基于 PI 逆模型的快速微摆反射镜的开环控制

胡亮亮,米凤文,金伟其,盛一成,何玉婷,雷琼莹

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

摘 要:由压电陶瓷驱动器构成的快速微摆反射镜平台存在迟滞特性,影响了对快速微摆反射镜的控制。 为了能够有效的对快速微摆反射镜进行控制,采用基于 PI 逆模型的开环控制方法。首先,采用 PI 模型对 快速微摆反射镜平台的迟滞特性建立数学模型,通过最小二乘法辨识 PI 模型的参数;其次,基于 PI 模型 的可逆性,求解 PI 逆模型参数;最后,验证基于 PI 逆模型的开环控制方法的有效性。根据轨迹跟踪实验得 到的数据,在正弦波轨迹输入信号下的均方根误差为 1.23%,最大误差为 2.45%;在三角波轨迹输入信号下 的均方根误差为 1.3%,最大误差为 2.37%。证明了基于 PI 逆模型的开环控制方法是可行的,能够有效地控 制快速微摆反射镜。

关键词:快速微摆反射镜; 压电陶瓷驱动器; 迟滞特性; Prandtl-Ishlinskii 模型; 开环控制 中图分类号; TN209 文献标志码; A DOI; 10.3788/IRLA201746.0818001

Open loop control of fast steering mirror based on PI inverse model

Hu Liangliang, Mi Fengwen, Jin Weiqi, Sheng Yicheng, He Yuting, Lei Qiongying

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Fast steering mirror platform which is composed of piezoelectric ceramic has hysteresis characteristic, it affects the control of the fast steering mirror. In order to control fast steering mirror effectively, open loop control method based on Prandtl–Ishlinskii (PI) inverse model was adopted. Firstly, the PI model was used to build the mathematic model of the hysteresis characteristic of the fast steering mirror and the parameters of PI model were identified by least mean squares method; Secondly, the parameters of the inverse model of PI were solved based on PI inverse model was verified. According to trajectory tracking experiment data, in the case of sine wave trajectory, root mean error is 1.23% and maximum error is 2.45%; in the case of triangle wave, root mean error is 1.3%, maximum error is 2.37%. It proves that open loop method based on PI inverse model is feasible and can effectively control fast steering mirror.

Key words: fast steering mirror; piezoelectric ceramic actuators; hysteresis characteristic; Prandtl – Ishlinskii model; open loop control

收稿日期:2016-12-10; 修订日期:2017-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61575023);总装预研基金(9140A02060415BQ01005)

作者简介:胡亮亮(1991-),男,硕士生,主要从事光电成像技术方面的研究。Email: 1582086036@qq.com

导师简介:金伟其(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事光电图像处理、夜视与红外技术、光电检测与仪器等方面的研究。

Email: jinwq@bit.edu.cn

0 引 言

近年来,基于压电陶瓷的微驱动技术得到了迅速发展,应用拓展到 IC 控制、激光测量光轴控制、遥 感成像、显微成像、光学微扫描成像、光电稳像、数码 相机防抖等诸多领域。由于成像过程中的摄像机平 台抖动或场景扫描等往往导致成像的模糊或激光 指示的偏离,采用基于压电陶瓷的光机快速补偿方 法^[1-2]不仅能够获得清晰稳定的图像和稳定的激光 指示,还可以达到有效的效果。

文中介绍了典型压电陶瓷二维微位移器和基于 压电陶瓷的快速微摆镜。其中,二维微位移器常用于 微扫描成像,控制光学部件实现光学微扫描,以及数 码相机中防抖的 CMOS 传感微位移器。基于压电陶 瓷的快速微摆镜,在其端面粘贴反射镜可构成快速 摆动反射镜,通过控制压电陶瓷的输入电压实现反 射镜的二维快速摆动,进而在光路中实现成像光束 或指示光束的控制。压电陶瓷驱动器通常具有开环 控制,闭环控制以及复合控制^[3-6]等几种控制方式。 由于压电陶瓷存在迟滞特性,开环控制是把迟滞逆 模型和迟滞系统串联起来,将具有迟滞特性的非线 性系统进行线性化,得到较好的控制。闭环控制是通 过压电陶瓷驱动器内部的传感器对迟滞系统输出进 行实时测量,再对输入进行反馈,得到闭环控制的效 果。而复合控制把基于迟滞逆模型的开环控制和基 于反馈的闭环控制结合起来,构成复合的控制系统, 从而可以对迟滞非线性系统进行更精确的控制。在 微扫描成像、光轴稳定等实际应用中,由于受体积和 重量等因素的限制,往往采用开环控制的方式。此时 需要采用一些特殊的处理方式,来减小迟滞特性对 快速微摆反射镜控制的影响。

针对微扫描成像的应用,研究了基于压电陶瓷快 速微摆反射镜的光机稳像技术。文中将在简介光机稳 像原理的基础上,介绍基于压电陶瓷的快速微摆反射 镜及其模块,以及基于 PI 迟滞逆模型的开环控制方法。

1 基于压电陶瓷的快速微摆镜及其控制

1.1 基于快速微摆反射镜的光机稳像工作原理 基于快速微摆反射镜的光机稳像原理如图1 所示,当摄像机平台抖动时入射光线也发生抖动, 从而使位于摄像机焦平面的图像变得模糊。为了获 得清晰的图像,可通过反方向补偿光线抖动的微角 度,从而稳定焦平面上的成像。具体的过程是:系 统微加速度计高速获取平台的抖动信息,提供给上 位机模块从而确定抖动位移量,并根据相应的滤波 器,获得快速微摆反射镜的摆动量,传送给快摆镜 控制器,转化成相应的控制电压,驱动快速微摆反 射镜摆动,补偿光线的抖动,保证摄像机获取稳定 清晰的图像。





基于压电陶瓷的快摆镜及其控制系统是稳像 系统的执行器,要使快摆镜能够有效地补偿光束抖 动的微角度,必须要有一套良好的控制系统。

1.2 快速微摆反射镜实验系统

基于压电陶瓷的快速微摆反射镜采用德国 PI 公司 S-330.20L 快速微摆反射镜,其内部无 SGS (Strain Gain Sensor),属于开环控制。S-330.20L 快 速微摆反射镜是由对称的四个压电陶瓷驱动器构 成,由三路电压控制信号控制反射镜在两个维度上 偏转:其中一路控制信号为固定的 100 V,另外两路 信号的输入在 0~100 V 之间;当其中两路信号均为 50 V 的时候,反射镜不发生偏转,处于平衡状态;当 其中一路信号为 50 V 时,另外一路的控制信号大于 50 V(或小于 50 V)时,反射镜会沿着 x 轴或 y 轴向一 个方向(或相反方向)偏转;当两路控制信号均不为 50 V 时,反射镜就会在两个维度上进行偏转;即通 过控制两路信号电压就可以实现反射镜在两个维度 上的偏转。 根据快速微摆反射镜的工作原理,笔者制作 了反射镜的控制器模块和功放模块(见图 2)。快摆 镜控制器主要包括 MSP430F169 微控制器,16 位 的 AD5754R 数模转换芯片,通信芯片 MAX3221E 以及电压转换芯片 TPS76050 和 TPS76033。微控 制器通过 MAX3221E 芯片接收上位机发送的快 摆镜偏摆量信号,再将数字信号发送给 AD5754R 数模转换芯片。其中,TPS76050 芯片将输入的+12 V 电压转化为+5 V,供给数模转换器。TPS76033 芯 片将+5 V 电压转化为+3.3 V,供给微控制器和通 信芯片。功放模块包括 PI 公司 E-841.55 模块和 3 个 E-831.05 模块,E-841.55 是电源模块,输 出-37 V 和+137 V 电压,供给 E-831.05 模块;E-831.05 是10 倍功率放大器,对模拟信号进行 10 倍 放大。





2 PI 模型及其逆模型的实现

基于压电陶瓷的快速微摆反射镜平台存在迟滞 特性,影响对快速微摆反射镜的控制,因此需要建立 迟滞特性模型,并基于迟滞逆模型对快速微摆反射 镜进行开环控制。为此,笔者搭建了如图3所示的实 验系统,主要包括:上位机模块、快摆镜控制器模块、 功放模块、快速微摆反射镜平台、两个开关电源模块 以及光电自准直仪模块。



图 3 实验系统图 Fig.3 Experiment system diagram

2.1 压电陶瓷的迟滞特性建模

压电陶瓷驱动器迟滞特性主要有两种建模方法:一种是根据迟滞特性的物理本质建模,称为物 理模型;另一种是根据迟滞曲线建模,称为现象模型。目前,主流方法是采用现象模型,其建模过程 简单,通用性强。广泛应用的现象模型有:Preisach 模型、PI模型、Krasnosel'skii-Pokrovkii 模型以及 对上述模型改进等^[7],其中 PI模型是可逆的,可直 接求出逆模型,而其他的模型不能直接求得逆模 型,建模过程相对复杂。因此,文中选择建立 PI 迟 滞模型。

2.2 PI 模型及其逆模型

PI 模型可由 play 算子表示, play 算子是 PI 模型的一个迟滞算子, 表示为:

 $y(t_i)=H_r[x](t_i)=\max(x-r,\min(x+r,y(t_{i-1})))$ (1) 式中:r为play 算子的固定阈值; $x(t_i)为 t_i$ 时刻的输 入信号值; $y(t_i)为 t_i$ 时刻的输出信号值; $y(t_{i-1})为 t_{i-1}$ 时刻 play 算子的输出值。其中, $t \in [t_0,t_m]$,且 $t_0 \le t_1 \le$ … $\le t_m$ 。x(t)在 $[t_0,t_m]$ 是分段单调输入信号。

play 算子的输出 y(t)和输入x(t)的关系如图 4



图 4 play 算子示意图 Fig.4 play operator diagram

 $y(t_0) = H_r[x](t_0) = \max(x - r, \min(x + r, y_0))$ (2) 式中: t_0 为系统的初始状态。

基于 PI 模型的迟滞模型是由多个 play 算子线性加权叠加构成,可表示为:

$$y(t_i) = \sum_{k=0}^{n-1} w_k H_{r_k}[x](t_i) = w^{\mathrm{T}} H_r[x](t_i)$$
(3)

式中: $w = [w_0, w_1, \dots, w_{n-1}]^T$ 为由 n 个 play 算子权重系 数构成的列向量; $H_r[x](t_i) = [H_{rn}[x](t_i), H_{r1}[x](t_i), \dots,$ $H_{rn-1}[x](t_i)]^T$ 是由 n 个 play 算子输出构成的列向量; r_k 为 play 算子阈值, 且 $0 = r_0 < r_1 < \dots < r_{r+1} < \dots < r_{n-1} < + \infty$ 。系 统的初始状态列向量 y_0 表示为 $[y_{00}, y_{01}, \dots, y_{0n-1}]^T$ 。

PI 模型的迟滞特性可由初始载入曲线¹⁸所描述, 所谓的初始载入曲线是指在系统的初始状态为零的 情况下,在单调递增的输入信号驱动下系统的输出 曲线,如图 5 所示。初始载入曲线可由一个分段的线



图 5 初始载入曲线 Fig.5 Initial loading curve

性函数表示:

$$\varphi(r) = \sum_{k=0}^{i} w_k(r - r_k) \tag{4}$$

式中: $r_k \leq r \leq r_{k+1}$; $i=0,1,\cdots,n-1_{\circ}$

其导数可表示为:

$$\frac{\mathrm{d}\varphi(r)}{\mathrm{d}r} = \sum_{k=0}^{i} w_k \tag{5}$$

当初始载入曲线的导数满足如下约束条件:

$$\vec{x} \oplus : M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & -1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -1 & -1 & \cdots & -1 \end{bmatrix}; w = \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \cdots \\ w_{n-1} \end{bmatrix}; \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon \\ \cdots \\ \varepsilon \end{bmatrix}, \varepsilon \not \equiv \psi$$

常小的正数。

则初始载入曲线是严格单调的,其逆函数 \u03c6⁻¹(r) 存在且唯一。\u03c6⁻¹(r)是分段线性函数且严格单调,可 作为迟滞模型的初始载入曲线:

$$\varphi'(r') = \sum_{k=0}^{r} w'_{k}(r' - r'_{k})$$
(7)

式中: $r'_k \leq r' \leq r'_{k+1}$; *i*=0,1,…,*n*−1_°

其导数可表示为:

$$\frac{\mathrm{d}\varphi'(r')}{\mathrm{d}r'} = \sum_{k=0}^{l} w'_{k} \tag{8}$$

φ(r)函数完全描述了 PI 模型的迟滞特性,其逆 函数 φ'(r')则描述了 PI 逆模型的迟滞特性。因此,PI 逆模型可表示为:

$$x(t_i) = y^{-1}(t_i) = \sum_{k=0}^{n-1} w'_k H_{r'_i}[y](t_i) = w'^{\mathrm{T}} H_{r'}[y](t_i)$$
(9)

求取参数 r'_{k} , w'_{k} (k=0,1,…,n-1)的具体表达式为^[8]:

$$r'_{i} = \sum_{k=0}^{i} w_{k}(r_{i} - r_{k})$$
(10)

$$w'_{0} = \frac{1}{w_{0}}, w'_{i} = -\frac{w_{i}}{(w_{0} + \sum_{k=1}^{i} w_{k})(w_{0} + \sum_{k=1}^{i-1} w_{k})}$$
(11)

于是,根据PI模型可直接求出PI逆模型。

2.3 PI 模型参数辨识

由于快速反射镜可在两个维度上偏转,所以需 要建立快速反射镜迟滞特性的二维数学模型。又快 速反射镜的理论偏转角度在±412.5"内,故可把快速 反射镜的偏转看作小角度的偏转。根据参考文献[9], 在小角度范围内,反射镜在两个维度上的偏转可看 作是近似独立的,因此可对快速反射镜在两个维度 上分别建立迟滞特性数学模型。在两个维度上建立 迟滞特性数学模型的方法是相同的,这里只给出依 据快速微摆反射镜绕 x 轴偏转建立的 PI 迟滞特性 数学模型及其实验结果。

对快速微摆反射镜进行静态控制测试,每次输入一个电压信号驱动反射镜偏转一个角度,由光电 自准直仪测量在该输入电压信号下反射镜偏转的角 度,由此得到大量的输入电压信号-偏转角度的数 据。在输入三角波电压信号情况下,得到的实验结果 如图6所示。



Fig.6 Triangle voltage signal and hysteresis curve

根据输入电压信号-偏转角度实验数据,采用最 小二乘法辨识 PI 模型参数的过程为:假设得到的实 验数据为 S={(u_i,α_i),i=0,1,…,m-1},其中,u_i为输入 电压信号,α_i为反射镜偏转的角度,m为测量的数据 数量。首先对输入电压和反射镜偏转角度进行归一 化处理,使它们的取值处于[0,1]范围内,便于对参数求 解。输入电压信号 u_i根据 PI 模型计算得到角度值:

$$\alpha(t_i) = \sum_{k=0}^{n-1} w_k H_{r_k}[u](t_i) = w^{\mathrm{T}} H_r[u](t_i)$$
(12)

根据最小二乘法,得到误差函数:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m-1} (\alpha(t_i) - \alpha_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{m-1} (w^{\mathrm{T}} H_r[u](t_i) - \alpha_i)^2$$
(13)

s.t. $Mw - \varepsilon \leq 0$

参数 w 具体的求解步骤如下:

(1) 首先根据公式(14)确定 play 算子的固定阈 值 *r*_k。

$$r_k = \frac{k}{n} \cdot |u_{\max}|, k = 0, 1, \cdots, n-1$$
 (14)

计算得到 r_k 的值为:0, 0.1, 0.2, …, 0.9。

(2) 公式(13)进行矩阵化,公式(13)中 $H_r[u](t_i)$ 不仅与当前时刻输入电压有关,还与前一时刻 play 算子 $H_r[u](t_{i-1})$ 的输出有关。在给定实验数据的情况 下,先计算出所有的 $H_r[u](t_i), i=0,1,\dots,m-1$ 。把所 有 $H_r[u](t_i)$ 构成为一个 $m \times n$ 的矩阵 $H = [H_r^{\mathsf{T}}[u](t_0) H_r^{\mathsf{T}}[u](t_1) \cdots H_r^{\mathsf{T}}[u](t_{m-1})]^{\mathsf{T}}$ 。

(3) 令 α=[α₀ α₁ ··· α_{m-1}]^T, 为 m×1 大小的列向
 量。要求解的问题转变为:

$$\begin{cases} E(x) = \frac{1}{2} ||Hw - \alpha||_{2}^{2} = \frac{1}{2} (Hw - \alpha)^{\mathsf{T}} (Hw - \alpha) \\ \text{s.t. } Mw - \varepsilon \leq 0 \end{cases}$$
(15)

(4)通过前面三个步骤,把求解 PI 模型参数的 问题转变为带有约束条件的最小二乘问题,利用 Matlab 中的优化函数即可求得参数。

通过以上四个步骤,求得 PI 模型参数 w 为: w=[0.7200 0.2120 0.1043 0.0766 0.0973

 $-0.3753 0.1333 0.0556 0.039v5 0.0178]^{T}$

求得 PI 模型参数 w 后,需要验证对应的 PI 模型是否能较好地拟合在其他输入电压信号下反射镜偏转角度。这里,使用常见的正弦波和三角波对得到的 PI 模型进行验证,并用均方根误差 e_{rms} 和最大误差 e_m来评价拟合的效果,计算公式为:

$$e_{\rm rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\alpha_{di} - \alpha_i)^2}}{\max_{i} (\alpha_{di}) - \min_{i} (\alpha_{di})} \times 100\%$$
(16)

$$e_{\rm m} = \frac{\max_{i} (\alpha_{di} - \alpha_{i})}{\max_{i} (\alpha_{di}) - \min_{i} (\alpha_{di})} \times 100\%$$
(17)

图 7 中,对于输入正弦波信号,PI 拟合的反射镜 偏转角度均方根误差为 0.49%,最大误差为 2.1%; 对于输入三角波信号,PI 模型拟合的反射镜偏转角 度均方根误差为 1.05%,最大误差为 3.8%。



300

200

100

-100

-200

-300 L

Deflection angle/(°)



20 40 60 80 100 120 Time/min

(b) 三角波信号(b) Triangle signal

图 7 输入正弦波和三角波信号时的偏转角度误差

Fig.7 Deflection angle error when input sine wave signal and triangle wave signal

一般地,play 算子数量 n 影响模型的精度,数量 越多,模型精度越高,但由于测量数据的误差,也可 能造成模型的误差加大,因此,需要综合平衡。所以, 文中采用 10 个 play 算子,通过实验结果看出,PI 模 型已达到较高的精度。

2.4 基于 PI 逆模型的开环控制

根据公式(10)和(11)可求出 PI 逆模型的参数 r' 和 w'的结果为:

 $r' = [0 \ 0.072 \ 0 \ 0.165 \ 2 \ 0.268 \ 8 \ 0.380 \ 1 \ 0.501 \ 1$ $0.584 \ 6 \ 0.681 \ 4 \ 0.783 \ 8 \ 0.890 \ 1]^{\mathrm{T}}$

w'=[1.3889 -0.3159 -0.1080 -0.0644 -0.0723

0.3715 -0.1694 -0.0561 -0.0363 -0.0155]^T因此, PI 逆模型表示为:

$$u(t_i) = \alpha^{-1}(t_i) = \sum_{k=0}^{n-1} w'_k H_{r'_k}[\alpha](t_i) = w'^{\mathsf{T}} H_{r'}[\alpha](t_i) \quad (18)$$

基于 PI 逆模型的开环控制方法是在迟滞系统 前串联一个迟滞逆系统,构成线性系统,原理如图 8 所示。图中 $\alpha_d(t)$ 为期望反射镜偏转的角度,u(t)为由 公式(18)表示的 PI 逆模型计算出来的电压值, $\alpha(t)$ 为反射镜实际的偏转角度。若 $\alpha(t)$ 越接近期望的偏 转角度 $\alpha_d(t)$,则说明控制精度越高。

实际应用中,通过输入期待偏转的角度值 $\alpha_d(t)$,



Fig.8 Open loop control method schematic diagram of fast steering mirror based on PI inverse model

由 PI 逆模型计算出控制电压 u(t),再经过数模变换 和放大输入到压电陶瓷驱动器,实现微反射镜的偏 转驱动。由于整体计算量小,可达到实时化处理。

为了证明基于 PI 逆模型开环控制的有效性,采 用基于 PSD 的微摆镜角度自准直测试系统进行了 扫描轨迹跟踪验证实验。实验系统如图 4 所示,实验 轨迹波形是正弦波和三角波,轨迹跟踪实验结果如 图 9 所示。实验表明:对于正弦波轨迹跟踪实验,均 方根误差为 1.23%,最大误差为 2.45%;对于三角波 轨迹跟踪实验,均方根误差为 1.3%,最大误差







tracking experiment

2.37%。证明基于 PI 逆模型的快速微摆反射镜的开 环控制是有效和可行的,能够减少迟滞特性对反射 镜控制的影响。

3 结 论

针对微扫描和光机稳像等对快摆镜的应用需要,笔者研制了一种基于压电陶瓷的快速微摆反 射镜,但由于采用开环控制,压电陶瓷的迟滞特性 影响微摆镜的控制精度。为此,研究了基于 PI 逆 模型的快速微摆反射镜开环控制的方法,通过最 小二乘法建立的 PI 模型有效地拟合了实验数据, 基于 PI 逆模型的开环控制方法能够有效地实现 对快速微摆反射镜的控制,对正弦波和三角波轨 迹跟踪的均方根误差分别为 1.23%和 1.3%,最大 误差分别为 2.45%和 2.5%。同时,基于 PI 逆模型 的开环控制方法的计算速度也达到实时性,满足 应用需要。

文中方法除可用于微扫描和光机稳像外,也可 以用于相类似的微角度摆动控制问题,具有普遍的 应用价值。

参考文献:

- Li Haoyang, Liu Zhaojun, Xu Pengmei. An overview on image stabilization method of space –born remote sensing systems [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(6): 52–57. (in Chinese)
- [2] Xu Guangzhou, Ruan Ping, Li Fu, et al. Design and simulation of tilt mirror for space image stabilized system
 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (4): 958–965. (in Chinese)
- [3] Yang Bintang, Zhao Yin, Peng Zhike, et al. Real-time compensation control of hysteresis based on prandtl – ishlinskii operator for GMA [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 124–130. (in Chinese)
- [4] Wu Yiling, Liu Tingxia, Zhang Zhendong, et al. Research on compound control arithmetic of piezoeletric ceramic based on PI model[J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 2015, 37(6): 950–954. (in Chinese)
- [5] Zhao Yanbin, Xu Yufei, Liao He, et al. On fast and accurate control for piezo –based steering mirror [J]. Aerospace Control and Application, 2014, 40(2): 31–36.
- [6] Zhang Guilin, Zhang Chengjin, Li Kang. Adaptive identification and inverse control of piezoeletric actuators based on PI hysteresis model [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(1): 85–89. (in Chinese)
- [7] Vahid Hassani, Tegoeh Tjahjowidodo, Thanh Nho Do. A survey on hysteresis modeling, identification and control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 49 (1): 209–233.
- [8] Kuhnen K, Janocha H. Inverse feedforward controller for complex hysteresis nonlinearities in smart –material systems
 [J]. *Control and Intelligent Systems*, 2001, 29(3): 74–84.
- [9] Huang Yinguo, Lin Yuchi, Wang Wei, et al. Research on the model of photoelectric auto –collimating system based on vector operation[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(10): 1086– 1090. (in Chinese)