

# 一种双变量自校正模糊 PI 控制在发动机控制中的应用

方中祥 李华聪 吴琪华 张嘉楨  
(西北工业大学 709 教研室, 西安, 710072)

RESEARCH OF A TWO-VARIABLE SELF-TUNING FUZZY PI CONTROL  
AND ITS APPLICATION IN AEROENGINE CONTROL

Fang Zhongxiang, Li Huacong, Wu Qihua, Zhang Jiazhen

(The Department of Turbine Engine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

**摘 要** 提出了一种双变量自校正模糊 PI 控制算法,构造出一种航空发动机双变量自校正模糊 PI 控制器和控制系统,研究了控制器和控制系统特性,为发动机控制探索了一种新方法。

**关键词** 双变量模糊控制 航空发动机控制 模糊推理

**中图分类号** V233.7, TP273

**Abstract** This paper proposed a new algorithm of two-variable self-tuning fuzzy PI control, synthesized a new structure of the two-variable self-tuning fuzzy-PI controller for aeroengine control, studied its application in aeroengine control, researched the general rule, adopted multivariable fuzzy control in aeroengine control, and explored a new method in aeroengine control.

**Key words** two-variable fuzzy control, aeroengine control, fuzzy reasoning

模糊控制理论在航空发动机控制中的应用已有学者进行了一些研究<sup>[1~3]</sup>,并在试验台上对某型航空发动机进行了试车试验研究<sup>[4]</sup>,但这些研究只是就单变量控制进行的,进行多变量控制研究只有文献[5]在地面最大状态下进行了初步研究,本文在以上研究的基础上探讨了一种新型的双变量自校正模糊 PI 控制算法,设计了双变量自校正模糊 PI 控制器和某型航空发动机模糊闭环控制系统,并在飞行包线内进行了计算机仿真研究,探索了航空发动机采用多变量模糊控制方法的规律,为航空发动机控制探索新方法。

## 1 双变量自校正模糊 PI 控制算法研究

选用供油量控制低压转子转速为常数,尾喷口控制涡轮后温度为常数,即

$$\$M \rightarrow N_1 = \text{const}, \quad \$A \rightarrow T_4^* = \text{const} \quad (1)$$

的控制规律,探索航空发动机采用模糊控制的可行性。

将模糊变量  $E_{N_1}$ ,  $E_{T_4}$ ,  $\$M_f$ ,  $\$A_c$  量化为 7 个语言变量,其论域划分为 15 个等级,建立各模糊变量的状态表。根据某型航空发动机特性及其控制规律,总结出 49 条模糊控制规则,利用输入语言变量根据控制规则进行模糊推理和模糊决策求得控制量。

双变量自校正模糊 PI 算法分为模糊推理算法、PI 算法和自校正算法 3 部分。采用文献[6]提出的多维模糊条件分解方法,将模糊控制系统的模糊关系矩阵分解为 4 个小模糊关系矩阵  $R_{11}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{22}$ , 并且这些分解模糊关系矩阵用离线计算的方法计算,算法为

$$R_{11} = \bigcup_{i=1}^{49} \{E_{N_1}(t) \cap M_f(t)\}, \quad R_{12} = \bigcup_{i=1}^{49} \{E_{N_1}(t) \cap A_c(t)\} \quad (2)$$

$$R_{21} = \bigcup_{i=1}^{49} \{E_{T_4}(t) \cap M_f(t)\}, \quad R_{22} = \bigcup_{i=1}^{49} \{E_{T_4}(t) \cap A_c(t)\} \quad (3)$$

根据模糊条件分解所得的模糊控制器的模糊关系方程分解为

$$M = E_{N_1}^T R_{11} \cap E_{T_4}^T R_{21}, \quad A = E_{N_1}^T R_{12} \cap E_{T_4}^T R_{22} \quad (4)$$

根据式(4)在线计算出的模糊控制量 \$M, A\$ 采用加权平均法进行模糊决策求得模糊推理的精确控制量 \$M\_f, A\$。

模糊 PI 算法如下

$$M = c_{11} \int M_f dt + c_{12} M_f, \quad A = c_{21} \int A dt + c_{22} A \quad (5)$$

PI 算法根据模糊推理算法得到的精确控制量利用式(5)计算出的 \$M\$ 和 \$A\$ 即为自校正模糊 PI 控制器的精确控制量, 算法中的系数 \$c\_{11}, c\_{12}, c\_{21}, c\_{22}\$ 现场调试确定。

自校正算法是在双输入模糊 PI 算法中加入自校正技术, 对量化因子 \$C\_{e1}, C\_{e2}\$ 和比例因子 \$K\_1, K\_2\$ 进行在线调节, 调整论域等级和系统增益, 来改善系统的动、静态性能。

自校正机构设计准则为

$$J_{1k} = \frac{1}{m e_{nN_1}} \sum_{i=1}^m |e_{N_1}(k-i)|, \quad J_{2k} = \frac{1}{m e_{nT_4}} \sum_{i=1}^m |e_{T_4}(k-i)| \quad k = m+1, m+2, \dots$$

式中: \$e\_{nN\_1}\$ 和 \$e\_{nT\_4}\$ 为控制误差限; \$k\$ 为当前时刻; \$e\_{N\_1}(k-i)\$ 和 \$e\_{T\_4}(k-i)\$ 为 \$k-i\$ 时刻的控制; \$m\$ 为自校正滞后步数, 且 \$m \le k\$。本文取

$$K_1 = \begin{cases} 0.5 \\ J_{1k} \\ 2.0 J_{1k} \end{cases}, \quad K_{b1} = \begin{cases} 0.5, & J_{1k} < 0.5 \\ 1, & 0.5 < J_{1k} < 2.0 \\ 2, & 2.0 < J_{1k} \end{cases}$$

$$K_2 = \begin{cases} 0.5 \\ J_{2k} \\ 2.0 J_{2k} \end{cases}, \quad K_{b2} = \begin{cases} 0.5, & J_{2k} < 0.5 \\ 1, & 0.5 < J_{2k} < 2.0 \\ 2, & 2.0 < J_{2k} \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{e1} = C_{e10} K_{b1}, \quad C_{e2} = C_{e20} K_{b2}$$

## 2 闭环模糊控制系统设计及仿真

根据前面所确定的参数、模糊控制算法和根据选定的控制规律, 设计的控制系统结构如图 1 所示。模糊控制器算法采用双变量自校正模糊 PI 控制算法, 以被控量低压转子转速的增量 \$N\_1\$ 及涡轮后温度的增量 \$T\_4^\*\$ 的误差为控制器的输入, 以控制量燃油量的增量 \$M\$ 及尾喷口的变化量 \$A\$ 为模糊控制器的输出。

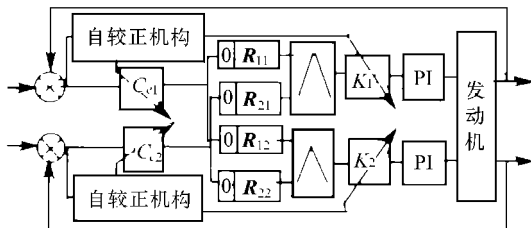


图 1 双变量自校正模糊 PI 控制系统结构图

用某型航空发动机的小偏离动态模型, 并根据图 1 所示结构进行仿真研究, 研究了飞行包线内大量状态点的发动机性能控制的效果, 飞行包线内部分点的仿真曲线如图 2~图 5 所示, 从图 2~图 5 可以看出虽然飞行包线内不同状态的参数差别很大, 但是控制系统能够较好地跟踪输入信号, 达到要求的控制精度; 并且具有较好的静态解耦特性和响应特性。

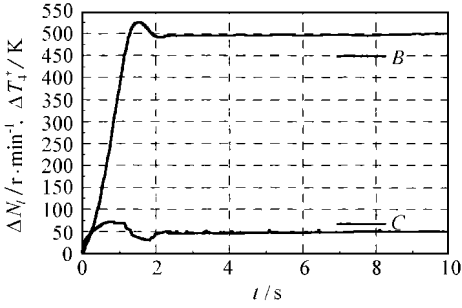


图 2 输入  $N_1 = 500r \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $T_4^+ = 50K$   
( $Ma = 0, H = 0$ )

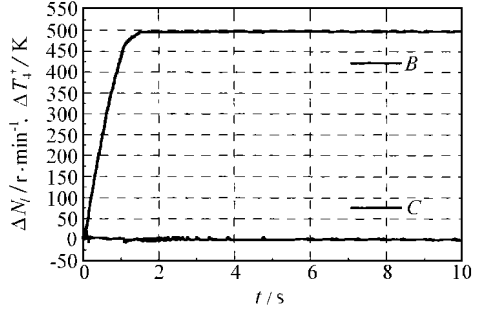


图 3 输入  $N_1 = 500r \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $T_4^+ = 0K$   
( $Ma = 0, H = 0$ )

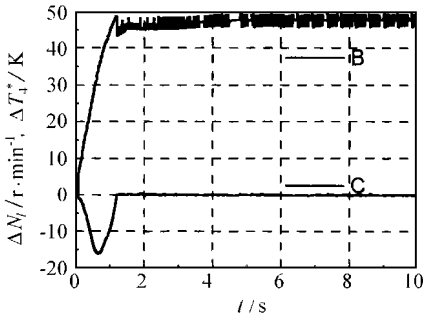


图 4 输入  $N_1 = 0r \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $T_4^+ = 50K$   
( $Ma = 0, H = 0$ )

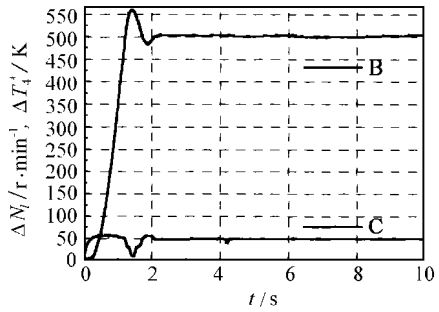


图 5 输入  $N_1 = 500r \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $T_4^+ = 50K$   
( $Ma = 1.5, H = 18\text{km}$ )

### 参 考 文 献

- 1 Wu C H, Xu Y H, Li B W. Application of a fuzzy controller in the fuel system turbo jetengine. Journal of Propulsion and Power, 1989, 5(3): 373~374
- 2 Wu C H, Luo E K. Model reference adaptive control system on an aeroengine. Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(6): 1257~1260
- 3 罗恩科, 吴琪华. 利用模糊控制理论设计自适应机构的自适应系统的研究. 航空动力学报, 1993, 8(4): 371~374
- 4 樊丁, 于晋文, 吴琪华. 模糊控制理论在航空涡轮喷气发动机控制系统中的应用. 航空学报, 1993, 14(4): B145~B152
- 5 方中祥, 吴琪华. 一种基于模糊推理的双变量模糊 PI 控制及其在航空发动机控制中的应用. 见方中祥, 尹大川主编: 现代科技新进展. 西安: 西北工业大学出版社, 1994. 77~82
- 6 Gupta M M, Kiszka J B, Trojan G M. Multivariable structure of fuzzy control systems. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1986, SMC-16(5): 638~655