基于 MMST 分组的一类 MIMO 非线性系统执行器故障自适应补偿控制

张绍杰 [1] 邱相玮 [1] 刘春生 [1] 胡寿松 [1]

摘 要 在多输入多输出 (Multiple-input multiple-output, MIMO) 非线性系统的执行器故障容错控制问题中, 控制器能够处理的执行器故障集合的大小与执行器分组方法有很大关系. 为扩大系统可处理的执行器故障集合, 本文针对一类具有执行器故障的 MIMO 非线性最小相位系统, 提出基于多模型切换 (Multiple model switching and tuning, MMST) 执行器分组的自适应补偿控制方法. 考虑系统的执行器卡死、部分失效和完全失效故障, 在微分几何反馈线性化的基础上, 研究基于多模型切换的执行器分组切换指标和切换策略, 设计了基于反演控制的自适应补偿跟踪控制律, 所设计的控制律能保证系统在执行器故障时闭环稳定, 渐近跟踪给定的参考信号, 且提出的分组方法扩大了可补偿的执行器故障集合. 仿真结果表明了本文设计方法的有效性.

关键词 多输入多输出非线性系统, 执行器故障, 反演控制, 自适应补偿, 执行器分组, 多模型切换

引用格式 张绍杰, 邱相玮, 刘春生, 胡寿松. 基于 MMST 分组的一类 MIMO 非线性系统执行器故障自适应补偿控制. 自动化学报, 2014, **40**(11): 2445−2455

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.02445

Adaptive Compensation Control Based on MMST Grouping for a Class of MIMO Nonlinear Systems with Actuator Failures

ZHANG Shao-Jie[1] QIU Xiang-Wei[1] LIU Chun-Sheng[1] HU Shou-Song[1]

Abstract For multiple-input multiple-output (MIMO) nonlinear systems fault tolerant control problems, compensable actuator failure sets are highly interrelated with the actuator grouping method. In order to enlarge the set of compensable actuator failures, an adaptive compensation control scheme with multiple model switching and tuning (MMST) actuator grouping is proposed for a class of nonlinear MIMO minimum phase systems with multiple actuator failures. Based on differential geometry feedback linearization, a backstepping adaptive compensation control law is designed for the systems with actuators locked in space or losing of effectiveness, and a new actuator grouping scheme based on MMST which enlarges the set of compensable actuator failures is proposed. The proposed control law can guarantee that the closed-loop systems with actuator failures are stable and asymptotically track of the given reference signals. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words Multiple-input multiple-output (MIMO) nonlinear systems, actuator failure, backstepping control, adaptive compensation, actuator grouping, multiple model switching and tuning (MMST)

Citation Zhang Shao-Jie, Qiu Xiang-Wei, Liu Chun-Sheng, Hu Shou-Song. Adaptive compensation control based on MMST grouping for a class of MIMO nonlinear systems with actuator failures. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(11): 2445−2455

工程中控制系统的传感器、执行器和控制对象等都不可避免地会发生故障, 其中执行器由于长期频繁地执行任务, 是系统中最易发生故障的部件. 执行器故障会对系统的正常工作产生很大的影响, 导致系统向无法预测的方向运行甚至使系统失去稳定性, 所以执行器故障时的容错控制具有重要的理论意义和工程应用价值. 容错控制涉及故障诊断与隔离[1−6]、重构控制等技术, 主要分为被动容错控制和主动容错控制[7] 两大类, 主动容错控制相对于被动容错控制具有明显的优势, 得到了广泛的研究. 主动容错控制涉及的重构控制技术主要有线性二次型控

收稿日期 2013-07-22 录用日期 2013-12-16
Manuscript received July 22, 2013; accepted December 16, 2013
国家自然科学基金 (61074063, 61473147), 中央高校基本科研业务费 (NZ2012007, NS2013032) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61074063, 61473147), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (NZ2012007, NS2013032)
本文责任编委 姜斌
Recommended by Associate Editor JIANG Bin
1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 210016
1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

制[8]、多模型控制[9]、模型参考控制[10]、滑模控制[11]和控制分配[12] 等方法, 其中自适应补偿控制[13−16]不需要故障诊断和隔离单元, 可避免故障诊断误差的影响, 且系统的实时性不会受到影响. 基于这些优点, 以 Li 等[17]、Tao 等[18−21]、Wang 等[22] 为代表的国内外学者对自适应补偿控制进行了广泛的研究和应用. 文献 [17] 为一类可全状态线性化的非线性系统设计了模糊自适应补偿律, 但因其要求的非线性函数未知, 故仅能解决有限的系统执行器故障跟踪控制问题; 文献 [19] 针对一类具有组合执行器故障的多输入单输出 (Multi-input single-output, MISO) 非线性最小相位系统设计了反演自适应补偿律, 闭环系统能够稳定和渐近跟踪参考信号, 且具有较好的动态性能; 文献 [20−21] 在文献 [19] 的基础上将控制对象拓展为 MIMO 非线性最小相位系统, 设计的控制律能使系统稳定且渐近跟踪参考信号. 对系统执行器进行分组, 以满足多种执行器故障组合的容错控制要求, 是 MIMO 系统执行器故障容错控制设计相较 MISO 系统的主要难题之一, 文献 [20−21] 对此问题进行了初步研究. 文献 [16] 采用执行器固定分组的方法, 在控制律设计前将执行器分组完成, 在系统运行时分组保持不变. 因仅采用一种分组, 故只能解决较少的执行器故障组合的容错控制问题. 文献 [21] 中采用了执行器虚拟分组方法, 利用设计自适应律的方法在不同执行器分组之间选择, 扩大了可补偿的执行器故障组合. 但由于存在多个不确定参数相乘的情况, 设计分组选择参数的自适应律较为复杂, 且其仅考虑了执行器卡死故障, 故不能适用其他类型的执行器故障. 结合上述相关研究成果的分析, 本文针对 MIMO 仿射非线性系统的执行器故障自适应补偿控制问题开展研究. 考虑执行器发生卡死、部分失效及其组合多种故障类型, 并改进执行器故障分组方法, 设计自适应补偿控制律, 扩大系统可容错的执行器故障类型和执行器故障组合形式. 本文提出的执行器故障分组方法源于文献 [23−24] 的多模型切换 (Multiple model switching and tuning, MMST) 逼近方法, 文献 [23] 分别针对线性与非线性系统提出了不同的 MMST 模型库建立方法, 并讨论了其中的差异; 文献 [24] 为一类线性 MIMO 系统的执行器故障设计了基于 MMST 方法的容错控制律. 本文结合执行器故障特征将该方法用于执行器故障分组, 提出的执行器分组方法使控制器可快速准确地切换到合适的分组, 并对故障系统进行变换, 利用反演控制自适应补偿设计控制律, 能保证系统在执行器故障时闭环稳定, 且能渐近跟踪给定的参考信号.

1 问题描述

考虑如下描述的一类 MIMO 非线性系统

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + \sum_{i=1}^{m} \boldsymbol{g}_i(\boldsymbol{x}) u_i \\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})\end{aligned} \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n$ 为系统的状态向量; $u_i \in \mathbf{R}$, $i = 1, \cdots, m$ 为系统输入; $\boldsymbol{y} = [y_1, \cdots, y_q]^{\mathrm{T}}$ $(q \geq 2)$ 为系统输出; $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \in \mathbf{R}^n$, $\boldsymbol{g}_i(\boldsymbol{x}) \in \mathbf{R}^n$, $i = 1, \cdots, m$ 和 $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}) \in \mathbf{R}^q$ 是关于系统状态的充分光滑的非线性函数; 并记 $g = [\boldsymbol{g}_1, \cdots, \boldsymbol{g}_m] \in \mathbf{R}^{n\times m}$.

参考文献 [18] 中的执行器故障表示方法, 本文将执行器表示为

$$\begin{aligned}&u_i = \lambda_i u_{ci}(\boldsymbol{x}, t) + \bar{u}_i \\ &\mathrm{Rank}\left(\mathrm{diag}\{\lambda_i, \bar{u}_i\}\right) \leq 1, \\ &\qquad t \geq t_i,\ \ 0 \leq \lambda_i \leq 1,\ \ i = 1, \cdots, m\end{aligned} \tag{2}$$

其中, u_i 是第 i 个执行器的实际输出; u_{ci} 是控制器对第 i 个执行器的控制输入; $\lambda_i \in \mathbf{R}$ 表示系统第 i 个执行器发生部分失效故障时有效部分的比例; $\bar{u}_i \in \mathbf{R}$ 表示第 i 个执行器的卡死故障的卡死位置. 式 (2) 可表示所有执行器卡死、部分失效的组合故障情况:

1) $\lambda_i = 1$, $\bar{u}_i = 0$, 即 $u_i = u_{ci}(t)$, 表明系统第 i 个执行器没有发生故障;

2) $0 < \lambda_i < 1$, $\bar{u}_i = 0$, 即 $u_i = \lambda_i u_{ci}(t)$, 表明系统第 i 个执行器发生部分失效故障, 如 $\lambda_i = 0.7$ 说明系统第 i 个执行器失效 30 %;

3) $\bar{u}_i \neq 0$, $\lambda_i = 0$, 即 $u_i = \bar{u}_i$, 表明系统第 i 个执行器发生卡死在 $\bar{u}_i$ 位置的卡死故障;

4) $\lambda_i = 0$, $\bar{u}_i = 0$, 即 $u_i = 0$, 表明系统第 i 个执行器发生完全失效故障.

执行器发生故障 (2) 时, 系统控制信号 $\boldsymbol{u} = [u_1, \cdots, u_m]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^m$ 可表示为

$$\boldsymbol{u} = \lambda \boldsymbol{u}_c(t) + \bar{\boldsymbol{u}} \tag{3}$$

其中, $\lambda = \mathrm{diag}\{\lambda_1, \cdots, \lambda_m\} \in \mathbf{R}^{m\times m}$; $\bar{\boldsymbol{u}}(t) = [\bar{u}_1(t), \cdots, \bar{u}_m(t)]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^m$; $\boldsymbol{u}_c(t) = [u_{c1}(t), \cdots, u_{cm}(t)]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^m$ 是待设计的控制输入.

假设 1. 在系统 (1) 发生执行器故障 (2) 时, 仍能够通过执行器有效部分或冗余的执行器使系统达到控制目的.

假设 1 是系统可以设计容错控制律的前提. 将式 (3) 代入系统 (1), 可得

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})(\lambda \boldsymbol{u}_c(t) + \bar{\boldsymbol{u}})\\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})\end{aligned} \tag{4}$$

取微分同胚映射 $\boldsymbol{T}(\boldsymbol{x}) = [\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^n$, 其中 $\boldsymbol{\xi} = [\xi_{11}, \xi_{12}, \cdots, \xi_{1\rho_1}, \xi_{21}, \cdots, \xi_{q\rho_q}]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^{\rho_1+\cdots+\rho_q}$, $\xi_{ij} = L_{f(x)}^{j-1} h_i(x)$, $i = 1, \cdots, q$, $j = 1, \cdots, \rho_i$, $\boldsymbol{\eta} \in \mathbf{R}^{n-(\rho_1+\rho_2+\cdots+\rho_q)}$. 系统 (4) 可通过映射转换为外部动态和内部动态两部分, 其中外部动态部分为

$$\begin{aligned}&\dot{\xi}_{i1} = \xi_{i2}\\ &\dot{\xi}_{ij} = \xi_{i(j+1)}\\ &\dot{\xi}_{i\rho_i} = \phi_i(\xi, \eta) + \boldsymbol{\beta}_i \lambda \boldsymbol{u}_c(t) + \boldsymbol{\beta}_i \bar{\boldsymbol{u}},\\ &\qquad i = 1, \cdots, q,\ \ j = 2, \cdots, \rho_i - 1\end{aligned} \tag{5}$$

内部动态部分为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}) + \bar{\boldsymbol{\Phi}}_\sigma(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta})\bar{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{\Phi}_\sigma(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta})\boldsymbol{u}_c(t) \tag{6}$$

式中, $\phi_i = L_{f(x)}^{\rho_i} h_i(\boldsymbol{x})$, $i = 1, \cdots, q$; $\boldsymbol{\beta}_i = [L_{\boldsymbol{g}_1} L_{f(x)}^{\rho_i - 1} h_i(\boldsymbol{x}), \cdots, L_{\boldsymbol{g}_m} L_{f(x)}^{\rho_i - 1} h_i(\boldsymbol{x})] \in \mathbf{R}^{1\times m}$.

假设 2. 系统 (5) 和系统 (6) 零动态稳定, 即系统 (1) 为最小相位系统.

本文研究目的是为系统 (1) 设计基于 MMST 分组切换方法的自适应补偿控制律, 使闭环系统在发生多种类型的执行器故障组合 (2) 时, 仍能保持稳定且能渐近跟踪给定的参考信号.

2　基于 MMST 的执行器分组

为解决多执行器控制组合的问题, 需参考 β_i 与执行器的物理意义, 将 m 个输入分在 q 个组中. 假设分组为

$$\begin{aligned}\varpi = \{&\{j_{11}, \cdots, j_{1d_1}\}, \cdots, \{j_{k1}, \cdots, j_{kd_k}\}, \cdots,\\ &\{j_{q1}, \cdots, j_{qd_q}\}\}\end{aligned} \tag{7}$$

上式表示 d_k 个输入 $u_{j_{k1}}, u_{j_{k2}}, \cdots, u_{j_{kd_k}}$ 分在 k 组, 其中 $d_1 + d_2 + \cdots + d_q = m$, 且一个执行器能且只能分在一个组. 根据分组结果 (7) 可将 $\boldsymbol{u}_c(t)$ 写成

$$\boldsymbol{u}_c(t) = B \cdot \boldsymbol{w}(t) \tag{8}$$

其中,

$$\boldsymbol{w}(t) = [w_1(t), \cdots, w_q(t)]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^q$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mq} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{m\times q}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & u_{ci}(t) \text{ 不在第 } j \text{ 组} \\ b_j, & u_{ci}(t) \text{ 在第 } j \text{ 组} \end{cases},\ i = 1, \cdots, m,\ j = 1, \cdots, q,$$

其中 b_j 为输入可调比例参数, 用来调节第 j 组执行器对系统控制输入的影响. 将式 (8) 代入系统 (5) 可得

$$\begin{aligned}&\dot{\xi}_{i1} = \xi_{i2}\\ &\dot{\xi}_{ij} = \xi_{i(j+1)}\\ &\dot{\xi}_{i\rho_i} = \phi_i(\xi, \eta) + \boldsymbol{\beta}_i \lambda B \boldsymbol{w}(t) + \boldsymbol{\beta}_i \bar{u},\\ &\qquad i = 1, \cdots, q,\ \ j = 1, \cdots, \rho_i - 1\end{aligned} \tag{9}$$

本文考虑的执行器故障包括部分失效 (包括完全失效) 和卡死. 用 $\boldsymbol{\sigma}_\mu = [\sigma_{\mu 1}, \cdots, \sigma_{\mu m}] \in \mathbf{R}^m$, $\mu = 1, \cdots, N$, $N = \sum_{i=1}^{m} C_m^i$ 表示执行器的卡死故障情况, 其中 N 是可能发生的执行器卡死故障情况的数量. 在 σ_μ 故障情况下第 i, $i = 1, \cdots, m$ 个执行器发生卡死故障则 $\sigma_{\mu i} = 1$, 没有发生故障或发生部分失效故障则 $\sigma_{\mu i} = 0$. 设 $\Pi_\mu = \{u_{\mu 1}, \cdots, u_{\mu p}\}$, $\mu = 0, \cdots, N$ 是故障 σ_μ 情况下 p 个发生卡死故障执行器的集合. 设 $E = \{\sigma_1, \cdots, \sigma_L\}$ 为系统可补偿的故障集合, 其中 L 是 N 个可能发生的执行器卡死故障情况中可补偿的故障情况数量. 在分析被控系统和故障 σ_μ 的基础上, 为每种故障情况提出相应适用的执行器分组 ϖ_μ.

MMST 执行器分组方法是在系统无故障时采用分组 ϖ_0, 在系统发生卡死故障 σ_μ, $\mu = 1, \cdots, L$ 时, 通过第 μ 个模型的逼近残差 $\hat{\boldsymbol{e}}_\mu \in \mathbf{R}^n$ 计算性能指标 $I_\mu \in \mathbf{R}$, 再在决策环节中根据性能指标切换到故障对应的执行器分组 ϖ_μ, 从而可以处理该类的故障形式. 设分组选择系数为 $\gamma_\mu \in \mathbf{R}$, 当采用分组 ϖ_μ 时, $\gamma_\mu = 1$, 否则 $\gamma_\mu = 0$. 本文采用的基于 MMST 的分组结构如图 1 所示.

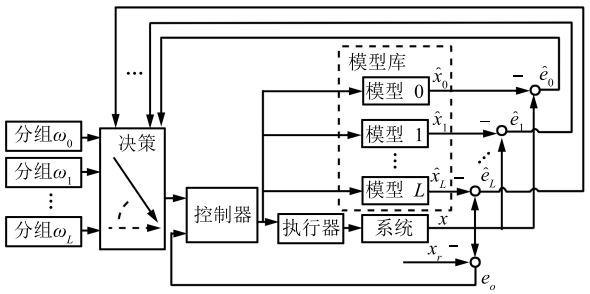


图 1　MMST 分组结构图

Fig. 1　Scheme of the MMST grouping

2.1　故障辨识模型库的建立

MMST 分组的模型库建立方法主要有固定模型和自适应模型, 由于执行器失效比例和卡死位置

是不确定参数, 如用固定模型建立方法, 则需较多的模型数量, 增加了计算量, 影响系统的实时性, 故本文选取自适应模型建立方法. 首先确定模型的不确定参数 (即故障的不确定参数), 然后设计自适应参数调整律对其进行估计, 使得辨识模型能渐近逼近其对应故障情况下的系统状态.

建立模型库时要确保模型库能够对应每种可补偿的故障形式, 在本文的辨识模型的执行器输入表达方式中, 非卡死故障执行器输入项都乘以一个不确定失效系数. 系统在可补偿的各种执行器故障情况下可表示如下

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_0^* &= \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})\lambda_0^*\boldsymbol{u}\\ \dot{\boldsymbol{x}}_\mu^* &= \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})(\lambda_\mu^*\boldsymbol{u} + \bar{\boldsymbol{u}}_\mu^*),\\ &\qquad \mu = 1,\cdots,L\end{aligned} \tag{10}$$

其中, 下标 0 表示无卡死故障情况, $\boldsymbol{x}_\mu^* \in \mathbf{R}^n$, $\mu = 0,1,\cdots,L$ 为各种可补偿故障情况下的系统状态, $\lambda_\mu^* \in \mathbf{R}^{m\times m}$ 和 $\bar{\boldsymbol{u}}_\mu^* \in \mathbf{R}^m$ 分别是故障 σ_μ 情况下的失效比例矩阵和卡死位置矩阵.

对应于式 (10) 中各种故障情况设计辨识模型为

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_0 &= \Lambda_0\hat{\boldsymbol{e}}_0 + \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})\hat{\lambda}_0^*\boldsymbol{u}\\ \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_\mu &= \Lambda_\mu\hat{\boldsymbol{e}_\mu} + \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})(\hat{\lambda}_\mu^*\boldsymbol{u} + \hat{\bar{\boldsymbol{u}}}_\mu^*),\\ &\qquad \mu = 1,\cdots,L\end{aligned} \tag{11}$$

其中, $\hat{\boldsymbol{e}}_\mu = \hat{\boldsymbol{x}}_\mu - \boldsymbol{x}$, $\mu = 0,1,\cdots,L$, $\hat{\lambda}_\mu^*$ 和 $\hat{\bar{\boldsymbol{u}}}_\mu^*$ 是 λ_μ^* 和 $\bar{\boldsymbol{u}}_\mu^*$ 的估计值, $\Lambda_\mu \in \mathbf{R}^{n\times n}$ 为主对角线元素为负数的对角矩阵. 将辨识模型 (11) 与系统 (4) 相减得辨识模型逼近残差系统为

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{e}}}_0 &= \Lambda_0\hat{\boldsymbol{e}}_0 + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})\tilde{\lambda}_0^*\boldsymbol{u}\\ \dot{\hat{\boldsymbol{e}}}_\mu &= \Lambda_\mu\hat{\boldsymbol{e}}_\mu + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})(\tilde{\lambda}_\mu^*\boldsymbol{u} + \tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_\mu^*),\\ &\qquad \mu = 1,\cdots,L\end{aligned} \tag{12}$$

其中, $\tilde{\lambda}_\mu^* = \hat{\lambda}_\mu^* - \lambda_\mu$; $\tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_\mu^* = \hat{\bar{\boldsymbol{u}}}_\mu^* - \bar{\boldsymbol{u}}_\mu$, $\mu = 1,\cdots,L$.

2.2 MMST 参数自适应估计及切换策略设计

设计故障辨识模型中自适应参数调整律为

$$\begin{aligned}&\dot{\hat{\lambda}}_{\mu i}^* = \mathrm{Proj}_{(\lambda_{\mu\min},1)}\left\{-\frac{1}{H_i}\hat{\boldsymbol{e}}_\mu^{\mathrm{T}}g(\boldsymbol{x})N_iu\right\}\\ &\hat{\lambda}_{\mu i}^*(0) \in [\lambda_{\mu\min},1],\ \ \mu = 1,\cdots,L,\\ &\qquad i = 1,\cdots,m \text{ 且 } u_{\mu i} \notin \Pi_\mu\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}&\dot{\hat{\bar{\boldsymbol{u}}}}_{\mu i}^* = \mathrm{Proj}_{(\bar{\boldsymbol{u}}_{\mu\min},\bar{\boldsymbol{u}}_{\mu\max})}\left\{-\hat{\boldsymbol{e}}_\mu^{\mathrm{T}}g(\boldsymbol{x})\boldsymbol{Q}_i\right\}\\ &\hat{\bar{\boldsymbol{u}}}_{\mu i}^*(0) \in [\bar{\boldsymbol{u}}_{\mu\min},\bar{\boldsymbol{u}}_{\mu\max}],\ \ \mu = 1,\cdots,L,\\ &\qquad i = 1,\cdots,m \text{ 且 } u_{\mu i} \in \Pi_\mu\end{aligned} \tag{14}$$

其中, $0 < \lambda_{\mu\min} < 1$, $\bar{\boldsymbol{u}}_{\mu\min} < \bar{\boldsymbol{u}}_{\mu\max}$; $N_i \in \mathbf{R}^{m\times m}$ 是主对角线第 i 个元素为 1 其他元素为 0 的对角矩阵, $\boldsymbol{Q}_i \in \mathbf{R}^m$ 是第 i 个元素为 1 其他元素为 0 的向量. 在该自适应参数调整律作用下, 在发生故障 σ_μ, $\mu = 1,\cdots,L$ 时, 对应的故障辨识模型可以渐近跟踪系统状态, 即 $\lim_{t\to\infty}\hat{\boldsymbol{e}}_\mu = 0$.

设计在各种分组之间切换的性能指标为

$$\begin{aligned}I_\mu = {}& c_1\left\|\hat{\boldsymbol{e}}_\mu(t)\right\|^2 +\\ & c_2\int_{t_o}^{t}\exp(-l(t-\tau))\left\|\hat{\boldsymbol{e}}_\mu(t)\right\|^2\mathrm{d}\tau,\\ & \qquad \mu = 0,\cdots,L\end{aligned} \tag{15}$$

其中, $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $l > 0$, t_0 在没有发生切换时为 0, 否则等于最近一次发生切换的时间. 在计算的同时比较性能指标 I_μ, $\mu = 0,\cdots,L$ 的大小, 并切换至最小性能指标对应的分组. 将切换结果代入系统中可得

$$\begin{aligned}&\dot{\xi}_{i1} = \xi_{i2}\\ &\dot{\xi}_{ij} = \xi_{i(j+1)}\\ &\dot{\xi}_{i\rho_i} = \phi_i(\xi,\eta) + \boldsymbol{\beta}_i\lambda\sum_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu\boldsymbol{B}_\mu\boldsymbol{w}(t) + \boldsymbol{\beta}_i\bar{\boldsymbol{u}},\\ &\qquad i = 1,\cdots,q,\ \ j = 2,\cdots,\rho_i - 1\end{aligned} \tag{16}$$

定理 1. 对于 MIMO 非线性系统 (1), 利用故障辨识模型自适应参数调整律 (13) 和 (14) 和切换策略 (15) 的 MMST 分组方法, 系统发生执行器故障 2) 时, 辨识模型可渐近逼近故障系统状态.

证明. 在 $t = 0$ 时刻, $\hat{\boldsymbol{x}}_\mu(0) = \boldsymbol{x}(0)$, $\mu = 0,\cdots,L$. 在系统没有发生卡死故障 (即系统无故障或只有部分失效故障) 时, $\bar{\boldsymbol{u}}_0^* = 0$, 选择 Lyapunov 函数 $V_0 = \frac{1}{2}(\hat{\boldsymbol{e}}_0^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{e}}_0 + \mathrm{tr}(\tilde{\lambda}_0^*H\tilde{\lambda}_0^*))$; 发生执行器故障 σ_i, $i = 1,\cdots,L$ 时, $\hat{e}_i$ 的 Lyapunov 函数为

$$V_i = \frac{1}{2}\left(\hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{e}}_i + \mathrm{tr}(\tilde{\lambda}_i^*H\tilde{\lambda}_i^*) + \tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_i^*T\tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_i^*\right) \tag{17}$$

其中, $H = \mathrm{diag}\{H_1,\cdots,H_m\} > 0$ 是待定的正定矩阵. 对 V_i 求导可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_i = {}& \hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}\Lambda_i\hat{\boldsymbol{e}}_i + \hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}g(\boldsymbol{x})\left(\tilde{\lambda}_i^*\boldsymbol{u} + \tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_i^*\right) +\\ & \mathrm{tr}\left(\dot{\tilde{\lambda}}_i^*H\tilde{\lambda}_i^*\right) + \dot{\tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}}_i^{*\mathrm{T}}\tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_i^* =\\ & \hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}\Lambda_i\hat{\boldsymbol{e}}_i + \hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}g(\boldsymbol{x})\times\end{aligned}$$

$$\left(\sum_{j=1,u_j\notin\Pi_i}^{m}\tilde{\lambda}_{ij}^{*}N_j\boldsymbol{u}+\sum_{j=i1}^{ip}\tilde{\bar{u}}_{ij}^{*}\boldsymbol{Q}_j\right)+$$
$$\sum_{j=1,u_j\notin\Pi_i}^{m}\dot{\tilde{\lambda}}_{ij}^{*}H_j\tilde{\lambda}_{ij}^{*}+\sum_{j=i1}^{ip}\dot{\tilde{\bar{u}}}_{ij}^{*}\tilde{\bar{u}}_{ij}^{*}=$$
$$\hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}\Lambda_i\hat{\boldsymbol{e}}_i+\sum_{j=1,u_j\notin\Pi_i}^{m}\tilde{\lambda}_{ij}^{*}\left(\hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}g(\boldsymbol{x})N_j\boldsymbol{u}+\dot{\tilde{\lambda}}_{ij}^{*}H_j\right)+$$
$$\sum_{j=i1}^{ip}\tilde{\bar{u}}_{ij}^{*}\left(\hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}g(\boldsymbol{x})\boldsymbol{Q}_j+\dot{\tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}}_{ij}^{*}\right)\tag{18}$$

将自适应参数调整律 (13) 和 (14) 代入上式可得

$$\dot{V}_i=\hat{\boldsymbol{e}}_i^{\mathrm{T}}\Lambda_i\hat{\boldsymbol{e}}_i\le 0\tag{19}$$

可知辨识模型可以渐近逼近故障系统状态, 即 $\lim_{t\to\infty}\hat{\boldsymbol{e}}_i=0$, 由切换性能指标 I_i 中指数递减函数 $\exp(-l(t-\tau))$ 可得 $\lim_{t\to\infty}I_i=0$, 而其他故障辨识模型的切换性能指标 I_j, $j=0,1,\cdots,L$, $j\neq i$ 在控制作用和积分项作用下会大于 0, 所以根据切换策略将选择与当前故障对应的分组方法, 即 $\gamma_i=1$, $\gamma_j=0$, $j=0,1,\cdots,L$, $j\neq i$. □

3　控制律设计

取 $\boldsymbol{y}_r(t)=[y_{r1},\cdots,y_{rq}]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^q$ 为系统参考输出, $e_i(t)=y_i(t)-y_{ri}(t)$, $i=1,\cdots,q$ 为跟踪系统的输出残差, 则跟踪控制系统的状态方程可表示为

$$\begin{aligned}&\dot{e}_i=\xi_{i2}-\dot{y}_{ri}\\&\dot{\xi}_{ij}=\xi_{i(j+1)}\\&\dot{\xi}_{i\rho_i}=\phi_i+\boldsymbol{\beta}_i\lambda\sum_{\mu=0}^{L}\boldsymbol{\gamma}_\mu B_\mu\boldsymbol{w}(t)+\boldsymbol{\beta}_i\bar{\boldsymbol{u}},\\&\qquad i=1,\cdots,q,\ \ j=2,\cdots,\rho_i-1\end{aligned}\tag{20}$$

为系统 (20) 设计反演控制律, 应用变量代换为

$$\begin{aligned}&Z_{i1}=e_i\\&Z_{ij}=\xi_{ij}-\alpha_{i(j-1)},\\&\qquad i=1,\cdots,q,\ \ j=2,\cdots,\rho_i\end{aligned}\tag{21}$$

设计反演参数为

$$\begin{aligned}&\alpha_{i1}=-c_{i1}Z_{i1}+\dot{y}_{r1}\\&\alpha_{ij}=-Z_{i(j-1)}-c_{ij}Z_{ij}+\dot{\alpha}_{i(j-1)}\\&\alpha_{i\rho_i}=-Z_{i(\rho_i-1)}-c_{i\rho_i}Z_{i\rho_i}-\phi_i(\xi,\eta)+\dot{\alpha}_{i(\rho_i-1)},\\&\qquad i=1,\cdots,q,\ \ j=2,\cdots,\rho_i-1\end{aligned}\tag{22}$$

其中, $c_{ij}>0$, $i=1,\cdots,q$, $j=1,\cdots,\rho_i$, 由反演控制律 (21) 可得反演参数系统为

$$\begin{aligned}&\dot{Z}_{i1}=-c_{i1}Z_{i1}+Z_{i2}\\&\dot{Z}_{ij}=-c_{ij}Z_{ij}+Z_{i(j+1)}-Z_{i(j-1)}\\&\dot{Z}_{i\rho_i}=\phi_i+\boldsymbol{\beta}_iK_1\sum_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu B_\mu\boldsymbol{w}(t)+\boldsymbol{\beta}_iK_2-\dot{\alpha}_{i(\rho_i-1)},\\&\qquad i=1,\cdots,q,\ \ j=2,\cdots,\rho_i-1\end{aligned}\tag{23}$$

其中, $K_1=\lambda$, $K_2=\bar{u}$. 设 $\bar{\beta}=[\boldsymbol{\beta}_1^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{\beta}_q^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^{q\times m}$, $G(\boldsymbol{x})=\bar{\beta}K_1B$, 为便于自适应参数调整律的设计, 将 $G(\boldsymbol{x})$ 变换为

$$G(\boldsymbol{x})=\bar{\beta}\left(\sum_{l=1}^{m}K_{1l}N_l\right)B\tag{24}$$

其中, $K_1=\mathrm{diag}\{K_{11},\cdots,K_{1m}\}=\sum_{l=1}^{m}K_{1l}N_l$; $K_{1l}=\lambda_l$; $N_l\in\mathbf{R}^{m\times m}$, $l=1,\cdots,m$ 是主对角线第 l 个元素为 1 且其他元素为 0 的对角矩阵. 要求最终设计的控制律 $\boldsymbol{w}(t)$ 满足下式

$$G(\boldsymbol{x})\cdot\boldsymbol{w}(t)=\begin{bmatrix}\alpha_{1\rho_1}-\boldsymbol{\beta}_1K_2\\\vdots\\\alpha_{q\rho_q}-\boldsymbol{\beta}_qK_2\end{bmatrix}\tag{25}$$

假设 3. 矩阵 $G(\boldsymbol{x})$ 非奇异.

假设 3 是控制律存在的前提. 设 $\hat{G}(\boldsymbol{x})$ 是 $G(\boldsymbol{x})$ 的估计值, 选择适当的自适应参数调整律可保证 $\hat{G}(\boldsymbol{x})$ 非奇异. 由于故障参数 K_1,K_2 为未知量, 故设 $\hat{K}_{1l}$, $\hat{K}_2$ 为 K_{1l}, K_2 的估计值. 代入式 (25) 可得系统控制律为

$$\boldsymbol{w}(t)=(\boldsymbol{\beta}\sum_{l=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l\sum_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu\boldsymbol{B}_\mu)^{-1}\begin{bmatrix}\alpha_{1\rho_1}-\boldsymbol{\beta}_1\hat{K}_2\\\vdots\\\alpha_{q\rho_q}-\boldsymbol{\beta}_q\hat{K}_2\end{bmatrix}\tag{26}$$

设计的自适应参数调整律为

$$\dot{\hat{K}}_{1l}=\begin{cases}\dfrac{1}{\Gamma_{1l}}\displaystyle\sum_{i=1}^{q}Z_{i\rho_i}\boldsymbol{\beta}_i\sum_{\mu=0}^{L}N_l\gamma_\mu\boldsymbol{B}_\mu\boldsymbol{w}(t), & |\chi|>a\\\dfrac{1}{\Gamma_{1l}}\displaystyle\sum_{i=1}^{q}Z_{i\rho_i}\boldsymbol{\beta}_i\sum_{\mu=0}^{L}N_l\gamma_\mu\boldsymbol{B}_\mu\boldsymbol{w}(t),\\\qquad\chi=a\ \text{且}\ \dot{\chi}\ge 0\ \text{或}\ \chi=-a\ \text{且}\ \dot{\chi}\le 0\\0, \quad \chi=a\ \text{且}\ \dot{\chi}<0\ \text{或}\ \chi=-a\ \text{且}\ \dot{\chi}>0\end{cases}\tag{27}$$

$$\dot{\hat{K}}_2 = \sum_{i=1}^{q} Z_{i\rho_i}\Gamma_2\beta_i{}^{\mathrm{T}} \tag{28}$$

式中, $\Gamma_1 = \mathrm{diag}\{\Gamma_{11}, \cdots, \Gamma_{1m}\} \in \mathbf{R}^{m\times m} > 0$, $\Gamma_2 \in \mathbf{R}^{m\times m} > 0$ 为待定的正定增益对角矩阵; χ 是 $\hat{G} = \bar{\boldsymbol{\beta}}(\sum_{l=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l)\sum_{\mu=1}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu$ 主对角线上绝对值最小的元素; $\dot{\chi}$ 是 $\bar{\beta}(\sum_{l=1}^{m}\dot{\hat{K}}_{1l}N_l)\sum_{\mu=1}^{L}\gamma_\mu B_\mu$ 主对角线上与绝对值最小元素 χ 对应的元素; 设 b 是 $G(\boldsymbol{x})$ 主对角线上绝对值的最小值, $G(\boldsymbol{x})$ 未知, 但总存在一个很小的正数 $a < b$. 可知选取自适应参数调整律 (27) 可满足矩阵 $G(\boldsymbol{x})$ 是非奇异的假设, 保证了自适应补偿控制律的存在.

定理 2. 对于非线性 MIMO 系统 (1), 基于定理 1 中 MMST 分组方法, 设计控制律 (26) 和自适应参数调整律 (27) 和 (28), 则在系统发生执行器故障 (2) 时, 在控制作用下闭环系统所有状态有界, 且能渐近跟踪给定的参考信号.

证明. 定理 1 已经证明, 利用 MMST 分组方法可选择合适的分组, 设已得到分组结果, 将其代入控制律 (26) 中可得

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta}_1 \sum\limits_{i=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l \sum\limits_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) + \boldsymbol{\beta}_1 K_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\beta}_q \sum\limits_{l=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l \sum\limits_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) + \boldsymbol{\beta}_q K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1\rho_1} \\ \vdots \\ \alpha_{q\rho_q} \end{bmatrix} \tag{29}$$

将 $\alpha_{i\rho_i}$ 代入上式并变换可得

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(-\boldsymbol{\beta}_1 \sum\limits_{i=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l \sum\limits_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) - \boldsymbol{\beta}_1\hat{K}_2\right) - \\ c_{1\rho_1}Z_{1\rho_1} - Z_{1(\rho_1-1)} + \dot{\alpha}_{i(\rho_i-1)} \\ \vdots \\ \left(-\boldsymbol{\beta}_q \sum\limits_{i=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l \sum\limits_{\mu=0}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) - \boldsymbol{\beta}_q\hat{K}_2\right) - \\ c_{q\rho_q}Z_{q\rho_q} - Z_{q(\rho_q-1)} + \dot{\alpha}_{q(\rho_q-1)} \end{bmatrix} \tag{30}$$

将上式代入反演代换变量中得到反演参数系统为

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{i1} =& -c_{i1}Z_{i1} + Z_{i2} \\ \dot{Z}_{ij} =& -c_{ij}Z_{ij} + Z_{i(j+1)} - Z_{i(j-1)} \\ \dot{Z}_{i\rho_i} =& \left[-\boldsymbol{\beta}_i \sum_{i=1}^{m}\hat{K}_{1l}N_l \sum_{\mu=1}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) - \boldsymbol{\beta}_i\hat{K}_2 - \right. \\ & \left. c_{i\rho_i}Z_{i\rho_i} - Z_{i(\rho_i-1)} + \dot{\alpha}_{i(\rho_i-1)} \right] + \boldsymbol{\beta}_i K_2 - \\ & \dot{\alpha}_{i(\rho_i-1)} + \boldsymbol{\beta}_i \sum_{i=1}^{m}K_{1l}N_l \sum_{\mu=1}^{L}\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) = \\ & -c_{i\rho_i}Z_{i\rho_i} - Z_{i(\rho_i-1)} - \boldsymbol{\beta}_i\tilde{K}_2 - \\ & \boldsymbol{\beta}_i \sum_{l=1}^{m}\sum_{\mu=0}^{L}\tilde{K}_{1l}N_l\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) \end{aligned} \tag{31}$$

其中, $\tilde{K}_1 = \hat{K}_1 - K_1$, $\tilde{K}_2 = \hat{K}_2 - K_2$, $i = 1, \cdots, q$, $j = 2, \cdots, \rho_i - 1$.

取系统 (31) 的 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned} V(t) =& \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{\rho_i} z_{ij}^2 + \\ & \frac{1}{2}\mathrm{tr}\left(\tilde{K}_1^{\mathrm{T}}\Gamma_1\tilde{K}_1\right) + \frac{1}{2}\tilde{K}_2^{\mathrm{T}}\Gamma_2^{-1}\tilde{K}_2 \end{aligned} \tag{32}$$

对其求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) =& -\sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{\rho_i} c_{ij}Z_{ij}^2 - \sum_{i=1}^{q} Z_{i\rho_i}\beta_i\tilde{K}_2 + \\ & \sum_{l=1}^{m}\dot{\tilde{K}}_{1l}^{\mathrm{T}}\Gamma_{1l}\tilde{K}_{1l} + \dot{\tilde{K}}_2^{\mathrm{T}}\Gamma_2^{-1}\tilde{K}_2 - \\ & \sum_{i=1}^{q} Z_{i\rho_i}\boldsymbol{\beta}_i \sum_{l=1}^{m}\sum_{\mu=0}^{L}\tilde{K}_{1l}N_l\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t) = \\ & -\sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{\rho_i} c_{ij}Z_{ij}^2 + \\ & \left(\dot{\tilde{K}}_2^{\mathrm{T}}\Gamma_2^{-1} - \sum_{i=1}^{q} Z_{i\rho_i}\boldsymbol{\beta}_i\right)\tilde{K}_2 + \\ & \sum_{l=1}^{m}\tilde{K}_{1l}\left(\dot{\tilde{K}}_{1l}^{\mathrm{T}}\Gamma_{1l} - \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^{q} Z_{i\rho_i}\boldsymbol{\beta}_i \sum_{\mu=0}^{L}N_l\gamma_\mu \boldsymbol{B}_\mu \boldsymbol{w}(t)\right) \end{aligned} \tag{33}$$

将自适应参数调整律 (27) 和 (28) 代入可得

$$\dot{V}(t) = -\sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{\rho_i} c_{ij} Z_{ij}^2 \le 0, \quad t \ne t_l,\ l = 1, \cdots, d \tag{34}$$

在 t_l 时刻, 故障发生, K_1 和 K_2 发生了跳变, 导致 $V(t)$ 发生相应的变化. 因为 $\dot{V}(t) \le 0$, 故有 $V(t_l^-) \le V(t_{l-1}^+)$. 若 $V(t_{l-1}^+)$ 为有限值, 则在区间 $[t_{l-1}, t_l]$ 内 e, $\tilde{K}_1$ 和 $\tilde{K}_2$ 有界, 而 K_1 和 K_2 的变化均为有限值, 则在下一故障发生后, $V(t_l^+)$ 有限. 于是在下一时间区间 $[\,t_l, t_{l+1}\,]$, 初始值 $V(t_l^+)$ 有限, e, $\tilde{K}_1$ 和 $\tilde{K}_2$ 有界. 因为初始值 $V(0)$ 有界, 则 $V(t)$ 分段连续, 且 $\tilde{K}_1$ 和 $\tilde{K}_2$ 有界, 可得系统可渐近跟踪给定的参考信号. □

4　仿真算例

为对比分析本文方法的有效性和优越性, 以文献 [21] 中双獭型飞机纵向通道控制为例, 验证本文提出的理论方法. 飞机纵向通道数学模型为

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \frac{F_x \cos\alpha + F_z \sin\alpha}{m} \\
\dot{\alpha} &= q + \frac{-F_x \sin\alpha + F_z \cos\alpha}{mV} \\
\dot{\theta} &= q \\
\dot{q} &= \frac{M}{I_y}
\end{aligned} \tag{35}$$

式中, V 为飞行速度, α 为攻角, θ 为俯仰角, m 为飞机质量, I_y 为转动惯量, ρ 是空气密度, S 是翼面面积, c 是平均翼弦长度, T_x 和 T_z 分别是作用在机体 x 和 z 轴方向的推力, $F_x = \bar{q}SC_x(\alpha, q, \delta_{e1}, \delta_{e2}) + T_x - mg\sin\theta$, $F_z = \bar{q}SC_z(\alpha, q, \delta_{e1}, \delta_{e2}) + T_Z + mg\cos\theta$, $M = \bar{q}cSC_m(\alpha, q, \delta_{e1}, \delta_{e2})$, $\bar{q} = \frac{1}{2}\rho V^2$, $C_x = C_{x1}\alpha + C_{x2}\alpha^2 + C_{x3} + C_{x4}(d_1\delta_{e1} + d_2\delta_{e2})$, $C_z = C_{z1}\alpha + C_{z2}\alpha^2 + C_{z3} + C_{z4}(d_1\delta_{e1} + d_2\delta_{e2}) + C_{z5}q$, $C_m = C_{m1}\alpha + C_{m2}\alpha^2 + C_{m3} + C_{m4}(d_1\delta_{e1} + d_2\delta_{e2}) + C_{m5}q$; δ_{e1} 和 δ_{e2} 为升降舵偏角. 取 V、α、θ、q 分别为系统状态 x_1、x_2、x_3、x_4; δ_{e1}、δ_{e2}、T_x、T_z 作为系统输入 u_1、u_2、u_3、u_4. 输出 $y = [x_1, x_3]^{\mathrm{T}}$, 系统具体仿真参数和系统状态方程见文献 [25].

由文献 [20] 可知该系统零动态在平衡点附近渐近稳定, 系统为最小相位系统. 系统的相对阶 $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$. 取微分同胚映射为 $\xi_1 = [x_1]$, $\xi_2 = [x_3, x_4]^{\mathrm{T}}$; 跟踪参考系统为 $1/(s+1)$ 和 $1/(s^2+6s+18)$, 参考输入信号分别为 $60 + \sin(0.05t)$ 和 $\sin(0.05t)$; 取自适应增益矩阵为 $\Gamma_1 = 100I_{4\times4}$, $\Gamma_2 = 0.01I_{4\times4}$; 设初始状态为 $x(0) = [55, 0, 0.02, 0]^{\mathrm{T}}$.

根据假设 1, 在执行器故障情况下, 该系统可能可以处理的执行器故障集合为 $E = \{\sigma_i | i = 0, \cdots, 9\}$, 其中 $\sigma_0 = [0,0,0,0]$, $\sigma_1 = [0,0,1,0]$, $\sigma_2 = [0,1,0,0]$, $\sigma_3 = [1,0,0,0]$, $\sigma_4 = [0,0,0,1]$, $\sigma_5 = [1,0,1,0]$, $\sigma_6 = [1,0,0,1]$, $\sigma_7 = [0,1,1,0]$, $\sigma_8 = [0,1,0,1]$ 和 $\sigma_9 = [0,0,1,1]$. 通过对上述 10 种不同故障类型的仿真和分析, 表明在本文设计的基于 MMST 执行器分组的自适应补偿控制作用下, 系统可处理满足假设 1 的任何执行器组合故障形式. 为说明本文方法及有效性, 以如下仿真为例进行验证和讨论. 将系统故障设定为在 $t = 100$ s, 执行器 u_1 发生 $\lambda_1 = 0.5$ 的部分失效故障; 在 $t = 200$ s, 执行器 u_3 发生卡死在 u_{c3} (200) 位置的卡死故障; 在 $t = 300$ s, 执行器 u_4 发生卡死在 u_{c4} (300) 位置的卡死故障. 可知在 $t = 0 \sim 200$ s 时系统的故障形式为 σ_0; 在 $t = 200 \sim 300$ s 时系统的故障形式为 σ_3; 在 $t = 300 \sim 400$ s 时系统的故障形式为 σ_9. 仿真结果如图 2 ∼ 8 所示.

图 2 和图 3 分别为系统输出与参考信号 y_1 和 y_{r1}, y_2 和 y_{r2} 的响应曲线, 由图可知系统可以很好地跟踪给定的参考信号; 图 4 和图 5 分别为系统状态 x_2 和 x_4 响应曲线, 表明系统内部动态的响应过程, 可以看出系统是内部动态稳定的; 图 6 ∼ 8 分别为辨识模型残差 e_0、e_1 和 e_9 的二范数响应曲线, 可以看出在 $t = 0 \sim 100$ s 时, 系统无故障, 此时 $\|e_0\| = 0$, 系统分组为 $\varpi_0 = \{\{u_3, u_4\}, \{u_1, u_2\}\}$; 在 $t = 100$ s 时, 执行器 u_1 发生部分失效故障, $\|e_0\| > 0$, 但辨识模型 0 仍能很快逼近故障系统, 此时系统分组为 $\varpi_0 = \{\{u_3, u_4\}, \{u_1, u_2\}\}$; 在 $t = 200$ s 时, 执行器 u_3

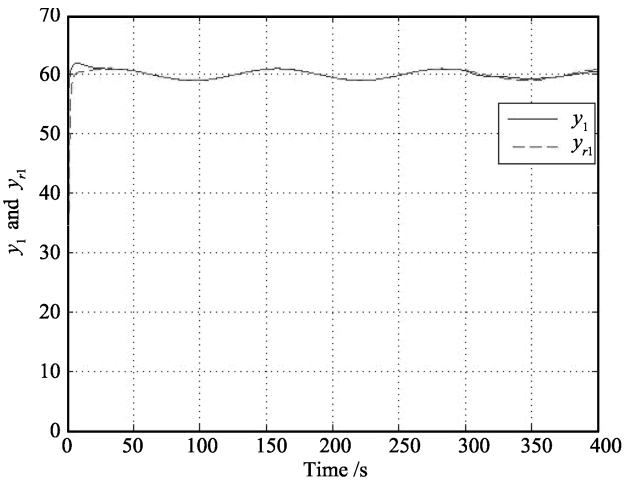


图 2　y_1 和 y_{r1} 响应曲线

Fig. 2　Response curves of y_1 and y_{r1}

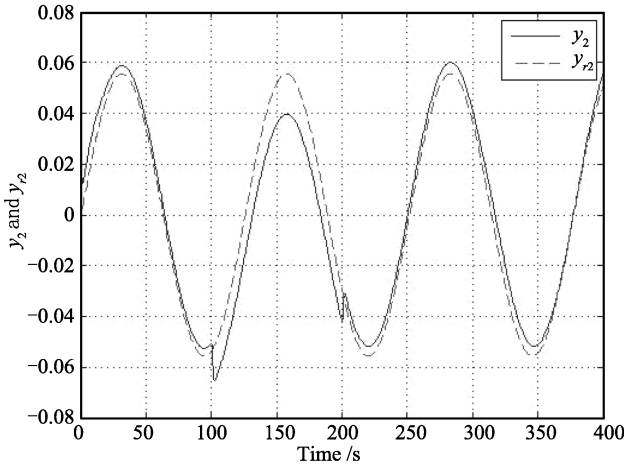


图 3 y_2 和 y_{r2} 响应曲线

Fig. 3 Response curves of y_2 and y_{r2}

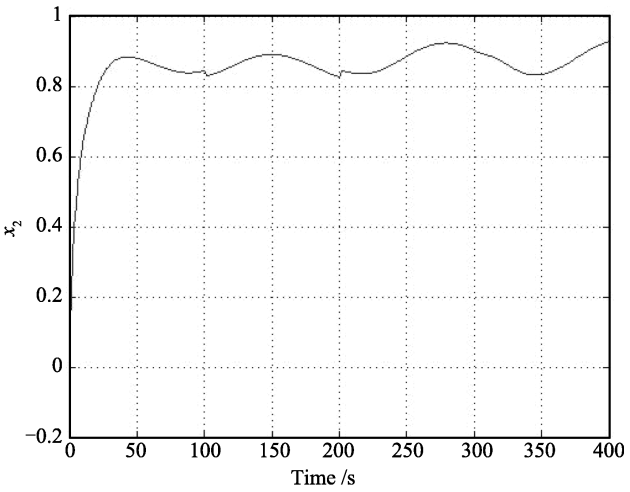


图 4 MMST 分组系统状态 x_2 响应曲线

Fig. 4 MMST grouping response curve of state x_2

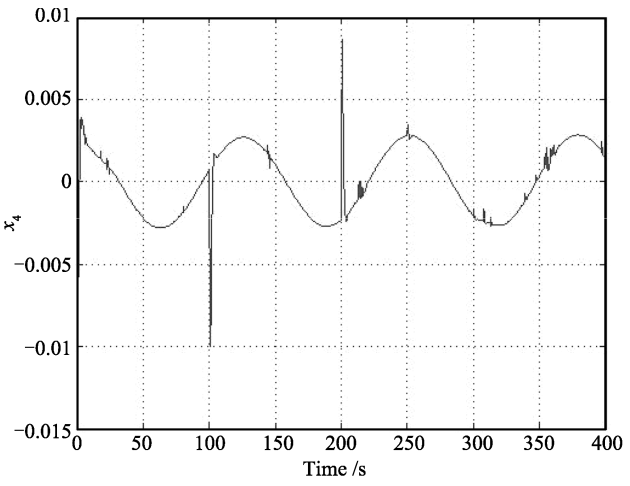


图 5 MMST 分组系统状态 x_4 响应曲线

Fig. 5 MMST grouping response curve of state x_4

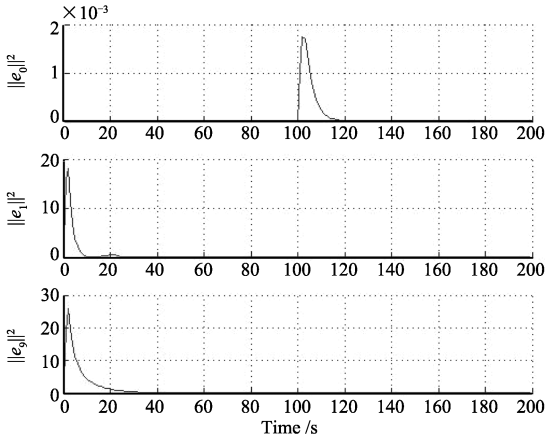


图 6 0～200 s 辨识模型残差二范数响应曲线

Fig. 6 Response curves of 2-norm of identification model residuals in 0～200 s

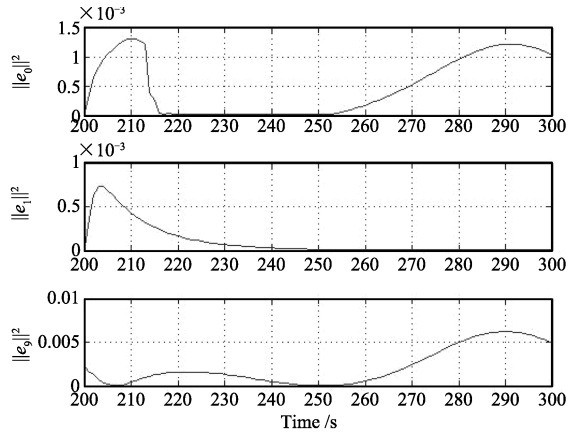


图 7 200～300 s 辨识模型残差二范数响应曲线

Fig. 7 Response curves of 2-norm of identification model residuals in 200～300 s

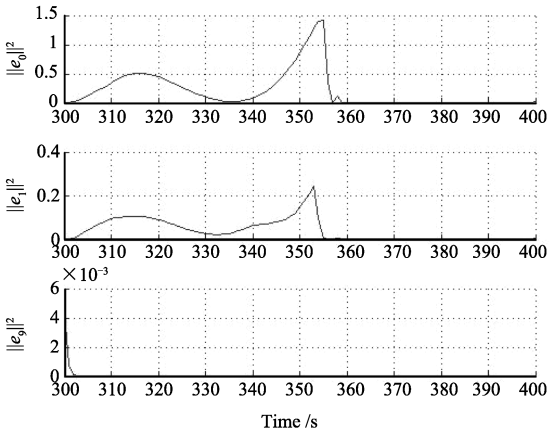


图 8 300～400 s 辨识模型残差二范数响应曲线

Fig. 8 Response curves of 2-norm of identification model residuals in 300～400 s

发生卡死故障, $\|e_0\|$ 由 0 变为大于零, $\|e_1\|$ 渐近趋于零, 此时系统分组为 $\varpi_1 = \{\{u_4\},\{u_1,u_2\}\}$; 在 $t = 300\,\mathrm{s}$ 时, 执行器 u_4 发生卡死故障, ϖ_0 和 ϖ_1 等分组已不适用, $\|e_9\|$ 渐近趋于零, 此时系统切换到分组 $\varpi_9 = \{\{u_1\},\{u_2\}\}$. 可以看出各个辨识模型的性能指标在系统发生相应故障时是最小的, 系统可以准确切换到合适的分组.

与文献 [20] 相比, 该方法在设计控制律之前就将执行器分组确定, 而固定的执行器分组方式可补偿的故障组合形式是有限的, 如设定上述执行器故障和发生时刻, 对 y_{r2} 的跟踪效果如图 9 所示, 表明当执行器 u_4 发生卡死故障时, 该方法已不能实现对参考信号的跟踪. 文献 [21] 在设计过程中没有考虑执行器 (部分) 失效故障, 所以系统在发生 (部分) 失效故障时同样不能实现对参考信号的跟踪, 甚至失去稳定性. 综上所述, 本文设计的控制律既能够处理文献 [21] 中虚拟分组方法不能处理的执行器 (部分) 失效故障, 又扩大了文献 [20] 中固定分组方法可补偿的执行器故障集合.

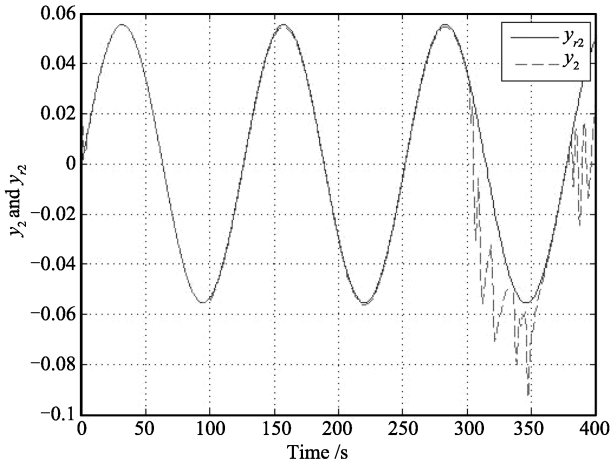


图 9　固定分组 y_2 和 y_{r2} 响应曲线

Fig. 9　Fix grouping response curves of y_2 and y_{r2}

为表明本文所用反演控制律自适应补偿律的优越性, 与文献 [25] 提出的模型状态跟随极点配置方法进行仿真对比. 向飞机系统 (35) 注入文献 [25] 固定分组可处理的执行器故障, 将系统故障设定为在 $t = 100\,\mathrm{s}$ 时, 执行器 u_1 发生 $\lambda_1 = 0.5$ 的部分失效故障; 在 $t = 200\,\mathrm{s}$ 时, 执行器 u_3 发生卡死在 u_{c3} (200) 位置的卡死故障. 仿真得到系统输出跟踪响应曲线如图 10 ∼ 13 所示. 由图可知, 与极点配置自适应补偿律相比, 反演控制律自适应补偿律因逐步设计的特点, 使其在故障发生后系统具有更小的跟踪残差, 比极点配置方法更适用于非线性系统执行器故障的自适应补偿控制设计.

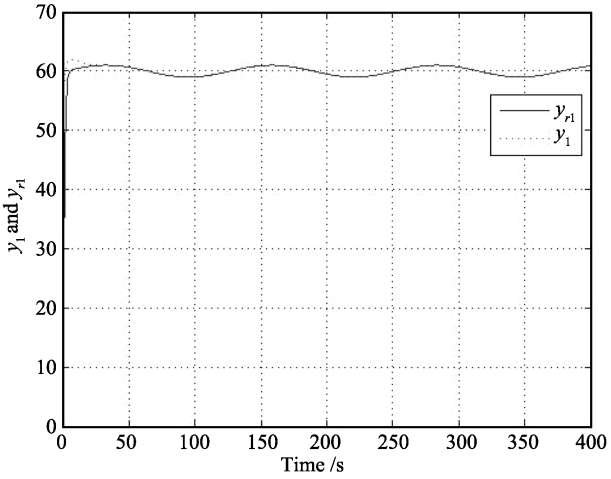


图 10　极点配置 y_1 和 y_{r1} 响应曲线

Fig. 10　Response curves of y_1 and y_{r1} based on pole placement

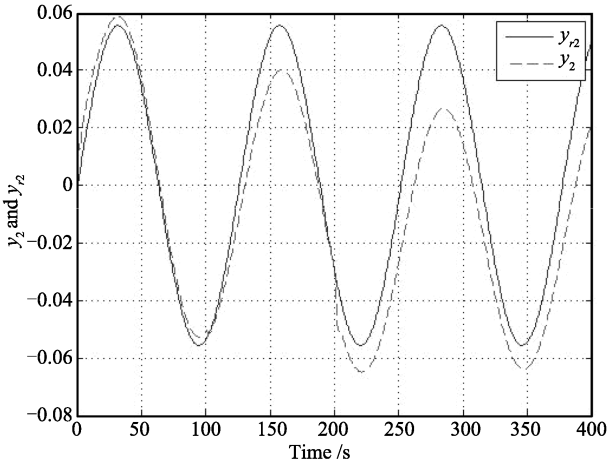


图 11　极点配置 y_2 和 y_{r2} 响应曲线

Fig. 11　Response curves of y_2 and y_{r2} based on pole placement

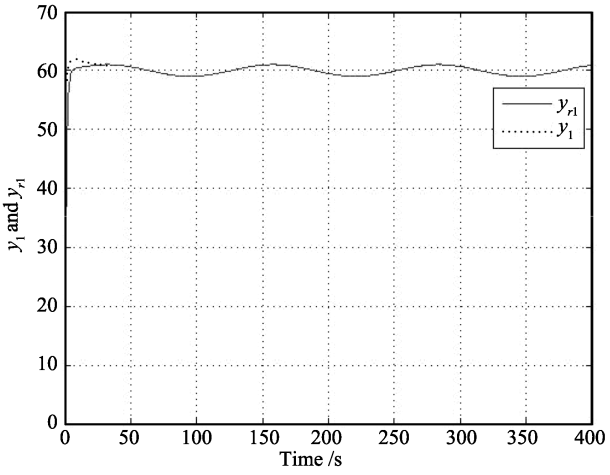


图 12　反演控制 y_1 和 y_{r1} 响应曲线

Fig. 12　Response curves of y_1 and y_{r1} based on backstepping

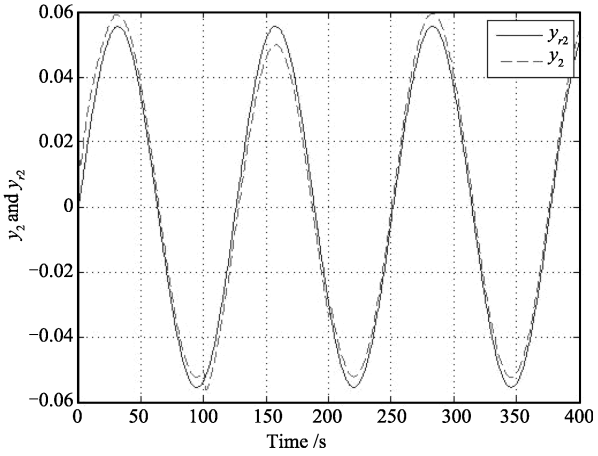


图 13 反演控制 y_2 和 y_{r2} 响应曲线

Fig. 13 Response curves of y_2 and y_{r2} based on backstepping

5 结论

本文针对一类具有执行器故障的 MIMO 非线性最小相位系统, 提出了一种基于 MMST 执行器分组的自适应补偿控制方案. 考虑系统的执行器卡死、部分失效和失效故障, 在微分几何反馈线性化的基础上, 采用基于 MMST 的执行器分组方法, 设计了反演自适应补偿跟踪控制律, 能够保证系统在执行器故障时闭环稳定, 渐近跟踪给定的参考信号. 提出的执行器分组方法使控制器可快速准确地切换到合适的分组, 扩大了可补偿的执行器故障集合. 仿真结果表明了本文设计方法的有效性.

References

1 Mao Z H, Jiang B, Shi P. Fault-tolerant control for a class of nonlinear sampled-data systems via a Euler approximate observer. *Automatica*, 2010, **46**(11): 1852−1859

2 Yang H, Jiang B, Staroswiecki M. Supervisory fault tolerant control for a class of uncertain nonlinear systems. *Automatica*, 2009, **45**(10): 2319−2324

3 Hu Zhi-Kun, Sun Yan, Jiang Bin, He Jing, Zhang Chang-Fan. An optimal unknown input observer based fault diagnosis method. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1225−1230
(胡志坤, 孙岩, 姜斌, 何静, 张昌凡. 一种基于最优未知输入观测器的故障诊断方法. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1225−1230)

4 Lv Ling-Ling, Duan Guang-Ren, Su Hai-Bin, Zhu An-Fu. A survey on linear discrete periodic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(7): 973−980
(吕灵灵, 段广仁, 苏海滨, 朱安福. 线性离散周期系统研究综述. 自动化学报, 2013, **39**(7): 973−980)

5 Fan Ji-Cong, Wang You-Qing, Qin Si-Zhao. Combined indices for ICA and their applications to multivariate process fault diagnosis. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 494−501
(樊继聪, 王友清, 秦泗钊. 联合指标独立成分分析在多变量过程故障诊断中的应用. 自动化学报, 2013, **39**(5): 494−501)

6 Zhou Dong-Hua, Liu Yang, He Xiao. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1933−1943
(周东华, 刘洋, 何潇. 闭环系统故障诊断技术综述. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1933−1943)

7 Zhang Y M, Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 2008, **32**(2): 229−252

8 Looze D P, Weiss J L, Eterno F S, Barrett N M. An automatic redesign approach for restructurable control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 1985, **5**(2): 16−22

9 Boskovic J D, Jackson J A, Mehra R K, Nguyen N T. Multiple-model adaptive fault-tolerant control of a planetary lander. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, **32**(6): 1812−1826

10 Bodson M, Groszkiewicz J E. Multivariable adaptive algorithms for reconfigurable flight control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1997, **5**(2): 217−229

11 Corradini M L, Orlando G. Actuator failure identification and compensation through sliding modes. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(2): 184−190

12 Liu Y, Luis G C. Adaptive control allocation in the presence of actuator failures. *Journal of Control Science and Engineering*, 2012, Article ID 502149, DOI: 10.1155/2012/502149

13 Zhao J, Jiang B, Shi P, Liu H T. Adaptive dynamic sliding mode control for near space vehicles under actuator faults. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2013, **32**(5): 2281−2296

14 Shen Q, Jiang B, Cocquempot V. Fuzzy logic system-based adaptive fault-tolerant control for near-space vehicle attitude dynamics with actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, **21**(2): 289−300

15 Li X J, Yang G H. Robust adaptive fault-tolerant control for uncertain linear systems with actuator failures. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(10): 1544−1551

16 Zhang Shao-Jie, Liu Chun-Sheng, Hu Shou-Song. Adaptive fault-tolerant control for multi-input-multi-output minimum-phase systems with actuator failures. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, **27**(9): 1190−1194
(张绍杰, 刘春生, 胡寿松. 多输入多输出最小相位系统的执行器故障自适应容错控制. 控制理论与应用, 2010, **27**(9): 1190−1194)

17 Li P, Yang G H. Adaptive fuzzy control of unknown nonlinear systems with actuator failures for robust output tracking. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference, 2008: 4898−4903

18 Tao G. Adaptive control of systems with actuator failures. In: Proceedings of the 2008 Control and Decision Conference. Yantai, China: IEEE, 2008. 53−54

19 Tang X D, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation for parametric strict feedback systems and an aircraft application. *Automatica*, 2003, **39**(11): 1975−1982

20 Tang X D, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation for nonlinear MIMO systems with an aircraft control application. *Automatica*, 2007, **43**(11): 1869−1883

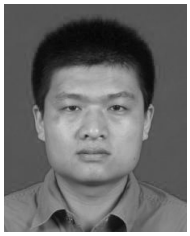
21 Tang X D, Tao G, Joshi S M. Virtual grouping based adaptive actuator failure compensation for MIMO nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(11): 1775−1780

22 Wang W, Wen C Y. Adaptive actuator failure compensation control of uncertain nonlinear systems with guaranteed transient performance. *Automatica*, 2010, **46**(12): 2082−2091

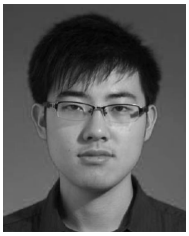
23 Narendra K S, Balakrishnan J, Ciliz M K. Adaptation and learning using multiple models, switching, and tuning. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, **15**(3): 37−51

24 Boskovic J D, Mehra R K. Stable multiple model adaptive flight control for accommodation of a large class of control effector failures. In: Proceedings of the 1999 American Control Conference, San Diego, CA: IEEE, 1999. 1920−1924

25 Zhang Shao-Jie, Liu Chun-Sheng, Hu Shou-Song. Adaptive fault tolerant control for a class of nonlinear systems with multiple actuator failures *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, **32**(3): 635−637
(张绍杰, 刘春生, 胡寿松. 一类非线性系统的执行器组合故障自适应容错控制. 系统工程与电子技术, 2010, **32**(3): 635−637)



张绍杰 南京航空航天大学自动化学院副教授. 2009 年获南京航空航天大学自动化学院博士学位. 主要研究方向为非线性系统控制和容错控制. 本文通信作者. E-mail: zhangsj@nuaa.edu.cn
(**ZHANG Shao-Jie** Associate professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. He received his Ph. D. degree from the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2009. His research interest covers nonlinear system control and fault tolerant control. Corresponding author of this paper.)



邱相玮 南京航空航天大学自动化学院硕士研究生. 2011 年获广西大学电气工程学院学士学位. 主要研究方向为非线性系统控制和容错控制.
E-mail: cetc30_qxw@163.com
(**QIU Xiang-Wei** Master student at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. He received his bachelor degree from Guangxi University in 2011. His research interest covers nonlinear system control and fault tolerant control.)

刘春生 南京航空航天大学自动化学院教授. 2006 年获南京航空航天大学自动化学院博士学位. 主要研究方向为非线性系统控制和容错控制.
E-mail: liuchsh@nuaa.edu.cn
(**LIU Chun-Sheng** Professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. She received her Ph. D. degree from the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2006. Her research interest covers nonlinear system control and fault tolerant control.)

胡寿松 南京航空航天大学自动化学院教授. 1960 年获北京航空航天大学自动化学院学士学位. 主要研究方向为控制理论与应用.
E-mail: hushousong@nuaa.edu.cn
(**HU Shou-Song** Professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. He received his bachelor degree from the College of Automation Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1960. His research interest covers control theory and applications.)