基于PID神经网络的多电动机协同控制研究

针对过程控制领域的多电动机系统协同控制问题，提出利用传统PID算法与人工神经网络相结合构建PID神经网络，并设计了基于该算法的多电动机协同控制系统。实验结果表明，PID神经网络算法可以有效地解决多电动机驱动系统的协同控制问题，算法收敛速度快，同步误差较小，同时具有较强的抗干扰能力，非常适合实际工程应用。

张　祺/广东中烟工业有限责任公司

张　祺/工程师

关键词/Keywords
PID神经网络·
多电动机驱动系统·
协同控制·

随着计算机技术、微电子技术以及机电一体化技术的飞速发展，现代工业的自动化、智能化程度不断提高，许多工业生产线不再采用传统的机械传动系统，取而代之的是更为先进的多电动机驱动系统，在印染、铸造、纺织和舞台布景等领域得到广泛应用[1, 2]。但是在实际的应用过程中，这种多电动机驱动系统还是暴露出一些问题，各驱动子系统之间可能由于传动轴机械特性不匹配、负载扰动和环境干扰等原因出现操作不同步的现象。因此，多电动机驱动系统的协同控制问题成为了运动控制领域重点关注的焦点之一。

多电动机驱动系统协同控制问题的难点在于其多变量、高耦合和非线性的特性，使得控制算法的设计存在一定困难。文献［3］提出一种基于在线调节PID参数并结合CAN总线远程控制的算法，具有一定的应用价值，但是当出现干扰时，控制效果较差；文献［4］设计了一种基于模糊PID的双电动机同步控制系统，仿真结果表明其控制效果要好于单PID控制方法，但该方法无法应用于多电动机系统；文献［5］将模糊PID算法应用于多电动机驱动系统，较好地解决了协同控制问题，但是模糊规则的制定更多要依靠专家经验，人为主观因素影响较大，限制了该算法的推广使用；为了避免这个问题，文献［6］提出了一种基于单神经元PID的多电动机同步控制算法，控制效果良好，抗干扰性强，不过遗憾的是该算法采用的是单神经元结构，当系统中电动机数量较多时，会造成算法复杂度过高，不利于实际工程应用。

通过上述分析，本文将传统PID控制方法与神经网络相结合，构建多变量输入、多控制量输出和多神经元结构的PID神经网络，来实现多电动机驱动系统的协同控制，可以很好地解决主从电动机的同步运行问题，而且系统的抗干扰能力较强，同时PID参数也可以在线实时整定。仿真结果证明了该算法的正确性和有效性。

多电动机协同控制分析

多电动机驱动系统协同控制问题的关键在于多个电动机之间要按照工艺要求始终保持一定的传动比，同时实现多个电动机在转速和相对位置上的同步。但现实的情况是，系统在运行过程中不可避免地要出现一定的扰动，也就是说电动机转速会出现瞬间的动态变化，因此本文设计的系统需要能够保证多个电动机同步运转，而且工艺要求的传动比保持不变。

由于PID神经网络控制算法可以根据被控对象，即电动机的状态变化实时地动态调整加权系数和PID参数，因此本文在传统的多电动机驱动控制系统中，引

中国知网　https://www.cnki.net

入PID神经网络，来实现对于同步误差的跟踪。该系统结构简单、鲁棒性好，可以在出现扰动的情况下，依然具有较好的同步性。

多电动机驱动系统的结构并不复杂，不同的生成过程，对工艺的要求不同，但是连续加工过程都要求各传动轴之间必须保持一定的速度关系，计算公式为

$$k_i V_i = k_{i+1} V_{i+1} \tag{1}$$

式中，k为电动机的协调系数；V为电动机的速度。

假设系统中的电动机共有n台，其中电动机M_1作为主电动机，其他$n-1$台电动机作为从电动机，这样系统的输入就包括n个系统给定值，以及n台电动机的输出反馈，共$2n$项，系统结构如图1所示。

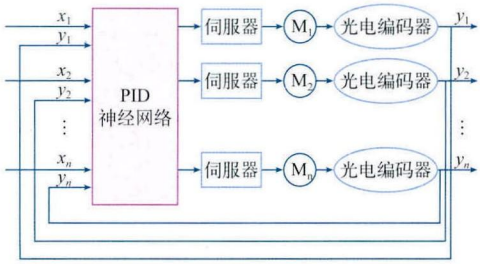

图1　多电动机协同控制系统

PID神经网络

1. 网络结构

PID神经网络是传统PID算法与经典人工神经网络算法相结合的产物，因此其为典型的前馈型网络结构，包括输入层、隐层和输出层共3层。每一个PID神经网络都是由多个结构相同，彼此独立的子网络构成，子网络的输入层包括2个神经元，分别为控制量的目标值和当前值；隐层与传统PID控制器相对应，包括3个神经元，分别为比例神经元、积分神经元和微分神经元；输出层仅有1个神经元，即为计算好的控制率[7]。一个典型的多变量控制PID神经网络的结构如图2所示。

2. 控制律计算

控制率计算即为PID神经网络各层的输入/输出计算，下面分别介绍。

对于输入层来说，计算较为简单，假设多变

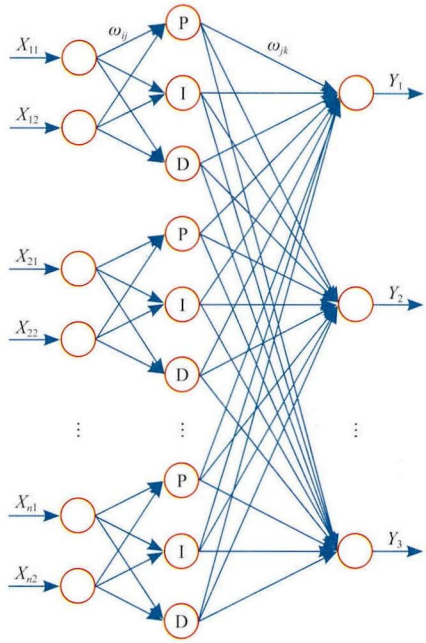

图2　多变量控制PID神经网络结构

量控制PID神经网络的输入层有$2n$个神经元，则输入数据与输出数据相同，即

$$x_{si}(k) = X_{si}(k) \tag{2}$$

隐层包含有$3n$个神经元，它们拥有同样的输入值，计算公式为

$$\mathrm{net}_{sj}(k) = \sum_{i=1}^{2} \omega_{ij} x_{si}(k) \quad j = 1,2,3 \tag{3}$$

比例元、积分元和微分元的输出各有不同，分别如下所示

$$u_{s1}(k) = \mathrm{net}_{s1}(k) \tag{4}$$

$$u_{s2}(k) = \mathrm{net}_{s2}(k) + u_{s2}(k-1) \tag{5}$$

$$u_{s3}(k) = \mathrm{net}_{s3}(k) - \mathrm{net}_{s3}(k-1) \tag{6}$$

输出层含有n个神经元，输出值即为隐层输出的加权和，计算公式为

$$y_{\mathrm{h}}(k) = \sum_{s=1}^{n} \sum_{j=1}^{3} \omega_{jk} u_{sj}(k) \tag{7}$$

3. 权值修正

PID神经网络的权值修正是按照误差梯度下降原则，因此首先需要知道误差如何计算，计算公式为

$$J = \sum_{k=1}^{n} [y_{\mathrm{h}}(k) - r(k)]^2 \tag{8}$$

式中，n为输出层神经元的个数；$y_{\mathrm{h}}(k)$为当前输出

中国知网　https://www.cnki.net

值；$r(k)$为目标输出值。

权值修正的目的就是为了让$y_h(k)$不断地接近$r(k)$，最终达到设定的要求，因此修正公式为

$$\omega_{ij}(k+1)=\omega_{ij}(k)-\eta\frac{\partial J}{\partial\omega_{ij}} \tag{9}$$

$$\omega_{jk}(k+1)=\omega_{jk}(k)-\eta\frac{\partial J}{\partial\omega_{jk}} \tag{10}$$

式中，$\omega_{ij}(k+1)$为输入层到隐层之间的权值；$\omega_{jk}(k+1)$为隐层到输出层之间的权值；η为学习率。

由于PID神经网络权值修正过程采用的是误差梯度下降方法，因此很容易陷入局部极小值，而且修正速度较慢，故本文在权值修正过程中加入动量项，来改善学习效率。改进后的权值修正公式为

$$\omega_{ij}(k+1)=\omega_{ij}(k)-\eta\frac{\partial J}{\partial\omega_{ij}}+\eta_1[\omega_{ij}(k)-\omega_{ij}(k-1)] \tag{11}$$

$$\omega_{jk}(k+1)=\omega_{jk}(k)-\eta\frac{\partial J}{\partial\omega_{jk}}+\eta_1[\omega_{jk}(k)-\omega_{jk}(k-1)] \tag{12}$$

实验分析

本文实验选用了3个电动机，电动机类型为永磁式同步电动机，其中电动机1为主电动机，其他2个电动机为从电动机，控制系统结构如图1所示。电动机的各主要参数为：有效磁链$\psi_f=0.175$ Wb，q轴和d轴等效电感均为$L=8.5$ mH，定子电阻为$R_s=2.875\ \Omega$，转子级数为$p=4$，转动惯量为$J=0.000\ 8$ kg·m^2，粘滞摩擦系数为$B=1.2$ n·s/m，额定电磁转矩为$T_m=30$ N·m，额定频率为$f=50$ Hz。

首先考察PID神经网络对于多电动机驱动系统控制量的跟踪能力，设定主电动机的期望转速输出为700 r/m，其他2个电动机的期望转速输出分别为400 r/m和600 r/m。由于众多文献的研究都表明模糊PID的控制效果要明显好于单独PID，因此本文将PID神经网络与模糊PID控制算法的效果进行比较，控制输出和控制误差变化分别如图3和图4所示。

从图3可以明显看出，利用PID神经网络算法时，系统控制量输出可以快速跟踪上设定目标，并且稳态值较为接近期望值；而模糊PID控制算法的输出虽然最终也能跟踪上设定目标，但调节时间明显较长，不利于实际工程应用。图4反映的结果同样表明PID神经网络算法使得控制误差可以快速地收敛，所用时间要明显小于模糊PID控制算法。由此可见，PID神经网络算法对于多电动机驱动系统的协同控制可以取得较好的控制效果。

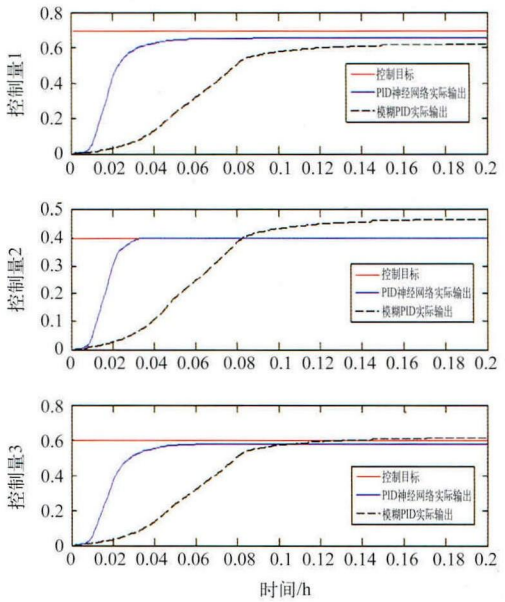

图3 控制输出效果对比

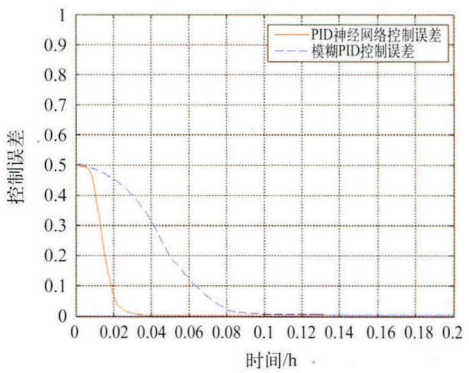

图4 控制误差变化对比

下面考察当系统出现扰动，尤其是从电动机出现扰动时，系统的控制效果。在$t=0.8$ s时，对电动机2施加30 N·m的阶跃扰动，实验结果如图5所示。

图5的结果表明，当1个从电动机出现扰动时，主电动机和其他从电动机可以快速跟踪其变化，最大同步误差仅为$e=1.34\%$。这充分说明PID神经元网络算法对于多电动机驱动系统具有良好的控制性能，能够很好地弥补传统多电动机系统主从结构带来的缺陷，整个系统有机地结合在

中国知网 https://www.cnki.net

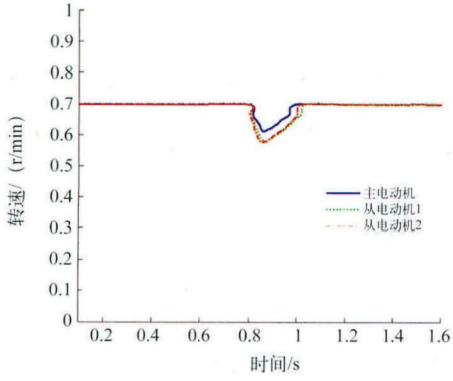

图5　扰动出现时电动机运行效果

一起，主电动机可以得到所有从电动机的反馈信息，从而确保了系统中各电动机可以协同运行。

结束语

本文重点研究了利用PID神经网络算法实现对于多电动机驱动系统的协同控制，充分利用了人工神经网络和PID控制算法的优点，设计了多电动机工作状态下的控制系统。实验结果表明，本文采用PID神经网络算法设计的控制系统，可以很好地跟踪控制目标，跟踪效果和跟踪速度要明显好于模糊PID算法。此外，实验结果还同时表明本文所设计的系统具有很好的抗干扰能力，在出现扰动时，可以快速跟踪变化情况。综合来看，本文设计的系统性能良好，为实现多电动机系统的协同控制提供了一个新的思路。

参考文献

[1] 张承慧，石庆升，程金．一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略［J］．中国电机工程学报，2007，27（15）：59-63.

[2] 王庆明，孙怡．基于模糊PID控制的直流电机同步控制系统［J］．机电工程，2012，29（5）：493-496.

[3] 赵君，刘卫国，谭博．基于CAN总线的分布式多电机控制研究［J］．测控技术，2008，27（8）：70-73.

[4] 杨晨娜，张怡．双电机同步控制系统的设计与仿真［J］．工业控制计算机，2009，22（1）：36-37.

[5] 万鹏飞，王莉．基于模糊PID控制的多电机同步控制研究［J］．仪器仪表用户，2009（1）：21-23.

[6] 李俊丽，何勇，王生泽．单神经元PID在多电机同步控制中的应用［J］．机电工程，2010，27（8）：14-18.

[7] 肖忠，玉瑞，王清．基于PID神经网络的主汽温系统设计与仿真［J］．系统仿真学报，2011，23（10）：2195-2199.

（收稿日期：2014－12－02）EA

（上接第86页）

人体触电风险；反之，则会危及人身生命安全。对于医疗IT系统的设计应用，设计人员应准确把握规范要求，借鉴标准图设计，防止施工图设计差错的发生。

医院是救死扶伤的医疗机构，病房建筑亦不同于一般的公共建筑，其功能复杂、涉及的电气系统种类多，对设计质量要求高。在实际的病房建筑电气施工图设计工作中，应加强不同设计专业间的协作配合，严格按设计规范和技术标准进行施工图设计，充分体现出设计深度，有效避免设计疏漏和差错的发生。只有这样，才能实现施工图设计文件的最佳优化，从设计源头上保证病房建筑电气工程的质量，为患者和医护工作者提供一个安全可靠的医疗环境。

参考文献

[1] 中国建筑东北建筑设计研究院．JGJ 16—2008民用建筑电气设计规范［S］．北京：中国建筑工业出版社，2008.

[2] 中机中电设计研究院有限公司．GB 50054—2011低压配电设计规范［S］．北京：中国计划出版社，2011.

[3] 上海电动工具研究所．GB 14050—2008系统接地的型式及安全技术要求［S］．北京：中国标准出版社，2008.

[4] 中南建筑设计院．08SD706—2医疗场所电气设计与设备安装［S］．北京：中国计划出版社，2009.

[5] 王厚余．医院中的电气安全要求［J］．建筑电气，1993（1）.

（收稿日期：2014－02－10）EA

中国知网　https://www.cnki.net