

# 基于磁弹效应的电动舵机压力传感器设计

王 宁, 张子建, 许 峻

(南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了实现对电动舵机的电动缸输出轴压力的动态测量, 该文设计并实现了一种基于磁弹效应的非接触式压力传感器, 它包括传感器探头和信号处理电路两部分。该文首先从磁致伸缩的理论模型中分析并建立了传感器的测量原理, 设计了传感器探头的结构。为优化激励源, 通过实验研究分析了不同的激励源对传感器信号的影响, 结果表明采用 105 kHz、幅值为 5 V 的方波作为激励源时传感器输出信号最优, 并以此设计了传感器信号电路。通过对传感器整体的压力标定实验得到传感器灵敏度为 0.294 mV/N, 重复性误差为 3.53%, 在运用三阶多项式拟合对传感器输入输出曲线进行校正后得到传感器的非线性误差为 1.76%, 适用于承压较大的电动缸输出轴及其他大重量设备的动态压力测量。

**关键词:** 压力传感器; 磁弹效应; 舵机; 电动缸

**中图分类号:** TP212.1

**文章编号:** 1000-0682(2024)02-0054-07

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.010

## Design of electric servo pressure sensor based on magnetoelastic effect

WANG Ning, ZHANG Zijian, XU Jun

(Astronautics College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To achieve dynamic measurement of the output shaft pressure of the electric cylinder of the electric servo, this paper designs and implements a non-contact pressure sensor based on the magnetoelastic effect, which includes two parts: a sensor probe and a signal processing circuit. This paper first analyzes and establishes the measurement principle of the sensor from the theoretical model of magnetostriction, and then designs the structure of the sensor probe. To optimize the excitation source, the influence of different excitation sources on the sensor signal is analyzed through experimental research. The results indicate that employing a 105 kHz square wave with an amplitude of 5 V as the excitation source contributes to the optimal output signal of the sensor. Based on this phenomenon, the sensor signal circuit is designed. Through the pressure calibration experiment of the sensor as a whole, the sensitivity of the sensor can reach 0.294 mV/N, and the repeatability error is 3.53%. After correcting the input and output curves of the sensor using third-order polynomial fitting, the nonlinear error of the sensor achieves 1.76%, which is suitable for dynamic pressure measurement of electric cylinder output shafts and other heavy equipment with high pressure.

**Keywords:** force sensor; magnetoelastic effect; steering engine; electric cylinder

## 0 引言

随着我国航空航天事业的发展,越来越多的研究人员投入到飞机、导弹、火箭以及其他各类飞行器的研究中。在这些飞行器的控制系统中,舵机起到控制飞行器在飞行过程中的方向和速度的作用。目前使用电驱动控制的电动舵机<sup>[1-2]</sup>技术快速发展,逐渐取代传统的液压舵机。

电动舵机使用电动缸作为驱动机构,设计为摆

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室开放课题(SKLRS-2022-KF-19)

第一作者: 王宁(1999—),男,汉,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为磁弹式传感器设计。

通信作者: 张子健(1984—),男,汉,山东德州人,副研究员,硕士生导师,研究方向为机器人技术,机电一体化技术等。

缸式单舵形式,舵柄的中心轮毂与舵杆相连,两端分别与两只电动缸的输出轴铰接。传统的电动舵机伺服系统中为了实现对舵角的控制,通常利用一个位移传感器或角位移传感器将位置/角度信息反馈给控制器。由于控制任务的精细化、智能化要求,需要在电动伺服系统中加入压力传感器,为舵机的精细控制提供力感知信息,协助位置传感器达到控制要求。

目前市面上的压力传感器由于测量时需要与电动缸输出轴相连、安装不方便、电动缸运动时难以实时测量等原因,不适合于测量电动舵机中电动缸运动时所受压力。因此该文设计了一种基于磁弹效应<sup>[3-5]</sup>的电动舵机压力传感器,它可以利用电动缸输出轴本身的磁致伸缩特性实现对电动缸输出轴压力的非接触式测量。

该文首先建立了磁弹式传感器测量的数学模型,接着设计传感器结构并通过实验研究激励源对传感器信号的影响,在此基础上完成了传感器电路的设计与制作,最后进行了传感器压力实验和结果分析。

## 1 理论模型

### 1.1 磁致伸缩模型

考虑如图 1 所示的情况,一根铁磁棒处于沿轴向的外部磁场中,同时受到轴向的外部机械力的作用,磁化强度  $M$ 、应力  $\sigma$  和磁场强度  $H$  之间的关系可简化为一维模型<sup>[6]</sup>。

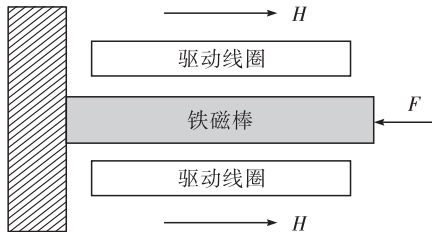


图 1 磁致伸缩模型

首先基于热力学,自由能  $G$  的全微分可以表示为:

$$dG = dU - SdT - TdS - \varepsilon d\sigma - \sigma d\varepsilon = -\varepsilon d\sigma + \mu_0 H dM - SdT \quad (1)$$

其中: $\mu_0$ 、 $H$ 、 $T$  分别代表真空磁导率、熵密度和温度。忽略温度的变化,应力  $\sigma$  和磁化强度  $M$  的偏微分可以表达为:

$$\varepsilon = -\frac{\partial G}{\partial \sigma}, \mu_0 H = \frac{\partial G}{\partial M} \quad (2)$$

把应力  $\sigma$  和磁化强度  $M$  作为独立变量进行泰勒级数展开,应变  $\varepsilon$  和磁场强度  $H$  可以展开成如下级数的形式<sup>[7]</sup>:

$$\varepsilon = -\frac{\partial^2 G}{\partial \sigma^2} \sigma - \frac{1}{2} \frac{\partial^3 G}{\partial \sigma^3} \sigma^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^4 G}{\partial \sigma^4} \sigma^3 + \dots - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^3 G}{\partial \sigma \partial M^2} + \frac{\partial^4 G}{\partial \sigma^2 \partial M^2} \sigma + \dots \right) M^2 \quad (3)$$

$$\mu_0 H = \frac{\partial^2 G}{\partial M^2} M + \frac{1}{3!} \frac{\partial^4 G}{\partial M^4} M^3 + \dots + \left( \frac{\partial^3 G}{\partial \sigma \partial M^2} \sigma + \frac{1}{2} \frac{\partial^4 G}{\partial \sigma^2 \partial M^2} \sigma^2 + \dots \right) M \quad (4)$$

式中包含  $M$  的三阶及以上项被忽略了。很明显,应变  $\varepsilon$  表达式中某些项只和应力  $\sigma$  有关,这些项的和就是弹性形变。而有些项是  $\sigma$  和磁化强度  $M$  的耦合项,这些的和就是磁致伸缩形变。磁致伸缩形变是由磁畴壁运动导致的,当棒材未被磁化时,磁致伸缩形变为零。当其达到饱和磁化时,磁致伸缩形变达到最大值。简化的磁致伸缩形变表达式如下<sup>[7]</sup>:

$$\lambda = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial^3 G}{\partial \sigma \partial M^2} + \frac{\partial^4 G}{\partial \sigma^2 \partial M^2} \sigma + \dots \right) M^2 = \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{M_s^2} M^2 \quad (5)$$

其中: $\lambda_s$  表示饱和磁致伸缩系数; $M_s$  表示饱和磁化强度; $\lambda_0$  采用双曲正切函数来表示。

### 1.2 迟滞模型

赫尔默兹自由能函数可以表示为如下形式:

$$A(\sigma, M, T) = \mu_0 H M + \frac{\mu_0}{2} \eta M^2 + \frac{3}{2} \sigma \lambda + TS \quad (6)$$

其中: $\eta$  称为 Weiss 分子场,它是一个无量纲系数,用来表示相邻磁化区间的相关强度。有效场可以表示为自由能密度函数  $A$  对磁化强度  $M$  的导数:

$$H_{eff}(\sigma, M, T) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dA(\sigma, M, T)}{dM} = H + \eta M + \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \frac{d\lambda}{dM} \quad (7)$$

式(7)中忽略了温度和熵密度的导数。根据玻尔兹曼统计方法可以得到非磁滞磁化强度和有效场的关系如下<sup>[8]</sup>:

$$M_{an} = \frac{2}{\pi} M_s \arctan(k H_{eff}) \quad (8)$$

其中,常量  $k$  是磁化率,因此可以得到  $M_{an}$  对有效场  $H_{eff}$  的微分如下:

$$\frac{dM_{an}}{dH_{eff}} = \frac{2}{\pi} M_s \frac{k}{1 + k^2 H_{eff}^2} \quad (9)$$

为了精确的描述动态激励下的迟滞效应,必须在能量守恒原理中考虑到涡流损耗和异常损耗。在磁化过程中存在几种类型的能量损耗,比如准静态耗散能量损耗和变化磁场中的动态能量损耗。根据

能量平衡原理<sup>[6]</sup>,可以得到:

$$E = E_{sta} + L_{hy} + L_{cl} + L_{ex} \quad (10)$$

其中: $E$  是所施加磁场每单位体积做的功; $E_{sta}$  代表储存在材料中的磁化能量; $L_{hy}$  指的是钉扎位点每单位体积的磁滞损耗; $L_{cl}$  代表经典动态涡流损耗; $L_{ex}$  是过剩能量损耗。迟滞损耗可以表示为:

$$I_{hy} = \mu_0 \int \zeta K (1 - c) dM_{irr} \quad (11)$$

其中: $K$  是一个结构参数用来表征破坏钉扎位点所需的平均能量,  $\zeta = \text{sgn}(dH/dt)$  是一个函数, 当  $dH/dt$  大于等于 0 时等于 1, 其他情况下等于 -1。在动态情况下, 需要充分考虑涡流损耗和过量损耗, 且这些损耗都和频率有关。在不同频率下的经典涡流损耗和过量损耗可用如下公式计算:

$$L_{cl} = \frac{D^2}{2\rho\beta} \int \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (12)$$

$$L_{ex} = \mu_0^{1.5} \sqrt{\frac{G_0 S_0 H_0}{\rho}} \int \left( \frac{dM}{dt} \right)^{1.5} dt \quad (13)$$

其中:参数  $\rho$  指电阻率; $G_0$  是一个常量为 0.135 6; $S_0$  代表横截面积; $H_0$  表示磁畴壁所经历的内部电动势, 单位是 A/m。将各表达式带入方程得到动态迟滞模型的微分方程<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} & \frac{D^2 \delta_M}{2\rho\beta} \left( \frac{d^2 M}{dt^2} + \frac{d^2 H}{dt^2} \right) + \mu_0^{1/2} \left( \frac{G_0 S_0 H_0}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{dM}{dt} \right)^{1.5} \\ & + \left[ \zeta K - \delta_M \bar{\eta} (M_{an} - M) - c \zeta K \bar{\eta} \frac{dM_{an}}{dH_{eff}} \right] \frac{dM}{dt} \\ & - \left[ \delta_M (M_{an} - M) + c \zeta K \frac{dM_{an}}{dH_{eff}} \right] \frac{dH}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

以 Terfenol-D 材料为待测件<sup>[6]</sup>, 图 2 和图 3 对比了不同频率下动态迟滞曲线的计算结果和实验数据, 可以发现不同频率下的实验曲线和仿真曲线均能较好的吻合。根据图 2 和图 3 可知当  $H$  是一个正弦交变磁场时,  $M$  是一个周期性的变化量, 且频率与磁场强度  $H$  的频率相等。当  $H$  是一个固定频率和强度的外部场强时, 此时  $M$  和应力  $\sigma$  存在一定的关系。控制激励磁场强度  $H$  不变, 改变应力  $\sigma$  大小, 仿真不同应力下的磁滞曲线如图 4 所示。

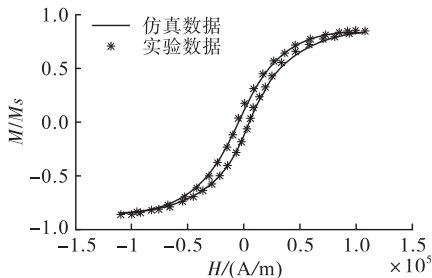


图 2 磁场强度频率为 1 Hz 时的迟滞曲线

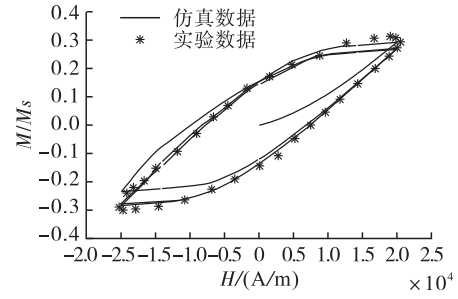


图 3 磁场强度频率为 1000 Hz 时的迟滞曲线

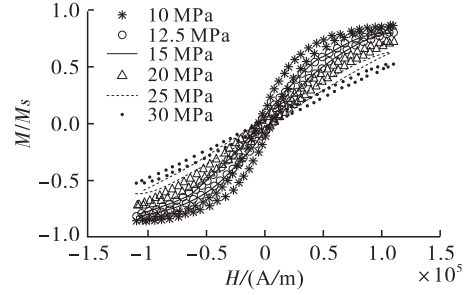


图 4 频率为 1 Hz, 幅值为 110 kA/m 的磁场强度下不同应力时的仿真磁化曲线

可以发现在不同的外部磁场强度下, 随着应力  $\sigma$  从 10 MPa 逐渐增加到 30 MPa, 磁化曲线的斜率在逐渐降低, 相应的磁化曲线的最大磁化强度也随应力增大而减小。可以得到磁化强度  $M$  和应力  $\sigma$  是相关的, 磁化曲线峰值的变化可以反映应力  $\sigma$  的变化。因此利用这种力-磁关系, 就可以通过测量材料磁特性的变化实现对其受力的测量。利用 MATLAB 绘制磁化强度  $M$  随时间  $t$  的变化曲线如图 5 所示。

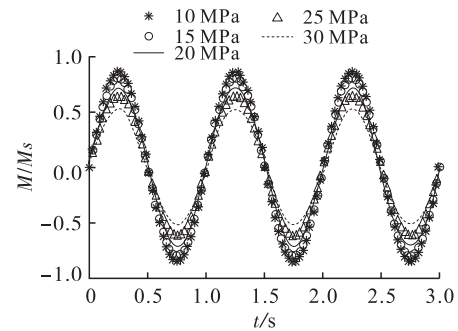


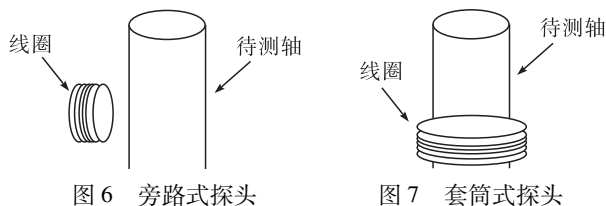
图 5 频率为 1 Hz, 幅值为 110 kA/m 的外部场强中不同应力下的磁化强度仿真曲线

由图 5 可知磁化强度  $M$  是一个幅值随应力变化的正弦曲线, 由磁感应强度公式  $B = \mu_0 (H + M)$  可以知道, 此时磁感应强度  $B$  也是一个固定频率的正弦交变量, 根据电磁感应定律, 变化的磁场产生电流, 因此当外部磁场  $H$  是正弦驱动磁场时, 就可以利用线圈将交变的磁化强度变成电信号, 通过测量电压或者电流来得到磁化强度  $M$ , 进而实现对力的测量。

## 2 传感器结构设计及激励源研究

### 2.1 结构设计

由理论模型可知,磁弹式压力传感器主要是通过检测铁磁性材料受到力的作用时内部磁特性的变化来得到其受力信息。常见的测量方法是利用一个激励线圈产生一个激励磁场,使铁磁性材料处于一个外部磁场环境中,接着通过一个或几个感应线圈去将铁磁性材料受力时磁化强度的变化转换成电信号,通过对电信号的采集和处理即可得到受力信息。根据激励线圈、感应线圈和待测轴的位置关系,可以分为套筒式结构和旁路式结构,如图 6 和图 7 所示。



由于电动缸输出轴材料是 45 钢,磁致伸缩系数通常在 10 ppm 左右,相对较小,为了实现在不粘贴敏感材料的情况下实现对轴压力的非接触动态测量,该文针对上述两种形式探头结构进行了实验研究,在正弦波激励下分别测量两种探头感应信号在电动缸空载和满量程(1500 N)时的峰峰值变化量,实验结果如图 8 所示。

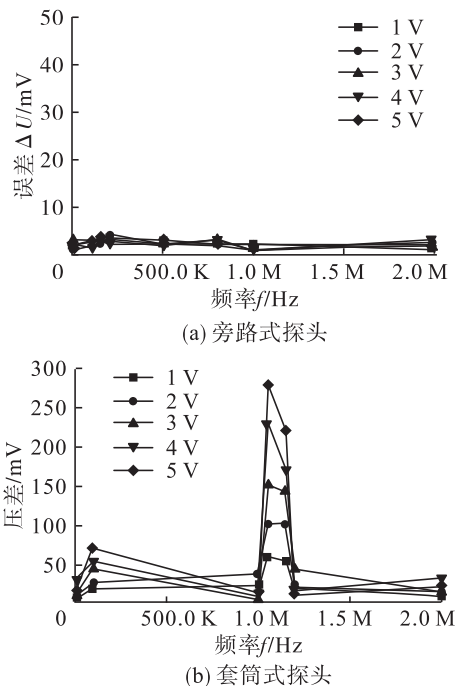


图 8 不同频率激励信号下输出信号峰峰值的压差

在激励信号频率为 0 ~ 2 MHz 范围内,旁路式探头输出信号在空载和满量程时的变化量最大为

5 mV,在 250 kHz 左右取得,灵敏度为 0.003 mV/N。套筒式探头输出信号的变化量最大为 280 mV,灵敏度为 0.186 mV/n,是旁路式探头的 62 倍,更适合作为电动舵机压力传感器探头。

### 2.2 激励源研究

根据前文的理论模型可以知道,当外界磁场强度  $H$  发生变化时,磁化强度  $M$  和应力  $\sigma$  的相关性会发生变化,而磁场强度  $H$  是由激励线圈上的激励信号决定的,因此该文研究激励信号对感应电压的影响,从而确定合适的激励源。

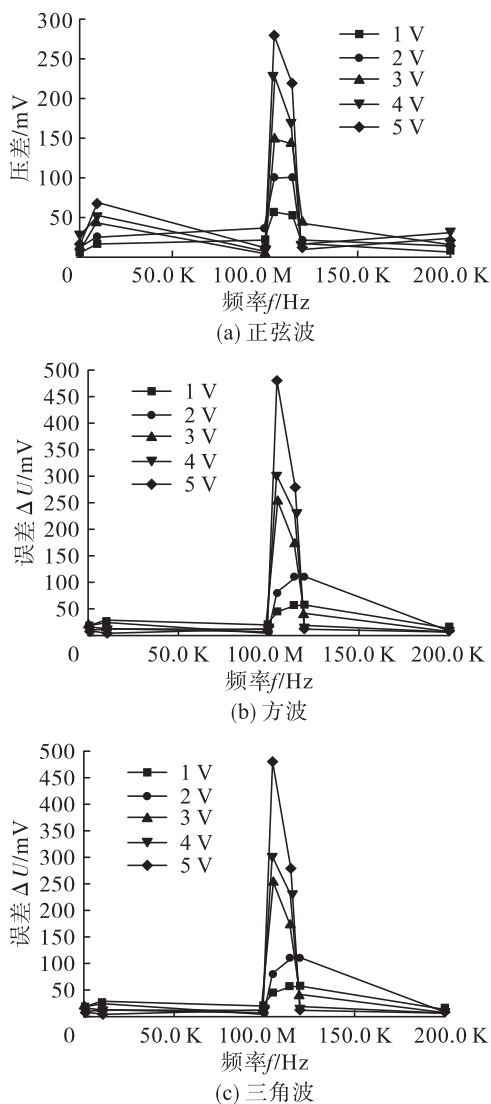


图 9 不同激励信号下输出信号峰峰值的压差

实验分别选取幅值为 1 V、2 V、3 V、4 V、5 V,频率为 1 kHz、10 kHz、100 kHz、115 kHz、120 kHz、200 kHz、1 MHz、2 MHz 的正弦波、方波、三角波激励信号,测量外力为 1500 N 和 0 N 时所对应的感应电压峰峰值的电压差,实验结果如图 9 所示。可以发现感应线圈线圈输出峰峰值的变化量在 100 kHz ~

120 kHz 之间取得最大值,趋势呈现先增大再减小,这个趋势在不同幅值的激励信号激励的情况下保持一致。在电压幅值从 1 V 到 5 V 递增时,相同频率下感应信号幅值的变化量则随激励电压幅值的增加而增加,这是由于激励电压幅值较高则产生的磁场强度较强,进一步导致感应电压幅值较大。且随着激励电压幅值的增加,感应信号幅值变化量增加的越来越少,而激励电压幅值增加会导致线圈电流增大,因为线圈电阻较小,所以若不断增加激励电压幅值会增加传感器电路的功率,同样需要在输出信号变化量和功率之间做出权衡。

相同频率、相同幅值的激励信号,方波激励产生的感应电压峰峰值变化量大于三角波和正弦波激励。当激励信号为幅值 5 V、频率 105 kHz 的方波时,感应信号在整个压力加载过程中峰峰值变化量最优,能达到 480 mV。因此可以确定传感器的最佳激励信号为 5 V、105 kHz 的方波。

### 3 传感器电路设计

传感器电路由激励模块、采集模块、通讯模块和电源模块组成。其中激励线圈接在激励模块后面,由激励模块给线圈输入一个预期的激励信号,再由采集模块将感应线圈的电压信号采集处理,将模拟信号转换为数字信号,再通过 RS485 接口或者 ESP32 的 WIFI 模块传到上位机,系统硬件实现方案如图 10 所示。激励模块采用直接数字频率合成技术(DDS),考虑到传感器探头的激励线圈内阻较小,DAC 的电流输出能力不够,所以选用了功率运算放大器 OPA452 接在 DAC 之后。一方面可以保证驱动小内阻线圈,另一方面可以通过外围电路对 DAC 输出的电压信号提供一个直流偏压,使其变成交流信号,如图 11 所示。

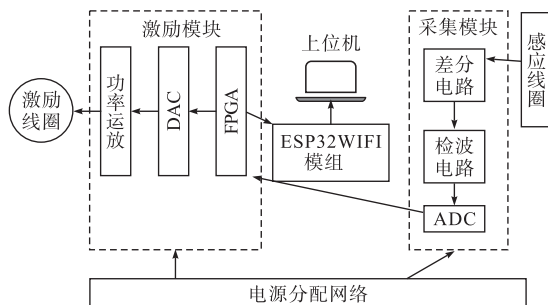


图 10 系统硬件框架图

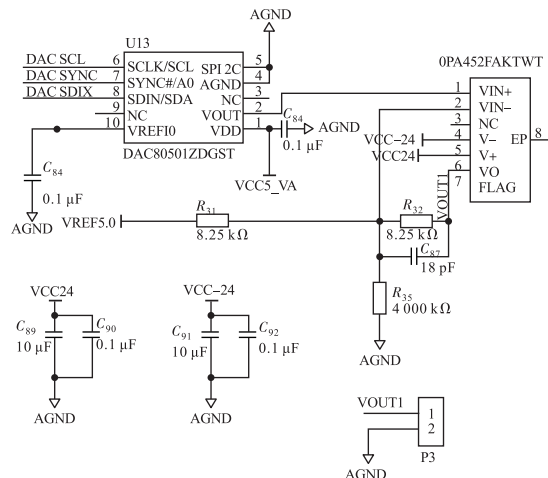


图 11 激励模块电路图

采集模块采用检波电路实现对交流感应信号的峰值和谷值采集,峰值(谷值)检波电路就是能检测被测波形的正峰值(负峰值),输出一个与正峰值相等的直流电压,实现交流信号向直流信号的转换。简单的峰值检波电路可以用二极管和电容实现,但是由于二极管压降的影响,这种电路输出的最大值总是小于输入峰值。该文采用两个运放组成的峰值检波电路如图 12,这种类型的检波电路由于引入了反馈,将输入信号和输出电压进行比较,可以消除二极管压降的影响。选用的 OPA365 运放,是一款零交叉、输入输出轨至轨、低噪声的高速运行运放是实现快速趋稳峰值检波电路的理想选择。

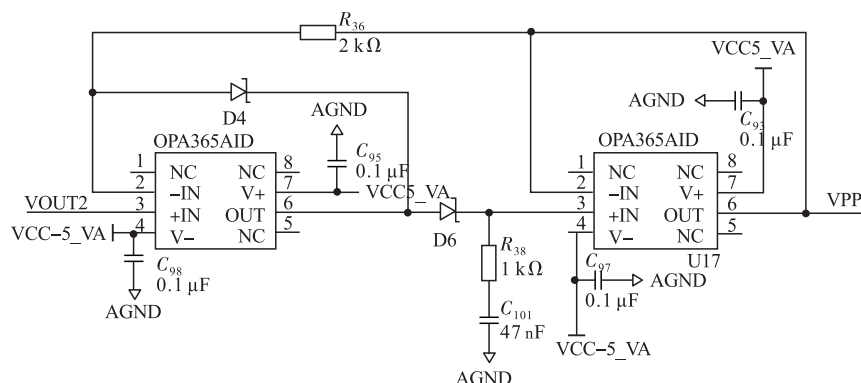


图 12 峰值检波电路图

通讯模块主要由 RS485 通讯模块和 WIFI 模块组成,可以提供串口通讯和无线传输两种方式。无线传输模块则是由 ESP32 - WROOM - 32E 外围电路和串口下载电路组成。FPGA 处理完的电压信号通过串口传输到 ESP32,再由 ESP32 无线传输给上位机。

#### 4 实验测量及分析

为了验证该文设计的传感器的性能<sup>[9]</sup>,基于图 13 的实验平台,将传感器探头和传感器电路连接,利用传感器电路的 RS485 接口将实时测量数据传到计算机的串口助手,从而得到传感器采集到的电压和压力曲线,实物如图 13 所示。

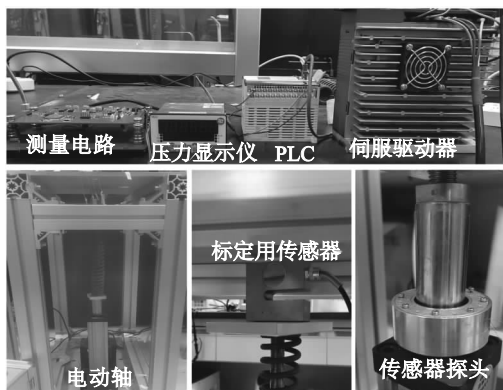


图 13 实验装置实物图

对激励信号下的传感器进行了 20 组的压力加载实验,得到的输出信号峰峰值变化量如图 14 所示。传感器灵敏度的计算公式如下:

$$S = \Delta Y / \Delta X \quad (15)$$

其中: $S$  代表传感器的灵敏度; $\Delta Y$  为输出信号的变化量; $\Delta X$  为被测信号的变化量,对于该文的传感器; $\Delta Y$  取 20 次实验得到的输出信号峰峰值变化量  $\Delta U$  的平均值; $\Delta X$  为传感器的量程 1500 N,计算得到传感器灵敏度  $S$  为 0.294 mV/N。

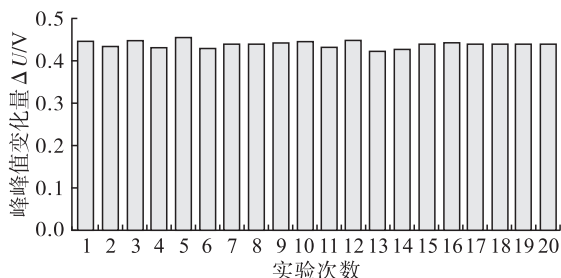


图 14 传感器输出信号峰峰值变化量

重复性误差<sup>[10]</sup>是评价传感器性能参数的一个重要指标,计算公式如下:

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (16)$$

式中, $\gamma_R$ 为重复性误差, $\Delta R_{\max}$ 为同一压力加载下的不同输出值之间的最大差值,分母  $Y_{FS}$  为满量程输出值。传感器在压力从 0 N 增长到 1500 N 过程中以 75 N 步进,重复 7 次实验得到的输出信号与压力的关系如图 15 所示,根据式 (16) 计算得到传感器最大重复性误差为 3.53%。

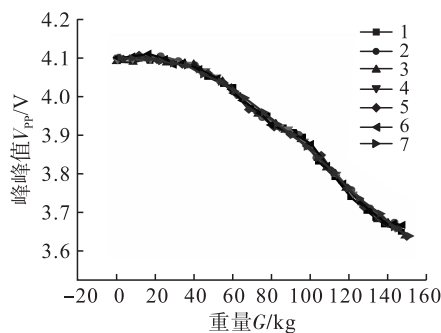
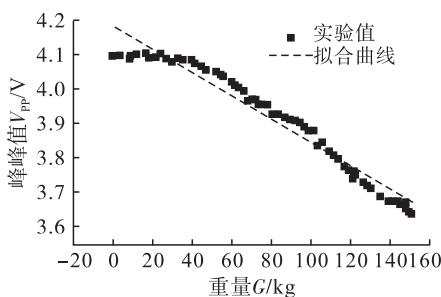


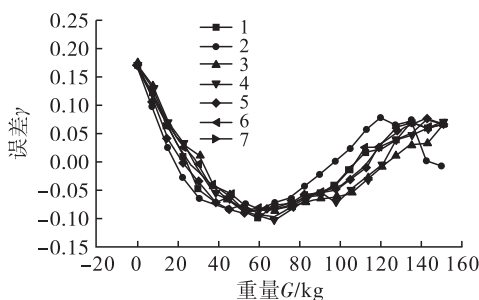
图 15 传感器输出输入曲线

理想的传感器输出与压力值成线性关系,但是通常实际压力传感器的输入和输出使非线性的。观察传感器的输出特性曲线可以发现,随着压力增大,传感器感应线圈输出电压的峰峰值逐渐降低,但是传感器输出与压力并不是完全成线性。为了提高传感器的精度,该文采用曲线拟合的方法对传感器输出特性进行补偿,非线性误差的计算公式如下:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (17)$$



(a) 一阶拟合曲线



(b) 一阶误差

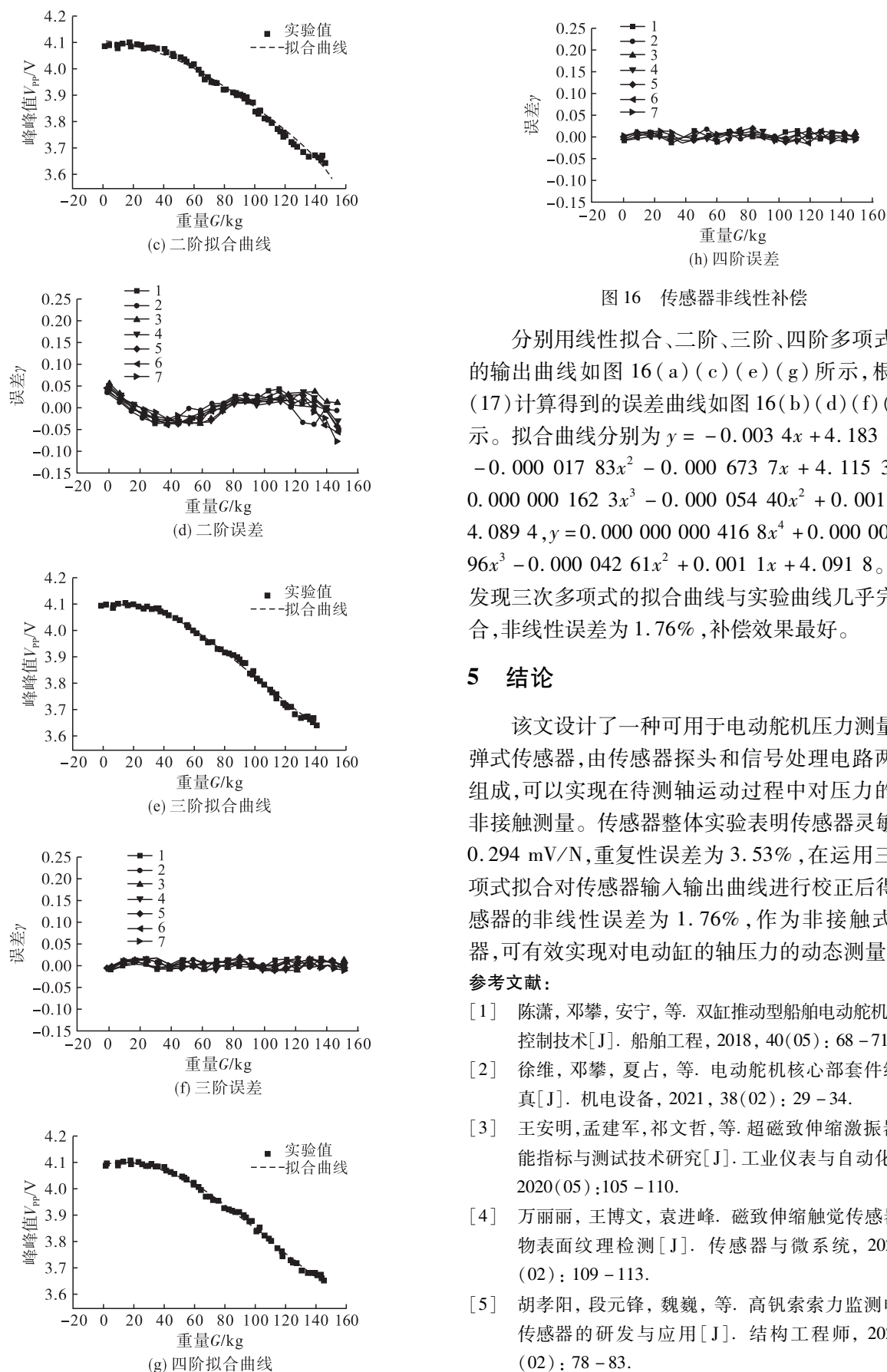


图 16 传感器非线性补偿

分别用线性拟合、二阶、三阶、四阶多项式拟合的输出曲线如图 16(a)(c)(e)(g) 所示, 根据式(17) 计算得到的误差曲线如图 16(b)(d)(f)(h) 所示。拟合曲线分别为  $y = -0.0034x + 4.1838$ ,  $y = -0.00001783x^2 - 0.0006737x + 4.1153$ ,  $y = 0.0000001623x^3 - 0.00005440x^2 + 0.0015x + 4.0894$ ,  $y = 0.000000004168x^4 + 0.00000003796x^3 - 0.00004261x^2 + 0.0011x + 4.0918$ 。可以发现三次多项式的拟合曲线与实验曲线几乎完全重合, 非线性误差为 1.76%, 补偿效果最好。

## 5 结论

该文设计了一种可用于电动舵机压力测量的磁弹式传感器, 由传感器探头和信号处理电路两部分组成, 可以实现在待测轴运动过程中对压力的动态非接触测量。传感器整体实验表明传感器灵敏度为 0.294 mV/N, 重复性误差为 3.53%, 在运用三阶多项式拟合对传感器输入输出曲线进行校正后得到传感器的非线性误差为 1.76%, 作为非接触式传感器, 可有效实现对电动缸的轴压力的动态测量。

### 参考文献:

- [1] 陈潇, 邓攀, 安宁, 等. 双缸推动型船舶电动舵机的同步控制技术[J]. 船舶工程, 2018, 40(05): 68-71+76.
- [2] 徐维, 邓攀, 夏占, 等. 电动舵机核心部件结构仿真[J]. 机电设备, 2021, 38(02): 29-34.
- [3] 王安明, 孟建军, 祁文哲, 等. 超磁致伸缩振荡器的性能指标与测试技术研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(05): 105-110.
- [4] 万丽丽, 王博文, 袁进峰. 磁致伸缩触觉传感器与织物表面纹理检测[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(02): 109-113.
- [5] 胡孝阳, 段元锋, 魏巍, 等. 高钎索索力监测电磁弹传感器的研发与应用[J]. 结构工程师, 2021, 37(02): 78-83.

(下转第 117 页)

节 PWM 脉宽的方式,实现了对驱动器输出角度的精确控制。

为了验证所提控制策略的有效性,该文在 Simulink 中搭建了仿真模型,并将该控制策略与传统的 PID 和滑模控制进行对比。仿真结果表明,相对于传统控制方法,所提的基于 PSO 的自适应滑模控制器在 SMA 驱动器控制中展现出了更高的响应速度和稳定性,为形状记忆合金材料的应用提供了新的思路和方法。

#### 参考文献:

- [1] 周博,王志勇,薛世峰. 形状记忆合金超弹性螺旋弹簧的力学模型[J]. 机械工程学报,2019,55(08):56-64.
- [2] TANAKA K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: one - dimensional tensile behavior[J]. Res Mechanica, 1986, 18:251-263.
- [3] LIANG C, ROGERS C A. One - dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2013,1(2):207-234.
- [4] Brinson, L. C. One - dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non - constant material functions and redefined martensite internal variable[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 1993, 4(2):229-242.
- [5] 梁明威. 基于形状记忆合金的柔性驱动平台回滞建模与控制算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- [6] 徐殿国,白凤强,张相军,等. 形状记忆合金执行器研究综述[J]. 电工技术学报,2022,37(20):5144-5163.
- [7] HWANG D, IHN Y S, KIM K. Compact modular cycloidal motor with embedded shape memory alloy wires[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018(5):1-1.
- [8] 李晓光,张弼,赵新刚,等. 形状记忆合金驱动器的自适应滑模反步控制[J]. 控制理论与应用,2020,37(01):137-146.
- [9] 尹海斌,薛欢,章志大,等. 形状记忆合金驱动的仿人腕关节机构理论与运动控制[J]. 机械科学与技术,2023,42(02):181-189.
- [10] HU B, LIU F, MAO B, et al. Modeling and position control simulation research on shape memory alloy spring actuator[J]. Micromachines, 2022, 13(2):178.
- [11] GILARDI G, HASLAM E, BUNDHOO V, et al. A shape memory alloy based tendon - driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part II: modelling and control[J]. Robotica, 2010, 28(5):675-687.
- [12] SHAKIBA S, AYATI M, YOUSEFI - Koma A. Development of hybrid prandtl - ishliniskii and constitutive models for hysteresis of shape - memory - alloy - driven actuators[J]. Robotica, 2021, 2021(2021):1-15.
- [13] 李锦钰,白海军,刘玉旺. 基于改进粒子群算法的四足机器人步态研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(05):70-75.
- [14] WANG T Z, ZHOU Y H. A nonlinear transient constitutive model with eddy current effects for giant magnetostrictive materials[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(12):13-20.
- [15] ZHAN Y S, LIN C. A constitutive model of coupled magneto - thermo - mechanical hysteresis behavior for giant magnetostrictive materials[J]. Mechanics of Materials, 2020, 148:103477.
- [16] KIM S, KIM K, CHOE K, et al. A nonlinear magneto - mechanical coupling model for magnetization and magnetostriction of ferromagnetic materials[J]. AIP Advances, 2020, 10(8).
- [17] 胡继敏,郭峰,赵祯,等. 温度对扭矩传感器弹性体 17-4PH 特性的试验[J]. 船舶工程,2023,45(S1):406-411.
- [18] 冯张彬,熊福敏,王健,等. MEMS 多晶硅纳米膜压力传感器过载能力设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(04):89-92+97.
- [19] 陈宝奇,周再祥,张强. 基于混沌麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的短期风电功率预测[J]. 工业仪表与自动化装置,2022(6):13-17.
- [20] 姜海燕. 基于 BP 神经网络的牵引供电系统的故障预测研究[J]. 工业控制计算机,2022,35(6):82-84.
- [21] 曹培,徐鹏,贺建明,等. 基于多源感知的开关柜绝缘缺陷检测技术[J]. 中国电力,2021,54(10):117-124+133.
- [22] 陈明,张文静,赵杰. 基于多源感知的电力工程数据信息处理与识别技术研究[J]. 电子设计工程,2023,31(4):178-182.
- [23] 祝小钧. 多源感知网络中数据融合方法研究与应用[D]. 重庆:重庆邮电大学,2022:23-46.
- [24] 王鹏,杨雨君,陈曼龙,等. 分布式质量块结构高 g 值加速度传感器仿真分析[J]. 仪表技术与传感器,2023(5):19-24+29.
- [25] 但丁谊,丁克勤,舒安庆. 基体封装式光纤布拉格光栅传感器的应变传递及其影响因素[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(5):147-155.
- [26] 张芮,朱姿娜. 柔性电涡流式触觉传感器性能仿真与分析[J]. 仪表技术与传感器,2021(6):16-20+25.