

分布式神经元 PID 在不均衡系统同步控制中的应用

乌建中, 侯贤士, 陈 吉

同济大学机械工程学院, 上海 200092

摘要 大型风电叶片模具的合模或脱模, 采用双缸铰接的液压翻转机构, 其在大角度翻转过程中多转臂同步性能将直接影响翻转模具的寿命和叶片生产质量。针对该翻转设备可靠性、适应性和控制精度要求较高的特点, 提出一种分布式的单神经元 PID 控制算法对机构转臂进行角位移同步控制, 学习过程采用改进的 LMS 算法, 并根据运动分析结果实现神经元输出增益的自动调整。建立 AMESim 机液混合模型, 通过动态共享内存运行 LabVIEW 神经元子 VI。联合仿真结果和实际应用均表明, 该方法对非线性、时变的不均衡系统具有良好的控制精度。

关键词 分布式; 单神经元 PID; 同步; 不均衡; AMESim 软件

中图分类号 TP271

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)23-0053-04

Application of Distributed Neuron PID in Synchronous Controlling of an Unbalanced System

WU Jianzhong, HOU Xianshi, CHEN Ji

*College of Mechanical Engineering, Tongji University,
Shanghai 200092, China*

Abstract The hydraulic turnover mechanism, using a dual cylinder hinge, is an advanced blade mould closing equipment of high technologies, mostly used for megawatt class wind blades above 40 meters, where more than three mechanisms are arranged along one blade mould at the same time. Obviously, there will be an unbalanced load on each mechanism due to the irregular shape of moulds and the inaccurate installing locations. The synchronous performance of multiple rotating arms, during a large-angle rotating process, directly influences the service life of blade moulds and the production quality of wind blades. For the turnover mechanism to enjoy high reliability, adaptability and control accuracy, a new control method using the distributed single neuron PID algorithm is proposed for a synchronous control of angular displacement of rotating arms. An improved LMS algorithm is used in the learning process, and the gain of the neuron output is adjusted automatically

by the neuron based on the motion analysis results. Through rotating motion analysis with iterations, some basic parameters are determined, and a mechanical and hydraulic combined simulation model in AMESim is established, including a planar mechanical model. The LabVIEW subprogram of neuron PID could be run through dynamic shared memory simultaneously. Finally, the results of traditional PID and neuron PID are shown in the same plot. It is shown through simulation results as well as practical applications that this method enjoys a good control accuracy for nonlinear and time variant unbalanced systems.

Keywords distributed; single neuron PID; synchronous; unbalance; software AMESim

0 引言

多执行机构驱动不均衡负载, 在利用传统控制方法进行跟踪调整的过程中, 各执行机构的输出存在相互作用, 这种相互作用使整个系统的动态性能恶化^[1-2]。文献[1]按照“同等方式”概念, 将单神经元 PID 控制器引入不均衡系统中, 实现了双缸同步的自适应控制。但在实际应用中, 同步系统往往采用任意布置的液压动力源和执行机构, 因而需要实现大范围非均匀可变布控, 这时传统的三总线中央集中控制方式受到限制, 必须采用实时性好、可靠性高的分布式现场总线系统。而针对分布式系统存在的大延时、阻塞等惯性环节对同步控制的影响, 文献[2]分析了不均衡系统同步控制误差特性, 提出基于数据传输的多系统同步控制容错方法, 但没有

收稿日期: 2009-09-21

作者简介: 乌建中, 教授, 研究方向为机电液控制、智能控制, 电子信箱: wjz@tongji.edu.cn

考虑输出不平衡时系统的耦合影响,实现方法上采用的状态跟随控制器需要获得系统准确的数学模型,这在复杂工程应用中很难实现。

模具液压翻转机构是生产大型风电叶片的重要设备,具有明显的不均衡负载特性。本文提出一种基于 CANbus 的分布式神经元 PID 同步控制方法,既可以优化系统的动态性能,减少系统差异和耦合对同步控制精度的影响,还可以增强终端子系统的内聚性,使设备扩展和维护更加便捷。

1 分布式神经元 PID 控制器和学习算法

1.1 单神经元 PID 控制器

神经元作为构成人工神经网络的基本单位,是具有自学习和自适应能力的多输入单输出的非线性处理单元。单神经元 PID 各输入转换项仅与唯一输出项之间有连接权值,与传统 PID 调节器相同,具有结构相对简单,易于实际应用的特点。并且,单神经元 PID 通过权值自适应算法,可以实现 PID 参数在线整定。

单神经元 PID 控制器神经元输出状态对应于 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数,并根据系统的运行状态,按照某一性能指标自学习、自适应权系数,实现 PID 控制器参数的动态调节。如图 1 所示。

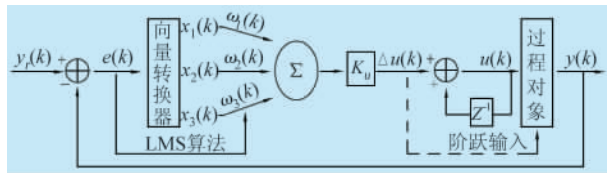


图 1 单神经元 PID 控制器模型

Fig. 1 Single neuron PID controller model

根据离散 PID 控制器的增量式输出:

$$\Delta u(k) = k_p e(k) + k_i \Delta e(k) + k_d \Delta^2 e(k) \quad (1)$$

式中, k_p 、 k_i 、 k_d 为 PID 运算的比例、积分和微分系数,分别对应于神经元权系数 $w_1(k)$ 、 $w_2(k)$ 、 $w_3(k)$; $e(k)$ 、 $\Delta e(k)$ 、 $\Delta^2 e(k)$ 作为神经元学习过程所需状态量,对应于神经元输入 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$; 比例环节 K_u 对应于神经元 PID 控制器的增益,可以通过算法实现自动调整。

根据信号递进关系,神经元输出为

$$u(k) = u(k-1) + K_u \sum_{i=1}^3 \bar{w}_i(k) x_i(k) \quad (2)$$

式中, $\bar{w}_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)|$, K_u 、 $\bar{w}_i(k)$ 为单神经元控制算法需要实现自调整的增益和权重系数。

1.2 自适应学习算法

单神经元常用的学习算法多为有监督的 Hebb 学习规则,或者以输出均方误差 MSE 为性能指标,如 LMS 算法^[3-4]。LMS 算法也称 Delta 算法,采用误差最速下降准则,通过计算 MSE 函数的梯度,使权重系数按照负梯度方向变化,从而使

得 MSE 函数不断减小,最终达到优化的目的。

根据文献[3]所述 LMS 算法, MSE 函数为

$$E = \sum_k \frac{1}{2} \sum_j \left(y_{ij}^k - \sum_i w_{ij}^k x_i^k \right)^2 = \sum_k E_k \quad (3)$$

式中, y_{ij}^k 为输出单元 j 的期望输出值,而 $y_j^k = \sum_i w_{ij}^k x_i^k$ 为实际输出值; E_k 为当前模式输入向量:

$$E_k = \frac{1}{2} (y_{rk} - W_k X_k)^2 \quad (4)$$

所以,根据与负梯度比例相关性要求,权重调整关系表示为

$$W_{k+1} = W_k + \mu (-\nabla_k) = W_k + \mu (y_{rk} - W_k X_k) X_k \quad (5)$$

式中, $\nabla_k = \partial E_k / \partial W_k$ 为当前模式的瞬时梯度, μ 为学习速率。

如图 1 所示,在实际应用系统中,神经元输出要作用于过程对象,还需要通过动态调节输出增益 K_u 进行监督学习。设神经元输出作用于过程对象的单位阶跃响应输出函数为 $R_k[\cdot]$,则过程对象的实际输出和神经元权重调整算法可修改为

$$E_k = \frac{1}{2} (y_{rk} - y_k)^2 \quad (6)$$

$$\Delta y_k = \Delta u_k R_k[\cdot] \quad (7)$$

$$W_{k+1} = W_k + \mu (y_{rk} - y_k) \frac{\partial y_k}{\partial u_k} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial W_k} = W_k + \mu e_k R_k X_k \cdot \text{sgn} \left[\frac{\partial y_k}{\partial u_k} \right] \quad (8)$$

式中, y_{rk} 、 y_k 为过程期望输出和实际输出,过程对象传递函数不变时 $R_k[\cdot]$ 为常数, R_k 、 $R_k[\cdot]$ 的正负由符号函数 $\text{sgn} \left[\frac{\partial y_k}{\partial u_k} \right]$ 决定。

1.3 分布式神经元 PID 控制器结构和控制策略

图 2 为不平衡系统分布式同步控制原理。控制系统的每个执行终端有一个独立运行的单神经元 PID 控制器,各执行机构同时根据参考输出跟踪各自的设定轨迹或速度。每个终端的参考输出由“虚拟主令”给出,不依赖于某一个节点的实际输出,各参考输出量可以相同,也可以不同,这样能够实现分布式的协同运动控制,同时减少各个终端之间的相互影响。

“虚拟主令”可以认为是向分散的各个神经元 PID 控制器实时发布参考输出值和学习监督制度的控制算法。基于 CANbus 的分布式系统中,网络中的每一个终端都可以作为通信主机运行“虚拟主令”程序,也可以设置专门的通信主机,如使用 PC。在某些场合,如速度同步控制中,参考输出为常数,这时“虚拟主令”程序非常简单,但在一些轨迹或协同运动控制中,“虚拟主令”程序又非常复杂,需要设置专门的控制器。

2 不平衡系统同步控制仿真分析实例

2.1 液压翻转机构分析和 AMESim 建模

液压翻转机构是用于大型风叶模具 180° 翻转开合的变幅运动机构,其平面机构模型如图 3 所示^[5]。工作时,要求多台具有变化不平衡负载的翻转机构按照转角同步运动。根据液压系统和单神经元 PID 原理,建立如图 4 所示的 AMESim

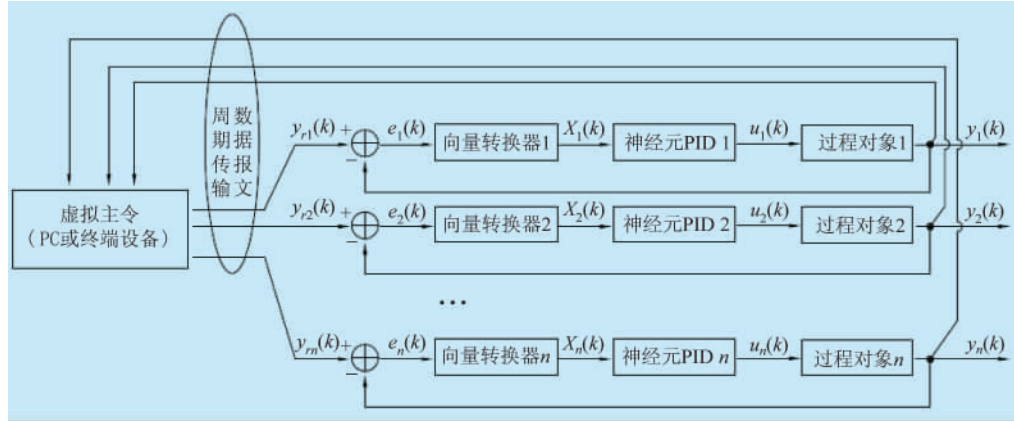


图2 分布式神经元PID控制器网络模型

Fig. 2 Distributed neuron PID controller network model

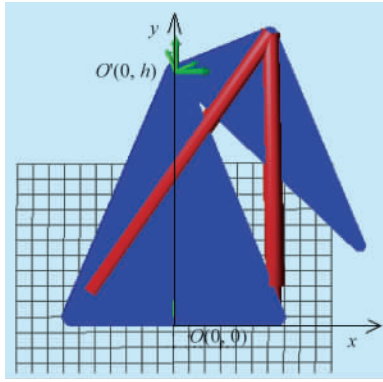


图3 液压翻转机构 AMESim 平面机构模型

Fig. 3 AMESim planar mechanical model of hydraulic turnover mechanism

混合仿真模型。

图4中，液压输入用变流源 HLF0C 模型代替变频调速后泵的流量，两个油缸用模型 HJ020 表示，而两个油缸的变幅运动可以选用两个铰接的平面运动杆件模型 PLMJ00，油缸上虚拟的位移传感器为平面运动杆件提供伸缩位移信号。翻转机构的直角三角形转臂选用有4个端口的平面物体模

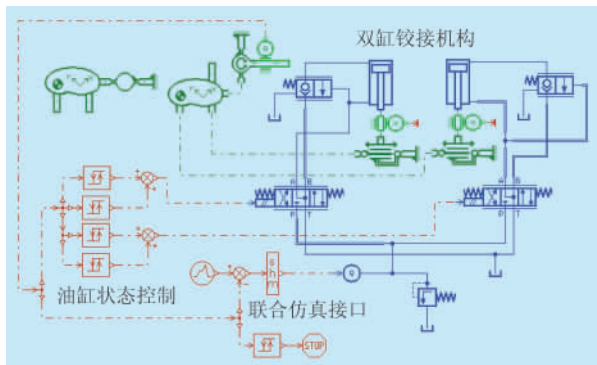


图4 液压翻转系统 AMESim 仿真模型

Fig. 4 AMESim simulation model of hydraulic turnover system

型 PLMBOD04, 将该模型的重心设置在转臂范围以外的某一位置, 表示转臂与模具连接后翻转运动的负载。转臂上安装有角度传感器, 用于检测系统同步运动的实际转角, 这里选用角度传感器模型 ADT00。

系统工作时, 每个转动过程两个油缸分别经历伸缸、到达死点和缩缸过程, 液压换向阀则按照动作要求分别位于左位、中位和右位。模型中, 两个使用角位移触发的信号之和使两个油缸在死点前、死点附近和死点后分别处于伸缸、中位浮动和缩缸运动状态。

2.2 系统运动分析

设两个油缸的支点坐标分别为 $(-b, 0)$ 和 $(b, 0)$, 初始铰点坐标为 $(r, 0)$, 转臂回转支点坐标为 $(0, h)$, 油缸小腔面积为 A , 大腔面积为 $2A$, 则根据供油关系

$$S = \arctan[(y-h)/x] \quad (9)$$

$$Q = \sum_k (q_1 + q_2) \quad (10)$$

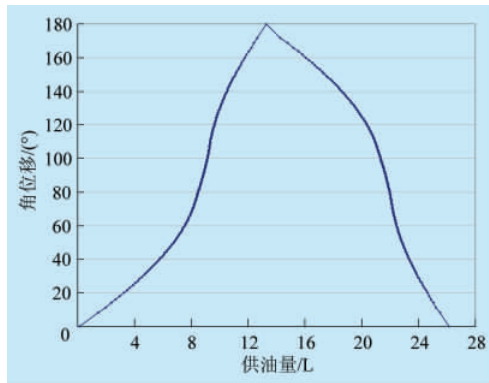
$$q_1 = n_1 A (\sqrt{2h\sqrt{r^2 - x_{k+1}^2} + 2x_{k+1}b + b^2 + h^2 + r^2} - \sqrt{2h\sqrt{r^2 - x_k^2} + 2x_k b + b^2 + h^2 + r^2}) \quad (11)$$

$$q_2 = n_2 A (\sqrt{2h\sqrt{r^2 - x_{k+1}^2} - 2x_{k+1}b + b^2 + h^2 + r^2} - \sqrt{2h\sqrt{r^2 - x_k^2} - 2x_k b + b^2 + h^2 + r^2}) \quad (12)$$

式中, Q 为供油量; S 为角位移; q_1, q_2 分别为两个油缸沿 x 轴的瞬态流量; 参数 $n_1, n_2 = 0, 1, 2$ 对应于各自油缸处于浮动、缩缸和伸缸运动状态。将上式整理后用 LabVIEW 作图, 可得出供油量-角位移和角位移-流量曲线, 也可以看作恒流量时的角位移曲线和恒角速度时的流量曲线, 如图5所示。

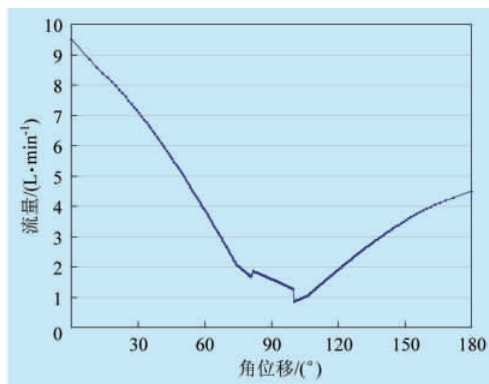
2.3 建立与 LabVIEW 联合仿真

调用共享内存模型 SHM00, 通过动态实时交换变量, 建立 AMESim 与 LabVIEW 的联合仿真。该模型左边参数为 X_k , 这些状态参数送到 LabVIEW 单神经元 PID 函数计算, 右边参数则为 LabVIEW 返回的神经元 PID 控制器输出 $u(k)$, 二者通过内存交换进行传递^[6]。



(a) 转臂供油量-角位移曲线

(a) Rotating arm's oil supply-angular displacement curve



(b) 转臂角位移-流量曲线

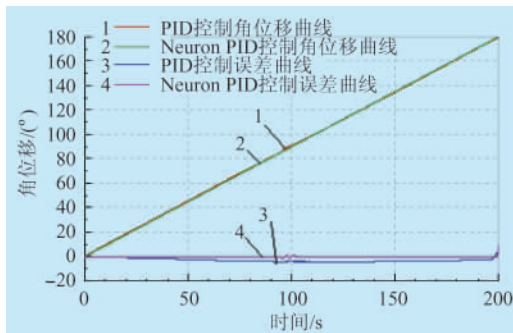
(b) Rotating arm's angular displacement-flow rate curve

图5 液压翻转机构转动分析

Fig. 5 Rotating motion analysis of hydraulic turnover mechanism

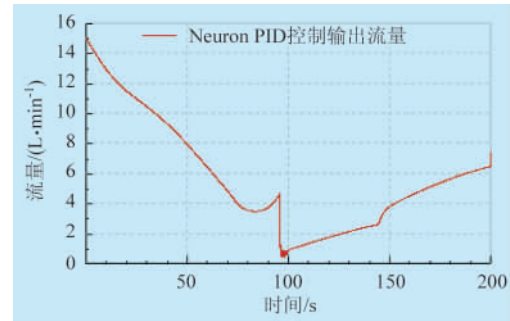
2.4 仿真结果

图6给出了使用单神经元PID控制追踪设定角位移轨迹时的角位移和流量曲线。可以看到,控制器能够使液压翻转机构转臂很好地追踪设定角位移曲线,追踪误差小,转臂运动速度比较平稳。仿真过程中发现,当系统流量过低时,系统平衡阀打开不稳定,转臂角位移容易出现抖动。所以,实际中应注意系统流量的匹配。



(a) 角位移曲线

(a) Angular displacement curve



(b) 流量曲线

(b) Flow rate curve

图6 神经元PID同步控制AMESim仿真

Fig. 6 AMESim simulation of synchronous control using single neuron PID

3 结束语

风电叶片模具液压翻转机构是一种可靠性、适应性要求较高的不平衡负载系统,目前已成功应用于工业现场。本文探讨采用分布式神经元PID控制器对其进行同步控制。仿真结果表明,该方法具有很好的负载适应性,并且基于“同等方式”的分布式控制减少了系统耦合,大大增加了分布式系统的内聚性和可靠性。该方法的关键在于,尽量减少系统时滞对控制精度的影响。

参考文献 (References)

- [1] 郭晓松, 祁帅, 占金春, 等. 基于同等方式控制的双缸同步液压系统仿真[J]. 机床与液压, 2009, 37(3): 149-151.
Guo Xiaoshong, Qi Shuai, Zhan Jinchun, et al. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(3): 149-151.
- [2] 刘俊利, 乌建中, 陈雨. 不平衡系统同步误差特性分析 [C]//第27届中国控制会议论文集. 昆明, 2008.
Liu Junli, Wu Jianzhong, Chen Yu. Error character analysis of synchronic control on unbalanced system [C]//Proceedings of the 27th CCC, Kunming, 2008.
- [3] 杨建刚. 人工神经网络实用教程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
Yang Jiangang. Artificial neural network tutorial[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001.
- [4] 李海涛, 仪维, 吴筱坚, 等. PIC单片机应用开发典型模块[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 11.
Li Haitao, Yi Wei, Wu Xiaojian, et al. Typical application development module of PIC MCU[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007: 11.
- [5] 颜海银, 乐韵斐. 风电叶片模具变幅翻转机构运动学分析 [J]. 机电一体化, 2007, 13(6): 44-47.
Yan Haiyin, Le Yunfei. Mechatronics, 2007, 13(6): 44-47.
- [6] 舒华, 舒怀林. 基于LabVIEW的PID神经网络控制器设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2918-2920.
Shu Hua, Shu Huailin. Journal of System Simulation, 2006, 18(10): 2918-2920.

(责任编辑 朱宇)