

双阀并联电液伺服力控系统的迭代学习控制*

于少娟^{1,2}, 彭 昌², 宋君君², 熊晓燕¹, 熊诗波¹

(1. 太原理工大学机械电子工程研究所 太原, 030024) (2. 太原科技大学电子信息工程学院 太原, 030024)

摘要 针对大部分舵机电液伺服力控系统存在多余力的问题, 提出采用双电液伺服阀并联控制, 即高响应大流量伺服阀和 p-qv 伺服阀并联的控制方法。考虑系统的非线性和时变特性, 采用了模糊控制与迭代学习控制相结合的控制方法, 即一个控制器采用模糊学习控制, 另一个采用迭代 PI 控制。理论分析及仿真结果表明, 双阀并联控制方案在舵机启动和停车过程中可以更好地抑制多余力, 同时改善了系统的加载性能、非线性和时变特性的影响。

关键词 迭代学习控制; 模糊控制; 双阀并联控制; p-qv 伺服阀

中图分类号 TH137.9

引言

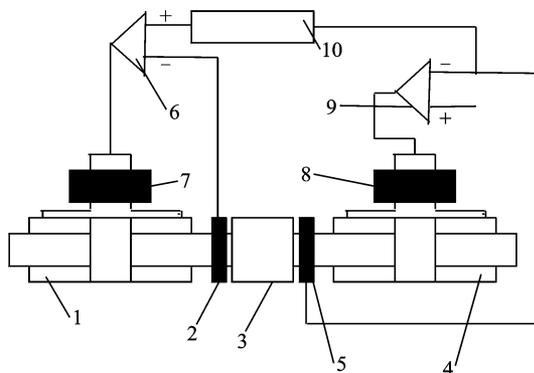
舵机电液伺服系统是一个典型的被动式电液力控系统, 在加载系统跟随舵机运动的同时, 加载缸中流量的变化会造成多余力的产生。舵机电液伺服系统是飞行器在设计阶段进行地面半实物仿真的主要设备之一, 用以模拟飞行器飞行过程中作用在舵面上的气动载荷。随着军事与国防工业的发展, 对电液负载模拟器的控制性能和技术指标的要求越来越高。负载模拟器可缩短飞行器研制周期, 节约研制经费, 提高可靠性和成功率, 因此, 研制高性能的电液负载模拟器具有重大的实际意义^[1-4]。

舵机电液伺服系统在动态加载过程中, 由于存在多余力的干扰, 会严重影响加载精度, 所以必须对多余力进行有效的抑制^[5]。目前, 国内都是用控制策略来补偿多余力, 但结果不太理想。笔者采用双阀并联控制来补偿多余力, 即主要用 p-qv 伺服阀来补偿多余力, 使控制施力系统的流量阀完全工作在无扰动的状态下。由于舵机系统本身的非线性, 时变性控制策略主要采用模糊迭代学习控制。

1 舵机电液伺服系统

舵机电液伺服系统原理如图 1 所示。左侧是加载系统, 右侧是模拟舵机系统。此系统由液压缸、电液伺服阀、伺服放大器、力传感器和位移传感器等重要部件组成。舵机系统是一个阀控缸系统, 加载系统

通过位移传感器检测出驱动侧液压缸位移, 经过力函数发生器输入相应的驱动信号给加载伺服阀, 驱动伺服阀阀芯运动, 从而使加载液压缸两腔产生与力载荷谱要求一致的压力差, 对驱动系统进行加载。力传感器将检测到的力电信号反馈到输入端, 与给定指令信号相比较, 以偏差信号控制阀芯偏移量, 形成闭环控制回路。但由于驱动液压缸与加载液压缸之间直接机械连接, 驱动液压缸的主动运动带动了加载液压缸的运动, 因此产生了一个与缸位移成比例的强迫流量, 从而形成多余力干扰。



1-加载液压缸; 2-力传感器; 3-惯性负载; 4-舵机液压缸; 5-位移传感器; 6、9-电子控制器; 7、8-伺服阀; 10-力函数发生器

图 1 舵机系统模拟电液加载台结构图

2 加载系统的数学模型

由各个部分的传递函数方程可得加载系统的力

* 国家自然科学基金资助项目(51075291); 山西省高校科技研究开发资助项目(20081063); 山西省研究生创新资助项目(20092013); 山西省科技攻关资助项目(20100322014, 20110322003); 太原科技大学博士基金资助项目(20122033)

收稿日期: 2011-06-13; 修改稿收到日期: 2011-09-27

加载方程^[6]如下。

阀的流量方程为

$$Q_L = K_q X_V - K_c P_L \quad (1)$$

其中： Q_L 为负载流量； K_q 为滑阀在稳态工作点附近的流量增益； X_V 为阀芯位移； P_L 为负载压力； K_c 为滑阀在稳态工作点附近的流量-压力系数。

液压缸工作腔的流量连续性方程为

$$Q_L = A s Y + \left(C_{lc} + \frac{V_t}{4\beta_e} s \right) P_L \quad (2)$$

其中： A 为活塞有效面积； Y 为活塞位移； C_{lc} 为液压缸的泄漏系数； V_t 为两个油腔的总容积； β_e 为有效体积弹性系数。

液压缸和负载的力平衡方程为

$$P_L = \frac{1}{A} (m s^2 + B_c s + K) Y + \frac{1}{A} F \quad (3)$$

其中： F 为作用在活塞上的任意外负载力； B_c 为活塞和负载的黏性阻尼系数； K 为负载的弹簧刚度。

力平衡方程为

$$F_{pM} = K(Y_2 - Y) \quad (4)$$

$$F_{pM} + F_c = m s^2 Y \quad (5)$$

其中： F_{pM} 为舵机驱动负载的力； F_c 为力传感器检测的驱动力。

由式(4)和式(5)得

$$Y = \frac{K Y_2 + F_c}{m s^2 + K} \quad (6)$$

由以上公式可得到，在给定量 u_r 、相机械干扰量 y_2 同时作用下的输出量 F_c 为

$$F_c = \left[(u_r - K_F F_c) \frac{K_a K_{V1} K_q A}{T_{V1} s + 1} - \left(\frac{A^2 s}{m s^2 + K} \right) \times (K Y_2 + F_c) \right] \frac{1}{K_{ce} + \frac{V_t}{4\beta_e} s}$$

其中： K_a 为放大器增益； $K_F = K_e / K_c$ 为力传感器系数； K_{V1} 为伺服阀增益； m 为活塞和负载的总质量。

加载系统方块图如图2所示。

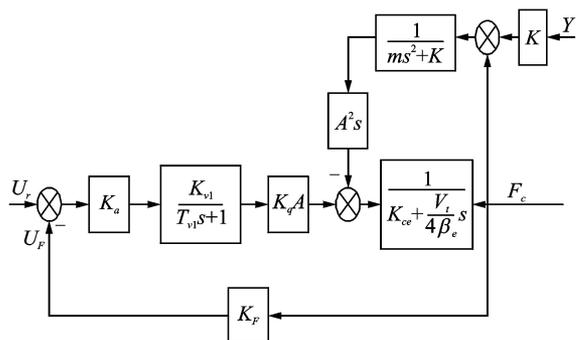


图2 加载系统方块图

3 双阀并联流量补偿原理

目前，被动式施力系统一般采用单伺服阀控制，这对伺服阀的性能要求很高，一般要求伺服阀工作在理想情况下才可以满足系统性能要求。实际工作中这种理想情况很难达到，随着加载频率的增加，多余力也会随着增大，导致加载误差变大，加载系统的性能变差，严重时甚至导致系统无法正常加载。使用双伺服阀控制正是基于使伺服阀工作在理想状态的思想产生的^[1,3]。

双阀补偿控制的原理是在加载系统的执行(加载)缸的两腔相对于加载伺服阀位置处再并联一个流量补偿阀。双阀并联控制方案实质上是一种将力控制和流量补偿控制进行职能分工的方法。双阀控制中用p-qv 伺服阀补偿强迫流量，另一个流量伺服阀控制加载力矩，即单独用一个伺服阀完成结构不变性原理补偿环节的流量补偿功能。图3为双阀并联控制结构图。但是双阀并联控制工作时可能不稳定，必须进行合理的增益配置，尽量使两阀叠加后的流量增益曲线在工作区域内不出现大的非线性，并且要保证两阀的零位一致。

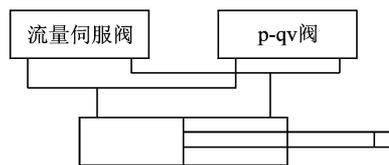


图3 双阀并联控制结构图

流量-压力伺服阀又称为p-qv 伺服阀，是在流量伺服阀的基础上，引入负载压力反馈回路构成的。由于负载压力的负反馈作用，当负载压力增大时，滑阀开口量减少；反之，负载压力减小，滑阀开口量增大，输出流量增大。因此，p-qv 伺服阀的压力-流量曲线斜率比流量伺服阀的压力流量特性曲线斜率大，如图4所示。p-qv 伺服阀由流量变化引起的压力变化远小于流量伺服阀，有利于减小多余力。因为国内还不能获得大流量的压力伺服阀，而p-qv 伺服阀的额定流量通常较小，所以可以由高响应大流量伺服阀和小型p-qv 伺服阀组成的双阀并联控制来实现对舵机系统的加载。主要用p-qv 伺服阀补偿多余力使控制施力系统的流量阀完全工作在不扰动的状态下，改善系统的性能^[7]。

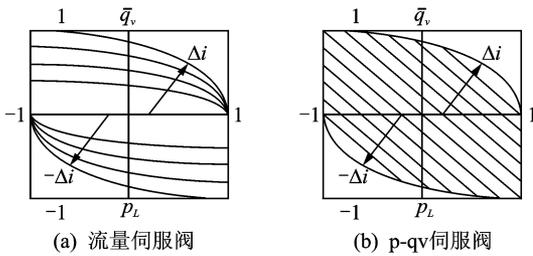


图4 伺服阀特性曲线

4 模糊迭代学习控制

4.1 控制原理

模糊迭代学习控制系统就是在模糊控制器基础上,增加一个迭代学习控制环节,模糊迭代学习控制原理图^[8]如图5所示。

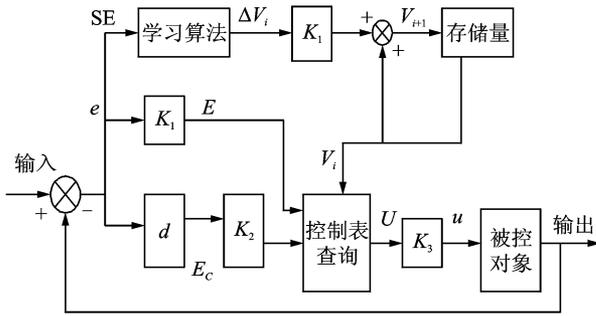


图5 模糊迭代学习控制原理图

笔者使用的二维模糊控制器,其输入量的偏差为 E ,偏差的变化率为 EC 。 K_1, K_2, K_3 分别为误差的量化因子、误差变化的量化因子和输出控制量的量化因子。二维模糊控制器进行模糊化、模糊推理和解模糊一系列操作,用得到的实际控制量 U 来控制被控系统。模糊迭代控制是在此基础上增加了一个迭代控制环节,目的是利用先前的控制误差积累修正不完善的模糊控制规则,达到改善控制效果的目的^[9]。采取的学习控制律为

$$V_{i+1} = V_i + K_l \Delta V_i \quad (7)$$

其中: V_{i+1}, V_i 为学习控制环节的模糊输出变量; K_l 为输出控制量校正的加权因子; ΔV_i 为通过学习算法计算出的校正量。

在 $\Delta V_0 = 0$ 时可将学习控制律简化为

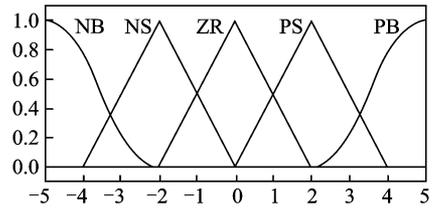
$$V_i = V_{i-1} + K_l e_i =$$

$$V_0 + K_l \sum_{j=1}^i e_j = K_l \sum_{j=1}^i e_j = K_l \Delta V_i \quad (8)$$

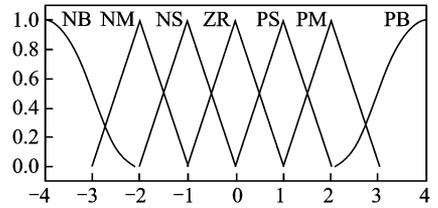
则模糊控制器的输出 U 被 V_i 修正为模糊控制器的输出 $U' = U + V_i$ 。

4.2 控制器设计

二维模糊控制器输入量偏差为 E ,输入量偏差的变化率为 EC ,论域为 $[-5, 5]$,定义5个模糊集,分别用“正大”(PB)、“正小”(PS)、“零”(ZR)、“负小”(NS)和“负大”(NB)来表示,如图6(a)所示。模糊控制器输出控制量为 U ,论域为 $[-4, 4]$,定义7个模糊集,分别用“正大”(PB)、“正中”(PM)、“正小”(PS)、“零”(ZR)、“负小”(NS)、“负中”(NM)和“负大”(NB)来表示,如图6(b)所示。



(a) 输入变量 E, EC 的隶属度函数



(b) 输入变量 U 的隶属度函数

图6 隶属度函数

笔者根据理论和经验设计了25条模糊规则,如表1所示。

表1 模糊控制规则

U	E					
	NB	NS	ZR	PS	PB	
EC	NB	NB	NM	NS	PM	ZR
	NS	NM	NS	NS	ZR	PM
	ZR	NM	NS	ZR	PS	PM
	PS	PS	ZR	PS	PM	PM
	PB	ZR	PM	PS	PM	PB

4.3 建立模糊迭代学习控制 Simulink 模型

通过上述描述的模糊控制器,再加上迭代控制算法,利用 Matlab/Simulink 中建立包含模糊迭代控制器的仿真模型如图7所示。

5 仿真研究

5.1 Matlab 和 Amesim 联合仿真

根据实际的液压回路,在 AMEsim 软件里直接

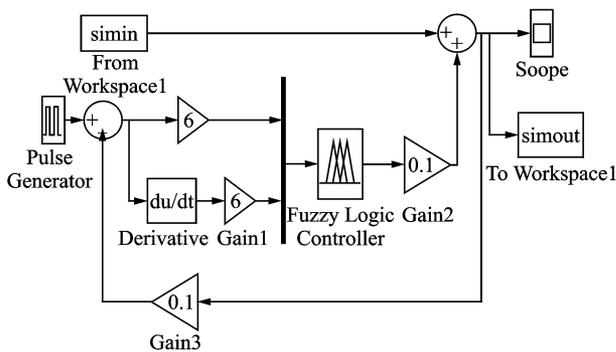


图7 模糊迭代学习控制器Simulink 仿真模型

调用各种元件模块,合理设置各个元件的参数,也可利用HCD库中的模型搭建所需要的元件,然后将各元件连接成完整的液压回路。图7为利用AMESim软件搭建的舵机系统模型,由油泵、电液伺服阀、溢流阀、液压油缸、位置传感器、压力传感器及接口模块等组成。其中舵机系统和加载系统的控制器集合到了一个模块中。舵机系统仿真方块图见图9。

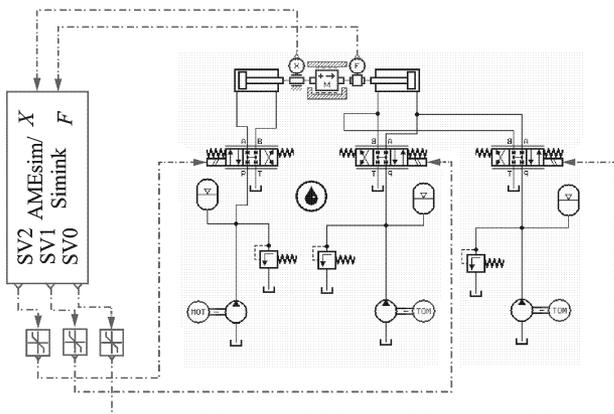


图8 系统模型联合仿真图

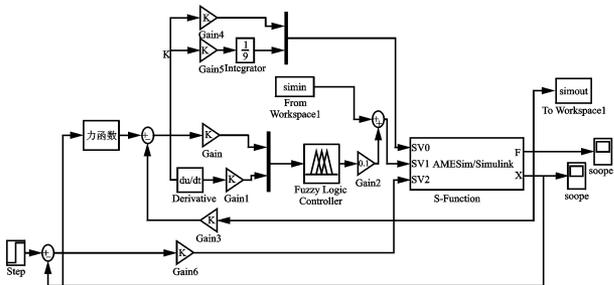


图9 舵机系统仿真方块图

加载系统高相应大流量伺服阀采用模糊迭代学习控制,p-qv 伺服阀采用迭代PI控制。

5.2 仿真结果

图10为单阀和双阀时采用常规PID控制各加载阶跃信号和正弦信号时的仿真曲线。

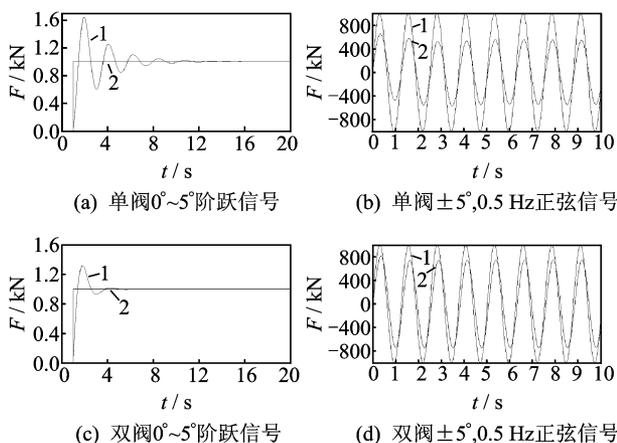


图10 PID控制

图11为双阀时大流量伺服阀采用模糊迭代学习控制,p-qv 采用常规PID控制时,±5°,0.5 Hz 正弦信号的仿真曲线图。其中曲线1为给定曲线,曲线2为采用未学习之前的跟踪曲线,曲线3为学习3次时的跟踪曲线,曲线4为学习6次时的跟踪曲线。

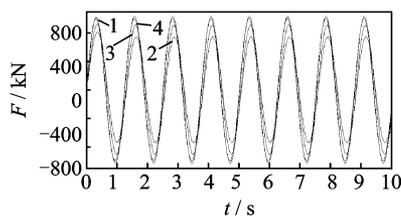


图11 模糊迭代学习控制

比较图10单阀、双阀控制可以看出,加载系统在启动时双阀并联控制比单阀控制的加载精度有了很大提高。但从正弦信号可以看出,当舵机具有一定速度时,通过常规PID控制,只采用双阀控制并不能达到令人满意的加载精度,而采用模糊迭代控制后跟踪精度明显增强。

6 实验结果

图12分别为单阀常规PID控制试验曲线和双阀并联模糊迭代控制试验曲线。由图12可以看出,采用单阀时多余力峰值约为7 kN,双阀时多余力峰值约为3 kN,多余力明显减少。

7 结束语

双阀控制可以在舵机系统启动和停车时很好地补偿多余力,而在舵机达到一定速度时,模糊迭代控制可以使加载系统精确地跟踪给定信号。仿真结果

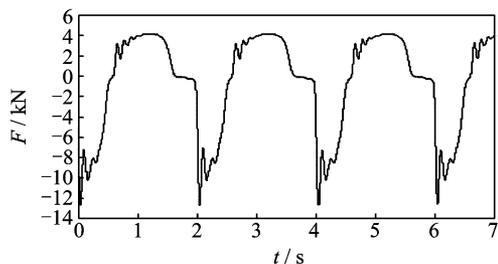
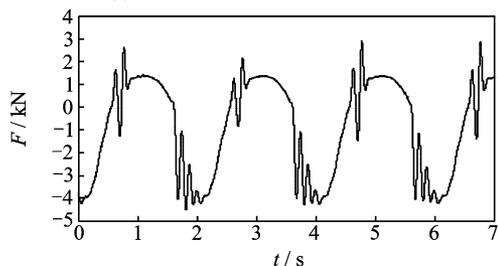
(a) 单阀PID控制 $\pm 5^\circ, 0.5$ Hz的正弦信号(b) 双阀并联模糊迭代控制 $\pm 5^\circ, 0.5$ Hz的正弦信号

图12 多余力试验曲线

表明,双阀控制和模糊迭代控制使系统获得良好的加载性能,提高了系统的精度。由实验结果也可以看出,双阀控制比单阀控制时的多余力小很多,初步验证了并联双阀采用模糊迭代控制比单阀控制明显减少了扰动,可提高系统的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 郝经佳,赵克定,徐宏光. 双阀控制在电液负载仿真台中的应用[J]. 中国机械工程, 2002, 13(10): 814-817.
Hao Jingjia, Zhao Keding, Xu Hongguang. The application of double valve control with pressure and flow servo valve in electro-hydraulic load simulator [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13 (10): 814-817. (in Chinese)
- [2] 权龙,邢向丰. Fuzzy-PID 在车辆液压悬架主动减振系统中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 28(S): 71-75.
Quan Long, Xing Xiangfeng. Application of a fuzzy-PID to the active damping system of hydraulic suspension for an automobile [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 28 (S): 71-75. (in Chinese)
- [3] 金波,朱世强,张光琼,等. 双阀并联电液位置控制系统研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(9): 72-75.

Jin Bo, Zhu Shiqiang, Zhang Guangqiong, et al. Study on parallel connected hydraulic position control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(9): 72-75. (in Chinese)

- [4] 张福波,王贵桥,杜林秀,等. 电液伺服疲劳试验机负载刚度自适应模型研究[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(1): 16-19.
Zhang Fubo, Wang Guiqiao, Du Linxiu, et al. Research on load rigidity adaptive model of electro-hydraulic servo fatigue testing machine [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27(1): 16-19. (in Chinese)
- [5] 卢林,王军政,陈彩可,等. 电液力控制系统在结构强度试验加载装置中的应用[J]. 液压与气动, 2004(8): 57-59.
Lu Lin, Wang Junzheng, Chen Caike, et al. Application of electro-hydraulic force control system in structure intensity experimental facility [J]. Hydraulic and Pneumatic, 2004(8): 57-59. (in Chinese)
- [6] Kyoung K A, Quang T D. Self-tuning of quantitative feedback theory for force control of an electro-hydraulic test machine Control [J]. Engineering Practice, 2009, 17: 1291-1306.
- [7] Temeltas H, Gokasan M, Bogosyan O S. A nonlinear load simulator for robot manipulators [C] // Proceedings of the 27th Annual Conference of the IECON'01. Denver, CO, USA: Industrial Electronics Society, 2001: 357-362.
- [8] 于少娟,齐向东,吴聚华. 迭代学习控制理论及应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 113-139.
- [9] Park K H, Bien Z, Huang D H. A study on the robustness of a PID type iterative learning controller against initial state error [J]. International Journal of Systems Science, 2003, 30(1): 49-59.



第一作者简介:于少娟,女,1971年10月生,博士、教授。主要研究方向为智能控制(学习控制)及其在电液伺服系统中的应用。曾发表《电力系统励磁控制机端电压的迭代学习补偿》(《电力系统保护与控制》2009年第7期)等论文。

E-mail: yushao71@yeah.net