文章编号:1004-2474(2022)02-0327-06

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2022.02.035

双向二维快速伺服刀架的前馈控制研究

武志士,李国平,邓益民,赵琪啸,徐少岩,杨依领

(宁波大学 机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘 要:以压电陶瓷驱动器作为动力输入的快速伺服刀架具有输出力大和高频率响应的优点。压电陶瓷驱动器固有的迟滞现象严重影响了快速伺服刀架的输出定位精度。为解决此问题,通过引入归一化 Bouc-Wen 模型建立前馈控制补偿器,归一化 Bouc-Wen 模型解决了经典 Bouc-Wen 模型中存在的参数冗余问题。获得模型参数后,基于其逆模型搭建了前馈补偿器,并在搭建的实验平台上进行了单/双自由度轨迹跟踪性能测试。实验结果表明,对于等幅正弦波信号,经前馈控制环节补偿下快速伺服刀架的最大轨迹跟踪误差为 1.18%,最大轨迹跟踪偏差为 2.61%,证明该文所提出的前馈控制补偿器能提高快速伺服刀架的定位精度。

关键词:快速伺服刀架;Bouc-Wen模型;迟滞特性;前馈控制;压电陶瓷驱动器中图分类号:TN384;TM22;TG71 文献标志码:A

Feedforward Control of Bidirectional 2-DOF Fast Tool Servo

WU Zhishi, LI Guoping, DENG Yimin, ZHAO Qixiao, XU Shaoyan, YANG Yiling

(College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The fast servo tool post with piezoelectric ceramic driver as the power input owns the obvious advantages of large output force and high frequency response. However, the inherent hysteresis of the piezoelectric ceramic driver seriously affects the output positioning accuracy of the fast servo tool post. In order to solve this problem, a feedforward control compensator is established by introducing a normalized Bouc-Wen model. The normalized Bouc-Wen model solves the problem of parameter redundancy in the classic Bouc-Wen model. After obtaining the model parameters, a feedforward compensator is built based on its inverse model. The single/double degree of freedom trajectory tracking performance test is carried out on the built test platform. The test results show that for a constant amplitude sine wave voltage signal, the maximum trajectory tracking error under the compensation of the feedforward control link is 1.18%, and the maximum trajectory tracking deviation is 2.61%. It proves that the proposed feedforward control compensator can significantly improve the positioning accuracy of the fast servo tool.

Key words: fast servo tool post; Bouc-Wen model; hysteresis characteristics; feedforward control; piezoelectric ceramic driver

0 引言

快速伺服刀架是指伺服控制的快速进给刀架系统^[1],主要用于精密制造。配合快速伺服刀架,可使 刀具产生快速而微小行程的高精度进给运动(位置 精度可达纳米级)。此外,快速伺服刀架还可实时跟 踪设计表面形状,能在一次加工中获得高精度表面 轮廓及可用于复杂表面形状的精密加工^[2]。基于这 些优点,快速伺服刀架技术已成为一种重要的微结 构表面加工方法。快刀伺服系统具有的快速性要求 其驱动器能产生高频运动,压电陶瓷致动器可以满 足这一要求。因此,许多学者提出并实现了由压电 陶瓷致动器驱动快速伺服刀架系统。通过引入柔性 铰链作为位移放大机构,快速刀架能实现大位移输 出^[3]。引入放大机构使刀架位移输出有较大的增 长^[4],但同时导致了响应频率降低^[5]。压电陶瓷致 动器的另一个特点是正向运动的性能比反向运动的 性能好,反向运动时间较长使整体运动时间长。通 过对向放置压电陶瓷致动器能有效地消除反向运动

收稿日期:2021-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51805276);浙江省自然科学基金资助项目(No. LQ18E050003)

作者简介:武志士(1994-),男,安徽省阜阳市人,硕士生,主要从事精密定位及机电测控方面的研究。通信作者:李国平(1967-),男,湖北 省武穴市人,教授,博士生导师,主要从事精密定位及机电测控方面的研究。

的负面影响,从而减少快速伺服刀架的响应时间。 当一个制动器前进同时另一个制动器后退,反向力 夹持下比单个制动器驱动时响应快。因此,双向驱 动的快速伺服刀架比单向驱动的快速伺服刀架频率 响应快^[6-7]。由于一些复杂轮廓的加工需较复杂的 伺服运动,而单自由度快速伺服刀架无法实现。因 此,多自由度快速伺服刀架^[8-9]已倍受关注。

压电陶瓷制动器存在迟滞特性,将降低快速伺服刀架的输出定位精度。为了消除迟滞的影响,需要通过构建迟滞模型建立前馈控制。已有研究中, 建模方法主要有 Preisach 模型^[10]、Prandtle-Ishlinskii 模型^[11]及 Maxwell 模型等^[12-14],但由于数学理 论发展的局限性,这些模型的准确率已达极限。近 年来引入了其他一些滞后模型(如 Bouc-Wen 模 型^[15-16]、LuGre 模型^[17]等),并取得了较好的效果。 与其他迟滞模型相比,Bouc-Wen 模型具有计算简 单,易得到逆模型,待求参数少的优点,但其存在参 数冗余问题,导致经典 Bouc-Wen 模型的参数难以 识别,阻碍了其应用。通过归一化处理能保证 Bouc-Wen 只依赖于一组特定的参数。

本文搭建了基于双向压电驱动的二自由度快速 伺服刀架的实验测试平台,获得了具有迟滞特性的 位移曲线。然后采用基因遗传算法求解了 Bouc-Wen 模型的参数,对其进行求逆运算解得逆模型。 最后依据逆模型构建了前馈控制环节,对快速伺服 刀架进行了不同电压信号下的运动补偿及二自由度 运动性能测试。

1 Bouc-Wen 模型及其归一化

1.1 经典 Bouc-Wen 模型回顾

Preasch、PI、Bouc-Wen 和 Duhen 模型等都对 迟滞特性有准确描述。经典 Bouc-Wen 模型是由 Bouc 提出,被 Wen 进一步修改以模拟振动力学的 滞后现象。Bouc-Wen 模型具有能描述多种迟滞类 别的能力和易计算的优点,这使大多数研究人员致 力于探索该新兴模型的广泛使用。该模型输入和输 出间的关系为

$$y(V,t) = \alpha k V(t) + (1-\alpha) Dkh(t)$$
(1)

 $\dot{h} = D^{-1} (A\dot{V} - \beta |\dot{V}| |h|^{n-1}h - \gamma \dot{V}|h|^{n})$ (2) 式中:y(V,t)为滞后输出位移;V(t)为输入到快刀 伺服刀架的电压;akV是模型中弹性项和由参数 α 、 k、D 组成的纯滞后项 $(1-\alpha)Dkh$;h(t)为迟滞效应 的辅助变量,它是非线性一阶微分方程(2)关于参数 A、β、γ、n(n≥1)的解。通过正确选取这些参数值, 可获得范围广泛的迟滞曲线。

1.2 归一化处理

迄今为止,许多研究工作都聚焦在 Bouc-Wen 模型的不对称性上,而经典 Bouc-Wen 模型中存在 的参数冗余问题同样制约着模型的应用。因此,有 必要对 Bouc-Wen 模型进行归一化处理,以避免参 数冗余问题。为了准确描述普遍的参数冗余问题, 现给出两组不同参数: $n_1 = n_2 = n$, $A_1 = A_2$, $a_1 = a_2$, $k_1 = k_2$, $\beta_2 = c^n \beta_1$, $\gamma_2 = c^n \gamma_1$, $D_2 = cD_1$,其中 c 为正常 数,初始条件 $h_1(0) = h_2(0) = 0$ 。因此,式(1)、(2) 中 Bouc-Wen 模型可改写为以下两种形式:

$$\begin{cases} y_{1}(V,t) = \alpha_{1}k_{1}V(t) + (1-\alpha_{1})D_{1}k_{1}h_{1}(t) \\ \dot{h}_{1} = D_{1}^{-1}(A_{1}\dot{V} - \beta_{1}|\dot{V}||h_{1}|^{n-1}h_{1} - \gamma_{1}\dot{V}||h_{1}|^{n}) \end{cases}$$
(3)

及:

$$\begin{cases}
y_{2}(V,t) = \alpha_{2}k_{2}v(t) + (1-\alpha_{2})D_{2}k_{2}h_{2}(t) \\
\dot{h}_{2} = D_{2}^{-1}(A_{2}\dot{V} - \beta_{2}|\dot{V}||h_{2}|^{n-1}h_{2} - \gamma_{2}\dot{V}|h_{2}|^{n}) \\
\end{cases}$$
(4)

根据给定参数,方程(4)可转化为

$$\begin{cases} y_{2}(V,t) = \alpha_{1}k_{1}V(t) + c(1-\alpha_{1})D_{1}k_{1}h_{2}(t) \\ \dot{h}_{2} = c^{-1}D_{1}^{-1}(A_{1}\dot{V} - c^{n}\beta_{1} |\dot{V}| |h_{2}|^{n-1}h_{2} - c^{n}\gamma_{1}\dot{V} |h_{2}|^{n}) \end{cases}$$
(5)

令
$$h_{a}(t) = ch_{2}(t)$$
,则方程(5)可表示为
 $\begin{cases} y_{2}(u,t) = \alpha_{1}k_{1}V(t) + (1-\alpha_{1})D_{1}k_{1}h_{a}(t) \\ \dot{h}_{a} = D_{1}^{-1}(A_{1}\dot{V} - \beta_{1}|\dot{V}||h_{a}|^{n-1}h_{a} - \gamma_{1}\dot{V}||h_{a}|^{n}) \end{cases}$
(6)

根据方程(4)、(5)可发现,对于任何输入信号 V(t),两个模型实际上生成了相同的迟滞环 y(V,t)。这表明归一化前Bouc-Wen模型的输入和 输出间的行为不是由一组唯一的参数{ $a,k,D,A,\beta,$ γ,n }决定的,归一化后Bouc-Wen模型避免了参数 ${a,k,D,A,\beta,\gamma,n}$ 不唯一的现象。对此,给出常数 $h_0 = \sqrt[n]{\frac{A}{\beta+\gamma}}, \rho = \frac{A}{Dh_0}, \sigma = \frac{\beta}{\beta+\gamma}, k_v = \alpha k, kh =$ $(1-\alpha)Dkh_0$ 和参数变量 $h(t) = \frac{h(t)}{h_0}$ 。经典Bouc-Wen模型存在参数冗余的原因是参数多,这使补偿 效果相同的模型可能具有多种组合。因此,有必要 对其进行归一化处理,减少参数,同时又保留模型的 一般性。观察经典模型可以看出, β | \dot{V} ||h|ⁿ⁻¹h与 $\gamma \dot{V} |h|$ "两项在一定情况下可以合并,从而得到参数 $\beta + \gamma$,继而就得到了简化后的参数 $\{\alpha, k, D, A, \beta, \gamma, n\}$ 参数,将其代入式(1)、(2)可得归一化后模型表 达式为

$$y(V,t) = k_v V(t) + k_h \hbar(t)$$
(7)

$$\hbar = \rho (\dot{V} - \sigma |\dot{V}| |\hbar|^{n-1} \hbar + (\sigma - 1) \dot{V} |\hbar|^n) \qquad (8)$$

图 1 为归一化 Bouc-Wen 模型在一组特定参数 下得到的迟滞曲线。



1.3 模型求逆

除了避免参数冗余问题外,归一化后 Bouc-Wen 还具有逆模型易取的特点。根据式(7)、(8)可 以求得归一化后 Bouc-Wen 模型输入、输出间的关 系为

$$V(t) = \frac{1}{k_{\rm w}} (y_{\rm d}(t) - k_{\rm h} h(t)) + V_{\rm b}$$
(9)

式中:y_d(t)为预期位移;V_b为对输出电压施加的偏 置电压,从而避免信号电压中出现负值;h(t)是由非 线性微分方程求解得到,代表逆模型中的迟滞环节。 k_v、k_h是模型中待求取的参数,由遗传算法得到。因 此,通过简单的运算可得补偿后的输入电压。

2 实验测试平台搭建

为了对快速伺服刀架进行任意信号的输入控制 及输出测量,搭建了实验平台。其中4个压电陶瓷 驱动器(直径Ø7 mm,长 28 mm,自由行程 30 μ m) 用于产生高精度输入位移。使用两个光学位移传感 器(Keyence,LK-G80,分辨率为 0.15 μ m)测量末端 执行器的响应。电压放大器的电压调节范围为 0~ 150 V。使用的 A/D 模块型号为 NI-PCI-6221。整 个测试系统基于 Labview 软件实现。

3 参数识别

归一化 Bouc-Wen 模型中仅含有 k_v、k_h、ρ、σ 和 n 5 个未知参数,因而求解工作减少。最小均方根

算法、粒子群优化算法和差分进化算法等智能算法 常被用以求取 Bouc-Wen 模型参数。本文使用了在 稳定性和收敛速度上均优于传统遗传算法的自适应 遗传算法,其流程图如图 2 所示。



图 2 参数求解流程图

本文选择均方根误差来评判模型与真实值之间的偏差:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (H_i - H_i^{\mathrm{BW}})^2}$$
(10)

式中:*i* 是选取的每个时刻点; $J(\theta)$ 为均方根误差; $\theta = [k_u, k_h, \rho, \sigma, n]^T$ 为待识别参数的向量; N_i 为采 样点的总数; H_i 为第*i* ms 测得的位移; H_i^{BW} 为归一 化 Bouc-Wen 模型产生的第*i* ms 输出位移。

验证实验中所使用的输入为正弦波电压信号及 由实验所测得快速伺服刀架的位移。虽然在自适应 遗传算法中设置更多的种群数和遗传代数会提高拟 合精度,但增加了时间。因此,本文选择初始种群为 50,遗传代数为100,求解后结果如表1所示。

表1 Bouc-Wen 模型参数表

k_{v}	$k_{ m h}$	ρ	σ	п	均方根误差/μm
7.67	-2.32	5.70	1.69	2.64	0.286 4

由表1可看出,正弦波最佳适应度为0.28 μm, 这说明归一化 Bouc-Wen 模型预测的结果与实验拟 合度较高。

将求得参数代入归一化后 Bouc-Wen 模型中, 可获得预测的位移曲线如图 3 所示。图中,实验曲 线是通过施加一个正弦波电压信号(振幅 75 V,频 率 1 Hz)到快速伺服刀架测得。



图 3 模型预测曲线(正弦波)图

由图 3 可看出,模型值与实验值产生的误差主 要位于峰顶处。由图 3 中误差曲线可知,在初始加 载过程中实验与模型出现最大误差,每个峰值的偏 差比其他时间大。这是因为归一化 Bouc-Wen 模型 存在非线性微分方程,其求解结果为近似值,具有一 定偏差,且在每个峰顶处,电压信号的变化率最大。 这些因素一起作用导致了归一化 Bouc-Wen 预测曲 线在每个峰顶偏差较大。初始部分出现最大偏差的 原因是实验获取的位移曲线在开始阶段表现出较强 的非线性,这使模型无法准确预测。

4 补偿与验证

330

图 4 为对快速伺服刀架进行迟滞补偿的结构 图。图中,y_d(t) 为期望得到的位移,u(t) 为 Bouc-Wen 逆模型产生的驱动电压,y(t) 为得到的驱动电 压 u(t) 施加到快速伺服刀架后得到的实际位移, FTS 为快速伺服刀架。以期望位移作为输入,输出 为补偿电压,将得到的具有补偿效果的电压信号施 加到快速伺服刀架,可得补偿后的实验位移。通过 实验可知,前馈控制下快速伺服刀架能准确地得到 期望轨迹。





为进一步验证模型的有效性,采用幅值 45 μ m、 频率 1 Hz 的等幅正弦波期望位移信号进行轨迹跟 踪实验。式(9)得到了补偿电压在每一时刻的数值。 因为有偏置电压 V_b 的存在,所以理想电压与补偿 电压的起点都不为 0,如图 5 所示。由图可看出,在 上升阶段,补偿电压大于理想电压;下降阶段,补偿 电压小于理想电压。这种反差可补偿快刀伺服刀架 中存在的迟滞特性。



通过激光位移传感器测得消除迟滞后的位移, 其与理想位移的对比如图 6 所示。由图可看出,前 馈控制下快速伺服刀架的末端位移输出与期望位移 吻合,最大轨迹跟踪误差发生在初始时刻。计算得 到期望与实验的线性度为 4.5%。由此可推断,基 于 Bouc-Wen 模型的前馈控制能有效地消除快速伺 服刀架的迟滞效应,从而提高快速伺服刀架的运动 定位精度。



为进一步验证前馈补偿法,执行了快速伺服刀 架在变幅正弦波位移轨迹下的运动性能测试实验。 测得实验曲线与期望位移如图 7 所示。由图可看 出,迟滞补偿下实验位移消除了迟滞特性的影响,与 理想位移基本吻合。再次证明了基于 Bouc-Wen 模 型迟滞建模的前馈补偿对快速伺服刀架中存在的迟 滞特性消除的有效性



控制在不同期望跟踪位移下对快速伺服刀架定位精 度的改善效果。由表可知,本文使用的基于归一化 Bouc-Wen 迟滞模型的补偿法能在很大程度上削弱 由压电陶瓷驱动器所引起的迟滞误差,有效地提高 了快速伺服刀架的驱动定位精度。为进一步提高快 速伺服刀架的轨迹跟踪精度及模型的稳定性,有必 要引入反馈控制。

表2 不同驱动信号的误差比较

期望跟踪位移	最大跟踪误差/%	最大跟踪偏差/%
等幅正弦波	1.18	2.61
变幅正弦波	1.45	1.79

5 二维性能测试

一些复杂曲面的加工要求快速伺服刀架能实现 多维运动,因此,本文对提出的快速伺服刀架进行了 两自由度运动性能测试。为了实现两自由度运动, 两个压电陶瓷制动器分别安装在 x、y 方向上。对 每个方向上预紧的压电陶瓷致动器施加特定电压信 号,最终快速伺服刀架的末端位移输出曲线即是所 选定的二维曲线。为了体现提出的快速伺服刀架二 自由度运动性能,以圆轨迹为参考,选择余弦信号驱 动 x 方向的压电陶瓷致动器 A,正弦信号驱动 y 方 向的压电陶瓷致动器 B。两路激光位移传感器同时 测得两个方向的快速伺服刀架末端的位移输出,将 测得位移作图可获得快速伺服刀架输出的圆形轨 迹。然而,由于压电陶瓷致动器中存在的迟滞特性, 导致了测得的轨迹更偏向于椭圆。因此,为获取更精 确的轨迹跟踪,有必要在二自由度运动中引入前馈控 制。将期望位移分解成两个方向上的单向期望位移, 并将其输入 Bouc-Wen 逆模型中,求得两个方向上的 补偿电压。将求得的补偿电压作为输入,可获得了迟 滞补偿后的位移曲线。图 8 为补偿前、后快速伺服刀 架输出的二维曲线对比图。





由图 8 可看出,补偿后二维轨迹曲线更接近于圆。而补偿前曲线由于受迟滞特性的影响,在实验 位移 $x=0, y=45 \mu m$ 或 $x=45 \mu m, y=0$ 部分与参 考轨迹偏差较大。补偿前、后曲线在峰顶处偏差较 大,一方面因受模型制约,另一方面因两个方向的预 紧力不同。以实验与参考曲线对应点的欧式距离作 为两者之间适应度 d 的表征值,能对快速伺服刀架 的二自由度运动性能进行定量分析。适应度 d 为

$$d = \sqrt{(x_i - x_{ri})^2 + (y_i - y_{ri})^2}$$
(11)

式中: x_i , y_i 分别为由激光位移传感器测得的x、y方向上的实验位移; x_{ri} , y_{ri} 为对应的参考曲线上点的位移。

将实验数据代入式(11)可得到补偿曲线的最大 拟合误差为4.486%,远小于未补偿曲线的最大拟 合误差(14.683%)。表明提出的二自由度快速伺服 刀架在前馈控制的补偿下具有较好的运动性能及优 良的轨迹跟踪能力。而引起误差的原因,除控制模 型本身存在的因素,两个方向上存在的制造误差也 使输出位移与期望位移不同。

6 结束语

由压电陶瓷制动器驱动的快速伺服刀架具有频 率高及输出力大等优点。但压电材料中存在的迟滞 特性严重影响了其输出位移定位精度。简化后的 Bouc-Wen模型具有参数少及易取逆的优点,利用 自适应遗传算法可求得模型中的参数。实验结果表 明,归一化后 Bouc-Wen模型能很好地描述双向压 电驱动的具有二自由度运动的快速伺服刀架中的迟 滞现象。基于简化后 Bouc-Wen模型搭建了前馈控 制环节,并对快速伺服刀架进行了运动性能测试。 结果表明,在前馈控制的补偿作用下,快速伺服刀架 定位精度得到提高。同时,也证明了该快速伺服刀 架具有优异的二自由度运动性能。

参考文献:

[1] 戴一帆,杨海宽,王贵林,等.压电陶瓷驱动的超精密快 刀伺服系统的设计与研制[J].中国机械工程,2009,20 (22):2717-2721.

DAI Yifan, YANG Haikuan, WANG Guilin, et al. Design and development of an ultra-precision fast tool servo system driven by piezoelectric ceramic[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22):2717-2721.

[2] 赵清亮,王义龙,于光,等.基于快速伺服刀架技术的菲 涅尔微结构金刚石超精密加工及其控制技术[J].机械 工程学报,2010,46(9):179-186.

ZHAO Qingliang, WANG Yilong, YU Guang, et al. Fast tool servo-based ultra-precision diamond machining of fresnel micro-structured surface and its control technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(9):179-186.

- [3] 孙涛,李国平,娄军强,等.基于柔性铰链的新型快速伺服刀架设计[J].振动与冲击,2016,35(13):160-166.
 SUN Tao,LI Guoping,LPU Junqiang, et al. Design of a new fast servo tool based on flexible hinges[J]. Jouranal of Vibration and Shock,2016,35(13):160-166.
- [4] 闫鹏,李金银. 压电陶瓷驱动的长行程快刀伺服机构设 计[J]. 光学精密工程,2020,28(02):390-397.
- [5] HAO L, HUI T, HUANG L, et al. A large-stroke flexure fast tool servo with new displacement amplifier [C]//Munich, Germany: 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2017.
- [6] 孙涛,李国平,姚秋水.基于双压电执行器的高频响伺 服刀架 实现研究[J]. 压电与声光,2015,37(4): 655-658.

SUN Tao, LI Guoping, YAO Qiushui. Realization Research of high-frequency response servo turret based on double piezoelectric actuators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(4):655-658.

[7] 赖文锋,李国平,武志士,等.双向压电驱动的二维快速 伺服刀架[J].压电与声光,2021,43(1):88-93.
LAI Wenfeng, LI Guoping, WU Zhishi, et al. A 2-dimensional fast servo tool driven by bidirectional piezoelectric actuator [J]. Piezoelectrics &. Acoustooptics, 2021,43(1):88-93.

- [8] WANG Y M, ANG Y Q, ZHOU X Q, et al. A new 2-DOF fast tool servo for diamond turning of freeform optical surface[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,101/102:1010-1013.
- [9] ZHU Z, ZHOU X, LIU Z, et al. Development of a piezoelectrically actuated two-degree-of-freedom fast tool servo with decoupled motions for micro-/nanomachining[J]. Precision Engineering, 2014, 38(4): 809-820.
- XIAO S,LI Y. Modeling and high dynamic compensating the rate-dependent hysteresis of piezoelectric actuators via a novel modified inverse preisach model[J].
 IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013,21(5):1549-1557.
- [11] 徐金秋,娄军强,杨依领,等. 压电宏纤维致动器的双 极性非对称迟滞建模及补偿控制[J]. 振动工程学报, 2021,34(1):159-165.
- [12] 吕雪军,李国平,胡力,等. 基于 BP 神经网络的 FTS 输出控制[J]. 振动与冲击,2019,38(7):77-85.
 LÜ Xuejun, LI Guoping, HU Li, et al. FTS output control based on BP neural network[J]. Jouranal of Vibration and Shock,2019,38(7):77-85.
- [13] 孙涛,李国平,孙浩益.基于 Duhem 模型和逆模型的压 电执行器精密定位及控制[J].宁波大学学报(理工 版),2017,30(1):13-17.
- [14] 俞炜平,郑心城,陈艳芳,等. 新进式重建网络的低照度图像增强与去噪研究[J]. 计算机科学,2021,48 (11A):435-440. YU Weiping, ZHENG Xincheng, CHEN Yanfang, et al. Low—light image enhancement and denoising via progressive restoration[J]. Computer Science,2021,48(11A):435-440.
- [15] KANG S Z, WU H T, LI Y, et al. A fractional-order normalized Bouc-Wen model for piezoelectric hysteresis nonlinearity [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021(99):1.
- [16] RAKOTONDRABE M. Bouc Wen modeling and inverse multiplicative structure to compensate hysteresis nonlinearity in piezoelectric actuators[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2011,8 (2):428-431.
- [17] NASER M, IKHOUANE F. Hysteresis loop of the LuGre model[J]. Automatica, 2015, 59:48-53.