于历史极小值)时, 边界线的顶点将不再包含该历史极值。

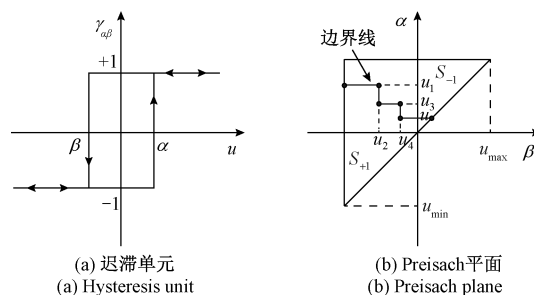


图 4 图形表示

Fig. 4 Graphical representation

根据上述定义可知, Preisach 模型具有擦除性和一致性。擦除性为输入量超过历史极值时, 与该历史极值对应的输入量变化过程将被擦除, 不再影响模型的输出量。一致性为输入量经历的极值相同时所对应的模型输出值变化量完全相同。

由于密度函数  $\mu(\alpha, \beta)$  辨识困难<sup>[14]</sup>, 因此在建立数值模型前需要根据输入量  $u(t)$  的取值范围将 Preisach 平面均匀离散化。若迟滞系统输入量的取值区间为  $[0, u_m]$  并将输入量区间 6 等分, 则离散化后的 Preisach 平面如图 5 所示。图 5 中, 各个网格的顶点对应一阶回转变曲线在离散点处的实测数据<sup>[15]</sup>。离散点密度越大, 建模精度越高<sup>[16]</sup>, 但同时需要采集和存储的数据量也以平方级别增加。

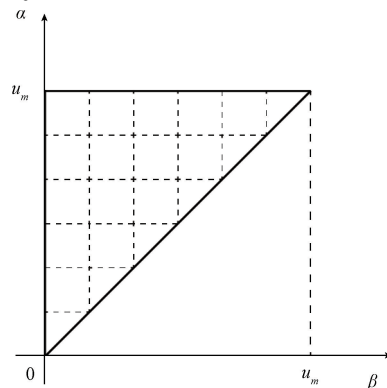


图 5 Preisach 平面离散化

Fig. 5 Discretization of Preisach plane



根据各个离散点的迟滞数据,可通过 F 函数法<sup>[17]</sup>建立 Preisach 的数值模型,其计算公式如下:

当输入量  $u(t)$  处于递增时,

$$f(t) = \sum_{k=1}^N [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(u(t), \beta_N) \quad (4)$$

当输入量  $u(t)$  处于递减时,

$$f(t) = \sum_{k=1}^{N-1} [F(\alpha_k, \beta_{k-1}) - F(\alpha_k, \beta_k)] + F(\alpha_N, \beta_{N-1}) - F(\alpha_N, u(t)) \quad (5)$$

式中:  $\alpha, \beta$  分别为边界线顶点的纵坐标和横坐标,即满足边界线划分规则的输入量极大值和极小值;  $F(\alpha, \beta)$  为 F 函数,可表示为:

$$F(\alpha, \beta) = f(\alpha, \alpha) - f(\alpha, \beta) \quad (6)$$

式中:  $f(\alpha, \alpha)$  为迟滞系统在输入量从零递增至  $\alpha$  时对应的输出值;  $f(\alpha, \beta)$  为迟滞系统在输入量从  $\alpha$  递减至  $\beta$  时对应的输出值。对于未处于离散点处的  $f(\alpha, \beta)$ , 可采用 Lagrange 双线性插值法进行计算<sup>[16]</sup>。

### 3 基于 Preisach 模型的迟滞补偿方法

Preisach 模型所要求的擦除性和一致性对于实际的迟滞系统而言较为苛刻,一般无法完全满足这两个性质,因此应用该模型描述迟滞系统的输入输出关系时将产生一定的误差。磁致伸缩位移传感器测量绝对位移且具有较高的重复性,其基本符合一致性原则,并在部分情况下满足擦除性。有鉴于此,本文尝试将 Preisach 模型应用于磁致伸缩位移传感器的迟滞建模。

图 6 表示的为基于 Preisach 模型的迟滞补偿方法的原理。将传感器整体视为一个迟滞系统  $G(t)$ , 通过 Preisach 模型描述该系统输入与输出之间存在的迟滞关系,然后利用 Preisach 逆模型近似表征  $G^{-1}(t)$ , 以此预测迟滞系统  $G(t)$  的输入量。其中,迟滞系统  $G(t)$  的输入量为磁环的实际位移  $u(t)$ , 输出量为传感器输出值  $s(t)$ 。在实际中,受限于 Preisach 的建模精度,根据系统输出量  $s(t)$  反求得到的迟滞补偿值  $\hat{u}(t)$  与系统输入量  $u(t)$  之间存在一定的误差。

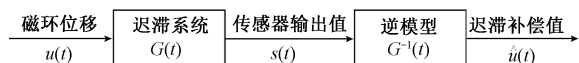


图 6 迟滞补偿方法的原理

Fig. 6 The principle of the hysteresis compensation method

符号定义如下:  $s[N]$  为传感器输出值序列,即  $s[N] = [s_1, s_2, s_3, \dots, s_N]$ ;  $u[k]$  为  $k$  时刻的迟滞补偿值序列,即  $u[k] = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_k]$ ;  $\hat{u}_k(i)$  为  $k$  时刻第  $i$  次迭代后所

得的迟滞补偿值,  $\hat{u}_k(0)$  为  $k$  时刻的迭代初始值;  $\alpha[m]$  和  $\beta[n]$  分别为  $u[k]$  根据擦除性原则得到的极大值序列和极小值序列, 即  $\alpha[m] = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]$ ,  $\beta[n] = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$ 。

在 Preisach 模型求逆过程中,对于输出值序列中的每个元素均需通过多次迭代以计算出与其对应的输入值<sup>[18]</sup>, 迭代过程的收敛速度依赖于迭代步长、稳态误差以及迭代初始值与收敛值之间的距离。为了满足精度要求,迭代步长  $d$  不宜选取较大值,此时若  $k$  时刻的迭代初始值  $\hat{u}_k(0)$  与该时刻的收敛值  $u_k$  相差较大,则会导致迭代次数相应增多,从而影响程序的执行效率。因此,为了提高迭代过程的收敛速度,本文将滞环曲线分段线性化,每轮迭代开始前首先计算迭代初始值  $\hat{u}_k(0)$ , 然后根据式(7)确定收敛值  $u_k$  的搜索区间。

设迭代过程中的稳态误差为  $e$ , 则有:

$$\begin{cases} e = P(\alpha[m], \beta[n]) - s_k \\ \Delta u = a \cdot \frac{|e|}{k} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P$  为 Preisach 模型的输出值;  $\alpha[m], \beta[n]$  为  $k$  时刻的极大值和极小值序列。  $a$  为控制搜索区间大小的常数,初始值为 1;  $k$  为分段线性化后传感器输出值  $s_k$  对应的直线斜率。

当  $e > 0$  时,搜索区间为  $[\hat{u}_k(0) - \Delta u, \hat{u}_k(0)]$ ; 当  $e < 0$  时,搜索区间为  $[\hat{u}_k(0), \hat{u}_k(0) + \Delta u]$ 。确定搜索区间包含收敛值后,在该区间内通过二分法寻找收敛值,否则增大  $a$  以扩大搜索区间。

为了描述这一过程,以图 7 为例进行说明。

在输入量从 0 增大至  $u_c$  然后又递减至 0 这一变化过程中,边界线顶点在 Preisach 平面中的移动轨迹如图 7(a) 中的虚线所示。图 7(b) 为边界线顶点在移动过程中所对应的 3 种情况。

图 7(c) 为滞环曲线分段线性化后的结果,其中各段直线的斜率按如下规则确定:

$$k = \begin{cases} \frac{c(f_{12} - f_{11}) + (h - c)(f_{22} - f_{21})}{h^2}, & s_k < s_{k-1} \\ \text{且 } 0 < u < nh \\ \frac{f_{12} - f_{11}}{h}, & s_k < s_{k-1} \text{ 且 } nh < u < u_c \\ \frac{f_{12} - f_{21}}{h}, & s_k > s_{k-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $h$  为输入量相邻离散点的间隔;  $u_c$  为输入量的极大值;  $c$  为  $u_c$  与左侧最近一个输入量离散点之间的间距,即  $c = u_c - nh$ ,  $n$  为满足  $nh \leq u_c < (n+1)h$  的正整数。  $f_{11}$ 、 $f_{12}$ 、 $f_{21}$  和  $f_{22}$  为网格顶点对应的迟滞系统输出值。

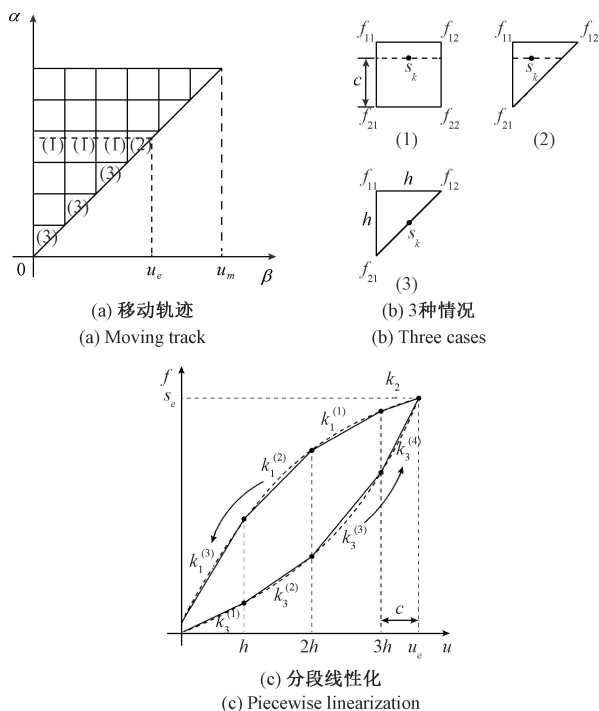


图 7 线性化过程说明

Fig. 7 The description of linearization process

由于各段直线的方程已知,因此对于  $k$  时刻的传感器输出值  $s_k$ , 均可通过对应的直线方程直接求得迭代初值  $\hat{u}_k(0)$ 。

实践表明当磁环移动方向改变时,磁致伸缩位移传感器的输出值将在很小的距离内发生跳变,导致 Preisach 模型所描述的迟滞关系在转向点附近偏离实际,从而增大了该区域内补偿值的误差。图 8 为磁环由正向转为反向移动时传感器输出值发生跳变的局部放大图。

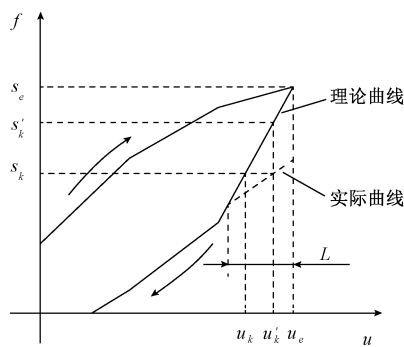


图 8 磁环转向时的示值跳变

Fig. 8 Indication jump of MDS with the magnetic ring turning

从图 8 中可以看出,在宽度为  $L$  的区间内,Preisach 模型所确定的理论曲线与实际的迟滞曲线之间存在较大偏差,此时根据  $s_k$  迭代得到的  $u_k$  将小于实际曲线所对应的位移  $u'_k$ 。同理,当磁环由反向转为正向移动时传感器

输出值也将发生跳变,此时直接根据 Preisach 模型迭代得到的迟滞补偿值将大于磁环的实际位移。

示值跳变仅发生在磁环转向后的一小段距离内,尽管可以增大 Preisach 模型的离散点密度以接近传感器在转向点附近的实际迟滞曲线,但这将导致 Preisach 平面中网格顶点的数量大幅增加并受限于存储空间的大小和实验设备的精度。为了减小磁环转向对补偿值的影响,本文在迭代时根据式(9)调整收敛条件中的  $s_k$ 。

$$\begin{cases} S_k = s_k + \Delta s, |u_k - u_e| \leq L \\ \Delta s = \text{sgn}(s_e - s_k) \cdot \min\left(\frac{L - |u_k - u_e|}{L} \cdot \Delta y, |s_k - s_e|\right) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $s_e$  为  $s[N]$  中距离  $s_k$  最近的一个极值;  $u_e$  为  $u[k]$  中与  $s_e$  对应的迟滞补偿值。  $\Delta y$  为与  $u_k$  相邻的离散点处一阶回转变曲线与上升曲线之间的差值。  $L$  为磁环转向后理论曲线与实际发生较大偏差时所对应的移动距离,可通过实验确定,本文取为 10 mm。

当磁环从转向点  $u_e$  开始以相反方向移动,理论曲线与实际曲线之间的偏离程度逐渐缩小,式(9)中  $\Delta s$  的数值也随之减小并在移动距离达到  $L$  后为零,表示此时不再考虑由示值跳变对补偿值造成的影响。从图 8 中可以看出,通过在转向点附近调整收敛条件中的  $s_k$  并使其接近  $s'_k$ ,可以减小该区域内由磁环转向引起的补偿误差。

当  $k$  时刻的迭代过程开始时,首先将计算得到的  $\hat{u}_k(0)$  加入迟滞补偿值序列  $u[k]$ ,即  $u[k] = [u_1, u_2, \dots, u_{k-1}, \hat{u}_k(0)]$ 。然后根据擦除性原则,更新极值序列  $\alpha[m]$  和  $\beta[n]$  并带入 Preisach 模型进行求解。经  $i$  次迭代满足收敛条件后,  $\hat{u}_k(i)$  即为  $k$  时刻的收敛值  $u_k$ ,此时  $u[k] = [u_1, u_2, \dots, u_{k-1}, u_k]$ 。若磁环处于转向点附近,则根据  $u_k$  调整收敛条件中的  $s_k$  并继续开始  $k$  时刻的迭代计算。当  $k = N$  时,程序终止,否则开始下一时刻的迭代计算。

## 4 实验与分析

迟滞实验平台如图 9 所示,主要由磁致伸缩位移传感器、磁环、伺服电机、移动导轨、激光干涉仪及其配件组成。激光干涉仪(安捷伦 5519 A,精度  $0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ ,分辨率  $0.01 \mu\text{m}$ )安置于平台的一侧,其激光头与干涉镜和反射镜保持同一水平线。滑台上固定有反射镜和传感器的磁环,可沿导轨作直线移动。借助夹具定位后将磁致伸缩位移传感器水平置于平台的托架上。在采集迟滞数据时,由伺服电机带动滑台移动,进而控制磁环的绝对位置,并通过 C#编写的上位机软件获取激光干涉仪示值及对应的传感器输出值。实验所用磁致伸缩位移传感器的静态技术参数如表 1 和 2 所示。

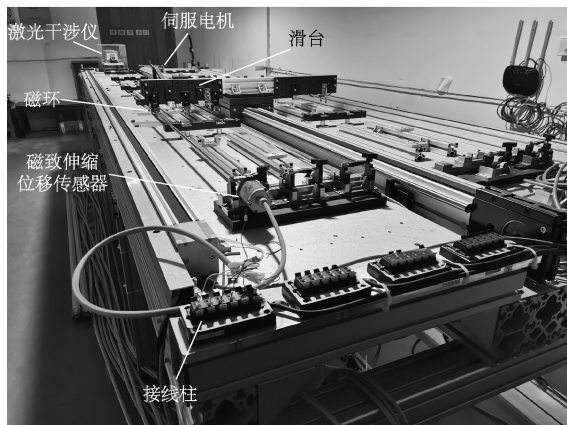
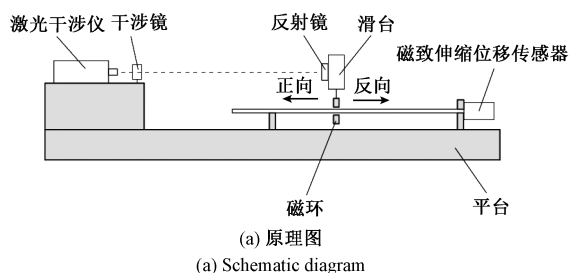


图 9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform

本文共进行两组实验,实验一中分别采集 10、20、…、100 mm 行程(校准点间隔 10 mm)范围内传感器的迟滞数据,用于建立迟滞补偿方法中所需的 Preisach 模型。实验二中采集传感器在 35、45、55、65、75、85 mm 行程(校准点间隔为各自行程的 1/10)范围内的迟滞数据,用以验证迟滞补偿方法的有效性。

实验过程中,为减小磁环移动时由滑台细微震颤造成的示值波动对实验的干扰,令磁环移动到校准点位置时保持静止状态,待激光干涉仪的示值波动范围小于  $1 \mu\text{m}$  后再进行数据采集。同时,为减小偶然因素对数据采集的干扰,重复 3 次以上的实验过程,并按行程大小和方向对迟滞数据进行分类,然后分别进行均值滤波处理。

#### 4.1 数据处理

由于滑台的移动精度有限,无法确保磁环精确并重复定位于校准点位置,从而影响了 Preisach 模型的建模精度。对此采用如下方法对传感器输出值进行修正<sup>[19]</sup>。

首先将迟滞数据按测量的先后顺序排列,然后使用最小二乘法对其进行拟合,得到的直线方程为

$$Y_{LS} = a + bx \quad (10)$$

式中: $a$ 、 $b$  分别为由最小二乘法得到的截距和斜率。

然后将迟滞数据中传感器输出值按式(11)归一化到统一的校准点位置。

$$y'_k = y_k + b(x'_k - x_k) \quad (11)$$

式中: $y'_k$  为第  $k$  个校准点的传感器理论输出值; $y_k$  为第  $k$  个校准点的传感器实际输出值; $x'_k$  为第  $k$  个校准点对应的位移传感器理想输入值; $x_k$  为第  $k$  个校准点的激光干涉仪示值,即位移传感器的实际输入值; $b$  为上述最小二乘直线方程的斜率。

经过上述处理,得到建立 Preisach 数值模型所需的离散点数据,如图 10 所示。

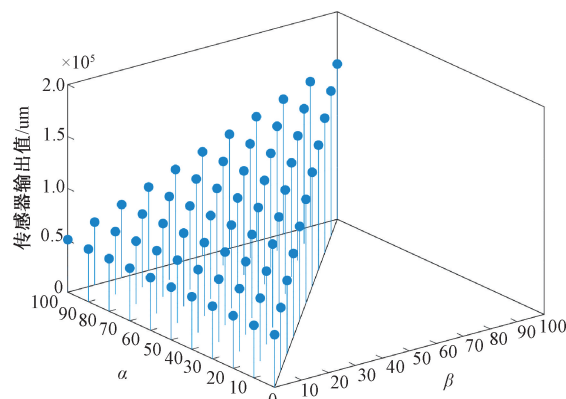
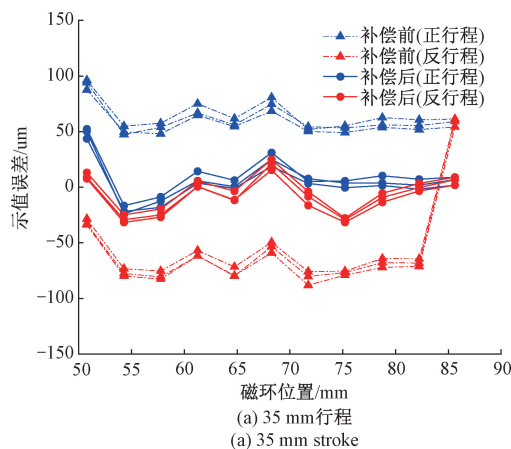


图 10 Preisach 平面中的离散点数据

Fig. 10 Data in discrete point of Preisach plane

#### 4.2 实验结果与分析

根据所提出的迟滞补偿方法,在 MATLAB 中编写程序并对实验二中测得的传感器输出值进行补偿,求逆过程中的收敛条件设置为  $e < 1$ 。图 11 为补偿前后传感器在各个行程范围内的误差曲线,对应的迟滞如表 1 所示,求逆过程中的迭代次数如图 12 所示。图 11 中的示值误差由文献[19]中的相应公式计算得到。



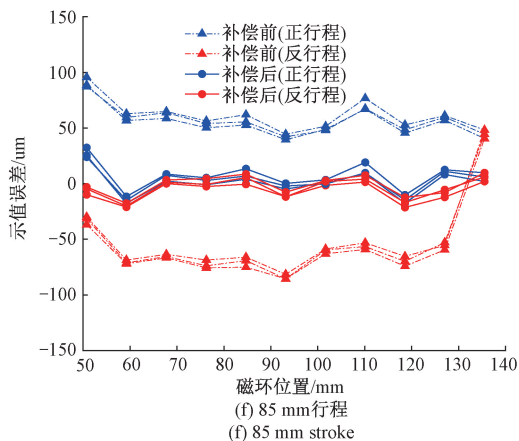
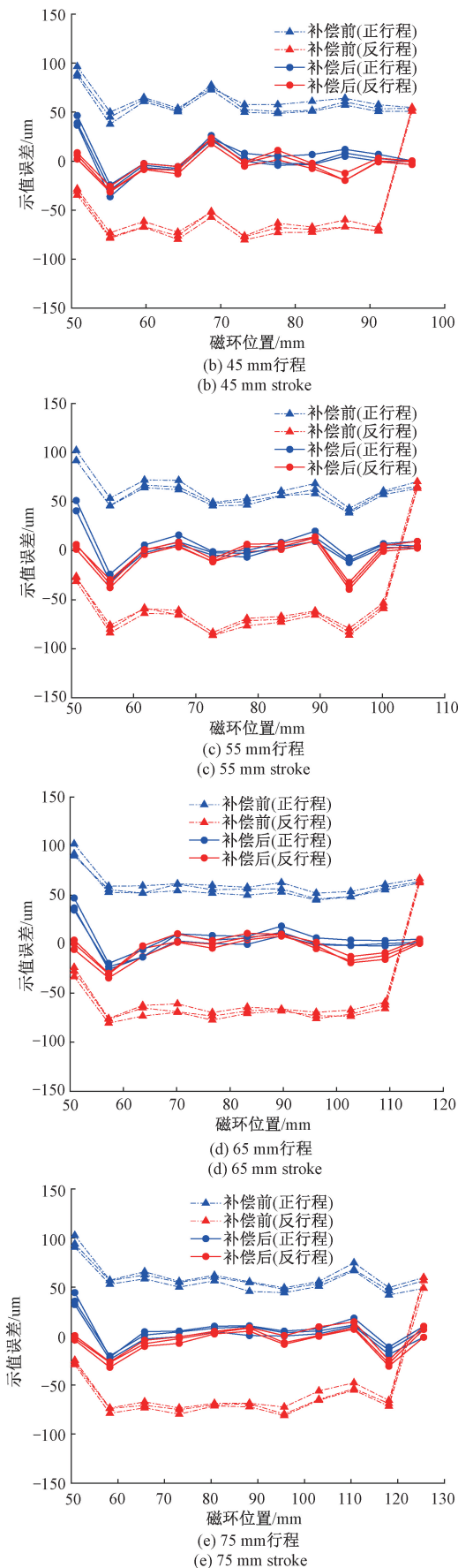


图 11 位移迟滞曲线

Fig. 11 Displacement hysteresis curve

表 1 中的迟滞  $y_m$  和标准差  $s$  分别根据式 (12) 和 (13) 进行计算。

$$y_m = | \overline{y'_{fk}} - \overline{y'_{bk}} |_{\max} \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_k - \bar{y})^2} \quad (13)$$

式中:  $\overline{y'_{fk}}$  为第  $k$  个校准点的正行程理论平均值;  $\overline{y'_{bk}}$  为第  $k$  个校准点的反行程理论平均值。  $\bar{y}$  为  $y_k$  的均值。

表 1 迟滞统计数据

Table 1 Hysteresis statistics

行程范围/ mm	迟滞/ $\mu\text{m}$		标准差/ $\mu\text{m}$	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
35	134.4	38.9	3.5	11.5
45	131.3	35.1	3.5	11.1
55	133.0	39.8	4.6	12.1
65	133.6	39.9	4.1	10.9
75	132.4	39.2	5.9	10.6
85	130.3	33.1	6.1	9.6

从图 11 中可知,对传感器进行三次校准所得到的误差根据行程方向分布于零点两侧且各自具有相近的数值,表明传感器在磁环移动方向相同时具有较高的重复性。当磁环处于相同位置时传感器的正行程和反行程误差曲线之间存在  $125 \mu\text{m}$  左右的差值,整体表现出较大的位移迟滞。而经过迟滞补偿后,传感器的示值误差下降明显,各个行程的迟滞均降低至原先的  $1/3$  左右。标准差相较补偿前有所增大,主要原因为传感器的迟滞经过补偿后在转向点附近具有更大的数值差异。



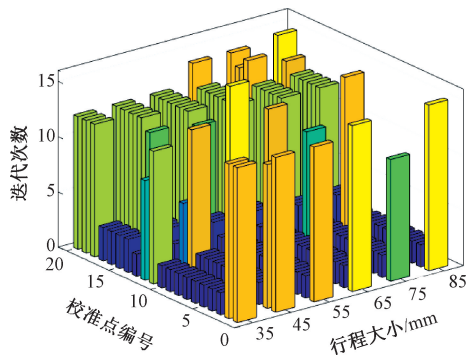


图 12 迭代次数

Fig. 12 Iteration number

从图 12 中可以看出,所提出的迟滞补偿方法的迭代计算主要集中于磁环的反向移动过程且收敛所需的迭代次数较少,由此可以缩短程序的执行时间。

为了进一步探究迟滞补偿方法对传感器测量的影响,根据文献[19]中的步骤计算了传感器在补偿前和补偿后的静态技术参数,结果如表 2 所示。

表 2 传感器静态技术参数

Table 2 Static characteristic parameters of the sensor

行程范围/mm	分组	回差/%	非线性度/%	重复性/%
35	补偿前	0.390	0.088	0.052
	补偿后	0.112	0.084	0.052
45	补偿前	0.296	0.067	0.036
	补偿后	0.078	0.066	0.036
55	补偿前	0.245	0.062	0.028
	补偿后	0.073	0.057	0.028
65	补偿前	0.208	0.052	0.027
	补偿后	0.062	0.042	0.027
75	补偿前	0.179	0.047	0.021
	补偿后	0.052	0.034	0.021
85	补偿前	0.156	0.035	0.018
	补偿后	0.039	0.020	0.018

由表 2 可知,相较于补偿前,磁致伸缩位移传感器的重复性在保留三位小数后保持不变,非线性度小幅度提升,而回差在各个行程中均明显降低。以上结果表明,所提出的迟滞补偿方法可有效降低磁致伸缩位移传感器的迟滞并提高测量精度。

## 5 结 论

磁致伸缩位移传感器的迟滞制约了测量精度的进一步提升,而目前通过改进波导丝材料来减小位移迟滞较为困难。本文将 Preisach 模型应用于磁致伸缩位移传感器的迟滞建模,然后基于该模型提出了一种迟滞补偿方法,将迟滞曲线分段线性化以减小求逆过程中的迭代次数并通过调整磁环转向点附近的收敛条件来减小由示值跳变引起的补偿误差,最后在 MATLAB 中编写相应程序并进行测试。实验结果表明,相较于未补偿状态,该方法能够有效降低磁致伸缩位移传感器的迟滞,而且由于程序的计算量较小,可移植到嵌入式平台上并实现实时补偿。在后续研究中将考虑传感器自身稳定性对迟滞补偿的影响,以进一步提高该方法的适用性。

## 参考文献

- [1] 周翟和,汪丽群,沈超,等. 基于 CPLD 的磁致伸缩高精度时间测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1):103-108.  
ZHOU D H, WANG L Q, SHEN CH, et al. Design of magnetostrictive high-precision time measurement system based on CPLD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 103-108.
- [2] 同志学,冯涛,张立岗,等. 多液压缸采样臂同步运动控制的设计与实现[J]. 控制工程, 2012, 19(6): 1090-1092+1096.  
TONG ZH X, FENG T, ZHANG L G, et al. Design and realization of multi-cylinder sampling arm synchronous motion control [J]. Control Engineering of China, 2012, 19(6): 1090-1092+1096.
- [3] SECO F, MARTIN J M, PONS J L, et al. Hysteresis compensation in a magnetostrictive linear position sensor[J]. Sensors and Actuators. A, Physical, 2004, 110(1-3):247-253.
- [4] WAKIWAKA H. Displacement sensor using magnetostrictive wire and decrease of its hysteresis error[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2008, 21: 379-384.
- [5] 谢新良,王博文,张露予,等. 考虑磁滞的铁磁磁致伸缩位移传感器输出电压模型及结构设计[J]. 工程科



- 学学报,2017,39(8):1232-1237.
- XIE X L, WANG B W, ZHANG L Y, et al. Output voltage model of Fe-Ga magnetostrictive displacement sensor considering hysteresis and structural design [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39 ( 8 ): 1232-1237.
- [ 6 ] LI M M, LI J H, BAO X Q, et al. Magnetostrictive Fe82Ga13.5Al4.5 wires with large Wiedemann twist over wide temperature range [J]. Materials & Design, 2017, 135: 197-203.
- [ 7 ] 卢云, 申蓉, 冯哲圣, 等. Ni-Fe 合金磁致伸缩波导丝特性研究 [J]. 功能材料, 2009, 40(11): 1791-1793.
- LU Y, SHEN R, FENG ZH SH, et al. Research on properties of magnetostriction NiFe alloy for displacement sensor [J]. Journal of Functional Materials, 2009, 40(11): 1791-1793.
- [ 8 ] 王昱棠, 张宇鹏, 徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜闭环控制 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 68-72.
- WANG Y T, ZHANG Y P, XU Y L. Dual-loop control strategy for fast-steering mirror driven by PZT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 68-72.
- [ 9 ] ZHOU X Z, YU C, TANG Z Y, et al. Wiedemann effect in Fe83Ga17 alloys for magnetostrictive sensors [J]. Sensors Journal IEEE, 2014, 14(1): 249-257.
- [ 10 ] SECO F, MARTIN J M, JIMENEZ A R, et al. A high accuracy magnetostrictive linear position sensor [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2005, 123 ( 1 ): 216-223.
- [ 11 ] DENG CH, KANG Y H, LI E L, et al. A new model of the signal generation mechanism on magnetostrictive position sensor [J]. Measurement, 2014, 47: 591-597.
- [ 12 ] 孙可, 袁梅. 磁致伸缩液位传感器信号拾取关键技术的研究 [J]. 测控技术, 2005(12): 15-18.
- SUN K, YUAN M. Study on signal pick-up device design for magnetostrictive liquid level sensor [J]. Measurement & Control Technology, 2005(12): 15-18.
- [ 13 ] 李春涛, 谭永红. 迟滞非线性系统的建模与控制 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 281-287.
- LI CH T, TAN Y H. Modeling and control for nonlinear systems with hysteresis [J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(2): 281-287.
- [ 14 ] 刘旺中, 陈照波, 侯守武, 等. 基于 Preisach 理论的形状记忆合金温度-位移迟滞仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 83-87.
- LIU W ZH, CHEN ZH B, HOU SH W, et al. Simulation on modeling of temperature-displacement hysteresis in SMA based on Preisach theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 83-87.
- [ 15 ] 孙浩添, 杜福嘉, 张志永. 辅助线法预测 Preisach 类一阶回转曲线 [J]. 振动. 测试与诊断, 2020, 40(2): 230-235+414-415.
- SUN H T, DU F J, ZHANG ZH Y. Preisach first order reversal curve predicted by auxiliary line method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 230-235+414-415.
- [ 16 ] 龚大成, 吕福在, 潘晓弘, 等. Preisach 逆补偿的 GMA 精密轨迹跟踪与实验优化 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1241-1246.
- GONG D CH, LYU F Z, PAN X H, et al. Precision tracking and experimental optimization of GMA by Preisach inverse compensation [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1241-1246.
- [ 17 ] DOONG T, MAYERGOYZ I. On numerical implementation of hysteresis models [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2003, 21(5): 1853-1855.
- [ 18 ] 唐志峰, 吕福在, 项占琴. 超磁致伸缩微位移驱动器的非线性迟滞建模及控制方法 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 55-61.
- TANG ZH F, LYU F Z, XIANG ZH Q. Nonlinear hysteresis model and control of magnetostrictive micropositioner [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 55-61.
- [ 19 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 磁致伸缩液位计: GB/T 21117-2007 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Magnetostrictive liquid level meter: GB/T 2111-2007 [S]. Beijing: China Metrology Publishing House,



2007.

### 作者简介



**郑文轩**, 2019 年于浙江科技学院获得学士学位, 现为浙江大学硕士研究生, 主要研究方向为智能传感与检测技术。

E-mail: zhengwx97@163.com

**Zheng Wenxuan** received his B. Sc. degree from Zhejiang University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student at Zhejiang University. His research interests include intelligent sensing and detection technology.



**唐志峰** (通信作者), 1999 年于重庆大学获得学士学位, 2005 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学生仪学院仪器系副教授, 主要研究方向为智能传感与检测技术。

E-mail: tangzhifeng@zju.edu.cn

**Tang Zhifeng** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 1999, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2005. He is currently an associate professor in the Department of Instrument Science and Technology at Zhejiang University. His research interests include intelligent sensing and detection technology.



**杨昌群**, 1988 年毕业于广东石油化工学院。现为国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司高级工程师, 研究方向为仪表自动化与检测技术。

E-mail: ycqun@126.com

**Yang Changqun** graduated from Guangdong University of Petrochemical Technology in 1988. He is currently a senior engineer at South China Branch of National Oil & Gas Piping Network Corporation. His research interests include instrumentation automation and detection technology.



**马舜**, 2006 年于浙江大学获得学士学位, 2011 年于浙江大学获得博士学位, 现为杭州市特种设备检测研究院高级工程师职称, 主要研究方向为特种设备检验检测。

E-mail: mashunhappy@126.com。

**Ma Shun** received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Zhejiang University in 2006 and 2011, respectively. He is currently a senior engineer at Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute. His research interests include special equipment inspection and testing.