

# 飞机部件柔性装配多轴协同控制算法研究

## Algorithm for Multi-Axis Cooperative Control of Aircraft Component Flexible Assembly

西北工业大学 黄 果 王仲奇 康永刚 胡玉龙

**[摘要]** 根据飞机部件柔性装配多轴协同控制的需求,采用模糊自整定PID算法进行实时控制。依据模糊自整定PID控制策略和PID参数的整定原则,结合MATLAB软件,用MATLAB语言编程与SIMULINK相结合的方法实现了一种飞机部件柔性装配模糊自整定PID控制器的设计、分析与仿真。

**关键词:** 柔性装配 模糊自整定PID MATLAB SIMULINK

**[ABSTRACT]** According to the aircraft component flexible assembly multi-axis cooperative control requirements, fuzzy self-tuning PID algorithm is used for real-time control. Based on fuzzy self-tuning PID control strategy and PID parameters setting principle, combined with the MATLAB software, MATLAB language programming and SIMULINK is combined to realize a kind of aircraft parts flexible assembly fuzzy self-tuning PID controller design, analysis and simulation.

**Keywords:** Flexible assembly Fuzzy self-tuning PID MATLAB SIMULINK

飞机部件结构复杂,协调位置多,其柔性装配工装包括多个运动轴,通过多轴的协同运动实现部件的精确定位,如何实现这些运动轴协调控制是整个控制系统的研究核心。在整个装配过程中,将部件精确定位夹持在工装后,通过测量系统检测基准点的坐标,并与理论坐标比较计算出柔性装配工装各个运动轴的调整量,通过控制系统驱动伺服机构带动部件到达理论位置<sup>[1]</sup>。系统对同步性要求很高,尤其在夹持部件后,同步要求更为突出,如果伺服机构各运动轴不能按照同步速度运动,会严重影响定位精度,损坏柔性工装,甚至导致飞机产品报废。因此,应针对实际情况设计合理的适应性、鲁棒性强的多轴协同控制

算法。

PID控制及其改进型是在工业过程控制中最为常见的控制器。PID控制是工业控制中最为普遍采用的控制方法,是最早发展起来的控制策略之一,由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高,被广泛应用于工业过程控制,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统<sup>[2]</sup>。飞机部件柔性装配定位控制系统在一个控制周期内需要输出多个控制信号,对系统响应速度要求较快,而且对位置的定位精度与同步性要求较高,因此传统的PID控制算法很难适合。基于以上分析,针对飞机部件柔性装配特点,本文拟以模糊控制理论为基础,开发多轴协同运动的模糊自整定PID控制算法,并通过MATLAB仿真软件验证控制算法的可靠性和有效性,对各轴运动参数进行在线调整,弥补PID调节控制的不足,改善系统的控制能力,减少超调量,缩短调整时间,从而实现飞机部件柔性装配多轴协同运动的实时控制。

### 1 控制系统架构

飞机部件柔性装配控制系统总体结构如图1所示,适用于不同产品柔性装配的定位控制。其主要包括3

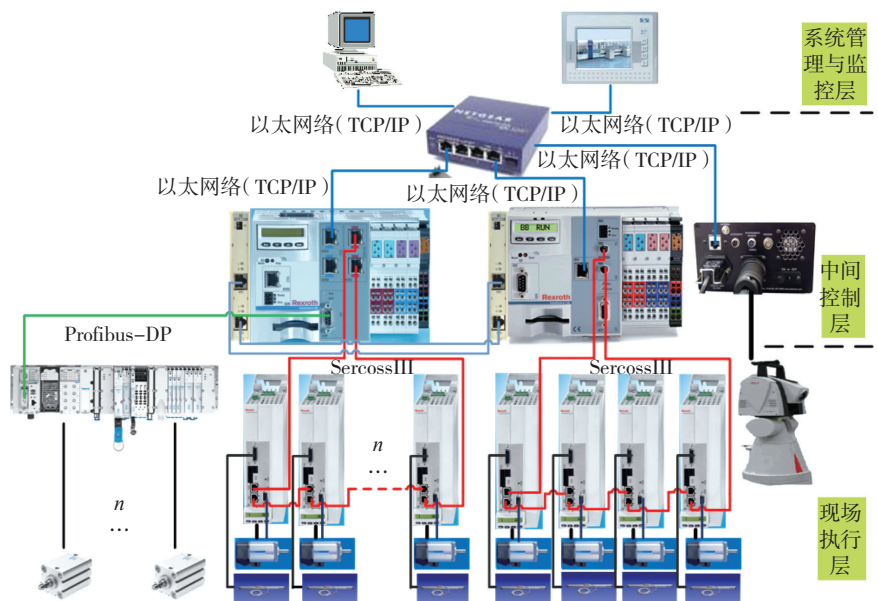


图1 柔性装配控制系统总体结构图

Fig.1 Overall structure of flexible assembly control system

个层面：现场执行层、中间控制层和系统管理与监控层。这种控制系统的组成是基于以太网和现场总线的分布式运动控制系统，这种控制系统拥有诸多优点：接线简单，在一条通信电缆上通常可挂接多种数字化设备，大量减少了电缆、端子的使用，精度高、误差小，提高了系统工作的可靠性的同时降低了安装和维护难度；同时，当前专用的运动控制器品种繁多，为控制系统省去了大量的硬件研制工作，缩短了开发周期。开发人员只需要选择带有标准接口、总线的运动控制器及其相应功能模块正确组态即可。

伺服电机驱动的同步位置控制系统中，采用并行结构的同步方式，如图 2 所示。该系统对每个轴均独立进行模糊自整定 PID 混合控制，通过对各轴的 PID 参数进行在线调节来确保被控对象在任何时刻的设定值和实际检测值之差都在给定的误差范围之内，从而保证控制系统定位的同步性<sup>[1]</sup>。本文设计的控制系统共用同一个模糊规则表，各轴的 PID 参数根据各自的输入偏差经模糊推理后而不断变化。这样可使各轴在位置不同时各自按自身的情况调整 PID 参数，使得各轴都能达到最佳的控制效果，从而快速的消除偏差，保证整个系统的同步性。

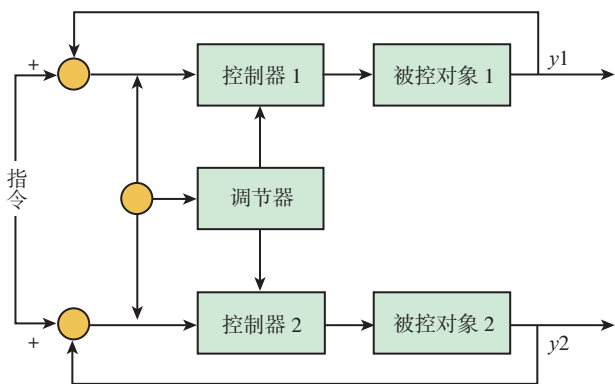


图2 并行结构方式  
Fig.2 Parallel structure mode

## 2 模糊自整定 PID 控制算法

常规的 PID 控制算法为<sup>[3-4]</sup>：

$$u(k) = K_p g E(k) + K_i g \sum_{j=0}^k E(j) + K_d g EC(k) \quad (1)$$

其中： $E(k)$ 、 $\sum_{j=0}^k E(j)$ 、 $EC(k)$  分别为系统偏差、偏差和与偏差变化率。 $K_p$  为比例系数，主要影响系统的响应速度； $K_i$  为积分作用系数，主要影响系统的稳态精度； $K_d$  为微分作用系数，主要影响系统的动态特性。

由于常规的 PID 控制器不具有在线调整参数  $K_p$ 、

$K_i$ 、 $K_d$  的功能，控制系统各轴在不同的工作情况下难以同时获得最佳的工作状态，从而影响到最终的控制效果。为了满足不同偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  对 PID 参数自整定的要求，本文在常规 PID 控制器的基础上构成了参数模糊自整定 PID 控制器，利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改。

### 2.1 设计原理

飞机部件柔性装配控制系统的模糊控制通常是在常规 PID 控制器的基础上，采用模糊推理的方法，根据系统位置偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  对 PID 参数进行在线整定来实现，其结构如图 3 所示。

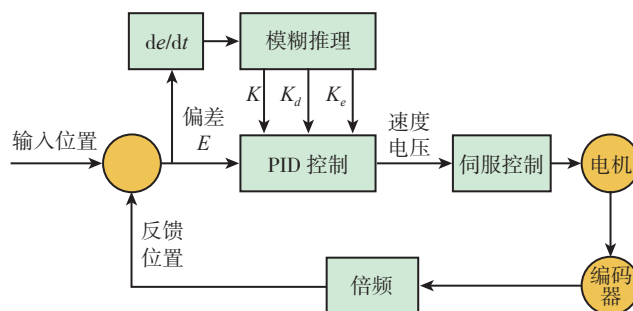


图3 基于模糊控制的位置控制系统框图  
Fig.3 Block diagram of fuzzy control based position control system

其实现思想是找出 PID 控制 3 个参数与偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  之间的模糊关系，在运行中通过不断检测  $E$  和  $EC$ ，再根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改，以满足在不同  $E$  和  $EC$  时对控制参数的不同要求，使被控对象具有良好的动、静态性能，而且计算量小，易于用 PC 机实现。

模糊控制中，偏差、偏差变化率的模糊量用  $E$  和  $EC$  表示， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  由以下算式确定：

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \{E_i, EC_i\}_p \\ K_i = K_{i0} + \{E_i, EC_i\}_i \\ K_d = K_{d0} + \{E_i, EC_i\}_d \end{cases} \quad (2)$$

其中： $\{E_i, EC_i\}_p$ 、 $\{E_i, EC_i\}_i$ 、 $\{E_i, EC_i\}_d$  为模糊推理的结果，即校正量； $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  为参数初始值。

### 2.2 隶属函数的确定

输入和输出变量隶属函数的确定是关键环节。本文提出的模糊 PID 控制根据系统运行的不同状态，考虑  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三者的关联关系，根据工程经验设计模糊整定参数，选择输入语言变量为误差  $E$  和偏差变化率  $EC$ ，选择输出语言变量为  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 。

对于模糊控制器的输入变量偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$ ，规定它们的论域为： $\{E, EC\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ； $E$

和  $EC$  的模糊子集为: {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}。

对于模糊控制器的输出变量  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ，其中  $K_p$  的论域为  $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ ； $K_i$  的论域为  $\{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}$ ； $K_d$  的论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ； $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的模糊子集均为: {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}。

### 2.3 PID 参数整定原则和控制规则表的建立

显然，模糊 PID 控制器可以根据不同的  $E$  和  $EC$  在线调整参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ，以使得系统获得最佳的控制性能。根据专家经验，本文在被控过程中基于系统输出响应，在不同  $E$  和  $EC$  下对 PID 控制器参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的自整定要求简单地总结为以下原则<sup>[3-6]</sup>：

(1) 当  $|E|$  值较大时，为了加快系统的响应速度，并防止因开始时  $E$  的瞬间变大，可能会引起的微分溢出，应取较大的  $K_p$  和较小的  $K_d$ 。另外，为了防止积分饱和，避免系统响应出现较大的超调，应去掉积分作用，取  $K_i=0$ 。

(2) 当  $|E|$  值中等大小时，为了保证一定的响应速度，同时使系统响应的超调量减小，应取较小的  $K_i$  和中等大小的  $K_p$  和  $K_d$ 。

(3) 当  $|E|$  值较小时，为了使系统具有良好的稳态性能，应减小  $K_p$  同时增大  $K_i$ 。为避免输出响应在设定值附近振荡，并考虑系统的抗干扰性能，应适当地选取  $K_d$ 。其原则是：当  $|EC|$  较小时， $K_d$  取大一些；当  $|EC|$  较大时， $K_d$  取较小的数值；通常  $K_d$  取中等大小。

(4) 偏差的变化量  $|EC|$  的大小表明偏差的变化率，当  $|EC|$  值较大，则  $K_p$  取较小的值； $|EC|$  值较小， $K_p$  取较大的值。

(5) 当  $|E|$  和  $|EC|$  异号，输出趋向给定值；当  $|E|$  和  $|EC|$  同号，输出远离给定值。

3 个参数的取值大小是否恰当，对控制系统的静态特性和动态特性影响很大。根据以上规则及  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  对系统的影响，制定出的参数调整规则如表 1、2、3 所示。

表1  $K_p$ 调整模糊规则表

| $K_p \backslash EC$ | $E$ | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|---------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| NB                  |     | PB | PB | PM | PM | PS | 0  | 0  |
| NM                  |     | PB | PB | PM | PS | PS | 0  | NS |
| NS                  |     | PM | PM | PM | PS | 0  | NS | NS |
| ZE                  |     | PM | PM | PS | 0  | NS | NM | NM |
| PS                  |     | PS | PS | 0  | NS | NS | NM | NM |
| PM                  |     | PS | 0  | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB                  |     | 0  | 0  | NM | NM | NM | NB | NB |

表2  $K_i$ 调整模糊规则表

| $K_i \backslash EC$ | $E$ | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|---------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| NB                  |     | NB | NB | NM | NM | NS | 0  | 0  |
| NM                  |     | NB | NB | NM | NS | NS | 0  | 0  |
| NS                  |     | NB | NM | NS | NS | 0  | PS | PS |
| ZE                  |     | NM | NM | NS | 0  | PS | PM | PM |
| PS                  |     | NM | NS | 0  | PS | PS | PM | PB |
| PM                  |     | 0  | 0  | PS | PS | PM | PM | PB |
| PB                  |     | 0  | 0  | PS | PM | PM | PB | PB |

表3  $K_d$ 调整模糊规则表

| $K_d \backslash EC$ | $E$ | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|---------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| NB                  |     | PS | NS | NB | NB | NB | NM | PS |
| NM                  |     | PS | NS | NB | NM | NM | NS | 0  |
| NS                  |     | 0  | NS | NM | NM | NS | NS | 0  |
| ZE                  |     | 0  | NS | NS | NS | NS | NS | 0  |
| PS                  |     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| PM                  |     | PB | NS | PS | PS | PS | PS | PB |
| PB                  |     | PB | PM | PM | PM | PS | PS | PB |

### 2.4 反模糊化方法

模糊控制器的输入量经过模糊化、模糊推理后得到相应的输出信息，但是这些输出信息是以模糊值的方式存在的。很明显，这些模糊值是不能直接控制一个被控对象的。它必须经过某种变换才能转换成可用于被控对象的清晰输出量。这种将模糊值转换成清晰值的过程称之为反模糊化<sup>[6]</sup>。在模糊控制中，常用的两种反模糊化方法为最大隶属度法(MOM)和重心法(COA)。本文采用的是 COA 反模糊化的方法，该方法亦称加权平均法，它以控制作用论域上的点  $u \in U$ ，对控制作用模糊集的隶属度  $U(u)$  为权系数进行加权平均而求得模糊结果。设  $U=\{u_i|i=1, 2, \dots, n\}$  有：

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n U(u_i)u_i}{\sum_{i=1}^n U(u_i)} \quad (3)$$

## 3 基于 MATLAB 的仿真分析

SIMULINK 是 MATLAB 的重要组件之一，它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。本文利用 MATLAB 本身的 Matlab 语言编程与 SIMULINK 仿真平台来构建整个模糊控制系统并进行仿真。

### 3.1 MATLAB 语言编程

按编程顺序，仿真程序主要由 5 个部分组成：(1) 仿真模型和仿真初值的给定部分；(2) 语言变量及其隶属

函数定义部分;(3)规则列表矩阵定义部分;(4)仿真计算部分;(5)仿真图形的输出部分<sup>[7]</sup>。编程语句摘取部分如下:

```
function main
a=newfis('fuzzpid'); % 建立一个新推理系统
a=addvar(a, 'input', 'E', [-3,3]); % 添加输入变量
    E, 并指出其论域
a=addmf(a, 'input', 1, 'NB', 'zmf', [-3, -1]);
    % 添加一个隶属函数
...
a=readfis('fuzzpid');
```

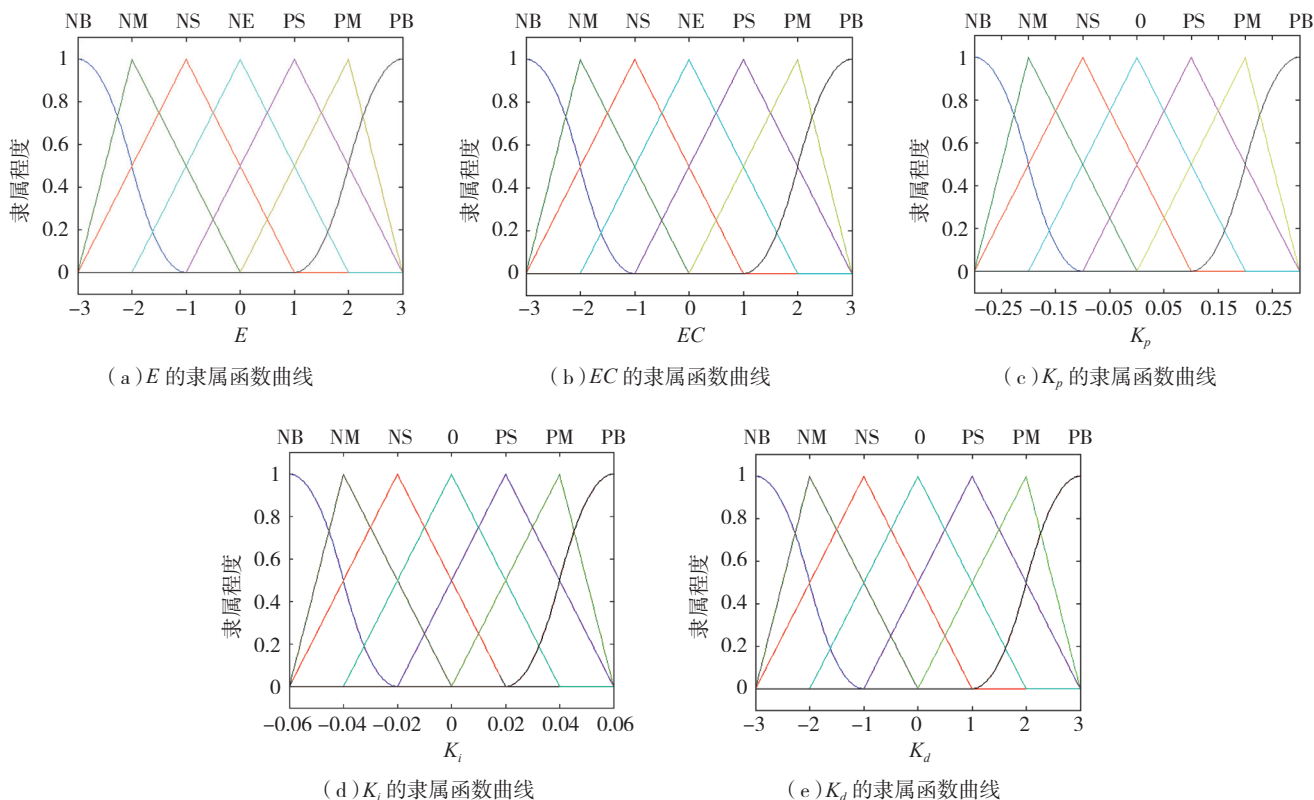


图4 隶属函数曲线

Fig.4 Membership function curve

plotfis(a); fuzzy fuzzpid

运行主函数 main, 可以分别得到输入变量  $E$ 、 $EC$  和输出变量  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的隶属函数曲线, 隶属度函数均采用交叠对称分布的三角形隶属度函数。其隶属函数曲线分别如下图 4 所示。

同时, 还可以得到 FIS 编辑界面, 如图 5 所示。即采用 Mmdani 推理方法。建立了一个 FIS 型文件, 保存为 fuzzyPID. fis。存盘之后还需选择 'save to workspace' (ctrl+T) 项, 将编辑好的 fuzzyPID. fis 文件保存到工作空间内, 以便在 SIMULINK 建模时能调用这些 FIS 文件。

### 3.2 SIMULINK 仿真模型

将模糊 PID 控制算法应用于飞机部件柔性装配多轴协同控制系统中, 其对应的 SIMULINK 仿真模型如图 6 所示。PID 控制器初始参数的设置根据 ISTE 最优设定法确定, 得到  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的 3 个初值分别为 0.4、0、1.0。依次设置所有模块的参数, 然后双击 Fuzzy Logic Controller 模块, 在其中输入 readfis('fuzzpid.fis'), 这样完成了模糊逻辑工具箱同 SIMULINK 的连接。仿真模型构建完成后, 可进入仿真阶段, 仿真曲线如图 7 所示。其中, 为了便于比较, 这里同时对常规 PID 控制和模糊自整定 PID 控制进行仿真分析, 本文考虑的被控对象的

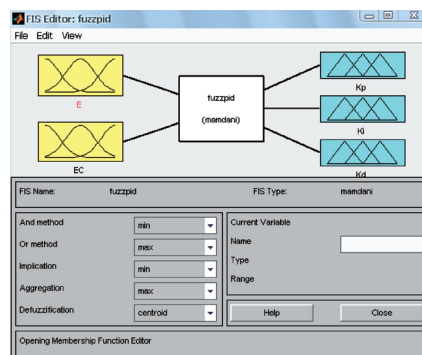


图5 FIS编辑界面

Fig.5 FIS editing interface

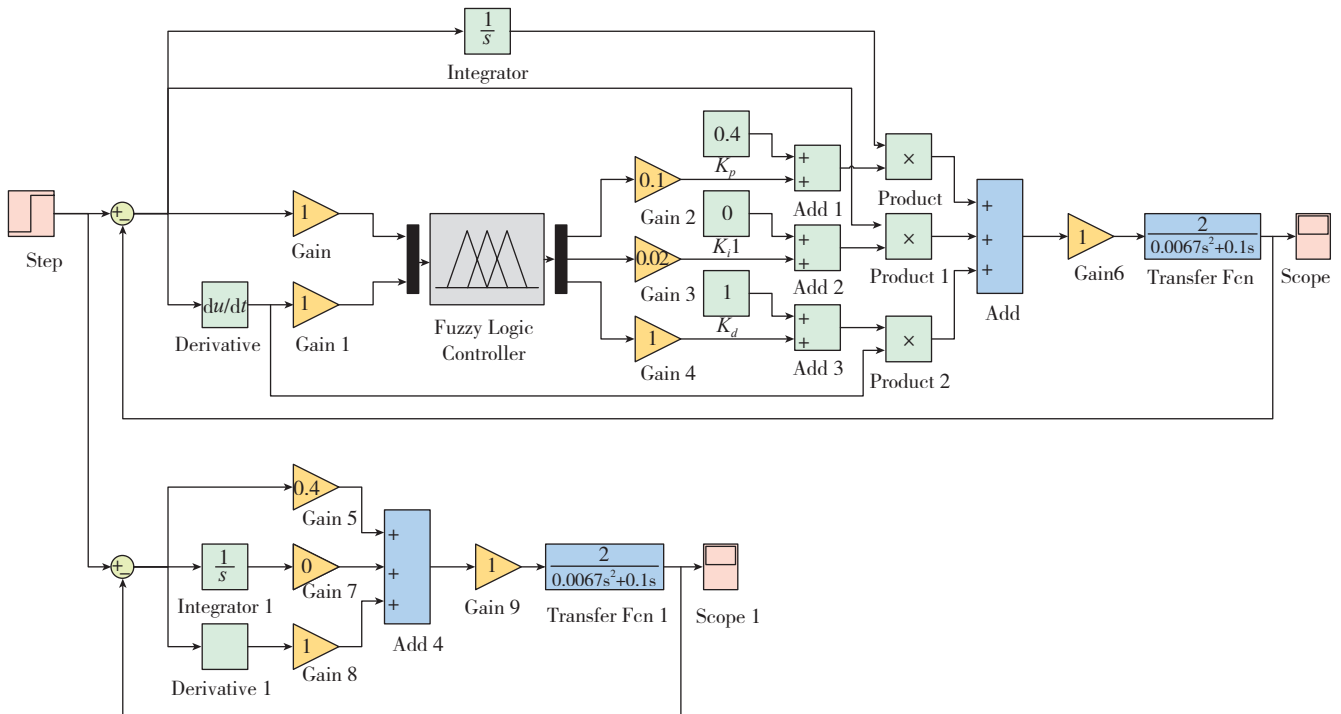
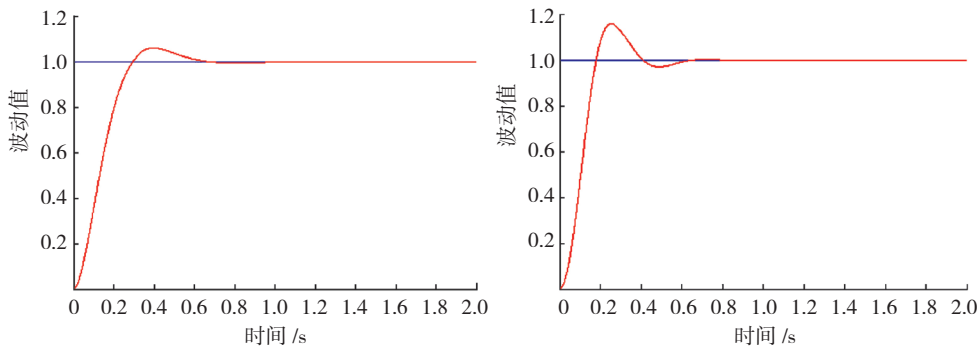


图6 模糊自整定PID与常规PID控制系统仿真模型

图6 Simulation model of fuzzy self-tuning PID and conventional PID control system



(a) 模糊自整定 PID 控制的仿真波形图

(b) 常规 PID 控制的仿真波形图

图7 仿真波形图

Fig.7 Simulation waveforms

算法设计, 结合实际的情况, 设计和实现了基于查表法的模糊自整定 PID 算法, 并通过 MATLAB\SIMULINK 中的 fuzzy 工具箱进行了伺服定位系统的控制算法设计, 通过具体的常用位置控制系统的模型验证了算法的可靠和有效性。

### 参考文献

[1] 谷宇. 飞机数字化装配定位自动控制技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

[2] 易继错, 候媛彬. 智能控制技术. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.

[3] 丁坚. 模糊 PID 控制器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

[4] 王祥好. 模糊 PID 控制算法在智能小车中的研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.

[5] 马银辉, 丁建设, 徐德松. 基于 MATLAB 的 PID 参数自调整模糊控制器的设计与应用仿真. 发电设备, 2005, 18(2): 112-114.

[6] 张伟. 基于模糊参数自整定 PID 控制的交流伺服系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.

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

(责编 小城)

传递函数为:

$$G(s) = \frac{2}{0.0067s^2 + 0.1s} \quad (4)$$

### 3.3 仿真结果分析

比较常规 PID 控制和模糊自整定 PID 控制的效果, 可以看出常规 PID 控制响应曲线超调量较大, 而参数模糊自整定 PID 控制可实现调节时间短、超调量小、系统很快进入稳态、无振荡、控制精度高、具有较强的鲁棒性, 能更好的满足系统的应用要求。

## 4 结束语

本文介绍了模糊自适应整定 PID 控制器的结构和