

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.021

## 某型飞航导弹的三维模糊控制器

王新阁<sup>1</sup>, 齐健<sup>1</sup>, 韩慧伶<sup>1</sup>, 李相伟<sup>2</sup>

(1. 空军航空大学 航空机械工程系, 吉林 长春 130022; 2. 空军航空大学 航空军械系, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为解决传统控制方法难以实现或难以奏效的控制问题, 设计三维模糊控制器。介绍三维模糊控制器的设计方案, 通过选择描述输入输出变量的词集、确定语言值的隶属度函数、制定模糊控制规则表、对  $K_e$ 、 $K_{ec}$  和  $K_u$  进行设计, 并以涡喷发动机为动力装置的导弹偏航通道为例, 采用分段控制策略进行实验分析。结果表明, 三维模糊控制器能提高系统的响应速度, 基本上实现无超调控制, 系统的跟踪性能也得到明显改善, 满足系统的性能指标要求。

**关键词:** 模糊控制; 分段控制; 三维模糊控制

**中图分类号:** TP273<sup>+</sup>.4 **文献标识码:** A

## Three-Dimensional Fuzzy Controller for a Certain Type Guided Missile

Wang Xinge<sup>1</sup>, Qi Jian<sup>1</sup>, Han Huiling<sup>1</sup>, Li Xiangwei<sup>2</sup>(1. Dept. of Aviation Mechanical Engineering, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;  
2. Dept. of Aviation Ordnance, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to solving traditional controlling problems of being difficult in performance, a three-dimensional fuzzy controller is designed. Introduce the design scheme and designing  $K_e$ ,  $K_{ec}$  and  $K_u$  based on choosing expression variables in and out, ensure subsection function of language values and establishing rule table of fuzzy control. A three-dimensional fuzzy controller applied to aerodynamics missile system is designed, which adopted the strategy of subsection control. The results of simulation demonstrate that the controller has such advantages as quick response and no over adjusting control. The track ability of the system is still improved, and the controller reaches the request of the system performance indexes.

**Keywords:** fuzzy control; subsection control; three-dimensional fuzzy control

### 0 引言

飞航导弹是一种以发动机为动力, 在大气中飞行的有翼飞行器。制导控制系统是保证飞航导弹攻击目标的重要保障, 是整个导弹的核心, 决定了飞航导弹能否完成各种战术技术指标<sup>[1]</sup>。在导弹控制系统的设计中, PID 控制器以其直观、实现简单、调整方便和鲁棒性好等优点得到了广泛应用。但随着精确制导技术的不断涌现, 控制对象的机构越来越复杂, 控制参数越来越多, 要求达到的战术指标也越来越高, 常规的 PID 控制已经很难得到满意的控制效果。采用 PID 控制器的系统虽然具有很好的稳态精度, 但往往动静特性不能兼顾, 而模糊控制具有易于实现对具有不确定性和强非线性对象的实时控制, 对被控对象特性参数的变化具有较强的鲁棒性, 对被控系统的干扰具有较强的抑制能力等特点, 模糊控制可以解决利用传统控制方法难以实现或难以奏效的控制问题<sup>[2]</sup>。故以某型飞航导弹偏航控制为例, 研究设计三维模糊控制器, 以提高飞航导弹控制系统的综合性能。

### 1 三维模糊控制器的设计方案

常规二维模糊控制器以系统误差  $e$  和误差变化率  $ec$  为输入变量, 由于  $e$  和  $ec$  被量化环节离散分档, 丢失部分信息, 从而造成调节死区。若采用二维模糊控制方法, 控制系统虽可能获得良好的动态性能, 但静态特性不能令人满意, 且在工作点附近易产生小范围的震荡。采用三输入—单输出模糊控制结构, 在误差的基础上, 引入误差的二阶导数, 设计三维模糊控制器, 其系统原理如图1。

仔细分析系统阶跃输入的响应过程, 可将模糊控制阶段分为初期和末期 2 个阶段<sup>[3]</sup>。在控制过程初始阶段, 由于被控对象的响应值和给定值之间偏差相差太大, 这时考虑被控系统跟踪给定值的精度没有多大意义, 应着重考虑提高被控系统的快速性, 采用的控制策略应以误差及误差的一阶导数的大小来确定; 而在控制过程的结束阶段, 被控对象的响应值和给定值之间的偏差已经很小了, 这时应着重考虑被控系统稳定性, 引入误差的二阶导数。故设计的三维模糊控制器采用分段控制的策略, 在控制过程的初级阶段, 只考虑误差和误差的一阶导数,

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-04-23

作者简介: 王新阁 (1966-), 男, 吉林人, 教授, 从事航空装备技术保障研究。

而在控制过程的结束阶段引入误差的二阶导数, 即 在不同的控制阶段采用不同的模糊控制规则表。

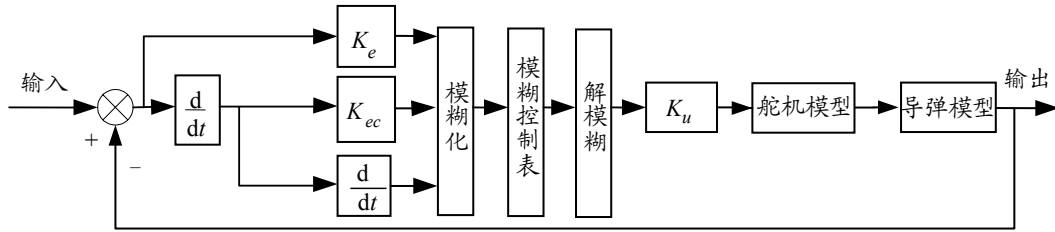


图 1 三维模糊控制系统原理图

## 2 三维模糊控制器设计

### 2.1 选择描述输入输出变量的词集

三维模糊控制器, 误差  $e$ 、误差的一阶导数  $ec$ 、控制量  $u$  的论域均为:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , 用 NB 表示负大, NM 表示负中, NS 表示负小, ZO 表示零, PS 表示正小, PM 表示正中, PB 表示正大。输入输出变量的模糊子集可表示为:

$E = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ;  $EC = \{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ ;  $U = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

为简化控制规则, 并满足控制系统快速性和稳定性要求, 只考虑误差的二阶导数  $ecc$  大于等于零和小于零 2 种情况。

### 2.2 确定语言值的隶属度函数

根据实际设计过程, 确定输入量  $e$ 、 $ec$  的模糊子集的隶属度函数选用三角形函数, 输出量  $u$  的模糊子集隶属度函数选用正态分布函数, 如图 2。

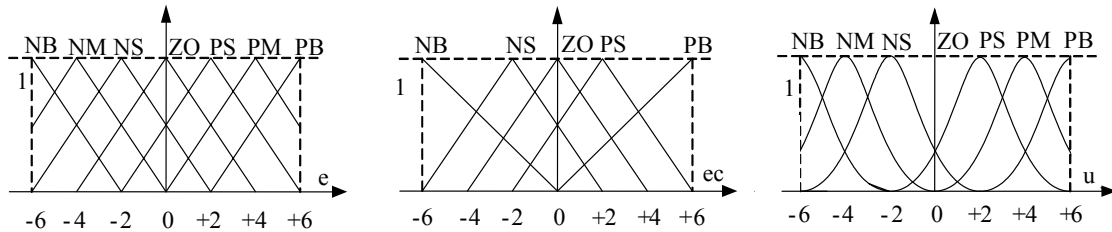


图 2 模糊子集的隶属度函数曲线

### 2.3 制定模糊控制规则表

表 1 模糊控制规则表

U \ E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
EC -6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	1	0
-5	6	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	1	0
-4	6	5	5	5	5	4	4	3	3	2	2	-1	-1
4	5	4	4	3	2	1	1	-2	-2	-3	-4	-4	-4
5	4	4	4	3	1	1	1	-3	-3	-4	-5	-5	-5
6	4	3	3	2	2	-2	-2	-3	-4	-5	-5	-6	-6

表 2 模糊控制规则表

U \ E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
EC -3	6	6	6	6	5	4	4	3	3	3	2	1	0
-2	5	5	5	5	4	4	3	3	2	2	1	1	0
-1	5	5	4	4	4	3	3	2	2	0	0	-1	-1
0	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
1	3	3	2	1	1	0	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3
2	3	2	2	2	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-4	-4
3	2	2	1	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-5

表 3 模糊控制规则表

U \ E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
EC -3	5	5	4	3	2	1	1	0	0	-1	-1	-1	-2
-2	4	4	3	2	2	1	1	0	0	-1	-1	-1	-2
-1	3	3	2	2	1	1	0	0	0	-1	-1	-2	-2
0	3	2	2	1	1	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4
1	4	3	3	1	0	0	0	-1	-2	-2	-3	-4	-4
2	4	4	3	2	1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5
3	4	3	2	2	1	1	-1	-2	-2	-4	-4	-5	-5

将控制过程分为初始和结束 2 个阶段，根据专家知识和飞航导弹偏航控制的基本原理，经过反复调试，修改模糊控制规则。在制定完模糊控制器的模糊规则后，采用合成推理的方法求解输出控制量  $u$  的模糊值矢量，采用加权平均法进行解模糊，求出精确的输出量值。当  $E = \pm 6, \pm 5, \pm 4$  时，模糊控制规则如表 1，当  $E = \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0$  且  $e_r \geq 0$  时，模糊控制规则如表 2，当  $E = \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0$  且  $e_r < 0$  时，模糊控制规则如表 3。

在三维模糊控制过程中，根据误差  $e$  和误差的二阶导数  $ec$  值的不同，选择使用对应的模糊控制规则表，这种实施控制的方法，实际上是用二维模糊控制表来实现三维模糊控制表要实现的功能。

### 2.4 三维模糊控制器 $K_e$ 、 $K_{ec}$ 和 $K_u$ 的设计

图 1 中， $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_u$  分别代表误差  $e$  的量化因子，误差变化  $ec$  的量化因子和输出量  $u$  的比例因子，经分析可知， $K_e$  是起划分粗调和细调范围作用的，当  $K_e$  比较大时，粗调范围比较大，导致上升时间变短，调节死区变小，但会出现超调，使得系统的过渡时间变长，严重时将产生振荡，使系统不

能稳定工作， $K_e$  过小时，系统上升速率过小，系统调节惰性变大，同时也影响系统的稳态性能，使系统稳态精度降低。 $K_{ec}$  对系统动态性能的影响正好相反， $K_{ec}$  选择较大时，超调量减少，但系统的响应速度变慢， $K_{ec}$  对系统的变化起抑制作用， $K_{ec}$  选择较小时，系统输出上升速率增大，可能导致系统输出产生过大的超调和振荡。 $K_u$  相当于常规控制系统中的比例增益，一般  $K_u$  越大，系统的响应速率越快，但  $K_u$  过大容易产生较大的超调，严重时会使系统振荡而不稳定， $K_u$  越小，系统输出上升速率较小，快速性变差，稳态精度变差。为满足控制系统的要求，应当根据系统的工作特征选取适当的  $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_u$  的数值。

### 3 仿真实验分析

该三维模糊控制器的控制对象为某型空地导弹，该种导弹以涡喷发动机为动力装置，发射方向可在扇面为  $\pm 60^\circ$  范围内机动，弹体模型如图 3，其中  $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  为导弹动力系数。舵机的传递函数为  $\frac{812}{s^2 + 76s + 637}$ 。

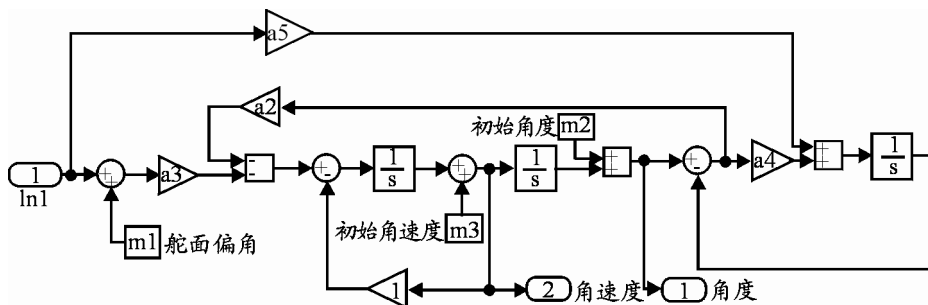


图 3 弹体仿真模型图

如图 4，系统在常规 PID 控制器作用下，PID 参数取值为  $K_p = 1.1$ 、 $K_i = 0.3$ 、 $K_d = 0.5$ 。系统在三维模

糊控制器作用下，此时量化因子  $k_e = 7$ ， $k_{ec} = 0.6$ ， $k_u = 6.3$ 。

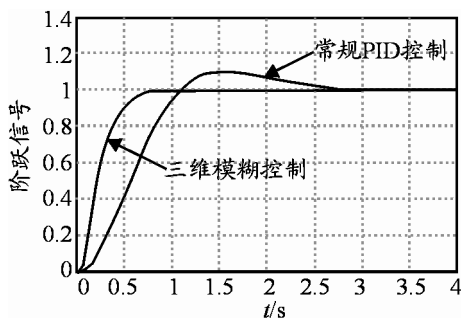


图 4 控制系统单位阶跃响应曲线

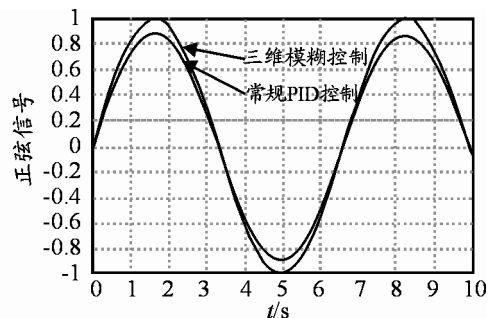


图 5 控制系统正弦信号响应曲线

(下转第 73 页)

式为:  $L(n)=[L(n-1)+L(n-2)+\dots+L(0)]/n$

式中:  $n$  为采样次数;  $L$  为传感器采样值。当  $n$  值较大时, 信号平滑度较高, 但灵敏度较低; 当  $n$  值较小时, 信号平滑度较低, 但灵敏度较高。根据试验效果,  $n=64$  时, 信号的稳定性有很大提高, 且信号综合采样频率为 625 Hz, 满足系统检测的实时性要求。

采取算术平均法后的系统稳定性有了大幅提升, 但不能克服因偶然因素引起的脉冲干扰, 因此对采样结果进行限幅滤波法(又称程序判断滤波法)处理。限幅滤波的方程如下:

$$L(n) = \begin{cases} L(n) & |L(n) - L(n-1)| \leq A \\ L(n-1) & |L(n) - L(n-1)| > A \end{cases}$$

根据经验判断, 确定 2 次采样允许的最大偏差值  $A$  (设为  $A$ ), 每次检测到新值时应进行判断: 如果本次值与上次值之差  $\leq A$ , 则本次值有效; 否则, 本次值无效, 放弃本次值, 用上次值代替本次值。根据实验测试,  $A$  取值为 0.012 时, 能有效过滤偶然因素引起的脉冲干扰。

### 3 系统调试

系统调试包括传感器位移线性度标定、12 工位标准极限位移值设定、基准面识别、检测重复精度测试、系统稳定性测试等内容。部分调试数据如表 1。

表 1 部分调试数据

测杆 序号	第一次读 数/mm	第一次读 数/mm	第一次读 数/mm	最大误差 /mm
标准弹体测试读数, 测试速度为 200 发/min				
1	1.497 944	1.503 761	1.497 944	0.005 817
2	1.684 096	1.678 279	1.684 096	0.005 817
3	1.625 924	1.620 106	1.625 924	0.005 818
4	1.765 538	1.759 721	1.765 538	0.005 817
5	1.451 405	1.445 588	1.451 405	0.005 825
6	1.678 279	1.678 279	1.678 279	0.00
7	1.567 751	1.561 934	1.567 751	0.005 817
8	1.579 386	1.579 386	1.579 386	0.00
9	1.800 42	1.806 26	1.794 625	0.005 84
10	1.527 03	1.521 213	1.521 213	0.011 635
11	1.486 309	1.480 492	1.480 492	0.005 817
12	1.666 645	1.672 462	1.672 462	0.005 817

表 1 显示 12 根测杆测试标准弹体时, 重复测量精度  $\leq \pm 0.006$  mm。由表 1 可知, 满足系统测试要求。

### 4 结束语

该系统实现了对弹体尺寸进行自动跟踪、识别, 并在算法上对采集的位移数据进行补偿和优化处理, 大大提高了国内小口径枪弹尺寸检测的执行效率和精度。经实验验证, 弹体尺寸的检测速度可达

到并超过 200 发/min, 检测精度可以控制在 0.01 mm 以内, 远远超过国内 80 发/min 生产节拍, 对国内小口径枪弹生产线的改造具有重要意义。

### 参考文献:

[1] 杨振江, 等. 智能仪器与数据采集系统中新器件及应用[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2001.  
 [2] 王泽山, 等. 火药装药设计原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.  
 [3] 蔡尚峰. 自动控制理论(下)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.  
 [4] 哈里斯(C.E.Harris). 汴荣宣 译. 美国枪弹生产的现代化[J]. 美国步枪手, 1979(11): 4-18.  
 [5] 严蔚民, 等. 数据结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

\*\*\*\*\*

(上接第 68 页)

由图 4 中对比可以得出: 较之常规 PID 控制器, 系统在三维模糊控制器作用下, 超调明显减少, 基本实现了无超调控制, 系统调整时间由 1.15 s 提高到 0.75 s, 稳态误差基本消除, 满足系统的性能指标要求。

为验证系统的跟踪性能, 系统输入选择正弦信号。如图 5, 由图 5 中 2 条响应曲线对比可以得出: 三维模糊控制系统输出正弦响应要比传统 PID 的输出响应好得多, 说明文中设计的三维模糊控制系统的跟踪性能要比优于常规 PID 控制系统。

### 4 结论

1) 采用分段控制策略, 用二维模糊控制表来实现三维模糊控制表要实现的功能, 设计了三维模糊控制器。

2) 基于 Simulink 软件环境, 以飞航导弹偏航控制为例, 建立了导弹控制系统弹体仿真模型。

3) 仿真结果表明, 采用三维模糊控制器, 在单位阶跃信号作用下, 较常规 PID 控制器, 导弹偏航控制系统的快速性明显提高, 基本实现了无超调控制; 在正弦信号作用下, 控制系统的跟踪性能得到明显改善。

### 参考文献:

[1] 刘根旺, 许化龙. 导弹姿态控制伺服系统的变结构控制[J]. 上海航天, 2004, 21(6): 15-17.  
 [2] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 3-10.  
 [3] 史莹晶, 马广富. 大空域机动巡航导弹的模糊 PID 控制器设计[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 11-13.