

## 近空间飞行器多模型软切换保性能非脆弱控制

王宇飞, 姜长生, 吴庆宪

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对可变机翼后掠角近空间飞行器存在严重非线性、强耦合等特性, 在考虑控制器存在摄动的情况下, 设计了可以平滑切换的多模型软切换保性能非脆弱控制方案. 首先利用可测前提变量将系统的工作空间划分为多个子空间, 然后在每一个子空间中根据给定的性能指标设计局部模糊鲁棒保性能非脆弱控制器. 由于采用了广义系统的设计方法, 有效地减少了求解的计算量和复杂度. 系统的全局控制器由各局部控制器进行模糊加权得到, 从而实现了软切换. 对可变机翼后掠角近空间飞行器的仿真实验表明了所提方法是有效的.

**关键词:** 近空间飞行器; 模糊系统; 软切换; 保性能; 非脆弱; 鲁棒控制

**中图分类号:** V249.1, TP273.4 **文献标识码:** A

## Multi-model soft-switching cost-guaranteed non-fragile control for near-space vehicle

WANG Yu-fei, JIANG Chang-sheng, WU Qing-xian

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** For the near-space vehicle with variable sweep wings, we present a multi-model soft-switching cost-guaranteed non-fragile controller with perturbation gain to tackle the strong nonlinearity and interaction characteristics. According to the observable premise variables, the working space of the controller is divided into multiple subspaces. In each subspace, we design a local robust cost-guaranteed non-fragile fuzzy controller based on the required performance index. Because the descriptor system method is employed in the design, the computation complexity and cost are greatly reduced. The global controller of the system is obtained by fuzzy-weighting the local controllers to realize the soft-switching. Results of simulation experiments to a near-space vehicle validate the robust and the non-fragile performance of the proposed method.

**Key words:** near-space vehicle; fuzzy systems; soft-switching; cost-guaranteed; non-fragile; robust control

### 1 引言(Introduction)

近空间飞行器<sup>[1]</sup>(near space vehicle, NSV)作为争夺制空权的关键武器<sup>[2]</sup>, 具有重大的战略价值, 已经得到世界各军事强国的关注和研究. 其具有极大的飞行包络, 为得到更好的亚声速、超声速和高超声速的飞行性能, 采用伸缩鸭翼和变后掠三角翼的结构.

目前关于高超声速飞行器控制方面的研究已有很多的成果. 如Sigthorsson等考虑当高超声速飞行器存在模型不确定以及部分状态量不可测的情况下, 利用线性输出反馈结合状态观测器实现了轨迹的跟踪控制<sup>[3]</sup>. 文献[4]针对存在不确定的吸气式弹性高超声速飞行器, 利用自适应动态逆方法对速度和高度进行了鲁棒控制. Du等人利用泛函连接神经网络在线逼近系统的不确定和外干扰, 结合预测控制实现了NSV的姿态跟踪控制<sup>[5-6]</sup>. 文献[7]利用滑模干扰补偿器与标称广义预测控制相结合来抵消高

超声速飞行器的复合干扰, 从而保证其在飞行过程中具有很好的鲁棒性能. 上述这些方法中飞行器运动特性均用单一的模型来表示. 本文中, 由于NSV的飞行环境复杂, 且在飞行过程中存在结构的变化, 采用单一的模型已无法很好地描述NSV的飞行动态, 因此考虑多模型控制方法.

20世纪70年代Lainiotis和Athans等人提出的多模型方法<sup>[8-11]</sup>现已成为处理复杂系统的一种有效方法<sup>[12]</sup>. 在多模型控制中, 一般有硬切换和软切换两种切换控制方法. 目前常用的是硬切换控制, 此方法设计直接, 但是控制器在切换过程中会存在过渡动态, 影响系统的性能; 而软切换一般是采用加权策略将各子控制器进行线性组合作为控制输出, 系统状态在切换过程中比较平滑<sup>[13-14]</sup>. 由于NSV在飞行过程中对稳定性和控制精度有很高的要求, 采用硬切换易产生切换时的动态响应, 不利于飞行安全, 因而本文考虑采用软切换的控制方式.

通常鲁棒控制器能够克服系统的不确定性和外干扰的影响,但是对于控制器本身的参数摄动却非常敏感,会影响到系统的控制性能,因此近年来非脆弱控制的研究受到广泛关注,也取得了一系列成果<sup>[15-18]</sup>.

本文根据可测前提变量将系统工作空间划分为若干个模糊子区域,根据T-S模糊理论在每一个子区域中建立局部模型,考虑当控制器存在摄动的情况下,根据性能指标设计局部鲁棒保性能非脆弱控制器.由于模糊规则数较多,在控制器的求解过程中,若按照传统的模糊控制方法,则需求解的线性矩阵不等式数目将随着模糊规则数的增加急剧“膨胀”.而本文采用了广义系统的方法,使得控制器求解的复杂度和计算量大大降低.由于控制器的切换发生在模糊子区域的边界上,系统的控制器由各局部控制器按照模糊加权得到,从而实现了软切换.最后通过对变机翼NSV的非脆弱软切换控制验证了本文算法的有效性.

## 2 问题描述(Problem statement)

变机翼后掠角NSV的气动外形如图1所示.则NSV飞行仿真模型为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\Omega} = f_s + g_{s1}\omega + \Delta_s + g_{s2}d_s, \\ y_s = \Omega, \\ \dot{\omega} = f_f + g_{f1}M + \Delta_f + g_{f2}d_f, \\ y_f = \omega. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\Omega = [\alpha \ \beta \ \mu]^T$ ,  $\omega = [p \ q \ r]^T$  分别表示姿态角和姿态角速度向量,分别为系统的慢变量和快变量;  $f_s, f_f \in \mathbb{R}^3$ ,  $g_{s1}, g_{s2}, g_{f1}, g_{f2} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  且与NSV的结构有关;  $\Delta_s, d_s, \Delta_f$  和  $d_f$  分别为姿态角回路和姿态角速度回路具有的不确定和所受到的外界干扰;  $M$  为作动器 $\delta$ 偏转产生的控制力矩;  $\delta = [\delta_e \ \delta_a \ \delta_r]^T$ , 分别为左、右升降副翼舵和方向副翼舵.

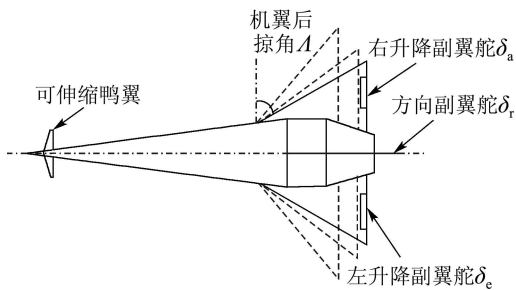


图1 NSV气动模型

Fig. 1 NSV aerodynamic model

针对上述NSV的飞行运动方程,不失一般性,考虑如下形式的系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) + \\ \Delta(x) + g_\eta(x(t))\eta(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^p$ ,  $y(t) \in \mathbb{R}^q$ ,  $\Delta(x) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\eta(t) \in \mathbb{R}^p$  分别为系统的状态、输入、输出、不确定及外部干扰,  $f(x) \in \mathbb{R}^n$ ,  $g(x) \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $g_\eta(x) \in \mathbb{R}^{n \times p}$  为连续光滑函数,矩阵  $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$  为常数矩阵.

对于系统(2),根据系统的可测前提变量将其工作空间划分为多个子区域,如本文的NSV系统中,可将机翼后掠角作为前提变量来划分区域,各子区域满足如下关系:

$$\begin{cases} \Omega_1 \cup \dots \cup \Omega_s = X, \Omega_i \cap \Omega_{i+1} \neq \emptyset, \\ i = 1, \dots, s-1, \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $X$  表示系统的工作空间,  $\Omega_i$  为划分的第  $i$  个子区域,  $s$  为所有子区域的数目.可以看出,划分的区域中相邻区域是相交的,即对相邻区域的边界进行了模糊化处理.局部控制器在模糊子区域的边界上进行切换,系统的控制器是由各局部控制器按照模糊加权得到,从而实现了控制器的软切换.

与一般模糊控制不同的是,多模型模糊软切换控制还具有进行区域切换的监督级.其整体模型为

监督级规则  $\tau$ :

IF  $z_1(t)$  is  $M_{\tau 1}$  and  $\dots$  and  $z_p(t)$  is  $M_{\tau p}$ , THEN

局部模糊规则  $i$ :

IF  $\bar{z}_1(t)$  is  $N_{\tau i 1}$  and  $\dots$  and  $\bar{z}_q(t)$  is  $N_{\tau i q}$ , THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A_{\tau i} + \Delta A_{\tau i})x(t) + \\ &\quad (B_{\tau i} + \Delta B_{\tau i})u(t) + \Phi_{\tau i}\eta(t), \end{aligned}$$

$$y(t) = Cx(t), \tau = 1, \dots, s, i = 1, \dots, r.$$

其中:  $z_k(t)$  ( $k = 1, \dots, p$ ) 和  $\bar{z}_m(t)$  ( $m = 1, \dots, q$ ) 为模糊前提变量,  $M_{\tau k}$  ( $k = 1, \dots, p$ ) 和  $N_{\tau im}$  ( $m = 1, \dots, q$ ) 表示模糊集合,  $s$  和  $r$  分别为所划分的子区域数目和局部模糊规则数,  $A_{\tau i}, B_{\tau i}, \Phi_{\tau i}$  为线性参数矩阵,  $[\Delta A_{\tau i} \ \Delta B_{\tau i}] \triangleq U_{\tau i} F_{\tau i}(t) [E_{1\tau i} \ E_{2\tau i}]$  为不确定参数矩阵,  $U_{\tau i}, E_{1\tau i}$  和  $E_{2\tau i}$  为常数矩阵,  $F_{\tau i}(t)$  为时变矩阵,且满足  $F_{\tau i}^T(t) F_{\tau i}(t) \leq I$ . 记  $\bar{A}_{\tau i} = A_{\tau i} + \Delta A_{\tau i}$ ,  $\bar{B}_{\tau i} = B_{\tau i} + \Delta B_{\tau i}$ .

则系统模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau(z(t)) h_{\tau i}(\bar{z}(t)) [\bar{A}_{\tau i} x(t) + \\ \bar{B}_{\tau i} u(t) + \Phi_{\tau i} \eta(t)], \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$h_\tau(z(t)) = \prod_{k=1}^p M_{\tau k}(z_k(t)) / \sum_{\tau=1}^s \prod_{k=1}^p M_{\tau k}(z_k(t)),$$

且

$$h_\tau(z(t)) \geq 0, \sum_{\tau=1}^s h_\tau(z(t)) = 1,$$

$$h_{\tau i}(\bar{z}(t)) = \prod_{k=1}^q N_{\tau ik}(\bar{z}_k(t)) / \prod_{i=1}^r \prod_{k=1}^q N_{\tau ik}(\bar{z}_k(t)),$$

且

$$h_{\tau i}(\bar{z}(t)) \geq 0, \sum_{i=1}^r h_{\tau i}(\bar{z}(t)) = 1,$$

$M_{\tau k}(z_k(t))$ 和 $N_{\tau ik}(\bar{z}_k(t))$ 分别表示模糊集合 $M_{\tau k}$ 和 $N_{\tau ik}$ 的隶属度函数. 简便起见, 用 $x, h_{\tau}, h_{\tau i}, u, \eta, y$ 分别表示 $x(t), h_{\tau}(z(t)), h_{\tau i}(\bar{z}(t)), u(t), \eta(t), y(t)$ .

针对系统(4), 考虑控制器存在摄动时, 按照并行分配补偿原则设计控制器, 控制规则如下:

监督级规则 $\tau$ :

IF  $z_1(t)$  is  $M_{\tau 1}$  and  $\dots$  and  $z_p(t)$  is  $M_{\tau p}$ , THEN

局部模糊规则 $i$ :

IF  $\bar{z}_1(t)$  is  $N_{\tau i 1}$  and  $\dots$  and  $\bar{z}_q(t)$  is  $N_{\tau i q}$ , THEN

$$u_{\tau i}(t) = (K_{\tau i} + \Delta K_{\tau i})x(t),$$

$$\tau = 1, \dots, s, i = 1, \dots, r.$$

其中:  $K_{\tau i}$ 为局部控制增益矩阵, 不确定参数矩阵 $\Delta K_{\tau i} \triangleq U_{K_{\tau i}} F_{K_{\tau i}}(t) E_{K_{\tau i}}$ ,  $U_{K_{\tau i}}$ 和 $E_{K_{\tau i}}$ 为常数矩阵,  $F_{K_{\tau i}}(t)$ 为时变矩阵且满足 $F_{K_{\tau i}}^T(t) F_{K_{\tau i}}(t) \leq I$ . 则区域 $\tau$ 内的局部控制器可表示为 $u_{\tau} = \sum_{i=1}^r h_{\tau i} u_{\tau i}$ .

记 $\bar{K}_{\tau i} = K_{\tau i} + \Delta K_{\tau i}$ , 则系统控制器可表示为

$$u = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_{\tau} h_{\tau i} \bar{K}_{\tau i} x. \quad (5)$$

### 3 鲁棒保性能非脆弱控制器设计(Robust cost-guaranteed non-fragile controller design)

针对系统(4), 定义如下性能指标:

$$J_c = \int_0^{\infty} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt, \quad (6)$$

其中 $Q, R$ 为给定的对称正定实矩阵.

为了减少需求解的矩阵不等式数目, 考虑采用广义系统的方法. 将式(5)等价变换为

$$0 \cdot \dot{u} = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_{\tau} h_{\tau i} (u - \bar{K}_{\tau i} x), \quad (7)$$

则原模糊系统可化为

监督级规则 $\tau$ :

IF  $z_1(t)$  is  $M_{\tau 1}$  and  $\dots$  and  $z_p(t)$  is  $M_{\tau p}$ , THEN

局部模糊规则 $i$ :

IF  $\bar{z}_1(t)$  is  $N_{\tau i 1}$  and  $\dots$  and  $\bar{z}_q(t)$  is  $N_{\tau i q}$ , THEN

$$E \dot{\bar{x}} = \bar{G}_{\tau i} \bar{x} + \bar{\Phi}_{\tau i} \eta,$$

$$y = \bar{C} \bar{x}, \tau = 1, \dots, s, i = 1, \dots, r,$$

其中:

$$E = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{G}_{\tau i} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{\tau i} & \bar{B}_{\tau i} \\ \bar{K}_{\tau i} & -I \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_{\tau i} = [\bar{\Phi}_{\tau i}^T \ 0]^T, \bar{C} = [C \ 0], \bar{x} = [x^T \ u^T]^T.$$

则系统(4)可化为

$$\begin{cases} E \dot{\bar{x}} = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_{\tau} h_{\tau i} (\bar{G}_{\tau i} \bar{x} + \bar{\Phi}_{\tau i} \eta), \\ y = \bar{C} \bar{x}. \end{cases} \quad (8)$$

与传统模糊控制相比, 含控制矩阵的系统(8)中各矩阵的下标均相同. 则性能指标(6)相应地可化为

$$J_c = \int_0^{\infty} [\bar{x}^T(t) H \bar{x}(t)] dt, \quad (9)$$

$$\text{其中 } H = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}.$$

考虑系统受到干扰影响, 给出如下假设:

**假设 1** 干扰 $\eta(t)$ 有界, 且满足 $\eta(t)^T \eta(t) \leq x^T(t) D^T D x(t)$ , 其中 $D$ 为常数矩阵.

考虑性能指标(6)和 $H_{\infty}$ 控制, 有如下定理成立.

**定理 1** 对于 $\tau = 1, \dots, s, i = 1, \dots, r$ , 根据性能指标(6)以及给定的 $H_{\infty}$ 性能指标 $\rho > 0$ , 如果对所有满足 $F_{\tau i}^T(t) F_{\tau i}(t) \leq I$ 和 $F_{K_{\tau i}}^T(t) F_{K_{\tau i}}(t) \leq I$ 的 $F_{\tau i}(t)$ 和 $F_{K_{\tau i}}(t)$ , 存在满足约束条件(10)的可逆实矩阵 $P$ 、标量 $\lambda > 0$ , 使得不等式(11)–(12)成立:

$$E^T P = P^T E \geq 0, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{G}_{\tau i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau i} + \bar{C}^T \bar{C} & P^T \bar{\Phi}_{\tau i} \\ \bar{\Phi}_{\tau i}^T P & -\rho^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{G}_{\tau i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau i} + H + \lambda \bar{D}^T \bar{D} & P^T \bar{\Phi}_{\tau i} \\ \bar{\Phi}_{\tau i}^T P & -\lambda I \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

其中:

$$\bar{D} = [D \ 0], P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ P_2 & P_3 \end{bmatrix},$$

则 $u = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_{\tau} h_{\tau i} \bar{K}_{\tau i} x$ 为闭环系统(4)渐近稳定的 $H_{\infty}$ 模糊保性能非脆弱控制律, 系统性能上界为 $J_c^* = x_0^T P_1 x_0$ .

**证** i) 针对式(11), 若存在满足不等式(10)的可逆实矩阵 $P$ , 则有

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{G}_{\tau i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau i} + \bar{C}^T \bar{C} & P^T \bar{\Phi}_{\tau i} \\ \bar{\Phi}_{\tau i}^T P & -\rho^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix} \leq 0. \quad (13)$$

整理可得

$$\begin{aligned} & \bar{x}^T [\bar{G}_{\tau i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau i} + \bar{C}^T \bar{C}] \bar{x} + \\ & \bar{x}^T P^T \bar{\Phi}_{\tau i} \eta^T + \eta^T \bar{\Phi}_{\tau i}^T P \bar{x} - \rho^2 \eta^T \eta \leq 0, \end{aligned} \quad (14)$$

则有下式成立:

$$\begin{aligned} & \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_{\tau} h_{\tau i} \{ \bar{x}^T [\bar{G}_{\tau i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau i} + \bar{C}^T \bar{C}] \bar{x} + \\ & \bar{x}^T P^T \bar{\Phi}_{\tau i} \eta^T + \eta^T \bar{\Phi}_{\tau i}^T P \bar{x} - \rho^2 \eta^T \eta \} \leq 0. \end{aligned} \quad (15)$$

定义系统的Lyapunov函数 $V(x) = \bar{x}^T E^T P \bar{x}$ , 则根据式(10), 对其求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{\bar{x}}^T E^T P \bar{x} + \bar{x}^T E^T P \dot{\bar{x}} = \\ & \dot{\bar{x}}^T E^T P \bar{x} + \bar{x}^T P^T E \dot{\bar{x}} = \\ & \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_{\tau} h_{\tau i} \{ \bar{x}^T [\bar{G}_{\tau i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau i}] \bar{x} + \end{aligned}$$

$$\bar{x}^T P^T \bar{\Phi}_{\tau_i} \eta^T + \eta^T \bar{\Phi}_{\tau_i}^T P \bar{x}\}. \quad (16)$$

由式(15), 上式可整理为

$$\dot{V}(x) + y^T y - \rho^2 \eta^T \eta \leq 0. \quad (17)$$

若考虑  $x(0) = 0$ , 对式(17)从0到  $t_f$  积分, 可得

$$V(x(t_f)) + \int_0^{t_f} (y^T y - \rho^2 \eta^T \eta) dt \leq 0, \quad (18)$$

又  $V(x(t_f)) \geq 0$ , 则由式(18)可得

$$\|y\|_2 / \|\eta\|_2 \leq \rho. \quad (19)$$

定义系统的  $L_2$  增益为  $\|T_{y\eta}(s)\|_\infty = \sup_{\|\eta\|_2 \neq 0} \|y\|_2 / \|\eta\|_2$ , 则可得系统的  $L_2$  增益不大于  $\rho$ .

由式(11)结合Schur补定理及矩阵Riccati方程易知系闭环系统是渐近稳定的.

ii) 假设存在可逆实矩阵  $P$  及标量  $\lambda > 0$  满足不等式(12), 则

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{G}_{\tau_i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau_i} + H + \lambda \bar{D}^T \bar{D} & P^T \bar{\Phi}_{\tau_i} \\ \bar{\Phi}_{\tau_i}^T P & -\lambda I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix} \leq 0. \quad (20)$$

式(20)等价于

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{G}_{\tau_i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau_i} + H & P^T \bar{\Phi}_{\tau_i} \\ \bar{\Phi}_{\tau_i}^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda \bar{D}^T \bar{D} & 0 \\ 0 & -\lambda I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \eta \end{bmatrix} \leq 0. \quad (21)$$

由假设1, 整理得到

$$\begin{aligned} & \bar{x}^T [\bar{G}_{\tau_i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau_i} + H] \bar{x} + \\ & \bar{x}^T P^T \bar{\Phi}_{\tau_i} \eta + \eta^T \bar{\Phi}_{\tau_i}^T P \bar{x} \leq 0, \end{aligned} \quad (22)$$

即

$$\sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau_i} \{ \bar{x}^T [\bar{G}_{\tau_i}^T P + P^T \bar{G}_{\tau_i}] \bar{x} + \bar{x}^T P^T \bar{\Phi}_{\tau_i} \eta^T + \eta^T \bar{\Phi}_{\tau_i}^T P \bar{x} \} \leq - \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau_i} \bar{x}^T H \bar{x}. \quad (23)$$

根据式(16), 上式可化为

$$\dot{V}(x) \leq - \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau_i} \bar{x}^T H \bar{x}. \quad (24)$$

由此可知, 当  $x \neq 0$  时,  $\dot{V}(x) < 0$ , 即闭环系统渐近稳定. 将式(24)从  $t = 0$  到  $t = \infty$  积分, 得

$$\int_0^\infty \dot{V}(x) dt \leq -J_c, \quad (25)$$

即有

$$\int_0^\infty \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau_i} \bar{x}^T H \bar{x} dt \leq V(x(0)) = J_c^*, \quad (26)$$

即闭环系统性能指标的上界为  $J_c^* = x_0^T P_1 x_0$ .

当式(11)–(12)都成立时, 闭环系统渐近稳定,  $u = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau_i} \bar{K}_{\tau_i} x$  为系统的  $H_\infty$  保性能非脆弱控制律. 证毕.

当设计控制器时, 可根据实际的控制要求和目标来选择定理1中的部分或全部不等式.

为便于求解, 需将定理1中的不等式化为线性矩阵不等式. 为此, 给出如下引理和定理.

**引理 1** 给定适当维数的实矩阵  $G, U$  和  $E$ , 其中  $G$  是对称的, 则对所有满足  $F^T F \leq I$  的实矩阵  $F, G + UFE + E^T F^T U^T < 0$  成立, 当且仅当存在常数  $\varepsilon > 0$ , 使得  $G + \varepsilon U U^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0$ .

**定理 2** 对于  $\tau = 1, \dots, s, i = 1, \dots, r$ , 根据性能指标(6)以及给定的  $H_\infty$  性能指标  $\rho > 0$ , 如果对所有满足  $F_{\tau_i}^T(t) F_{\tau_i}(t) \leq I$  和  $F_{K\tau_i}^T(t) F_{K\tau_i}(t) \leq I$  的  $F_{\tau_i}(t)$  和  $F_{K\tau_i}(t)$ , 存在可逆实矩阵  $V$ 、实矩阵  $W_{\tau_i}$ , 标量  $\varepsilon > 0, \sigma > 0$ , 使得不等式(27)–(28)成立:

$$\begin{bmatrix} S_1 & * & * & * & * \\ W_{\tau_i} - V_2 + V_3^T B_{\tau_i}^T & S_2 & * & * & * \\ CV_1 & 0 & -\varepsilon I & * & * \\ E_{1\tau_i} V_1 + E_{2\tau_i} V_2 & E_{2\tau_i} V_3 & 0 & -I & * \\ E_{K\tau_i} V_1 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} S_3 & * & * \\ W_{\tau_i} - V_2 + V_3^T B_{\tau_i}^T & S_2 & * \\ DV_1 & 0 & -\sigma I \\ V_1 & 0 & 0 \\ V_2 & V_3 & 0 \\ E_{1\tau_i} V_1 + E_{2\tau_i} V_2 & E_{2\tau_i} V_3 & 0 \\ E_{K\tau_i} V_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ -\varepsilon Q^{-1} & * & * & * \\ 0 & -\varepsilon R^{-1} & * & * \\ 0 & 0 & -I & * \\ 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (28)$$

其中:

$$S_1 = A_{\tau_i} V_1 + V_1^T A_{\tau_i}^T + B_{\tau_i} V_2 + V_2^T B_{\tau_i}^T + \varepsilon \rho^{-2} \bar{\Phi}_{\tau_i} \bar{\Phi}_{\tau_i}^T + U_{\tau_i} U_{\tau_i}^T,$$

$$S_2 = -(V_3 + V_3^T) + U_{K\tau_i} U_{K\tau_i}^T,$$

$$S_3 = A_{\tau_i} V_1 + V_1^T A_{\tau_i}^T + B_{\tau_i} V_2 + V_2^T B_{\tau_i}^T + \sigma \bar{\Phi}_{\tau_i} \bar{\Phi}_{\tau_i}^T + U_{\tau_i} U_{\tau_i}^T,$$

$$V = \begin{bmatrix} V_1 & 0 \\ V_2 & V_3 \end{bmatrix},$$

则  $u = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau_i} \bar{K}_{\tau_i} x$  为闭环系统(4)渐近稳定的  $H_\infty$  模糊保性能非脆弱控制律,  $K_{\tau_i} = W_{\tau_i} V_1^{-1}$ , 系统性能上界是  $J_c^* = x_0^T (\varepsilon V_1^{-1}) x_0$ , 其中“\*”表示矩阵

中对称位置矩阵的转置矩阵.

证 i) 对式(11)两边分别左乘 $\text{diag}\{(P^{-1})^T, I\}$ 和右乘 $\text{diag}\{P^{-1}, I\}$ , 并记 $X = P^{-1}$ , 根据Schur补性质, 有

$$\begin{bmatrix} X^T \bar{G}_{\tau i}^T + \bar{G}_{\tau i} X + \rho^{-2} \bar{\Phi}_{\tau i} \bar{\Phi}_{\tau i}^T & X^T \bar{C}^T \\ \bar{C} X & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (29)$$

又

$$\bar{G}_{\tau i} = G_{\tau i} + \Delta G_{\tau i} = G_{\tau i} + \bar{U}_{\tau i} \bar{F}_{\tau i} \bar{E}_{\tau i}, \quad (30)$$

其中:

$$G_{\tau i} = \begin{bmatrix} A_{\tau i} & B_{\tau i} \\ K_{\tau i} & -I \end{bmatrix}, \quad \bar{U}_{\tau i} = \begin{bmatrix} U_{\tau i} & 0 \\ 0 & U_{K\tau i} \end{bmatrix},$$

$$\bar{F}_{\tau i} = \begin{bmatrix} F_{\tau i} & 0 \\ 0 & F_{K\tau i} \end{bmatrix}, \quad \bar{E}_{\tau i} = \begin{bmatrix} E_{1\tau i} & E_{2\tau i} \\ E_{K\tau i} & 0 \end{bmatrix}.$$

由引理1可知, 当存在常数 $\varepsilon > 0$ 时, 式(29)可化为

$$\begin{bmatrix} X^T \bar{G}_{\tau i}^T + \bar{G}_{\tau i} X + \rho^{-2} \bar{\Phi}_{\tau i} \bar{\Phi}_{\tau i}^T & X^T \bar{C}^T \\ \bar{C} X & -I \end{bmatrix} + \varepsilon^{-1} \begin{bmatrix} \bar{U}_{\tau i} \\ 0 \end{bmatrix} [\bar{U}_{\tau i}^T \ 0] + \varepsilon \begin{bmatrix} X^T \bar{E}_{\tau i}^T \\ 0 \end{bmatrix} [\bar{E}_{\tau i} X \ 0] < 0. \quad (31)$$

将上式进行整理, 两边同乘 $\varepsilon$ , 并记 $V = \varepsilon X$ , 有

$$\begin{bmatrix} V^T \bar{G}_{\tau i}^T + \bar{G}_{\tau i} V + \varepsilon \rho^{-2} \bar{\Phi}_{\tau i} \bar{\Phi}_{\tau i}^T + \bar{U}_{\tau i} \bar{U}_{\tau i}^T & & \\ & \bar{C} V & \\ & \bar{E}_{\tau i} V & \\ V^T \bar{C}^T & V^T \bar{E}_{\tau i}^T & \\ -\varepsilon I & 0 & \\ 0 & -I & \end{bmatrix} < 0. \quad (32)$$

将 $V$ ,  $\bar{\Phi}_{\tau i}$ ,  $\bar{U}_{\tau i}$ ,  $\bar{E}_{\tau i}$ 代入上式, 即可得式(27)成立, 其中 $W_{\tau i} = K_{\tau i} V_1$ . 由定理1可知, 当式(27)成立时, 闭环系统渐近稳定且满足 $H_\infty$ 性能指标.

ii) 与i)中过程类似, 对式(12)两边分别左乘 $\text{diag}\{(P^{-1})^T, I\}$ 和右乘 $\text{diag}\{P^{-1}, I\}$ , 记 $X = P^{-1}$ ,  $V = \varepsilon X$ ,  $\sigma = \varepsilon \lambda^{-1}$ , 其中 $\varepsilon$ 为标量, 根据Schur补性质和引理1, 即可得式(28)成立, 其中 $W_{\tau i} = K_{\tau i} V_1$ . 由定理1可知, 当式(28)成立时, 闭环系统渐近稳定且满足性能指标要求, 其性能上界是 $J_c^* = x_0^T (\varepsilon V_1^{-1}) x_0$ .

可见式(27)–(28)分别为式(11)–(12)的线性矩阵不等式形式. 由式(27)–(28)可解得控制增益 $K_{\tau i} = W_{\tau i} V_1^{-1}$ , 此时 $u = \sum_{\tau=1}^s \sum_{i=1}^r h_\tau h_{\tau i} \bar{K}_{\tau i} x$ 为闭环系统的 $H_\infty$ 保性能非脆弱控制律. 证毕.

通过以上的分析可以得知, 若按照传统的模糊控制求解方法则至少需求解 $sr(sr+1)$ 个矩阵不等式, 当模糊规则数增加时, 计算量将会急剧增大, 从而产

生计算“膨胀”. 而采用本文中的广义系统方法只需求解 $2sr$ 个矩阵不等式, 大大减少了需求解的不等式数目, 有效地降低了求解的复杂度和计算量.

#### 4 仿真验证(Simulation results)

本文考虑NSV机翼后掠角 $\Lambda$ 从 $60^\circ$ 增大至 $75^\circ$ 时的姿态控制. 将NSV的工作空间根据机翼后掠角划分区域, 其中: 机翼后掠角 $\Lambda \approx 60^\circ$ 时为区域1, 机翼后掠角 $\Lambda \approx 67^\circ$ 时为区域2, 机翼后掠角 $\Lambda \approx 75^\circ$ 时为区域3, 相邻区域中间的为过渡区域, 如图2所示.

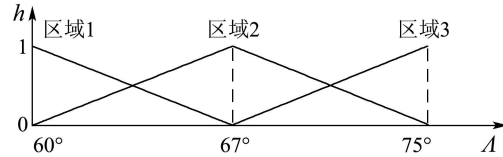


图2 区域划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of region division

则根据所划分的区域, 对NSV的姿态系统进行模糊建模. 其中NSV快回路的模糊模型为:

1) 在区域1中, 高度 $H \approx 35$  km, 速度 $V \approx 2.0$  km/s,  $\alpha \approx 0^\circ$ 和 $\beta \approx 0^\circ$ , 其模糊规则分别为:

**规则1** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[-0.5 \ -0.5 \ -0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f11} + \Delta A_{f11})x + (B_{f11} + \Delta B_{f11})u_f + \Phi_{f11}d_f$ ;

**规则2** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[-0.5 \ -0.5 \ 0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f12} + \Delta A_{f12})x + (B_{f12} + \Delta B_{f12})u_f + \Phi_{f12}d_f$ ;

**规则3** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[-0.5 \ 0.5 \ -0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f13} + \Delta A_{f13})x + (B_{f13} + \Delta B_{f13})u_f + \Phi_{f13}d_f$ ;

**规则4** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[-0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f14} + \Delta A_{f14})x + (B_{f14} + \Delta B_{f14})u_f + \Phi_{f14}d_f$ ;

**规则5** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[0.5 \ -0.5 \ -0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f15} + \Delta A_{f15})x + (B_{f15} + \Delta B_{f15})u_f + \Phi_{f15}d_f$ ;

**规则6** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[0.5 \ -0.5 \ 0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f16} + \Delta A_{f16})x + (B_{f16} + \Delta B_{f16})u_f + \Phi_{f16}d_f$ ;

**规则7** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[0.5 \ 0.5 \ -0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f17} + \Delta A_{f17})x + (B_{f17} + \Delta B_{f17})u_f + \Phi_{f17}d_f$ ;

**规则8** 若 $[p \ q \ r]^T$ 约为 $[0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T$  rad/s, 则 $\dot{x} = (A_{f18} + \Delta A_{f18})x + (B_{f18} + \Delta B_{f18})u_f + \Phi_{f18}d_f$ .

2) 在区域2和区域3中,  $H \approx 35$  km,  $V$ 分别为2.1 km/s和2.2 km/s,  $\alpha \approx 0^\circ$ 和 $\beta \approx 0^\circ$ , 模糊规则的选取类似于区域1中的选取, 此处不再赘述.

类似地, 慢回路的模糊模型为:

1) 在区域1中,  $H \approx 35$  km,  $V \approx 2.0$  km/s, 其模糊规则分别为:

**规则1** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[-10^\circ \ -5^\circ \ -10^\circ]^T$ , 则 $\dot{x} = (A_{s11} + \Delta A_{s11})x + (B_{s11} + \Delta B_{s11})u_s + \Phi_{s11}d_s$ ;

**规则2** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[-10^\circ \ -5^\circ \ 10^\circ]^T$ , 则 $\dot{x} = (A_{s12} + \Delta A_{s12})x + (B_{s12} + \Delta B_{s12})u_s + \Phi_{s12}d_s$ ;

**规则3** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[-10^\circ \ 5^\circ \ -10^\circ]^T$ , 则  
 $\dot{x} = (A_{s13} + \Delta A_{s13})x + (B_{s13} + \Delta B_{s13})u_s + \Phi_{s13}d_s$ ;

**规则4** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[-10^\circ \ 5^\circ \ 10^\circ]^T$ , 则  
 $\dot{x} = (A_{s14} + \Delta A_{s14})x + (B_{s14} + \Delta B_{s14})u_s + \Phi_{s14}d_s$ ;

**规则5** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[10^\circ \ -5^\circ \ -10^\circ]^T$ , 则  
 $\dot{x} = (A_{s15} + \Delta A_{s15})x + (B_{s15} + \Delta B_{s15})u_s + \Phi_{s15}d_s$ ;

**规则6** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[10^\circ \ -5^\circ \ 10^\circ]^T$ , 则  
 $\dot{x} = (A_{s16} + \Delta A_{s16})x + (B_{s16} + \Delta B_{s16})u_s + \Phi_{s16}d_s$ ;

**规则7** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[10^\circ \ 5^\circ \ -10^\circ]^T$ , 则  
 $\dot{x} = (A_{s17} + \Delta A_{s17})x + (B_{s17} + \Delta B_{s17})u_s + \Phi_{s17}d_s$ ;

**规则8** 若 $[\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 约为 $[10^\circ \ 5^\circ \ 10^\circ]^T$ , 则  
 $\dot{x} = (A_{s18} + \Delta A_{s18})x + (B_{s18} + \Delta B_{s18})u_s + \Phi_{s18}d_s$ .

2) 在区域2和区域3中,  $H \approx 35$  km,  $V$ 分别为2.1 km/s和2.2 km/s, 模糊规则的选取类似于区域1中的选取, 略.

NSV初始状态为 $\Lambda = 60^\circ$ ,  $H = 35$  km,  $V = 2.0$  km/s; 姿态角为 $\alpha = 3^\circ$ ,  $\beta = -1^\circ$ ,  $\mu = 2^\circ$ , 推力 $T = 210$  kN; 角速率为 $p = q = r = 2$  ( $^\circ$ )/s. 假设NSV在 $t = 2$  s时开始变形,  $t = 12$  s时完成变形, 此时 $\Lambda =$

75°. 同时考虑气动参数存在30%的不确定, 且 $p, q, r$ 通道受到 $[2.0 \times 10^5 \cos(3t), 5.0 \times 10^5 \cos(2t), 4.0 \times 10^5 \cos(2t)]^T$  N·m的力矩干扰.

快回路中, 取 $Q_f = I_3, R_f = 0.001 \times I_3, \Delta A_f = 0.3A_f, \Delta B_f = 0.5B_f, \rho_f = 5 \times 10^{-5}$ ; 慢回路中, 取 $Q_s = I_3, R_s = I_3, \Delta A_s = 0.3A_s, \Delta B_s = 0.5B_s$ . 假设快回路控制器参数矩阵 $K_{fri}$ 存在如下加性摄动:

$$\begin{bmatrix} 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 10^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin t & 0 & 0 \\ 0 & \sin t & 0 \\ 0 & 0 & \sin t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 10^2 & 0 \\ 0 & 0 & 10^2 \end{bmatrix};$$

慢回路控制器参数矩阵 $K_{sri}$ 存在如下加性摄动:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos t & 0 & 0 \\ 0 & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & \cos t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}.$$

各系数矩阵及控制器参数矩阵的具体表达式, 限于篇幅, 略. 此时可得慢回路对于该初始状态的系统性能上界为 $J_{cs}^* = 67.3202$ , 快回路对于该初始状态的系统性能上界为 $J_{cf}^* = 36.7987$ .

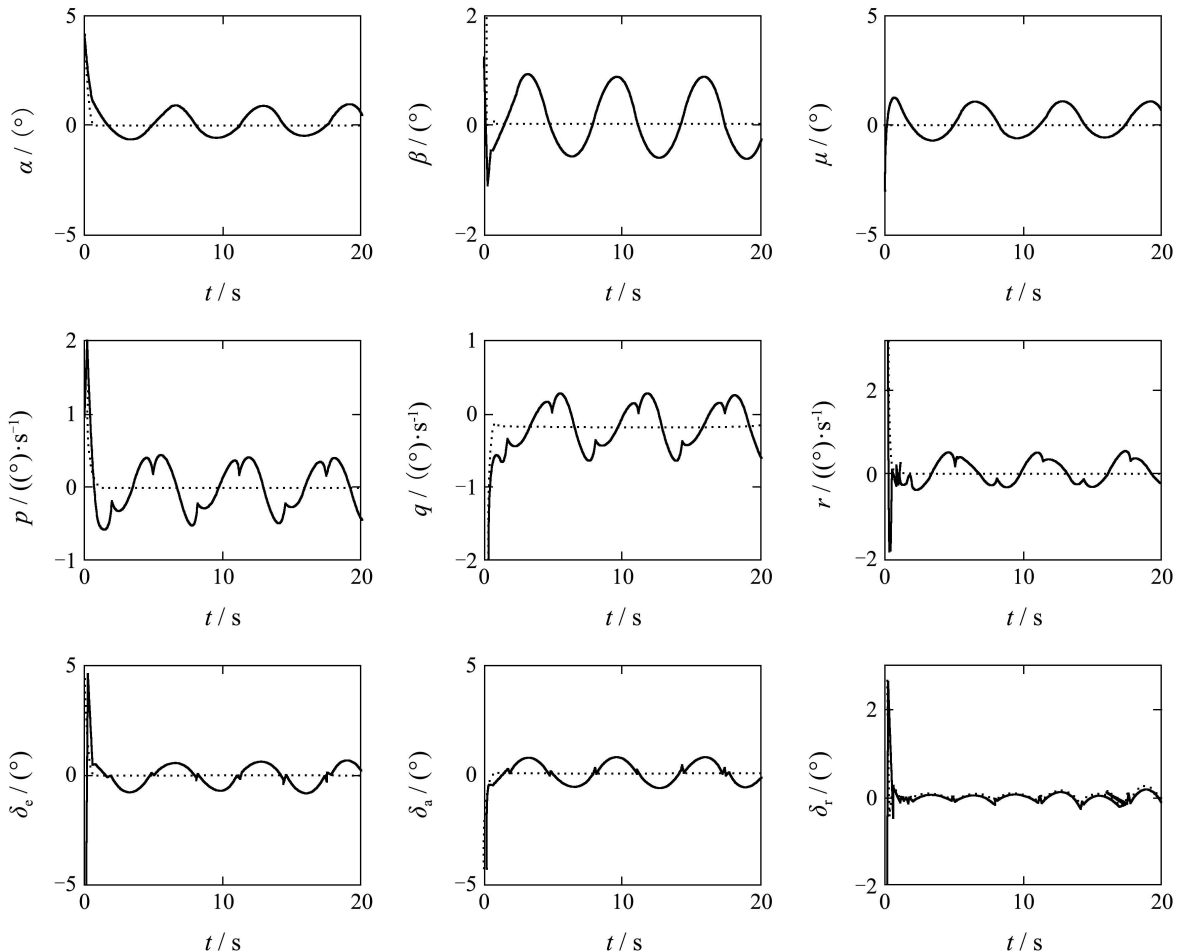


图3 NSV姿态控制响应

Fig. 3 Responses of NSV attitude control

本文从两种情况来验证本算法的有效性: 1) 不考虑控制器存在摄动时设计控制器; 2) 考虑控制器存在摄动时利用本文方法设计控制器. 仿真结果如图3所示, 第1种情况的仿真曲线如图中实线所示, 为脆弱控制, 第2种情况的仿真曲线如图中虚线所示, 为非脆弱控制.

从仿真曲线可以看出, 当控制器存在摄动时, 若不采用非脆弱控制器, 则飞行姿态不能够很好地得到控制, 严重影响了NSV的飞行性能甚至会威胁到飞行安全. 而采用本文所设计的多模型软切换保性能非脆弱控制方法, 在机翼变形过程中, 当控制器存在摄动时, 仍然能够很好地实现NSV的姿态控制, 且姿态响应平稳, 未出现强烈的抖动, 舵面偏转也较平滑, 表明了本文所设计的控制方案是有效的.

## 5 结论(Conclusion)

本文针对变机翼后掠角NSV设计了多模型软切换保性能非脆弱控制方案, 根据可测前提变量将系统工作空间利用划分为多个子区域, 并将各局部控制器在模糊子区域的的边界上进行切换, 系统的控制器由各局部控制器按照模糊加权得到, 从而实现了软切换. 同时考虑了当控制器存在摄动时系统的非脆弱控制, 在求解控制器的过程中采用了广义系统的方法, 有效地减少了求解的计算量和复杂度. 最后对变机翼后掠角NSV进行了控制, 仿真结果表明了该控制方法的有效性.

## 参考文献(References):

- [1] 崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 658 – 672.  
(CUI Erjie. Research statutes, development trends and key technical problems of near space flying vehicles[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(6): 658 – 672.)
- [2] 尹志忠, 李强. 近空间飞行器及其军事应用分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006: 17(5): 64 – 68.  
(YIN Zhizhong, LI Qiang. Analysis of near space vehicle and its military application[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2006: 17(5): 64 – 68.)
- [3] SIGTHORSSON D O, JANKOVSKY P, SERRANI A, et al. Robust linear output feedback control of an airbreathing hypersonic vehicle[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(4): 1052 – 1066.
- [4] FIORENTINI L, SERRANI A. Nonlinear robust adaptive control of flexible air-breathing hypersonic vehicles[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(2): 401 – 416.
- [5] DU Y L, WU Q X, JIANG C S. Adaptive predictive control of near-space vehicle using functional link network[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 27(2): 148 – 154.
- [6] DU Y L, WU Q X, JIANG C S, et al. Adaptive robust predictive control for hypersonic vehicles using recurrent functional link artificial neural networks[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2010, 6(12): 5351 – 5365.
- [7] 程路, 姜长生, 都延丽, 等. 一类不确定系统基于滑模干扰补偿的广义预测控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 175 – 180.  
(CHENG Lu, JIANG Changsheng, DU Yanli, et al. The sliding mode disturbance compensated GPC method for a class of uncertain systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 175 – 180.)
- [8] LAINIOTIS D G. Optimal Adaptive estimation structure and parameter adaption[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, 16(2): 160 – 170.
- [9] LAINIOTIS D G, DESHPANDE J G, UPADHYAY T N. Optimal adaptive control: a non-linear separation theorem[J]. *International Journal of Control*, 1972, 15(5): 877 – 888.
- [10] LAINIOTIS D G. Partitioning a unifying framework for adaptive system-I: estimation[J]. *Proceedings of IEEE*, 1976, 64(8): 1126 – 1143.
- [11] ATHANS M. The stochastic control of the f-8c aircraft a multiple model adaptive control (MMAC) method-part I: equilibrium flight[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, 22(5): 768 – 780.
- [12] 王世虎, 沈炯, 李益国. 多模型控制方法及其研究进展[J]. 工业仪表与自动化装置, 2008, (1): 13 – 17.  
(WANG Shihu, SHEN Jiong, LI Yiguo. Multi-model control and its study progress[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2008, (1): 13 – 17.)
- [13] HE F, ZHAO S H, TONG W M, et al. The smooth switching of fuzzy-PI control[C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. New York: IEEE, 2009: 14 – 16.
- [14] CHEN P C, WU S L, CHUANG H S. The smooth switching control for TORA system via LMIs[C] // *The 8th IEEE International Conference on Control and Automation*. New York: IEEE, 2010: 1338 – 1343.
- [15] SHU Z, LAM J, XIONG J L. Non-fragile exponential stability assignment of discrete-time linear systems with missing data in actuators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(3): 625 – 630.
- [16] LI L, JIA Y. Non-fragile dynamic output feedback control for linear systems with time-varying delay[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2009, 3(8): 995 – 1005.
- [17] LIN R Q, CHEN S L, DING X W. Nonfragile guaranteed cost control for Delta operator-formulated uncertain time-delay systems[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(2): 229 – 232.
- [18] LIU Y, ZHAO J. Nonfragile control for a class of uncertain switching fuzzy time-delay systems[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(2): 233 – 238.
- [19] 张军, 姜长生, 方炜. 变结构近空间飞行器大飞行包络控制特性研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 543 – 549.  
(ZHANG Jun, JIANG Changsheng, FANG Wei. Variable structure near space vehicle control characteristics of large flight envelope[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 543 – 549.)

## 作者简介:

王宇飞 (1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非线性鲁棒自适应控制和飞行控制, E-mail: wangyf@nuaa.edu.cn;

姜长生 (1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制和鲁棒控制等, E-mail: jiangcs@nuaa.edu.cn;

吴庆宪 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制和飞行控制等, E-mail: wuqingxian@nuaa.edu.cn.