文章编号 1004-924X(2017)08-2139-10

非共振式压电直线电机精密驱动及定位控制

曹小涛，李德全*，李洪文，林冠宇，杨维帆
（中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033）

摘要：为实现光机结构、集成电路等领域中大行程及高精度的位移控制，利用较为适用的非共振式尺蠖型压电直线电机，基于高压功率运算放大器，设计了非共振式压电直线电机的精密复合放大驱动电路，通过理论分析及实验得到的伯德图验证了驱动电路的分辨率和幅频特性。以现场可编程门阵列(FPGA)为核心处理器，以光栅尺为反馈元件，通过分析非共振式压电直线电机的多种运行模式，根据直线电机的运行时序，设计完成了开环大范围整步运行模式与闭环小范围单步运行模式相结合的控制策略，在单步运行模式中分别设计完成了 PID 控制算法及 PID 与压电陶瓷迟滞逆模型前馈相结合的复合控制算法。实验结果表明，该控制策略能够实现大行程内的精密位移控制，复合控制算法具有比 PID 更加优越的控制效果，能够在 21 mm 大行程内实现 1.5 nm 的闭环定位控制精度，直线电机的最大驱动力可达 300N，满足大行程高精度位移控制的应用需求。

关 键 词：非共振式压电陶瓷；迟滞逆模型；大行程高精度定位控制；FPGA；复合控制模型
中图分类号：TP394.1；TH691.9 **文献标识码**：A **doi**：10.3788/OPE.20172508.2139

Precision drive and position control of non-resonance piezoelectric stack linear motor

CAO Xiao-tao, LI De-quan, LI Hong-wen, LIN Guan-yu, YANG Wei-fan

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: lidequan@alu.hit.edu.cn*

Abstract: In order to realize long stroke and high precision displacement control in scopes such as optical-mechanical structure, integrated circuit and so on, a precision hybrid amplification driving circuit was designed by using non-resonance piezoelectric inchworm stack linear motor based on the high voltage power operational amplifier. Resolution and amplitude-frequency characteristic of driving circuit were verified by Bode diagram gotten by theoretical analysis and experiment. Taking FPGA as core processor and grating ruler as feedback element, through analyzing various operation modes of non-resonant piezoelectric linear motor, according to the operation sequence of linear motor, a control strategy combining the open loop large range whole step mode with closed-loop and small-range single step operation mode was designed and finished. Two types of control algorithms of PID and compound control of combination between PID and feed forward of hysteresis inverse model of piezoelectric ce-

收稿日期：2017-01-21；**修订日期**：2017-04-14.
基金项目：国家自然基金重大科研仪器研制项目(No. 41527806)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ramic were designed respectively in single step operation mode. Experimental results indicate that the control strategy can realize precise displacement control. Compound control algorithm has more superior control effect than PID. Moreover, its closed-loop position control precision can reach 1.5 nm in large stroke of 21 mm. Linear motor can realize maximum driving force of 300N and satisfies application demands of high-precision displacement control in large stroke.

Key words: non-resonance piezoelectric ceramic; hysteresis inverter model; long stroke and high precision displacement control ; FPGA; compound control algorithm

1 引 言

航空航天、集成电路、生物工程、光电子等领域的迅速发展,对精密驱动技术的要求越来越高。尤其是在光电设备精密定位、跟踪、稳像、主动光学调整等应用中[1-3],传统的电磁电机在控制精度、结构设计、响应速度等方面已经难以满足要求。

压电直线电机作为一种常用的压电致动器,它的激励源来自于压电陶瓷自身的逆压电效应和电致伸缩效应。压电直线电机通过特定的机械结构将压电陶瓷周期性的微观运动转换为输出轴宏观可见的直线位移运动,以此来驱动外部载荷产生相应的位移运动。由于压电直线电机具有响应速度快、精度高、抗干扰性强、掉电可自锁、适用于真空和超净环境等优点,受到了国内外众多专家学者的广泛关注,并已经在精密微定位、光学仪器、航空航天等领域得到应用[4-5]。

近年来,压电直线电机的结构及驱动方式都取得了迅速且全面的发展,出现了很多不同种类,按照其内部电机定子的激励方式基本可以分为共振型和非共振型两种。共振型压电直线电机利用共振效应将压电陶瓷的微观形变转化为负载的宏观位移,主要有行波型、驻波型和表面波型超等。非共振型压电直线电机直接利用压电陶瓷形变驱动负载运动或利用机械几何放大原理将压电陶瓷的微观形变转化为负载的宏观位移,主要有直动驱动型、惯性冲击型、尺蠖原理型、摩擦驱动型等[6]。

本文的压电直线电机位移控制系统中所用到的压电直线电机为非共振型中的尺蠖原理型,尺蠖原理型压电直线电机模仿自然界中尺蠖的曲形前进行为,通过多个压电作动元件的驱动及嵌位单元的相互作用,实现直线电机输出轴的交替驱动,从而将压电元件的微小位移累积为步进连续的大行程精密位移输出[6-7]。

尺蠖非共振型压电直线电机具有行程大、分辨率高、承载能力强等优点,具有广阔的应用前景。本文主要针对该种电机的复杂运行模式,讨论其驱动及控制方法。首先基于压电直线电机运动原理及多种运动模式,设计完成了基于FPGA和高压功率运算放大器的压电电机试验系统。针对压电电机的大行程高精度定位控制要求,采用整步运动模式开环控制与单步运行模式闭环控制相结合的控制方法。通过整步运动实现大行程运动,接近期望定位位置时,再通过单步运行模式实现微小距离的精密闭环控制。另外,针对压电陶瓷的迟滞效应,提出了基于PID反馈和压电陶瓷逆模型前馈补偿的复合控制算法。最后通过对比试验,验证了本文所提方法的有效性。

2 压电直线电机原理及驱动模式

2.1 压电直线电机的构成

图1(彩图见期刊电子版)为一种非共振式尺蠖型压电直线电机及其内部结构示意图。其中,中间直线部分为电机直线位移输出轴,浅黄色的PZT负责上下垂直运动(以下简称上下PZT),深黄色的PZT负责左右切向运动(以下简称左右PZT)。

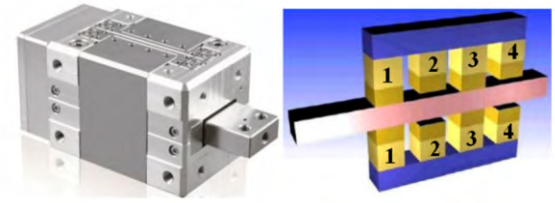


图1 压电直线电机及其内部结构示意图

Fig.1 Piezoelectric linear motor and its internal structure map

压电直线电机内部具有4对支腿,1和3的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

驱动信号相同，2 和 4 的驱动信号相同，通过不同时序的驱动电压来驱动所有的 PZT，就可以实现像人走路的运动，从而输出大范围位移，如图 2（彩图见期刊电子版）所示。

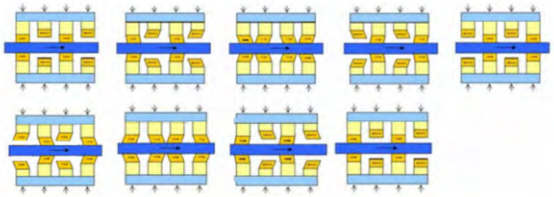


图 2　压电直线电机的运动原理

Fig. 2　Movement principle of linear motor

2.2　压电直线电机的运动模式

压电直线电机的运动模式有 3 种，分别为：整步运动模式、平滑运动模式以及单步运行模式。

图 3 为压电直线电机在整步运行模式及平滑运动模式下输出位移与时间的关系图。整步运动模式下 1&3 支腿和 2&4 支腿反复交替踏在直线位移输出轴上，因此能得到最大的运动速度，但是运动位移不够平滑，平滑运动模式下 1&3 腿或 2&4 支腿踏上金属条的时候，并没有走整步运动模式下支腿运动的完整步，而是只走了大概一半的范围，然后就抬脚了，抬脚以后在空中完成没走完的步，因此能得到尽可能平滑的运动曲线，但运动速度相对较小。单步运行模式即在运动过程中，1&3 支腿和 2&4 支腿都同时踏在直线位移输出轴上，1&3 支腿和 2&4 支腿不换腿，而只是在单步里面来回运动。在这个模式下，由于只是 1&3 腿和 2&4 腿的左右 PZT 在运动，所以这个时候的推力/拉力最大，而且动态能力很高，和传统叠堆型 PZT 一样，因此这种情况下也同样存在

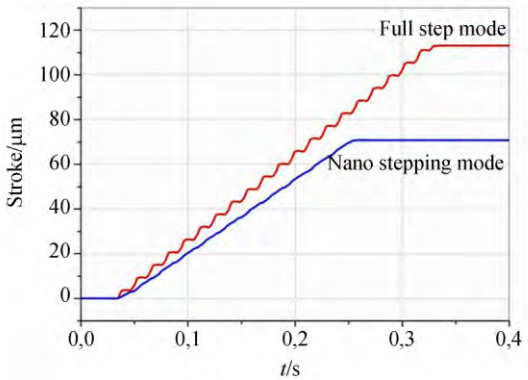


图 3　压电直线电机整步及平滑运动模式

Fig. 3　Full step and smooth motion modes of linear motor

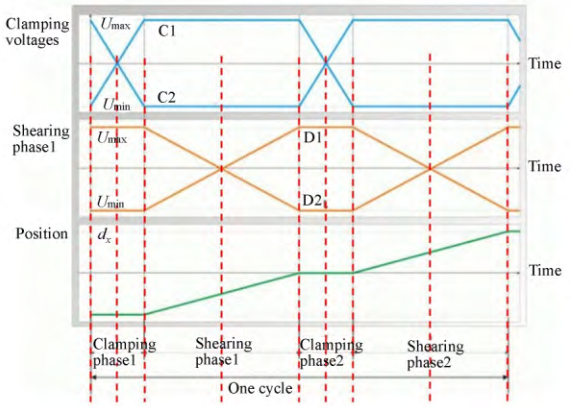


图 4　整步模式驱动时序图

Fig. 4　Drive timing diagram of full step mode

与叠堆型 PZT 相同的迟滞问题。

图 4（彩图见期刊电子版）为压电直线电机整步运动时序图，图中蓝色 C1 代表 1&3 腿的“上下 PZT”，C2 代表 2&4 腿的“上下 PZT”，桔色 D1 代表 1&3 腿的“左右 PZT”，D2 代表 2&4 腿的“左右 PZT”，绿色代表这个时序驱动电压加载后的位移曲线。

为实现大范围快速精密定位控制，本文采用整步运动＋单步运动相结合的模式。首先利用运动速度较快的整步运行模式以获得同等条件下最快的位移速度，当到达某个特定的位移阈值之后，再利用单步模式进行闭环控制，以实现精密位移控制。

3　控制系统试验平台

3.1　压电直线电机控制方案

压电直线电机控制系统试验平台实物图及原理框图分别如图 5 和图 6 所示，主要由上位机、控制电路、反馈电路和驱动电路组成。

上位机主要完成与控制器的通讯功能，发送控制指令，采集、存储及显示系统状态数据，具体软件代码由 Labview 实现。控制电路主要采用 Altera 公司型号为 EP3C40F32417N 的 FPGA 作为核心控制单元，其作用是与上位机通信、霍尔零点判断、光栅尺解码、压电直线电机运动模式时序控制及转换、单步模式闭环控制算法的实现。驱动电路采用 4 路由精密低压运放＋高压大功率运放（OP07＋PA95）组成的双级运算放大器高压驱动电路，分别控制 4 组压电支腿。反馈电路主要

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

包括霍尔零点定位和光栅尺直线位移，霍尔零点定位用于实现零点及方向判断功能。采用栅距为 20 μm 的直线光栅尺，利用 16 位正余弦插补器 IC-TW8 将光栅尺输出的正余弦模拟信号细分后，转换为标准 AB 信号接入 FPGA，再将 AB 信号解码，得出压电直线电机的相对位移量。通过零位和相对位移量可以解算出压电直线电机的绝对位移量。

FPGA 依据上位机指令，采集压电电机零位及光栅尺信息，通过控制算法并按照相应时序将计算结果输出至 4 路 20 位 DA 转换器 AD5791，然后通过 4 路驱动电路控制压电电机运动，从而构成压电直线电机位置闭环控制系统。

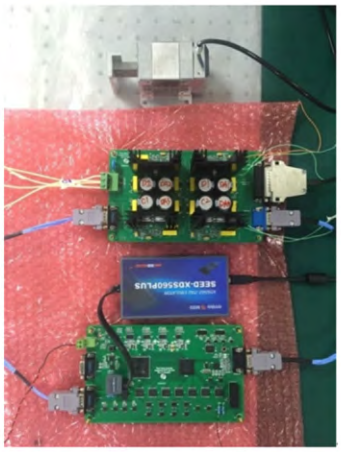


图 5 压电直线电机控制系统实物图

Fig. 5 Prototype of linear motor control system

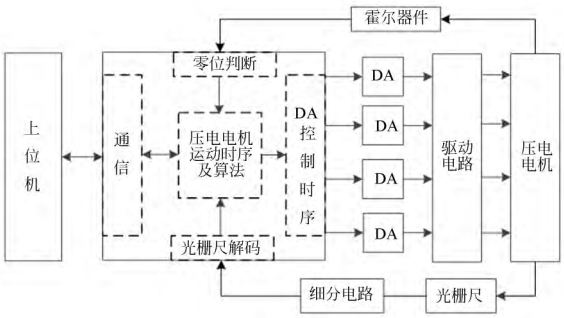


图 6 压电直线电机控制系统试验平台原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of linear motor control system

3.2 压电直线电机双级高压驱动电路

驱动电路的性能将直接影响压电直线电机系统的位移控制精度。根据设计原理的不同，压电陶瓷驱动电路一般分为电荷控制型和电压控制型。电荷控制型可以一定程度弱化压电陶瓷的蠕变特性和迟滞特性，但是响应时间较长。电压控制性主要又分为两种：开关式和直流放大式。开关式效率较高，频率响应带宽较宽，但是输出静态波纹较大。而直流放大式的频率响应较宽且静态纹波较小[8-10]。通过以上比较分析，本文最终采用的为直流放大式驱动电路，电路原理图见图 7。

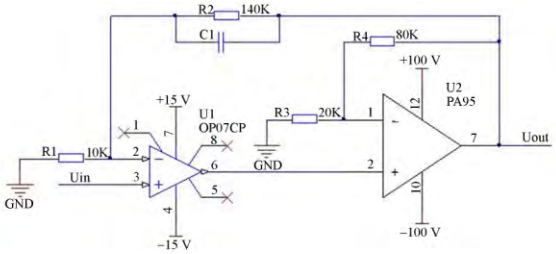


图 7 直流放大式驱动电路原理图

Fig. 7 Diagram of drive circuit for DC amplified

该电路主要由高精密运算放大器 OP07 以及高压运算放大器 PA95 构成，由图 7 可以看出(R4 + R3)/R3 = 5，(R2 + R1)/R1 = 15，由此可得 OP07 的放大倍数为 3，PA95 的放大倍数为 5，因此压电陶瓷驱动电路的复合放大倍数为 15 倍。

由于 PA95 的最大输入失调电压为 5 mV，而 OP07 的最大输入失调电压为 75 μV，考虑到压电陶瓷驱动电路的输入失调电压由输入失调电压较小的 OP07 决定，故输入失调电压为 75 μV×15 =1.125 mV，远小于单级运放失调电压。通过上述分析可知，采用双级放大电路将会有效地提高压电陶瓷驱动电路的分辨率。

由于压电陶瓷为典型的容性负载，所以放大电路的输出阻抗 R_O 和容性负载 C_L 将在放大电路的 Aol 曲线上产生一个极点，其频率如下：

$$f_p = 1/(2\pi R_O C_L). \tag{1}$$

这将在已经设计好的处于深度负反馈的稳定电路中增加 −45°的相移，因此，可能造成整个电路的不稳定或产生自激振荡。针对此问题，本文采用反馈零点补偿方法[11]，在电路中增加电容 C_1，使信号增益增加一个零点，并使零点对应的特征频率为：

$$f_x = 1/(2\pi R_2 C_2). \tag{2}$$

通过合理选取参数，将会在 f_x 处产生 45°的相角裕度，补偿极点的影响，从而使系统稳定。

对所设计压电电机的驱动电路进行分辨率试验，测试点电压分别为 0.001 44，1.639 54，8.194 09 V。利用 FPGA 使 AD5791 每次增加

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1LSB，并利用六位半电压表记录驱动电路的输出电压。对于每个电压值，AD5791 输入数字量步进 3 次，试验数据见下表 1。

表 1　压电直线电机驱动电路分辨率

Tab. 1　Resolution of drive circuit for linear motor

测量次数	电压 1 /V	电压 2 /V	电压 3 /V	电压 4 /V	增量均值 V/LSB
1	0.00144	0.00175	0.002	0.00226	0.00025
2	1.63954	1.63982	1.64012	1.64041	0.00029
3	8.19409	8.19431	8.19454	8.19478	0.00023

3 次试验取均值，则驱动电路的增量均值为 0.000 25V/LSB。由于压电电机 +/−3 μm 对应的驱动电压为 +/−250 V。因此，根据理想情况可计算得，20 位 DA 转换器所能实现的最高分辨率为 3pm。该分辨率远小于光栅尺细分之后的分辨率(0.3 nm)，因此压电电机驱动电路输出电压的分辨率满足精密定位要求。

然后采用频率特性分析仪对压电驱动电路带载情况进行动态特性测试，测试环境如图 8 所示，测试得到的波特图如图 9(彩图见期刊电子版)所示。

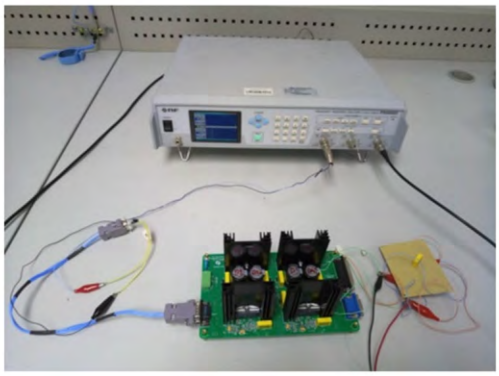


图 8　动态特性测试系统

Fig. 8　Testing system of dynamic characteristic

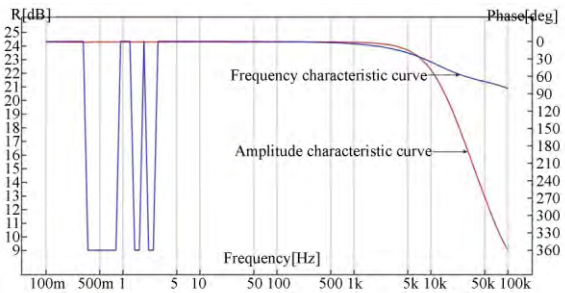


图 9　压电电机驱动电路波特图

Fig. 9　Bode diagram of drive circuit

图 9 中红色为幅值特性曲线，蓝色为相位特性曲线。可以看出，系统稳定，其电压放大倍数为 15.048 7，−3 dB 带宽为 20.1 kHz，相位裕度为 75°。放大倍数与设计值基本一致，压电直线电机的最大驱动频率为 100 Hz，因此压电驱动电路的动态特性满足设计要求。

3.3　压电直线电机控制算法

本文压电直线电机的位移控制策略为先采用整步运行模式以最快的速度靠近目标，然后切换至单步运行模式以实现较高的位移控制精度。然而，由于单步运行模式下存在迟滞问题，将会影响控制精度。

压电陶瓷的迟滞特性是指压电陶瓷的升压曲线和降压曲线之间不存在对称轴。压电陶瓷在驱动过程中，驱动电压幅值及频率都会影响其迟滞特性曲线的形状和曲线所围面积，不同的制作材料及制造过程也会导致压电陶瓷迟滞效应有所不同。一些压电陶瓷驱动器在开环控制的情况下，迟滞非线性所产生的跟踪误差可达到 16%～25%以上。导致这一现象的原因是由于在外电场作用下，压电陶瓷的极化强度为外电场方向的极化电荷密度，而压电陶瓷的介电常数与外电场强度之间并不是线性关系，存在电滞回线[12]。

压电陶瓷的开环控制方案如图 10 所示。首先建立压电陶瓷的电压-位移模型 H，然后反解得到位移-电压模型 H^{-1}；再根据 H^{-1} 由目标位移 $y_n(u)$，反解出施加在压电陶瓷两端的驱动电压 $u(k)$。

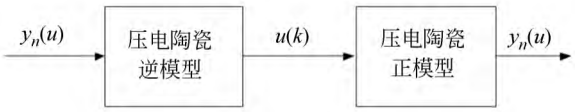


图 10　压电陶瓷的开环控制方案

Fig. 10　Open loop control scheme for piezoelectronic ceramics

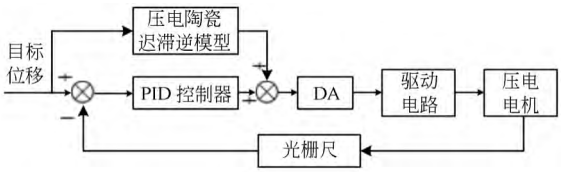


图 11　压电陶瓷复合控制方案框图

Fig. 11　Block diagram of hybrid control for piezoelectronic ceramics

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于压电陶瓷逆模型与实际系统存在误差，造成开环控制效果不佳，甚至不稳定。因此本文采用 PID+压电陶瓷前馈逆模型的复合控制方案。控制方案框图如图 11 所示。

PID 控制器结构清晰、参数可调，适用于各种控制对象，另外，其还可根据现场实际情况调节参数。因此可取得较好的控制效果，在动态控制系统中应用广泛。

PID 控制器的表达式为：

$$u(t)=k_p\left[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right],\quad(3)$$

在数字算法中由于增量型 PID 控制算法[13]只与前三次采样值有关，简单可靠，故本文采用增量型 PID 控制算法。

目前，压电陶瓷电压位移迟滞模型主要有多项式拟合模型、Preisach 模型、Generalized Maxwell Slip（GMS）模型、Prandtl-Ishlinskii 模型、Dahl 模型、Duhem 模型、Jiles-Atherton（J-A）模型、Neural Network 模型等[14-15]。其中多项式拟合法可以较为容易地推导出用于构建前馈控制的逆模型，从而消除压电陶瓷的迟滞效应。多项式拟合模型一般将迟滞曲线分为上升曲线和下降曲线两个阶段，根据上升曲线和下降曲线的不同特点进行拟合，从而得到各多项式的实际参数。上升阶段和下降阶段的多项式方程可以分别描述为：

$$y_r=a_nu^n+a_{n-1}u^{n-1}+\cdots\cdots a_1u+a_0,\quad(4)$$

$$y_d=b_nu^n+b_{n-1}u^{n-1}+\cdots\cdots b_1u+b_0.\quad(5)$$

试验测得压电直线电机在单步驱动模式下 0～100 V 升降压位移迟滞数据点图如图 12 所示。图中下方曲线为升压数据拟合曲线，上方曲线为降压数据拟合曲线。

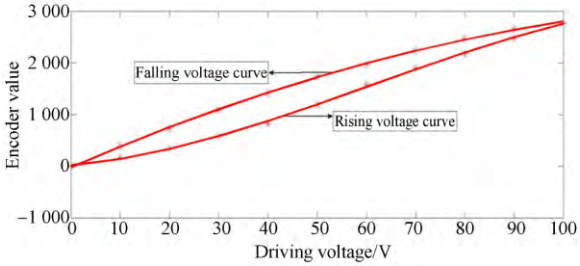


图 12 压电陶瓷 0-100 V 迟滞特性曲线

Fig. 12 Block diagram of hysteresis characteristic in 0～100 V

对数据中的极限升压曲线与降压曲线部分进行多项式拟合。由电压-位移数据曲线可以看出，升压曲线存在拐点，故采用三次多项式进行拟合，下降曲线不存在拐点，故采用二次曲线进行拟合，拟合曲线如图 12 所示。

升压迟滞的拟合曲线表达式为：

$$y=-0.23\times10^{-2}u^3+4.234\times10^{-1}u^2+8.247\ 0u+1.572\ 03,\quad(6)$$

降压迟滞的拟合曲线表达式为：

$$y=-3.12\times10^{-1}u^2+41.404\ 4u-2.025\ 17,\quad(7)$$

式中，y 代表位移，u 代表电压。从图 13 及上述公式可知数据拟合较为理想，压电陶瓷升压位移拟合误差最大为 0.24%，降压位移拟合误差最大为 0.17%。

求解压电陶瓷的逆模型即为求解公式(6)和(7)。式(7)较易求解，利用一元二次求根公式

$$u=(-b\pm\sqrt{b^2-4ac})/(2a),\quad(8)$$

其中 $a=-3.12$，$b=41.404\ 4$，$c=-2.025\ 17-y$。即可求出降压迟滞逆模型。

式(6)首先把方程化为 $x^3+px+q=0$ 的形式，即设 $x=z-\frac{b}{3a}$，将原式化为：

$$z^3+\left(\frac{c}{a}-\frac{b^2}{3a}\right)z+\left(\frac{d}{a}+\frac{2b^3}{27a^3}-\frac{bc}{3a^2}\right)=0,\quad(9)$$

其中 $a=0.002\ 3$，$b=0.423\ 4$，$c=8.247$，$d=y+1.572\ 03$。然后即可通过一元三次方程卡尔丹诺

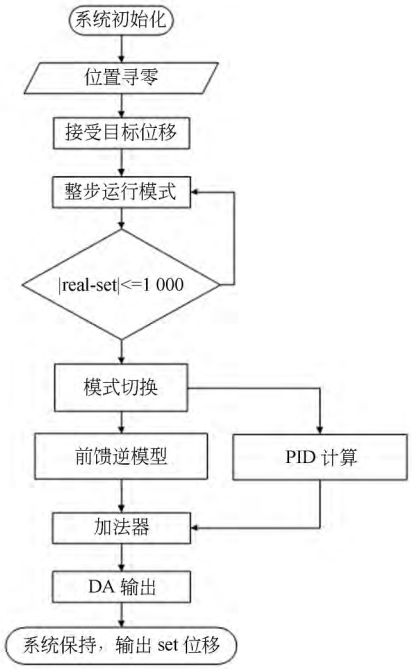


图 13 软件控制方案图

Fig. 13 Flow chart of software control program

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

公式求解得到升压迟滞逆模型。

3.4　控制系统软件

压电直线电机软件控制方案如图 13 所示，其中 set 代表目标位移码值，real 代表压电直线电机实际输出位移码值。模式切换的阈值选为 1 000个码值。

4　试验与结果

上位机所指定的目标位移为 141 325 个码，待压电直线电机输出位移平稳后，采集 1 000 个输出码值，数据点采样率为 1K，利用 matlab 求其均方根和均方根误差，计算出压电直线电机的控制精度，上位机采集到的光栅尺输出码值曲线如图 14 所示，图中斜线部分为整步运行模式下压电直线电机的输出位移码值，直线部分为单步运行模式下压电直线电机的输出位移码值。图 15 为单步运行模式下输出位移码值的局部放大图，图中横坐标数据点采样率为 1K，纵坐标代表光栅尺输出码值。上述试验共进行 5 次，试验数据如表 2 所示。

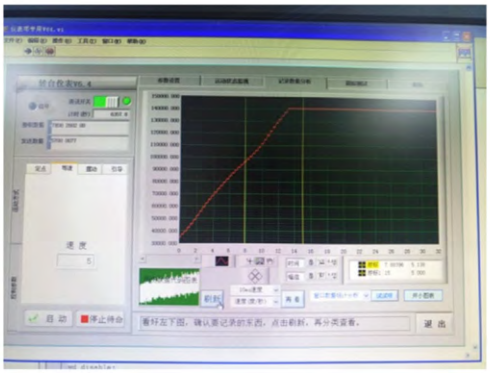


图 14　光栅尺输出码值曲线图

Fig. 14　Code value diagram of grating

表 2　压电直线电机输出位移

Tab. 2　Output displacement of piezoelectric liear motor

测量次数	码值均方根	码值均方根误差	控制精度 /nm
1	141 324.7	5.1	1.53
2	141 324.7	5.3	1.59
3	141 324.4	5.2	1.56
4	141 325.8	5.3	1.59
5	141 324.6	5.2	1.56

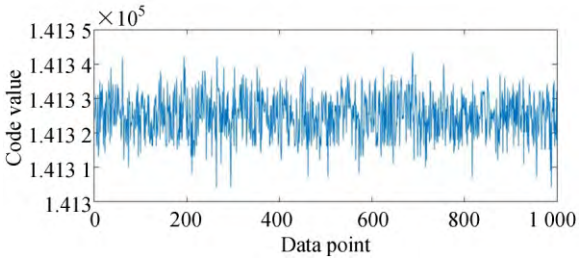


图 15　稳定阶段光栅尺输出码值

Fig. 15　Code value of linear decoder during stability

由上述数据可得到，其均方根为 141 324.8，均方根误差为 5.22，光栅尺输出的每个码值对应的位移为 0.3 nm，则将均方根误差换算成压电直线电机位移为 1.566 nm，即控制精度为 1.566 nm。

压电直线电机单步运行模式下，采集 PID 及 PID 加前馈逆模型的控制方案下光栅尺的位移输出码值，试验数据如图 16 所示。图中“＊”为 PID 加前馈逆模型的控制方案下的数据点，“·”为单 PID 闭环控制方案下的数据点，数据点采样率为 1K。分析试验数据可知，PID 加前馈逆模型控制方案的调节时间为单 PID 闭环控制的 45.4%，最大超调量减少至单 PID 闭环控制的 31.2%。由对比结果可知复合控制方案控制性能优于单 PID 闭环控制。

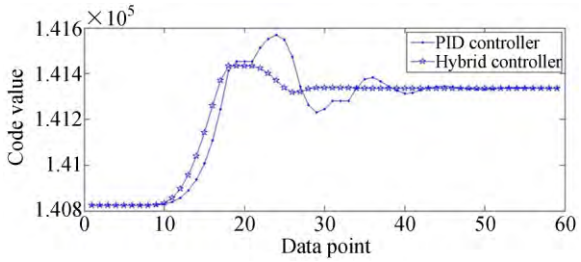


图 16　压电直线电机驱动力实验数据图

Fig. 16　Experimental data of drive force for piezoelectric linear motor

利用 S9M 力传感器测试±100 V 供电电压下压电直线电机的最大推力和拉力。利用 NI PXIe-6363 板卡采集 S9M 输出电压，采集到的电压值经过 matlab 处理后即可得出数据。

上位机所采集到的拉力及推力数据曲线如图 18 及图 19 所示。图中横坐标为所采集的数据点个数，数据点采样率均为 1 K，纵坐标为 S9M 力传感器输出电压，该电压每 0.02 mV 代表 1N 外力。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

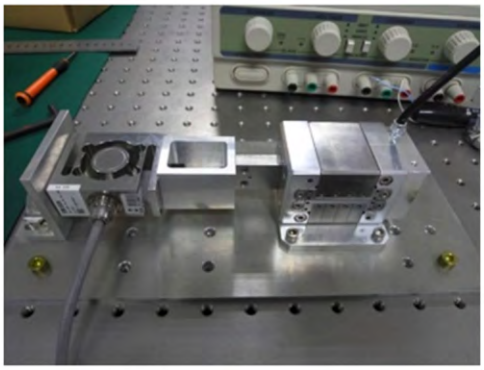


图 17 压电直线电机驱动力试验装置

Fig. 17 Drive force experiment setup

理想情况下最大推拉力数值应相等，但由于受测量误差及压电直线电机工艺问题等的影响，经数据分析后得出本文所使用的压电直线电机在供电电压为±100 V 时，最大推力为 315 N，最大拉力为 300 N。

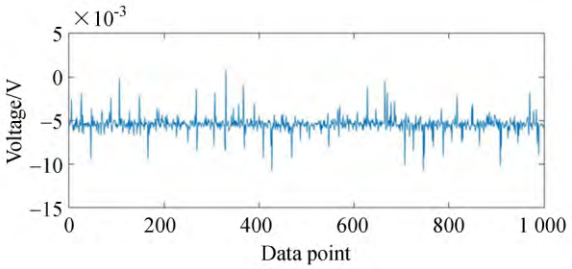


图 18 压电直线电机拉力测试数据

Fig. 18 Test results of pulling force

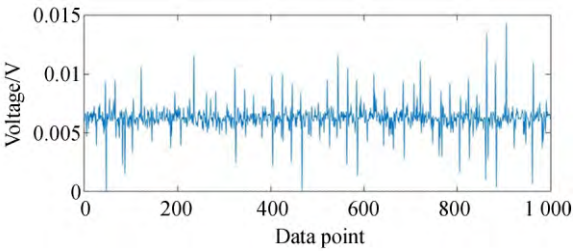


图 19 压电直线电机推力测试数据

Fig. 19 Test results of press force

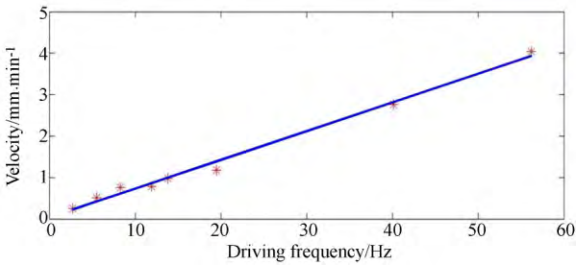


图 20 压电直线电机驱动频率与运行速度

Fig. 20 Drive frequency vs motion velocity curve of linear motor

压电直线电机的总行程为 21 mm，它的运行速度受驱动频率的影响，从测试结果图 20 可以看出，其运行速度与驱动频率基本成正比关系。

5 结 论

本文针对光机结构、集成电路等领域中精密调整任务的需要，设计完成了非共振式压电直线电机的精密复合放大驱动电路，其输入失调电压为 1.125 mV，电压放大倍数为 15.048 7，−3 dB 带宽为 20.1 kHz，相位裕度为 75°。为解决压电直线电机在单步运行模式下的迟滞问题，利用多项式拟合法建立了压电直线电机在单步运行模式下的极限迟滞曲线，其升压曲线拟合误差最大为 0.24%，降压曲线拟合误差最大为 0.17%。在此基础上通过 PID 加前馈逆模型的控制方案实现了 21 mm 大行程内 1.5 nm 的闭环定位控制精度。实验结果表明复合控制方案的控制效果优于单 PID 闭环控制，其调节时间仅为单 PID 闭环控制的 45.4%，最大超调量仅为单 PID 闭环控制的 31.2%。在这种控制方案下，直线电机的最大驱动力为 300 N，全行程 21 mm 最快运行时间为 5.2 min，满足大行程高精度位移控制的应用需求。

参考文献：

[1] 李宏壮，林旭东，刘欣悦，等. 400mm 薄镜面主动光学实验系统[J]. 光学 精密工程，2009，17(9)：2076-2083.

LI H ZH, LIN X D, LIU X Y, *et al*.. Experiment system of 400 mm thin-mirror active optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2076-2083. (in Chinese)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] 袁刚，张小波，王代华，等. 压电式快速控制反射镜的迟滞特性及线性化[J]. 光学 精密工程，2015，23(6)：1650-1656.
YUAN G，ZHANG X B，WANG D H，*et al*.. Hysteresis and linearization of piezoelectric fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*，2015，7(5)：739-748. (in Chinese)

[3] 曹小涛，孙天宇，赵运隆，等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学，2014，7(5)：739-748.
CAO X T，SUN T Y，ZHAO Y L，*et al*.. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope [J]. *Chinese Optics*，2014，7(5)：739-748. (in Chinese)

[4] 赵宏伟，吴博达，华顺明，等. 尺蠖型压电直线驱动器的动态特性[J]. 光学 精密工程，2007，15(6)：873-877.
ZHAO H W，WU B D，HUA SH M，*et al*.. Dynamic performance of inchworm type piezoelectric linear actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*，2007，15(6)：873-877. (in Chinese)

[5] 陈培红，王寅，黄伟清. 一种新型直动式压电直线电机的设计[J]. 压电与声光，2011，33(2)：239-243.
CHEN P H，WANG Y，HUANG W Q. The design of a new direct action piezoelectric linear motor [J]. *Piezo Electrics & Acoustooptics*，2011，33(2)：239-243. (in Chinese)

[6] 陈西府. 摩擦驱动型非共振压电叠层直线电机的研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2014.
CHEN X F. *Research on friction drive type non-resonance piezoelectric stack linear motors* [D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2014. (in Chinese)

[7] 马立，肖金涛，周莎莎，等. 杠杆式尺蠖压直线电驱动器[J]. 光学 精密工程，2015，23(1)：184-190.
MA L，XIAO J T，ZHOU SH SH，*et al*.. Linear lever-type piezoelectric inchworm actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*，2015，23(1)：184-190. (in Chinese)

[8] 黄春，汝长海，叶秀芬，等. 基于补偿技术的宽频带压电陶瓷驱动电源[J]. 压电与声光，2009，31(3)：373-376.
HUANG CH，RU CH H，YE X F，*et al*.. A broadband piezoelectric amplifier based on compensation technology [J]. *Piezo Electrics & Acoustooptics*，2009，31(3)：373-376. (in Chinese)

[9] 刘向东，傅强，赖志林. 多单元浮地级联式压电陶瓷执行器高压驱动电源[J]. 光学 精密工程，2012，20(3)：597-606.
LIU X D，FU Q，LAI ZH L. High-voltage power amplifier based on multi-unit cascade for piezoelectric actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*，2012，20(3)：597-606. (in Chinese)

[10] 杨雪峰，李威，王禹桥. 压电陶瓷驱动电源的研究现状及进展[J]. 仪表技术与传感器，2008(11)：109-112.
YANG X F，LI W，WANG Y Q. Present situation and development of power supply for piezoelectric actuator [J]. *Instrument Technique and Sensor*，2008(11)：109-112. (in Chinese)

[11] 赛尔吉欧·佛朗哥. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 西安：西安交通大学出版社，2009.
SERGIO F. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits* [M]. Xi'an：Xi'an Jiaotong University Press，2009. (in Chinese)

[12] 王希花. 基于压电陶迟滞非线性建模及控制系统的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2010.
WANG X H. *Research based on piezoelectric ceramics hysteresis nonlinear modeling and control* [D]. Harbin：Harbin Engineering University，2010. (in Chinese)

[13] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2015.
WANG X M. *Single Chip Microcomputer Control of Motor* [M]. Beijing：Beihang University Press，2015. (in Chinese)

[14] 赖志林，刘向东，陈振，等. 压电陶瓷执行器多模时

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

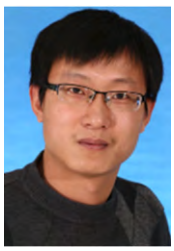
变滑模逆补偿控制[J]. 电机与控制学报,2012,16(1):92-103.

LAI ZH L, LIU X D, CHEN ZH, *et al*.. Multi-mode time-varying sliding mode control of piezoelectric actuator based on inverse compensation [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(1): 92-103. (in Chinese)

[15] 党选举. 压电陶瓷执行器的神经网络实时自适应逆控制[J]. 光学 精密工程,2008,16(7):1266-1272.

DANG X J. Real-time adaptive inverse control based on neural networks for piezoelectric actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1266-1272. (in Chinese)

作者简介:



曹小涛(1980—),**男,河南巩义人,博士,副研究员,2008年于吉林大学获得博士学位,主要研究方向为空间相机电子学及控制系统技术**。E-mail: caoxiaotao@ciomp.ac.cn

李德全(1991—),**男,辽宁鞍山人,研究实习员,2014年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2016年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事嵌入式系统设计及精密控制算法研究**。E-mail: lidequan@alu.hit.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net