

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.055

拖拉机电液悬挂系统模糊PID自适应控制方法*

李明生 赵建军 朱忠祥 谢斌 迟瑞娟 毛恩荣

(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室,北京 100083)

摘要: 将模糊PID自适应控制方法应用到拖拉机电液悬挂系统控制中。根据系统特性,设计了模糊PID自适应控制器,建立了电液悬挂系统模型,并与普通PID控制方法进行了牵引力控制、位置控制性能仿真分析。搭建了试验台对电液悬挂系统进行田间试验。试验结果表明,采用模糊PID自适应控制以后,电液悬挂系统设定耕深由0.1 m阶跃至0.3 m时,系统过渡过程时间为4 s,无超调量;设定牵引力由3 kN阶跃至7 kN时,系统过渡过程时间为5 s,系统超调量为25%。

关键词: 电液悬挂系统 模糊PID自适应控制 仿真 田间试验

中图分类号: S232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0295-06

Fuzzy-PID Self-adaptive Control Method in Electro-hydraulic Hitch System

Li Mingsheng Zhao Jianjun Zhu Zhongxiang Xie Bin Chi Ruijuan Mao Enrong

(Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fuzzy-PID self-adaptive control method was used in tractor's electro-hydraulic hitch system. Firstly, the fuzzy-PID self-adaptive controller was designed, and the model of the system was built. Secondly, the performance of draft control and position control was simulated and analyzed compared with PID control. At last, a field-test bed of electro-hydraulic hitch system was built. The test result showed that fuzzy-PID adaptive control had a better performance than PID control in electro-hydraulic hitch system. When the preset position stepped from 0.1 m to 0.3 m, the response time was 4 s, and overshoot was 0. When preset draft stepped from 3 kN to 7 kN, the system's response time was 5 s, and the overshoot was 25%.

Key words: Electro-hydraulic hitch system Fuzzy-PID self-adaptive control Simulation Field test

引言

电液悬挂系统是拖拉机上用于农具提升控制以及动力输出的重要组成部分,是一个闭环控制系统。PID控制是闭环控制的一种常见形式,具有算法简便、容易实现、鲁棒性强等特点,在控制领域得到了广泛应用^[1]。

PID控制原理简单,适应性强。传统的PID控制没有参数自适应调整能力,其参数整定必须相对于一个已知的系统,且参数整定之后可能只适用于

一种工况,因此固定的PID参数必然不能满足控制要求。实际应用中,PID参数方法一般为试验整定,包括Ziegler-Nichols方法^[2-3]、临界比例度法^[3-4]、衰减曲线法^[4-5]等,整定过程困难繁琐。为此,具有自适应能力的参数可调的PID控制方法开始得到研究与应用,包括单神经元PID自适应控制^[6-7]、RBF神经网络控制^[8-9]、BP神经网络控制^[10-12]、模糊PID自适应控制^[13]等。

拖拉机电液悬挂系统的机械以及液压系统部分都存在着非线性因素并且控制过程中容易受到不确

收稿日期:2013-06-26 修回日期:2013-07-11

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B01)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QJ018)

作者简介:李明生,博士生,主要从事车辆智能控制与液压研究,E-mail:li-ming.2004@163.com

通讯作者:毛恩荣,教授,博士生导师,主要从事拖拉机电液悬挂系统研究,E-mail:gxy15@cau.edu.cn

定因素的影响,为此本文将模糊 PID 自适应控制引入拖拉机电液悬挂系统中,并对系统控制性能进行研究。

1 电液悬挂系统原理

根据大功率拖拉机的作业特点和目前实际使用的功能要求,设计采用大功率拖拉机电液悬挂控制系统总体方案如图 1 所示。系统主要由驾驶员控制面板、传感器、液压系统、电子控制单元和悬挂机构等组成。驾驶员通过控制面板进行牵引力控制、位置控制、力位综合控制、油压控制等控制方式的选择及控制参数的设定;传感器主要包括牵引力传感器、耕深传感器、油液压力传感器等,传感器信号经信号放大及 A/D 转换后传递至 ECU;液压系统由液压泵、电液控制阀、液压缸、管接头及油管等组成,液压泵为系统提供油液动力,电液控制阀受电子控制单元控制,通过控制阀口的开闭及开口大小来控制油液方向及流量大小,从而控制悬挂机构的升降及执行速度;电子控制单元接收来自控制面板的控制信号及传感器信号,对比分析得出控制信号,并将控制信号放大后用于电液控制阀的控制。

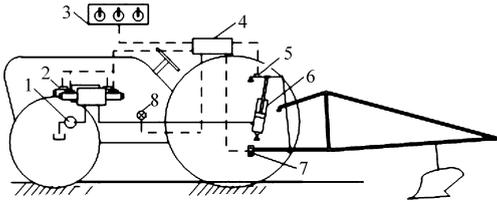


图 1 拖拉机电液悬挂控制系统

Fig. 1 Electro-hydraulic hitch control system in tractor

1. 液压泵
2. 电液控制阀组
3. 控制面板
4. 电子控制单元
5. 倾角传感器
6. 液压缸
7. 牵引力传感器
8. 油压传感器

2 模糊 PID 自适应控制

模糊 PID 自适应控制器由常规 PID 控制和模糊推理两部分组成,模糊推理部分实质就是一个模糊控制器,其输入是偏差和偏差变化率。PID 参数模糊自整定的原理是事先确定 PID 3 个参数同偏差和偏差变化率之间的模糊关系,在系统运行控制过程中通过不断查询模糊控制规则进行 PID 参数的实时修改,从而获得更好的动态与静态性能。针对牵引力控制,设计拖拉机电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制框图如图 2 所示。

牵引力控制中模糊 PID 控制器输入变量为牵引力的偏差以及牵引力偏差的变化率,输出量为比例控制阀控制电压。

2.1 输入输出变量及其论域确定

模糊控制器的输入变量为牵引力偏差 e 以及偏

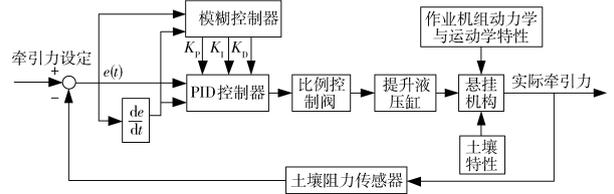


图 2 电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制框图

Fig. 2 Fuzzy-PID self-adaption controller structure of electric-hydraulic hitch system

差变化率 e_c , 输出变量为 PID 控制器参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。偏差 e 的基本论域取 $[-e, e]$, 偏差变化率 e_c 的基本论域取 $[-e_c, e_c]$, ΔK_p 的基本论域取 $[-\Delta K_p, \Delta K_p]$, ΔK_i 的基本论域取 $[-\Delta K_i, \Delta K_i]$, ΔK_d 的基本论域取 $[-\Delta K_d, \Delta K_d]$ 。

模糊控制器只能接收离散数据,而系统变量为连续变量,因此首先要进行论域的离散化。各个变量的离散论域如下:偏差 e 离散论域: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$;偏差变化率 e_c 离散论域: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$; ΔK_p 离散论域: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$; ΔK_i 离散论域: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$; ΔK_d 离散论域: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。各个变量的量化等级均为 7 级。

电液悬挂控制系统论域设计如下:①误差 e :基本论域为 $[-6, 6]$, 量化论域为 $[-3, 3]$, 量化因子为 0.5。②误差变化速率 e_c :基本论域为 $[-1.2, 1.2]$, 量化论域为 $[-3, 3]$, 量化因子为 2.5。③ ΔK_p :基本论域为 $[-0.09, 0.09]$, 量化论域为 $[-3, 3]$, 比例因子为 0.03。④ ΔK_i :基本论域为 $[-0.3, 0.3]$, 量化论域为 $[-3, 3]$, 比例因子为 0.1。⑤ ΔK_d :基本论域为 $[-0.0015, 0.0015]$, 量化论域为 $[-3, 3]$, 比例因子为 0.0005。

2.2 变量论域模糊子集确定

模糊控制中隶属函数的形状对控制效果影响较大。一般将低分辨率隶属函数的模糊集合用于系统误差较大的范围内以提高系统的稳定性,将高分辨率隶属函数的模糊集合用于系统误差较小或接近零的范围内以提高系统的灵敏度。

本控制系统采用三角形隶属度函数,每个变量取 7 个模糊子集,分别为:“负大”(NB)、“负中”(NM)、“负小”(NS)、“零”(ZO)、“正小”(PS)、“正中”(PM)、“正大”(PB),论域为 $[-3, 3]$, NB 为 Z 型隶属度函数, PB 为 S 型隶属度函数,其他为三角形隶属度函数。各个变量的隶属度函数如图 3 ~ 7 所示。

2.3 模糊控制规则

模糊控制规则是模糊控制器的核心,是在控制过程中对实践经验加以总结得到的模糊条件语句的

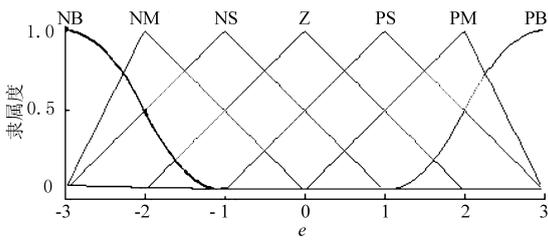


图3 偏差 e 隶属度函数

Fig. 3 Membership function of signal offset e

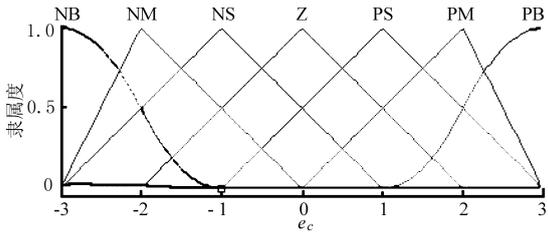


图4 偏差变化率 e_c 隶属度函数

Fig. 4 Membership function of signal offset change rate e_c

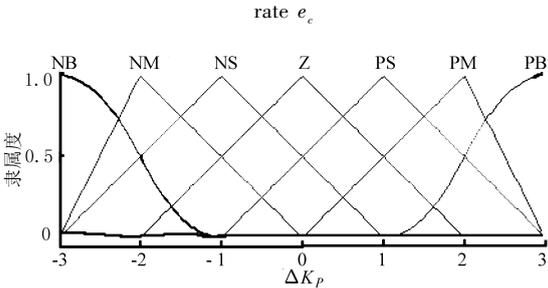


图5 输出变量 ΔK_p 隶属度函数

Fig. 5 Membership function of output variable ΔK_p

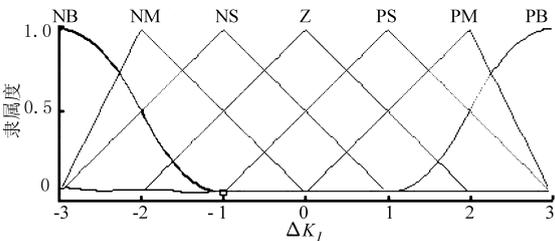


图6 输出变量 ΔK_i 隶属度函数

Fig. 6 Membership function of output variable ΔK_i

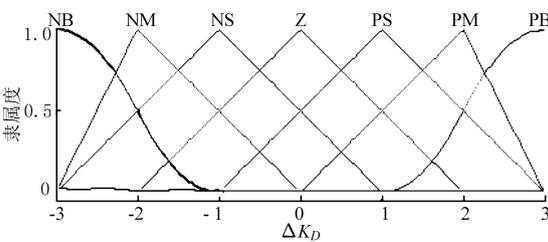


图7 输出变量 ΔK_d 隶属度函数

Fig. 7 Membership function of output variable ΔK_d

集合。

在进行模糊 PID 控制器设计时模糊规则的确定遵循以下原则：①当偏差 e 较大时，为了提高系统响应速度，比例环节应取较大值，微分环节取较小值，积分环节应尽量小以抑制积分的影响。②当偏差 e

处于中间值时，比例环节应该较小以减少超调量。③当偏差 e 较小时，比例与积分环节应取较大值以减小稳定误差，同时调整微分环节来降低系统的振荡。

由此制定模糊控制规则如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则

Tab. 1 ΔK_p fuzzy control rules

| e | e_c | | | | | | | |
|-----|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB | NB |
| NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB |
| NM | PB | PB | PM | PS | PS | Z | NS | NM |
| NS | PM | PM | PM | PS | Z | NS | NS | NS |
| Z | PM | PM | PS | Z | NS | NM | NM | Z |
| PS | PS | PS | Z | NS | NS | NM | NM | PS |
| PM | PS | Z | NS | NM | NM | NM | NB | PM |
| PB | Z | Z | NM | NM | NM | NB | NB | PB |

表 2 ΔK_i 模糊控制规则

Tab. 2 ΔK_i fuzzy control rules

| e | e_c | | | | | | | |
|-----|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB | NB |
| NB | NB | NB | NM | NM | NS | Z | Z | NB |
| NM | NB | NB | NM | NS | NS | Z | NS | NB |
| NS | NB | NM | NS | NS | Z | PS | PS | NB |
| Z | NM | NM | NS | Z | PS | PM | PM | NM |
| PS | NM | NS | Z | PS | PS | PM | PB | NM |
| PM | Z | Z | PS | PS | PM | PB | PB | Z |
| PB | Z | Z | PS | PM | PM | PB | PB | Z |

表 3 ΔK_d 模糊控制规则

Tab. 3 ΔK_d fuzzy control rules

| e | e_c | | | | | | | |
|-----|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB | NB |
| NB | PS | NS | NB | NB | NB | NM | PS | PS |
| NM | PS | NS | NB | NM | NM | NS | Z | PS |
| NS | Z | NS | NM | NM | NS | NS | Z | Z |
| Z | Z | NS | NS | NS | NS | NS | Z | Z |
| PS | Z | Z | Z | NS | Z | Z | Z | Z |
| PM | PB | PS | PS | PS | PS | PS | PB | PB |
| PB | PB | PM | PM | PM | PS | PS | PB | PB |

3 电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制仿真

根据所设计的模糊 PID 自适应控制器，在 Matlab/Simulink 中对电液悬挂控制系统的牵引力控制、位置控制以及力位综合控制性能进行仿真。

首先利用 Matlab 的模糊推理工具箱建立模糊推理系统，如图 8 所示。

根据图 3 ~ 7 的隶属关系，输入输出变量的隶属关系。按照模糊控制状态表在规则编辑器中输入控

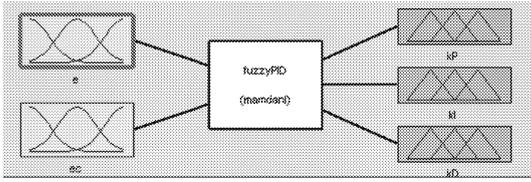


图8 模糊推理系统结构图

Fig. 8 Fuzzy inference system structure

制规则,在规则观察器中观察控制规则的图形表示如图9所示;通过曲面观察器观察输入输出变量的隶属关系结果如图10所示。

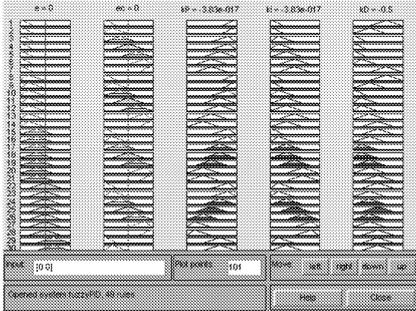


图9 模糊控制规则图形

Fig. 9 Fuzzy control rules graphics

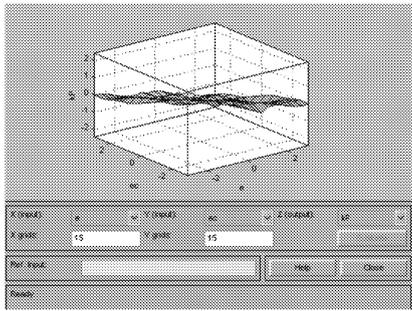


图10 输入输出变量隶属关系图形

Fig. 10 Subordinate relations graphics of input and output variables

在 Matlab/Simulink 中建立模糊 PID 自适应牵引力控制器模型如图 11 所示,模型输入牵引力偏差,模糊推理器根据经过量化偏差信号及偏差信号变化率对 PID 参数进行修正,输出控制电压信号。为了进行控制效果对比,建立 PID 控制器模型如图 12 所示。

建立电液悬挂系统仿真模型如图 13 所示。模型主要由牵引力设置模块、位置设置模块、控制器模型、控制接口、提升控制模型、下降控制模型,液压缸与作业机组模型等组成。

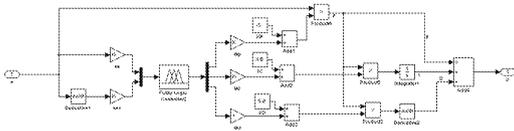


图11 模糊PID自适应控制器模型

Fig. 11 Fuzzy-PID self-adaptive controller model

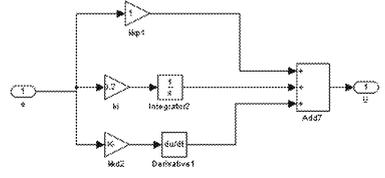


图12 PID控制器模型

Fig. 12 PID controller model

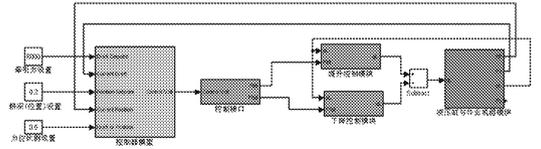


图13 电液悬挂系统模型

Fig. 13 Electric-hydraulic hitch system model

4 电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制试验

4.1 仿真试验

本文主要研究电液悬挂系统在位置控制、牵引力控制模式下的动态性能。

(1)位置控制模式下电液悬挂系统动态性能仿真

电液悬挂系统在位置控制模式下农具位置由 0 阶跃至 0.3 m 时,农具设定位置正、负阶跃变化时电液悬挂系统的响应特性仿真曲线如图 14 所示。由图可知,常规 PID 控制的过渡过程时间为 20 s,最大超调率为 6.7%;模糊 PID 自适应控制的过渡过程时间为 4.5 s,系统无超调。

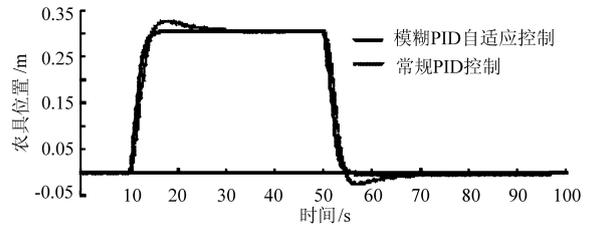


图14 位置控制模式农具位置调整曲线

Fig. 14 Farm implements' position adjustment curves in position control mode

(2)牵引力控制模式下电液悬挂系统动态性能仿真

电液悬挂系统牵引力控制信号由 8 000 N 至 9 000 N 阶跃时系统的响应特性仿真曲线如图 15 所示。由图可知,采用模糊 PID 自适应过渡过程时间为 2.4 s,系统变化过程平稳,无超调及振荡环节;采用 PID 过渡过程时间为 5.2 s,系统变化过程平稳,无振荡环节,有较小超调量。

4.2 田间试验

设计拖拉机电液悬挂系统田间试验方案如图 16 所示。电液悬挂系统控制器接收驾驶员操作

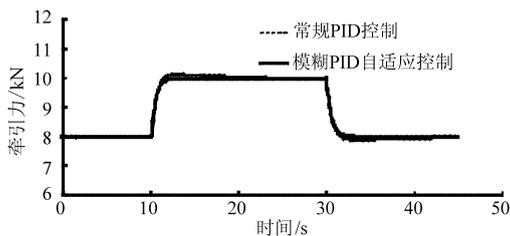


图 15 牵引力控制模式系统牵引力变化曲线

Fig. 15 Draft's curve in draft control mode

指令以及传感器信号,处理后生成电压控制信号进行电液比例提升下降控制阀的控制,同时将所有数据通过 NI 数据采集卡传输至 PC 机进行数据保存。搭建田间试验平台如图 17 所示。

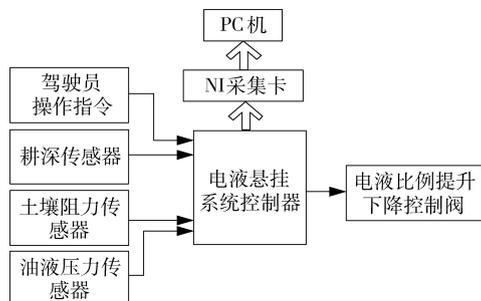


图 16 拖拉机电液悬挂系统田间试验方案

Fig. 16 Field test scheme of tractor electro-hydraulic hitch system



图 17 拖拉机电液悬挂系统室外试验台

Fig. 17 Field test bed of tractor electro-hydraulic hitch system

(1) 拖拉机电液悬挂系统位置控制试验

本试验中,拖拉机设定为 B2 挡,车速稳定在 8.6 km/h,首先设定耕深为 0.2 m,死区为 ± 1 cm,然后将耕深设定阶跃至 0.1 m,待系统稳定后将耕深设定阶跃至 0.25 m,记录电液悬挂系统变化曲线如图 18 所示。由图可知,位置控制模式下,设定耕深由 0.2 m 阶跃至 0.1 m 时,系统过渡过程时间为 5 s,超调量为 30%;设定耕深由 0.1 m 阶跃至 0.3 m 时,系统过渡过程时间为 4 s,无超调量。

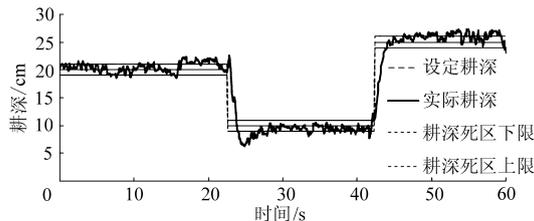


图 18 电液悬挂系统位置控制试验曲线

Fig. 18 Position control testing curves of electro-hydraulic hitch control system

(2) 拖拉机电液悬挂系统牵引力控制试验

试验过程中,拖拉机设定为 B2 挡,车速稳定在 8.6 km/h,电液悬挂系统初始牵引力为 3 kN,待系统稳定时对牵引力进行设定,先阶跃上升至 7 kN,稳定后阶跃下降至 2 kN,记录实际牵引力的变化,由此进行牵引力控制性能分析。为提高效率,防止电液比例阀频繁启闭造成的系统过热等现象,设置牵引力控制死区为 ± 500 N。牵引力控制试验牵引力变化曲线如图 19 所示。由图可知,牵引力控制模式下,设定牵引力由 3 kN 阶跃至 7 kN 时,系统过渡过程时间为 5 s,系统超调量为 25%;设定牵引力由 7 kN 阶跃至 2 kN 时,系统过渡过程时间为 6 s,系统超调量为 20%。系统控制平稳,对土壤比阻等阶跃抑制性较好,最大控制偏差为 1 kN。

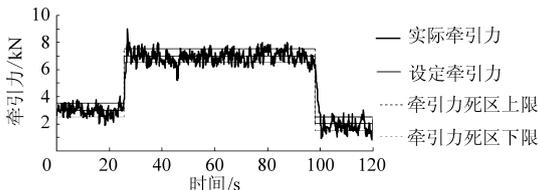


图 19 电液悬挂系统牵引力控制试验曲线

Fig. 19 Draft control test curves of electro-hydraulic hitch system

5 结束语

针对拖拉机电液悬挂系统开展了模糊 PID 自适应控制方法的研究工作,设计了模糊 PID 自适应控制器以及常规 PID 控制器,通过建立拖拉机电液悬挂系统数学模型进行系统性能分析并且搭建室外试验台进行了田间试验。试验结果表明,采用模糊 PID 自适应控制方法后,电液悬挂系统控制过程平稳,响应速度快,能够满足大功率拖拉机田间作业的要求。

参 考 文 献

- 1 朱盈,朱俊. 多种 PID 控制及其仿真比较[J]. 工业控制计算机,2010,23(1):53~54.
Zhu Ying, Zhu Jun. Several kinds of PID control and simulation comparison [J]. Industrial Control Computer, 2010, 23(1): 53~54. (in Chinese)
- 2 徐维维,胡亚非,李解. Ziegler-Nichols 法在双容水箱中的 Simulink 仿真过程的研究[J]. 流体传动与控制,2011(2):31~35.
Xu Weiwei, Hu Yafei, Li Jie. Study on Ziegler-Nichols method for the Simulink to the double water tank [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2011(2): 31~35. (in Chinese)

- 3 陈岩. 基于 Ziegler-Nichols 参数整定方法的张力控制系统研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
Chen Yan. Research on tension control system with Ziegler-Nichols tuning [D]. Shenyang: Northeastern University,2008. (in Chinese)
- 4 孙跃光,林怀蔚,周华茂,等. 基于临界比例度法整定 PID 控制器参数的仿真研究[J]. 现代电子技术,2012,35(8):192~194.
Sun Yueguang, Lin Huaiwei, Zhou Huamao, et al. Simulation study on setting of PID controller parameters according to critical proportioning method [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(8): 192~194. (in Chinese)
- 5 王正林,王开胜,陈国顺. Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- 6 曾贵娥,邱丽,朱学峰. PID 控制器参数整定方法的仿真与试验研究[J]. 石油化工自动化,2005,20(4):20~23.
Zeng Guie, Qiu Li, Zhu Xuefeng. The simulation and experiment on the parameter-tuning methods of PID controllers [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2005, 20(4): 20~23. (in Chinese)
- 7 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 8 徐朝阳,陈江,黄善祥. 基于比例系数改进的单神经元 PID 控制及仿真研究[J]. 新技术新工艺,2013(1):34~36.
Xu Zhaoyang, Chen Jiang, Huang Shanxiang. Research on single neuron PID control and its simulation based on improved proportional coefficient [J]. New Processes, 2013(1): 34~36. (in Chinese)
- 9 宋道金. 单神经元自适应 PID 控制器的性能优化设计[J]. 计算机工程与应用,2007,43(12):199~201.
Song Daojin. Design of single neuron adaptive PID controller [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(12): 199~201. (in Chinese)
- 10 林瑞全,邱公伟. 基于 S 函数的神经元 PID 控制器 Simulink 仿真模型[J]. 中国仪器仪表,2001,10(2):4~5.
Lin Ruiquan, Qiu Gongwei. Simulink simulation model of neuron PID controller based on S-function[J]. China Instrumentation, 2001, 10(2): 4~5. (in Chinese)
- 11 王首斌. 基于 BP 神经网络的 PID 控制器的仿真研究[J]. 电气传动自动化,2008,30(6):22~25.
Wang Shoubin. Research on simulation of PID controller based on BP neural network [J]. Electric Drive Automation, 2008, 30(6):22~25. (in Chinese)
- 12 李绍铭,赵伟. 基于 S 函数的 RBF 神经网络 PID 控制器 Simulink 仿真[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2008,18(1):19~21.
Li Shaoming, Zhao Wei. Simulink simulation of RBF network PID controller based on S-function [J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology, 2008, 18(1): 19~21. (in Chinese)
- 13 廖芳芳,肖建. 基于 BP 神经网络 PID 参数自整定的研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(7):1 711~1 713.
Liao Fangfang, Xiao Jian. Research on self-tuning of PID parameters based on BP neural networks [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7):1 711~1 713. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 294 页)

- 10 庄继德. 计算车辆地面力学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 11 崔莹,高峰. 可变直径轮月球探测车运动学建模与分析[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(3):348~352.  
Cui Ying, Gao Feng. Kinematic modeling and analysis of variable diameter wheeled lunar rover [J]. Journal of Beihang University, 2008, 34(3):348~352. (in Chinese)
- 12 陈家瑞. 汽车构造:下册[M]. 北京:机械工业出版社,2009
- 13 赵继俊. 优化技术与 MATLAB 优化工具箱[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- 14 焦晓娟. RecurDyn 多体系统优化仿真技术[M]. 北京:清华大学出版社,2010:107~151.
- 15 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册:下册[M]. 北京:机械工业出版社,1994.