

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210993

# 基于模糊算法的自适应忆阻 PI 控制系统设计\*

范凯伦<sup>1,2,3</sup> 张兵<sup>1,2,3</sup> 李志俊<sup>1,2,3</sup> 毛耀<sup>1,2,3</sup>(1. 中国科学院光束控制重点实验室 成都 610209; 2. 中国科学院光电技术研究所 成都 610209;  
3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 为了解决传统模拟 PI 控制器参数不易整定以及面对被控对象发生变化时无法在线进行参数调整的问题,引入了忆阻器件实现了控制器参数可在线调整。同时针对忆阻器阻值大小不易确定的问题,引入了模糊算法,将模糊算法与忆阻 PI 控制器进行结合,设计了一种模糊忆阻 PI 控制系统,实现了控制器参数的自适应调整。在理论推导的基础上,进行了 Multisim 仿真与电路实验。结果表明,基于模糊算法的自适应忆阻 PI 控制系统与传统模拟 PI 控制器相比,参数可以进行在线调整,具有较强的自适应能力,且基于模糊算法的自适应忆阻 PI 控制系统可以将系统的超调量降低 66.27%,具有更好的跟踪性能。

**关键词:** 自适应;忆阻器;模糊控制;PI 控制;参数调整

中图分类号: TP273 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8010

## Design of adaptive memristor PI control system based on fuzzy algorithm

Fan Kailun<sup>1,2,3</sup> Zhang Bing<sup>1,2,3</sup> Li Zhijun<sup>1,2,3</sup> Mao Yao<sup>1,2,3</sup>(1. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the parameters of traditional analog PI controller are not easy to adjust and the parameters can not be adjusted online when the controlled object changes, memristor is introduced to realize the online adjustment of controller parameters. At the same time, aiming at the problem that the resistance value of the memristor is not easy to determine, a fuzzy algorithm is introduced, and a fuzzy memristor PI controller is combined with the fuzzy algorithm to design a fuzzy memristor PI control system, which realizes the adaptive adjustment of the controller parameters. Based up on the oretical derivation, not only the Multisim simulation was carried out, but also the circuit experiment was conducted. The results show that compared with traditional analog PI controller, the parameters of the adaptive memristor PI control system based on fuzzy algorithm can be adjusted online, and has strong adaptive ability. Moreover, the adaptive memristor PI control system based on fuzzy algorithm can reduce the overshoot of the system by 66.27%, and has better tracking performance.

**Keywords:** self-adaption; memristor; fuzzy control; PI control; parameter adjustment

## 0 引言

1971年,蔡少棠教授根据电路理论提出一种具有存储特性的电路元件——忆阻器<sup>[1]</sup>,忆阻器不同于常规的电路元件,它具有一些独特的元件特性,因此被称为第四种基本电路元件<sup>[2]</sup>。由于缺乏物理模型,忆阻器的发展一直十分缓慢,直到2008年,美国HP实验室偶然发现具有忆阻特性的器件,并首次提出忆阻器的TiO<sub>2</sub>模型,为忆阻器的研

究打开了新的大门<sup>[3-4]</sup>。忆阻器的阻值具有非线性,其阻值可以根据外部电压电流的改变进行动态变化,相当于纳米级的滑动变阻器。自忆阻器被提出以来,引起了各大领域相关学者的关注,忆阻器本身具有可记忆性、存储性、尺寸小、耗能低等优点,在智能控制<sup>[5]</sup>、神经网络<sup>[6]</sup>、大规模集成电路<sup>[7]</sup>等领域具有巨大的发展潜力。

PID控制不仅结构简单,而且稳定性好、可结合能力强,在工业控制领域中有大量的应用实例。然而在实际控

收稿日期:2022-08-08

\* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61905253)项目资助

制电路中,传统模拟 PID 控制器最难的是如何调节比例、积分和微分 3 个参数,且参数一旦确定,再调节起来比较困难。近年来现代工业技术发展迅速,控制对象的复杂度也在逐渐提高,对控制系统的设计方法及其鲁棒性的要求也越来越高<sup>[8-9]</sup>,PID 控制逐渐显露出其局限性,因此大量将智能控制与 PID 进行结合的方法相继被提出,如模糊 PID 控制<sup>[10-11]</sup>、神经网络 PID 控制<sup>[12]</sup>、遗传算法 PID 控制<sup>[13]</sup>等。这些算法 PID,多采用数字控制,系统构成比较复杂,不易用集成电路实现,发展空间也受到一定的限制。近年来,不断有研究人员将忆阻器与 PID 进行结合,Dong 等<sup>[14]</sup>用忆阻器替换 PID 控制器中的电阻实现了忆阻 PID,但只处于仿真阶段实物实现较困难,且 PID 参数不能单独调节。程铁栋等<sup>[15]</sup>用忆阻器硬件实现了并联的模拟 PID 控制器,但忆阻器的阻值不好控制大小,无法有效应对变化的被控对象。针对忆阻器阻值调整的问题,刘军等<sup>[16]</sup>利用 NMOS 管设计了一种忆阻器控制电路,但需保持 NMOS 工作在恒流区。Lu 等<sup>[17]</sup>采用梯度下降法来调节忆阻器的阻值,一定条件下实现了一种自适应的忆阻 PID 控制器。

虽然加入微分部分能够提高控制器的性能,但同时也会放大噪声,当微分参数设置不合理时会使控制系统的性能变差<sup>[18]</sup>,往往使用 PI 控制器就能获得良好的跟踪效果,因此本文设计的控制器不加入微分,而采用 PI 控制器。为解决传统模拟 PI 控制器参数不易整定的难题,本文引入两个忆阻器分别替换 PI 控制器的比例和积分环节电路中的电阻。针对忆阻器的阻值调整困难问题引入模糊控制算法,通过 DSP 的 AD-DA 转换模块将模糊控制器的输出信号输入到两个忆阻器上实现对忆阻器阻值的调整,从而能够完成忆阻 PI 控制器参数的自整定。提出的基于模糊算法的自适应忆阻 PI 控制器能够在线整定控制器参数,实现了更好的跟踪控制效果,扩大了其在工业控制领域的应用范围。

### 1 PI 控制器电路

PI 控制器主要由比例、积分环节两部分组成,通过调节控制器的比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  可以改变控制器的输出性能实现更好的跟踪效果。 $K_p$  用于提高系统的响应速度, $K_p$  越大系统上升速度越快,调节时间越短,但过大将导致超调,失去稳定性。 $K_i$  用于减小系统的稳态误差, $K_i$  越大,系统消除余差的速度越快,但过大也会产生超调。图 1 为模拟 PI 控制器电路图,其中  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  是型号为 AD711KN 的运算放大器,分别构成比例环节、积分环节和求和电路,计算可得输入信号与输出信号之间的关系表达式,具体表示如下:

$$V_{out} = K_p V_{in} + K_i \int V_{in} dt \quad (1)$$

$$K_p = \frac{R_6 R_2}{R_1 R_3} \quad (2)$$

$$K_i = \frac{R_6}{R_5 C_1 R_4} \quad (3)$$

其中,  $V_{in}$  为输入信号,  $V_{out}$  为输出信号。

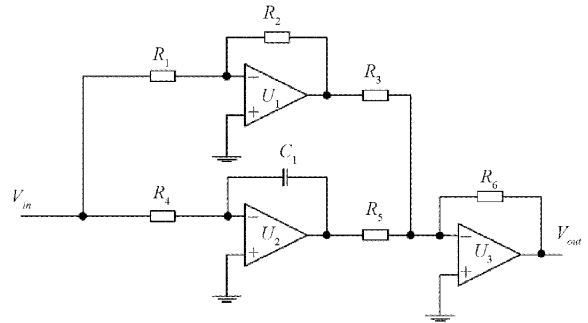


图 1 PI 控制器电路图

## 2 忆阻器

### 2.1 忆阻器的原理

HP 实验室提出的忆阻器物理模型是由夹在两个金属铂(Pt)电极之间的两层二氧化钛( $TiO_2$ )薄膜构成,其中一层的  $TiO_2$  不含有氧空位具有高阻抗性,叫做非掺杂区,另一层的  $TiO_2$  缺乏部分氧原子,叫做掺杂区( $TiO_{2-x}$  区)。非掺杂区和掺杂区两部分的阻值相加结果就是忆阻器的总阻值。当忆阻器上外加电压信号时,非掺杂区和掺杂区的区间会产生变化,随之忆阻器的总阻值也会跟着改变<sup>[19]</sup>。HP 忆阻器模型如图 2 所示,整个忆阻器的长度为  $D$ ,  $w$  为掺杂层的长度,当  $w = 0$  时,忆阻器只有非掺杂区,这时忆阻值最大记作  $R_{OFF}$ ,当  $w = D$  时,忆阻器只有掺杂层,这时忆阻值最小记作  $R_{ON}$ ,而整个忆阻器的阻值为:

$$R(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \quad (4)$$

其中,  $x = \frac{w}{D} \in [0, 1]$ , 为掺杂层长度与忆阻器总长度的比值。

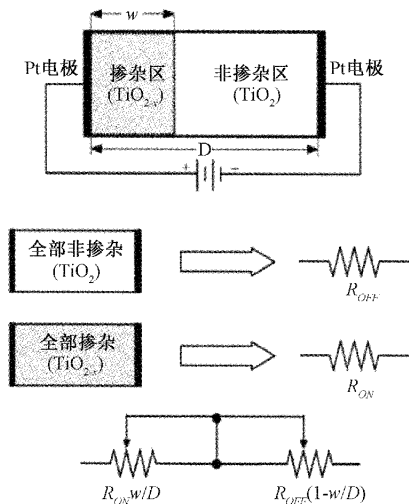


图 2 HP 忆阻器模型

2.2 忆阻器的电路模型

忆阻器是一种二端电路元件,当外部有偏压信号时其阻值大小会随着电压信号的变化而变化,其元件特性可以用电荷和磁通来表示,具体的磁控忆阻器表达式如下:

$$W(\varphi) = \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \tag{5}$$

将  $v = \frac{d\varphi}{dt}, i = \frac{dq}{dt}$  代入式(5)可得:

$$W(\varphi) = \frac{idt}{vd\varphi} = \frac{i}{v} \tag{6}$$

其中,  $W(\varphi)$  表示忆导值,  $q$  为通过忆阻器的电荷量,  $\varphi$  为通过忆阻器的磁通量,  $i$  为忆阻器上的电流,  $v$  为忆阻器上的电压。

假设忆导值  $W(\varphi)$  与磁通量  $\varphi$  之间表示为一次函数关系,则:

$$W(\varphi) = \alpha\varphi + \beta \tag{7}$$

文献[20]根据式(7)搭建了一个忆阻模拟电路,但缺点是流入流出忆阻器的电流大小并不相等,这并不符合忆阻器作为二端元件的特性。为了解决这个问题,本文在其基础上引入了一个电流转换器实现电流转换功能,实现了流入流出忆阻器的电流相等,具体电路如图3所示。

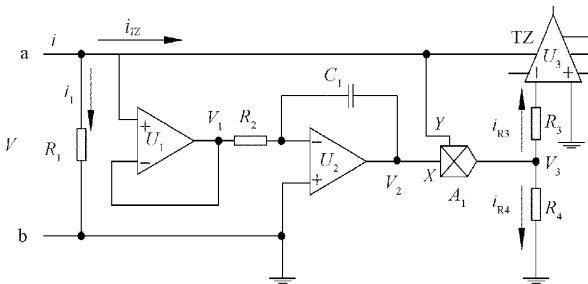


图3 磁控忆阻器电路

在图3所示电路中,运算放大器  $U_1$  和  $U_2$  型号为 AD711JN,其中  $U_1$  是一个电压跟随器,目的是缓解负载效应, $U_2$  实现积分功能,  $A_1$  是一个模拟乘法器型号为 AD633JN,其用来实现两个输入端的相乘,运算放大器  $U_3$  型号为 AD844AN,是一个电流转换器,用于实现电流转换功能。通过电路分析可以获得如下关系:

$$\begin{cases} V_1 = V \\ V_2 = V_2(0) - \frac{1}{R_2 C_1} \int_0^t V_1(t) dt \\ V_3 = \frac{V \cdot V_2}{10} \end{cases} \tag{8}$$

由图中关系可知:

$$i_{TZ} = i_{R4} = \frac{V_3}{R_4} \tag{9}$$

$$i = i_1 + i_{TZ} = \frac{V}{R_1} + \frac{V_3}{R_4} \tag{10}$$

将式(8)和(10)联立可得:

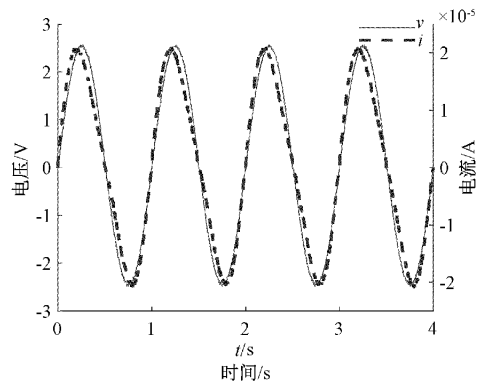
$$W(\varphi) = \frac{i}{v} = \frac{1}{R_1} + \frac{V_2(0)}{10R_4} - \frac{1}{10R_4 R_2 C_1} \int_0^t V(t) dt = \frac{1}{R_1} + \frac{V_2(0)}{10R_4} - \frac{\varphi}{10R_4 R_2 C_1} \tag{11}$$

由式(11)可以看出忆阻器阻值的大小和输入信号的电压值有关。

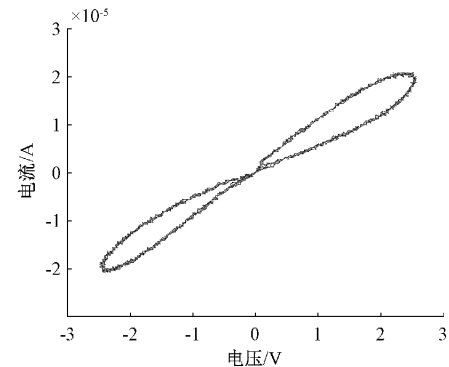
对比式(7)和(11)可得:

$$\alpha = -\frac{1}{10R_4 R_2 C_1}, \beta = \frac{1}{R_1} + \frac{V_2(0)}{10R_4} \tag{12}$$

忆阻器是一种非线性电路元件,当输入为正弦信号的情况下,其伏安特性曲线呈现为斜“8”字形。为了对该电路进行实验验证,采用面包板搭建忆阻器电路,并用信号发生器给该忆阻器输入一个峰峰值为 5 V,频率为 1 Hz 的正弦信号,得到忆阻器上的电压电流结果如图4(a)所示,伏安特性曲线如图4(b)所示,实验结果验证了该磁控忆阻器电路的正确性,以及应用到模拟 PID 控制器中的可行性,为更进一步的研究提供了基础。



(a) 电压电流波形图



(b) 伏安特性曲线

图4 忆阻电压电流波形及伏安特性曲线

3 基于模糊算法的自适应忆阻PI控制系统

3.1 模糊算法设计

模糊算法是一种智能控制方法,主要是通过大量的操作经验来设计模糊控制规则,再用计算机实现自动控制功能,无需精确知道控制对象的数学模型<sup>[21]</sup>,同时模糊控制还具有设计方法简单、适用性强、稳定性好等优点。模糊算

法通常由模糊规则库、模糊推理机、模糊化接口和解模糊化接口 4 个部分组成<sup>[22-23]</sup>,具体如图 5 所示。本文设计两个双输入单输出的 T-S 型模糊控制器实现对忆阻 PI 控制器参数  $K_p$ 、 $K_i$  的整定,其中输入信号为忆阻 PI 控制器输出的误差信号  $e$  和误差信号的变化率  $ec$ , 对其分别进行模糊化处理并用以下 5 个语言变量  $[NB, NS, ZE, PS, PB]$  进行描述,且输入输出量的隶属度函数具体形式如图 6(a)、(b) 所示。经解模糊化后实际的输出量  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  分别作用于忆阻 PI 控制器的两个忆阻器,实现对忆阻器的阻值调整,从而实现对忆阻 PI 控制器参数的调整。其中模糊规则的设计是模糊算法的关键,本文根据以往控制经验分别对控制器参数  $K_p$ 、 $K_i$  设计了 9 条规则,具体模糊控制规则如表 1、2 所示。

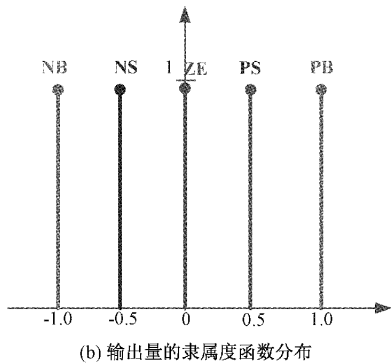
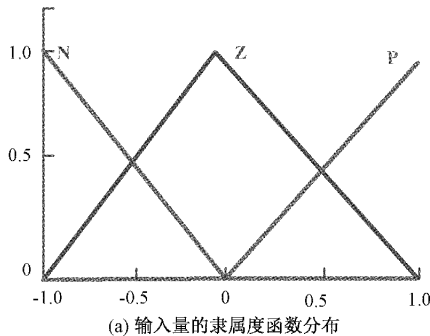
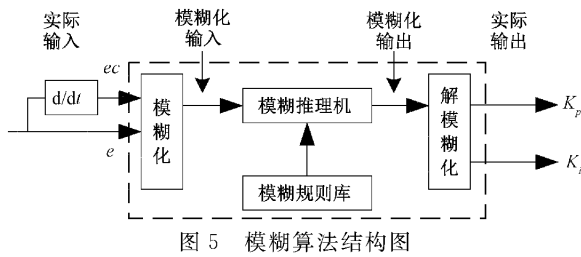


图 6 模糊算法的输入输出量隶属度函数

表 1 忆阻 PI 控制器的  $K_p$  参数的模糊规则表

$\Delta K_p$	EC			
	N	Z	P	
E	N	PB	PS	ZE
	Z	PS	ZE	NS
	P	ZE	NS	NB

表 2 忆阻 PI 控制器的  $K_i$  参数的模糊规则表

$\Delta K_i$	EC			
	N	Z	P	
E	N	NB	NS	ZE
	Z	NS	ZE	PS
	P	ZE	PS	NB

### 3.2 模糊忆阻 PI 控制系统电路设计

搭建基于模糊算法的自适应忆阻 PI 控制器电路原理图如图 7 所示,其中  $U_i$  作为一个减法器,输出得到误差信号,然后送到 PI 控制器中作为输入,  $M_1$ 、 $M_2$  里面封装有图 3 所示磁控忆阻器电路。由于模糊算法属于数字方法,所以本文使用主芯片为 TMS320C6747 的 DSP 开发板的 AD-DA 转换功能,首先将输入误差信号进行 A/D 转换然后将转换结果送入模糊算法的输入,并将输出结果进行 D/A 转换,其中  $\Delta K_p$  作用于忆阻器  $M_1$ ,  $\Delta K_i$  作用于忆阻器  $M_2$ ,控制忆阻器的阻值进行改变,达到自适应控制的效果。控制对象为通过分立元器件搭建的一阶或二阶系统,用于测试跟踪效果。该方法采用数字模糊控制与忆阻模拟 PI 控制器电路结合的方法,只需要通过计算机调整模糊算法输出的比例因子就可以在线改变控制器参数,期间不需要进行电阻电容的更换,不仅使控制器参数的调整变得更加方便,也大大延长了器件的使用寿命。

## 4 仿真与实验

### 4.1 Multisim 仿真

在 Multisim 软件中对传统模拟 PI 控制器和忆阻 PI 控制器进行仿真,为了进行对比,设置初始 PI 控制器参数相同,设置  $K_p = 20$ ,  $K_i = 50$ ,各元器件参数配置情况如表 3、4 所示,其中  $k_e$  和  $k_{ec}$  分别为  $e$  和  $ec$  的量化因子,  $k_{ue}$  和  $k_{uec}$  分别为  $e$  和  $ec$  的比例因子。

输入幅值为 1 V 的阶跃信号,当被控对象为  $\frac{1}{s+1}$  时,传统模拟 PI 控制器的输出波形和忆阻 PI 控制器的输出波形分别如图 8 所示,当被控对象为  $\frac{2}{2s+2}$  时,传统模拟 PI 控制器的输出波形和忆阻 PI 控制器的输出波形分别如图 9 所示。可以看到加入忆阻器后的控制器输出波形和传统的模拟 PI 控制器的输出波形相差不大,甚至忆阻 PI 效果还差一些,这是因为忆阻器上的电压信号很小,导致忆阻器的阻值变化太慢,而且没有相应的规则控制忆阻器阻值的改变方向,忆阻器的阻值不能向有利的方向进行调节,故不能体现忆阻器的作用。因此亟需提出一种控制忆阻器阻值变化的方法来控制忆阻器阻值向有利的方向进行变化。

### 4.2 电路实验

由仿真结果可以看出将忆阻内化到 PI 控制器中,仅依靠误差大小来改变忆阻器的阻值并不能达到一个很好的控

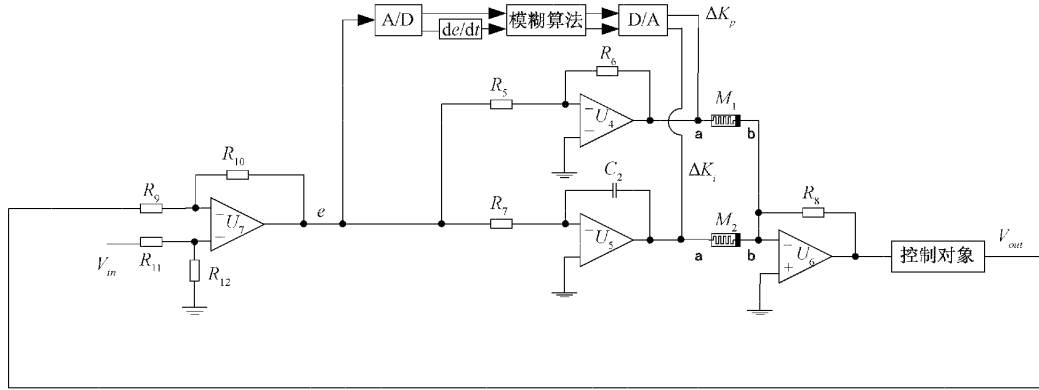


图7 基于模糊算法的自适应忆阻PI控制系统

表3 磁控忆阻器电路中各元件参数设置

参数	数值
$R_1$ (忆阻 $M_1$ 的取值)	10 k $\Omega$
$R_1$ (忆阻 $M_2$ 的取值)	40 k $\Omega$
$R_2$	47 k $\Omega$
$R_3, R_4$	100 k $\Omega$
$C_1$	1 $\mu$ F

表4 基于模糊算法的自适应忆阻PI控制系统参数设置

参数	数值
$R_5, R_6, R_7, R_9, R_{10}, R_{11}$	100 k $\Omega$
$R_8$	200 k $\Omega$
$C_2$	1 $\mu$ F
$k_e, k_{ec}$	0.5
$k_{ue}$	4
$k_{uec}$	2

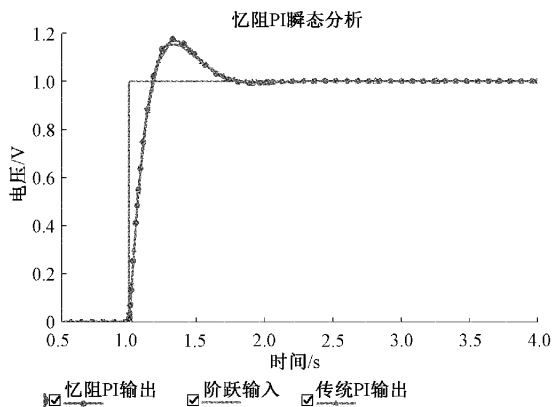


图8 阶跃输入下传统PI和忆阻PI的输出波形

制效果,因此本文采用模糊算法来调节忆阻器的阻值,从而实现PI控制器电路的自适应调整。忆阻PI控制器整体电路采用面包板进行搭建,具体实验装置图如图10所示。

对于一个阶跃信号进行跟踪,当被控对象为  $\frac{1}{s+2}$  时,传

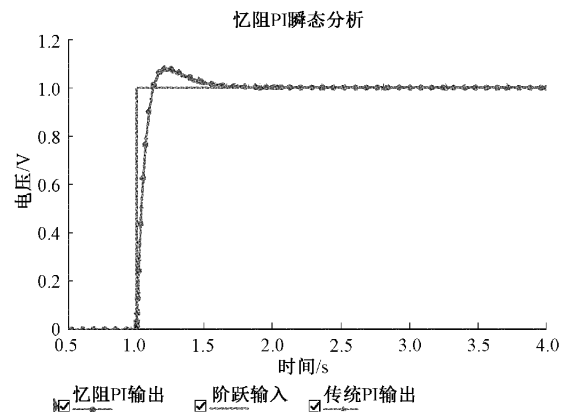


图9 阶跃输入下传统PI和忆阻PI的输出波形

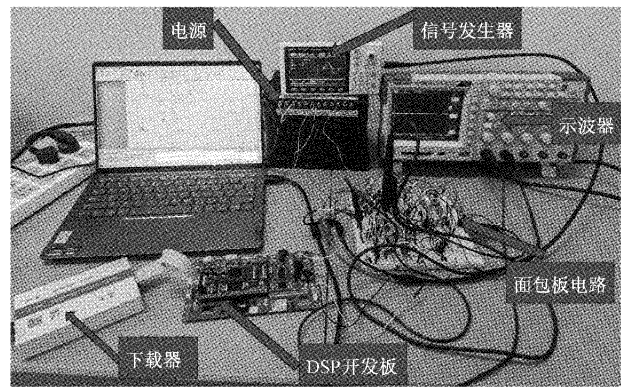


图10 阶跃输入下传统PI和忆阻PI的输出波形

统模拟PI控制器、忆阻PI控制器和基于模糊算法的忆阻PI控制器的输出波形如图11所示。

当被控对象为  $\frac{5}{5s+1}$  时,传统模拟PI控制器、忆阻PI

控制器和基于模糊算法的忆阻PI控制器的输出波形如图12所示。

当被控对象为  $\frac{1}{s+1}$  时,传统模拟PI控制器、忆阻PI

控制器和基于模糊算法的忆阻PI控制器的输出波形如图13所示。

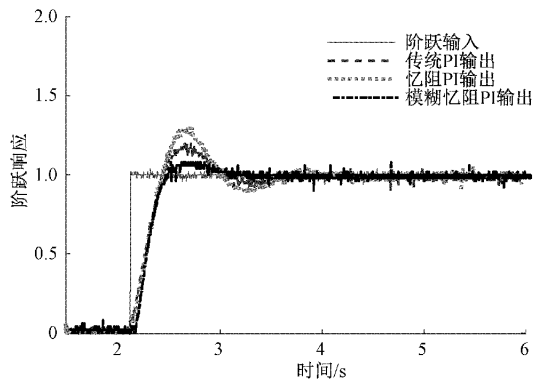


图 11 被控对象为  $\frac{1}{s+2}$  时, 3 种 PI 控制器的输出结果

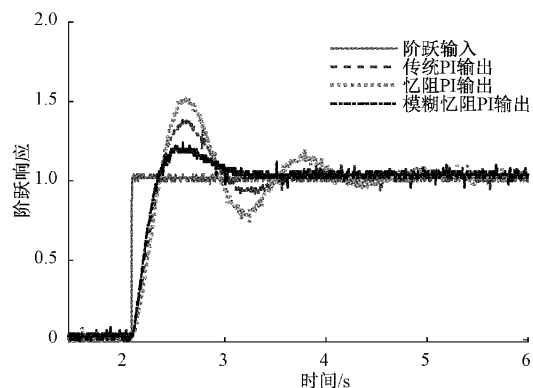


图 12 被控对象为  $\frac{5}{5s+1}$  时, 3 种 PI 控制器的输出结果

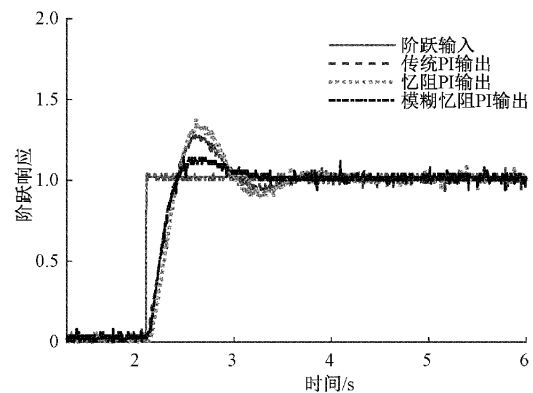


图 13 被控对象为  $\frac{1}{s+1}$  时, 3 种 PI 控制器的输出结果

由实验结果图 11 可以看出, 当输入为阶跃信号时, 传统 PI 控制器输出结果的超调量较大, 当引入忆阻器后, 虽然忆阻器本身阻值具有可变性, 但由于电路的电流较小不足以让忆阻器进行大幅度变化, 其次忆阻的阻值变化方向也不确定, 所以忆阻 PI 控制器与传统模拟 PI 控制器相比并没有得到一个好的输出结果。由图 11 可以看到忆阻 PI 控制器输出结果的超调量与传统 PI 控制器的输出结果相比反而更大, 实验结果验证了上节的仿真结果。为了对忆

阻器进行阻值控制, 本文提出用模糊算法进行调整忆阻器阻值, 由图 11 看出基于模糊算法的忆阻 PI 控制器, 上升时间更快, 且超调量也明显下降, 相比于传统 PI 控制器超调量降低了 62.17%, 相比于忆阻 PI 控制器超调量降低 73.52%, 具有更好的跟踪效果。

为了对基于模糊算法的忆阻 PI 控制器的自适应能力进行验证, 通过改变被控对象特性, 然后观察控制器输出结果。从图 12 实验结果计算得出基于模糊算法的忆阻 PI 控制器相比于传统 PI 控制器超调量降低了 53.45%, 相比于忆阻 PI 控制器超调量降低 63.52%; 从图 13 实验结果计算得出基于模糊算法的忆阻 PI 控制器相比于传统 PI 控制器超调量降低了 51.62%, 相比于忆阻 PI 控制器超调量降低 60.31%。从实验结果可以看出基于模糊算法的忆阻 PI 控制器, 能够更好的处理控制对象不确定性问题, 具有更好的自适应能力。

## 5 结 论

为了解决传统模拟 PI 控制器参数不易整定以及面对被控对象特性变化时无法在线进行参数调整的问题, 本文引入了具有阻值可调节功能的忆阻器件, 同时针对忆阻阻值的调整问题, 采用了模糊算法进行整定。文中建立了基于模糊算法的自适应忆阻 PI 控制系统的电路模型, 并进行了理论推导、Multisim 仿真和电路实验, 验证了所提方案的正确性。在电路的设计上, 均使用简单便宜的元器件, 制造简单且容易实现。实验结果与传统模拟 PI 控制器相比, 调节时间更短, 超调量更小, 提高了系统的自适应能力, 为更精密高效的现代工业控制提供了参考。

## 参考文献

- [1] CHUA L O. Memristor—the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519.
- [2] 夏思为, 段书凯, 王丽丹, 等. 基于忆阻神经网络 PID 控制器设计[J]. 计算机学报, 2013, 36(12): 2577-2586.
- [3] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The missing memristor found [J]. Nature, 2008, 453(7191): 80-83.
- [4] WILLIAMS R S. How we found the missing memristor [J]. IEEE Spectrum, 2008, 45(12): 28-35.
- [5] SUN B, CAO Y, GUO Z, et al. Sliding mode stabilization of memristive neural networks with leakage delays and control disturbance [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 32(3): 1254-1263.
- [6] LIU X, ZENG Z. Memristor crossbar architectures for implementing deep neural networks [J]. Complex & Intelligent Systems, 2022, 8(2): 787-802.

- [7] MANOURAS V, STATHOPOULOS S, SERB A, et al. Selectively biased tri-terminal vertically-integrated memristor configuration [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-9.
- [8] 李志俊,毛耀,亓波,等.量子光通信中位置修正单检测控制方法[J].光电工程,2022,49(3):22-36.
- [9] 夏文强,何秋农,段倩文,等.基于传感器优化与鲁棒预测的等效加速度前馈[J].光电工程,2021,48(11): 3-12.
- [10] 沈跃杰,行鸿彦,王水璋.基于粒子群优化的串级模糊PID无人机飞行控制系统[J].电子测量技术,2022, 45(1):96-103.
- [11] 韦宏利,周建波,王晴悦,等.基于模糊PID的温度控制系统设计[J].国外电子测量技术,2021,40(9): 111-116.
- [12] 范怡敏,罗云飞,魏春英.基于自适应神经网络的无人机PID控制器研究[J].电子测量技术,2021,44(9): 163-167.
- [13] 张涵,刘铁军,刘波,等.遗传优化PID整定算法在阀门定位器中的应用[J].电子测量与仪器学报,2021, 35(11):215-222.
- [14] DONG Z K, DUAN S K, HU X F, et al. A spintronic memristor based PID controller [C]. AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015), Atlantis Press, 2015: 280-283.
- [15] 程铁栋,胡玮剑,杨丽荣,等.基于变容二极管的忆阻PID自适应控制系统设计[J].电子元件与材料,2022, 41(1):104-110.
- [16] 刘军,段书凯,李天舒,等.忆阻PID控制器在机械臂实时控制系统中的应用研究[J].电子学报,2017, 45(11):2795-2799.
- [17] LU Y M, LIANG Q Q, HUANG X F. Parameters self-tuning PID controller circuit with memristors[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2018, 46(1): 138-154.
- [18] 胡发焕,唐军,邱小童.模糊自适应PI控制在直流无刷电动机调速系统的应用[J].制造技术与机床, 2012(6):188-191.
- [19] DONG Z, LI C, QI D, et al. Multiple memristor circuit parametric fault diagnosis using feedback-control doublet generator[J]. IEEE Access, 2016(4): 2604-2614.
- [20] 贺少斌.基于忆阻器的非线性电路特性研究[D].广西:广西大学,2013.
- [21] LIU J, XIE S Y, CHEN C, et al. A spintronic memristor crossbar array for fuzzy control with application in the water valves control system [J]. Measurement and Control, 2019, 52(5-6): 418-431.
- [22] VIJAY A R F, KAMATCHI K V. Adaptive ELM neural computing framework with fuzzy PI controller for speed regulation in permanent magnet synchronous motors [J]. Soft Computing, 2020, 24 (14): 10963-10980.
- [23] PHU N D, HUNG N N, AHMADIAN A, et al. A new fuzzy PID control system based on fuzzy PID controller and fuzzy control process[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020, 22(7): 2163-2187.

### 作者简介

范凯伦,硕士研究生,主要研究方向为忆阻器件研究与应用、跟踪控制。

E-mail: fankailun2020@163.com

李志俊(通信作者),副研究员,硕士生导师,主要研究方向为忆阻器件研究、跟踪控制。

E-mail: lizhijun@ioe.ac.cn

毛耀,研究员,博士生导师,主要研究方向为跟踪控制、忆阻模拟电路、传感器信号处理。

E-mail: maoyao@ioe.ac.cn