

# 航空发动机多路模糊切换控制系统设计

仇小杰 黄金泉 鲁峰 刘楠

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

**摘要:**针对航空发动机在不同控制通路切换过程中出现的转速等参数发生大幅度跳变以及系统不稳定的问题,提出了一种模糊切换控制方法,设计了基于不同结构控制通路的模糊切换控制器,基于无源性概念对航空发动机多路模糊切换控制系统进行了稳定性分析,得到了多路模糊切换控制系统稳定的充分条件。航空发动机模糊切换系统与直接切换系统仿真结果表明了航空发动机多路模糊切换控制方法的有效性。

**关键词:**航空发动机;多路切换控制;模糊切换;稳定性分析

**中图分类号:**V231.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)04-0439-07

## Multi-loop Fuzzy Switching Control System Design for Aircraft Engines

Qiu Xiaojie, Huang Jinquan, Lu Feng, Liu Nan

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Considering the significant jump of working parameters such as speed and the unstable problem of the system during the shift of different control loops on aircraft engine, the method for fuzzy switching control scheme is proposed. The fuzzy switching controller for different structures of control loops is designed. The stability of the multi-loop switching control system for aircraft engines is analyzed based on the passivity theorem. Sufficient stability condition of multi-loop switching system is obtained. Compared with the direct switching system, simulation of the proposed fuzzy switching system shows the effectiveness to the multi-loop switch control method for aircraft engines.

**Key words:** aircraft engines; multi-loop switching control; fuzzy switching; stability analysis

随着飞行包线的不断拓展,发动机要执行的任务日益增多,由于不同时段、不同目标、不同任务采取的控制策略不同,体现了发动机控制的多模态性<sup>[1]</sup>。在发动机控制过程中,存在很多不同结构的控制通路(开环控制)或控制回路(闭环控制)<sup>[2]</sup>,并需要根据发动机的状态进行多控制通路或控制回路间的切换,从而满足发动机的性能要求。

近年来,混合系统已经成为控制界的研究热点<sup>[3-4]</sup>,而切换系统作为一类特殊的混合系统,其控

制方法已经得到实际应用<sup>[5-9]</sup>。当前航空发动机控制系统的多路切换一般采用Min/Max规则,这种方法在两个通路切换的边界处采用硬切换方法,这会引起发动机的被控参数或控制参数发生大幅度跳变,并可能导致系统不稳定。

在多路切换控制系统的稳定性分析中,无源性分析有着广泛的应用。基于无源性定理的多路切换控制系统稳定性分析主要集中在子通路控制结构相同的情况下<sup>[10-11]</sup>,对于不同控制结构的多路切换

控制系统的稳定性分析未见报道。

随着航空发动机技术的不断进步和性能的不断提高,其控制系统由简单到复杂,控制通路也越来越多。在进行发动机半物理仿真试验时,当加速开环控制通路切换到转速闭环控制回路后,发动机转速发生大幅度跳变,甚至导致发动机转速的振荡,严重时产生不稳定响应。为了解决这一问题,本文基于模糊逻辑和切换系统理论,提出一种模糊切换控制方法,给出了不同控制结构的航空发动机多路模糊切换控制系统的数学描述并基于无源性概念对系统的切换过程进行稳定性分析。

### 1 系统设计

航空发动机多路切换控制系统结构如图1所示,系统由发动机、 $n$ 个控制模态以及一个模糊切换控制器组成,航空发动机通过在各个子控制通路间相互切换实现需要的功能。系统中存在不同结构的子控制通路,包括 $m$ 个闭环控制回路以及 $(n-m)$ 个开环控制通路。

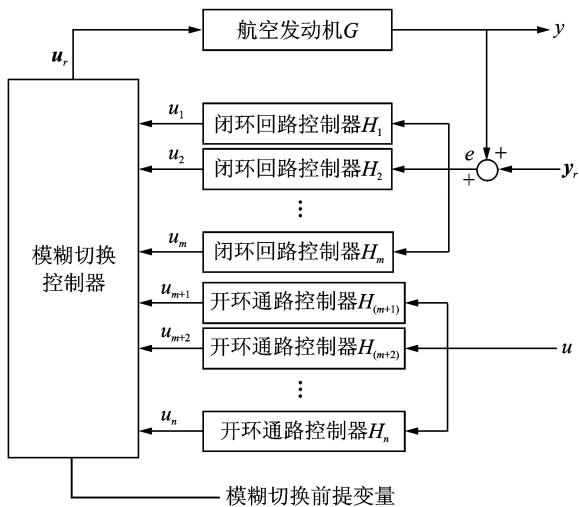


图1 航空发动机多路模糊切换控制系统结构图

多路切换控制系统通过模糊切换控制器实现多路控制器之间的相互切换。考虑多输入单输出的模糊切换控制器,采用模糊If-Then规则,对 $n$ 个控制通路,有 $n$ 个规则,第 $i$ 个规则如下

If  $E_1(t)$  is  $M_{i1}$ , and  $\dots$ ,  $E_p(t)$  is  $M_{ip}$

Then  $u_i(t) = u_i(x(t))$  (1)

式中: $i=1, 2, \dots, n$ ;  $E_1(t), E_2(t), \dots, E_p(t)$ 为 $p$ 个前提变量; $M_{i1}(t), M_{i2}(t), \dots, M_{ip}(t)$ 为相对应的模糊集; $x(t)$ 为状态变量; $u_i(t)$ 为控制输入量; $u_i(x(t))$ 为第 $i$ 个子控制回路中的控制器输出。

模糊切换控制器输出为

$$u_r(t) = \sum_{i=1}^n h_i(E(t))u_i(x(t)) \quad (2)$$

式中:  $h_i(E(t)) = \omega_i(E(t)) / \sum_{i=1}^n \omega_i(E(t))$ ,

$$\omega_i(E(t)) = \prod_{k=1}^p N_{ik}(E_k(t)), N_{ik}(E_k(t)) \text{为 } E_k(t) \text{ 属于 } M_{ik} \text{ 的模糊隶属度函数, 且 } h_i(E(t)) > 0, \sum_{i=1}^n h_i(E(t)) = 1.$$

多路切换系统表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u_r(t) \\ u_r(t) = \sum_{i=1}^n h_i(E(t))u_i(x(t)) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f_i(x(t))$ 和 $g_i(x(t))$ 可以为线性或者非线性函数。

### 2 稳定性分析

令 $F$ 为 $\mathbf{R}^n$ 到 $\mathbf{R}$ 的函数空间,在此空间内定义一个标量乘积 $\langle x, y \rangle \triangleq \int_0^\infty x(t)y(t) dt$ ,定义内积空间 $H \triangleq \{x \in F \mid \|x\|^2 = \langle x, x \rangle < \infty\}$ 。令 $x_T(t)$ 为 $x$ 的 $T$ 截取,  $x_T(t) = \begin{cases} x(t) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases}$ 。令 $\Gamma \in \mathbf{R}^+$ , 定义 $H$ 空间的扩展 $H_e \triangleq \{x \in F \mid \forall T \in \Gamma, \|x_T\|^2 = \langle x_T, x_T \rangle = \langle x, x \rangle_T < \infty\}$ 。设有算子 $G: H_e \rightarrow H_e$ , 若存在常数 $\vartheta$ 使得 $\langle Gx, x \rangle_T \geq \vartheta, \forall T > 0, \forall x \in H_e$ , 则称 $G$ 是无源的。若存在 $\theta > 0$ 和 $\vartheta$ 使得 $\langle Gx, x \rangle_T \geq \theta \|x_T\|^2 + \vartheta, \forall T > 0, \forall x \in H_e$ , 则称 $G$ 是严格无源的。在普通反馈系统的稳定性分析中,无源性定理具有广泛的应用<sup>[12]</sup>。

考察如图1所示的多路切换控制系统,令闭环回路总输出为 $u_c$ ,开环通路总输出为 $u_o$ ,则系统方程为

$$\begin{cases} u_o = u_r - u_c = u_r - \left( \sum_{i=1}^m h_i H_i \right) e \\ y_r = e + y = e + \left( \sum_{i=1}^m h_i G \right) u_r \\ u_o = \sum_{i=m+1}^n h_i H_i u \end{cases} \quad (4)$$

将无源性概念应用到此系统的稳定性分析中,得到以下定理。

**定理1** 若 $G, H_i: H_e \rightarrow H_e$ ,假设对于 $H$ 空间中的 $u$ 和 $y_r$ 产生在 $H_e$ 的解 $u_r$ 和 $e$ ,若存在常数 $\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varphi, \eta$ 和 $\epsilon_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,使得

$$\left. \begin{aligned} & \| \mathbf{G} \mathbf{x} \|_T \leq \alpha \| \mathbf{x} \|_T + \beta \\ & \langle \mathbf{G} \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle_T \geq \delta \| \mathbf{x} \|_T^2 + \gamma \\ & \langle \mathbf{x}, \left( \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i \right) \mathbf{x} \rangle_T \geq \sum_{i=1}^m h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i \mathbf{x} \|_T^2 + \varphi \\ & \langle \mathbf{x}, \left( \sum_{i=m+1}^n h_i \mathbf{H}_i \right) \mathbf{x} \rangle_T \geq \sum_{i=m+1}^n h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i \mathbf{x} \|_T^2 + \eta \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \forall \mathbf{x} \in H_e \\ & \forall T \in \mathbf{R}^+ \end{aligned} \quad (5)$$

若  $\delta + \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m\} > 0$  且  $\min\{\varepsilon_{m+1}, \varepsilon_{m+2}, \dots, \varepsilon_n\} > 0$ , 则  $u, y_r \in H$ , 那么  $u_r, e, y, u_c \in H$ , 即整个多路切换控制系统 BIBO 稳定。

**证明:** 由式(4)得

$$\begin{aligned} & \langle \mathbf{G} u_r, u_r \rangle_T + \langle e, \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T = \\ & \langle \mathbf{G} u_r, [u_o + \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e] \rangle_T + \\ & \langle [y_r - \mathbf{G} u_r], \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T = \\ & \langle \mathbf{G} u_r, u_o \rangle_T + \langle \mathbf{G} u_r, \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T + \\ & \langle y_r, \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T - \langle \mathbf{G} u_r, \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T = \\ & \langle \mathbf{G} u_r, u_o \rangle_T + \langle y_r, \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)得

$$\begin{aligned} & \delta \| u_r \|_T^2 + \gamma + \sum_{i=1}^m h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i e \|_T^2 + \varphi \leq \\ & \langle \mathbf{G} u_r, u_r \rangle_T + \langle e, \left( \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i \right) e \rangle_T \end{aligned} \quad (7)$$

结合式(6,7)得

$$\begin{aligned} & \langle \mathbf{G} u_r, u_o \rangle_T + \langle y_r, \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \rangle_T \geq \delta \| u_r \|_T^2 + \gamma + \\ & \sum_{i=1}^m h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i e \|_T^2 + \varphi \end{aligned} \quad (8)$$

利用 Schwarz 不等式可得

$$\begin{aligned} & \| u_o \|_T \| \mathbf{G} u_r \|_T + \left\| \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \right\|_T \| y_r \|_T \geq \\ & \delta \| u_r \|_T^2 + \gamma + \sum_{i=1}^m h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i e \|_T^2 + \varphi \end{aligned} \quad (9)$$

由式(5)可得

$$\begin{aligned} & \| u_o \|_T \alpha \| u_r \|_T + \beta \| u_o \|_T + \| y_r \|_T \left\| \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \right\|_T \geq \\ & \delta \| u_r \|_T^2 + \gamma + \sum_{i=1}^m h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i e \|_T^2 + \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

从而

$$\delta \| u_r \|_T^2 + \sum_{i=1}^m h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i e \|_T^2 \leq \| u_o \|_T \alpha \| u_r \|_T +$$

$$\beta \| u_o \|_T + \| y_r \|_T \left\| \left( \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i \right) e \right\|_T - \varphi - \gamma \quad (11)$$

因为  $\sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e = u_r - u_o$ , 所以

$$\left\| \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \right\|_T^2 = \| u_r - u_o \|^2$$

$$\begin{aligned} & \text{即 } \left\| \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e \right\|_T^2 \geq \| u_r \|_T^2 - 2 \| u_r \|_T \| u_o \|_T + \\ & \| u_o \|_T^2 \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(11,12), 考虑到  $u_r = \sum_{i=1}^m h_i \mathbf{H}_i e + u_o$ ,

用  $|\varepsilon_i|$  代替  $\varepsilon_i$ , 可得

$$\begin{aligned} & \delta \| u_r \|_T^2 + \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m\} (\| u_r \|_T^2 - 2 \| u_r \|_T \cdot \\ & \| u_o \|_T + \| u_o \|_T^2) \leq \| u_o \|_T \alpha \| u_r \|_T + \beta \| u_o \|_T + \\ & \| y_r \|_T \| u_r \|_T + \| y_r \|_T \| u_o \|_T - \varphi - \gamma \end{aligned} \quad (13)$$

即  $(\delta + \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m\}) \| u_r \|_T^2 \leq$

$$\begin{aligned} & \| u_r \|_T \left[ \left( \sum_{i=1}^m h_i 2 |\varepsilon_i| + \alpha \right) \| u_o \|_T + \| y_r \|_T \right] + \\ & \| u_o \|_T \| y_r \|_T + \beta \| u_o \|_T + \\ & \sum_{i=1}^m h_i |\varepsilon_i| \| u_o \|_T^2 - \varphi - \gamma \end{aligned} \quad (14)$$

因为  $(\delta + \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m\}) > 0$ , 故式(14)可以转化为如下不等式

$$\| u_r \|_T^2 \leq 2b(T) \| u_r \|_T + c(T) \quad (15)$$

式中  $b(T)$  和  $c(T)$  为  $T$  的递增函数。

由式(5)可得

$$\begin{aligned} & \langle u, \left( \sum_{i=m+1}^n h_i \mathbf{H}_i \right) u \rangle_T \geq \sum_{i=m+1}^n h_i \varepsilon_i \| \mathbf{H}_i u \|_T^2 + \eta \end{aligned} \quad (16)$$

因为  $u_o = \sum_{i=m+1}^n h_i \mathbf{H}_i u$ , 所以

$$\| u \|_T \| u_o \|_T \geq \min\{\varepsilon_{m+1}, \varepsilon_{m+2}, \dots, \varepsilon_n\} \| u_o \|_T^2 + \eta \quad (17)$$

因为  $\min\{\varepsilon_{m+1}, \varepsilon_{m+2}, \dots, \varepsilon_n\} > 0$ , 则若  $u$  有界,  $u_o$  有界。

故由于  $u$  和  $y_r \in H$ , 则  $u_o$  和  $y_r \in H$ , 那么当  $T \rightarrow \infty$  时,  $b(T)$  和  $c(T)$  趋于定值, 假设为  $b$  和  $c$ , 那么式(15)可得

$$\| u_r \|_T \leq b(T) + [b(T)^2 + c(T)]^{1/2} \leq (b^2 + c)^{1/2} + b \quad \forall T \in \mathbf{R}^+ \quad (18)$$

故  $u_r \in H$ 。根据式(5),  $e, y, u_c \in H$ 。

亦即当  $u$  和  $y_r$  输入有界时,  $u_o, u_r, e, y, u_c$  有界, 即多路切换控制系统 BIBO 稳定。证毕。

### 3 仿真分析

本文以某型涡扇发动机非线性部件级模型<sup>[13]</sup>

为被控对象,进行多路切换控制仿真,此模型是用C++语言程序编写的实时模型,具有结构清晰,灵活通用、扩展性强、便于修改的优点,能够有效反映真实发动机的动静态特性和实时性。控制量为燃油流量 $\omega_f$ ,被控制量为高压转子转速 $n_h$ 、涡轮前温度 $T_4$ 等。仿真实现航空发动机在高度 $h=0$  km,马赫数 $Ma=0$ 以及高度 $h=4$  km,马赫数 $Ma=0.5$ 工况下,在加减速开环通路和转速闭环回路以及转速闭环回路和温度闭环回路之间切换。

模糊切换过程中前提变量 $E(t)$ 采用的线性隶属度函数与高斯隶属度函数分别如图2,3所示,图中 $E(t)_s$ 、 $E(t)_e$ 为模糊切换中设计的回路切换开始和结束时刻的前提变量值。

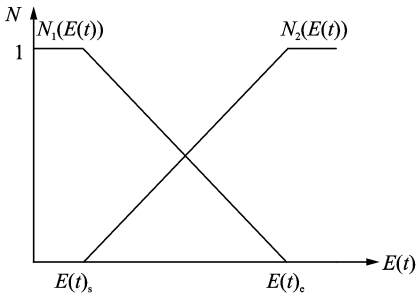


图2 线性隶属度函数

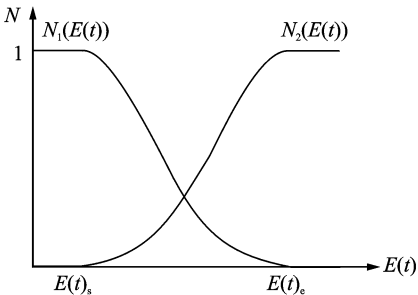


图3 高斯隶属度函数

线性隶属度函数描述如下

$$N_1(E(t)) = \begin{cases} 1 & E(t) < E(t)_s \\ \frac{E(t) - E(t)_e}{E(t)_s - E(t)_e} & E(t)_s \leq E(t) \leq E(t)_e \\ 0 & E(t) > E(t)_e \end{cases} \quad (19)$$

$$N_2(E(t)) = \begin{cases} 0 & E(t) < E(t)_s \\ \frac{E(t) - E(t)_s}{E(t)_e - E(t)_s} & E(t)_s \leq E(t) \leq E(t)_e \\ 1 & E(t) > E(t)_e \end{cases} \quad (20)$$

高斯隶属度函数描述如下

$$N_1(E(t)) = \begin{cases} 1 & E(t) < E(t)_s \\ e^{-(E(t) - E(t)_s)^2 / 2En_1^2} & E(t)_s \leq E(t) \leq E(t)_e \\ 0 & E(t) > E(t)_e \end{cases} \quad (21)$$

$$N_2(E(t)) = \begin{cases} 0 & E(t) < E(t)_s \\ e^{-(E(t) - E(t)_e)^2 / 2En_2^2} & E(t)_s \leq E(t) \leq E(t)_e \\ 1 & E(t) > E(t)_e \end{cases} \quad (22)$$

式中: $E(t)_s$ 、 $E(t)_e$ 和 $En_1$ 、 $En_2$ 分别为两个高斯函数的期望值和标准差,这里 $E(t)_s = E(t)_s$ , $E(t)_e = E(t)_e$ , $En_1 = En_2 = (E(t)_e - E(t)_s) / 3$ 。

### 3.1 加减速开环通路和转速闭环回路之间切换仿真分析

本过程开始是慢车状态,使用加速开环控制通路<sup>[14]</sup>,当加速到目标转速时切换到高压转速闭环控制,达到稳态后使用减速开环控制通路,当减速到目标转速时切换到高压转速闭环控制。本过程的前提变量为发动机高压转速 $n_h$ ,并分别运用直接切换方法和模糊切换方法对这个过程进行仿真,讨论了模糊隶属度函数的选取以及模糊切换起始前提变量位置的不同对模糊切换过程仿真效果的影响。

图4,5为在高度 $h=0$  km,马赫数 $Ma=0$ 工况下加减速开环控制通路与高压转速闭环控制回路直接切换和基于不同隶属度函数模糊切换的仿真结果比较。两种模糊切换过程的切换起始转速位置相同。如图所示,在加速开环到转速闭环切换过程中,直接切换使得发动机的转速发生大幅度跳变,且高压转子转速超调量达到3%,在减速开环到转速闭环切换过程中,直接切换使得发动机燃油量发生大幅度跳变,容易造成贫油熄火,不能满足性能要求。而模糊切换使得发动机性能大幅度改善,基于线性隶属度函数的模糊切换其高压转子转速超调量仅有1%,基于高斯隶属度函数的模糊切换其高压转子转速没有超调,且燃油跳变大幅度改善,满足发动机性能。通过比较基于高斯隶属度函数的模糊切换优于基于线性隶属度函数的模糊切换。

图6,7为在高度 $h=0$  km,马赫数 $Ma=0$ 工况下加减速开环控制通路与高压转速闭环控制回路基于高斯隶属度函数下不同切换起始转速位置的模糊切换过程中仿真结果。如图所示,若模糊切换加速起始位置位于高压转速的75%、减速起始位置位于高压转速的85%,即模糊切换过早,那么两个控制通路也将过早投入到工作中,这样不利于各自

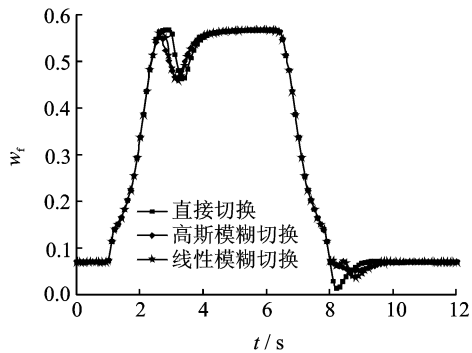


图4  $h=0\text{ km}, Ma=0$  工况直接切换和基于不同隶属度函数模糊切换控制下的主燃油量变化曲线

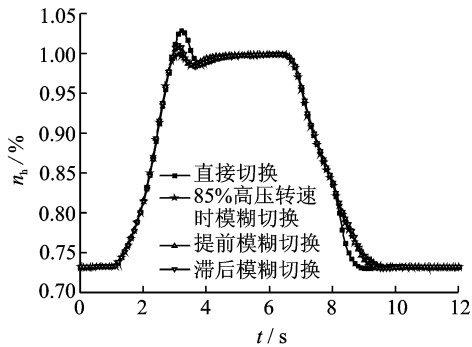


图7  $h=0\text{ km}, Ma=0$  直接切换和基于不同切换起始位置模糊切换控制下的高压转速变化曲线

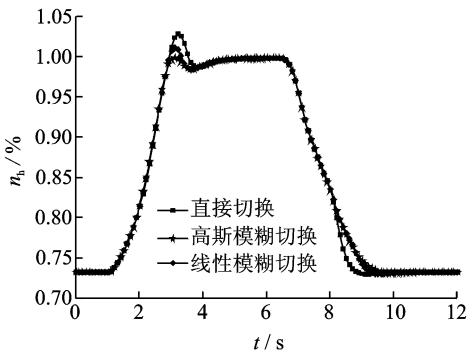


图5  $h=0\text{ km}, Ma=0$  工况直接切换和基于不同隶属度函数模糊切换控制下的高压转速变化曲线

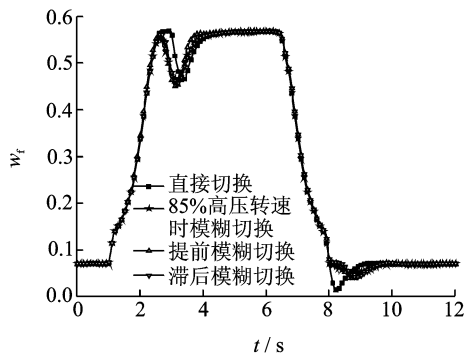


图6  $h=0\text{ km}, Ma=0$  工况直接切换和基于不同切换起始位置模糊切换控制下的主燃油量变化曲线

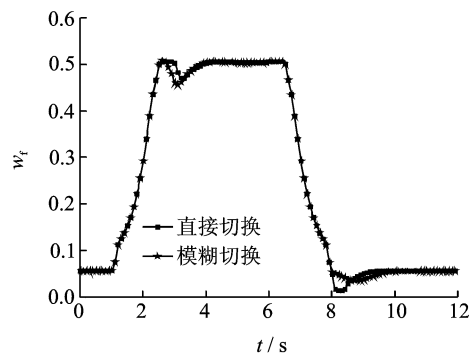


图8  $h=4\text{ km}, Ma=0.5$  工况直接切换和模糊切换控制下的主燃油量变化曲线

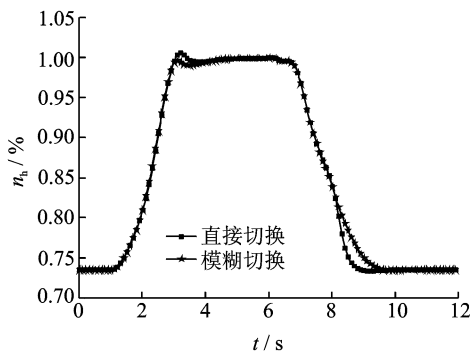


图9  $h=4\text{ km}, Ma=0.5$  工况直接切换和模糊切换控制下的高压转速变化曲线

通路优势的发挥。若模糊切换加速起始位置位于高压转速的92%、减速起始位置位于高压转速的75%，即模糊切换过迟，这样来不及解决直接切换过程中转速超调的问题。通过比较当模糊切换加速减速起始位置均位于高压转速的85%时效果最好，发动机转速无超调，且燃油跳变大幅度改善切换过程平稳过渡，满足发动机性能。

图8,9为高度 $h=4\text{ km}$ ，马赫数 $Ma=0.5$ 工况下加减速开环控制通路与高压转速闭环控制回路直接切换和基于模糊切换的仿真结果比较。采用高

斯隶属度函数，且加减速模糊切换起始位置均位于高压转速的85%。如图所示，本文模糊切换方法同样适用于高空情况，使得发动机转速无超调，且燃油跳变大幅度改善，切换过程平稳过渡，满足发动机性能。

### 3.2 转速闭环回路和温度闭环回路之间切换仿真分析

本过程开始时发动机处于高压转速闭环控制，当转速闭环控制回路发生故障从而无法正常工作，故需切换到其他闭环控制回路(本文选择温度闭环控制回路)。本过程的前提变量为时间 $t$ ，采用

高斯隶属度函数,并以转速闭环控制回路发生故障时间为起始切换位置。分别运用直接切换方法和模糊切换方法对这个过程进行仿真。

图10~12为高度 $h=0\text{ km}$ ,马赫数 $Ma=0$ 工况下转速闭环控制通路温度闭环控制回路直接切换和基于模糊切换的仿真结果比较。如图所示,直接切换使得发动机的供油量与涡轮前温度发生大幅度跳变,容易造成发动机失稳,不能满足性能要求。而模糊切换其燃油量没有发生跳变,使得发动机性能大幅度改善,满足发动机性能。图13~15为高度 $h=4\text{ km}$ ,马赫数 $Ma=0.5$ 工况下转速闭环控

制通路与温度闭环控制回路直接切换和基于模糊切换的仿真结果比较。如图所示,本文模糊切换方法同样适用于高空情况,使得发动机切换过程平稳过渡,满足发动机性能,具有很好的通用性。

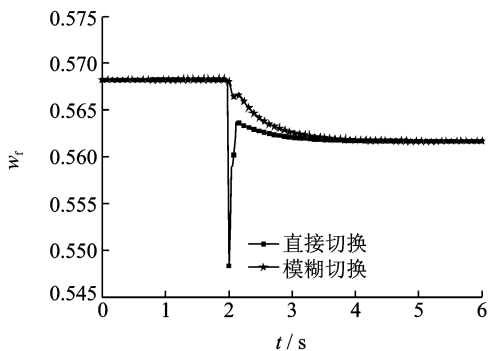


图10  $h=0\text{ km}, Ma=0$  工况直接切换和模糊切换控制下的主燃油量变化曲线

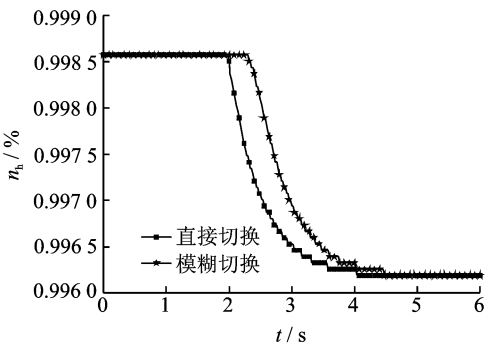


图11  $h=0\text{ km}, Ma=0$  工况直接切换和模糊切换控制下的高压转速变化曲线

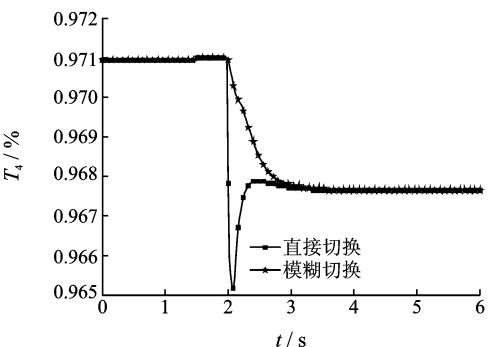


图12  $h=0\text{ km}, Ma=0$  工况直接切换和模糊切换控制下的涡轮前温度变化曲线

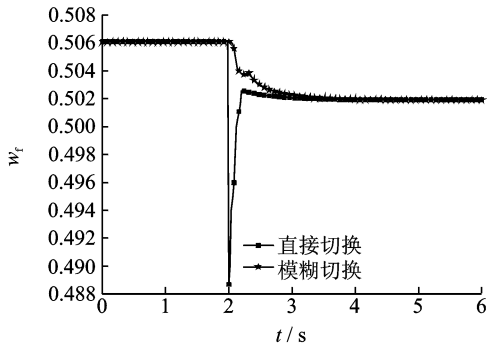


图13  $h=4\text{ km}, Ma=0.5$  工况直接切换和模糊切换控制下的主燃油量变化曲线

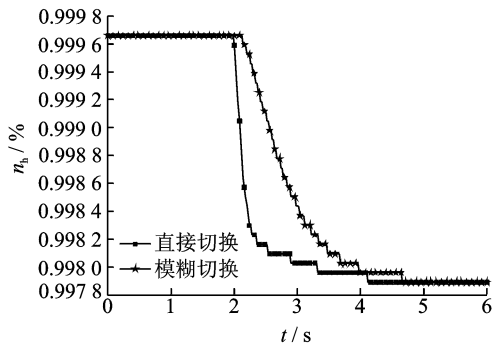


图14  $h=4\text{ km}, Ma=0.5$  工况直接切换和模糊切换控制下的高压转速变化曲线

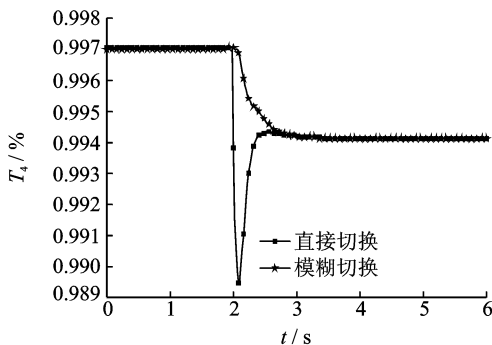


图15  $h=4\text{ km}, Ma=0.5$  工况直接切换和模糊切换控制下的涡轮前温度变化曲线

### 4 结束语

本文针对当前航空发动机不同控制通路切换过程中出现的转速等参数发生大幅度跳变以及系统不稳定问题,提出了一种模糊切换控制方法,设计了基于不同结构控制通路的航空发动机模糊切换控制系统,并将无源性概念应用到切换控制系统的稳定性分

析中去,推导出了切换控制系统稳定的充分条件。仿真结果表明,该方法不仅能够在全包线内使切换过程稳定过渡,保证系统的稳定性,而且还具有良好的动态性能和通用性,具有很好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Boskovic J D, Mehra R K. Multi-mode switching in flight control[C]//Digital Avionics Systems Conferences. Philadelphia: [s. n.], 2000:1-8.
- [2] 王曦,程茵.国外航空推进控制技术的发展[J].航空发动机,2009,35(3):4-7.
- [3] Lennartson B, Tittus M, Egardt B, et al. Hybrid systems in process control [J]. Control Systems Magazine, 1996,16(5):45-56.
- [4] Cassandras C G, Pepyne D L, Wardi Y. Optimal control of a class of hybrid systems[J]. Automatic Control, 2001,46(3):398-415.
- [5] Skafidase E, Evans R J, Savkin A N, et al. Stability results for switched controller system[J]. Automatica, 1999,35(4):553-564.
- [6] Lam H K, Fran H F, Peter K S. A switching controller for uncertain nonlinear systems [J]. IEEE Control System Magazine, 2002,22(1):7-14.
- [7] Chen Songshyong, Chang Yuanchang, Wu Jenqiang, et al. Fuzzy control design for switched nonlinear systems [C]//SICE Annual Conference. Okayama: Eileen Breen, 2008:352-357.
- [8] 于达仁,刘晓锋,隋岩峰.考虑切换特性的航空发动机多回路控制系统设计[J].航空动力学报,2007,22(8):1376-1383.
- [9] 刘晓锋,隋岩峰,何保成,等.涡扇发动机多回路切换系统稳定性分析[J].航空动力学报,2006,21(3):197-201.
- [10] Jia Baozhu, Ren Guang, Long Gang. Design and stability analysis of fuzzy switching PID controller [C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian: [s. n.], 2006:3934-3938.
- [11] 赵延东,于锡纯.模糊PID控制器的稳定性分析[J].控制与决策,2002,17(5):631-634.
- [12] 冯纯伯.应用无源性分析研究时变非线性系统的稳定性[J].自动化学报,1997,23(6):775-781.
- [13] 窦建平,黄金泉,周文祥.基于UML的航空发动机仿真建模研究[J].航空动力学报,2005,8(4):684-688.
- [14] 王旭,梁钧襄.有约束的航空发动机加速最优控制[J].航空学报,1992,13(4):144-150.