

双目标约束下的航空发动机分布式控制系统 最优保成本容错控制

王磊^{1,2}, 谢寿生¹, 彭靖波¹, 杨勇¹, 任立通¹

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;

2. 中国人民解放军 93704 部队, 北京 101100)

摘 要: 针对带参数摄动、Markov 时延、数据丢包和外部干扰的航空发动机分布式控制系统,研究了当执行机构发生部分失效故障时的被动容错控制问题,在 H_∞ 性能指标和成本性能指标双重约束下设计了最优保成本容错控制器。首先对系统模型中的各不确定参数进行量化描述,并在此基础上建立整个闭环系统的增广模型;其次证明了双目标约束下闭环系统渐进稳定的充分条件,并给出保成本容错控制器的设计方法;基于双目标相容性理论,得到最优保成本容错控制律的求解方法。仿真结果表明最优保成本容错控制器能够在执行机构发生区间内的任一随机故障时保证闭环系统渐进稳定,并具备一定的 H_∞ 性能。且当发动机低压转子转速发生 1% 阶跃变化时,最优保成本容错控制器的主燃油流量和尾喷管临界截面积峰值仅为最优鲁棒 H_∞ 容错控制器的 16.03% 和 16.93%。

关 键 词: 航空发动机; 分布式控制系统; 执行机构故障; 保成本控制; 容错控制; 相容性理论

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Optimal guaranteed cost fault-tolerant control with bi-index constraints for aero-engine distributed control system

WANG Lei^{1,2}, XIE Shou-sheng¹, PENG Jing-bo¹,
YANG Yong¹, REN Li-tong¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 93704 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 101100, China)

Abstract: The passive fault-tolerant control was studied for aero-engine distributed control system with parameter perturbation, Markov time-delay, data dropout and external disturbance when interval random actuator faults occurred. An optimal guaranteed cost fault-tolerant controller was designed under double constran of H_∞ and cost performance index. At the beginning, uncertain parameters were described quantitatively. Based on the description a closed-loop augmented model was built. Then sufficient conditions for asymptotic stability with bi-index constraints of the augmented system were derived. The design approach of guaranteed cost fault-tolerant controller was proposed. Finally the optimal guaranteed cost fault-tolerant controller was designed based on consistency theory. Simulation results show that the devised controller ensures the closed-loop system asymptotically stable when interval random actuator faults occur, and have a certain H_∞ performance. Besides, when low-pressure rotor speed has 1% step change, the maximum main fuel mass flow and throat area in this controller are 16.03% and 16.93%, respectively, of that in optimal robust H_∞ fault-tol-

erant controller.

Key words: aero-engine; distributed control system; actuator failure; guaranteed cost control; fault-tolerant control; consistency theory

实际系统的容错控制策略往往不仅要保证在故障模式下系统的稳定性,同时也要尽可能满足一定的性能指标或约束条件,如航空发动机的容错控制系统,在故障发生时,不仅希望航空发动机维持稳定运转,对外部干扰具备一定的不敏感性,同时也希望系统响应时间和成本最小,因此探索在多目标约束下的容错控制方法是非常必要的.近年来,国内外学者针对时滞系统的多目标容错控制问题进行了一系列有益的研究,文献[1]针对一类不确定的线性离散时滞系统,设计了能够同时满足区域极点指标、稳态方差指标和 H_∞ 性能指标的满意容错控制器.文献[2]利用 LMI(linear matrix inequality)方法,研究了双目标约束下,一类线性不确定离散系统基于状态反馈的鲁棒容错控制器设计方法.但航空发动机分布式控制系统与文献中采用的特定时滞系统并不完全相同,由于航空发动机实际工作环境恶劣,在控制器设计时所采用的系统模型需要充分考虑 Markov 时延、数据丢包、参数摄动、外部干扰、闭环系统性能等因素的影响.另外如何对故障进行量化描述也很重要,它将直接关系到被动容错控制器的适用范围.

因此,针对航空发动机分布式控制系统设计双目标约束的被动容错控制器时,以下 3 个问题亟待解决:①对故障的描述较为单一,如文献[3-5]均假设执行机构仅存在正常、故障两种状态,并在此基础上分别设计了完整性容错控制器.文献[6]仅考虑了传感器存在部分衰减故障的时滞系统的容错问题.②对分布式控制系统的影响因素(Markov 时延、数据丢包、参数摄动、外部干扰等)考虑不充分.③在 H_∞ 性能指标和成本性能指标双重约束下,对外部干扰的假设局限性较大.如文献[7-8]在求解成本性能上界时,假设外部干扰为零,文献[9-10]假设外部干扰平方可积分,即外部干扰的平方函数从零到正无穷积分有效,平方可积的干扰函数能量小,且随时间趋近于零.显然这两种量化方式存在一定的局限性.

鉴于以上 3 个问题,本文针对带参数摄动、Markov 时延、数据丢包和外部干扰的航空发动机分布式控制系统,研究了当执行机构发生部分失效故障时的被动容错控制问题.首先对系统模

型中的各参数进行量化描述,并在此基础上建立整个闭环系统的增广模型;其次证明了 H_∞ 性能指标和成本性能指标双重约束下闭环系统渐进稳定的充分条件,并给出鲁棒 H_∞ 保成本容错控制器的设计方法;最后对双目标相容性进行讨论,得到最优保成本容错控制律的求解方法.

1 航空发动机分布式控制系统模型建立

1.1 系统描述

航空发动机分布式控制系统如图 1 所示, τ_{sc}^i 为第 i 个传感器的输出时延, τ_{ca}^i 为第 i 个执行机构的控制时延, τ_c 为控制器的计算时延.

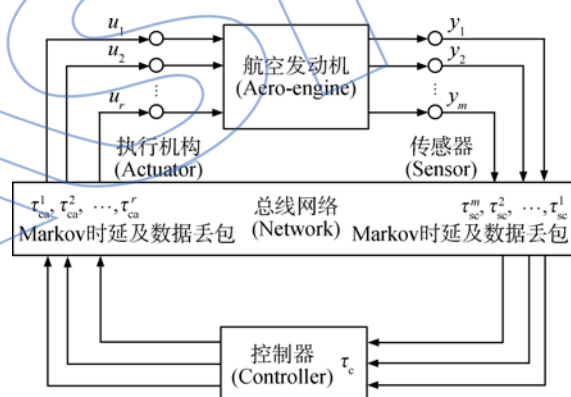


图 1 航空发动机分布式控制系统结构图

Fig. 1 Structural chart of aero-engine distributed control system

对航空发动机分布式控制系统做如下假设:

假设 1 传感器和执行机构为时钟驱动,中央控制器为事件驱动.

假设 2 数据带有时间戳并为单包传输,且无时序错乱.

假设 3 存在数据丢包,且当数据丢包时,沿用上一采样时刻数据.

假设 4 执行机构的控制时延 $\tau_{ca}^1, \dots, \tau_{ca}^r$ 和传感器输出时延 $\tau_{sc}^1, \dots, \tau_{sc}^m$ 均有上界.各传感器输出量在网络中传递的优先级相同.因此可近似认为各传感器输出量到中央控制器的输出时延相等,用 τ_{sc} 表示,同理从中央控制器到各执行机构的控制时延也近似相等,记为 τ_{ca} .基于假设 1、假设 3,

根据文献[11]提出的时延合并充分条件,将控制时延 τ_{ca} 和输出时延 τ_{sc} 合并为 $\tau(k)$.

离散系统方程可以描述为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(k) + \\ (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}[k - \tau(k)] + \mathbf{R}\mathbf{d}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}[k - \tau(k)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x}(k) = [\dot{n}_l \quad n_h]^T$ 为系统状态变量, $\mathbf{u}(k) = [\dot{m}_f \quad A_8]^T$ 为控制量输入, $\mathbf{y}(k) = [n_l \quad \pi_t]^T$ 为系统输出. n_l 为低压转子转速; n_h 为高压转子转速; $\dot{m}_f$ 为主燃油流量; A_8 为尾喷管临界截面积; π_t 为涡轮落压比. $\mathbf{d}(k)$ 为系统外部噪声干扰; $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$ 为模型的参数摄动; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{R}$ 为适维矩阵.

1.2 参数的量化说明

本文考虑的航空发动机分布式控制系统带有 Markov 时延、数据丢包、参数摄动等特点,且被动容错控制器针对执行机构发生部分失效故障的情况.因此需对 Markov 时延、模型参数摄动和执行机构随机故障 3 个参数进行量化说明

1) 存在数据丢包情况的传输时延 $\tau(k)$ [12]

由于分布式控制系统在某一时间段的时延和丢包情况与该时段的总线负载有关,并不是无约束的随机跳变,可将时延序列 $\{\tau(k) | 0 \leq \tau(k) \leq \tau_m(k) < \infty, k=0, 1, \dots, \infty\}$ 等效为有限状态的 Markov 过程.不失一般性,假设 $\tau_m(k) = 2T$, T 为传感器采样周期,以下简称 $\tau_m(k) = 2$. $\tau(k)$ 的状态空间为 $\Omega = \{1, 2\}$, 时延的状态转移概率矩阵 $\Pi = \pi_{ij} (i, j \in \Omega)$, $\pi_{ij} = P\{\tau(k+1) = j | \tau(k) = i\} \geq 0$, 且有 $\sum_{j=1}^2 \pi_{ij} = 1$, $\pi_{ij} = 0 (j > i + 1)$. 状态转移概率矩阵 Π 可以采用统计学方法获得.

为保证控制器设计过程的简洁明了,选取 $2T$ 作为时延的最大值,本文得到的定理均可扩展到更大时延的情况.

2) 模型的参数摄动 $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$

系统小偏离状态空间模型的参数摄动 $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$ 为随机不确定项,满足

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{A}(k) = \mathbf{G}\mathbf{F}(k)\mathbf{E}_a \\ \Delta\mathbf{B}(k) = \mathbf{G}\mathbf{F}(k)\mathbf{E}_b \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{G}$, $\mathbf{E}_a$, $\mathbf{E}_b$ 是已知适维常数矩阵, $\mathbf{F}(k)$ 为未知矩阵,且 $\mathbf{F}^T(k)\mathbf{F}(k) \leq \mathbf{I}$ (下文将 $\mathbf{F}(k)$ 记为 $\mathbf{F}$).

3) 执行机构部分失效故障增益矩阵 $\mathbf{M}$

假设执行机构故障增益位于 $(0, m_{\max}]$ 区间,

引入故障增益矩阵 $\mathbf{M} = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_p)$, 其中 p 为执行机构数量, $m_{bi} \leq m_i \leq m_{ei} (0 < m_{bi} < 1, m_{ei} = m_{\max} > 1)$. 当 $m_i < 1$ 时,第 i 个执行机构发生衰减故障;当 $m_i = 1$ 时,第 i 个执行机构正常;当 $m_i > 1$ 时,第 i 个执行机构发生正向漂移.

为弱化故障增益随机性的影响,使设计的被动容错控制器对 $(0, m_{\max}]$ 区间内的任意随机故障均具有容错能力,引入矩阵

$$\mathbf{M}_0 = \text{diag}(m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p})$$

$$\mathbf{J} = \text{diag}(j_1, j_2, \dots, j_p)$$

$$\mathbf{L} = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_p)$$

$$\mathbf{N} = \text{diag}(m_{e1}, m_{e2}, \dots, m_{ep})$$

$$\text{式中 } m_{0i} = \frac{m_{bi} + m_{ei}}{2}, j_i = \frac{m_{ei} - m_{bi}}{m_{ei} + m_{bi}}, l_i = \frac{m_i - m_{0i}}{m_{0i}},$$

则

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0(\mathbf{I} + \mathbf{L}) \quad |\mathbf{L}| \leq \mathbf{J} \leq \mathbf{I}$$

$$|\mathbf{L}| = \text{diag}(|l_1|, |l_2|, \dots, |l_p|)$$

1.3 增广闭环系统建立

鉴于分布式控制系统的时延特性,本文控制器采用带记忆功能的状态反馈控制器

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{M}\mathbf{K}\mathbf{z}(k)$$

式中 $\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}^T(k), \mathbf{u}^T(k-2), \mathbf{u}^T(k-1)]^T$, 当 $\tau(k) = i (i \in \Omega)$ 时,系统(式(1))可转化为以下增广的闭环系统:

$$\begin{cases} \mathbf{z}(k+1) = (\bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{M}\mathbf{K}_i)\mathbf{z}(k) + \bar{\mathbf{R}}\mathbf{d}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{z}(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\bar{\mathbf{A}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \Delta\mathbf{A} & (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})(2-i) & (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})(i-1) \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{D}(2-i) \quad \mathbf{D}(i-1)]$$

2 双目标约束下的闭环系统稳定性分析

2.1 双目标约束的定义

本文考虑的双目标约束是 H_∞ 性能指标和成本性能指标双重约束,定义系统(式(1))的成本函数为

$$\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{S} \mathbf{u}(k)] \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{S}$ 为给定的对称正定加权矩阵.

$\sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k)]$ 表示离散系统能量之和, 与系统调节时间、超调量及稳态误差有关, 当系统参考输入为零时, 调节时间、超调量和稳态误差越小, 则 $\sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}(k)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(k)]$ 值越小; $\sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{u}^T(k) \mathbf{S} \mathbf{u}(k)]$ 表示离散系统成本之和, 与主燃油流量和尾喷管临界截面积有关, 在给定初始状态的情况下, $\sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{u}^T(k) \mathbf{S} \mathbf{u}(k)]$ 越小, 则表示系统所需的控制成本越低.

定义 1^[13] 对系统(式(1))和成本函数(式(4)), 如果存在控制律 $\mathbf{K}$ 和一个正数 Φ^* , 使得系统闭环渐进稳定, 且满足 $\Phi \leq \Phi^*$, 则称 Φ^* 为系统(式(1))的一个成本性能上界, $\mathbf{K}$ 为系统(式(1))的一个保成本控制律.

双目标约束下的最优保成本容错控制器设计目标是: 针对带 Markov 时延、数据丢包、参数摄动和外部干扰的航空发动机分布式控制系统(式(1)), 当执行机构发生故障增益位于 $(0, m_{\max}]$ 区间内的任一故障时, 设计被动容错控制器, 使闭环系统(式(3))满足如下条件:

1) 当 $\mathbf{d}(k) = 0$ 时, 闭环系统鲁棒渐进稳定.

$$\begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{P}}_i & 0 & (\bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{M}_0\mathbf{K}_i)^T & \bar{\mathbf{C}}^T & \bar{\mathbf{I}}^T & (\bar{\mathbf{N}}\mathbf{K}_i)^T & (\bar{\mathbf{J}}\mathbf{K}_i)^T & \bar{\mathbf{E}}^T \\ 0 & -\gamma^2 \mathbf{I} & \bar{\mathbf{R}}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{M}_0\mathbf{K}_i & \bar{\mathbf{R}} & -\bar{\mathbf{P}}_i^{-1} + \epsilon_1 \bar{\mathbf{B}}\mathbf{M}_0\mathbf{J}\mathbf{M}_0^T \bar{\mathbf{B}}^T + \epsilon_2 \bar{\mathbf{G}}\bar{\mathbf{G}}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\mathbf{C}} & 0 & 0 & -\mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\mathbf{I}} & 0 & 0 & 0 & -\bar{\mathbf{Q}}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\mathbf{N}}\mathbf{K}_i & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{S}^{-1} & 0 & 0 \\ \bar{\mathbf{J}}\mathbf{K}_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon_1 \mathbf{I} & 0 \\ \bar{\mathbf{E}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon_2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

式中 $\bar{\mathbf{A}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}(2-i) & \mathbf{B}(i-1) \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{I}} = [\mathbf{I} \ 0 \ 0]$, $\bar{\mathbf{E}} = [\mathbf{E}_a \ \mathbf{E}_b(2-i) \ \mathbf{E}_b(i-1)]$,

2) 在零初始条件下, 从扰动 $\mathbf{d}(k)$ 到系统输出 $\mathbf{y}(k)$ 的传递函数矩阵 $\|\mathbf{H}(k)\|_{\infty} \leq \gamma$, 即

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{y}^T(k) \mathbf{y}(k) \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k).$$

3) 闭环系统的成本函数 Φ 有上界 Φ^* , 即 $\Phi \leq \Phi^*$, 且使 Φ^* 最小.

2.2 闭环系统稳定性分析

引理 1 (Schur 补性质) 具有如下形式的对称矩阵:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} \end{bmatrix}$$

式中 $\mathbf{S}_{12}$ 为块阵, $\mathbf{S}_{11}$, $\mathbf{S}_{22}$ 为方阵, 以下 3 个条件等价:

- 1) $\mathbf{S} < 0$;
- 2) $\mathbf{S}_{22} < 0$, $\mathbf{S}_{11} - \mathbf{S}_{12} \mathbf{S}_{22}^{-1} \mathbf{S}_{12}^T < 0$;
- 3) $\mathbf{S}_{11} < 0$, $\mathbf{S}_{22} - \mathbf{S}_{12}^T \mathbf{S}_{11}^{-1} \mathbf{S}_{12} < 0$.

引理 2^[14] 给定 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ 为适维实常值矩阵, $\mathbf{Y}$ 为任意的对称实矩阵, 假设 $\mathbf{H}$ 为时变适维对角矩阵, 满足 $\|\mathbf{H}\| \leq \mathbf{U}$ 且 $\exists k > 0$ 使得 $\|\mathbf{H}\| = \mathbf{U}$, $\mathbf{U}$ 为正定对角矩阵, 则 $\mathbf{Y} + \mathbf{R}_1 \mathbf{H} \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_2^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}_1^T < 0$ 的充分必要条件是存在正常数 $\beta > 0$, 使得

$$\mathbf{Y} + \beta \mathbf{R}_1 \mathbf{U} \mathbf{R}_1^T + \beta^{-1} \mathbf{R}_2^T \mathbf{U}^T \mathbf{R}_2 < 0$$

定理 1 对于存在执行机构故障的闭环系统(式(3)), 对于 $\forall i \in \Omega$ 若存在正定矩阵 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ 和正常数 ϵ_1, ϵ_2 使得矩阵不等式(式(5))成立, 则闭环系统(式(3))渐进稳定, 具有 H_{∞} 性能指标 γ , 且存在成本性能上界 Φ^* .

$\bar{\mathbf{G}} = [\mathbf{G}^T \ 0 \ 0]^T$, $\bar{\mathbf{J}} = \text{diag}(\sqrt{j_1}, \sqrt{j_2}, \dots, \sqrt{j_p})$, $\bar{\mathbf{P}}_i = \sum_{j=1}^2 \pi_{ij} \mathbf{P}_j$, γ 为 H_{∞} 性能指标, 成本性能上界为

$$\Phi^* = \mathbf{z}^T(0) \mathbf{P}_i \mathbf{z}(0) + \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) \quad (6)$$

证明 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V[\mathbf{z}(k), k, i] = \mathbf{z}^T(k) \mathbf{P}_i \mathbf{z}(k)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta V(\mathbf{z}) = & V[\mathbf{z}(k+1), k+1, j] - V[\mathbf{z}(k), k, i] = \\ & [\mathbf{z}^T(k) (\bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M} \mathbf{K}_i)^T + \mathbf{d}^T(k) \bar{\mathbf{R}}^T] \bar{\mathbf{P}}_i \cdot \\ & [(\bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M} \mathbf{K}_i) \mathbf{z}(k) + \bar{\mathbf{R}} \mathbf{d}(k)] - \mathbf{z}^T(k) \mathbf{P}_i \mathbf{z}(k) \end{aligned}$$

由 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{N}$ 定义可知

$$\begin{aligned} & \mathbf{z}^T(k) (\mathbf{K}_i^T \mathbf{M}^T \mathbf{S} \mathbf{M} \mathbf{K}_i) \mathbf{z}(k) \leq \\ & \mathbf{z}^T(k) (\mathbf{K}_i^T \mathbf{N}^T \mathbf{S} \mathbf{N} \mathbf{K}_i) \mathbf{z}(k) \\ \Delta V(\mathbf{z}) \leq & \begin{bmatrix} \mathbf{z}(k) \\ \mathbf{d}(k) \end{bmatrix}^T \boldsymbol{\Theta} \begin{bmatrix} \mathbf{z}(k) \\ \mathbf{d}(k) \end{bmatrix} - \\ & [\mathbf{x}(k)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k)^T \mathbf{S} \mathbf{u}(k)] + \\ & \gamma^2 \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) - \mathbf{y}^T(k) \mathbf{y}(k) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Theta} = & \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M} \mathbf{K}_i)^T \\ \bar{\mathbf{R}}^T \end{bmatrix} \bar{\mathbf{P}}_i \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M} \mathbf{K}_i) & \bar{\mathbf{R}} \end{bmatrix} + \\ & \bar{\mathbf{C}}^T \bar{\mathbf{C}} + \begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{P}}_i & 0 \\ 0 & -\gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{K}_i^T \mathbf{N}^T \mathbf{S} \mathbf{N} \mathbf{K}_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

1) 由成本函数 Φ 定义可知 $\mathbf{Q}, \mathbf{S}$ 为对称正定矩阵, 则当 $\mathbf{d}(k) \equiv 0$ 时, 若 $\boldsymbol{\Theta} < 0$ 则 $\Delta V(\mathbf{z}) < 0$, 此时闭环系统(式(3))渐进稳定, 控制目标(式(1))实现.

2) 当 $\mathbf{d}(k) \neq 0, \boldsymbol{\Theta} < 0$, 且为零初始条件时

$$\Delta V(\mathbf{z}) < \gamma^2 \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) - \mathbf{y}^T(k) \mathbf{y}(k) \quad (7)$$

对式(7)从 $k=0$ 到 ∞ 求和, 可得

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{y}^T(k) \mathbf{y}(k) - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) < \\ -V(\infty) < 0 \end{aligned}$$

$$\Psi_{22} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\chi}_1 + \varepsilon_1 \pi_{11} \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M}_0 \mathbf{J} \mathbf{M}_0 \bar{\mathbf{B}}^T + \varepsilon_2 \pi_{11} \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{G}}^T & 0 \\ 0 & -\boldsymbol{\chi}_2 + \varepsilon_1 \pi_{22} \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M}_0 \mathbf{J} \mathbf{M}_0 \bar{\mathbf{B}}^T + \varepsilon_2 \pi_{22} \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{G}}^T \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{31} = \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{C}} \boldsymbol{\chi}_i)^T & (\mathbf{I} \boldsymbol{\chi}_i)^T & (\mathbf{M} \mathbf{Y}_i)^T & (\bar{\mathbf{J}} \mathbf{Y}_i)^T & (\bar{\mathbf{E}} \boldsymbol{\chi}_i)^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\Psi_{32} = 0$$

$$\Psi_{33} = \text{diag}[-\mathbf{I} \quad -\mathbf{Q}^{-1} \quad -\mathbf{S}^{-1} \quad -\varepsilon_1 \mathbf{I} \quad -\varepsilon_2 \mathbf{I}]$$

证明略.

控制目标(式(2))实现.

3) 当 $\mathbf{d}(k) \neq 0, \boldsymbol{\Theta} < 0$, 初始条件不为零时, 对式(7)从 $k=0$ 到 ∞ 求和, 可得

$$\begin{aligned} V(\infty) - V(0) < -\Phi + \sum_{i=0}^k [\gamma^2 \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) - \\ \mathbf{y}^T(k) \mathbf{y}(k)] \Phi < V(0) + \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^2 \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) \leq \\ \mathbf{z}^T(0) \mathbf{P}_i \mathbf{z}(0) + \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^2 \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k) = \Phi^* \end{aligned}$$

控制目标(式(3))实现

根据引理 1、引理 2 可知 $\boldsymbol{\Theta} < 0$ 等价于式(5), 证毕.

2.3 鲁棒 H_{∞} 保成本容错控制器设计

矩阵不等式(式(5))所含的非线性项包括 $-\mathbf{Q}^{-1}, -\mathbf{S}^{-1}, -\bar{\mathbf{P}}_i^{-1}$, 而矩阵 $\mathbf{Q}, \mathbf{S}$ 均为已知, 因此只需根据定义将 $-\bar{\mathbf{P}}_i^{-1}$ 线性化便可以直接利用 Matlab LMI 工具箱进行求解, 因此控制器的设计过程实际上就是将式(5)转化为线性矩阵不等式的过程.

定理 2 对于 $\forall i \in \Omega$, 如果存在矩阵 $\mathbf{Y}_i$, 正定矩阵 $\boldsymbol{\chi}_1, \boldsymbol{\chi}_2$ 和正常数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, 使得线性矩阵不等式(式(8))成立, 则闭环系统(式(3))在给定 H_{∞} 性能指标 γ 和成本函数加权矩阵 $\mathbf{Q}, \mathbf{S}$ 后, 满足 2.1 节所述的 3 个控制目标, 控制器增益 $\mathbf{K}_i = \mathbf{Y}_i \boldsymbol{\chi}_i^{-1}$, 成本性能上界 $\Phi^* = \mathbf{z}^T(0) \mathbf{P}_i \mathbf{z}(0) + \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{d}^T(k) \mathbf{d}(k)$.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{21} & \Psi_{31} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} & \Psi_{32} \\ \Psi_{31} & \Psi_{32} & \Psi_{33} \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

其中

$$\Psi_{11} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\chi}_1 & 0 \\ 0 & -\gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{21} = \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{A}}_i \boldsymbol{\chi}_i + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M}_0 \mathbf{Y}_i) \sqrt{\pi_{11}} & \bar{\mathbf{R}} \sqrt{\pi_{11}} \\ (\bar{\mathbf{A}}_i \boldsymbol{\chi}_i + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{M}_0 \mathbf{Y}_i) \sqrt{\pi_{12}} & \bar{\mathbf{R}} \sqrt{\pi_{12}} \end{bmatrix}$$

3 双目标相容性讨论

控制目标(式(2))体现了控制器对外部干扰 $d(k)$ 的抑制作用,目标(式(3))则保证了系统的成本.如果单纯考虑 H_∞ 性能指标 γ 作为系统的控制指标,虽然可以保证系统对外部干扰的敏感性最小,但同时也削弱了控制量 $u(k)$ 的控制作用.为了解决这一矛盾,通常将两者结合考虑使系统既有良好的性能鲁棒性又具有稳定鲁棒性.双目标相容性实际上就是闭环系统(式(3))在满足2.1节提出的3个控制目标的前提下,当外部干扰 $d(k) \neq 0$ 时,选择适当的最优目标函数使成本函数 Φ 有上界且上界最小.

在保成本容错控制器设计中,一般选择成本性能上界 Φ^* 作为优化问题的目标函数.

$$\Phi^* = z^T(0)P_i z(0) + \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} d^T(k)d(k) \quad (9)$$

从式(9)可以看出目标函数包含 H_∞ 性能指标 γ ,因此以 Φ^* 作为目标函数的优化问题则兼顾了控制器对外部干扰的敏感性.另外通过式(9)还可以看出 Φ^* 是否有意义(Φ^* 为确定的正实数)取决于闭环系统的初始状态 $z(0)$ 、初始时延 i 以及外部干扰 $d(k)$ 如何选取.

3.1 外部干扰的处理

在单纯的保成本控制中,对于外部干扰一般有两种处理方法:一种是假设 $d(k) = 0$,不考虑外部干扰对系统的影响;另一种是假设外部干扰平方可积,即 $d(k)$ 在 $(0, +\infty)$ 范围内平方可积, $\sum_{k=0}^{\infty} d^T(k)d(k) < \rho$. 显然这两种方法对于干扰的假设过于理想化,无干扰的实际系统并不存在,而满足平方可积条件的函数亦不常见.

以某型涡扇发动机系统为例,假设其所能容忍的最大阶跃响应时间为 α ,传感器采样周期为 T ,则当 $k > \text{int}(\alpha/T)$ 时系统趋于稳定,其中 int 为取整运算.令

$$\Phi^* = \sum_{k=0}^{\text{int}(\alpha/T)} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Su(k)] \quad (10)$$

若 $d(k)$ 为有界外部干扰,且 $\|d(k)\|_2 \leq \rho$,对式(7)从 $k=0$ 到 $\text{int}(\alpha/T)$ 求和,可得

$$V[\text{int}(\alpha/T)] - V(0) < -\Phi^* + \sum_{i=0}^{\text{int}(\alpha/T)} [\gamma^2 d^T(k)d(k) - y^T(k)y(k)]$$

$$\Phi^* < V(0) + \sum_{i=0}^{\text{int}(\alpha/T)} \gamma^2 d^T(k)d(k) \leq$$

$$\begin{bmatrix} x(0) \\ u(-2) \\ u(-1) \end{bmatrix}^T P_i \begin{bmatrix} x(0) \\ u(-2) \\ u(-1) \end{bmatrix} + \text{int}(\alpha/T) \gamma^2 \rho^2 = \bar{\Phi}^* \quad (11)$$

3.2 初始状态和初始时延的处理

式(11)中 P_i, K_i 与初始时延 i 有关,同时改进成本性能上界 $\bar{\Phi}^*$ 还依赖于系统的初始状态 $[x(0)^T \ u(-2)^T \ u(-1)^T]^T$. 为了避免这种对初始条件的依赖,假定初始状态未知,但分别属于集合 $\Gamma_x = \{x(0) \in \mathbf{R}^n \mid x(0) = \Lambda_x v_0, v_0^T v_0 \leq I\}$, $\Gamma_u = \{u(k) \in \mathbf{R}^n \mid u(k) = \Lambda_u v_k, v_k^T v_k \leq I\}$, $k = -1, -2$, 其中 Λ_x, Λ_u 分别为给定的 $x(k)$ 和 $u(k)$ 初始状态最大值矩阵.由于初始时延 $i \in \Omega = \{1, 2\}$, 令 $\bar{\Lambda} = [\Lambda_x^T \ \Lambda_u^T \ \Lambda_u^T]^T$, 则 $\bar{\Phi}^*$ 变形为

$$\bar{\Phi}^* = \bar{\Lambda}^T P_i \bar{\Lambda} + \bar{\Lambda}^T P_2 \bar{\Lambda} + \text{int}(\alpha/T) \gamma^2 \rho^2 \quad (12)$$

双目标约束下的保成本容错控制器可通过基于线性矩阵不等式约束的凸优化设计方法求解,即通过求解一组线性矩阵不等式的可行解,并在可行解空间内寻找可使 $\bar{\Phi}^*$ 最小的最优解,从而获得控制律的设计参数.

定理3 在执行机构发生故障增益为 M 的随机故障时,对于存在时延和丢包的不确定分布式控制系统(式(1)),如果式(13)表示的凸优化设计问题存在最优解 $\{[(\eta_{\text{lopt}} + \eta_{2\text{opt}} + \text{int}(\alpha/T) \gamma_{\text{opt}}^2 \cdot \rho^2) \mid Y_{1\text{opt}}, Y_{2\text{opt}}, X_{1\text{opt}}, X_{2\text{opt}}, \epsilon_{1\text{opt}}, \epsilon_{2\text{opt}}]\}$, 则 $\bar{\Phi}^*$ 与所有满足 $\gamma \geq \gamma_{\text{opt}}$ 的 H_∞ 性能指标 γ 相容,双目标约束下的最优保成本容错控制律为 $K_{i\text{opt}} = Y_{i\text{opt}} X_{i\text{opt}}^{-1}$ ($i \in \Omega$),最优成本性能上界 $\bar{\Phi}_{\text{opt}}^* = \eta_{1\text{opt}} + \eta_{2\text{opt}} + \text{int}(\alpha/T) \gamma_{\text{opt}}^2 \rho^2$.

$$\min_{Y_i, X_i, \epsilon_1, \epsilon_2 \in i \in \Omega} [\eta_1 + \eta_2 + \text{int}(\alpha/T) \gamma^2 \rho^2]$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \text{式(8)} & i \in \Omega \\ X_i > 0 & i \in \Omega \\ \epsilon_1 > 0 & \epsilon_2 > 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} -\eta_1 & \bar{\Lambda}^T \\ \bar{\Lambda} & -X_1 \end{bmatrix} < 0 \quad \begin{bmatrix} -\eta_2 & \bar{\Lambda}^T \\ \bar{\Lambda} & -X_2 \end{bmatrix} < 0$$

(13)

凸优化问题(式(13))的目标函数是成本性能上界的变化形式.由式(11)可知,成本性能上界 Φ^* 与闭环系统的初始状态 $[x^T(0) \ u^T(-2) \ u^T(-1)]$, H_∞ 性能指标 γ 以及外部干扰上界 ρ

有关. 当约束条件 4(式(13))满足时, $\bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P}_1 \bar{\mathbf{A}} < \eta_1$, $\bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P}_2 \bar{\mathbf{A}} < \eta_2$, 故目标函数 $[\eta_1 + \eta_2 + \text{int}(\alpha/T)\gamma^2 \rho^2]$ 的最小值即为最小成本性能上界.

式(13)是一个具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题, 可利用 Matlab LMI 工具箱中的 mincx 函数求解.

4 仿真及结果分析

选取某型航空发动机在高度 $H=10\text{ km}$, 马赫数 $Ma=1$, 工作于最大状态, 传感器采样周期 $T=20\text{ ms}$ 时的离散状态空间模型(式(14))作为保成本容错控制器设计的标准模型.

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(k) + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}[k - \tau(k)] + \mathbf{R}d(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}[k - \tau(k)] \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.9371 & 0.0013 \\ 0.0382 & 0.9301 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.0118 & 0.0095 \\ 0.0124 & 0.0078 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.0403 \\ 0.0358 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2.387 & -1.479 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} -0.4075 & -0.2871 & -0.0084 & -0.0062 & -0.0006 & -0.0004 \\ -0.3536 & -0.1603 & -0.0062 & -0.0047 & -0.0004 & -0.0003 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} -0.2739 & -0.1924 & 0 & 0 & -0.0069 & -0.0050 \\ -0.2373 & -0.1080 & 0 & 0 & -0.0051 & -0.0038 \end{bmatrix}$$

设定执行机构的故障增益矩阵为 $\mathbf{M}_1 = \text{diag}[0.5, 1.5]$, 系统为零初始状态, 初始控制量 $\dot{m}_t(0)=0, A_8(0)=0$, 对低压转子转速 n_t 做 1% 的阶跃响应, 将本文最优保成本容错控制器与文献[15]设计的最优鲁棒 H_∞ 容错控制器的控制效果进行比较, 结果如图 2、图 3 所示. 从图 2 中可以看出, 当执行机构发生增益为 $\mathbf{M}_1 = \text{diag}[0.5, 1.5]$ 故障时, 两种控制器均能达到满意的控制效果, 闭环系统渐进稳定, 调节时间小于 80 个采样周期(1.6 s). 但本文所设计的控制器在闭环系统到达稳定状态之后存在微小波动, 波动幅度小于 0.02%, 这是因为本文以成本性能上界(式(12))为凸优化问题的目标函数, 该目标函数兼顾了控制器的 H_∞ 性能和成本性能, 得到的 H_∞ 性能指标最优值为 $\gamma_{\text{opt}}=4.65$, 而最优鲁棒 H_∞ 容错控制器以 γ 作为唯一目标函数, 以求对外部干扰的抑

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.2071 & 0.6786 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \text{diag}(0.1, 0.1)$$

$$\mathbf{E}_a = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.02 \\ 0.02 & 0.02 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_b = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = [n_t \quad \pi_t]^T$$

$$\mathbf{u} = [\dot{m}_t \quad A_8]^T$$

$$\mathbf{y} = [n_t \quad \pi_t]^T$$

设故障增益区间为 $(0, 1.5]$, 时延的状态概

$$\text{率转移矩阵 } \Pi = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}.$$

外部干扰 $d(k)$ 为 $[-0.5, 0.5]$ 区间内均匀分布的随机信号, 则 $\rho=0.5$. 设初始状态 $x(0) \leq [5\% \quad 5\%]^T$, $u(-2) \leq [10\% \quad 5\%]$, $u(-1) \leq [10\% \quad 5\%]$, 则 $\bar{\mathbf{A}} = [5 \quad 5 \quad 10 \quad 5 \quad 10 \quad 5]$, 以上初始状态均经过归一化处理.

给定成本函数加权矩阵

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据定理 3 求得, 最优成本性能上界 $\bar{\Phi}_{\text{opt}}^* = 197.9$, $\gamma=4.65$, 当信号传输时延 $\tau=1, \tau=2$ 时, 控制器增益分别为

制作用最小, 得到的 H_∞ 性能指标最优值为 $\gamma_{\text{opt}} = 0.29$, 故本文控制器在干扰抑制能力方面略逊于文献[15].

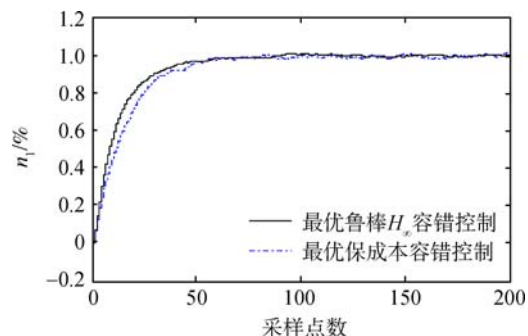


图2 故障增益为 $\mathbf{M}_1$ 时 n_t 阶跃响应

Fig. 2 Step response of n_t when fault gain is $\mathbf{M}_1$

图3为两种控制器在执行机构故障增益为 $\mathbf{M}_1$ 且 n_1 做1%的阶跃时系统控制量的对比,由于控制目标相同,控制量的参考输入也相同,故图3给出的控制量不包含参考输入.从图中可以看出,在最优鲁棒 H_∞ 容错控制器作用下,主燃油流量 $\dot{m}_f$ 峰值为1.56%,尾喷管临界截面积 A_8 峰值为0.348%;在最优保成本容错控制器作用下,主燃油流量 $\dot{m}_f$ 的峰值为0.25%,尾喷管临界截面积 A_8 峰值为0.065%,由此可见在控制目标相同的情况下,本文控制器所需的控制量仅为文献[15]控制器的16.03%和16.93%.

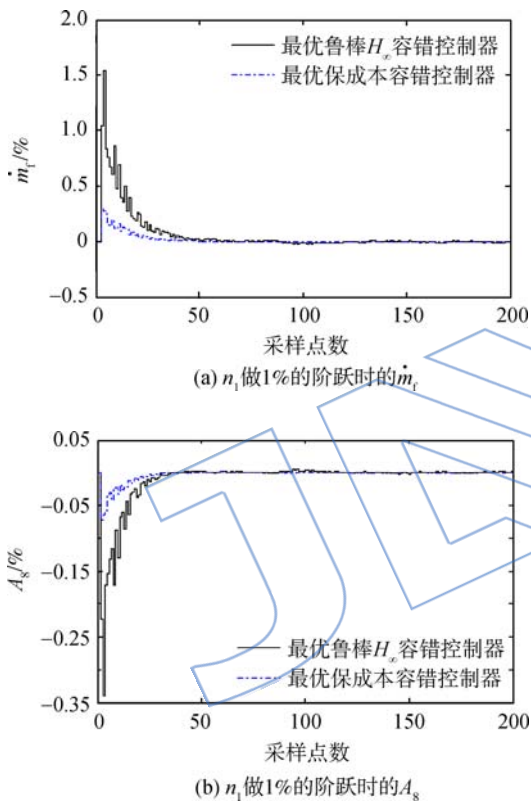


图3 故障增益为 $\mathbf{M}_1$ 时两种控制器的控制信号对比
Fig. 3 Comparison of control signals of two controllers when fault gain is $\mathbf{M}_1$

由以上分析可知,按照本文方法设计的双目标约束最优保成本容错控制器在执行机构发生部分失效故障的情况下,能够保证闭环系统渐进稳定,并使系统具备一定的 H_∞ 性能,同时可有效降低系统控制成本.

将 $\tau(k) = i (i=1, 2, \dots, \infty)$ 依次代入线性矩阵不等式(式(8)),求得控制器所能容忍的时延最大值 $\tau_m(k) = 9T$.为检验本文控制器对区间内其他故障的泛化能力,以及对网络时延的适应性,选择故障增益 $\mathbf{M}_2 = \text{diag}[1, 1, 2]$, $\mathbf{M}_3 = \text{diag}[0.4,$

$0.2, 2]$ 种故障模式和 $\tau_m(k) = 4T$ (网络状况1), $\tau_m(k) = 9T$ (网络状况2), $\tau_m(k) = 2T$ (网络状况3) 3种网络模式对最优保成本容错控制器进行检验,分别对 n_1 做1%的阶跃响应,结果如图4、图5所示.从图中可以看出,当时延最大值 $\tau_m(k) \leq 9T$ 时,最优保成本容错控制器均能保证闭环系统渐进稳定,但控制性能存在差异.当 $\tau_m(k) = 2T$ 时,图4和图5中的 n_1 阶跃响应曲线平滑无波动,无超调;当 $\tau_m(k) = 4T$ 时,图4中的 n_1 阶跃响应曲线在达到稳态之前发生明显波动;当 $\tau_m(k) = 9T$ 时,图4、图5的 n_1 阶跃响应曲线分别出现5%和1%的超调,且波动幅度增大.由此可见,随着时延增大,最优保成本容错控制器性能将在允许范围内出现一定程度下降.

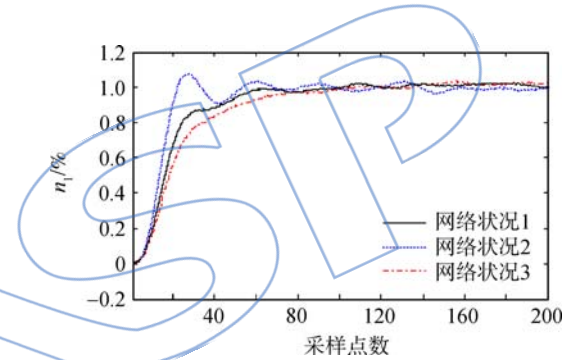


图4 故障增益为 $\mathbf{M}_2$ 时不同网络状况下 n_1 阶跃响应
Fig. 4 Step response of n_1 in different network conditions when fault gain is $\mathbf{M}_2$

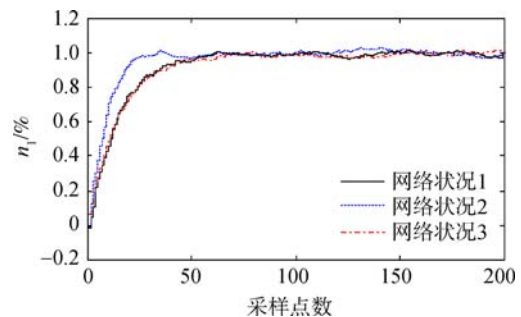


图5 故障增益为 $\mathbf{M}_3$ 时不同网络状况下 n_1 阶跃响应
Fig. 5 Step response of n_1 in different network conditions when fault gain is $\mathbf{M}_3$

5 结 论

本文针对带参数摄动、Markov 时延、数据丢包和外部干扰的航空发动机分布式控制系统,研究了当执行机构发生部分失效故障时的被动容错控制问题.在 H_∞ 性能指标和成本性能指标双重

约束下设计了最优保成本容错控制器. 通过仿真对比得出如下结论:

1) 本文设计的最优保成本容错控制器以控制 H_∞ 性能指标和成本性能指标作为控制器的设计目标,能够在执行机构发生区间内的任一随机故障时保证闭环系统渐进稳定,并具备一定的 H_∞ 性能.

2) 与最优鲁棒 H_∞ 容错控制器相比,双目标约束下的最优保成本容错控制器能够在保证闭环系统动态性能的同时,有效降低系统控制成本,在控制目标相同的情况下,控制量峰值仅为最优鲁棒 H_∞ 容错控制器的 16.03% 和 16.93%.

3) 本文控制器所容忍的最大时延长度为 9 个采样周期,当控制器所能容忍的时延最大值 $\tau_m(k) \leq 9T$ 时,控制器能够保证闭环系统渐进稳定,但随着时延增大,控制器性能将在允许范围内出现一定程度下降.

参考文献:

- [1] 韩笑冬,葛龙,王执铨. 多指标约束下离散时间系统的满意容错控制[J]. 信息与控制, 2008, 37(5): 544-549.
HAN Xiaodong, GE Long, WANG Zhiqian. Satisfactory fault-tolerant control for discrete-time systems with multi-index constraints[J]. Information and Control, 2008, 37(5): 544-549. (in Chinese)
- [2] Zhang D F, Wang Z Q, Hu S S. Robust satisfactory fault-tolerant control of uncertain linear discrete-time systems: an LMI approach[J]. International Journal of Systems Science, 2007, 38(2): 151-165.
- [3] 郭一楠,张芹英,巩敦卫,等. 一类时变时延网络控制系统的鲁棒容错控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 689-692.
GUO Yinan, ZHANG Qinying, GONG Dunwei et al. Robust fault-tolerant control of networked control systems with time-varying delays[J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 689-692. (in Chinese)
- [4] 邓玮,费敏锐. 带有执行器故障的网络控制系统的自适应容错 H_∞ 控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 269-272.
DENG Weihua, FEI Minrui. Adaptive fault-tolerant H_∞ -infinity control for networked control systems with actuator faults[J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(2): 269-272. (in Chinese)
- [5] 罗小元,尚美杰,陈彩莲,等. 基于网络控制的航空器动力系统的容错控制[J]. 控制工程, 2011, 28(2): 171-174.
LUO Xiaoyuan, SHANG Meijie, CHEN Cailian, et al. Fault-tolerant control of spacecraft dynamic system based on control network[J]. Control Engineering of China, 2011, 28(2): 171-174. (in Chinese)
- [6] 彭高丰,马振中,夏明霞,等. 传感器部分失效的网络控制系统 H_∞ 容错控制[J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 58-61.
PENG Gaofeng, MA Zhenzhong, XIA Mingxia et al. Robust H_∞ fault-tolerant control networked control system against sensor partial failure[J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19(11): 58-61. (in Chinese)
- [7] 马跃超,黄丽芳,张庆灵. 时变不确定时滞连续系统的鲁棒 H_∞ 保成本控制[J]. 物理学报, 2007, 56(7): 3744-3752.
MA Yuechao, HUANG Lifang, ZHANG Qingling. Robust guaranteed cost H_∞ control for uncertain time-varying delay system[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(7): 3744-3752. (in Chinese)
- [8] 李炜,曹慧超. 区间快变时延 NCS 鲁棒 H_∞ 保性能容错控制[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(3): 105-110.
LI Wei, CAO Huichao. Robust H_∞ guaranteed fault-tolerant control for networked control system with fast interval time-varying delay[J]. Journal Huazhong University of Science and Technology, 2011, 39(3): 105-110. (in Chinese)
- [9] 李洁坤,穆春来,虞继敏. 一类参数不确定广义时滞系统的 H_∞ 保性能鲁棒控制[J]. 西南大学学报, 2009, 31(7): 38-43.
LI Jiekun, MU Chunlai, YU Jimin. Robust guaranteed cost control for singular systems with time-delay and parameter uncertainty[J]. Journal of Southwest University, 2009, 31(7): 38-43. (in Chinese)
- [10] 沃松林,史国栋,邹云. 不确定广义大系统分散鲁棒 H_∞ 保性能控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 1035-1040.
WO Songlin, SHI Guodong, ZOU Yun. Decentralized robust H_∞ and cost-guaranteed control for uncertain singular large-scale systems[J]. Control Theory and Applications, 2009, 26(9): 1035-1040. (in Chinese)
- [11] 朱其新,胡寿松. 网络控制系统的分析与建模[J]. 信息与控制, 2003, 32(1): 5-8.
ZHU Qixin, HU Shousong. Analysis and modeling of network control systems[J]. Information and Control, 2003, 32(1): 5-8. (in Chinese)
- [12] 彭琛,代冀阳,刘星,等. 网络控制系统随机鲁棒控制律设计方法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 1955-1959, 2000.
PENG Chen, DAI Jiyang, LIU Xing, et al. Stochastic robust control law design for networked control systems[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(8): 1955-1959, 2000. (in Chinese)
- [13] Miyachi M, Ishitobi M, Takahashi N. An LMI approach to observer-based guaranteed cost control[J]. Artificial Life and Robotics, 2008, 12(1): 276-279.
- [14] Xie L. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertain[J]. International Journal of Control, 1996, 63(4): 741-750.
- [15] 姜翀,张庆灵. 随机时延网络控制系统的 Markov 建模及 H_∞ 控制[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2241-2244.
JIANG Chong, ZHANG Qingling. H_∞ control for Markov model of NCSs with stochastic delay[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(11): 2241-2244. (in Chinese)