

doi: 10.7690/bgzdh.2018.11.007

# 神经网络自组织模糊控制在同步收集装置的应用

陈 斌, 王茂森, 戴劲松, 邵长旭

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为提高多电机运行的同步性以及冲击干扰下电机控制的快速反应和鲁棒性, 提出将神经网络的自组织模糊控制融合进环形耦合控制策略中。建立同步收集装置的控制模型, 给出环形耦合控制结构, 分析传统 PID 控制和传统模糊控制的缺陷, 并通过实验验证。实验结果表明, 融合有神经网络模糊控制策略的环形耦合控制具有更高的同步性和鲁棒性。

**关键词:** 永磁同步电机; 环形耦合; 多电机同步; 神经网络自组织模糊控制

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Application of Neural Network Self-organizing Fuzzy Control in Synchronous Collecting Device

Chen Bin, Wang Maosen, Dai Jinsong, Shao Changxu

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the synchronization of multi-motor operation and the fast response and robustness of motor control under impact disturbance, the neural network self-organizing fuzzy control is integrated into the ring coupling control strategy. The control model of synchronous collecting device and the ring coupling control structure are established, the defects of traditional proportional-integral-derivative (PID) control and traditional fuzzy control are analyzed and verified by experiments. The experimental results show that the ring coupling control with neural network fuzzy control strategy has higher synchronization and robustness.

**Keywords:** PMSM; ring coupling; multi-motor synchronization; NNSOC

### 0 引言

在速度同步研究中, 已有学者提出了许多控制策略。在主从结构中, 输入的从属电机是主电机的输出, 但负载转矩的干扰可能导致速度跟踪误差较大<sup>[1]</sup>。刘然等<sup>[2]</sup>提出了采用并行交叉耦合控制, 即通过共享 2 个控制回路的反馈信息来解决这个问题。但当同步电动机的数量  $n > 2$  时, 平行交叉耦合控制是不适用的, 因为控制结构难以确定<sup>[3]</sup>。佩雷斯<sup>[4]</sup>提出了适用的同步电机数量  $n > 2$  的相对交叉耦合控制方法, 但需要在线计算一个  $n$  维的方阵, 如果系统  $n$  的规模大, 则控制结构太复杂且难以计算。虚拟总轴技术模拟机械总轴的原理, 使得各个电机的速度朝减小该电机与其他电机速度差的方向变化<sup>[5]</sup>。但虚拟总轴的系统输入信号需经虚拟总轴后得到各个电机的参考信号, 导致电机参考信号与系统输入信号不一致, 单机精度变差, 同步精度也随着下降<sup>[6]</sup>。笔者提出将神经网络的自组织模糊控制融合进环形耦合控制策略中, 既具有模糊控制的鲁棒性, 又具有神经网络的自学习和记忆联想功能。

### 1 同步收集装置

如图 1 所示, 收集装置位于某模拟装填平台中。模块药通过时, 身管开合装置打开, 模块药经收集通道下落至同步传送带上, 传送带将 6 个模块药收集移送到收集仓中, 根据供弹速度的变化, 要求传送带的传送速度可调。同时为了保证落下的模块药被及时移走, 防止下一发落下的模块药将其砸坏, 破坏模块药的完整性, 保证模块药下落的位置安全可靠, 需要确保模块药下落冲击的瞬间, 传送带不会失同步, 该模拟平台适用于多型号弹药的模拟装填, 所以要求多电机系统既具有高度的同步性, 还应具有一定的鲁棒性, 以适应不同范围的冲击。

传送带由多台电机同步控制转速, 现有的控制策略采用环形耦合和传统 PID 或传统模糊控制结合的多电机同步控制策略。该控制策略适用于负载波动小的传输场景, 当负载变化剧烈时, 系统的调整时间长, 响应速度慢。笔者提出的神经网络自组织模糊控制经过线下训练后, 在面对样本范围内的负载变化时响应迅速, 能在面对样本中未出现的大负

收稿日期: 2018-08-26; 修回日期: 2018-10-11

作者简介: 陈 斌(1993—), 男, 江苏人, 硕士, 从事机电系统智能化与灵巧化研究。

载时，联想出相应的输出。

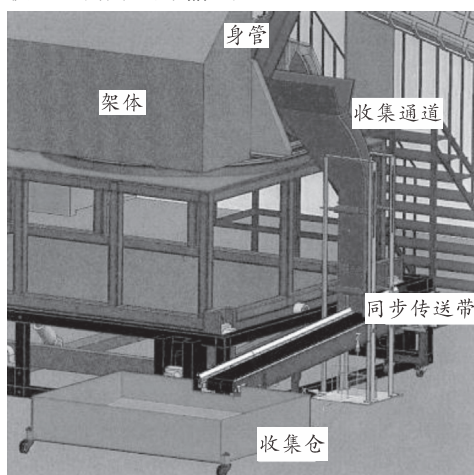


图 1 模块药收集装置结构

## 2 环形耦合控制

### 2.1 环形耦合控制结构

环形耦合控制是在同等方式的基础上建立起各个单元之间的速度补偿形成的，为了使系统中的被控对象能够协调与运行，环形耦合控制策略同时考虑了被控对象的输出与给定输出之间的误差关系以及相邻单元之间的输出误差关系<sup>[7]</sup>。环形耦合控制策略是基于给定的控制信号加上各自误差补偿的思想形成的<sup>[8]</sup>。采用环形偏差耦合控制结构时，每台电机要考虑自身速度  $\omega_i$  与给定速度  $\omega_0$  之间的跟踪误差  $e_i(t)$  和与其相邻的上一台电机速度  $\omega_{i+1}$  之间的同步误差  $\varepsilon_i(t)$ 。

$$e_i(t) = \omega_0(t) - \omega_i(t); \quad (1)$$

$$\varepsilon_i(t) = \omega_i(t) - \omega_{i+1}(t)。 \quad (2)$$

经过环形耦合补偿后的误差为：

$$E_i(t) = e_i(t) - K_i * \varepsilon_i(t)。 \quad (3)$$

控制器的设计目的是使跟踪误差及同步误差  $e_i(t)$  和  $\varepsilon_i(t)$  趋于 0。

第 1 台电机的同步误差为第 1 台电机与最后一台电机的转速差，由此将转速同步差形成一个环形闭环。冲击载荷时，闭环中任一电机的转速发生变化导致多电机失同步时，都会导致电机及相邻电机的速度发生变化，并依次传导给相邻电机，调整后减少整体同步误差。

如图 2 所示，环形耦合控制还可与现代控制理论，如模糊控制、神经网络控制、自适应控制等相结合，从而改善多电机系统的同步性和鲁棒性，有一定的工程应用价值。

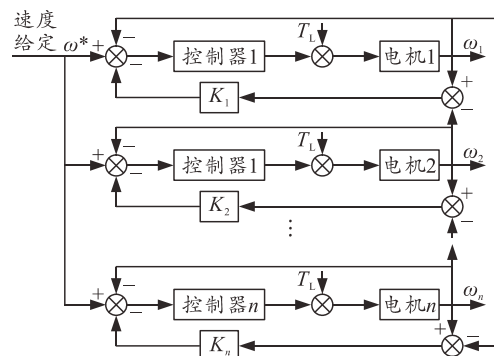


图 2 环形耦合控制结构

### 2.2 传统 PID 控制和传统模糊控制的缺陷

永磁同步电机闭环控制中，传统 PID(比例、积分和微分)控制原理简单、使用方便、适应性强，可以广泛应用于各种工业过程控制领域。但是 PID 控制器也存在一些问题，如参数调节需要一定过程，最优参数选取比较麻烦。由于负载的变化以及电机参数的摄动等因素影响，使得传统 PID 对多台电机的同步控制效果仍不尽理想<sup>[9-10]</sup>。合理的 PID 参数通常由经验丰富的技术人员在线整定，对一些系统参数会变化的过程，PID 控制就无法有效地对系统进行在线控制，不能满足在系统参数发生变化时，PID 参数随之发生相应改变的要求，严重影响控制效果。

模糊算法具有很强的自适应性，能够根据外界条件的变化自动修正 PID 的控制参数<sup>[11]</sup>。但由于操作人员或设计者经验的局限性，传统模糊控制器的设计无法保证达到最优或次优控制性能。同时模糊规则表占据大量内存，查表速度慢，只能根据现有规则控制，不够理想。为此笔者提出将神经网络与模糊控制结合，为模糊控制器提供好的学习功能，自动生成模糊规则。

## 3 基于神经网络的自组织模糊控制

基于神经网络的自组织模糊控制(neural network self organizing fuzzy control, NNSOC)，省去了显式的规则搜索和推理，将规则隐含地分布于神经网络中，通过高速并行的分布计算即可产生结果<sup>[12]</sup>。将 NNSOC 应用于速度 PID 控制中，可提高控制的响应速度。

相对于传统模糊控制，基于神经网络的自组织模糊控制具有以下特点：

- 1) 可以直接从经验中获取知识，自动建立模糊规则和隶属函数；
- 2) 无须查表，节省内存；

3) 具有较强的适应能力和联想能力, 甚至可以通过记忆对未出现的样本联想出合适的输出值, 得到控制器的控制量。

NNSOC 的系统结构如图 3 所示。

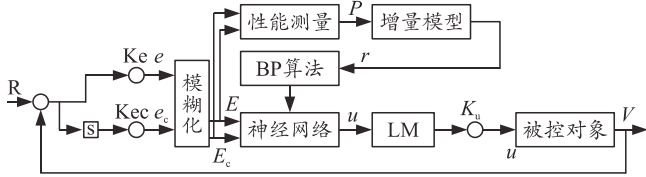


图 3 NNSOC 系统结构

控制规则通过一个神经网络执行, 如图 4 所示。输入层输入相邻 2 台电机的速度差  $\Delta v$  及速度差  $\Delta v'$  的变化率模糊子集, 输出层为 PID 输出控制量的模糊子集, 将样本依次送入神经网络进行离线训练, 训练结束后, 网络可以记忆模糊控制的规则。规则修正通过 BP 算法实现, 如图 5 所示。

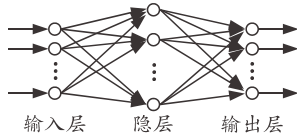


图 4 生成速度控制规则的神经网络

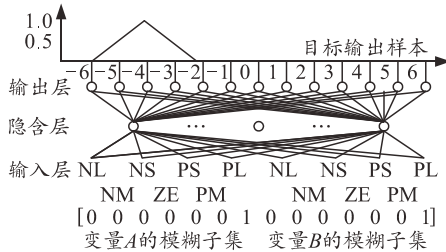


图 5 BP 网络模糊控制器结构

电机速度的神经网络模糊控制是利用离线训练好的网络, 通过在线计算得到最佳控制输出。通过速度传感器得到速度和速度变化率, 根据速度和变化率划分模糊论域和模糊子集, 利用神经网络对样本进行离线训练, 并记忆模糊规则, 产生对应的控制输出。该控制方法反应速度快, 使得电机速度调节响应迅速。

整个神经网络模糊自组织的控制过程为:

- 1) 学习样本表 2;
- 2) 离线训练, 记忆模糊控制“规则库”;
- 3) 采样, 计算  $e(t)=v_1-v_2$ ,  $e_c(t)=e(t)-e(t-1)$ ;
- 4) 控制量  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  修正, 转 3) 继续修正。

网络经过训练后, 待目标误差达到精度要求, 网络性能满足控制要求后, 进行后续采样和控制修正。

### 4 实验

实验中对转速差进行采样, 采用数据通过

Matlab 进行训练。电机同步运行模型采用 Matlab/Simulink 建立, 实现动态系统建模、仿真和分析。以  $K_p$  为例, 对  $K_p$  进行离线训练, 通过样本将参量模糊化, 得到参量的模糊量。

根据 Kolmogorov 定理, 输入层  $E$  和  $E_c$  有 8 个节点, 中间层有 17 个节点, 输出层  $K_p$  有 4 个节点, 步数为 500, 目标误差 0.001, 训练函数采用“traindx”。该函数是动量及自适应 IrBP 的梯度递减训练函数, 训练速度快, 学习效率自适应, 在对样本学习的过程中采用 traindx 函数, 有助于提高响应速度并应对未知的冲击情况。

样本如表 1 所示, 控制规则如表 2。

表 1 输入参量及模糊量

输入量	数值
同步速度差 $E$	NB -8.702 -6.302 -5.702 -4.3
	NM -5.7 -4.3 -3.7 -2.2
	NS -3.7 -2.2 -1.8 -0.2
	Zero -1.87 -0.2 -0.2 -1.8
	PS 0.2 1.8 2.2 3.8
	PM 2.2 3.8 4.2 5.8
	PB 4.2 5.702 6.302 8.702
速度差变化率 $E_c$	NB -8.698 -6.3 -5.7 -4.2
	NM -5.8 -4.2 -3.8 -2.2
	NS -3.8 -2.2 -1.8 -0.2
	Zero -1.8 -0.2 0.2 1.8
	PS 0.2 1.8 2.2 3.8
	PM 2.2 3.8 4.2 5.8
	PB 3.8 5.7 6.3 8.698
$K_p$	NB -12.45 -10.4 -9.45 -6.9
	NM -9.9 -6.8 -6.3 -3.2
	NS -6.003 -3.3 -2.8 -0.15
	Zero -2.8 -0.25 0.25 3.15
	PS 0.25 3.15 3.65 6.15
	PM 3.65 6.15 6.65 9.75
	PB 7.1 9.6 10.4 14.5

表 2  $K_p$  控制规则

$E_c$	$E$						
	NB	NM	NS	Zero	PS	PM	PB
NB	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB
NM	NS	NS	PS	PM	PB	PB	PB
NS	NM	NM	NS	PS	PM	PB	PB
Zero	NM	NM	NM	Zero	PM	PM	PM
PS	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PM
PM	NB	NB	NM	NS	PS	PS	PS
PB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS

对样本数据归一化后送入网络进行训练, 训练后误差小于 0.001, 说明网络性能可以满足要求。训练结果如图 6 所示。

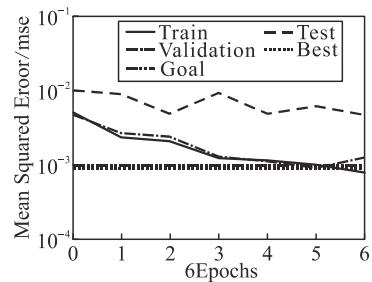


图 6 训练结果

建立 3 台电机同步运行的模型，如图 7。电机间采用同步环形偏差耦合控制同步误差，转速差中融合基

于神经网络的自组织模糊算法修正  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 。同步电机速度设为 1 500 r/min，电机参数根据实际参数设置。

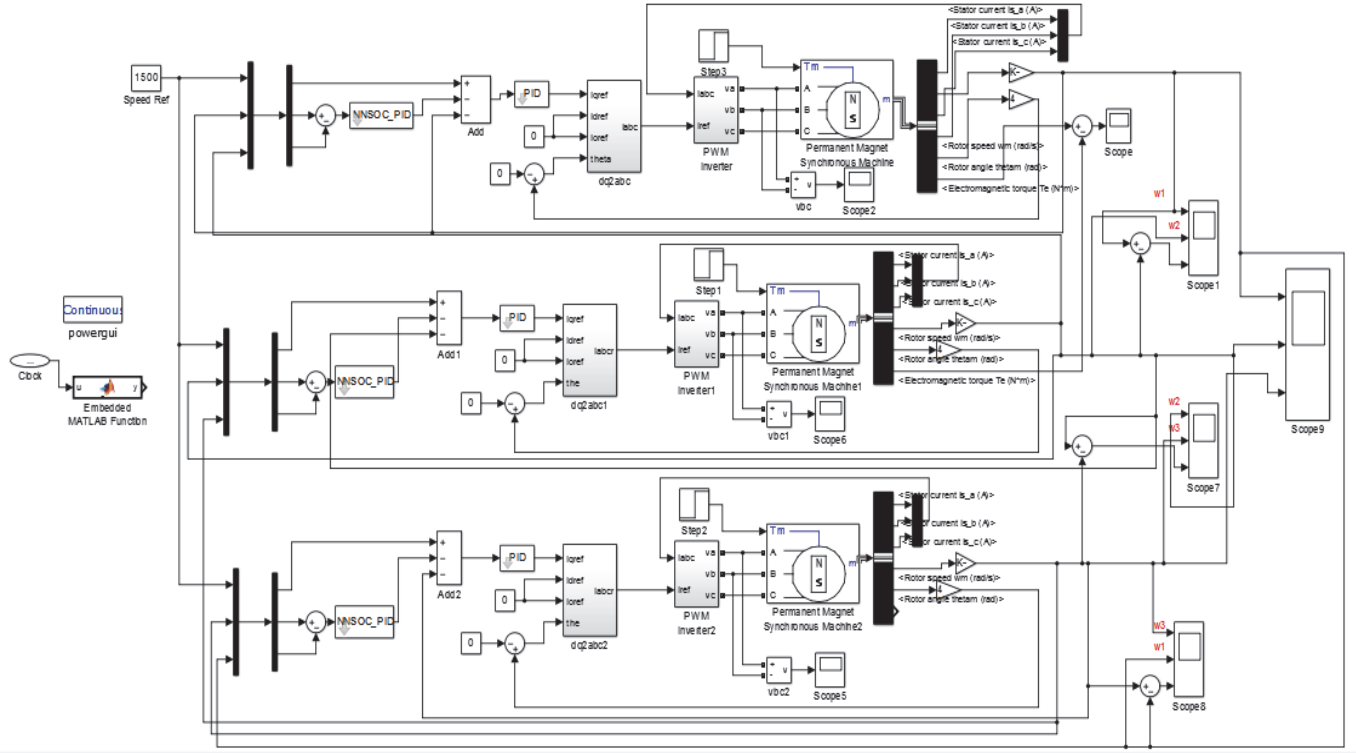


图 7 3 台 PMSM 电机环形控制模型

系统空载运行和恒定负载运行时，3 台电机的同步性能好，电机间的转速同步误差为零，如图 8 所示。通过 0.1 s 对 1 号电机施加  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$  的冲击载荷，电机的速度发生变化，转速的同步性也发生变化，如图 9 和图 10 所示。

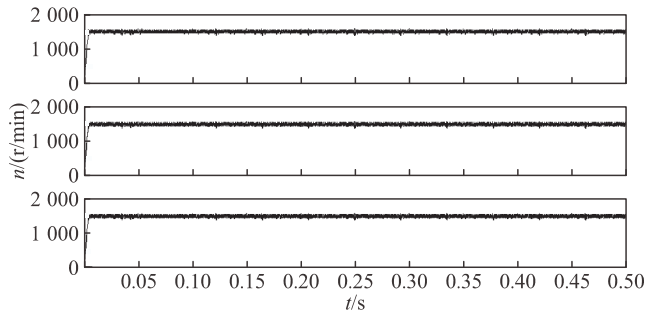


图 8 系统空载或恒转矩时 3 台电机速度曲线

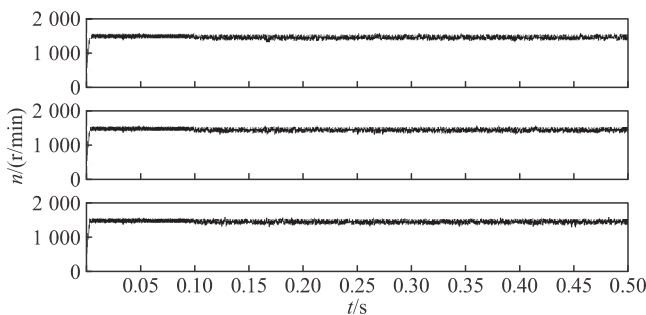


图 9 0.1 s 冲击载荷时 3 台电机速度曲线

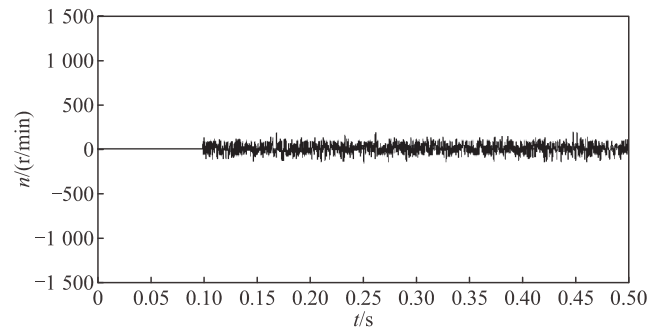


图 10 0.1 s 冲击载荷时电机速度同步误差

由图 8 可知：采用环形耦合和神经网络模糊控制结合的控制策略，能够使系统在无负载或恒定负载时保持较高的稳定性，同步误差为零；从图 9 可以看出：在某个电机受到冲击载荷作用时，单独电机的转速变化超过样本值时，控制系统能联想出响应输出，使传送装置的总体速度变化小，冲击下的系统整体速度变化小；从图 10 可以看出：同时能将多电机同步传动结构中的同步误差控制在较小范围内，电机的同步率波动较小，满足装置的同步性要求。由图 9、图 10 可知：采用了神经网络自组织模糊控制的电机系统，在面对干扰时的电机速度波动小，减轻了电机间的失同步现象。

## 4 结束语

笔者针对确定装备 FSI 过程中属性指标的优先性, 提出考虑属性优先级的区间数 TOPSIS 方法。该方法在指标评价方面用区间数表示属性评价范围, 避免了因专家评价意见不一致导致评价结果存在的盲目性; 在属性权重确定方面, 克服了传统恒定指标权重的缺陷, 利用效用值理论充分考虑了指标权重的不确定性; 在初始区间数决策矩阵规范化方面运用极差变换思想, 保证了规范化矩阵的单调性、平移不变性和区间稳定性等性质, 保持了初始区间数决策矩阵蕴含的重要信息。

该方法运算简单, 易于计算机编程实现, 应用性和推广性较强, 可以用来解决其他具有属性优先性、属性指标值为区间数且指标权重不确定类型问题的决策。

## 参考文献:

- [1] 甘茂志, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 273-290.
- [2] 俞金松, 程继红, 张国. 基于重要度评价的导弹 FSI 确定方法[J]. 海军航空工程学院学报(军事版), 2013, 30(3): 77-81.
- [3] 咎翔, 张仕新, 韩朝帅, 等. 一种关于重要功能产品的

\*\*\*\*\*  
(上接第 37 页)

## 5 结论

实验结果表明: 采用环形耦合和神经网络自组织模糊控制结合的控制策略, 能有效改善冲击载荷影响下电机运行的稳定性, 保证多台电机运行时具有很高的同步性, 满足该收集装置的工作要求, 对改善该系统的响应速度和鲁棒性、保证模块药收集过程中精确安全具有重要作用。同时, 该控制策略可以应用于其他面临冲击载荷的多电机传送系统, 具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 董佳, 齐向东, 王元友, 等. 模糊 PID 技术在架车机举升单元同步控制中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2015(2): 191-193.
- [2] 刘然, 孙建忠, 罗亚琴, 等. 多电机滑模环形耦合同步控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2010(22): 2662-2665.
- [3] 曹玲芝, 李春文, 牛超, 等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 586-592.
- [4] YEH S S, HSU P L. Analysis and design of integrated control for multi-axis motion systems[J]. IEEE

定量分析方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(8): 69-83.

- [4] 唐彦峰, 闫旭, 封会娟, 等. 基于熵权正交投影的重要功能产品确定方法[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(1): 31-34.
- [5] 吴坤, 康建设, 杨东. 基于熵权可拓理论的雷达发射机关键件判别研究[J]. 军械工程学院学报, 2015, 27(1): 10-14.
- [6] 李永义, 周正华, 李伯权, 等. 基于区间数可能度的地震应急物资分配优化方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 637-643.
- [7] 罗承忠. 模糊集引论: 上册[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1989: 197-199.
- [8] 李晓威, 顾海鹏, 柏明星. 基于区间数的 TOPSIS 方法在水驱油田开发效果评价上的应用[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(19): 171-177.
- [9] 胡明礼, 范成贤, 史开泉. 区间数决策矩阵规范化方法的性质分析[J]. 计算机科学, 2013, 40(10): 203-207.
- [10] 尤天慧, 樊治平. 区间数多指标决策的一种 TOPSIS 方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(9): 840-843.
- [11] 张辽宁, 屈洋, 张政, 等. 基于技术检测的装甲装备武器系统执行任务能力评估[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 74-76.
- [12] 陶长琪, 凌和良. 属性具有线性优先级的区间数多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(4): 177-185.

\*\*\*\*\*  
Transactions on Control System Technology, 2003, 11(3): 375-382.

- [5] 林松润, 李军, 林嘉义. 基于电子虚拟总轴的舞台机械控制系统多电机同步控制[J]. 工业控制计算机, 2015(7): 47-49.
- [6] 张今朝, 刘国海, 潘天红. 多电机同步系统的多模型辨识[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 138-142.
- [7] 谷雨, 马钱. 基于加权交叉耦合的多电机同步控制研究[J]. 电气传动, 2015, 45(9): 58-61.
- [8] 颜昌彬. 模糊 PID 在电机调速中的应用[J]. 无线互联科技, 2015(22): 137-138.
- [9] 王维斌, 王文琰, 毛海杰. 基于滑模与偏差耦合复合控制的舞台升降台同步控制方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(4): 3-7.
- [10] 葛红豆, 赫雷, 曹维清, 等. 基于模糊 PID 控制的 AGV 控制[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 76-79.
- [11] 张莉, 李彦明, 马培荪, 等. 基于模糊 PID 控制器的多电机同步控制装置的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2003(4): 11-13.
- [12] 司景萍, 马继昌, 牛家骅, 等. 基于模糊神经网络的智能故障诊断专家系统[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 164-171.