

短距起飞垂直降落飞机发动机保性能容错控制

丁润泽¹, 肖玲斐¹, 胡继祥¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力, 江苏 南京 210016)

摘要: 本文针对短距起飞垂直降落 (STOVL) 飞机发动机存在的系统扰动和控制回路时滞问题, 基于保性能控制理论, 设计了保性能鲁棒控制器, 提出了求解相应线性矩阵不等式 (LMI) 的方法, 实现发动机在工作条件恶化的情况下仍能保持满意的性能, 保证飞行安全。并进一步考虑传感器故障, 利用卡尔曼滤波器的特性, 构建卡尔曼滤波器组, 从而当传感器发生故障时, 能够利用系统预测值重构控制信号, 实现容错控制。仿真验证表明, 本文所提的保性能控制方法可以提高 STOVL 发动机的稳态和动态性能, 具有良好的容错能力。

关键词: STOVL 飞机发动机; 保性能控制容错控制; 卡尔曼滤波器; 线性矩阵不等式 (LMI)

中图分类号: V24 **文献标识码:** A

Guaranteed Cost Fault Tolerant Control for STOVL Aircraft Engines

DING Runze, XIAO Ling-fei, HU Jixiang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China. XIAO Ling-fei, E-mail: lfxiao@nuaa.edu.cn)

Abstract : In this paper, aimed at the perturbation and control loop delay problems in the short takeoff and vertical landing (STOVL) aircraft engine systems, a novel robust guaranteed cost controller is constructed and methods of solving the corresponding linear matrix inequality (LMI) is presented on the basis of guaranteed cost control theory. The sensor faults are considered as well, based on the Kalman filter characteristics, and by creating a series of Kalman filters, fault tolerant control is realized by reconfigurable control signals with the predictive value of the systems when sensors are in failure. Simulation results show that the guaranteed cost control method can improve the steady-state and dynamic performance of the STOVL aircraft engines, has good fault tolerance capability.

Key words STOVL aircraft engine; Guaranteed cost fault tolerant control; Kalman filter; Linear matrix inequality (LMI)

1 引言

短距起飞/垂直降落 (STOVL, Short Takeoff and Vertical Landing) 飞机备常规舰载机没有的短距起飞和垂直降落的能力, 摆脱了对航母弹射器和拦阻索的依赖, 并且降低航母平台本身的技术难度。国外主要航空大国都在莫求发展该类飞机, 但目前只有美、英、俄三国拥有独立研发 STOVL 飞机的能力^[1-3]。能否设计出具有良好升力和推力

性能的发动机, 直接影响发动机研制的成败。由于 STOVL 飞机发动机起飞时需要产生向下的矢量推力, 其喷出的涡轮后高温气体很容易导致发动机进气温度上升, 进口流场畸变等情况, 使得发动机工作环境恶化, 增加发动机传感器故障的风险, 威胁飞行安全。因此。针对 STOVL 飞机发动机设计一个鲁棒控制律, 使得发动机在工作环境发生改变时, 发动机控制系统仍具有可靠的性能就显得尤为重要。

基金项目: 中国博士后基金, 非线性级联系统规定性能滑模容错控制研究 (2015M571749); 中央高校基本科研业务费专项资金资助, 基于滑模理论的航空发动机故障检测与容错控制研究 (NS2016027)。

作者简介: 肖玲斐 (1982-), 女, 湖南衡阳, 副教授, 博士, 从事航空动力系统控制与优化、故障诊断与容错的研究。

近年来保性能控制受到广泛的重视。人们已经对保性能控制进行了许多研究，研究的方法一般选用线性矩阵不等式的方法，即 LMI 处理方法。针对航空发动机可能出现的时滞和不确定性，保性能控制能够取得令人满意的结果。

由于航空发动机传感器工作环境恶劣，不仅要承受高温，还有巨大的离心载荷，而 STOVL 飞机发动机进口温度会受喷出气体的影响，传感器更容易出现故障，使得控制系统发生故障的概率越来越高^[5-8]。而卡尔曼滤波的主要思想是利用实际测量的数据与模型预测数据之间的差值乘以相应的增益来修正状态变量，从而使修正后的状态变量值和实际的状态变量值误差的方差最小。因此，当传感器发生故障时，可以通过屏蔽故障信号，用剩余无故障信号估计系统状态，进行容错控制。

文献[9]中采用了一种增广 LQR 的方法，将指令跟踪的误差增广进状态量，对航空发动机进行控制，能够消除稳态误差。但没有考虑可能发生的发动机系统参数摄动和控制回路时滞。

文献[10]针对带参数摄动、Markov 时延、数据包丢失和外部干扰的分布式航发控制系统，设计了一类双约束条件下最优保性能控制器。并在执行机构出现故障时能够被动容错。但没有研究针对 STOVL 发动机很可能出现的传感器故障进行容错控制。

本文针对含有系统参数摄动和控制回路时延的 STOVL 发动机系统，选取合适的李雅普诺夫函数，推导出系统渐近稳定的条件，并得到其 LMI 形式的等价条件，通过求解该 LMI，得到一组解，得到了控制律的一个参数化表示，在该控制律的作用下，系统渐进稳定，且系统性能指标具有上界。构造一个优化问题，求该 LMI 的最优解，该最优解求得的反馈控制律能够使得系统渐进稳定，并使得系统性能指标上界达到最小。构造卡尔曼滤波器组，某一传感器发生故障时，通过其他传感器作为输入的卡尔曼滤波器的预测值重构信号，进行容错控制。最后，通过仿真实例，对比了本文研究的保性能控制和广泛使用的 LQR 控制的性能优劣。

2 控制器设计及容错方法

考虑 STOVL 飞机发动机非线性模型^[11],

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x, u) \end{cases} \quad (1)$$

当 STOVL 飞机发动机在稳态点 (x_0, y_0, u_0) 处工作

时，通过对其方程进行泰勒展开，舍去高阶项，得

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta \dot{y} &= C \Delta x + D \Delta u \end{aligned} \quad (2)$$

为方便起见，舍去 Δ 不写。考虑高压轴折合转速 n_c ，低压轴折合转速 n_f ，燃油量 W_{fb} ，发动机喷口喉道面积 A_8 ，升力风扇喷管出口面积 A_e ，低压涡轮出口总压 P_{46}^* ，状态向量 $x(t) = [n_f \ n_c]^T$ ，输入向量 $u(t) = [W_{fb} \ A_8 \ A_{lift}]^T$ ，输出向量 $y(t) = [n_f \ P_{46}^* \ \pi_{lift}]^T$ ，有

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{n}_f \\ \dot{n}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_f \\ n_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{fb} \\ A_8 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} n_f \\ P_{46}^* \\ \pi_{lift} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_f \\ n_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{fb} \\ A_8 \\ A_e \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

此处得到的为在稳态点小幅度阶跃得到的小偏差线性化模型。由于 STOVL 发动机的工作特点，容易受到喷出气流的影响，这种环境的影响会使得系统矩阵发生参数摄动，使得模型具有不确定性。

针对文献[11]中 STOVL 飞机发动机模型，考虑

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + DFE_1)x(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 D, E_1 是已知适维常数实矩阵，代表了不确定性的结构， $F(t) \in R^{i \times j}$ 是未知的具有 Lebesgue 可测元素，并且满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ ，其中 I 表示适维单位矩阵。在控制回路上存在时滞。

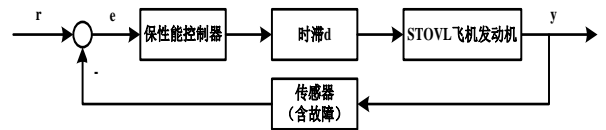


图 1 含不确定性及时滞系统仿真结构图

针对该线性化 STOVL 飞机模型，按图 1 所示结构设计鲁棒保性能控制器，使得系统在该控制律的作用下渐近稳定，并对参数不确定性和控制回路时滞具有鲁棒性。构造卡尔曼滤波器组，当传感器出现故障时，通过卡尔曼滤波器的预测值重构控制信号，进行容错控制。

考虑以下假设和引理。

假设 1 x_0 是一个零均值随机变量满足

$$E\{x_0, x_0^T\} = I, \quad E\{\dot{x}_0, \dot{x}_0^T\} = I, \quad E \text{ 表示期望因子。}$$

假设 2 考虑含有时滞 d 的系统 (2)，存在常数矩阵 $K \in R^{m \times n}$ 和对角正定矩阵 $P \in R^{n \times n}$ 、 $Z \in R^{n \times n}$ ，使得

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + dA^T ZA & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T ZA & dK^T B^T ZBK \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

引理 1^[8] Schur 补引理：对给定的对称矩阵 $S = S^T = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix}$ ，其中 $S_{11} \in R^{r \times r}$ ，以下三个条件是等价的：

- (1) $S < 0$ 。
- (2) $S_{11} < 0$ ， $S_{22} - S_{22}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$ 。
- (3) $S_{22} < 0$ ， $S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$ 。

引理 2^[9] 给定具有适当维数的矩阵 $Q = Q^T, H, E$ ，则 $Q + HF(t)E + E^T F^T(t)H^T < 0$ 。对所有满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的 $F(t)$ 都成立的充要条件是存在一正数 $\varepsilon > 0$ 使得下式成立

$$Q + \varepsilon^{-1} H H^T + \varepsilon E^T E < 0。$$

3 □ 保性能控制器设计

为了简洁的阐述本文所提控制器设计方法，本节先假设传感器无故障。

考虑 STOVL 飞机发动机系统(4)存在状态反馈控制律 $u(t) = Kx(t)$ ，在反馈回路上存在时滞 d 。

则系统(4)可写为

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + A_d x(t-d) \quad (6)$$

其中 $A_d = BK$ 。

闭环系统变为

$$\dot{x}(t) = (A + DFE_1)x(t) + BKx(t-d) \quad (7)$$

考虑性能指标

$$J = \int_0^\infty [x^T(t)Qx(t) + x^T(t-d)K^T RKx(t-d)] dt \quad (8)$$

本节主要目标是针对含时滞 d 的系统(7)设计保性能状态反馈控制律

$$u^*(t) = Kx \quad (9)$$

定理 1：对含有时滞 d 和不确定性 $\Delta A = DF(t)E_1$ 的系统(7)，最优保性能控制律为

$$u(t) = WX^{-1}x(t)$$

在该控制律的作用下系统渐进稳定，且系统性能指标(8)上界最小。如果存在一组解 $\varepsilon, X, W, \bar{X}_{11}, \bar{X}_{12}, \bar{X}_{22}, \bar{N}_1, \bar{N}_2, M, \bar{Z}$ 使得下式中的求解最优问题

$$\min_{\varepsilon, W, X, M} tr(M) \quad (10)$$

$$s.t.1) \begin{bmatrix} AX + XA^T + \bar{N}_1 + \bar{N}_1^T + \varepsilon DD^T + h\bar{X}_{11} & BW - \bar{N}_1 + \bar{N}_2^T + h\bar{X}_{12} & dXA^T & X & 0 & E^T X \\ * & -\bar{N}_2 - \bar{N}_2^T + h\bar{X}_{22} & dW^T B^T & 0 & W^T & 0 \\ * & * & d(\bar{Z} - 2X) & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -R^{-1} & 0 \\ * & * & * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0$$

$$s.t.2) \begin{bmatrix} \bar{X}_{11} & \bar{X}_{12} & \bar{N}_1 \\ * & \bar{X}_{22} & \bar{N}_2 \\ * & * & \bar{Z} \end{bmatrix} > 0, \quad s.t.3) \begin{bmatrix} M_1 & I \\ I & X \end{bmatrix}, \quad s.t.4) \begin{bmatrix} M_2 & I \\ I & \bar{Z}^{-1} \end{bmatrix}$$

成立。其中 $\bar{X}_{11}, \bar{X}_{12}, \bar{X}_{22}, W, \bar{N}_1, \bar{N}_2$ 为适维矩阵， M_1, M_2, X, \bar{Z} 为对称适维矩阵， ε 为常数。

证明：考虑以下 Lyapunov 泛函

$$\hat{V}(t, x_t) = x^T P x + \int_{-d}^t \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds d\theta \quad (10)$$

其中 $P \in R^{n \times n}$ 和 $Z \in R^{n \times n}$ 为对称正定矩阵。

沿着系统(7)的解， $V(t, x_t)$ 对时间 t 的导数为

$$\dot{\hat{V}}(t, x_t) = \dot{\hat{V}}_1(t, x_t) + \dot{\hat{V}}_2(t, x_t) \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_1(t, x_t) &= x^T (A + DFE_1)^T P x + x^T (t-d)(BK)^T P x \\ &\quad + x^T P (A + DFE_1) x + x^T B K x (t-d) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\dot{\hat{V}}_2(t, x_t) = d \dot{x}^T(t) Z \dot{x}(t) - \int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds \quad (13)$$

由于 $Z \in R^{n \times n}$ 为正定矩阵，有 $\int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds > 0$ ，考虑

$$\dot{V}(t, x_t) + \int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds \quad (14)$$

$$\text{有 } \dot{V}(t, x_t) < \dot{V}(t, x_t) + \int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds。$$

令 $\eta(t) = \begin{bmatrix} x(t)^T & x^T(t-d) \end{bmatrix}$ ，则式(14)可写为

$$\eta(t) \begin{bmatrix} (A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) + dA^T ZA & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T ZA & dK^T B^T ZBK \end{bmatrix} \eta^T(t) \quad (15)$$

因此，若

$$\begin{bmatrix} (A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) + dA^T ZA & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T ZA & dK^T B^T ZBK \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

即 $\dot{V}(t, x_t) + \int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds < 0$ ，相应的 $\dot{V}(t, x_t) < 0$ ，则系统是稳定的。

考虑性能指标(8)，若

$$\begin{bmatrix} (A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) + dA^T ZA + Q & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T ZA & dK^T B^T ZBK + K^T RK \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

则式(17)等价于

$$\begin{bmatrix} (A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) + dA^T ZA & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T ZA & dK^T B^T ZBK \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$< \begin{bmatrix} -Q & 0 \\ 0 & -K^T RK \end{bmatrix} < 0$$

将式(18)左乘 $\eta(t)$ ，右乘 $\eta^T(t)$ 得到

$$\dot{V}(t, x_t) + \int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds < \eta(t) \begin{bmatrix} -Q & 0 \\ 0 & -K^T RK \end{bmatrix} \eta^T(t)$$

故

$$\dot{V}(t, x_t) < -x^T(t)Qx(t) - x^T(t-d)K^T RKx(t-d) \quad (19)$$

式(19)可等价于

$$x^T(t)Qx(t) + x^T(t-d)K^T RKx(t-d) < -\dot{V}(t, x_t) \quad (20)$$

对式(20)两边从 $t=0$ 到 $t=\infty$ 进行积分可得

$$J = \int_0^\infty [x^T(t)Qx(t) + x^T(t-d)K^T RKx(t-d)] dt < V(0) - V(\infty)$$

$$V(0) - V(\infty) = x_0^T P x_0 + \int_{-h}^0 \int_\theta^0 \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds d\theta$$

令

$$J^* = x_0^T P x_0 + \int_{-h}^0 \int_\theta^0 \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds d\theta \quad (20)$$

可得 J^* 为相应的性能指标的一个上界。

令 $\bar{J} = E\{J\} \leq E\{J^*\}$, 由于

$J^* = x_0^T P x_0 + \int_{-h}^0 \int_\theta^0 \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds d\theta$, 同时考虑假设 1, 可知

$$\begin{aligned} E\{\bar{J}\} &\leq E\{x_0^T P x_0 + \int_{-h}^0 \int_\theta^0 \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds d\theta\} \\ &= \text{tr}(P) + \int_{-h}^0 \int_\theta^0 \text{tr}(Z) ds d\theta \\ &= \text{tr}(P) + \frac{1}{2} d^2 \text{tr}(Z) \end{aligned}$$

其中 $\text{tr}(X)$ 为矩阵 X 的迹。

定义 $Y = PA + A^T P$, 则

$$(A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) < 0 \quad (21)$$

可写为

$$Y + P D F E_1 + E_1^T F^T (P D)^T < 0 \quad (22)$$

由引理 2, 以上矩阵不等式对所有满足 $F^T F \leq I$ 的不确定矩阵 F 成立, 当且仅当存在标量 $\varepsilon > 0$ 使得

$$Y + \varepsilon P D D^T P + \varepsilon^{-1} E_1^T E_1 < 0 \quad (23)$$

由引理 1、引理 2 可知式(16)等价于

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q + \varepsilon P D D^T P + \varepsilon^{-1} E_1^T E_1 & PBK & dA^T Z \\ (BK)^T P & K^T RK & d(BK)^T Z \\ dZA & dBK & -dZ \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

由牛顿-莱布尼兹公式, 有

$$x(t-d) = x(t) - \int_{t-d}^t \dot{x}(s) ds ,$$

则对适维矩阵 N_1 和 N_2 , 有

$$\begin{bmatrix} x^T(t)N_1 + x^T(t-d)N_2 + (x^T(t)N_1 + x^T(t-d)N_2)^T \\ \times \left[x(t) - \int_{t-d}^t \dot{x}(s) ds - x(t-d) \right] \end{bmatrix} = 0 \quad (25)$$

对任意适维矩阵 $X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \geq 0$, 有

$$\eta(t) \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \eta^T(t) - \int_{t-d}^t \eta(t) \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \eta^T(t) ds \geq 0 \quad (26)$$

构造

$$\dot{\bar{V}}(t, x_t) = \dot{V}(t, x_t) + \int_{t-d}^t \dot{x}^T(s) D \dot{x}(s) ds + (25) + (26)$$

由于式(25) = 0, 式(26) ≥ 0 。若 $\dot{\bar{V}}(t, x_t) < 0$, 我们有理由得到 $\dot{V}(t, x_t) < 0$ 。 $\dot{\bar{V}}(t, x_t)$ 可写为

$$\eta_1^T(t) \Gamma \eta_1(t) - \int_{t-d}^t \eta_2^T(t, s) \Psi \eta_2(t, s) ds , \quad \text{其中}$$

$$\eta_1(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) \\ x^T(t-d) \end{bmatrix} , \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \phi_{11} + hA^T Z A & \phi_{12} + hA^T Z B K \\ * & \phi_{22} + h(BK)^T Z B K \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\phi_{11} = PA + A^T P + \varepsilon P D D^T P$$

$$+ \varepsilon^{-1} E_1^T E_1 + N_1 + N_1^T + Q + hX_{11} ,$$

$$\phi_{12} = PBK - N_1 + N_2^T + hX_{12} ,$$

$$\phi_{22} = -N_2 - N_2^T + K^T RK + hX_{22} ,$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & N_1 \\ * & X_{22} & N_2 \\ * & * & Z \end{bmatrix} \quad (28)$$

式(24) < 0 利用 Schur 补引理可等价于

$$\Xi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & dA^T Z \\ * & \phi_{22} & d(BK)^T Z \\ * & * & -dZ \end{bmatrix} < 0 \quad (29)$$

由以上几式可得, 当式(29)成立, 式(28) $>$

$$0, \quad X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \geq 0 \text{ 时, 有 } \dot{\bar{V}}(t, x_t) < 0 .$$

系统是渐进稳定的。

令

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & P^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & Z^{-1} \end{bmatrix} \quad (30)$$

针对

$$\Xi = \begin{bmatrix} PA + A^T P + \varepsilon P D D^T P + \varepsilon^{-1} E_1^T E_1 + N_1 + N_1^T + Q + hX_{11} & PBK - N_1 + N_2^T + hX_{12} & dA^T Z \\ * & -N_2 - N_2^T + K^T RK + hX_{22} & d(BK)^T Z \\ * & * & -dZ \end{bmatrix}$$

令 $E = \bar{P} \Xi \bar{P}$, 可得

$$E = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & dP^{-1} A^T \\ * & \varphi_{22} & dP^{-1} (BK)^T \\ * & * & -dZ^{-1} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\varphi_{11} = AP^{-1} + P^{-1} A^T + \varepsilon D D^T$$

$$+ \varepsilon^{-1} P^{-1} E_1^T E_1 P^{-1} + P^{-1} N_1 P^{-1}$$

$$+ P^{-1} N_1^T P^{-1} + P^{-1} Q P^{-1} + P^{-1} h X_{11} P^{-1}$$

$$\begin{aligned}\varphi_{12} &= BKP^{-1} - P^{-1}N_1P^{-1} + P^{-1}N_2^T P^{-1} + hP^{-1}X_{12}P^{-1} \\ \varphi_{22} &= -N_2 - N_2^T + K^T RK + hX_{22}\end{aligned}$$

令 $\Omega = \bar{P}\Psi\bar{P}$, 可得

$$\Psi = \begin{bmatrix} P^{-1}X_{11}P^{-1} & P^{-1}X_{12}P^{-1} & P^{-1}N_1P^{-1} \\ * & P^{-1}X_{22}P^{-1} & P^{-1}N_2P^{-1} \\ * & * & P^{-1}ZP^{-1} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{aligned}\text{令 } \bar{X}_{11} &= P^{-1}X_{11}P^{-1}, \quad \bar{X}_{12} = P^{-1}X_{12}P^{-1}, \\ \bar{X}_{22} &= P^{-1}X_{22}P^{-1}, \quad \bar{Z} = P^{-1}ZP^{-1}, \quad X = P^{-1}, \\ W &= KP^{-1}, \quad \bar{N}_1 = P^{-1}N_1P^{-1}, \quad \bar{N}_2 = P^{-1}N_2P^{-1}.\end{aligned}$$

则可得

$$E = \begin{bmatrix} \bar{\varphi}_{11} & BW - \bar{N}_1 + \bar{N}_2^T + h\bar{X}_{12} & dXA^T \\ * & -\bar{N}_2 - \bar{N}_2^T + P^{-1}K^T RKP^{-1} + h\bar{X}_{22} & dW^T B^T \\ * & * & -dZ^{-1} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \bar{X}_{11} & \bar{X}_{12} & \bar{N}_1 \\ * & \bar{X}_{22} & \bar{N}_2 \\ * & * & \bar{Z} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\text{其中 } \bar{\varphi}_{11} = AX + XA^T + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} XE_1^T E_1 X + \bar{N}_1 + \bar{N}_1^T + P^{-1}QP^{-1} + h\bar{X}_{11}$$

利用 Schur 补引理, (33) < 0 等价于

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + \bar{N}_1 + \bar{N}_1^T + \varepsilon DD^T + h\bar{X}_{11} & BW - \bar{N}_1 + \bar{N}_2^T + h\bar{X}_{12} & dXA^T & X & 0 & E_1^T X \\ * & -\bar{N}_2 - \bar{N}_2^T + h\bar{X}_{22} & dW^T B^T & 0 & W^T & 0 \\ * & * & d(\bar{Z} - 2X) & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -R^{-1} & 0 \\ * & * & * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0$$

由问题的可行解 $\varepsilon, W, \bar{X}_{11}, \bar{X}_{12}, \bar{X}_{22}, \bar{N}_1, \bar{N}_2, M_1, M_2$ 求得的控制律是系统的保性能控制律。由 Schur 补引理中提到, 定理 1 中的 s.t.3) 等价于 $M_1 > X^{-1} > 0, \text{s.t.4) 等价于 } M_2 > \bar{D} > 0$ 因此, M_1, M_2 最小化的轨迹可指出矩阵 X, \bar{D} 最小化的轨迹。也就是保性能的最小化过程。由于 $E\{\bar{J}\} = \text{tr}(P) + \frac{1}{2}d^2\text{tr}(D)$, 因此求解该优化问题得到系统的控制律能够使得系统性能指标 (8) 上界达到最小, 因此 $u(t) = WX^{-1}x(t)$ 为系统 (7) 的最优保性能控制律。证明完毕。■

4 □ STOVL 发动机保性能容错控制器设计

本节考虑 STOVL 飞机发动机传感器故障情况下的保性能容错控制问题。根据 Kalman 滤波器设计思想, 本文利用 Kalman 滤波器给出系统的估计值, 采用 Kalman 滤波器组, 从而在传感器发生故

障时, 利用系统的估计值重构控制信号, 最终设计出保性能容错控制器, 实现容错控制。

设计系统的 Kalman 滤波器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} + Du \\ K = PC^T R^{-1} \end{cases} \quad (35)$$

其中 \hat{x}, \hat{y} 为 Kalman 滤波器的估计值, K 为 Kalman 滤波器的增益矩阵。 P 满足 Riccati 方程

$$AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0 \quad (36)$$

在发生传感器故障前, 系统是 (6), 当发生传感器故障时, 屏蔽传感器的状态反馈信号 $x(t-d)$, 采用滤波器预测值 \hat{x} , 考虑时滞 d 后为 $\hat{x}(t-d)$ 。则系统变为

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A + \Delta A)x(t) + A_d \hat{x}(t-d) \quad (37)$$

由第 3 节中的相同的方法, 考虑同样的 Lyapunov

泛函 $\hat{V}(t, x_t) = x^T P x + \int_{-h}^t \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) Z \dot{x}(s) ds d\theta$ 。

$$\text{令 } \zeta(t) = \begin{bmatrix} x(t)^T & \hat{x}^T(t-d) \end{bmatrix}, \text{ 由第 3 节推导}$$

可知, 若式 (38) < 0, 则系统 (37) 渐进稳定。其中式 (38) 如下所示

$$\zeta(t) \begin{bmatrix} (A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) + dA^T Z A & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T Z A & dK^T B^T ZBK \end{bmatrix} \zeta^T(t) \quad (38)$$

式 (38) < 0 等价于式 (39)

$$\begin{bmatrix} (A + DFE_1)^T P + P(A + DFE_1) + dA^T Z A & PBK + dA^T ZBK \\ (BK)^T + dK^T B^T Z A & dK^T B^T ZBK \end{bmatrix} < 0 \quad (40)$$

式 (40) 在第 3 节内已证明过, 不再证明。

对于传感器故障, 设计 m 个卡尔曼滤波器, m 为被检测的传感器数目。每个卡尔曼滤波器都监测某个特定传感器, 以除去被监测的传感器后剩余的 $m-1$ 个传感器测量值子集作为输入量, 以除去被监测的传感器后剩余的传感器测量值作为输入量。第 i 个卡尔曼滤波器的方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y^i - \hat{y}^i) \\ \hat{y}^i = C^i \hat{x} + D^i u \\ K^i = PC^{iT} R^{-1} \end{cases} \quad (41)$$

y^i 是测量值 y 除去第 i 行的测量子集, \hat{y}^i 是测量子集 y^i 的估计值。矩阵 C^i, D^i 分别是矩阵 C, D 除去第 i 行后剩下的子集。 K^i 是对应于矩阵对 (A, C^i) 的卡尔曼滤波器增益矩阵。

每个卡尔曼滤波器都用来监测一个具体的传感器, 采用容错技术原理来设计, 即假设该滤波器所监测的为故障传感器, 而滤波器的输入信号为除去被监测的故障传感器测量值后剩余的无故障传感器的测量值。例如共有 3 个传感器被监测, 第 3 个卡尔曼滤波器用来监测第 3 个传感器, 其输入测量值只是第 1、2 传感器的测量值。当某个传感器发生

故障时, 由于监测该传感器的容错卡尔曼滤波器只用到其它几个无故障的传感器测量值, 该卡尔曼滤波器能得到正确的估计值。于是, 当其中一个传感器发生故障时, 可以用没有发生故障的传感器测量值作为输入的 kalman 滤波器的值作为系统的预测值, 采用 kalman 滤波器的预测值作为系统当前的状态, 重构信号进行闭环控制。使得系统能够继续保持稳定。

3 仿真验证

考虑 STOVL 飞机发动机模型^[11], 即式 (4) 中

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} -4.1847 & -0.3086 \\ 0.6847 & -5.0996 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1.9743 & 1.4177 & 0.8291 \\ 0.8120 & 0.0247 & -0.0940 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.8722 & 1.8696 \\ -4.4368 & 8.4551 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.2622 & -1.2771 & -0.0796 \\ 0.4736 & 1.2873 & 0.1188 \end{bmatrix},$$

$$E_1 = 0.05 \times A$$

当存在时滞 $d=0.1s$ 时, 系统表示为

$$\dot{x}(t) = (A + DFE_1)x(t) + BKx(t-d)$$

$$y(t) = [y_1 \quad y_2]$$

通过文中保性能控制器(GCC)的设计方法, 求解线性矩阵不等式得到 $K_{GCC} = \begin{bmatrix} -2.4589 & 0.5191 \\ 2.2780 & -0.4484 \\ 2.1186 & -0.4219 \end{bmatrix}$ 。

为了对比分析本文设计方法的有效性, 设计 LQR 控制器, 其中 $K_{LQR} = \begin{bmatrix} 1.4682 & 0.0416 \\ 1.0652 & -0.0254 \\ 0.6256 & -0.0256 \end{bmatrix}$ 。

根据图 1 所示搭建仿真实验平台。假设系统发生传感器偏执故障, 由卡尔曼滤波器对系统状态的估计, 重构控制信号并容错控制。假设故障在 5s 时发生。仿真图像图 2 到图 5 所示。其中蓝色为 LQR 仿真曲线, 红色为 GCC 仿真曲线。

由图 2 和图 3 可发现, 相比于 LQR 控制, GCC 虽然具有一定的稳态误差, 但仿真曲线平稳, 超调量和振荡小。当发生传感器故障时能够迅速容错, 波动小, 在容错后 GCC 控制下的稳态误差同 LQR 控制下的稳态误差相差不大, 说明 GCC 的容错控制能力强于 LQR 控制。

根据图 4 和图 5 可知, GCC 控制量小于 LQR 控制, 且控制量平稳, 波动小, 峰值远小于 LQR 控制。有助于减小硬件要求和控制能量要求。通过对比可以看出, 当系统存在时滞和不确定性时, 保性能控制能够更快、更平和的到达稳定, 并在出现故障后进行容错, 能够尽快的使系统恢复稳定, 并保持系统性能, 且控制量较小。

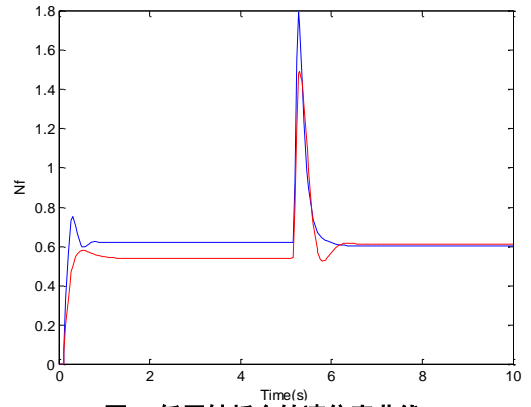


图 2 低压轴折合转速仿真曲线

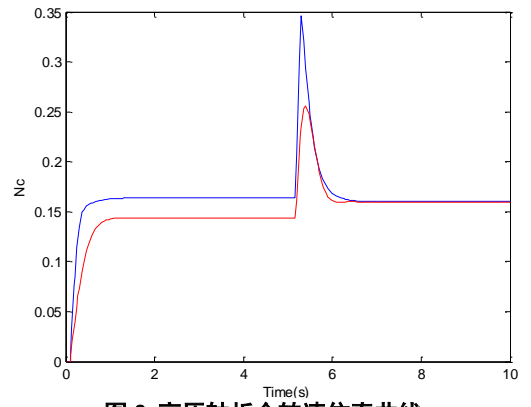


图 3 高压轴折合转速仿真曲线

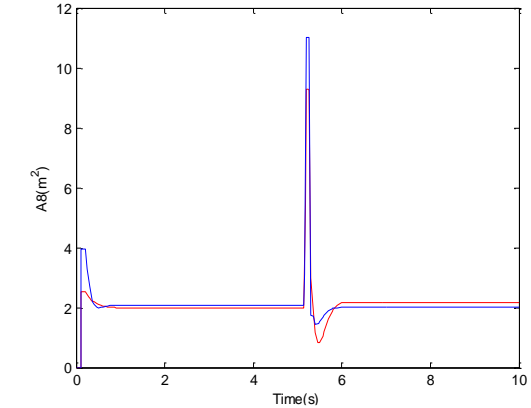


图 4 发动机喷口喉道面积仿真曲线图

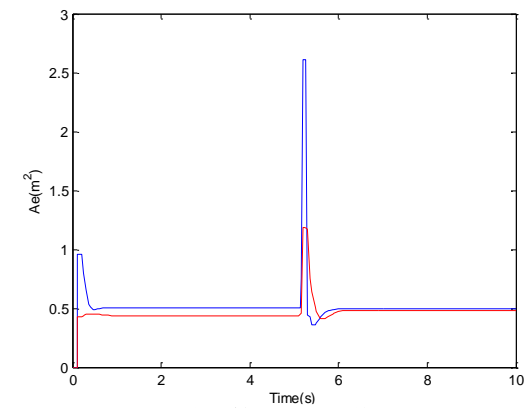


图 5 升力风扇喷管出口面积仿真曲线图

3 结语

本文研究了 STOVL 飞机发动机的保性能控制问题, 设计了保性能控制器, 并针对可能出现的传

传感器偏执故障,设计多组卡尔曼滤波器,利用未发生故障的传感器信号作为滤波器的输入信号,预测系统状态,并用预测值重构信号,进行容错保性能控制器设计。通过仿真对比了采用保性能控制和LQR控制的系统性能,仿真结果表明,当系统具有时滞和不确定性时,保性能控制能够更快、更平和的到达稳定,并在出现故障后能够尽快的使系统恢复稳定,保持系统性能。

参考文献 (References)

- [1] 叶代勇,滕健,郭捷,等. 短距起飞/垂直降落战斗机发动机发展及关键技术分析 [J]. 航空发动机, 2013, 39(1): 75-78.
- [2] 离子鱼. 垂直升空技术的探索——美国超音速STOVL 战斗机动力装置的发展[J]. 舰载武器, 2010 (4): 46-55.
- [3] 离子鱼. 中国发展 STOVL 战斗机的前景和技术分析[J]. 舰载武器, 2008 (2): 44-50.
- [4] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E et al. Linear matrix inequality in system and control theory//SIAM Studies in Applied Mathematics. Philadelphia:SIAM, 1994
- [5] 许域菲. 近空间飞行器非线性容错控制技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2011.
- [6] 高志峰. 复杂系统的容错控制技术及其在近空间飞行器中的应用研究[D]. 南京航空航天大学, 2011.
- [7] 李怡勇,沈怀荣,李岩. 先进控制方法在飞行控制系统设计中的应用[J]. 飞航导弹, 2006, 35 (12):50-54.
- [8] 胡刚,刘永清,李远清. 不确定性控制系统的成因、分类与控制策略[J]. 工业工程, 2001, 4(1):49-52. DOI:10.3969/j.issn.1007-7375.2001.01.011.
- [9] 沃松林,吴建成. 不确定非线性广义系统的鲁棒控制与保性能控制[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6):955-957. DOI:10.3321/j.issn:1001-506X.2007.06.028.
- [10] 陈毅. 航空发动机控制系统传感器故障诊断研究[D]. 南京航空航天大学, 2007.
- [11] 庞淑伟. STOVL 飞机发动机建模及多变量控制器设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015
- [12] 史国栋,沃松林,邹云. 参数不确定广义时滞系统的保性能控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2):266-270.
- [13] 俞立,徐建明. 具有控制约束的不确定离散系统最优保性能控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(10):1453-1456.
- [14] 唐斌,刘国平,桂卫华. 不确定系统的网络化保性能控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1):105-110.
- [15] 谢林柏. 网络化控制系统中若干问题的研究[D]. 华中科技大学, 2004. DOI:doi:10.7666/d.d005647.
- [16] 蒋莲莲. 长时延不确定网络控制系统的保性能控制 [D]. 东北大学, 2009.
- [17] 王晓斌. 长时延和丢包的网络控制系统保性能控制 [J]. 控制工程, 2013, 20(1):7-10. DOI:doi:10.3969/j.issn.1671-7848.2013.01.014.
- [18] 余加霞. 不确定线性系统优化控制算法研究[D]. 西安理工大学, 2007. DOI:doi:10.7666/d.y1050151.
- [19] 朱广卿. 时滞不确定系统性能鲁棒控制及应用研究 [D]. 南京航空航天大学, 2008.
- [20] Guo S. Robust reliability method for non-fragile guaranteed cost control of parametric uncertain systems[J]. Systems & Control Letters, 2014, 64(1):27-35.
- [21] Chen L, Zhou Y, Zhang X. Guaranteed cost control for uncertain genetic regulatory networks with interval time-varying delays[J]. Neurocomputing, 2014, 131(7):105-112.
- [22] Yoneyama J. Robust guaranteed cost control of uncertain fuzzy systems under time-varying sampling[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1):249-255.
- [23] Limin WANG (王立敏), Xi CHEN (陈曦), Furong GAO (高福荣). An LMI Method to Robust Iterative Learning Fault-tolerant Guaranteed Cost Control for Batch Processes[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 21(4):401-411.
- [24] Thuan M V, Phat V N. Optimal Guaranteed Cost Control of Linear Systems with Mixed Interval Time-Varying Delayed State and Control[J]. Journal of Optimization Theory & Applications, 2012, 152(2):394-412.