

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.001

双马达模糊神经网络速度同步控制实现方法研究*

杨前明, 洪广元, 胡开文, 王 伟

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:针对内嵌式溢油回收机扫油臂与卷筒双马达电液驱动速度同步控制问题,对扫油臂和卷筒驱动系统的组成、工作原理和控制要求进行了阐述;基于“等同控制”策略,引入模糊神经网络控制理论,建立了双马达模糊神经网络控制器;运用 Matlab 软件对模糊神经网络控制系统与 PID 控制系统进行了仿真,获得了阶跃响应对比曲线和线速度同步误差对比曲线,探讨了速度同步控制系统的稳定性,分析了线速度同步误差特点与形成原因。研究表明:模糊神经网络控制系统几乎无超调、调节时间为 5.2 s, PID 控制系统超调量为 23%、调节时间为 8 s,速度达到稳定时,模糊神经网络控制系统线速度差为 7 mm/s, PID 控制系统线速度差为 16 mm/s;与 PID 控制相比,模糊神经网络控制具有更好的动态响应特性和稳态特性,同步误差更小、同步精度更高。

关键词:溢油回收机;双马达;速度同步控制;模糊神经网络控制;PID 控制

中图分类号:TH39;TE95;TP271

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1229-06

Realization method of fuzzy neural network speed synchronous control of dual-motor

YANG Qian-ming, HONG Guang-yuan, HU Kai-wen, WANG Wei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Aiming at the problem of the sweep arm of the oil for the embedded type oil spill recovery machine and fence reel dual-motor electro-hydraulic driving speed synchronous control, the constitution, working principle and control requirement of the drive system consisting of the sweep arm of the oil and fence reel were expounded. The dual-motor fuzzy neural network controller was established basing on equivalent control strategy and introducing the fuzzy neural network control theory. The simulation of the fuzzy neural network control system and the PID control system was carried out and the contrast curve of step response and linear speed synchronization error was also obtained using the Matlab software. The stability of the speed synchronous control system was discussed and the characteristics of linear speed synchronization error and its causes were also analyzed. The results indicate that the fuzzy neural network control system has no overshoot almost and the adjustment time is 5.2 s, the PID control system overshoot is 23% and the adjustment time is 8 s. When the speed achieves stability the linear velocity difference of the fuzzy neural network control system is 7 mm/s and that of the PID control system is 16 mm/s. Therefore the dynamic response and steady-state characteristics of the fuzzy neural network control are better compared to the PID control. Besides, the synchronization error and the synchronization precision of the fuzzy neural network control is smaller and higher compared to the PID control.

Key words: oil spill recovery machine; dual-motor; speed synchronous control; fuzzy neural network control; PID control

收稿日期:2017-02-15

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAC14B05)

作者简介:杨前明(1960-),男,江苏如皋人,博士,教授,硕士生导师,主要从事机电一体化、电液控制技术、机器人方面的研究。E-mail: yqm8396@163.com

0 引 言

随着经济建设的飞速发展,全球对于石油的需求和消耗逐年增加,海洋石油的勘探、运输规模不断扩大,在海洋石油的生产环节和运输环节极易发生溢油事故。溢油事故一旦发生将对海洋环境和国民经济造成严重的损害。内嵌式溢油回收机是一种重要的海面溢油应急装备,能够快速清理突发性海上溢油,避免溢油对海洋环境造成污染,同时将溢油进行有效回收利用,节约了宝贵的石油资源。内嵌式溢油回收机扫油臂与卷筒均采用电液比例阀控马达驱动,实现围油栏布放速度同步控制。文献[1]运用 D-H 位移矩阵法建立了扫油臂机构运动学模型并进行了 Matlab 仿真,解决了扫油臂端部抓握点运动轨迹的规划策略问题;文献[2-3]针对双马达速度同步控制问题,提出以 PLC 为控制核心的电液比例阀控马达主从方式和等同方式同步控制方案,对扫油臂端部速度与围油栏卷筒布放速度进行同步控制,取得了较好的控制效果;文献[4]采用了模糊 PID 控制策略,将模糊推理运用于 PID 参数的整定,对于起重机双马达速度的同步控制,取得了较高的同步控制精度;文献[5]针对工程机械液压底盘试验台双马达转速同步控制存在的问题,提出了直接自适应模糊控制方法,增强了系统的抗干扰性,改善了系统的同步控制效果;文献[6]基于定量反馈理论(QFT)设计了一种等同式同步控制器,应用于双马达液压同步控制系统中,提高了系统的稳定性和同步精度。

内嵌式溢油回收机在海上收油作业时,由于海面风力载荷和海浪冲击的随机变化,导致双马达同步控制系统受到随机性干扰,双马达同步控制系统是一个非线性不确定系统。对于非线性不确定系统控制问题,采用将模糊控制和神经网络控制相结合的方法解决控制的稳定性更具有优势^[7]。

本研究对内嵌式溢油回收机扫油臂和卷筒驱动系统的组成、工作原理和控制要求进行阐述。

1 系统组成与控制策略

1.1 系统组成

系统主要由扫油臂与卷筒两个马达-减速机驱动系统组成。马达 1 经过减速机 1、外啮合齿轮对对减速机 2 驱动扫油臂转动,马达 2 经过减速机 2、行星轮系齿轮对减速机后,驱动卷筒转动。扫油臂和卷筒驱动系统示意图如图 1 所示。

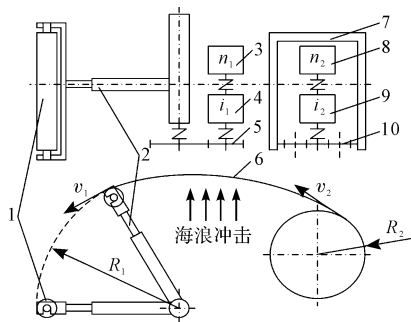


图 1 扫油臂和卷筒驱动系统示意图

1—浮筒;2—扫油臂;3—马达 1;4—减速机 1;5—外啮合齿轮对;6—围油栏;7—卷筒;8—马达 2;9—减速机 2;10—行星轮系齿轮对

1.2 工作原理与控制要求

图 1 中,围油栏的一端固定在浮筒上,另一端缠绕在卷筒上。溢油回收机开始收油工作时,扫油臂端部抓握着浮筒开始逆时针转动,同时卷筒也作逆时针转动,而完成围油栏布放工作;溢油回收机结束收油工作时,动作原理恰好相反,在扫油臂与卷筒的同步反向转动下,浮筒到达船内指定位置,从而完成围油栏收回工作。

围油栏布放和收回过程中,需要尽可能保证扫油臂端部线速度和卷筒线速度的同步精度,即理论上希望扫油臂端部线速度和卷筒线速度相同。由于海浪对于围油栏冲击力的随机性导致了扫油臂受力,即驱动马达输出负载的不确定性,因此,实现两个马达转速的精准控制是实现扫油臂端部线速度和卷筒线速度同步控制的前提与技术关键。

1.3 同步控制策略

双马达模糊神经网络速度同步控制系统原理图如图 2 所示。

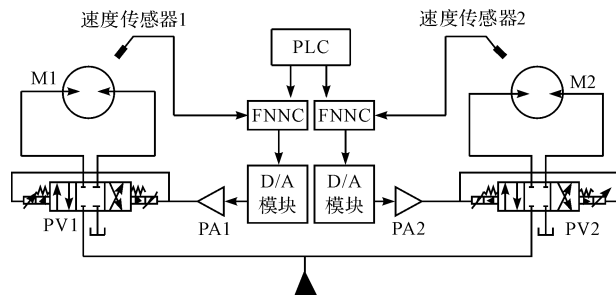


图 2 双马达模糊神经网络速度同步控制系统原理图

系统采用了双马达“等同控制”策略,当给定输入信号时,系统对两个输出量进行独立反馈校正,保证两个输出量具有良好的速度跟随性,从而实现速度同步控制^[8]。控制系统由 PLC、模糊神经网络控制器

FNNC、D/A 模块、比例放大器 PA₁ 与 PA₂、比例换向阀 PV₁ 与 PV₂、卷筒马达 M₁、扫油臂马达 M₂、速度传感器 1、速度传感器 2 组成。

图 2 的控制思想是:设定速度控制指令信号,将速度值转化为两个马达对应的数字量发送给 D/A 模块,D/A 模块将数字量信号转化为电压模拟量信号,比例放大器将电压模拟量信号转化为能够驱动比例换向阀阀芯的电流信号,阀芯的位移随着驱动电流的变化而变化,因此,进入液压马达的流量也发生变化,从而实现了马达转速与旋转方向的控制。

马达的输出转速通过速度传感器来进行检测反馈,模糊神经网络控制器 FNNC 将其处理并与设定速度比较、构成闭环控制回路,直到马达转速达到设计的控制精度。

1.4 数学模型

双马达模糊神经网络速度同步控制系统方框图如图 3 所示。

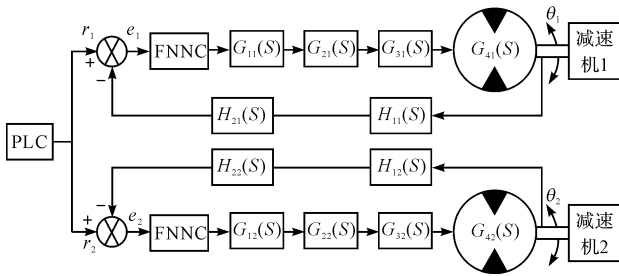


图 3 双马达模糊神经网络速度同步控制系统方框图

FNNC, G₁(S), G₂(S), G₃(S), G₄(S)—模糊神经网络控制器、D/A 模块、比例放大器、比例换向阀、液压马达的传递函数;H₁(S), H₂(S)—速度传感器与速度调整因子的传递函数

在图 3 中代入各个传递函数,得到模糊神经网络速度同步控制系统传递函数方框图^[9],如图 4 所示。

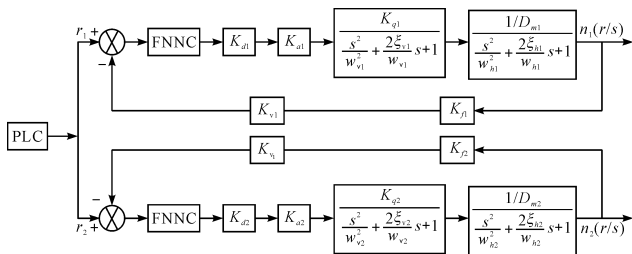


图 4 模糊神经网络速度同步控制系统传递函数方框图

2 模糊神经网络控制

收油船与溢油回收设备海面作业时,由于海面风

浪的作用,船舶颠簸、围油栏受力随机性强,马达驱动负载干扰等因素的影响,双马达旋转系统难以实现较好的同步运行控制。之前笔者采用常规 PID 控制方式,虽然简单易行,但由于 PID 参数相对固定,对于多干扰因素的系统,要想提升控制系统的控制性能难以奏效。

2.1 模糊神经网络控制器

模糊神经网络控制器(FNNC)原理框图如图 5 所示。

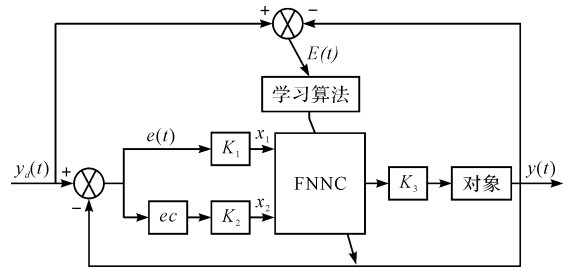


图 5 模糊神经网络控制器原理框图

y_d(t)—系统的期望输出;y(t)—系统 t 时刻的输出

FNNC 是阀控马达系统模糊神经网络控制器,该控制器中的节点与一般的神经元不同,但是其本质也是实现了从输入到输出的非线性映射,仿照 B-P 网络,运用误差反传的方法来设计调整参数,使得被控对象的输出逼近期望输出^[10-11]。

本研究采用最速下降法来修正权值 ω_{ij},即按照 E 对加权系数的负梯度方向搜索调整,附加一个使得搜索快速收敛的全局极小惯性系数项,则有:

$$\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} + \alpha \Delta \omega_{ij}(t) \quad (1)$$

式中:η—学习速率;α—平滑因子。

隶属度函数的中心值 c_{ij} 和宽度 σ_{ij} 可以采用与求 ω_{ij} 类似的学习算法求出:

$$c_{ij}(t+1) = c_{ij}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} + \alpha \Delta c_{ij}(t) \quad (2)$$

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) - \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} + \alpha \Delta \sigma_{ij}(t) \quad (3)$$

给定样本的输入和期望输出,根据性能指标函数,通过式(1~3)就可以应用神经网络进行模糊推理,从而自动修正调整最后一层的连接权值 ω_{ij} 及隶属度函数的中心值 c_{ij} 和宽度 σ_{ij},即等同于根据被控对象的工况和特性来自动调整模糊控制规则及其参数,避免了人工调整时存在的各种困难。

2.2 FNNC 的离线训练

2.2.1 基本结构

FNNC 基本结构示意图如图 6 所示^[12-13]。

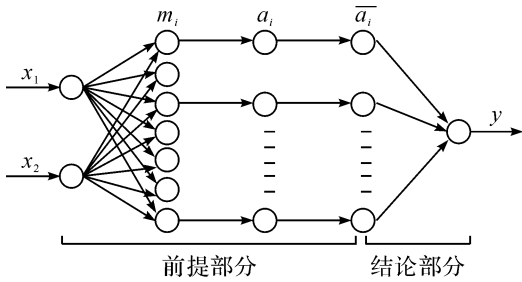


图 6 FNNC 的基本结构

x_1 — 马达速度设定值与实际输出值之差 e ; x_2 —

速度差的变化率 ec ; y —FNNC 的输出

第 1 层至第 4 层构成 FNNC 的前提部分,第 4 层至第 5 层构成结论部分。

图 6 中第 1 层为输入层,即 e 和 ec ;第 2 层为模糊化层,每一个节点对应一个语言变量值,将确定量输入转换为模糊矢量,作为控制器的输入。采用正态函数作为隶属度函数:

$$\mu_i^j = e - \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2} \quad (4)$$

式中: c_{ij} — 隶属度函数的中心值; σ_{ij} — 隶属度函数的宽度。

第 3 层为模糊规则层,每一个节点代表一条模糊规则,通过和模糊化层的连接来完成模糊规则的匹配,通过每一个节点的组合得到相应的加权系数,计算每一条规则的适用度 α_j 。

第 4 层为归一化层,实现归一化计算 $\bar{\alpha}_j$;第 5 层为去模糊化层,将模糊化后的变量进行清晰化,计算出 y 。

2.2.2 隶属度赋值与控制规则

FNNC 输入变量为 e 和 ec ,输出变量为 y ,模糊变量的模糊子集为^[12-13]:

{NB,NM,NS,Z,PS,PM,PB}^[14-15]。

NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB 分别为模糊集的负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。 e 、 ec 和 y 的量化论域均取为 $[-4,4]$,隶属度函数选用正态函数。

根据隶属度函数得出的隶属度赋值表如表 (1~3) 所示。

表 1 模糊变量 e 的隶属度赋值表

e	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
NB	0	0	0	0	0	0	0	0.6	1.0
NM	0	0	0	0	0	0	0.6	1.0	0.6
NS	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0
Z	0	0	0	0.7	1.0	0.7	0	0	0
PS	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0
PM	0	0.6	1.0	0.6	0	0	0	0	0
PB	1.0	0.6	0	0	0	0	0	0	0

表 2 模糊变量 ec 的隶属度赋值表

ec	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
NB	0	0	0	0	0	0	0	0.7	1.0
NM	0	0	0	0	0	0	0.6	1.0	0.6
NS	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0
Z	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0
PS	0	0	0.6	1.0	0.6	0	0	0	0
PM	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0
PB	1.0	0.6	0	0	0	0	0	0	0

表 3 输出变量 y 的隶属度赋值表

y	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
NB	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0
NM	0	0	0	0	0	0	0.7	1.0	0.7
NS	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0
Z	0	0	0	0.7	1.0	0.8	0	0	0
PS	0	0	0.3	1.0	0.5	0	0	0	0
PM	0	0.2	1.0	0.8	0	0	0	0	0

根据经验得到的模糊控制规则表如表 4 所示。

表 4 模糊控制规则表

y	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	NS
	NS	NM	NM	NS	NS	NS	Z
	Z	NM	NS	Z	Z	PS	PS
	PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM
	PM	NS	Z	PS	PS	PM	PM
	PB	NS	Z	PS	PS	PS	PM

表 4 给出了 49 条模糊控制规则,每条规则均对应一对训练样本,则可获得 49 对样本。将其作为神经网络样本数据进行离线训练。将 e 、 ec 分别作为输入样本 p , y 作为目标样本 t ,对于 If (e is NB) and (ec is NB) then (y is NB) 这条模糊控制规则,通过赋值表查询可得 1 条训练样本:

$$p = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0.6\ 1.0; 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0.7\ 1.0],$$

$$t = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0.5\ 1.0],$$

其余 48 条训练样本以此类推。

2.2.3 离线训练

本研究在 Matlab 命令窗口运行 nntool 指令,进入神经网络/数据管理器界面,将 49 个输入样本 p 和 49

个目标样本 t 导入到系统中,建立神经网络 network1,对 49 对样本进行离线训练。

离线训练结果曲线如图 7 所示。

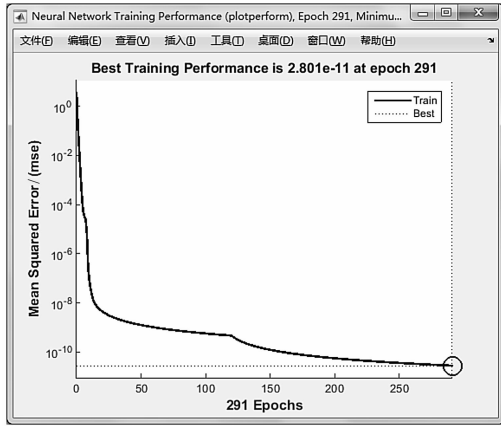


图 7 离线训练结果曲线图

分析图中曲线可以看出,网络经过 291 次训练后,目标误差达到要求。

离线训练结束后,本研究利用函数 gensim(net,st) 将设计好的模糊神经网络对象转换成 Simulink 形式,在 Simulink 中进行可视化仿真^[16-17]。

3 系统仿真与分析

3.1 系统仿真

本研究利用 Matlab 软件中 Simulink 软件包将控制系统传递函数方框图转化为液压系统仿真模型进行仿真。

系统仿真原始参数参考取值如表 5 所示。

表 5 原始参数取值表

参数	物理意义	数值
K_d	DA 模块增益	1/3 200
$K_a/(A \cdot V)^{-1}$	比例放大器增益	0.1
ξ_v	比例阀阻尼比	0.6
$w_v/(\text{rad} \cdot \text{s})^{-1}$	比例阀固有频率	60
$K_q/(\text{m}^3 \cdot (\text{S} \cdot \text{A})^{-1})$	比例阀流量增益	8.67×10^{-4}
ξ_h	液压阻尼比	7.57
w_h	液压固有频率	10.55
$D_m/(\text{m}^3 \cdot \text{rad})$	马达排量	10×10^{-6}
K_f	传感器增益	39
K_v	速度调整因子	60

本研究将设计好的模糊神经网络控制器载入系统,利用 Simulink 工具箱建立的双马达模糊神经网络速度同步控制系统仿真框图如图 8 所示。

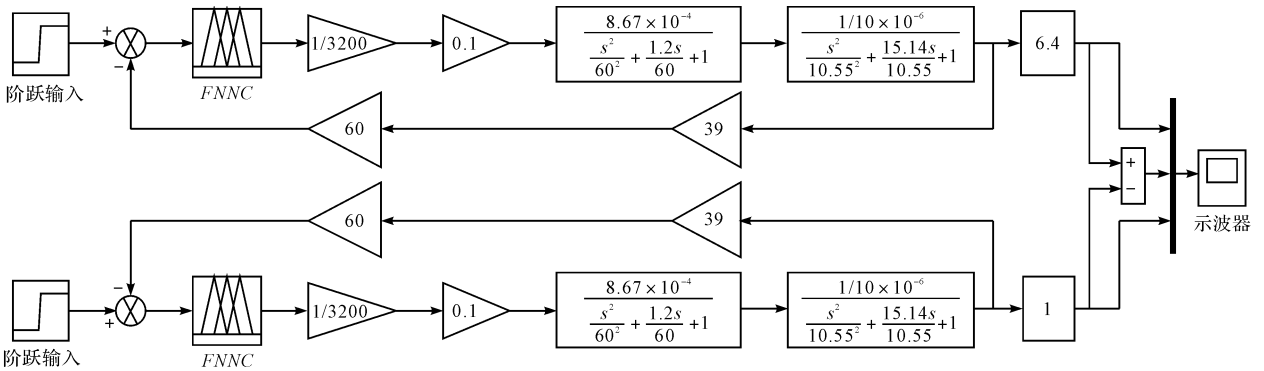


图 8 双马达模糊神经网络速度同步控制系统仿真框图

3.2 阶跃响应

模糊神经网络控制系统与 PID 控制系统的阶跃响应对比图如图 9 所示。

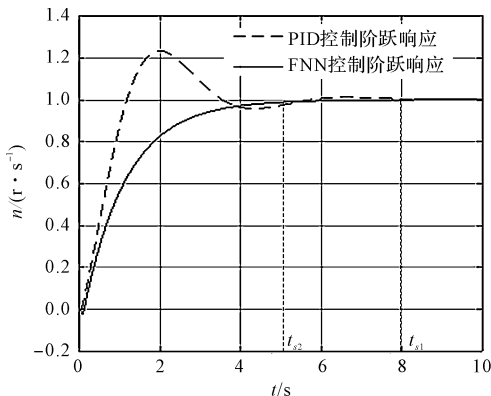


图 9 阶跃响应对比图

分析图 9 仿真曲线可以看出,PID 控制系统超调量为 23%,模糊神经网络控制系统基本无超调;PID 控制系统调节时间 t_{s1} 为 8 s,模糊神经网络控制系统调节时间 t_{s2} 为 5.2 s,调节时间更短。故与 PID 控制相比,模糊神经网络控制具有更好的动态响应特性和稳态特性。

3.3 速度同步误差对比

PID 控制与模糊神经网络控制下的线速度同步误差对比图如图 10 所示。

分析仿真结果可以看出,当速度达到稳定时,采用 PID 控制,系统的线速度差为 16 mm/s,而采用模糊神经网络控制,系统的线速度差为 7 mm/s,故模糊神经网络控制相比 PID 控制,同步误差更小,同步精度更

高,更能够提高扫油臂端部线速度和卷筒线速度同步的控制效果,具有更好的控制品质。

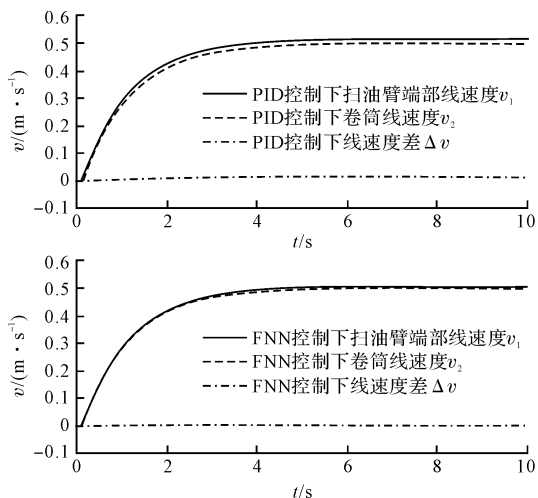


图 10 线速度同步误差对比图

4 结束语

本研究以内嵌式溢油回收机扫油臂端部线速度与卷筒线速度同步控制系统为研究对象,采用模糊神经网络控制方案,建立了双马达速度同步控制系统数学模型,利用 Matlab/Simulink 软件进行了稳定性与速度同步误差分析。

(1)从系统阶跃响应对比来看,PID 控制系统超调量为 23%,模糊神经网络控制系统基本无超调,PID 控制系统调节时间为 8 s,模糊神经网络控制系统调节时间为 5.2 s,调节时间更短,故与 PID 控制相比,模糊神经网络控制具有更好的动态响应特性和稳态特性;

(2)从线速度同步误差对比来看,当速度达到稳态时,采用 PID 控制系统线速度差为 16 mm/s,而采用模糊神经网络控制,系统的线速度差为 7 mm/s,故模糊神经网络控制相比 PID 控制,同步误差更小、同步精度更高。

参考文献 (References):

- [1] 杨前明,闫久祥,王世刚,等. 基于 D-H 位移矩阵法的溢油回收系统扫油臂运动学建模[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2014,33(1):92-97.
- [2] 杨前明,孔令奇,李 健,等. 电液比例马达速度同步控制

系统建模与仿真[J]. 工程设计学报,2015,22(4):330-336.

- [3] 杨前明,李 健,孔令奇. 海面溢油回收机双马达速度闭环同步控制实现方法研究[J]. 机床与液压,2015,43(19):105-108.
- [4] 刘晓峰,刘昕晖,王龙山,等. 基于模糊 PID 控制的大型履带起重机双马达速度同步控制[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(3):659-664.
- [5] 逢 波,王占林,白国长. 工程机械液压底盘试验台双马达同步的研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(9):2018-2021.
- [6] 王成磊,郭治富,董彦良,等. 基于定量反馈理论的双液压马达等同式同步控制器的设计研究[J]. 液压与气动,2011(12):18-23.
- [7] 田明秀. 永磁同步电动机的模糊神经网络控制方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学电气工程学院,2006.
- [8] 高恒路,桑 勇,邵龙潭. 同步控制策略及其典型应用的研究[J]. 液压气动与密封,2012,32(5):1-7.
- [9] 宋锦春. 电液比例控制技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.
- [10] 孔祥臻,赵敬伟,蒋守勇. 液压阀控马达速度系统模糊神经元控制与仿真[J]. 机床与液压,2011,39(17):111-112.
- [11] 周惜诵. 交流伺服驱动控制泵组的液压系统应用[J]. 液压气动与密封,2015,35(9):38-41.
- [12] 周佩秋. 基于模糊神经网络的双卷扬同步控制技术研究[J]. 机械设计与制造,2016(9):64-68.
- [13] 于 添,黄 旭,范格非. 基于神经网络和遗传算法的机床床身优化设计研究[J]. 机械,2016(3):25-27.
- [14] CHEN S Y, LEE C Y, WU C H, et al. Intelligent motion control of voice coil motor using PID-based fuzzy neural network with optimized membership function[J]. **Engineering Computations**,2016,33(8):2302-2319.
- [15] NGUYEN T B T, LIAO T L, YAN J J. Adaptive tracking control for an uncertain chaotic permanent magnet synchronous motor based on fuzzy Neural networks[J]. **Journal of Vibration and Control**,2015,21(3):580-590.
- [16] 刘延俊,于 刚,赵敬伟. 基于模糊神经网络的阀控马达系统仿真[J]. 山东大学学报:工学版,2006,36(4):96-99.
- [17] 杨国来,王洪泽,郭 龙. 阀控液压马达动态特性控制的仿真研究[J]. 液压气动与密封,2017,37(1):27-30.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

杨前明,洪广元,胡开文,等. 双马达模糊神经网络速度同步控制实现方法研究[J]. 机电工程,2017,34(11):1229-1234.

YANG Qian-ming, HONG Guang-yuan, HU Kai-wen, et al. Realization method of fuzzy neural network speed synchronous control of dual-motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(11):1229-1234.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>