

四输入模糊推理自校正控制 在发动机控制中的应用*

西 北工业大学 方中祥** 李华聪 吴琪华 张嘉桢 陈辅群

【摘要】 四输入模糊推理算法是同时利用两个输入模糊变量的误差和误差变化率进行模糊推理;在四输入模糊推理算法中引入自校正技术,形成了基于四输入模糊推理的双变量自校正模糊控制算法;仿真研究了该控制算法和控制器的特性,结果表明用该控制方法设计的航空发动机模糊控制系统获得了满意的控制性能。

主题词: 模糊控制论 航空发动机 自动控制 仿真

分类号: V233.7 TP273

1 前 言

作者利用计算机仿真研究了航空发动机双变量模糊 PI 控制系统的响应特性和解耦特性,得到了满意的结果^[1]。但是设计控制器时仅利用输入模糊变量的误差信息,对输入信息利用不充分。本文在此基础上讨论的基于四输入模糊推理的双变量自校正模糊控制算法,在设计模糊控制器时考虑了输入模糊变量的误差和误差变化率,充分利用了输入信息进行模糊推理。但是仅仅用模糊推理方法控制系统性能不够理想,于是引入自校正技术,形成基于四输入模糊推理的双变量自校正控制算法。该方法在发动机多变量控制中也获得满意的性能。

2 四输入模糊推理自校正模糊控制设计

2.1 该控制器的控制规则设计

采用四输入模糊推理自校正模糊控制算法,设计的自校正模糊控制系统的结构如图 1。选取被控量的增量 ΔN_1 和 ΔT_4^* 的误差 EN_L, ET_4^* 及误差变化率 $\dot{EN}_1$ 和 $\dot{ET}_4^*$ 作为控制器的输入模糊变量,选取控制量的偏差 ΔM_f 及 ΔA_c 为控制器的输出模糊变量,将模糊变量 $EN_L, ET_4^*, \dot{EN}_1, ET_4^*, \Delta M_f$ 及 ΔA_c 同文献[1]一样进行量

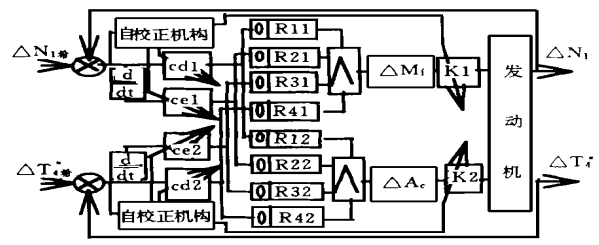


图 1 四输入模糊推理自校正模糊控制系统图

1997 年 3 月收稿, 1997 年 10 月收到修改稿。

* 本文系国家自然科学基金(编号: 59076290)和航空基金资助项目(编号: 90C53021)

** 男 35 岁 博士 工程师 西安市西北工业大学 709 教研室 710072

化和划分论域等级,形成相应的模糊变量状态表,状态表同文献[1]中表1类似,只是论域等级和隶属度的数值不同。

文献[1]类似总结出包含模糊变量的误差和误差变化率的控制规则63条如下。

$$\begin{aligned} \text{IF } EN_{L(i)} = PS \text{ and } \dot{EN}_{L(i)} = NM \text{ and } ET_{4(i)}^* = NS \text{ then } ET_{4(i)}^* = PM \\ \text{then } \Delta M_{f(i)} = PM \text{ and } \Delta A_{c(i)} = PS \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 $EN_{L(i)}$, $\dot{EN}_{L(i)}$, $ET_{4(i)}^*$ 和 $\dot{ET}_{4(i)}^*$ 是定义在其论域上的4个输入模糊变量, $\Delta M_{f(i)}$ 和 $\Delta A_{c(i)}$ 是定义在其论域上的两个输出模糊变量。

2.2 四输入模糊推理自校正模糊控制推理算法设计

四输入模糊推理方法象文献[1]一样将模糊关系矩阵 R 分解为八个模糊关系矩阵 R_{11} , R_{21} , R_{31} , R_{41} , R_{12} , R_{22} , R_{32} 和 R_{42} 分解模糊关系矩阵采用离线计算,算法如下:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{EN_{L(i)} \cap \Delta M_{f(i)}\} & R_{12} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{EN_{L(i)} \cap \Delta A_{c(i)}\} \\ R_{21} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{\dot{EN}_{L(i)} \cap \Delta M_{f(i)}\} & R_{22} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{\dot{EN}_{L(i)} \cap \Delta A_{c(i)}\} \\ R_{31} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{ET_{4(i)}^* \cap \Delta M_{f(i)}\} & R_{32} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{ET_{4(i)}^* \cap \Delta A_{c(i)}\} \\ R_{41} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{\dot{ET}_{4(i)}^* \cap \Delta M_{f(i)}\} & R_{42} &= \bigcup_{i=1}^{63} \{\dot{ET}_{4(i)}^* \cap \Delta A_{c(i)}\} \end{aligned} \quad (2)$$

采用在线变换推理的方法得到控制量 ΔM_f 及 ΔA_c ,变换推理算法是:

$$\begin{aligned} \Delta M_f &= EN_L \cdot R_{11} \cap \dot{EN}_L \cdot R_{21} \cap ET_4^* \cdot R_{31} \cap \dot{ET}_4^* \cdot R_{41} \\ \Delta A_c &= EN_L \cdot R_{12} \cap \dot{EN}_L \cdot R_{22} \cap ET_4^* \cdot R_{32} \cap \dot{ET}_4^* \cdot R_{42} \end{aligned} \quad (3)$$

然后采用加权平均算法进行模糊判决得到精确控制量。

2.3 自校正机构设计

在四输入模糊推理方法中加入自校正技术,对量化因子 C_{e1} , C_{d1} , C_{e2} , C_{d2} 和比例因子 K_1 和 K_2 进行在线调节,调整论域等级的大小和系统增益,相当于改变了模糊控制规则,从而改善系统的动、静态性能。

自校正机构设计准则为:

$$J_{1k} = \frac{1}{me_{inf\ nl}} \sum_{i=1}^m |e_{nl}(k-i)| \quad J_{2k} = \frac{1}{me_{inf\ T4}} \sum_{i=1}^m |e_{T4}(k-i)|$$

式中: $k = m+1, m+2, \dots$ 。

其中 $e_{inf\ nl}$ 和 $e_{inf\ T4}$ 为控制误差限, k 为当前时刻, $e_{nl}(k-i)$ 和 $e_{T4}(k-i)$ 为 $k-i$ 时刻输入模糊变量的误差, m 为自校正滞后步数,且 $m \leq k$ 。本文取:

$$\begin{aligned} K_1 &= \begin{cases} 0.5 \\ J_{1k} \\ 2.0J_{1k} \end{cases} & K_{b1} &= \begin{cases} 0.5 & J_{1k} < 0.5 \\ 1.0 & 0.5 < J_{1k} < 2.0 \\ 2.0 & 2.0 < J_{1k} \end{cases} \\ K_2 &= \begin{cases} 0.5 \\ J_{2k} \\ 2.0J_{2k} \end{cases} & K_{b2} &= \begin{cases} 0.5 & J_{2k} < 0.5 \\ 1.0 & 0.5 < J_{2k} < 2.0 \\ 2.0 & 2.0 < J_{2k} \end{cases} \\ C_{e1} &= C_{e10}K_{b1} & C_{d1} &= C_{d10}K_{b1} & C_{e2} &= C_{e20}K_{b2} & C_{d2} &= C_{d20}K_{b2} \end{aligned} \quad (4)$$

3 四输入模糊推理自校正模糊控制系统仿真

据图 1 所示系统和文献[1] 的模型在飞行包线内的大量状态进行仿真研究, 仿真时取自校

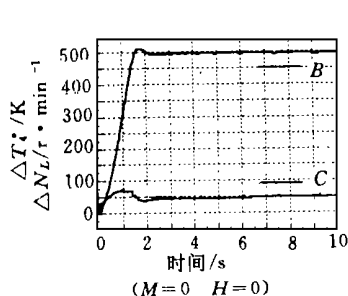


图 2 $\Delta N_L = 500 \text{ r/min}$, $T_4^* = 50 \text{ K}$

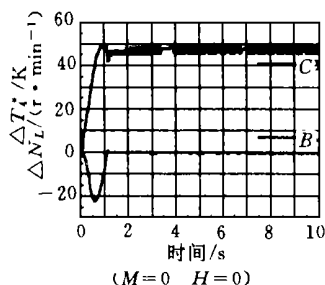


图 3 $\Delta N_L = 500 \text{ r/min}$, $T_4^* = 0 \text{ K}$

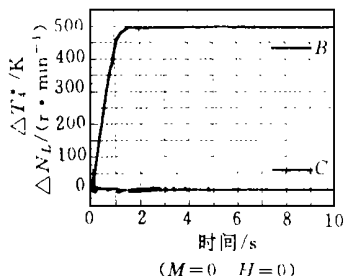


图 4 $\Delta N_L = 0 \text{ r/min}$, $T_4^* = 50 \text{ K}$

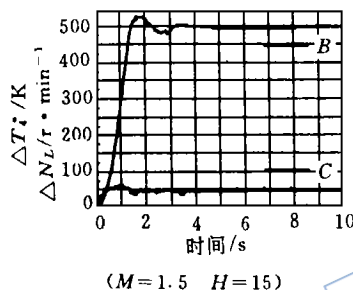


图 5 $\Delta N_L = 500 \text{ r/min}$, $T_4^* = 50 \text{ K}$

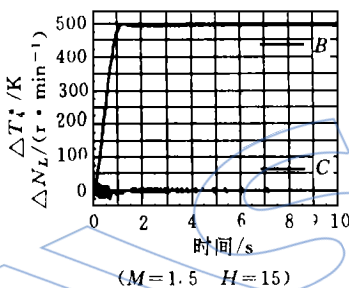


图 6 $\Delta N_L = 500 \text{ r/min}$, $T_4^* = 0 \text{ K}$

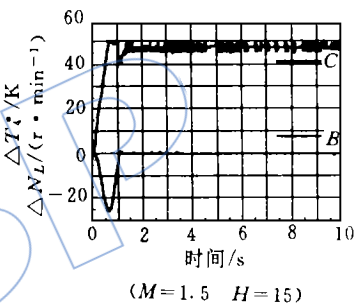


图 7 $\Delta N_L = 0 \text{ r/min}$, $T_4^* = 50 \text{ K}$

正机构的控制误差限 $e_{nfl} = \pm 25 \text{ r/min}$, $e_{nflT4} = \pm 2.5 \text{ K}$ 即相对偏差输入信号的误差为 $\pm 5\%$ 。仿真结果表明基本达到设计误差要求, 采用 FORTRAN 77 程序设计语言设计仿真程序, 仿真 10 秒钟的发动机过程, 在奔腾-75 微机上运行时间不到 1 秒, 表明算法具有较好的实时性。结果还表明该方法也具有较好的静态解耦特性和满意的响应特性。发动机部分状态下不同输入 ΔN_L 和 ΔT_4^* 的仿真曲线如图 2~图 7, 曲线 B 表示转速响应曲线, C 为温度响应曲线。

4 结 论

研究结果表明本文的模糊控制方法也具有较好的静态解耦特性、满意的响应特性, 本文的多变量模糊控制方法有望应用于发动机控制系统中, 克服航空发动机建模的困难。当然, 发动机多变量模糊控制研究还是刚刚起步, 还有许多问题有待研究。

参 考 文 献

- 1 方中祥, 黄万伟, 张嘉桢等. 一种双变量模糊 PI 控制在航空发动机控制中的应用. 航空动力学报, 1997, 13(1): 41-44

(责任编辑 王震华)

blade cross-sectional stiffnesses with finite element method on the basis of the two-dimensional linear model. The warping effect and deformation characteristics are incorporated in the formulation. As a result, a software was been developed, which consists of 3 nodes, 4 nodes, 6 nodes, 8 nodes elements. The effectiveness of the program has been verified by means of comparison with NABSA's analytical results.

Key Words Helicopter blades Cross section Stiffness Finite element methods

APPLICATION OF TWO- VARIABLE SELF- STUNING FUZZY CONTROL BASED ON FUZZY REASONING WITH FOUR INPUTS IN AEROENGINE CONTROL

Fang Zhongxiang, Li Huacong, Wu Qihua, Zhang Jiazhen, Chen Fuqun

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT Self-stuning technicalization was introduced into the fuzzy control algorithm based on the fuzzy-reasoning with four inputs. A new two-variable self-stuning fuzzy control algorithm was synthesized based on the fuzzy-reasoning with four inputs. Then a two-variables self-stuning fuzzy controller with four inputs has been designed. The research focuses on the algorithms and the property of this controller, as well as its application in aeroengine control by computer simulation. The results show that this method is feasible for the aeroengine control system.

Key Words Fuzzy control theory Aircraft engines Automatic control Simulation

EXPERIMENTAL RESEARCH OF REVERSE FLOW IN AXIAL- FLOW COMPRESSOR

Li Jun

(1st Dept. Air Force Engineering College, Xi'an 710038)

Zhu Junqiang, Liu Hong, Liu Zhiwei

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The experiments of reverse flow in a single-stage axial-flow compressor were completed. The parameters, such as velocities, static and total pressure, incidence and deviation, were measured at three sections: the inlet section of rotor, the section between rotor and stator, the outlet of stator. The pressures and temperatures of the flow are measured with a steady acquisition system. The experimental results show that, uniform flow parameters are obtained at the outlet section of stator, but the parameters in the inlet section of rotor vary obviously at the radial direction. The incidences of the reverse flow are very large, so there exists a great loss. Therefore, the temperature rises as the gas flow through the compressor reversely.

Key Words Compressors Aerodynamic tests Flow parameter measurement