

# 基于模糊 PID 控制的变排量液压 马达系统仿真

马俊功, 杨晓月

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘要:** 与定排量液压马达系统相比较, 变排量液压马达系统可降低流量消耗、提高总体效率、减小设备尺寸, 且具有响应速度快等优点, 能满足大功率和大惯量负载使用需求; 针对液压伺服系统的非线性和负载参数的时变等特点, 对变排量液压马达控制系统策略进行了研究, 通过对其进行 AMESim 建模仿真, 分析了其速度控制和运动位置控制方法; 由于常规 PID 控制器的控制参数在系统动态响应中是固定不变的, 液压系统在工作过程中受到负载扰动而使得输出速度波动较大, 从而造成不平稳性; 故采用模糊自整定 PID 控制方法, 在线实时调整 PID 控制参数, 运用 AMESim 和 Matlab/Simulink 软件对该伺服系统进行联合建模仿真; 仿真结果表明, 与常规 PID 控制相比较, 模糊 PID 控制在响应速度和平稳性等方面具有显著优势。

**关键词:** 变排量液压马达; 模糊 PID 控制; AMESim

## Simulation of Variable Displacement Hydraulic Motor System Based on Fuzzy PID Control

Ma Jungong, Yang Xiaoyue

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Compared with fixed displacement hydraulic motor system, variable displacement hydraulic motor system has a significant improvement in peak flow consumption, overall efficiency and equipment size, and has the advantage of fast response. It can meet the demand of high power and large inertia load. Based on the nonlinearity characteristic of the hydraulic servo system and the time variability of the load parameters, the control strategy of the variable displacement hydraulic motor control system is studied. The speed control and the motion position control method are analyzed by AMESim modeling and simulation. Conventional PID controller cannot adjust control parameters according to load changes in real time, which can cause instability due to speed fluctuation. Therefore, we utilize the fuzzy PID control model of AMESim and Simulink in Matlab to model and simulate the servo system. Simulation results show that compared with the conventional PID control, fuzzy PID control has a significant advantage in terms of response speed and stability performance.

**Keywords:** variable displacement hydraulic motor system; fuzzy PID control; AMESim

## 0 引言

与典型的定排量液压马达系统相比较, 变排量液压马达系统主要的结构不同在于取消了伺服阀, 并且用可转动的斜盘及其相关控制代替了固定斜盘。对于定排量液压马达而言, 在所有工作状况下, 排量是定值, 流量和速度成正比, 在高速时需要流量很大。而对于变排量液压马达而言, 马达排量要匹配于转矩需求, 因此, 在变负载工作条件下, 变排量液压马达系统流量需求得以减小。除了减少流量消耗, 变排量液压马达系统还可以减少能量消耗、减小供油设备的尺寸和重量以及配电系统容量等。同时, 由于其响应快, 为提高机动性和战场生存能力提供了保证<sup>[1]</sup>。变排量液压马达可应用于作战飞机舱门功率驱动系

统, 实现武器内埋装置, 以达到隐身和减小飞行阻力的目的。

随着高性能飞机的发展, 大功率大惯量负载的工况越来越多, 传统的定排量马达速度调节系统已无法满足驱动装置性能要求, 而变排量马达驱动系统组成的容积调速回路因功率损失小(没有溢流损失和节流损失)、效率高(工作压力随负载变化)、响应快、油温低及多工况匹配性能等方面的优势, 将在高速、大功率系统有很大的实际应用价值。

由于变排量液压马达伺服系统的非线性特性和负载的变化性, 常规 PID 控制难以取得良好的控制效果。而模糊自整定 PID 控制将模糊控制与常规 PID 控制相结合, 可以根据工况实时调节控制参数, 故采用模糊自整定 PID 控制方法, 运用 AMESim 和 Matlab/Simulink 软件对该液压伺服系统进行联合仿真, 并与常规 PID 控制结果进行比较。

## 1 变排量马达系统组成及工作原理

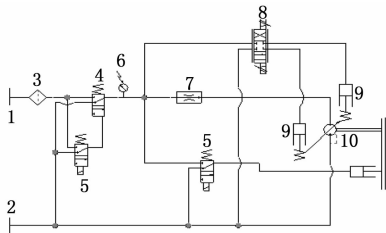
变排量液压马达根据变量机构的不同可分为单向、双

收稿日期:2017-09-14; 修回日期:2017-10-14。

作者简介:马俊功(1969-),男,内蒙古自治区赤峰市人,讲师,硕士研究生导师,主要从事机电系统建模仿真、电液伺服控制方向的研究。

向变排量液压马达<sup>[2]</sup>。单向变排量马达的变量机构为油缸和弹簧，油缸出力和弹簧弹力作用在马达斜盘两端，平衡时确定斜盘角度位置，从而控制马达的排量。双向变排量马达的变量机构为两个油缸，其出力分别作用于斜盘的两端，通过出力比较控制马达的排量。由于双向变排量马达换向方式简单，本文选择研究双向变排量马达系统，以下简称变排量马达系统。

变排量液压马达系统的工作原理如图 1 所示，其主要由以下几个部分组成：油箱（1—2）、过滤器（3）、关闭阀（4）、电磁导阀（5）、压力传感器（6）、流量控制阀（7）、伺服阀（8）、2 个液压缸（9）、双向变量马达（10）等。



1. 供油; 2. 回油; 3. 过滤器; 4. 关闭阀; 5. 电磁导阀; 6. 压力传感器; 7. 流量控制阀; 8. 伺服阀; 9. 液压缸; 10. 变量马达。

图 1 变排量液压马达系统原理图

变排量液压马达系统的工作原理：采用伺服阀控制双向变量液压马达排量的方式，通过调节伺服阀开度的大小调节进入变量油缸的流量，两变量油缸出力相比较，力平衡时马达斜盘倾角位于特定位置，从而控制液压马达的排量。初始位置时，变量油缸在复位弹簧的作用下液压马达排量达到最小位置。由于此系统中，变量油缸的数量为 2 个，因此可以实现双向变排量。

根据液压马达的转矩公式：

$$T = \frac{\Delta p V}{2\pi} \eta_m \quad (1)$$

式中， $T$  为液压马达转矩， $\Delta p$  为液压马达进出口压差， $V$  为液压马达排量， $\eta_m$  为液压马达的机械效率。在转矩一定的情况下， $\Delta p$  变大，则需要的排量越小。与阀控定排量液压马达系统相比，变排量液压马达系统省去了伺服阀上损耗的压降，约为系统压力的 1/3，即作用在变排量液压马达上的压差  $\Delta p$  较大，所以变排量液压马达系统需要的流量小于定排量液压马达系统。在转速相同的情况下，排量越小，系统所需流量就越小。

## 2 变排量马达系统模型建立

### 2.1 三环控制模型

为了精确实现位置和速度的控制，该液压伺服系统采用斜盘倾角+速度+位置的三环控制方式。三环控制系统如图 2 所示，角位置传感器向控制器提供变排量液压马达斜盘的角度（即排量）反馈信号，构成马达斜盘角度的位置闭环。转速传感器为控制器提供液压马达输出轴的转速

反馈信号，构成液压马达轴的转速闭环。角位移传感器向控制器提供输出的角度位置反馈信号，构成系统输出的角度位置闭环。上述三环控制模型系统中，斜盘角度的位置环是内环，速度环是外环，而输出角度位置控制环则是最外面的大闭环。

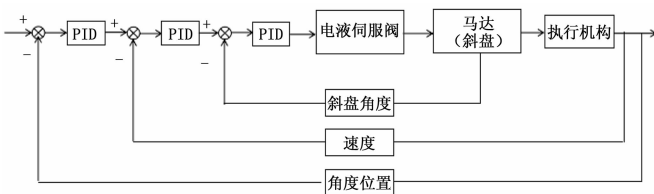


图 2 三环控制系统方框图

控制器使用最外环的角位置传感器的反馈信号，给出运动方向和位置的闭环数字控制信号，数字控制信号通过控制器功率放大器变成控制电信号，控制电信号驱动电液喷嘴挡板伺服阀的电马达，控制推动变排量液压马达斜盘执行机构的流量，从而控制变排量液压马达的斜盘角度，而斜盘角度决定了液压马达的排量以及输出扭矩。

### 2.2 液压伺服系统 AMESim 模型建立

根据变排量液压马达系统原理图（如图 1），结合上小节所述的斜盘倾角+速度+位置的三环控制方式，在 AMESim 软件中利用信号控制库、液压库和机械库中的元件图标搭建草图，经过选择子模型、设置模型参数等步骤，建立变排量液压马达伺服系统整体模型，如图 3 所示<sup>[3]</sup>。其中，控制器的输入信号设定为速度曲线，通过积分转变为角度位置曲线。液压马达输出经过减速箱减速，再将转矩和转速传递到执行机构上，以推动大惯量负载和提高系统的功重比。

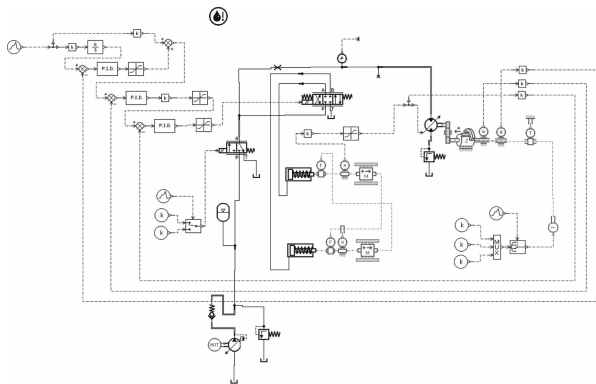


图 3 变排量液压马达伺服系统 AMESim 模型

现将速度控制信号分为三段，即加速段、恒速段和减速段。

## 3 模糊 PID 控制器设计

常规 PID 控制器的控制参数在系统动态响应过程中是固定不变的，不能根据负载的改变进行实时调整，致使液压系统在工作过程中因输出速度波动而造成不平稳性。为

解决这一问题, 可采用模糊自整定 PID 控制方法对变排量液压马达系统进行控制。这种方法结合了常规 PID 控制和模糊控制各自的优势。

### 3.1 模糊 PID 控制原理

模糊 PID 控制器的原理如图 4 所示, 主要由模糊控制器以及 PID 控制器两个部分组成。模糊控制器主要功能是对 PID 控制器中的参数进行在线整定, 以误差  $e$  和误差变化  $ec$  作为输入, 然后进行模糊化、模糊推理、清晰化, 得到三个控制参数的变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。PID 控制器接收来源于模糊控制器的控制参数的变化量, 并按公式 (2) 计算得到实时控制值  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ , 输出控制实际系统。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  是 PID 控制参数初始值。模糊 PID 控制不会破坏原有的常规 PID 的控制效果, 仅根据系统的跟踪误差对 PID 控制参数进行增量调节。

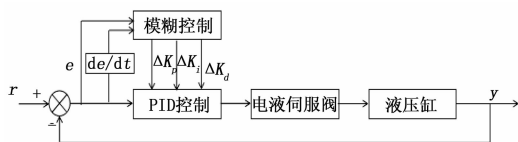


图 4 模糊 PID 控制器原理图

### 3.2 输入输出变量和模糊化

模糊控制器的输入量为角度位置信号与给定值的误差  $e$  和该误差变化率  $ec$ , 模糊控制器的输出量为调整 PID 控制器参数的变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。

定义 7 个模糊子集  $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$  来描述输入量  $e$ 、 $ec$  和输出量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的值。在该系统中, 模糊控制器的输入、输出变量的隶属函数均采用三角形隶属度函数, 如图 5 所示。三角形隶属度函数灵敏度高、占内存小、运算简单。误差  $e$  的基本论域确定为  $[-7.5, 1]$ , 误差变化  $ec$  的基本论域确定为  $[-6, 6]$ 。观察 PID 参数的变化范围, 可以得到 PID 的三个参数变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的基本论域均为  $[-6, 6]$ 。

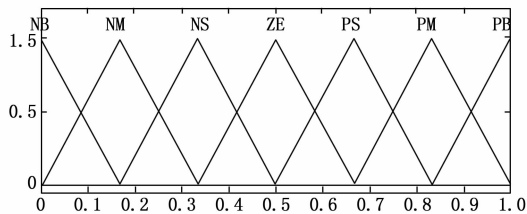


图 5 三角形隶属度函数

### 3.3 模糊控制规则

定义模糊 PID 控制通过建立输入量 (误差  $e$ 、误差变化  $ec$ ) 与输出量 (PID 控制参数变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ) 之

间相对应的模糊规则来实现实时调节控制参数的作用。模糊规则的建立需要依据专家和设计者的经验和实际使用时的情况, 使控制器按照需要完成控制参数的实时调整。

在 PID 控制器中, 比例环节成比例地反映调节系统的误差信号。增大  $K_p$  值, 可加快系统的响应速度, 减小系统的稳态误差, 但  $K_p$  值过大会产生较大的超调, 甚至使系统不稳定; 减小  $K_p$  值可以减小超调, 提高稳定性, 但  $K_p$  值过小会减慢响应速度, 延长调节时间<sup>[4]</sup>。因此, 当误差偏大时, 应取较大的  $K_p$  值以提高响应速度, 迅速较小误差, 而当误差偏小时,  $K_p$  值则取较小值, 以使系统具有较小的超调并保证一定的响应速度。 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊规则分别如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1  $\Delta K_p$  模糊规则表

$ec \backslash K_p$	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	O
NM	PB	PB	PM	PS	PS	O	NS
NS	PM	PM	PM	PS	O	NS	NS
O	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PS	PS	O	NS	NS	NM	NM
PM	PS	O	NS	NM	NM	NM	NB
PB	O	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 2  $\Delta K_i$  模糊规则表

$ec \backslash K_p$	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	O	O
NM	NB	NB	NM	NS	NS	O	O
NS	NB	NM	NS	NS	O	PS	PS
O	NM	NM	NS	O	PS	PM	PM
PS	NM	NS	O	PS	PS	PM	PB
PM	O	O	PS	PS	PM	PB	PB
PB	O	O	PS	PM	PM	PB	PB

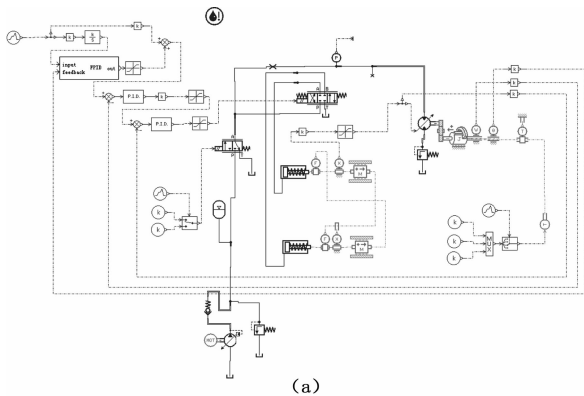
表 3  $\Delta K_d$  模糊规则表

$ec \backslash K_p$	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	O
NS	O	NS	NM	NM	NS	NS	O
O	O	NS	NS	NS	NS	NS	O
PS	O	O	O	O	O	O	O
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

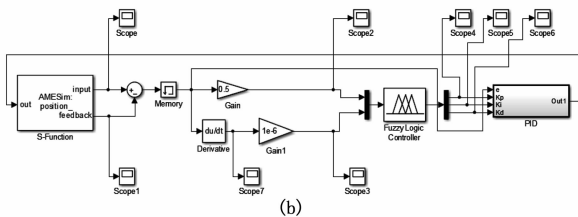
### 3.4 模糊 PID 控制算法

为了消除液压伺服系统的非线性和负载参数的时变性

的影响, 对外环 PID 参数采用模糊自适应调节<sup>[5-8]</sup>。利用软件接口将上文中建立的变排量液压马达伺服系统 AMESim 模型以 S-Function 模块的形式导入到 Matlab/Simulink 中, 即可建立 AMESim 和 Matlab 软件仿真平台, 进行联合仿真。在 Matlab 软件的 Fuzzy Logic Design 工具箱中进行模糊控制器设计, 然后与 PID 控制器进行联接, 即可完成模糊 PID 控制器模型的搭建<sup>[9]</sup>。基于模糊 PID 控制的变排量液压马达伺服系统模型如图 6 所示。其中, PID 控制器的内部结构如图 7 所示。



(a)



(b)

图 6 基于模糊 PID 控制的变排量液压马达伺服系统的模型

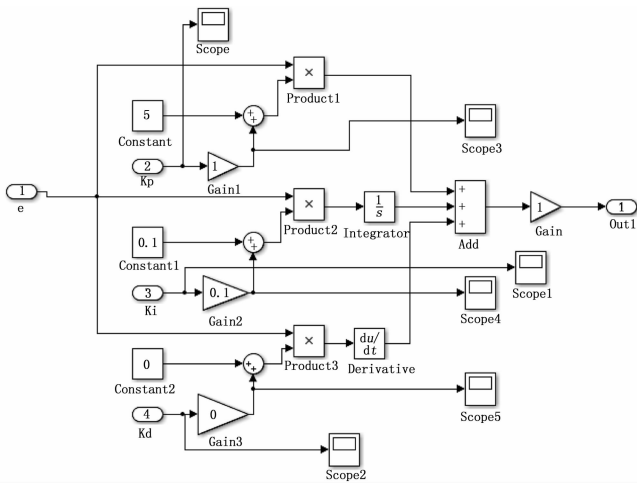


图 7 控制器内部结构

## 4 模糊 PID 控制系统仿真分析

### 4.1 仿真步骤

AMESim 软件有 4 种工作模式: 草图模式 (Sketch mode)、子模型模式 (Submodel mode)、参数模式 (Parameter mode)、仿真模式 (Simulation mode)。该模糊 PID 控

制系统仿真步骤如下:

- 1) 在草图模式下搭建草图, 主要利用信号控制库、机械库和液压库这三个元件库对系统进行建模;
- 2) 搭建好模型后进入子模型模式, 选择首选子模型按钮赋予各个元件数学模型;
- 3) 进入参数模式, 设置液压泵、伺服阀、液压马达、液压缸等各模型参数;
- 4) 进入仿真模式, 先设置运行参数, 最终时间 (Final time) 为 2 s, 输出间隔 (Print interval) 为 1 ms;
- 5) 选择 Tools 下拉菜单中的 “Start AMECustom” 按钮以运行 Matlab/Simulink 进行联合仿真;
- 6) 根据模糊 PID 控制原理, 在 Simulink 中进行模糊 PID 控制器建模;
- 7) 在 Simulink 中点击开始仿真按钮以运行仿真。

### 4.2 仿真方法

采用 AMESim 软件和 Matlab/Simulink 软件联合仿真的方法, 通过结合 AMESim 强大的液压系统建模仿真功能和 Matlab 中模糊逻辑设计 (Fuzzy Logic Design) 功能, 实现基于模糊 PID 控制的变排量液压马达系统仿真。

AMESim 与 Simulink 的联合仿真通过 AMESim 中创建接口图标功能和 Simulink 中的 s 函数实现连接的。具体实现过程是 AMESim 中通过系统编译、参数设置等生成的系统模型作为供 Simulink 使用的个 s 函数, 在 Simulink 中得到普通 S 函数的同等对待。仿真过程中 AMESim 将自动生成与存储的文件名一致的动态链接文件, 该文件为 Matlab S 函数格式, 供算法中的 S 函数调用, 借助接口模块实现了两者的联合仿真。

首先建立联合仿真模型, 然后分析各敏感参数对系统性能的影响, 根据仿真结果, 对马达参数和控制器控制参数进行优化, 然后再次进行仿真分析, 最后得到满足性能要求的控制方法和参数。

### 4.3 仿真结果分析

考虑到该液压系统受顺、逆载作用的情况 (顺载是指作用方向与物体运动方向相同的力, 逆载是指作用方向与物体运动方向相反的力), 负载曲线如图 8 所示, 负载在 0~1 s 为 10000 Nm, 在 1 s 末发生从 10000~-10000 Nm 的跳变, 在 1~2s 为 -10000 Nm。规定负载为正值时, 即为逆载; 负载为负值时, 即为顺载。

在控制器输入速度信号为如图 9 所示梯形信号 (1 号线) 的条件下对系统进行了仿真, 速度控制信号分为三段, 即匀加速段、恒速段和匀减速段。常规 PID 控制策略控制下得到了如图 9 (2 号线) 所示的仿真结果, 模糊 PID 控制策略控制下得到了如图 9 (3 号线) 所示的仿真结果。从仿真曲线可以看出, 在常规 PID 控制下, 负载发生突变前, 速度反馈信号跟踪效果较好, 负载由正到负发生剧烈变化, 此时, 顺载带动输出轴转动, 速度快速变大, 此后系统震

荡无法收敛, 即控制失效。而模糊 PID 控制策略在此过程中仍可取得较好的控制效果, 仅在负载突变时产生短暂的波动峰值, 之后能够很快恢复并且跟踪信号可以跟上给定信号。通过对比分析, 可见模糊 PID 控制策略实现了对 PID 参数的实时调整, 可根据负载变化进行在线调节, 与常规 PID 相比在响应速度和平稳性等方面有着显著的优势。

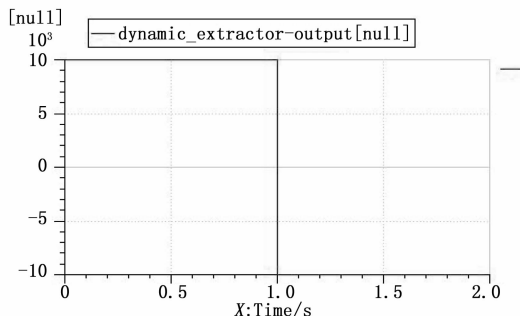


图 8 负载跳变曲线

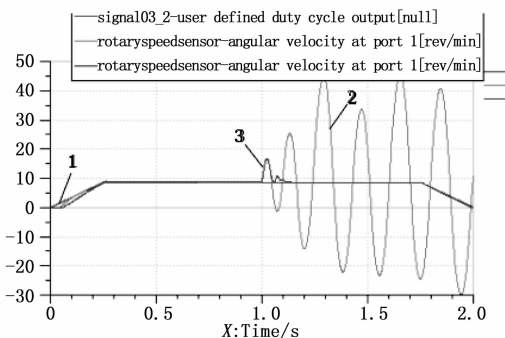


图 9 给定信号和常规、模糊 PID 控制输出曲线

## 5 结论

为了实现变排量液压马达伺服控制系统在变负载工况

(上接第 56 页)

故障诊断系统。该系统与飞行器综合测试软件都安装在导弹综合测试设备中, 形成测试—诊断—一体化平台。本系统具有诊断速度快、准确率高, 只需专职测试人员而非专业设计师即可完成故障诊断的优点。已被应用在某型号飞行器的总装综测中, 并在实际工作中, 辅助测试人员自主完成了多次故障诊断工作, 取得了较好的应用效果。

### 参考文献:

[1] 吴伟, 张宏军, 曹玉华, 等. 测试—诊断—维修一体化平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (6): 1415-1416.  
 [2] Pentland A, Rosalind W. Photobook: content-based manipulation of image databases [J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 18 (3): 233-254.  
 [3] 梁永全. 基于内容的多媒体信息检索的研究 [D]. 中科院研究生院 (计算技术研究所). 1999.  
 [4] Smith J R, Chang S F. Visually searching the web for content

下既能满足快速响应的要求, 又能兼顾系统输出的平稳性, 本文采用了能够实时调节控制参数的模糊 PID 控制算法, 并运用 AMESim 和 Matlab/Simulink 对该系统进行联合建模仿真。仿真结果表明, 与常规 PID 控制相比较, 模糊 PID 控制能够显著改善变负载条件下伺服系统的不平稳性, 提高系统的响应速度。

### 参考文献:

[1] Durtschi W G, Kandil M, Kilroy D. Design, development, and demonstration of a high-pressure, Overcenter, Variable-Displacement Hydraulic Motor [A]. Long Beach, California: Aerospace Technology Conference and Exposition [C]. 1990.  
 [2] 游有鹏, 缪群华. 液压与气压传动 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
 [3] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.  
 [4] 刘春生, 吴庆宪. 现代控制工程基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
 [5] 陈斌, 裴忠才, 唐志勇. 液压四足机器人的自适应模糊 PID 控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48 (9): 140-144.  
 [6] 石云飞, 章青, 吕喆. 基于模糊 PID 控制的液压同步提升系统仿真分析 [J]. 计算机工程与科学, 2016, 38 (11): 2335-2341.  
 [7] 余容, 孙浩然, 何朝明. 伺服控制系统的复合模糊自适应 PID 控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017, 4: 75-81.  
 [8] 付甜甜, 朱玉川, 顾亚军. 基于 Matlab-AMESim 的电液伺服系统 PID 控制 [J]. 机床与液压, 2016, 20 (10): 144-146.  
 [9] 鲁雄文. 模糊 PID 控制系统的设计与研究 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (24): 146-149.

[J]. IEEE Multimedia Magazine, 1997, 4 (3): 12-20.  
 [5] Haralic R M, Shanmuganm K. Textures features for image classification [J]. IEEE Trans On System, man and cybernetics, 1973, 3 (6): 610-621.  
 [6] Tumara H, Mori S, Yamawaki T. Texture features corresponding to visual perception [J]. IEEE - SMC, 1978, 8 (6): 460-473.  
 [7] 庞茂, 周晓军, 胡宏伟. 基于解析小波变换的奇异性检测和特征提取 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2007, 40 (11): 1994-1997.  
 [8] 陈涛, 梁生. 小波分析的工程理解及其在机械诊断中的应用 [J]. 动态分析与测试技术, 1996, 4 (3): 0-16.  
 [9] 石峰, 莫忠息. 信息熵 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.  
 [10] Blanco S, Figliosa A, Quian Q R et al. Time-frequency analysis of electroencephalogram series; information transfer function and wavelets packets [J]. Physical Review E, 1998, 57 (1): 932-940.