



基于 dSPACE 的压电定位器迟滞非线性 实验平台设计

张桂林, 刘浩天, 商丰盈, 张 婧*

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 青岛 266590)

摘要: 为加强学生对非线性问题的认识与理解, 设计了一套基于 dSPACE 的压电陶瓷纳米定位器迟滞非线性半实物仿真实验平台。首先, 详细介绍了实验平台的组成; 其次, 基于实验平台采集压电定位器的迟滞非线性数据, 并应用一般最小二乘法辨识得到 Prandtl-Ishlinskii 模型, 进而应用解析法得到 PI 逆模型; 最后, 在前馈通路上串联压电定位器的 PI 逆模型以补偿其迟滞非线性特性, 从而将非线性系统转为伪线性系统。学生在实验过程中不仅可以加深对非线性特性以及逆系统法的理解, 还可以通过参数辨识法以及逆补偿法切实解决一类智能材料的迟滞非线性问题, 提高学生将理论知识与工程实践相结合的能力, 培养自动化专业学生解决复杂工程问题的能力。

关键词: dSPACE; 压电定位器; 最小二乘法; Prandtl-Ishlinskii 模型

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220482

Design of Hysteretic Nonlinear Experimental Platform for Piezo-positioner Based on dSPACE

ZHANG Guilin, LIU Haotian, SHANG Fengying, ZHANG Jing*

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to strengthen students' understanding of nonlinear problems, a set of hysteresis nonlinear hardware-in-the-loop simulation platform for piezoelectric ceramic nanopositioners based on dSPACE is designed. Firstly, the composition of the experimental platform is introduced in detail. Secondly, the hysteresis nonlinear data of the piezo-positioner is collected based on the experimental platform, the PI (Prandtl-Ishlinskii) model is obtained by the general least squares identification method, and the PI inverse model is obtained by the analytical method. Finally, the PI inverse model is added to the feedforward path to offset the hysteresis nonlinearity, thereby transforming the nonlinear system into a pseudo-linear system. During the experiment, students can not only deepen their understanding of the nonlinear characteristics and inverse system method, but also effectively solve the hysteretic nonlinear problem of a kind of intelligent materials through the parameter identification method and inverse compensation method, improve students' ability to combine theoretical knowledge with engineering practice, and cultivate automation students' ability to solve complex engineering problems.

Key words: dSPACE; piezo-positioner; least square method; Prandtl-Ishlinskii model

近年来, 非线性系统的分析与设计问题成为控制领域的研究重点, 而目前自动化专业在非线性系统的分析理论教学中, 仍以相平面法和描述函数法为主, 这两种方法都是图解近似法, 且要

求学生在控制器设计时需要具体系统的运动性质有一定的了解^[1]; 而在自动控制原理的实验教学中, 配套的实验多以 TD-ACC 系列模拟实验箱或以单片机、DSP 为核心的纯实物实验平台为主,

收稿日期: 2022-08-03; 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家新工科研究与实践项目 (E-GXHPY20200418); 山东省本科教学改革研究项目 (P2020001, Z2020021); 山东科技大学青年教师教学拔尖人才培养计划 (BJRC20190504); 山东科技大学教育教学研究“群星计划”项目 (QX2020Z11)。

作者简介: 张桂林 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事控制理论与控制应用方面的研究。

* **通信作者:** 张婧 (1982-), 女, 博士, 副教授, 主要从事控制理论与控制应用方面的研究。E-mail: zjing133@sdust.edu.cn

其中模拟实验箱主要通过运放、电阻、电容等构成的模拟电路来仿真实际的系统^[2]，其内部可改变的元件比较少，且难以测得精确的非线性环节模型，学生使用这类实验箱往往只通过连接几根导线进行规定的几种实验，与实际工程应用有一定的差距^[3]；而以单片机或者 DSP 为核心的实验平台进行相关实验时对学生的编程能力要求比较高，在实验过程中需要编写大量的程序，增加了学生的学习难度^[4]，而且代码比较抽象，与控制框图之间差距比较大，学生难以通过实验对非线性系统有比较直观的理解和认识。

逆系统方法是根据对象精确模型计算出逆模型，再将其与原对象串联，以前馈逆补偿的方法构成具有线性传递关系的伪线性系统，而不依赖于非线性系统的求解或稳定性分析，因此具有普遍的研究意义。常见的非线性特性包括迟滞、饱和等，本文以压电定位器具有的迟滞非线性特性为例，以前馈逆补偿方法将非线性系统补偿为伪线性系统。压电定位器具有定位精度高、响应速度快、驱动力大、体积小等优点被广泛应用于高精制造加工、精密定位与跟踪、医疗器械等领域^[5]。但是压电材料本身固有的迟滞非线性严重影响了压电定位器的定位精度，甚至可能导致闭环控制系统失稳，这种复杂的非线性难以用传统的非线性系统分析方法进行处理。因此旨在实验基础上利用 PI(Prandtl-Ishlinskii)模型来描述迟滞非线性，利用一般最小二乘法辨识 PI 模型参数再采用数学解析法求得 PI 逆模型，最后通过开环前馈逆补偿的方法来抵消压电定位器的迟滞非线性。本文设计了一套基于 dSPACE 的压电陶瓷纳米定位器迟滞非线性半实物仿真实验平台，由于 dSPACE 强大的可拓展性且可以与 MATLAB/Simulink 进行无缝连接的突出优势，学生在实验过程中不需要接触额外的编程语言^[6]，仅在 MATLAB/Simulink 中进行简单配置即可实现对象的模型参数辨识及控制算法设计。同时由于这一实验平台实现了半实物仿真，即被控对象是真实存在的，缩小了实验装置与实物的距离，增加了实验的可信度。

利用基于 dSPACE 的压电定位器迟滞非线性实验平台，可以开展建立控制系统数学模型与非线性系统分析的逆系统方法的实验教学。学生在进行压电定位器迟滞补偿的实验中，不仅能加深对非线性特性以及非线性系统逆系统法的理解，

锻炼采用最小二乘参数辨识法建立控制系统数学模型的能力，还能将理论应用于工程实践，切实解决一类智能材料的迟滞非线性问题。在逆补偿的基础上，还可以进一步开展自动控制原理课程中关于超前滞后控制设计、PID 控制等经典控制方法的实验教学，锻炼学生处理实际问题的能力，提高学生理论与实践相结合的能力。

1 实验平台设计及工作过程

dSPACE 实时仿真平台拥有高性能的处理器单元，以及丰富的 I/O 口，具备强大的扩展性，可以方便地连接不同的实验对象，构成半实物仿真平台来快速验证算法的可行性^[7]。

1.1 硬件系统设计

本文以 Physik Instrumente 公司的 P-733.2XY 压电陶瓷纳米定位器为实验对象，构建基于 dSPACE 的半实物仿真实验平台。实验平台由压电陶瓷纳米定位器、上位机、dSPACE 及转接板装置、电压放大器、信号监视器 5 个部分组成，如图 1 所示，各硬件的参数如表 1 所示。

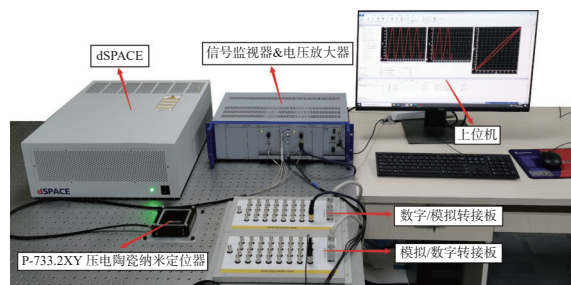


图 1 基于 dSPACE 的压电定位实验平台

表 1 实验平台的各硬件参数

硬件名	硬件参数
压电陶瓷纳米定位器	输入电压范围为-20~100 V，输出位移最大为115 μm，内置高分辨率电容传感器
上位机	高性能计算机，并装有MATLAB 2018b及ControlDesk
dSPACE及转接板装置	DS2103中的MUX_DAC模块将Simulink输入的±1转化成±10 V的电压输出信号，DS2002中的MUX_ADC模块将输入的±10 V的电压信号转换成±1的Simulink输出
电压放大器	输入电压范围为-2~120 V 输出电压范围为-30~130 V
信号监视器	将压电定位器产生的位移信号转换成0~10 V电压信号

1.2 软件系统设计

dSPACE 实时仿真平台拥有强大的 RTI 库

(RTI1007)和实验调试软件 ControlDesk, 其中 RTI 将不同单元的 I/O 口配置成简单的模块, 并且与 MATLAB/Simulink 进行完美衔接, 用户可以像使用 Simulink 中的模块一样使用 RTI 库中的模块来设置相应的 I/O 口, 从而实现对应单元的功能, 同时配合 MATLAB 的 RTW 将 Simulink 中搭建的系统模型自动生成代码并下载到 dSPACE 中, 在 ControlDesk 中可以实时监测实验数据、实时在线调试参数等, 算法中的参数也可以在 ControlDesk 中实时在线调试, 从而快速验证算法的可行性。

1.3 工作过程

dSPACE 与实验对象通过 DB50 线以及 BNC 线进行连接, 实验平台的工作过程如图 2 所示。

学生只需要在 MATLAB/Simulink 中搭建出简单的实验框图, 通过 Build Model 键自动编译成相应的 C 代码。期望信号由上位机发出后, 通过 DS2103 采集卡的 14 位 DAC 产生 0~10 V 的控制电压, 再经 E505 电压放大器放大 10 倍后施加到压电定位器, 内置高分辨率的电容传感器检测其产生的位移信号, 由 E509 信号监视器转换为 0~10 V 的电压信号, 经过 DS2002 采集卡的 16 位 ADC 转换为 0 和 1 的数字信号被传输至 dSPACE 中进行数据处理。在 ControlDesk 软件中导入编译好的.sdf 文件即可实时在线监视实验平台的输入输出数据, 且可将输入输出数据直接保存为.mat 格式, 方便学生在 MATLAB 中处理实验数据。

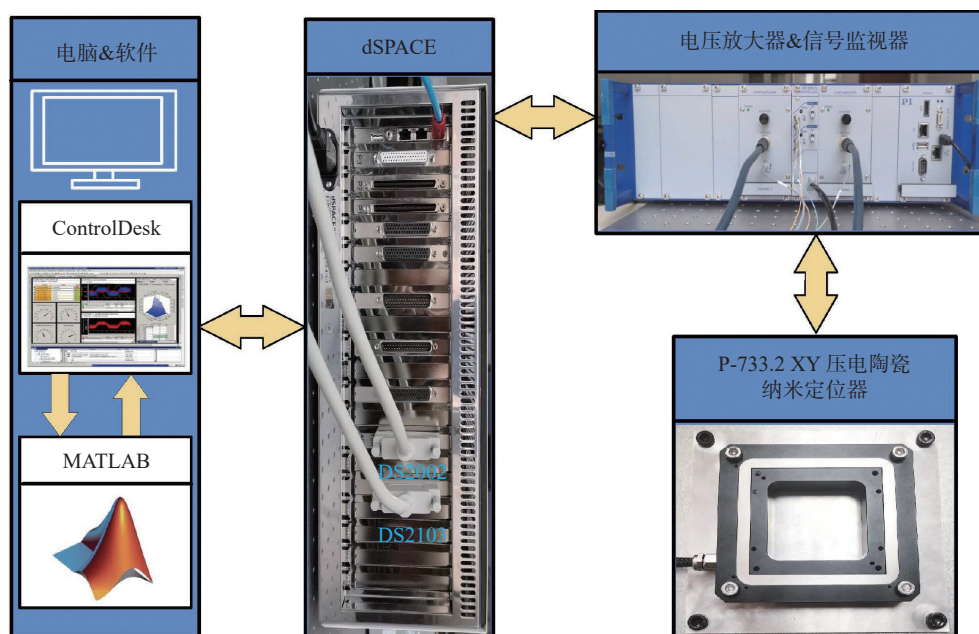


图2 实验平台的工作过程框图

2 迟滞非线性数学模型的建立

2.1 结果分析

根据图 2 与表 1, 在 Simulink 中搭建数据采集的实验如图 3 所示。其中输入信号可以根据需求在 MATLAB/Simulink 中设置, 因为正弦信号是最简单的信号单元, 且易产生, 所以本实验将正弦信号作为压电定位器的输入信号。由于压电定位器的输入电压为 -20~100 V, 而内置的电容传感器采集到的输出位移信号经 E509 信号监视器转换为对应的 0~10 V 电压, 所以需要对其进行归一化处理, 输出端同理。实验中设置正弦信号 $r(t) = 1.5 \sin(2\pi t) + 1.5$, 采样频率为 10 kHz, 根据表 1 以

及图 3 进行归一化后, 压电定位器的实际输入电压信号 $u(k) = 15 \sin(2\pi k) + 15$, 红框内的部分代表用 BNC 线和 DB50 线连接的 dSPACE 半实物仿真平台、E505 信号放大器、压电定位器以及 E509 信号监视器组成的真实系统。

利用图 3 所示的实验框图采集到的压电定位器迟滞非线性实验数据如图 4 所示。

从图 4(b)中可以看出压电定位器的输入电压与输出位移之间存在迟滞非线性, 这种复杂的非线性不光具有多值映射性, 还具有记忆特性^[8], 严重影响了压电定位器的定位精度, 本实验利用参数辨识的方法对这种迟滞非线性进行建模, 并通过求解逆模型来消除这种迟滞非线性^[9]。

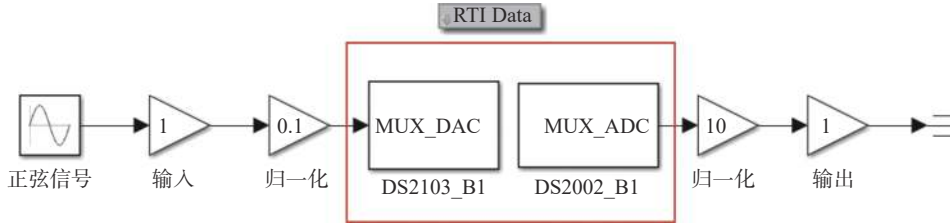


图 3 开环数据采集实验框图

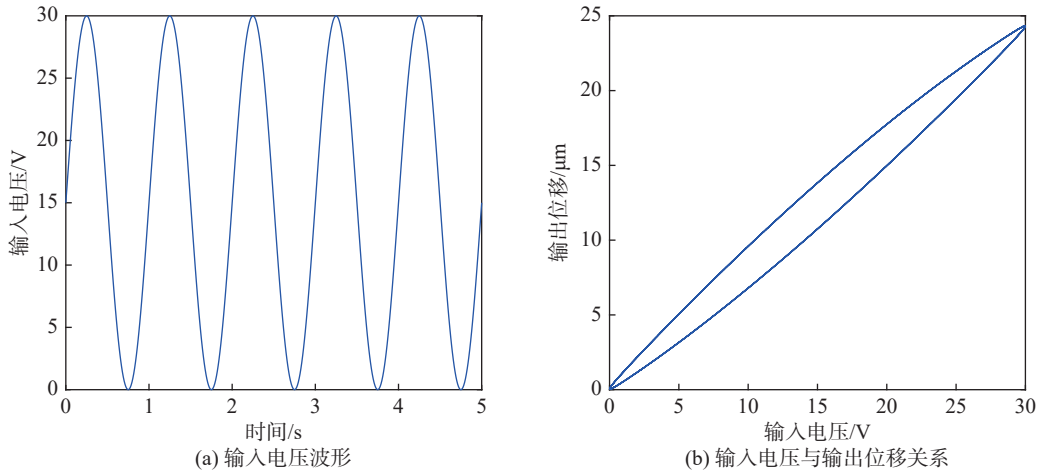


图 4 压电定位器迟滞非线性

2.2 迟滞非线性 PI 模型

本文采用 PI 模型来描述迟滞非线性，它只是根据实际的迟滞现象进行建模而不需要考虑实际系统的物理特性^[10]，且可以求得解析逆模型，容易被学生理解。

PI 模型是由一系列阈值不同、权重不同的基本 play 算子或者 stop 算子线性加权叠加而成^[11]，其递推表达式为：

$$\begin{cases} y(t) = \max\{u(t) - r, \min\{u(t) + r, y(t_i)\}\} \\ y(0) = \max\{u(0) - r, \min\{u(0) + r, y(0)\}\} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $u(t)$ 是单调区间 $t_0 \leq t_1 \dots \leq t_N$ 上的分段单调输入信号， r 为 play 算子的阈值， $y(0)$ 是 play 算子的初始输入。

将多个不同阈值和权重的 play 算子线性加权叠加即可以得到 PI 模型^[12]，其递推表达式为：

$$P(k) = W^T Y(k) = \sum_{i=1}^n \omega_i \{\max\{u(k) - r_i, \min\{u(k) + r_i, y_i(k-1)\}\}\} \quad (2)$$

式中： n 为 play 算子数量，权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ ， $Y(k)$ 是 k 时刻 n 个 play 算子输出组成的向量， $y[0] = (y_1[0], y_2[0], \dots, y_n[0])$ 为 k 时刻每个 play 算子的初始值， r_i 为 k 时刻每个 play 算子的阈值。

由上述分析可以看出，阈值 r 和权重系数 ω 是

PI 模型的两个关键参数，阈值 r 可选择如下：

$$r_i = \frac{i}{n}(u_{\max} - u_{\min}), i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

式中： n 为阈值个数， u_{\max} 和 u_{\min} 分别为输入电压的最大值和最小值，在实际阈值选择时，为了降低计算复杂度，阈值选择采用前密后疏的原则^[13]。阈值的选取以及权值的辨识结果如表 2 所示。

表 2 PI 模型参数

i	r	ω	i	r	ω
1	0.0	0.3970	9	5.0	0.0540
2	0.5	0.2839	10	7.0	0.0322
3	1.0	-0.0606	11	9.0	0.0744
4	1.5	0.0453	12	13.0	0.1161
5	2.0	0.0091	13	17.0	0.0404
6	2.5	0.0188	14	21.0	0.0280
7	3.0	0.0100	15	25.0	0.0155
8	3.5	0.0296	16	29.0	0.0031

利用 ControlDesk 采集压电定位器的输入输出数据，通过一般最小二乘法进行权重系数的辨识，辨识流程如图 5 所示。

根据一般最小二乘法参数辨识原理，性能函数为：

$$J = \sum_{k=1}^N e^2(k) = \sum_{k=1}^N \left\{ [y(k) - W^T Y(k)]^2 \right\} \quad (4)$$

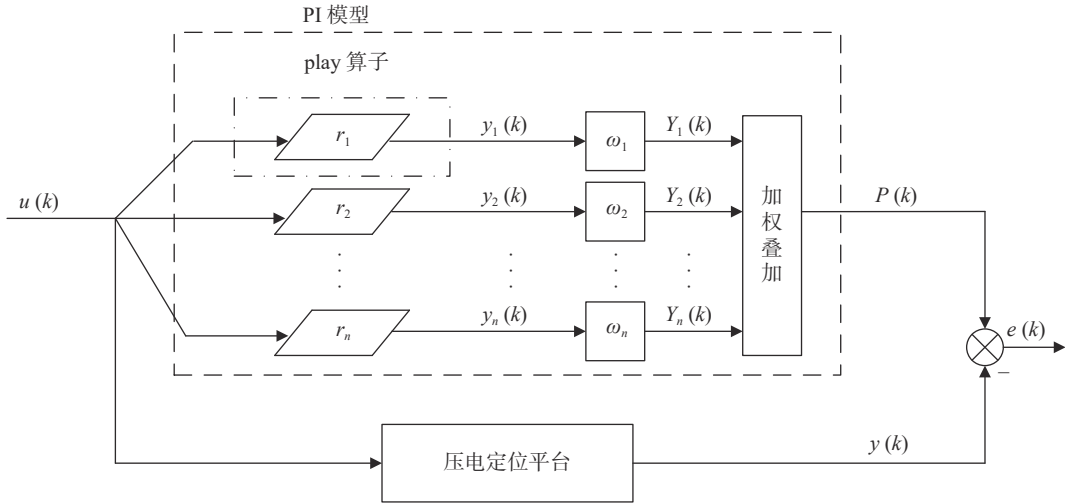


图 5 压电定位器迟滞非线性

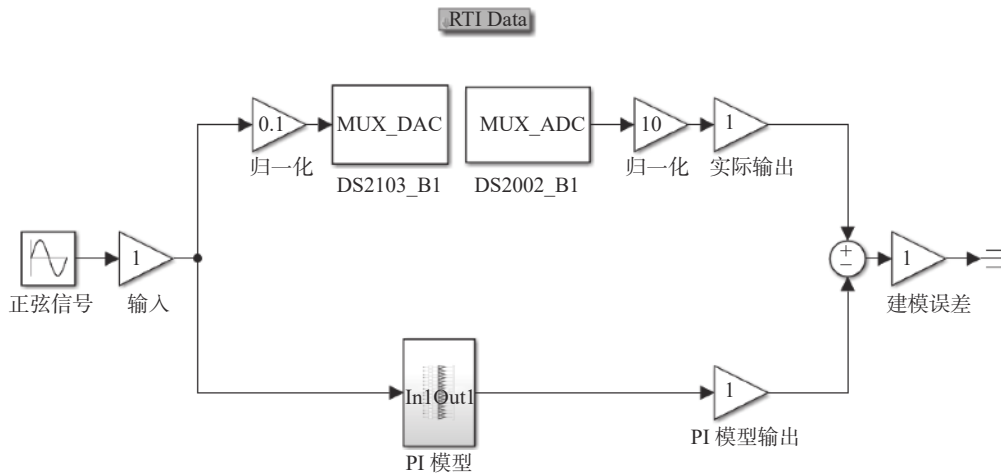


图 6 模型验证实验框图

寻找合适的权重系数使得 k 时刻时, PI 模型的输出 $P(k)$ 与实际压电定位器输出 $y(k)$ 之差的平方最小, 即:

$$J(W) = (y - P)(y - P)^T = (y - W^T Y)(y^T - Y^T W) = yy^T - yY^T W - W^T Yy^T + W^T Y Y^T W \quad (5)$$

当性能函数达到最小时, 满足:

$$\frac{\partial J}{\partial W} = -2Yy^T + 2YY^T W = 0 \quad (6)$$

从而可以求得权重向量为:

$$W = (YY^T)^{-1} Yy^T \quad (7)$$

通过在 MATLAB 中输入 $\omega = \text{pinv}(H * H') * H * y'$ 实现上述参数辨识, 其中 $H = (Y_1(k), Y_2(k), \dots, Y_n(k))$, y' 为采集到的压电定位器输出数据, H' 、 y' 分别对应式(7)中 Y^T 、 y^T 。

根据辨识得到的阈值和权重系数在 Simulink

中利用 Backlash 模块和 Gain 模块构建 PI 迟滞模型, 通过图 6 所示的实验框图来校验 PI 模型与压电定位器迟滞非线性曲线的拟合度, 校验结果如图 7 所示。

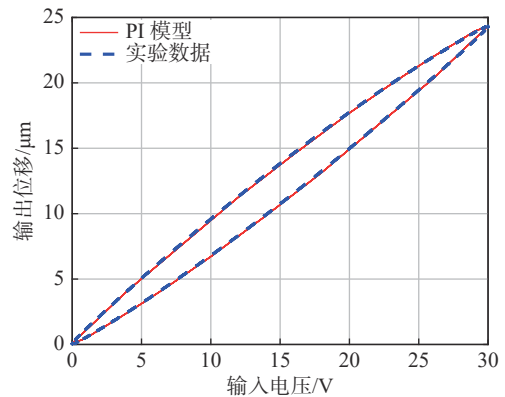


图 7 校验结果

从图 7 可以看出,采用上述一般最小二乘法辨识得到的 PI 模型可以较好地描述实际的迟滞非线性特性。

2.3 迟滞非线性 PI 逆模型

PI 逆模型的结构跟 PI 模型一样,只是阈值和权重系数不同,可以通过数学推导方式直接求得 PI 逆模型的阈值和权重系数^[14],PI 逆模型的离散递推表达式如下:

$$u_m(k) = \sum_{i=1}^n \omega_{ni} \{ \max \{ y(k) - r_{ni}, \min \{ y(k) + r_{ni}, u(k-1) \} \} \} \quad (8)$$

式中: $u_m(k)$ 是 PI 逆模型输出电压,也是 PI 模型的输入电压; $y(k)$ 是 PI 模型中 play 算子的期望输出位移; r_{ni} 是 PI 逆模型的阈值; ω_{ni} 是 PI 逆模型的权重。具体计算公式如下:

$$\omega_{n1} = \frac{1}{\omega_1} \quad (9)$$

$$\omega_{ni} = \frac{-\omega_i}{\left(\omega_1 + \sum_{j=2}^i \omega_j \right) \left(\omega_1 + \sum_{j=2}^{i-1} \omega_j \right)}, i = 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

$$r_{ni} = \sum_{j=1}^i \omega_j (r_i - r_j), i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$u_{mi}(0) = \sum_{j=1}^{i-1} \omega_j y_j(0) + \sum_{j=1}^n \omega_j y_j(0), i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

经过上述推导求得 PI 逆模型的阈值和权重系数如表 3 所示。

表 3 PI 逆模型参数

i	r_{ni}	ω_{ni}	i	r_{ni}	ω_{ni}
1	0	2.5187	9	3.318	-0.0935
2	0.199	-1.0502	10	4.892	-0.0499
3	0.539	0.1433	11	6.531	-0.1016
4	0.849	-0.1096	12	10.106	-0.1286
5	1.182	-0.0203	13	14.146	-0.0381
6	1.519	-0.0402	14	18.347	-0.0247
7	1.866	-0.0205	15	22.660	-0.0132
8	2.218	-0.0574	16	27.035	-0.0026

3 开环前馈逆补偿控制

为了抵消迟滞非线性的影响,将求得的 PI 逆模型串联到压电定位器的前向通路上^[15],即前馈逆补偿迟滞非线性的原理如图 8 所示。 $P(k)$ 为

k 时刻压电定位器实际的输出位移; $P_m(k)$ 为 k 时刻压电定位器的期望输出位移; $u_m(k)$ 为 k 时刻 PI 逆模型输出的电压。

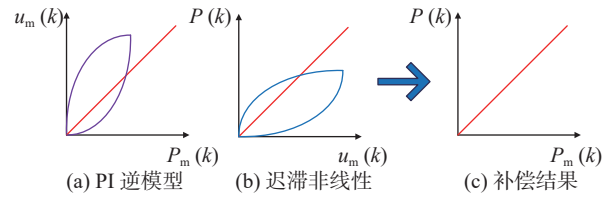


图 8 前馈逆补偿迟滞非线性原理图

由于压电定位器的输出位移与输入电压之间存在迟滞非线性定义为:

$$P(k) = H(u_m(k)) \quad (13)$$

PI 逆模型根据期望的位移得到对应的电压为:

$$u_m(k) = H^{-1}(P_m(k)) \quad (14)$$

将 PI 逆模型串联在压电定位器的前向通路上来抵消迟滞非线性,联立式(13)和(14)得:

$$P(k) = H(H^{-1}(P_m(k))) = aP_m(k) \quad (15)$$

式中: a 为前馈逆补偿后的一个比例系数。

根据上述原理,搭建的前馈逆补偿控制的实验框图如图 9 所示,其中输入为图 4(a)所示的正弦信号。

在 ControlDesk 中保存输入输出数据,在 MATLAB 中进行数据处理得到开环前馈逆补偿控制的实验结果如图 10 所示。

期望输入与实际输出的相对误差为:

$$RE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_s(i) - y_q(i))^2}{\sum_{i=1}^N (y_q(i))^2}} \quad (16)$$

式中: $y_s(i)$ 是实际的输出数据; $y_q(i)$ 是实际的输入数据; N 是实际输入数据的长度。

根据式(12)计算得无前馈逆补偿时,实际输出与期望输入的相对误差 $RE=0.1341$,在前馈通路上加入 PI 逆模型后,实际位移跟踪期望位移的相对误差 $RE=0.0095$ 。结合图 10 及图 7 也可以看出,在 PI 逆模型的作用下,压电定位器的迟滞非线性得到了较好的补偿。利用这种逆系统法使得原来的非线性系统变为一个伪线性系统,学生可在此基础上加入自动控制原理中学习的传统控制策略,如 PID 控制、超前滞后控制等设计符合控制系统性能要求的控制算法。

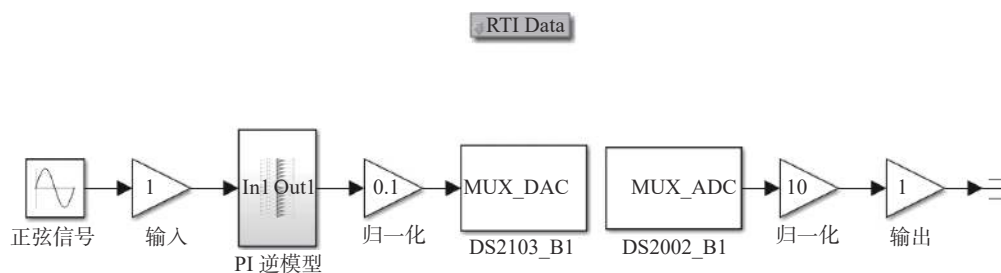


图9 前馈逆补偿实验框图

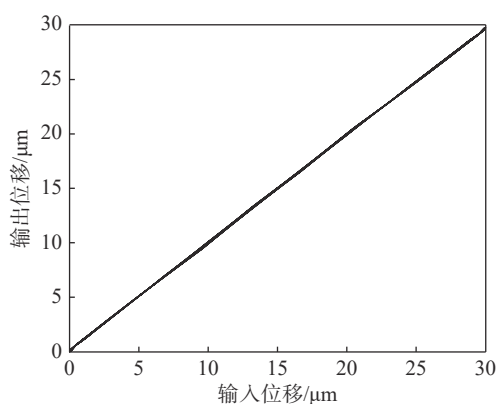


图10 前馈逆补偿控制实验结果

4 结束语

本文利用 dSPACE 及 Physik Instrumente 公司的 P-733.2XY 压电陶瓷纳米定位器设计了一套半实物仿真平台, 该平台可以有效地解决目前大多数高校中非线性系统控制理论学习以及配套实验存在的问题。在非线性系统控制理论学习方面, 利用 PI 迟滞模型来描述压电定位器的复杂迟滞非线性, 通过一般最小二乘法辨识得到 PI 模型的关键参数, 并解析求得 PI 逆模型, 在前馈通路上串联 PI 逆模型从而有效地抵消迟滞非线性。这种非线性系统处理方法可以有效地处理一类智能材料的迟滞非线性问题, 具有一定的普遍性。在配套的实验方面, 由于整套实验是基于 dSPACE 半实物仿真平台来设计搭建的, 既保证了实验的真实性又大大降低了算法实现的难度。

参考文献

[1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 6版. 北京: 科学出版社, 2013: 359-403.

- [2] 夏静萍, 王瑛. 自动控制原理综合实验设备研制及教学应用[J]. *实验技术与管理*, 2017, 34(9): 104-108.
- [3] 朱燕红, 史美萍, 谢海斌. dSPACE实验系统的开发与实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2015, 32(11): 125-127.
- [4] 许丽川, 叶小龙, 李逢春, 等. 基于dSPACE的三相交流异步电机SVPWM实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2012, 29(9): 51-55.
- [5] GU G Y, ZHU L M, SU C Y, et al. Modeling and control of Piezo-actuated nanositioning stages: A survey[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 313-332.
- [6] 邵雪卷, 孟凡斌, 陈志梅, 等. 基于dSPACE的磁悬浮系统实验平台设计[J]. *实验技术与管理*, 2016, 33(12): 67-71.
- [7] 周林娜, 王众, 刘金浩, 等. 基于dSPACE的刚柔耦合多电机控制实验平台[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(11): 120-124.
- [8] 于志亮, 王岩, 曹开锐, 等. 压电陶瓷执行器迟滞补偿及复合控制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2113-2120.
- [9] 赵庆旭, 王一帆, 吴文鹏, 等. 压电陶瓷驱动平台的复合控制方法研究[J]. *电光与控制*, 2019, 26(6): 80-84.
- [10] 于志亮, 刘杨, 王岩, 等. 基于改进PI模型的压电陶瓷迟滞特性补偿控制[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 129-135.
- [11] 王贞艳, 张臻, 周克敏, 等. 压电作动器的动态迟滞建模与H_∞鲁棒控制[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(1): 35-41.
- [12] 田雷, 陈俊杰, 崔玉国, 等. 基于PI迟滞模型的单压电变形镜开环控制[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 136-142.
- [13] 马宏伟, 须颖, 安冬, 等. 基于三段PI模型的压电驱动器迟滞补偿方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(1): 53-60.
- [14] 左守印, 王合龙, 周德召, 等. 基于几何法求解PI逆模型参数[J]. *电光与控制*, 2019, 26(1): 47-50.
- [15] 方楚, 郭劲, 徐新行, 等. 压电陶瓷迟滞非线性前馈补偿器[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2217-2223.

编辑 张俊