

改进的 RBF 神经网络 PID 算法在电磁振机中的应用

李丹, 翟震

(郑州大学 材料科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 为了减少实际工作生产环境对智能组合秤称量精度的影响, 增加电磁振动系统对环境的抗干扰性能。**方法** 用 RBF 神经网络 PID 算法改进组合秤中的电磁振动系统, 并在基础的 RBF 神经网络 PID 控制算法上引入动量因子的平方, 减少拟合误差和参数调节过程中的震荡现象。**结果** 与基础的 RBF 神经网络 PID 控制算法相比, 改进后算法的收敛速度更快, 拟合精确度更好; 当仿真长度增加时, 依然可以很好地逼近目标函数。**结论** 改进后的算法使电磁振机的振幅和振动频率更加稳定, 可以减少环境中噪音对其的干扰。

关键词: 电磁振动系统; RBF-PID; 动量因子; 自适应

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)07-0192-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.029

Application of Improved RBF Neural Network PID Algorithm in Electromagnetic Vibrating Machine

LI Dan, ZHAI Zhen

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the impact of the working production environment on the weighing accuracy of the intelligent combination scale and increase the anti-jamming performance of the electromagnetic vibration system to the environment. The RBF neural network PID control algorithm was used to improve the electromagnetic vibration system in the production process. And the square of the momentum factor was added to the basic RBF neural network PID control algorithm. The empirical accumulation of parameter changes was considered to reduce the parameter adjustment. Compared with the basic RBF neural network PID control algorithm, the improved algorithm had faster convergence speed and better fitting accuracy. When the simulation length increased, the target function could still be well approximated. The improved algorithm makes the amplitude and vibration frequency of the electromagnetic vibration machine more stable. It can reduce the interference of noise in the environment.

KEY WORDS: electromagnetic vibration system; RBF-PID; momentum factor; self-adaptive

智能组合秤是公认的精度高和速度高的一种称量工具, 现在已经被广泛地应用于不同生产领域, 比如针对药材、糖果、蔬菜等形状不规则、质量分布不均匀的产品进行称量。近几年, 我国在智能组合秤的研究上取得了很大的进展, 但是仍然处于中下阶段,

存在称量精度不高、产品合格率低等情况^[1-3], 很多的专家学者主要从硬件和软件的角度来提升组合秤的称量性能。电磁振动给料器^[4] (简称电磁振机) 是组合秤系统中主要的一个部分, 它在很大程度上可以决定组合秤的称量速度和组合误差。电磁振机的

收稿日期: 2018-10-19

作者简介: 李丹 (1993—), 女, 郑州大学硕士生, 主攻包装机械。

通信作者: 翟震 (1968—), 男, 硕士, 郑州大学副教授, 主要研究方向为包装机械。

工作主要通过振动系统, 将物料从振动盘中均匀进入缓存斗中^[5], 然后再进行称量、卸料和包装等一系列的工作。

电磁振机一般为开环的可控硅流控制, 但需要工作人员在现场根据实际的生产需求进行振动的幅度和频率的调整, 对电磁振机的调整主要是改变交流电的导通角的大小来控制电压的大小, 从而达到控制电磁振机的振动幅度。在实际生产过程中, 很多外在的因素都会对振动的幅度产生影响, 如: 机器的老化状态, 周围环境噪音的干扰以及被称量的物料的形狀等^[6]。面对这些外在的干扰, 系统并不能做到自动调节和屏蔽干扰^[7], 振幅的不稳定对整个称量过程带来很大的影响, 因此电磁振动系统可以自动调整参数或者屏蔽外来的干扰来适应称量的要求非常重要。

1 电磁振机的 RBF-PID 控制器设计

电磁振机一般采用 PID 控制系统^[8], 这是由于 PID 控制系统结构简单^[9], 但是其过度依赖数学模型, 难以适应时变性和非线性的系统, 其控制参数需要人工不断地进行调整, 这个过程不仅浪费时间还会造成原料的浪费。针对传统 PID 存在的问题, 专家学者们用各种智能算法对其进行改进, 如用自适应模糊算法对其改进^[10-11], 使其具有更好的动态响应性能; 模拟退火算法^[12]用以增加系统的控制性能; 神经网络算法^[13-14]增强系统的控制效果等, 也都获得了不错的结果。

RBF 神经网络 PID 控制算法是将传统 PID 控制与 RBF 径向基神经网络智能算法相结合的一种控制算法, 系统即使不知道被控制对象的具体模型, 也可以自动调整 PID 的控制参数, 这很好地弥补了 PID 控制系统的不足。RBF 神经网络^[15]具备很强的自学习性能并且可以在任意精度下逼近非线性函数, 控制系统整定算法调整 PID 的控制参数主要是利用 RBF 神经网络的非线性映射能力, 在线辨识被控对象的模型。文中对基础的 RBF 神经网络 PID 控制算法进行改进, 使系统具有更快的收敛速度、更强的适应性和抗干扰性能。

1.1 PID 控制

目前很多的电磁振机控制系统采用传统 PID 控制, 参数的整定一般选用增量式控制器, 只需调节积分、微分和比例的大小, 便可达到优化的效果。

增量 PID 控制算法:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p(k-1)x_{c1}(k) + \\ &K_i(k-1)x_{c2}(k) + K_d(k-1)x_{c3}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: K_p , K_i , K_d 为 PID 控制器的调节参数。

$$\begin{cases} e_c(k) = r(k) - y(k) \\ x_{c1}(k) = e_c(k) = e_c(k) - e_c(k-1) \\ x_{c2}(k) = e_c(k) \\ x_{c3}(k) = e_c(k) - 2e_c(k-1) + e_c(k-2) \end{cases} \quad (2)$$

则控制律: $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 。

PID 参数的调整采用梯度下降法, 具体公式为:

$$\begin{cases} \Delta K_p(k) = -\eta_c \frac{\partial E_c(k)}{\partial K_p(k-1)} = \eta_c e_c(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} x_{c1}(k) \\ \Delta K_i(k) = -\eta_c \frac{\partial E_c(k)}{\partial E_j(k-1)} = \eta_c e_c(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} x_{c2}(k) \\ \Delta K_d(k) = -\eta_c \frac{\partial E_c(k)}{\partial E_d(k-1)} = \eta_c e_c(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} x_{c3}(k) \end{cases} \quad (3)$$

则 PID 参数的学习算法为:

$$\begin{cases} K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_d(k-1) + \Delta K_d(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: η_c 为学习速率; ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 分别为 PID 的 3 个参数的调整量。

1.2 RBF 神经网络算法

RBF 神经网络包括 3 部分: 输入层、隐含层和输出层。输入层和隐含层之间为非线性映射, 隐含层到输出层之间为线性传播。在 RBF 神经网络中, 输入层的节点决定了隐含层神经元的数量, 设第 i 个样本点的输入向量为 $X_i(i=1, 2, \dots, n)$, 选取高斯基函数为隐藏层的激励函数, 主要是因为高斯基函数结构简单、对称性好, 其表达式为:

$$R_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

那么网络的输出为:

$$f(x) = \sum_{j=1}^m \omega_j(k-1) R_j(x(k)) \quad (6)$$

网络学习过程中, ω_j 为隐含层第 j 个神经元的输出权值; b_j 为基宽; $R_j(x)$ 为高斯函数; c_{ji} 为指隐含层中第 j 个神经对应于输入层第 i 个神经元的中心矢量。对于 c_{ji} , b_j , ω_j 的参数迭代调整采用梯度下降法。

网络辨识性能指标函数为:

$$E(k) = 0.5[r_{in}(k) - y_{out}(k)]^2 \quad (7)$$

1.3 改进的 RBF-PID 控制器

利用 PID 和 RBF 神经网络的优点, 用 RBF 来调节 PID 的参数。整个控制系统主要可分为 2 个部分。

1) RBF 神经网络控制。输入的参数可以对网络的权值进行动态调整, 并为系统提供 Jacobian 信号。

2) PID 控制。控制器可以进行闭环控制, 通过

RBF 提供的 Jacobian 信号对 PID 的 3 个参数 K_p , K_i , K_d 进行在线整定。

用 Matlab 对基础的 RBF 网络 PID 算法编写 M 文件发现,随着仿真长度的增加,算法拟合的速度逐渐减慢并出现错误,不再产生 Jacobian 信息值, PID 的参数也不再发生调节,系统出现差错。分析算法发现用梯度下降法去调节参数的过程中只是简单考虑了一个具体时刻的参数变化,并未考虑到之前参数调整得到的经验积累,因此出现震荡,拟合速度减慢。对于这种状况,很多学者对其进行改进,比如加入动量因子或者加入动量项,虽然也取得了不错的效果,但是对于仿真长度增加系统不再出现拟合的现象仍然没有解决。文中主要是在 RBF 网络参数调节中加入动量因子的平方,根据误差的改变量来确定梯度下降法在调节中所起的作用。

具体算法如下:

$$\begin{cases} \Delta x(k) = \alpha^2 \Delta x(k-1) + [-\eta(1-\alpha^2) \frac{\partial E(k)}{\partial x(k-1)}] \\ x(k) = x(k-1) + \Delta x(k) \end{cases} \quad (8)$$

则 $\Delta \omega_j(k)$, $\Delta b_j(k)$, $\Delta c_{ji}(k)$ 变成:

$$\begin{cases} \Delta \omega_j(k) = \alpha^2 \Delta \omega_j(k-1) + \eta(1-\alpha^2) e(k) R_j(x(k)) \\ \Delta b_j(k) = \alpha^2 \Delta b_j(k-1) + \eta(1-\alpha^2) \cdot \\ \quad e(k) \omega_j(k-1) R_j(x(k)) \frac{\|x(k) - c_j(k-1)\|^2}{b_j^3(k-1)} \\ \Delta c_{ji}(k) = \alpha^2 \Delta c_{ji}(k-1) + \eta(1-\alpha^2) \cdot \\ \quad e(k) \omega_j(k-1) R_j(x(k)) \frac{\|x(k) - c_{ji}(k-1)\|^2}{b_j^2(k-1)} \end{cases} \quad (9)$$

则 RBF 参数的学习算法为:

$$\begin{cases} b_j(k) = b_j(k-1) + \Delta b_j(k) \\ \omega_j(k) = \omega_j(k-1) + \Delta \omega_j(k) \\ c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \Delta c_{ji}(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: η 为学习率。

动量因子 α 的具体取值如下所示:

$$\alpha = \begin{cases} 0.95 & E(k) > 0.04 \Delta E(k-1) \\ 0 & \Delta E(k-1) < 0 \\ 0.9 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

计算 PID 参数时,需要用到 $\frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)}$ ((称为

Jacobian 信息), Jacobian 信息无法直接得到,由于被控对象的具体模型未知,通过做近似处理得到:

$$\frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j(k-1) \frac{\partial R_j(x(k))}{\partial u(k)} =$$

$$\sum_{j=1}^m w_j(k-1) R_j(x(k)) \frac{c_{ji(n_j+1)}(k-1) - u(k)}{b_j^2(k-1)} \quad (12)$$

该分量即为 RBF 网络辨识所得系统 Jacobian 信息; η_c 为学习速率; ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 分别为 PID 的 3 个参数的调整量。

电磁振动给料机振动控制系统见图 3。 $r_{in}(k)$ 为设定输入值; $e(k)$ 为控制偏差值; $y_{out}(k)$ 为被控对象输出; $y_{mout}(k)$ 为网络输出值。

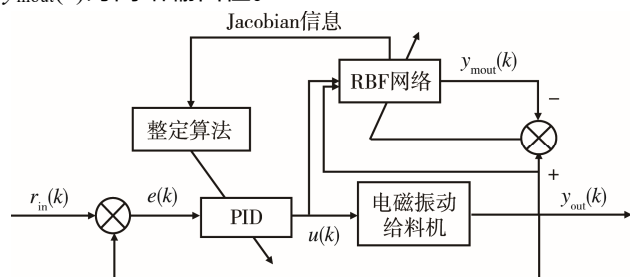


图 1 基于 RBF 整定的 PID 控制系统结构

Fig.1 Structure of PID control system based on RBF setting

当误差有增大的趋势时,动量因子起了主要的调节作用,增加了之前参数的修正量在参数调节的过程中起的作用;当误差增长过快时,增加梯度下降法的作用。参数变化过快时,加入的动量因子可以使修正量减小,网络参数在沿梯度变化的方向上有一定的惯性,有很好的抗震荡作用,可以避免参数修正过程中超调现象的出现,并且可以解决当仿真长度增加系统出现错误的现象。

1.4 改进 RBF 网络 PID 控制流程

改进 RBF 网络 PID 控制流程见图 2。

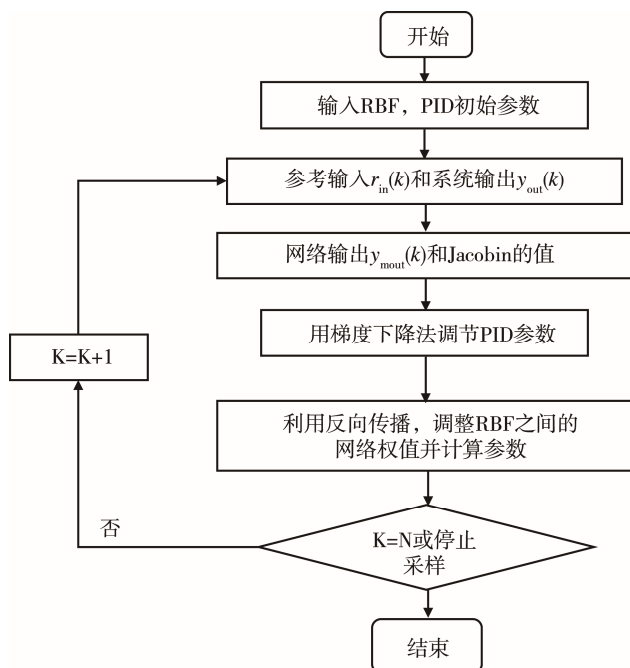


图 2 改进 RBF 网络 PID 控制流程

Fig.2 Flow chart of improved RBF network PID control

2 电磁振机的单片机控制设计

控制系统用单片机 MCS51 系列中的 8031 进行开发, 扩展程序存储器 27128 和译码器 74LS138, 此外选用 AD C574 和 DA C1210 作为数模转化器, 用 8155 扩展键盘。具体的单片机控制接口图见图 3。

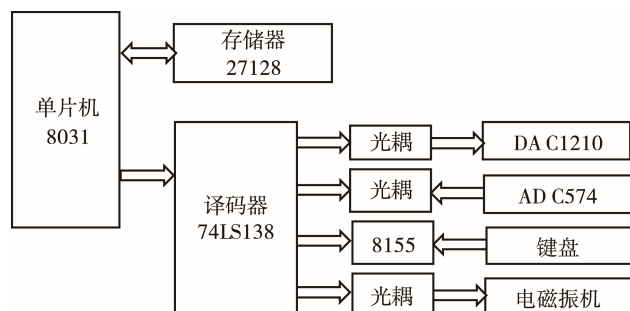


图 3 单片机控制接口

Fig.3 Diagram of microcontroller control interface

反馈值经过 A/D 将模拟的信号转化成数字信号可以求出误差, 然后通过 D/A 重新转化成模拟信号, 调节相应的参数, 控制执行机构, 从而达到控制效果, 系统闭环控制见图 4。

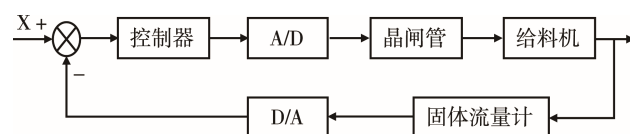


图 4 系统闭环控制

Fig.4 Diagram for closed-loop control of system

2 Matlab 仿真实验

为了验证改进后 RBF-PID 控制器对电磁振机的控制效果, 将改进后的控制方法与基础的 RBF-PID 方法以及传统的 PID 控制进行比较。将被控对象设置为以下的非线性系统:

$$y_{\text{out}}(k) = -0.1y_{\text{out}}(k-1) + \frac{u(k-1)}{1 + y_{\text{out}}(k-1)^2} \quad (13)$$

输入指令信号为:

$$r_{\text{in}}(t) = 1.0 \operatorname{sgn}(\sin(2\pi t)) \quad (14)$$

通过 Matlab 对以上的几种方法进行仿真。RBF 网络选用 3-6-1 的结构, $u(k)$, $y_{\text{out}}(k)$, $y_{\text{out}}(k-1)$ 分别为输入层的 3 个输入参数, $y_{\text{mout}}(k)$ 为输出值, 取 RBF 学习速率为 0.3。取 PID 学习速率为 0.2, PID 得 3 个参数的为 $K_p=0.03$, $K_i=0.01$, $K_d=0.03$, 采样周期 $t=0.001$ s。并在 $t=0.8$ s ($k=800$) 时加入了干扰信号 $u(k)=u(k-1)+1$ 。得到的控制效果见图 5。

通过分析可以得到在 RBF 学习速率为 0.3 时, RBF 神经网络 PID 系统与传统 PID 相比, 可以更快、准确地逼近被控对象; 在 $t=0.8$ s 处加入了干扰

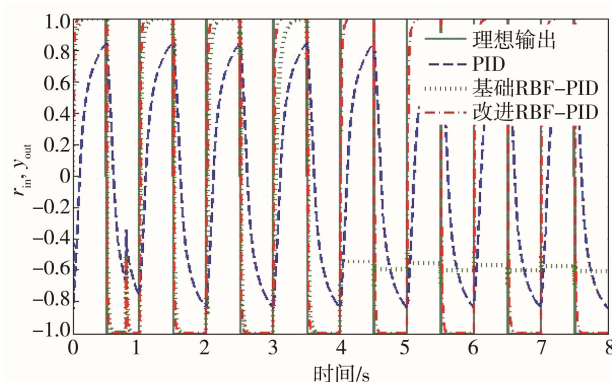


图 5 3 种控制方法的控制效果与网络的拟合效果

Fig.5 Control effect of three control methods and fitting effect of network

信号, RBF-PID 系统可以很快地整合恢复, 比传统的 PID 的抗干扰能力更强。改进后的 RBF 神经网络 PID 系统和基础的系统比逼近速度更快, 拟合后的误差更小, 系统更加稳定。当仿真长度增加时, 基础的系统出现错误, 不能再调节 PID 的参数, 改进后的系统很好地解决了这一问题。

3 结语

针对电磁振机震动过程中的问题, 文中分析了传统 RBF 神经网络 PID 算法的优劣, 提出在 RBF 算法中加入动量因子的平方, 前几次参数经验积累加入考虑, 改进后的算法可以减小修正量, 避免参数调节过程中出现超调现象。

仿真结果表明, 改进后的算法克服了常规 PID 控制算法的不足, 提高了 PID 控制器的控制精度和收敛速度, 具有较强的抗干扰和自适应能力, PID 参数很好地适应了环境的变化, 控制效果较好; 很好地解决了算法调节的震荡问题, 仿真长度增加也不会出现 PID 参数不调的现象, 这样可以更好地适应于组合秤的电磁震动系统。

设计了电磁振机的单片机控制系统, 系统采用了性能较好的 MCS51 单片机, 通过验证发现改进后的算法具有较好的稳定性, 电磁振机的振幅受环境的影响较小。

参考文献:

- [1] 权小青. 我国智能组合秤市场发展分析[J]. 衡器, 2012, 41(12): 1—3.
QUAN Xiao-qing. Analysis of the Development of Intelligent Combination Scale Market in China[J]. Weighing Instrument, 2012, 41(12): 1—3.
- [2] 袁梦, 刘萍, 余勃, 等. 组合秤包装生产线分布式监控系统的软件设计[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 10—12.

- YUAN Meng, LIU Ping, SHE Bo, et al. Software Design of Distributed Monitoring System for Combination Scale Packaging Production Line[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 10—12.
- [3] IMAHORI S, KARUNO Y, NAGAMUCHI H, et al. Kansei Engineering, Humans and Computers: Efficient Dynamic Programming Algorithms for Combinatorial Food Packing Problems[J]. International Journal of Biometrics, 2011, 3(3): 228—245.
- [4] 张军光. 电磁振动给料机的发展与控制方式探讨[J]. 城市建设理论研究, 2014(11): 201—201.
- ZHANG Jun-guang. Discussion on the Development and Control of Electromagnetic Vibrating Feeder[J]. City Construction Theory Research, 2014(11): 201—201.
- [5] 骆有东. 电磁振动给料器的性能及控制研究[J]. 包装工程, 2005, 26(4): 54—55.
- LUO You-dong. Research on Performance and Control of Electromagnetic Vibration Feeder[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(4): 54—55.
- [6] 郝晓琳, 李志华. 电磁振动给料机在配料称量系统中的应用分析[J]. 橡塑技术与装备, 2005, 31(10): 41—44.
- HAO Xiao-lin, LI Zhi-hua. Application Analysis of Electromagnetic Vibrating Feeder in Batching Weighing System[J]. Rubber Technology & Equipment, 2005, 31(10): 41—44.
- [7] 顾平灿. 电磁振动给料器给料速度的研究[J]. 机电工程, 2012, 29(7): 790—794.
- GU Ping-can. Research on Feeding Velocity of Electromagnetic Vibrating Feeder[J]. Mechanical Engineering, 2012, 29(7): 790—794.
- [8] 万文, 熊震江. 电磁振动给料机的PID控制[J]. 矿山机械, 2006(5): 55—56.
- WAN Wen, XIONG Zhen-jiang. PID Control of Electromagnetic Vibrating Feeder[J]. Mining Machinery, 2006(5): 55—56.
- [9] ATTARAN S M, YUSOF R, SELAMAT H. A Novel Optimization Algorithm Based on Epsilon Constraint-RBF Neural Network for Tuning PID Controller in Fecoupled HVAC System[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 613—624.
- [10] 周海涛, 周建华, 杭小宇. 基于自适应模糊PID控制方法的研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(3): 139—141.
- ZHOU Hai-tao, ZHOU Jian-hua, HANG Xiao-yu. Research on Adaptive Fuzzy PID Control Method[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(3): 139—141.
- [11] 杜汉强, 张广文. 基于模糊自适应PID控制器的张力控制系统[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 90—91.
- DU HAN-qiang, ZHANG Guang-wen. Tension Control System Based on Fuzzy Adaptive PID Controller[J]. Journal of Packaging Engineering, 2008, 29(1): 90—91.
- [12] 于瀛, 杨世忠, 衡丽帆. 遗传模拟退火整定PID算法的应用仿真研究[J]. 自动化应用, 2018(3): 70—72.
- YU Ying, YANG Shi-zhong, HENG Li-fan. Application Simulation of Genetic Simulated Annealing PID Algorithm[J]. Automation, 2018(3): 70—72.
- [13] ZHANG M G, LI W H, LIU M Q. Adaptive PID Control Strategy Based on RBF Neural Network Identification[C]// International Conference on Neural Networks and Brain, Icn&b IEEE, 2005: 1854—1857.
- [14] 申超群, 宰守香. 基于RBF-PID的啤酒灌装贮液缸内液位控制[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 45—48.
- SHEN Chao-qun, ZAI Shou-xiang. Liquid Level Control in Liquid Storage Tank of Beer Filling Machine Based on RBF-PID[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 45—48.
- [15] LIN F J, HSIEH H J, CHOU P H, et al. Digital Signal Processor-based Cross-coupled Synchronous Control of Dual Linear Motors via Functional Link Radial Basis Function Network[J]. Iet Control Theory & Applications, 2012, 5(4): 552—564.