



王述彦

# 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究

王述彦, 师宇, 冯忠绪

(长安大学 工程机械学院 教育部“道路施工技术与装备”重点实验室, 西安 710061)

**摘要:** 为解决工程机械多功能试验台二次调节加载系统的控制问题, 笔者简介了 PID 控制和模糊控制的原理及特点, 提出了模糊 PID 控制器的模糊 PID 自整定控制方法。在模糊 PID 控制器的设计中, 分析了模糊 PID 控制器的控制原理; 确定了模糊语言变量和隶属函数; 制定了模糊规则以及模糊推理和解模糊的方法。最后, 分别采用 PID 控制和模糊 PID 控制对试验台二次调节加载系统进行了仿真。研究表明模糊 PID 自整定控制具有良好的校正性能, 改善了二次调节加载系统的动态响应, 提高了控制效果。

**关键词:** PID 控制; 模糊控制; 模糊 PID 控制器; 二次调节; 试验台; 仿真

中图分类号: TH122

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2011) 01-0166-07

## A Method for Controlling a Loading System Based on a Fuzzy PID Controller

Wang Shuyan, Shi Yu, Feng Zhongxu

(Ministry of Education Key Laboratory for Technology And Equipment of Highway Construction,  
College of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064)

**Abstract:** To control the loading system for secondary regulation of the multi-functional experimental bench of construction machinery, we introduce the theory and characteristics of PID control and fuzzy control. We put forward a control method of fuzzy auto-tuning PID for a fuzzy PID controller. During the process of designing the controller, we analyze the control theory of the fuzzy PID controller, determine variables of fuzzy statements and sub-ordinative functions and stipulates the methods of fuzzy rules, fuzzy reasoning and creates solutions of the fuzziness. Finally, we make simulation of the loading system of secondary regulation of the bench in the method of PID control and fuzzy PID control. The result shows that the fuzzy auto-tuning PID control is a good control method with correcting ability and it improves the dynamic response of the loading system.

**Key words:** PID control; fuzzy control; fuzzy PID controller; secondary regulation; experimental bench; simulation

长安大学最新研制的工程机械多功能试验台可悬挂多种工程机械工作装置, 用于研究工程机械牵引及加载性能, 该试验台牵引(加载)液压系统采用了二次调节加载系统。基于二次调节原理的二次调节加载系统具有非线性和时变特性。在这种条件

下, 要得到系统精确的数学模型比较困难。传统的控制方法满足不了控制精度的要求, 而且抗干扰的能力较差。模糊控制可以克服以上问题。另一方面, 采用常规 PID 控制器虽然简单易行, 但一组固定不变的 PID 参数无法适应参数变化, 干扰众多的控制系统, 显然难以获得满意的控制效果。甚至当参数变化范围太大时, 系统性能会明显变差。基于模糊控制和 PID 控制各自的优势和局限性, 把 PID 控制和模糊控制结合起来, 构成模糊 PID 控制, 能够实现较好的控制效果。

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 教育部留学基金项目(0004-1005)资助

作者简介: 王述彦(1963-), 副教授, 博士研究生, 研究方向为工程机械理论与设计, wangshuyan63@163.com

1 PID 控制原理

PID 控制的特点是只需对控制器参数 ,即比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_I$  和微分系数  $K_D$  进行调整 ,就可获得满意的结果。PID 控制系统由 PID 控制器和被控对象组成 ,PID 控制器是一种线性控制器。根据设定目标值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成的控制偏差  $e(t)$  ,将此偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量 ,对受控对象进行控制。

控制器控制方程为

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{1}$$

控制器时域输出  $u(t)$  方程为

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。整定的目的就是设法使控制器的特性和被控对象配合好 ,以便得到最佳控制效果。典型的 PID 只能利用一组固定参数进行控制 ,这些参数不能兼顾系统的动态性能和静态性能之间、设定值和抑制扰动之间的矛盾。为此控制系统需引入智能控制体系 ,在 PID 初值基础上通过增加修正参数进行整定 ,改善系统动、静态性能。

由式 (2) 可知 ,各项系数的调整只影响式中对应一项的系数变化。这一线性叠加原理给控制带来极大的方便。如图 1 所示。当被控对象参数变化时 ,可通过调整控制器相应参数进行校正 ,使系统获得满意的效果。这样 ,算法简单、计算量小 ,且控制准确<sup>[1]</sup>。

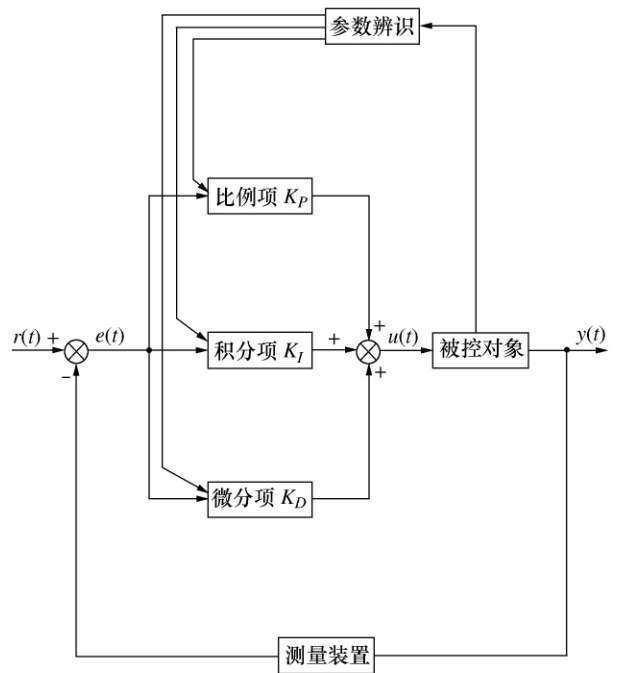


图 1 可变参数 PID 控制原理图

不过 ,PID 控制器都要求精确的数学模型 ,在数学模型不精确的情况下 ,将降低控制性能。针对这种情况 ,笔者提出了结合模糊控制的模糊 PID 解决方法。

2 模糊控制原理

随着自动控制系统被控对象的复杂化 ,表现为控制系统具有多输入、多输出的强耦合特性、参数时变性和非线性特性 ,更突出的问题是从系统对象获得的信息量相对减少 ,相反对控制性能的要求却日益高度化。很多时候被控对象精确的数学模型很难或无法建立。若将人们的手动控制经验用语言加以描述 ,构成一系列条件语句 ,即控制规则 ,再利用模糊理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理 ,将模糊的控制规则上升为数值运算 ,让计算机运用程序来实现这些控制规则 ,这样就可利用计算机模拟人进行自动控制被控对象。这正是模糊控制的基本思想。

模糊控制系统由模糊数据和规则库、模糊器、模糊推理机和解模糊器组成。模糊控制系统用作控制器时称为模糊控制器<sup>[2]</sup>。模糊控制系统与传统的闭环控制系统不同之处在于用模糊控制器代替了模拟式控制器。模糊控制器结构如图 2 所示。

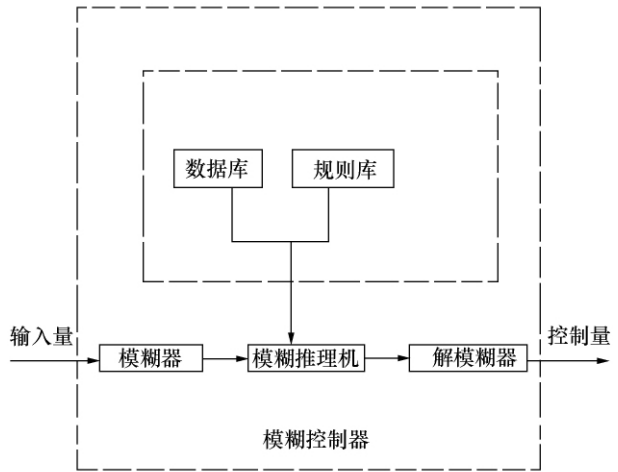


图 2 模糊控制器结构图

模糊控制过程分为模糊化、模糊逻辑推理和解模糊判断 3 个步骤。其分别由模糊控制器的模糊器、模糊推理机和解模糊器完成。模糊系统的性能优劣主要取决于模糊控制器的结构、模糊规则、推理算法以及模糊决策的方法等因素<sup>[3]</sup>。

3 模糊 PID 控制器设计

3.1 模糊 PID 控制器原理

模糊自整定 PID 控制器以误差  $e$  和误差变化率

$\dot{e}$  作为输入 ,PID 参数  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  作为输出。以误差  $e$  和误差变化率  $\dot{e}$  作为输入 ,可以满足不同时刻的  $e$  和  $\dot{e}$  对 PID 参数自整定的要求。利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改 ,便构成了模糊自整定 PID 控制器<sup>[4 5]</sup> ,其结构如图 3 所示。

由图 3 可知:该系统由一个标准 PID 控制器和一个模糊参数调节器组成。控制目标为使被控对象输出  $y(t)$  达到指定值  $R$  ,PID 控制器根据闭环误差  $e(t) = R - y(t)$  产生控制信号  $u(t)$  ,模糊参数调节器调节 PID 控制器的参数。

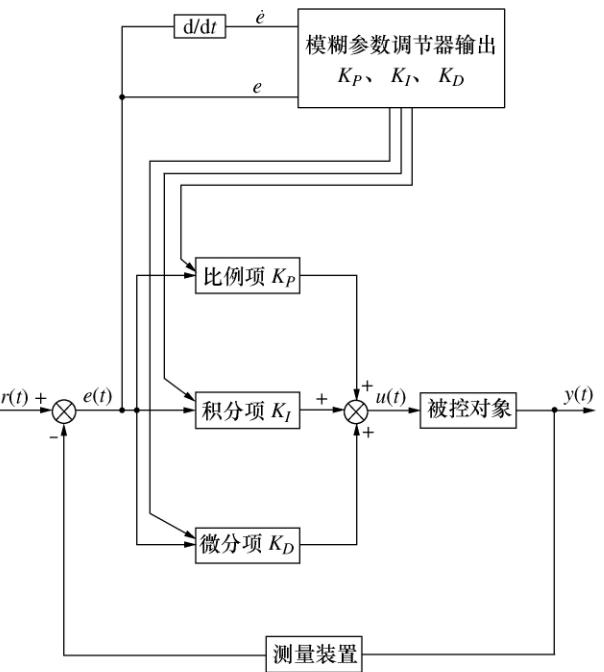


图 3 模糊自整定 PID 结构原理图

为了进一步提高系统的响应或执行速度 ,采用改进的模糊控制器。控制器原先控制的是  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  这 3 个参数 ,而现在控制的是  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的增量 ,即  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ 。这 3 个增量的变化比较小 ,需要的计算量较  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  明显减少。在模糊控制器之后有一保留器 ,保留的是上一次  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的值  $K'_p$ 、 $K'_I$ 、 $K'_D$  ,然后加上模糊控制器的输出值 ,再作用于控制对象。保留器的初始值可以根据经验来设定。

即

$$K_p = K'_p + \Delta K_p \tag{3}$$

$$K_I = K'_I + \Delta K_I \tag{4}$$

$$K_D = K'_D + \Delta K_D \tag{5}$$

此时模糊控制器变为以误差  $e$  和误差的变化率  $\dot{e}$  为输入量 , $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  为输出量。

3.2 模糊语言变量的确定

将系统偏差  $e$  和偏差变化率  $\dot{e}$  作为模糊控制器

的输入语言变量 , $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  为输出语言变量。它们的变化范围定义为模糊集上的基本论域:

$$e, \dot{e}, K_p, K_I, K_D = (-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4)$$

其模糊子集为  $e, \dot{e} = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$  ,子集中元素分别代表负大、负小、零、正小、正大。这种划分适合控制品质要求一般的场合。

将基本论域范围内连续变化的量分级离散化 ,然后进行模糊处理。设二次元件速度偏差  $e$  和  $\dot{e}$  的变化范围为  $[-4, 4]$  ,如果不在此区间 ,可以通过线性变换公式 (6) 将取值在  $[a, b]$  之间的连续量转换到  $[-4, 4]$  之间。

$$y = \frac{8}{b - a} \left( x - \frac{a + b}{2} \right) \tag{6}$$

3.3 隶属函数的确定

各模糊状态的隶属函数一般选择对称三角形、对称梯形、正态型隶属函数。因为三角形隶属函数其形状仅与它的直线斜率有关 ,运算较简单 ,所占内存空间也小 ,因此比较适合于有隶属函数在线调整的模糊控制。在此选三角形为语言变量的隶属函数 ,如图 4 所示。

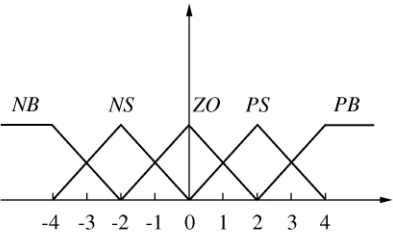


图 4  $e$ 、 $\dot{e}$ 、 $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  隶属函数

实际上 ,隶属函数的形状(三角形、梯形或正态分布等)对控制效果的影响并不大 ,而每个模糊子集对整个论域覆盖范围的大小对性能影响较大 ,一般来说 ,每个模糊子集的宽度若选择适当 ,控制效果就会较好 ,如果所选宽度较小 ,则部分区域没有规则相适应 ,那么收敛性就不好 ,相反 ,重叠规则相加 ,规则间相互影响大 ,使得响应慢。因此  $e$  与  $\dot{e}$  采用相同的隶属函数 ,同样  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  也采用相同的隶属函数。从而可以确定  $e$ 、 $\dot{e}$  和  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  隶属度的赋值表。

3.4 模糊规则

控制规则是模糊控制器的核心。根据经验和知觉推理 ,将人的大量成功的控制策略经整理、加工提炼后 ,用输入、输出变量的模糊状态给以描述 ,就得到了控制规则。典型的阶跃响应曲线如图 5 所示。

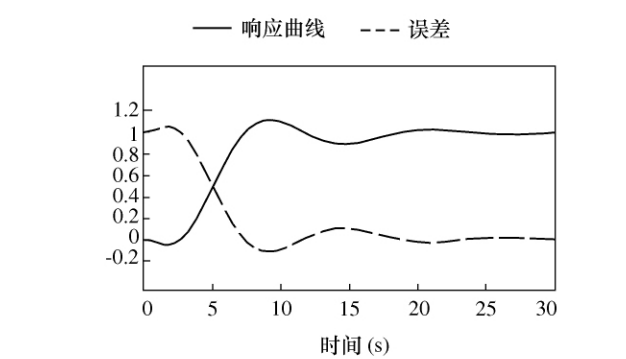


图 5 动态响应示意图

文献[5]归纳出二次元件在被控过程中对不同的 $e$ 和 $\dot{e}$ ,参数 $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 自整定的原则,故制定出模糊控制规则为:

(1) 当二次元件起动或停止运行时,二次元件的输出转速偏差 $e$ 较大,为加快响应速度,可以取较大的 $K_p$ ;同时为了避免由于开始时偏差 $e$ 的瞬时变大可能出现的微分过饱和而使控制作用超出许可范围 $K_D$ 取中等;为了防止二次元件转速出现较大的超调,产生积分饱和,通常去掉积分作用,即使 $K_I=0$ 。

(2) 当二次元件正常运转后,速度偏差 $e$ 和偏差变化率 $\dot{e}$ 处于中等大小时,为使二次元件转速具有较小的超调, $K_p$ 应取小一些; $K_I$ 取值要适当,此时 $K_D$ 的取值对系统响应的影响较大,取值要适中,以保证系统响应速度。

(3) 当二次元件转速基本恒定时,此时速度偏差 $e$ 较小,为使系统稳定性能较好,应该增加 $K_p$ 和 $K_I$ ,同时避免系统在设定值附近出现振荡现象,并考虑系统的抗干扰性能, $K_D$ 的取值相当重要。一般 $\dot{e}$ 较小时 $K_D$ 取大一些, $\dot{e}$ 较大时 $K_D$ 取小一些。

根据以上的分析可制定出模糊控制规则如表 1 所示。

表 1  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  模糊推理规则

$\dot{e}$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB NB PS	PB NB ZE	PB NB ZE	PS NB ZE	ZE ZE PS
NS	PB NB NB	PS NS NB	PS NS NS	ZE ZE ZE	NB ZE PS
ZE	PS NS NB	PS NS NB	ZE ZE NS	NS PS ZE	NB PS PS
PS	PS NS NB	ZE ZE NS	NS PS NS	NS PS ZE	NB PB PS
PB	ZE ZE PS	NS PS ZE	NS PS ZE	NB PB ZE	NB PB PS

注:表 1 每格里有 3 个模糊控制规则,从左到右分别为 $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 的模糊控制规则

PID 控制器的输出参数用以下各式表示为

$$K_p' = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \tag{7}$$

$$K_I' = \frac{K_I - K_{Imin}}{K_{Imax} - K_{Imin}} \tag{8}$$

$$K_D' = \frac{K_D - K_{Dmin}}{K_{Dmax} - K_{Dmin}} \tag{9}$$

模糊控制器的误差、误差变化量的实际范围称为这些变量的基本论域。为进行模糊化处理,必须将输入误差、误差变化量的基本论域转化到相应模糊集的论域,这中间需要量化因子。同时,控制对象实际所要求的控制量的变化范围称为输入量的基本论域,从模糊控制算法求得的控制量转到基本论域也需乘以一比例因子。由此引入误差、误差变化率输入量化因子 $k_e$ 、 $k_{\dot{e}}$ 及输出变换比例因子 $k_u$ 。

输入量化因子 $k_e$ 、 $k_{\dot{e}}$ 及输出比例因子 $k_u$ 对系统的动、静态性能影响很大,因此要合理选取。一般地,输入量化因子取决于响应曲线中的最大超调量,输出比率因子取决于初始 PID 参数,同时还与希望达到的响应性能有关。

$$R_l = e \text{ and } \dot{e} \rightarrow K_p = \int_{e \times \dot{e} \times K_p} \frac{\mu(e) \Lambda\mu(\dot{e}) \Lambda\mu(K_p')}{(e \dot{e} K_p')} \tag{10}$$

$l = 1 \ 2 \ 3 \ ; \cdots \ 25$

$$K_p \text{ 的总模糊关系为 } R_{KP} = \bigcup_{l=1}^{25} R_l \tag{11}$$

同理可求出:

$$R_{KD} = \bigcup_{m=1}^{25} R_m \tag{12}$$

$$R_{KI} = \bigcup_{n=1}^{25} R_n \tag{13}$$

式中:

$$R_m = (e \text{ and } \dot{e}) \rightarrow K_D = \int_{e \times \dot{e} \times K_D} \frac{\mu(e) \Lambda\mu(\dot{e}) \Lambda\mu(K_D')}{(e \dot{e} K_D')} \tag{14}$$

$$R_n = (e \text{ and } \dot{e}) \rightarrow K_I = \int_{e \times \dot{e} \times K_I} \frac{\mu(e) \Lambda\mu(\dot{e}) \Lambda\mu(K_I')}{(e \dot{e} K_I')} \tag{15}$$

$$K_D = K_I = NB \ NS \ ZE \ PS \ PB$$

$m = n = 1 \ 2 \ 3 \ ; \cdots \ 25$

3.5 解模糊

模糊推理的结果,即模糊控制器的输出变量,一般情况下是一个模糊集,不能直接用于控制被控对象,需要先转化成执行器可以执行的精确量。此过程一般称为解模糊,重心法是模糊控制系统中应用比较广泛的一种解模糊方法。

$z^*$  是模糊集  $C$  的隶属度  $\mu_C(z)$  函数所覆盖区域的中心,即

$$z^* = \frac{\int_a^b z\mu_C(z) dz}{\int_a^b \mu_C(z) dz}, U = [a \ b] \tag{16}$$

实际处理中,上面的计算都离线进行,制成控制决策表并存放在计算机中,在控制过程中采用查表法来读取数据,因此减少了在线计算时间,提高了系统的实时性。已知  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  查询表后再式(7)~式(9)可得到3个自整定参数  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的值。其优化值可以在后面仿真过程中借助仿真软件 Matlab 的 NCD 优化箱自动寻优得到。

应当注意的是:经过解模糊求得的模糊控制器的输出变量的确切值,只是其论域确切值。还需要

根据输出变量的论域和模糊状态,按照输入变量“实际确切值转化为论域确切值”的逆过程,将输出变量的论域确切值转化为对应的实际确切值。这样得到的输出变量实际确切值,才能作为模糊控制器传给执行器的可以执行的精确量,从而用于控制被控对象。

4 仿真算例

4.1 仿真模型建立

选择 Matlab/Simulink 仿真软件,建立工程机械多功能试验台二次调节加载系统仿真模型和被控对象仿真模型<sup>[6~8]</sup>,分别如图6,图7所示。在图6中,模糊推理系统及被控对象为封装子系统。

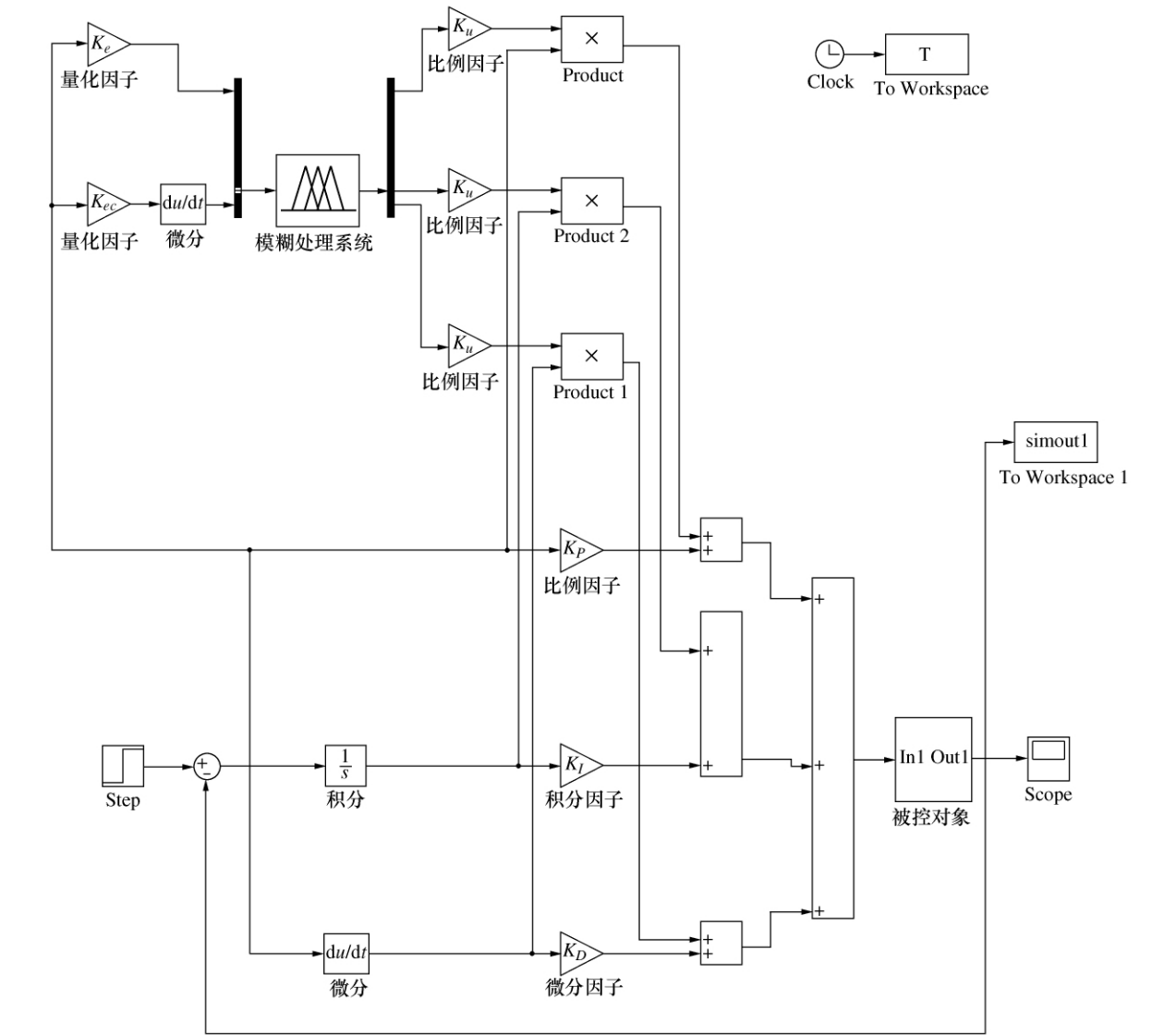


图6 二次调节加载系统仿真模型

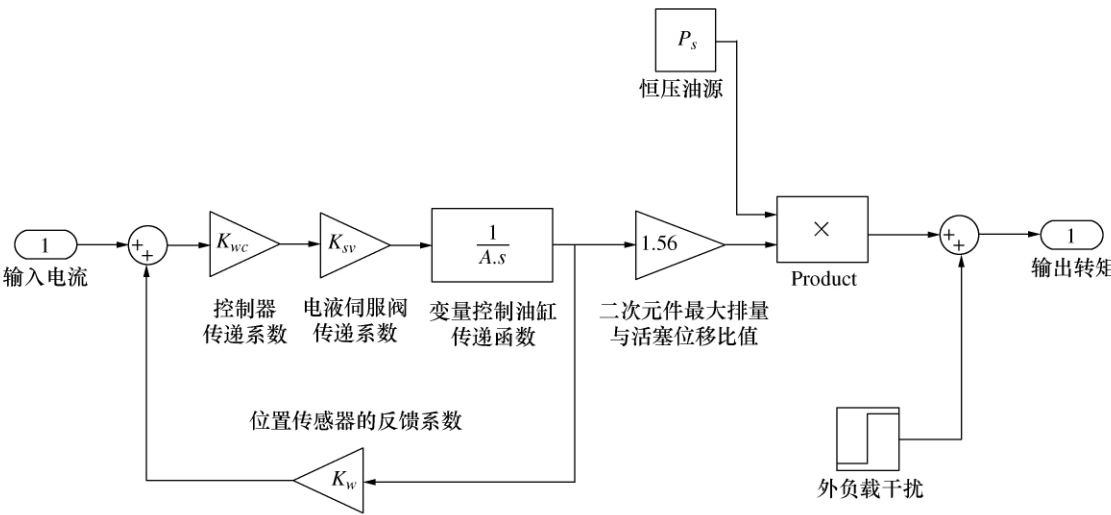


图 7 被控对象仿真模型

笔者采用图形用户界面建立模糊推理系统,主要包括 3 个 GUI 工具箱: FIS 编辑器、隶属度函数编辑器和规则编辑器,它们之间是动态连接的。模糊推理系统的基本属性设为“与”运算采用极小运算“或”运算采用极大运算;模糊蕴含采用极小运算;模糊规则综合采用极大运算;解模糊采用重心法。

4.2 仿真结果和分析

为验证加载系统模糊 PID 自适应控制在试验台的适用性,对图 6 所示二次调节加载系统模型进行多种输入下的输出响应仿真<sup>[9,10]</sup>。以下分别对加载系统在不同加载模式下进行仿真。

(1) 阶跃载荷下的仿真

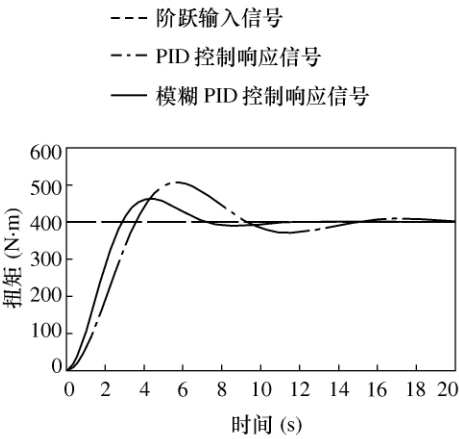


图 8 400 N·m 转矩阶跃信号输入二次调节系统输出转矩的响应

当加载系统在 400 N·m 转矩阶跃信号输入下,二次元件输出转矩的动态响应特性如图 8 所示,图中给出了阶跃输入与控制模型的输出响应。可以看出常规 PID 输出最大超调量为 27.5%,控制系统

调整时间 16 s;模糊自适应 PID 输出最大超调量 16.25%,控制系统调整时间 11 s,且过渡过程平稳,模糊自适应 PID 控制系统较好地跟随规范输入。

(2) 正弦波载荷下的仿真

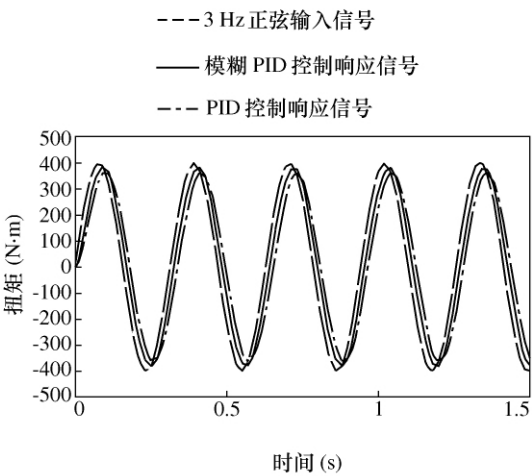


图 9 幅值为 400 N·m 的 3 Hz 正弦波信号输入下二次调节系统输出转矩的响应

为进一步了解系统性能,二次元件启动时刻加载满负荷正弦变化扭矩考察系统特性。一般,牵引型工程车辆载荷频率为 6 Hz 以内。所加信号为幅值 400 N·m 的 3 Hz 正弦波信号。结果如图 9 所示,模糊 PID 控制与常规 PID 控制相比,其二次调节系统输出转矩能够更加快、准、稳地跟踪规范输入,由此显示出模糊 PID 自适应控制的良好校正性能。

通过上述仿真试验,可以看出模糊 PID 自适应控制能有效地克服强负载干扰的影响,且算法相对简单,计算量小,运行速度快,是一种实用工程控制策略。

5 结束语

(1) 模糊 PID 自整定控制具有模糊控制和 PID 控制的优点,克服了二次调节系统的非线性和时变性。通过建立试验台加载系统模糊 PID 自整定控制模型并进行仿真,研究表明采用模糊 PID 自整定控制后使得二次元件输出动态响应性能大大改善,显示出模糊 PID 自整定控制的良好校正性能。

(2) 笔者尝试了模糊 PID 自适应控制这一相对简单而有效的现代控制方法,更多的自适应控制方案以及其它智能控制方法也可以引入到二次调节加载系统中,其方法的可行性研究及分析也将成为一系列重要的课题。

[参考文献]

[1] 陈新海,李言俊等. 自适应控制及应用[M]. 西北工业大学出版社,1998

[2] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 清华大学出版社,2003

[3] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 电子工业出版社,2005

[4] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 机械工业出版社,2002

[5] 刘金坤. 先进 PID 控制及 MATLAB 仿真[M]. 电子工业出版社,2004

[6] 邱晓琳,李天柁等. 基于 MATLAB 的动态模型与系统仿真工具-Simulink 3.0/4.X [M]. 西安交通大学出版社,2003

[7] 孙亮. Matlab 语言与控制系统仿真[M]. 北京工业大学出版社,2001

[8] 薛定宇,陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 清华大学出版社,2002

[9] 姜继海等. 二次调节静液传动位置系统的模糊控制和试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,1998,4(6)

[10] 王淑莲等. 二次调节节能系统非线性 PID 控制器设计[J]. 液压与气动,2004,4(9)

(上接第 165 页)

4 结论

笔者对某一放气系统进行了理论分析和实验研究。以实验数据为基础,探讨了在理论计算放气时间时,应将整个过程假设为声速和亚声速两个阶段比较合理。

进行理论计算时,尽管近似将放气过程假设为等温过程,并回避了复杂放气系统具有的截面突变、内壁粗糙度等对放气时间的影响,但只要合理确定声速和亚声速的分界点,则理论计算结果与实验结果就比较接近。

[参考文献]

[1] 金英子,朱祖超,杨庆俊. 气动系统充放气过程中气体状态多变指数的简化与确定[J]. 机械工程学报,2005,41(6):76~79

[2] 李军,李玉军,王祖温. 气动充放气系统的流场计算[J]. 机床与液压,1999,4(4):24~26

[3] 杨丽红,叶骞,刘成良. 等温容器放气测定气动电磁阀流量特性的研究[J]. 机械科学与技术,2005,20(10):1170~1172

[4] Harley J C, et al. Gas flow in micro-channels[J]. **Journal of Fluid Mechanics**,1995,284:257~274

[5] 杜东兴,谭立彦,李志信等. 微细圆管内气体流动阻力特性进一步研究[J]. 工程热物理学报,1999,20(5):603~607

[6] 徐文灿,谢富春,陈才元. 气动元件流量特性的测定[M]. 北京:中国标准化出版社,1993

[7] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004

[8] 李林,彭光正. 气管流量特性参数的分析研究[J]. 液压与气动,2004,4(5):26~28