

用于船舶舵机的电液负载模拟器之控制系统

慕香永¹, 裴 润¹, 刘志林¹, 张 军²

(1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201108)

摘要: 对船舶舵机使用的电液负载模拟器, 建立了传递函数模型, 给出了频率特性. 根据这个模拟器的实时性和跟踪精度指标, 设计了主从式结构计算机控制系统; 其中采用了自适应模糊PID控制器, 以保证系统的鲁棒性能; 又设计了前馈控制器, 提供速度补偿和加速度补偿, 使系统有多余力时, 能够满足性能指标. 实际加载实验表明, 无论主动或被动加载, 其精度都满足设计指标, 并且系统工作稳定可靠.

关键词: 负载模拟器; 多余力; 模糊自适应PID; 前馈补偿

中图分类号: TP273.5 **文献标识码:** A

A control system for the electro-hydraulic load-simulator employed in a marine rudder

MU Xiang-yong¹, PEI Run¹, LIU Zhi-lin¹, ZHANG Jun²

(1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201108, China)

Abstract: For the electro-hydraulic load-simulator employed by the marine rudder, we establish its transfer function model and present its frequency characteristic. Based on the real-time operation requirements and the target-tracking accuracy, we design a master-slave computer control system. In this control system, a fuzzy adaptive PID controller is employed for ensuring the robust performance. A feedforward compensator with speed and acceleration compensations is also designed for ensuring the performance requirements when there are superfluous forces. Practical load-experiment results show that this system can work steadily and reliably, and the accuracies of active and passive loads also satisfy design requirements..

Key words: load simulator; superfluous force; adaptive fuzzy PID; feedforward compensate

1 引言(Introduction)

近几十年来, 负载模拟器在军事和民用领域得到了广泛应用. 其中, 用于飞行器舵机加载的电液负载模拟器经国内外学者长期研究, 取得了许多有价值的研究成果^[1,2]. 但对用于模拟大加载力范围的船舶舵机负载模拟器的研究还相对较少. 船舶操舵系统所受负载非常复杂, 包括摩擦负载、水动力铰链力矩负载、浪涌和舵面空拍干扰力矩载荷等. 舵机负载模拟器是用于模拟舰船舵机所受水动力负载的地面半实物仿真设备, 其功能是在实验室条件下复现舵面所受各种负载, 考核操舵系统在实际负载条件下的性能指标和可靠性, 达到缩短研制周期, 节约研制经费, 提高可靠性和成功率的目的. 电液伺服系统由于具有响应速度快、系统频带宽等优点, 在这类仿真设备中有着广泛的应用^[3]. 船舶舵机电液负载模拟器是典型的被动式电液力伺服系统, 系统工作时存在着多余力干扰, 多余力的抑制是系统设计中必须解决的关键问题之一. 本文主要研究了大型船

舶负载模拟器的数学模型, 控制器的设计以及实际系统中的多余力的有效消除手段等问题, 并在实际应用中取得了很好的效果. 本文中所设计的系统中共有1号、2号、3号三套结构相同的子系统, 后续分析中以1号加载子系统为例.

2 舵机负载模拟器工作原理及数学模型(Working principle and mathematic model of rudder load simulator)

系统的整体结构如图1所示, 负载模拟器由两个部分组成: 舵机系统和用于模拟水动力负载的加载系统. 图1中左侧1是加载液压缸, 图1中右侧2是舵机液压缸, 它是船舶上操舵系统的原形液压缸, 在该系统中为被试对象即承载对象. 舵机系统是泵控缸系统, 它本身是位置伺服系统, 按照一定的规律和要求跟随指令信号 U_{pr} 主动运动, 其输出对应为舵角. 在进行被动加载时, 舵机液压缸活塞杆的位移 Y_p 由位移传感器3测出, 传感器的输出电压 U_{pf} 经调理后进

入控制计算机. 控制计算机中的力函数发生器根据位移信号产生加载系统的指令输入信号 $F_r = F(Y_p)$, 控制器通过伺服阀控制加载液压缸对承载对象加载, 经力传感器4将加载液压缸的输出力信号 U_{Ff} 反馈给控制器, 构成闭环. 系统也可以进行主动加载, 此时舵机不运动, 相当于一个质量块.

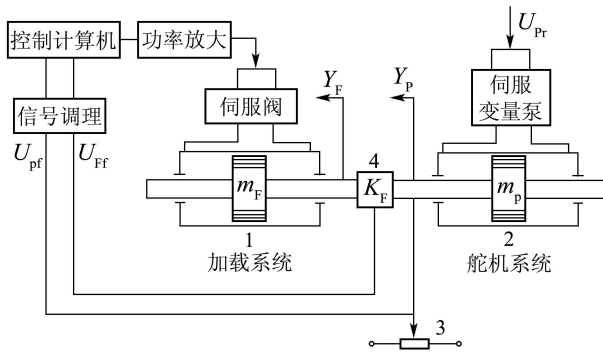


图1 舵机电液负载模拟器结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of rudder load simulator

由图1和前述分析以及文献[4, 5], 可得到图2所示的系统方框图.

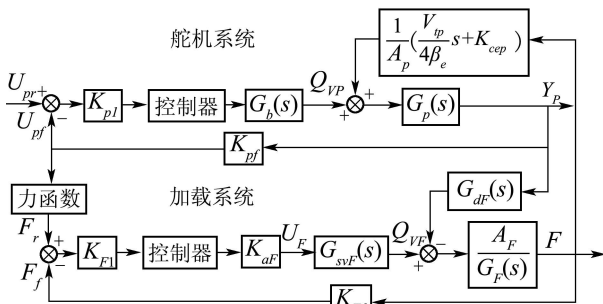


图2 系统方框图

Fig. 2 Block diagram of system

图2中舵机系统随舵机型号和所选用的液压控制与执行元件的不同, 其参数将有很大的变化. 因此, 本文主要介绍加载系统主要控制参数. 其中部分参数由机械和液压系统设计获得, 部分参数由现场调试实测获得, 系统主要传递函数及参数说明如下:

$G_{svF}(s)$ —加载系统伺服阀的传递函数;

$$G_{svF}(s) = \frac{Q_{VF}(s)}{U_F(s)} = \frac{K_{svF}}{\frac{s^2}{\omega_{svF}^2} + \frac{2\xi_{svF}}{\omega_{svF}} + 1}. \quad (1)$$

$G_F(s)$ —无外部扰动时, 液压缸的负载压降与伺服阀的负载流量之间的等效传递函数;

$$G_F(s) = \frac{m_F V_{tF}}{4\beta_e K_F} s^3 + \left(\frac{B_{cF} V_{tF}}{4\beta_e K_F} + \frac{m_F K_{ceF}}{K_F} \right) s^2 + \left(\frac{V_{tF}}{4\beta_e} + \frac{B_{cF} K_{ceF} + A_F^2}{K_F} \right) s + K_{ceF}, \quad (2)$$

K_F —力传感器刚度(N/m);

K_{aF} —加载系统功率放大器的放大系数(V/V);

K_{Ff} —加载系统力传感器放大系数(V/N);

m_F —加载系统液压缸的活塞及活塞杆质量(kg);

K_{svF} —加载系统伺服阀流量增益(m^3/s)/V;

V_{tF} —加载系统液压缸的容积(m^3);

β_e —液压油的等效体积弹性模数(Pa);

B_{cF} —加载系统液压缸的粘性阻尼系数N/(m/s);

ξ_{svF} —加载系统伺服阀阻尼比;

ω_{svF} —加载系统伺服阀的角频率(rad/s);

K_{ceF} —加载系统总的流量压力-系数(m^3/s)/Pa;

A_F —加载系统液压缸的截面积(m^2);

K_{pf} —舵机系统位移传感器的放大系数(V/m);

K_{F1} —加载系统前项增益(V/V);

图2中的 $G_{dF}(s)$ 将在5中由式(4)给出. 表1列出了加载系统的主要技术参数.

表1 加载系统参数

Table 1 Loading system parameters

K_F	1.56×10^9	K_{aF}	2
K_{Ff}	0.00001	m_F	260
K_{svF}	1.24×10^{-3}	V_{tF}	3.56×10^{-2}
β_e	6.9×10^8	B_{cF}	75
ξ_{svF}	0.6	ω_{svF}	628
K_{ceF}	3.57×10^{-11}	A_F	4.12×10^{-2}
K_{pf}	18.2	K_{F1}	2

当油源压力为10 Mpa, 将表1参数代入系统传递函数后, 可得图3所示的加载系统的固有频率特性.

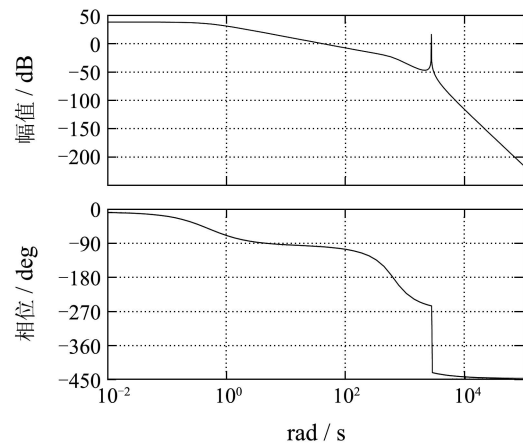


图3 加载系统频率特性

Fig. 3 Frequency characteristic of loading system

3 舵机负载模拟器计算机控制系统设计(Design of rudder load simulator computer control system)

计算机控制系统的总体结构如图4所示. 系统以

上位机和下位机为核心, 构成3套独立的加载子系统, 各子系统的组成基本相同。

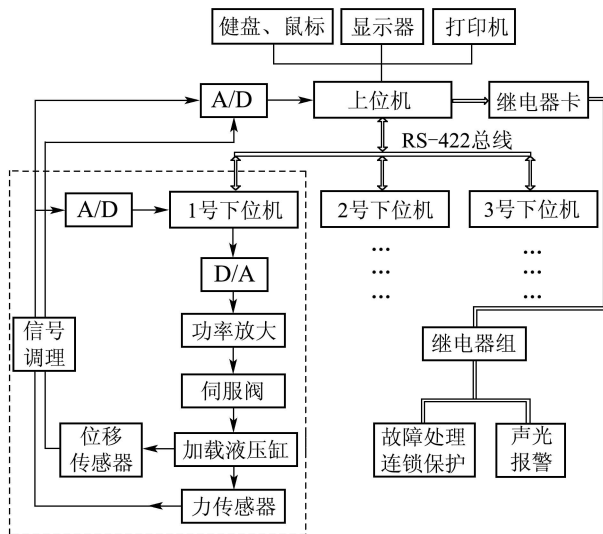


图4 计算机控制系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of computer control system

上位机是全系统的管理核心, 硬件系统以研华工控机为主机, 配有研华公司的数据采集卡、继电器卡和MOXA公司的多串口卡, 软件系统采用WINDOWS98作为操作系统, 编程语言为VisualC++6.0。上位机的主要功能有: 产生并下传力-舵偏角函数曲线、数据实时采集、存储和图形显示、向下位机发送操作指令、系统管理、人机对话、数据分析与处理等。

下位机是各子系统的控制核心, 硬件系统采用研华工控机作为主机, 配有研华公司的330 kHz高速数据采集控制卡和串口通信卡, 软件采用DOS6.2作为操作系统, 编程语言为TurboC2.0。下位机主要完成以下任务: 力函数的实时插补运算、反馈和前馈控制算法运算、各传感器信号的采集、接收上位机下传的力-舵角函数曲线及操作指令等。下位机采样时间为2 ms, 采用RS-422接口与上位机通信。在各传感器和A/D转换器之间采用了以OP-07为基本器件的信号调理板, 通过对调理板上的电阻和跳线的调整可以实现不同信号形式、不同电压极性和不同电压范围的信号预处理。功率放大由两个前置的OP-07和一个BB公司的OPA547所组成的放大电路来实现。

系统上位机采用窗口-菜单式界面, 通过键盘设置主、被动加载和控制参数, 利用VXD技术采集和显示全部数据, 对加载全过程进行管理和监控。系统具有安全报警和故障分析处理功能, 具有超载和超限位保护功能, 各个物理量的门限值均可灵活设定。系统出现故障后能以声、光、屏幕显示等方式报警, 指示故障类型, 同时做出连锁保护和紧急处理。

4 模糊自适应PID控制器设计(Design of fuzzy adaptive PID controller)

舵机系统本身是位置伺服系统, 有可能存在超调大、性能不稳定等不确定因素。加载中随着被试舵机和工作环境的变化, 承载对象的特性参数和结构也将随之改变。同一舵机系统, 在进行主动加载和被动加载时, 相对于加载系统来说, 也可以看作是不同的加载对象。以上情况都可以看作是加载系统的不确定因素, 若采用常规的PID控制器很难满足系统的性能指标要求。为满足系统的鲁棒性能, 增强抗干扰能力, 同时考虑系统的实时性要求, 加载系统采用图5所示的模糊自适应PID控制器^[6]。

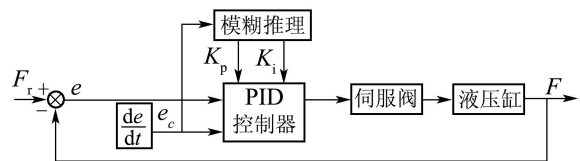


图5 模糊自适应控制器结构图

Fig. 5 Structure of fuzzy adaptive controller

根据系统的特点, 在本系统中采用PI控制, K_p 和 K_i 初值分别为1.0和0.01, 隶属函数曲线如图6所示。系统中共有35条模糊规则, 在每个采样周期中根据所得到的误差 e 和误差变化量 e_c , 利用模糊规则在线对 K_p 和 K_i 进行整定^[7,8]。系统采用重心法进行反模糊化, 控制量经D/A转换器送至功率放大器来控制伺服阀。

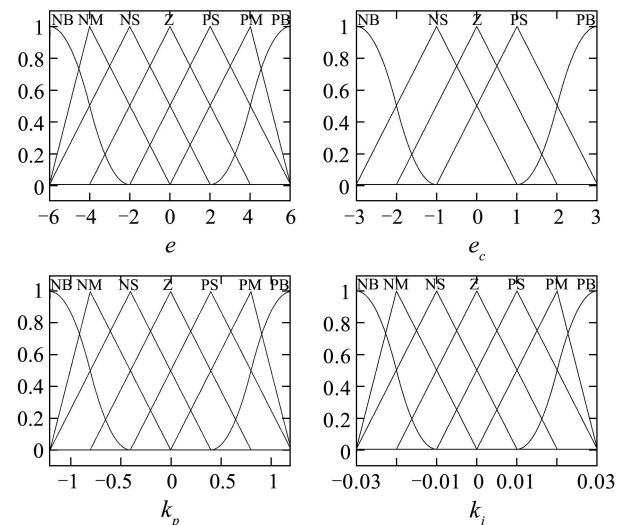


图6 e, e_c, k_p, k_i 隶属函数

Fig. 6 Membership functions of e, e_c, k_p, k_i

5 前馈补偿器设计(Design of feedforward compensator)

系统进行被动加载时, 舵机系统在运动的同时, 通过轴系连接环节拖动加载系统一起运动。由于舵

机的主动运动,在加载液压缸的两腔中产生强迫流量,该流量导致加载系统出力出现很大的偏差,即多余力^[4,5],它是系统的主要扰动。前馈控制是一种按照扰动进行补偿的开环控制,能够实现对系统全部或部分干扰的补偿。前馈控制系统虽然能克服外干扰的影响,但其静态精度很难保证,因此前馈控制往往要与反馈控制结合起来。图7所示为图2中加载系统加入前馈补偿环节后的前馈-反馈控制结构图,图7中: $G_c(s)$ 为图2中由 K_{F1} 、控制器、 K_{aF} 串联组成的环节, $E(s)$ 为前馈补偿环节。

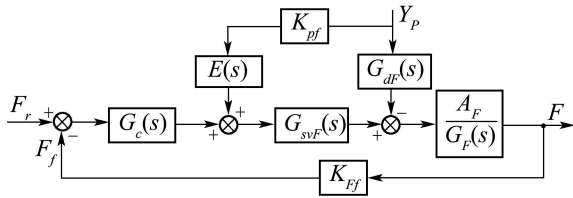


图7 前馈-反馈控制系统结构图

Fig. 7 Structure of feedforward-feedback control system

加载系统无补偿时,在给定量 F_r 和干扰量 Y_p 同时作用下,输出力 F 的传递函数为

$$F(s) = \frac{G_c(s)G_{svF}(s)A_F F_r(s) - A_F G_{dF}(s)Y_p(s)}{K_{ceF}G_F(s) + G_c(s)G_{svF}(s)A_F K_{Ff}}, \quad (3)$$

式(3)中 $G_{dF}(s)$ 为干扰通道等效传递函数,如式(4)所示:

$$G_{dF}(s) = \left(\frac{V_{tF}m_F}{4\beta_e} s + K_{ceF}m_F + \frac{V_{tF}B_{cF}}{4\beta_e} \right) s^2 + (A_F^2 + K_{ceF}B_{cF})s. \quad (4)$$

由干扰量 Y_p 所产生的多余力 F_d 的传递函数为

$$F_d(s) = \frac{-A_F G_{dF}(s)Y_p(s)}{K_{ceF}G_F(s) + G_c(s)G_{svF}(s)A_F K_{Ff}}. \quad (5)$$

由式(3)(4)可知,实际加载力 F 主要由3部分组成:受伺服阀控制的加载力、与操舵系统液压缸活塞杆速度有关的多余力、与操舵系统液压缸活塞杆加速度和加速度导数有关的多余力。其中,与操舵系统液压缸活塞杆速度有关的多余力直接作用在加载液压缸上,其产生机理比较复杂,是多余力的主要部分。在机械和液压设计中采取以下措施有利于消除系统的这部分多余力:在加载液压缸两腔开连通孔;增大加载液压缸两腔的泄漏;降低操舵系统与加载系统的连接刚度;选择高频响电液伺服阀,缩短加载系统对多余力冲击的响应时间;

据上述分析,在不增加机械机构的情况下,仅靠反馈控制很难达到满意的效果,而很多理论上可行的消除扰动的控制方法由于受到实际条件和速度的

限制无法实现。依据本节前述的前馈控制思想,本系统采用速度补偿和加速度补偿来消除多余力。如图7,引入补偿环节 $E(s)$ 后,多余力 F_d' 的传递函数为

$$F_d'(s) = \frac{[k_{pf}E(s)G_{svF}(s) - G_{dF}(s)]A_F Y_p(s)}{K_{ceF}G_F(s) + G_c(s)G_{svF}(s)A_F K_{Ff}}. \quad (6)$$

由于伺服阀频带很宽(100 Hz),将伺服阀作为比例环节来处理,即 $G_{svF}(s) = K_v$,当 $E(s)$ 为

$$E(s) = \frac{G_{dF}(s)}{K_{pf}K_v} \quad (7)$$

时,理论上可以完全消除多余力。实际应用中采用了速度补偿和加速度补偿,它们的系数都为根据实际调试所得的常数。本系统中舵机舵角的变化范围为 $-30^\circ \sim +30^\circ$,图8为输入为零时,未加入(上图)和加入(下图)前馈补偿环节的被动加载输出力曲线。为便于观察,图8中虚线为放大5倍的舵角曲线。

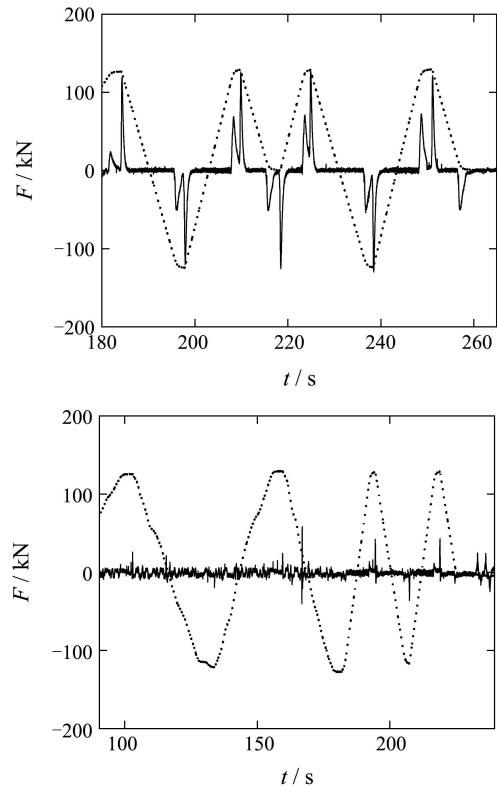


图8 前馈补偿实验曲线

Fig. 8 Experiment curves of feedforward compensating

6 实验结果(Experiment results)

系统实际加载曲线如图9~11所示。

图9为200 kN常值力主动加载实验曲线,图10为幅值50 kN频率1 Hz正弦力主动加载实验曲线,加载中为保护舵机系统不受突然加载大力的冲击,恒值力以斜坡形式上升到预定的加载力,正弦力以斜坡形式先上升到150 kN后再实施正弦力加载。图11是加载梯度为800 kN/30°时被动加载实验曲线,为便于

观察,图11中舵角曲线放大了10倍.

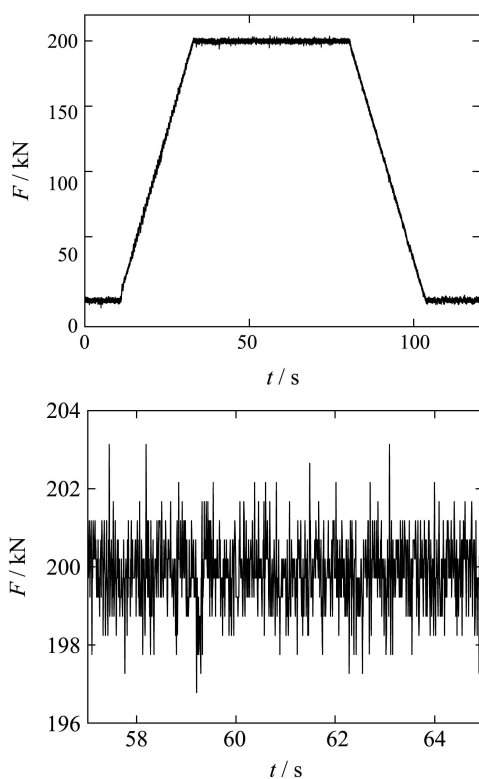


图9 200 kN主动加载及局部放大曲线

Fig. 9 200 kN active loading curve and partial amplified curve

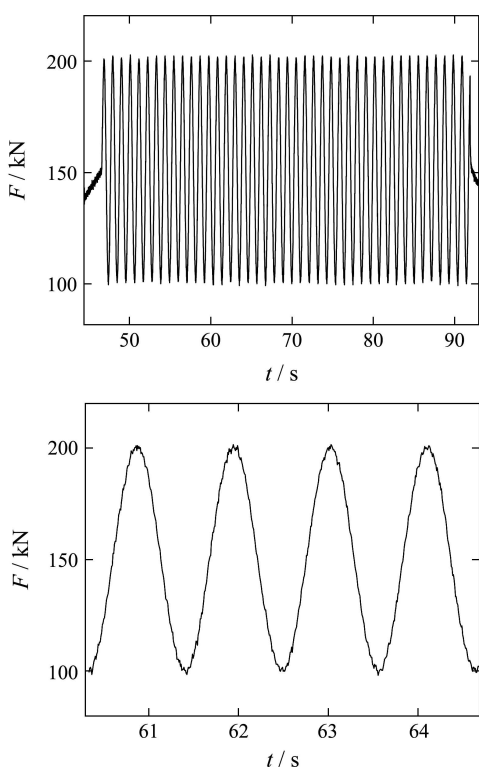


图10 50 kN/1Hz加载及局部放大曲线

Fig. 10 50 kN/1Hz loading curve and partial amplified curve

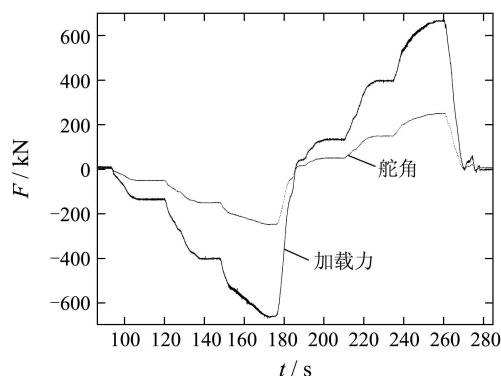


图11 800 kN/30°被动加载曲线

Fig. 11 800 kN/30° passive loading curve

7 结束语(Conclusion)

依据对系统工作机理分析,所设计的计算机控制系统在采用自适应模糊PID控制器和前馈补偿器后,提高了系统的鲁棒性能和对多余力的消除能力.实际工作结果表明系统工作可靠,主、被动加载精度高,满足要求的性能指标.

参考文献(References):

- [1] NAM Y S, HONG S K. Force control system design for aerodynamic load simulator[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(5): 549 – 558.
- [2] KARPENKO M, SEPEHRI N. Hardware-in-the-Loop simulator for research on fault tolerant control of electrohydraulic flight control systems[C] // *Proceedings of American Control Conference*. Minneapolis, USA: IEEE Press, 2006, 7: 4645 – 4651.
- [3] NIKSEFAT N, SEPEHRI N. Design and experimental evaluation of a robust force controller for an electro-hydraulic actuator via quantitative feedback theory[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(12): 1335 – 1345.
- [4] 华清, 焦宗夏, 王小东, 等. 电液负载模拟器的精确数学模型[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 31 – 35.
(HUA Qing, JIAO Zongxia, WANG Xiaodong, et al. Complex mathematical model of electro-hydraulic torque load simulator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(11): 31 – 35.)
- [5] 刘长年. 液压伺服系统优化设计理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
(LIU Changnian. *Optimized Design Theory of Hydraulic Servo System*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.)
- [6] CARVAJAL J, CHEN G R. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis[J]. *Information Sciences*, 2000, 123(3): 249 – 270.
- [7] 李敏远, 都延丽, 姜海鹏. 智能自整定PID在药剂温度控制系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(5): 805 – 810.
(LI Minyuan, DU Yanli, JIANG Haipeng. Application of intelligent self-tuning PID in temperature control system of medicament[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(5): 805 – 810.)
- [8] 薛阳, 彭光正, 贺保国, 等. 气动位置伺服系统的非对称PID控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 20(1): 129 – 133.
(XUE Yang, PENG Guangzheng, HE Baoguo, et al. Asymmetric fuzzy PID control for pneumatic position control system[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 20(1): 129 – 133.)

够满足对过热汽温实时控制的需要. 同时可根据具体控制对象, 在工况变化不大的情况下, 采取间断性地在线模型辨识, 可满足实时性更高的系统.

7 结论(Conclusion)

本文将MPSO算法融合到NNPC中, 提出基于MPSO-RBF混合优化策略的模型预测, 以及基于MPSO的滚动优化. 针对过热汽温的控制, 构造了基于此NNPC的串级控制系统, 通过仿真试验, 表明该方法具有良好的控制性能.

参考文献(References):

- [1] 范永胜, 徐本皋, 陈来九. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23 – 28.
(FAN Yongsheng, XU Bengao, CHEN Laijiu. Study of adaptive fuzzy control of boiler superheated steam temperature based on dynamic mechanism analysis[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 1997, 17(1): 23 – 28.)
- [2] LAZAR M, PASTRAVANU O. A neural predictive controller for non-linear systems[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, 60(3/5): 315 – 324.
- [3] 王俊年, 申群太, 沈洪远, 等. 基于多种群协同进化微粒群算法的径向基神经网络设计[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2): 251 – 255.
(WANG Junnian, SHEN Quntai, SHEN Hongyuan, et al. Evolutionary design of RBF neural network based on multi-species cooperative particles warm optimizer[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(2): 251 – 255.)
- [4] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C] // *IEEE International Conference of Evolutionary Computation*. Anchorage, Alaska: [s.n.], 1998: 69 – 73.
- [5] CLERC M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C] // *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*. Washington, USA: [s.n.], 1999: 1951 – 1957.
- [6] 左兴权, 李士勇. 采用免疫进化算法优化设计径向基函数模糊神经网络控制器[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 521 – 525.
(ZUO Xingquan, LI Shiyong. Optimal design of radial basis function fuzzy neural network controller based on immune evolutionary algorithm[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 521 – 525.)
- [7] EBERHART R, SHI Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C] // *IEEE International Conference of Evolutionary Computation*. Seoul, South Korea: [s.n.], 2001: 81 – 86.
- [8] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [9] SOLOWAY D, HALEY P J. Neural generalized predictive control[C] // *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Dearborn, MI, USA: [s.n.], 1996: 277 – 282.

作者简介:

- 肖本贤** (1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能控制, E-mail: xiaobenxian@126.com;
- 王晓伟** (1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制, E-mail: feixiangwei@hotmail.com;
- 朱志国** (1980—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制, E-mail: tree20000@163.com;
- 刘一福** (1962—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为热控自动化, E-mail: dcs2008@ah163.com.

(上接第568页)

作者简介:

- 慕香永** (1971—), 男, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系博士研究生, 主要研究方向为负载模拟器的复杂控制技术、机器人控制, E-mail: muxy005@hit.edu.cn;
- 裴润** (1939—), 男, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系教

授、博士生导师, 主要研究方向为计算机控制、机器人控制;

刘志林 (1977—), 男, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系博士研究生, 主要研究方向为混杂系统、预测控制;

张军 (1972—), 男, 上海航天技术研究院副研究员, 主要研究方向为预测控制、信号处理.