

忆阻 PID 控制器在机械臂 实时控制系统中的应用研究

刘 军¹, 段书凯², 李天舒², 王丽丹²

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715)

摘 要: 目前忆阻器在忆阻神经形态电路方面的研究日渐成熟,但将其应用于实时控制电路还有待完善. 本文以二关节机械臂作为研究对象,将电压阀控忆阻器与传统 PID 控制器相结合,设计了可用于实时电路系统的忆阻 PID (M-PID) 控制系统. 并创新性的利用 MOS 管自身开关阈值,设计了带有“零态”区间的阈值忆阻器控制电路,这可有效避免因控制器频繁切换带给系统的震荡. 论文利用 Matlab 仿真软件,从阶跃响应及位置跟踪两个层面对所设计的控制系统进行了仿真分析. 仿真结果表明:所提 M-PID 控制算法可有效改善二关节机械臂控制系统的稳态和动态品质.

关键词: 实时控制系统; 阈值忆阻器; M-PID; 机械臂

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)11-2795-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.11.029

Research on the M-PID Controller Application in Real Time Control System of the Robot Arm

LIU Jun¹, DUAN Shu-kai², LI Tian-shu², WANG Li-dan²

(1. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Southwest University, Chongqing, 400715, China)

Abstract: The memristor used in the neural morphology circuit is becoming more mature at present, but it applied to real-time control circuit has yet to be perfect. In this paper, the two-joint robot arm is used as research object, and a memristor PID (M-PID) control system for real-time circuit system is designed by combining the memristor with the traditional PID controller. By using the switching threshold of the MOS transistor, this paper innovative designed a memristor control circuit with zero state interval, which can effectively avoid the oscillation caused by frequent switching of the controller. The proposed control algorithm is analyzed from step response and position tracking using Matlab simulation software. The simulation results show that the proposed M-PID control algorithm can effectively improve the steady-state and dynamic quality of the two-joint robot arm control system.

Key words: real-time control system; memristor with voltage threshold; memristor PID (M-PID); robot arm

1 引言

自 2008 年,惠普实验室研究人员首次做出了纳米忆阻器的物理模型以来^[1],众多学者认为结合忆阻器的记忆能力,实时电路存在可根据自身状态实时调整且符合运算需求的可能性.这就是说运算电路与记忆电路可同时并存,而且可随需求调整.这已完全超出目前实时电路的设计逻辑,沿着这条路发展下去,新一代

智慧(“类人化”)机器人的诞生将不再是一种奢想.

众所周知,机械臂是目前在机器人领域中应用最为广泛的自动化机械装置^[2].然而由于其自身的强非线性、高耦合等特性,其控制方式变得较为复杂.因此,各种复杂的算法也被应用于机械臂的控制^[3-6].尽管利用这些算法取得了一定的效果,但其通用性较差,且控制参数设计复杂.经典 PID 算法因算法简单、可靠性高且通用性好等特点常被应用于机械臂的控制.然而,在实际控制过程

收稿日期: 2016-12-01; 接受日期: 2017-04-10; 责任编辑: 蓝红杰

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61372139, No. 61571372, No. 61101233); 中央高校基本科研业务费专项 (No. XDJK2016A001, No. XDJK2016C027, No. XDJK2015C009)

中, PID 参数一旦确定, 其各项参数将无法修改, 这对于强非线性高耦合的机械臂控制系统来说, 将导致系统稳定性变差且适应性能力欠佳. 因此, 众多学者利用高级的算法优化 PID 控制系统^[7-10]. 尽管他们可以提高机械臂控制系统的性能, 但也增加了系统的复杂度, 有时其稳定性也难以保证. 有没有一种算法既不增加系统的复杂度, 且可以自行修改本已确定的 PID 控制参数来提高系统的运行精度? 答案是一定的. 忆阻器的出现解决了上述出现的矛盾. 然而, 忆阻器结合 PID 控制算法的设计仅局限于算法过程推导及间接利用忆阻形态电路修正既定的 PID 控制参数, 并未对 PID 控制算法硬件电路进行设计且未对其硬件实现的电路进行说明^[11].

本文利用阀控忆阻器的阻值自身特性设计了基于阀控忆阻器的 PID 控制系统. 所提控制系统可根据被控系统所处状态实时修正 PID 控制参数, 完成高级算法所

能达到的控制效果且硬件电路设计只是将传统 PID 硬件的电阻改成忆阻器即可. 当然, 附加的忆阻器控制电路本文运用 MOS 管自身电压阈值, 创新性的提出一种“零态”区间可调的满足实时电路运行的忆阻器控制电路, 其运算速度远高于高级算法利用软件编程实现的速度且实时性得到提高.

2 阀控忆阻器特性分析

本文采用文献[12]中带有电压阈值的忆阻器模型. 利用数值仿真技术对其进行特性分析, 参数设定为: $\alpha = 0, \beta = 1E13$, 最小忆阻值 $R_{on} = 1K\Omega$, 最大忆阻值 $R_{off} = 10K\Omega$, 初始阻值 $R_{init} = 5K\Omega$, 阈值电压 $V_t = 4.6V$. 输入电压采用正弦电压 $V_M = V_0 \sin(2\pi f t)$, 其幅值和频率采用四种组合形式 [4.5V 50MHz], [4.5V 10MHz], [5V 50MHz] 和 [5V 10MHz]. 仿真结果如图 1 所示.

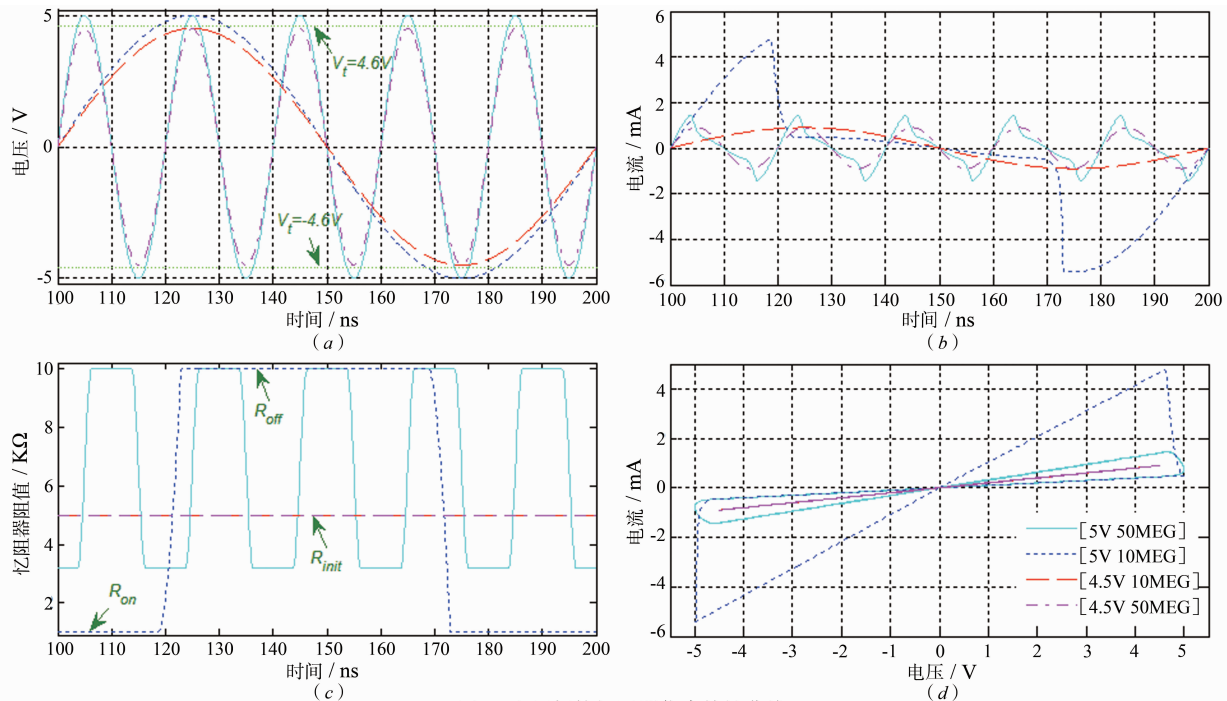


图1 电压阀控忆阻器仿真特性曲线

从图 1(b) 中可以看出, 当触发电压低于阈值电压时, 电流随电压成比例变化, 这主要是由于此时忆阻器没有被触发, 其阻值保持在初始阻值. 结合图 1(d) 可以看出忆阻器 $v-i$ 曲线斜率受忆阻器初始阻值影响. 在图 1(c) 中, 当触发电压高于忆阻器阈值电压时, 忆阻器被触发, 忆阻器阻值达到最大最小值. 尽管此时触发电压持续作用, 但其阻值一直稳定于最大或最小值. 此外, 从图 1(d) 中可以看出忆阻器 $v-i$ 曲线并不唯一确定, 它取决于触发电压的幅值、频率及持续时间.

3 忆阻 PID 控制器硬件电路实现

本文设计的忆阻 PID 控制器硬件电路, 其设计思

想如图 2 所示.

在图 2 中, 可以看出忆阻 PID 控制器的设计过程就是将传统 PID 控制器硬件电路中的常规电阻更换为忆阻器, 当维持阀控忆阻器在特定的阻值时, 其输出为一特定值, 这也就对应了 PID 控制器参数中的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的值. 由于忆阻器的阻值可变性, 就可获得随需求变化的 K_p 、 K_i 和 K_d 的值. 然而, 改变忆阻器阻值时, 需附加忆阻器驱动电路, 使其阻值满足系统需求. 那么, 忆阻器驱动电路的设计就显得十分重要. 第 4 小节将对此方面给予重点说明.

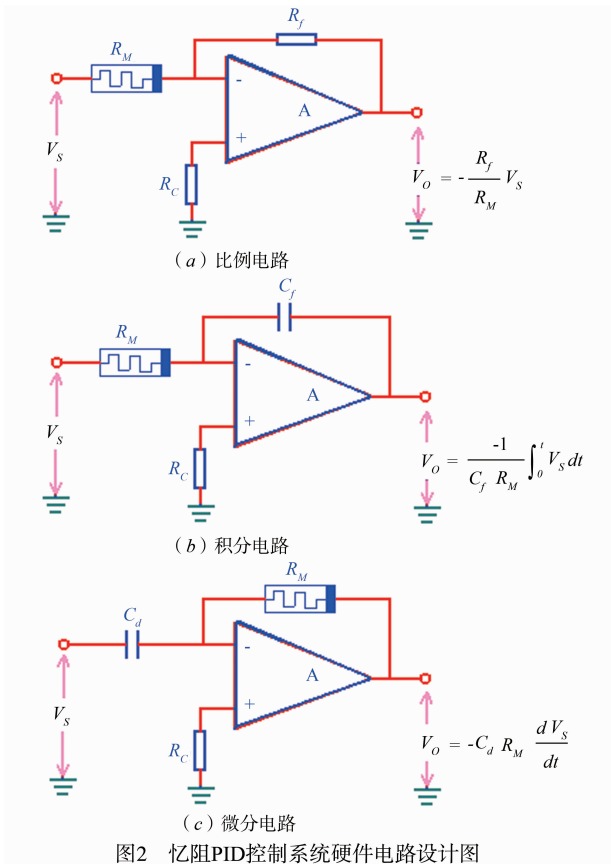


图2 忆阻PID控制系统硬件电路设计图

4 忆阻器控制电路设计

对于忆阻器的控制电路设计方法众多^[13,14]. 本文创新性的利用 CMOS 管自身的阈值开关电压, 将系统处于稳定状态时, 设定一个“零态”的范围, 避免系统的频繁波动. 其设计思路如图 3 所示.

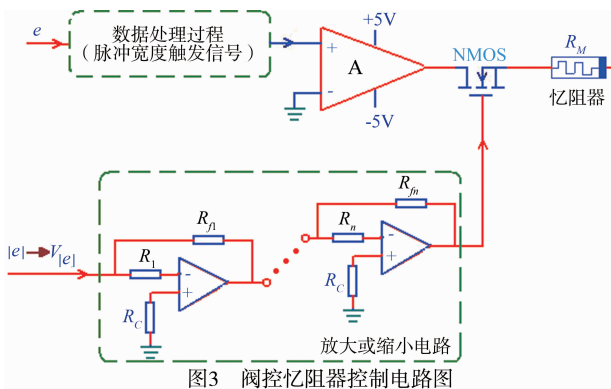


图3 阀控忆阻器控制电路图

从图 3 可知, 忆阻器控制电路有一个 N 沟道增强型 MOS 管, 一个运算放大器 A, 一个根据实际电路设计的级联式运算放大器以及一个根据误差值经过数据处理的脉冲宽度触发控制器. 所设计的驱动电路, 可以满足忆阻器的“正向”、“反向”、和“零态”(保持)三种状态的切换, 这在实时电路控制中十分关键.

为使 NMOS 管工作在恒流区, 在输入回路加栅极电压 V_{GG} , 他应大于 NMOS 管开启电压 $V_{GS(th)}$, 此时栅极电压由误差绝对值所产生电压 $V_{|e|}$ 通过级联式运算放大器获取.

$$V_{GG} = \xi V_{|e|} \quad (1)$$

式(1)中, ξ 为级联放大器放大或缩小的倍数.

为保证误差在一定范围内实时电路中工作在稳定状态, 此时需要 $V_{GG} < V_{GS(th)}$. 误差范围受级联运算放大器的控制, 当满足 $V_{GG} < V_{GS(th)}$ 时, NMOS 管不被触发, 处于断开状态, 也就是此时忆阻器的控制电路工作在“零态”区间的过程, 其“零态”区间的范围即为 $[-V_{GG}, V_{GG}]$. 作为控制电路的另一端输入误差的正负决定着运算放大器 A 工作于“正向”和“反向”的状态. 为正时, 运算放大器输出为 +5V; 反之, 为 -5V. 其触发阀控忆阻器的时序电路如图 4 所示.

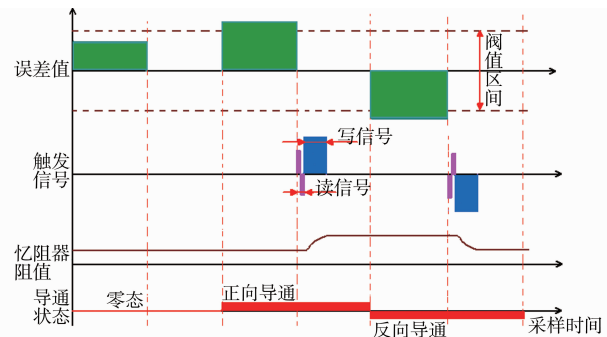


图4 忆阻器导通时序图

从图 4 可看出阀控忆阻器在阈值区间会保持“零态”运行, 一旦触发电压超过阈值, 阀控忆阻器将以“正向”或“反向”方式导通. 在导通过程中, 需对忆阻器进行读写操作. 为避免忆阻器在读过程对实时电路产生附带影响, 在读电压的选择上, 一般将其设定为忆阻器触发阈值电压以下, 在本文中选定触发电压为 4V, 正反向脉宽均为 0.5ns. 因此在读过程中, 忆阻器阻值未被改变, 只需测量流过的忆阻器的电流电压, 通过欧姆定律即可获取忆阻器阻值.

5 仿真分析

为更好观察设计忆阻 PID 控制器对二关节机械臂的控制特性, 本文将针对控制系统在阶跃响应和位置跟踪两个层面验证所提算法的可行性. 被控对象二关节机械臂根据其控制特性等效为一个三阶系统, 其表

达式为: $P(s) = \frac{1760}{s^3 + 45.6s^2 + 265s}$. 采样时间设定为

0.001s, 仿真时间为 0.5s. 忆阻器 PID 电路中 (如图 2), 忆阻器初值设定为 $R_{\text{mini}} = 5\text{k}\Omega$, 其他参数设定为: $R_f = 2.5\text{k}\Omega$, $C_f = 100\text{pF}$, $C_d = 33\text{pF}$.

5.1 阶跃响应

由于机械臂自身存在的非线性、时滞等的特征,

PID 控制算法只能在其某个平衡点及其邻域内使用,一旦超出系统极有可能崩溃.然而,即使在平衡点或其邻域内进行,其稳态及动态品质也不理想.利用本文设计的忆阻 PID 控制算法,可有效地改进这些性能,其仿真结果如图 5 所示.

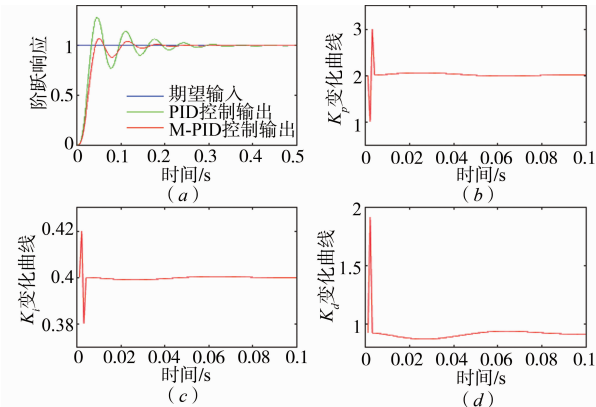


图5 M-PID控制器对三阶机械臂系统的阶跃响应

图 6 为以比例系数变化为例,描述了忆阻器控制电路中各个参数的变化情况.从图 6(a)中可以看出忆阻器的触发信号完成了本文对它的设计过程,在工作电路的采样间歇,实现了忆阻器读写信号的计算与给定.此时需要说明的是,忆阻器的触发信号相对于采样信号依然相当微小,图 6(a)中的忆阻器方波信号已被放大 1E3 倍,并对其每一步过程运用不同线条进行描述这样便于读者更直观的感受忆阻器的读写过程.图 6(b)给出了忆阻器的具体导通时间.图 6(c)给出了忆阻器阻值的变化过程,在此过程中也很好的验证了阀控忆阻器在阈值以内的阻值不变性及在阈值以外的阻值可变性.图 6(d)给出了忆阻器的阻值变化误差,它可以看出忆阻器在设定阈值以内具体什么阶段进行触发.

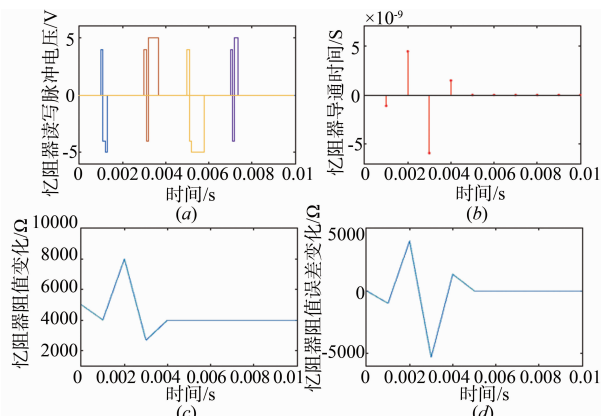


图6 阶跃响应下 K_p 系数忆阻硬件电路仿真曲线

5.2 位置跟踪

机械臂控制涉及两个关节处的位置和速度控制系统,本文选取某一关节处的位置信号(设定为 $24\sin(2\pi\omega t)$)作为仿真对象,研究其对位置跟踪的特性.图 7 为仿真结果.

从图 7(a)中可以看出,所设计的 M-PID 控制器可以较好的实现对位置的跟踪,M-PID 各参数实时变化以适应系统的需要.其变化曲线如图 7(b)、(c)、(d)所示.

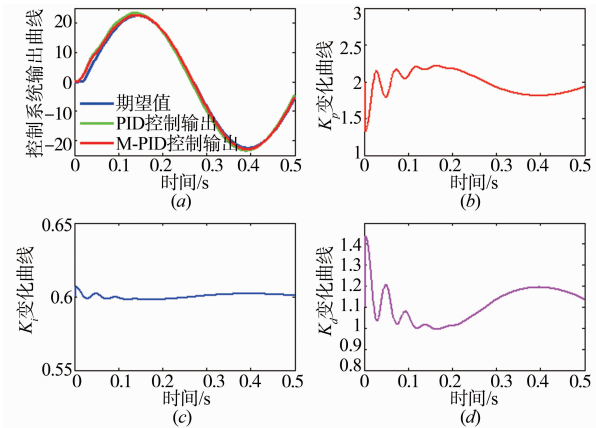


图7 M-PID控制器跟踪位置信号仿真结果

为验证设计忆阻器硬件电路的可行性,本文选取比例系数放大电路中的忆阻器控制系统和忆阻器的变化值为分析对象,其仿真结果如图 8 所示.

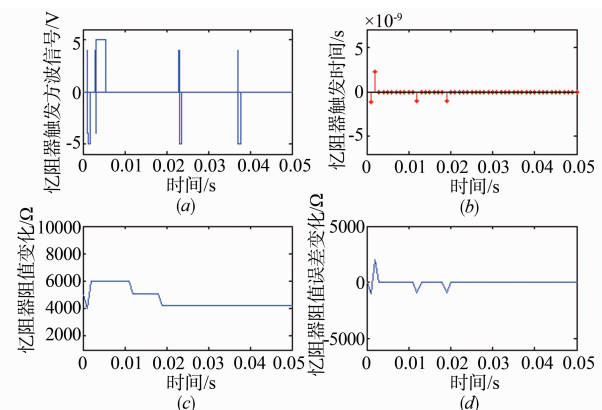


图8 比例系数忆阻硬件电路仿真曲线

从图 8 可以看出忆阻器控制电路在不同的忆阻器阻值误差率下的跟随过程.为更好的说明本文提出的具有创新性阈值忆阻器控制电路的设计以及级联放大电路对“零态”范围的控制作用.本文将文献[14]提出的忆阻器触发电路应用于二关节机械臂实时控制系统中,观察系统参数的变化,如图 9 所示.

从图 9 可以看出,“零态”严格定义在一个特定值时,会使忆阻器电路不断受到触发,这会引起系统的震荡.在实时控制系统中,为了避免控制参数的频繁切换,在满足二关节机械臂运行精度的情况下,需对忆阻器的“零态”进行一个范围规定,这样也可以消除由控制器频繁切换带来的系统震荡,这也是本文所提“零态”区间设定对机械臂控制系统的重要性所在.

6 结论与讨论

本文利用阀控忆阻器阻值自身特性,依据 PID 控

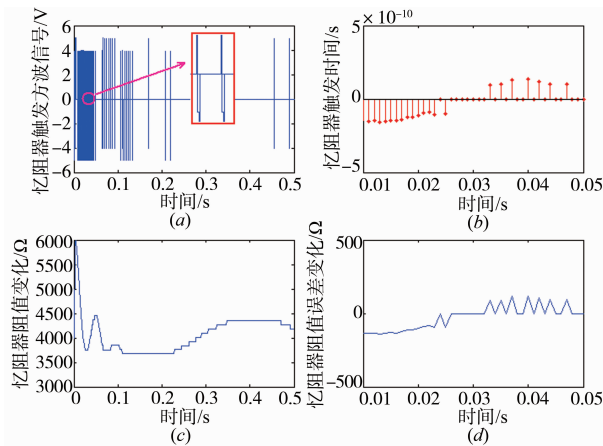


图9 无阈值“零态”比例系数仿真结果

制器常规设计规则,设计了基于忆阻器的 PID 控制器,并将其应用于二关节机械臂的控制系统中,仿真结果表明:所提算法可很好的改进机械臂系统的稳态特性及动态品质.本文主要贡献点在于:(1)创新性的设计了可用于实时系统的阀控忆阻器控制电路;(2)阐明了所提算法与目前高级算法驱动 PID 控制器的相似与不同之处;(3)为忆阻器在实时系统中应用提供了设计上的支持,并以二关节机械臂作为研究对象,验证了忆阻器在实时系统中应用的可行性.

参考文献

- [1] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008, 453(7191): 80–83.
- [2] 许烁,王阳,孙成恺,等.模块化可重构服务机器人任务规划[J].电子学报,2016,44(1):101–109. Xu Shou, Wang Yang, Sun Chengkai, et al. Mission planning for a team of modular and reconfigurable service robots[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 101–109. (in Chinese)
- [3] Khan S G, Jalani J. Realisation of model reference compliance control of a humanoid robot arm via integral sliding mode control[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, (7): 1–8.
- [4] Cui M, Liu W, Liu H, et al. Extended state observer-based adaptive sliding mode control of differential-driving mobile robot with uncertainties[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(12): 667–683.
- [5] Malki H, Misir D, Feigenspan D, et al. Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying loads[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1997, 5(3): 371–378.
- [6] Li T S, Duan S K, Liu J, et al. A spintronic memristor-based neural network with radial basis function for robotic manipulator control implementation[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2016, 46(4): 582–588.

- [7] 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. Xia Siwei, Duan Shukai, Wang Lidian, et al. Design of memristive neural network PID controller[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(12): 2577–2586. (in Chinese)
- [8] Zhong G, Deng H, Xin G, et al. Dynamic hybrid control of a hexapod walking robot: experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 1–1.
- [9] Pezeshki S, Badalkhani S, Javadi A. Performance analysis of a Neuro-PID controller applied to a robot manipulator[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(6): 1–10.
- [10] Pounds P E I, Dollar A M. Stability of helicopters in compliant contact under PD-PID control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(6): 1472–1486.
- [11] 武花干,包伯成,徐权.基于二极管桥与串联 RL 滤波器的一阶广义忆阻模拟器[J].电子学报,2015,43(10): 2129–2132. Wu Ganhua, Bao Bocheng, Xu Quan. First order generalized memristor emulator based on diode bridge and series RL filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10): 2129–2132. (in Chinese)
- [12] Pershin Y V, La F S, Di V M. Memristive model of amoeba learning[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2009, 80(1): 301–327.
- [13] Card H C, Schneider C R, Moore W R. Hebbian plasticity in MOS synapses[J]. Radar & Signal Processing Iee Proceedings F, 1991, 138(1): 13–16.
- [14] Soudry D, Castro D D, Gal A, et al. Memristor-based multilayer neural networks with online gradient descent training[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2015, 26(10): 1–13.

作者简介



刘 军 男,博士,讲师,1982 年生于安徽宿州.研究方向为忆阻器的智能控制系统设计.
E-mail:lcysj@swu.edu.cn



段书凯 男,博士,教授,博士生导师.1973 年生于重庆奉节.研究方向为智能信息处理、人工神经网络、非线性理论与电路、忆阻及忆阻系统等领域.
E-mail:duanshukai@swu.edu.cn