

一类含有随机输入时延和故障的离散系统 H_∞ 控制

顾 洲^{1,2}, 王道波², 田恩刚³, 刘金良⁴

(1. 南京师范大学动力工程学院, 江苏 南京 210042;

2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016;

3. 南京师范大学电气与自动化学院, 江苏 南京 210042;

4. 东华大学信息科学学院, 上海 201620)

摘 要: 研究了一类具有控制输入时延的离散系统 H_∞ 可靠性控制问题, 提出了具有实际意义的服从某种概率分布的随机故障模型。假设输入时延符合齐次 Markov 分布, 在控制器的设计中利用了控制器的历史信息, 把系统转换为无时延的 Markov 跳变系统, 根据 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 方法, 给出了故障分布依赖的 H_∞ 均方稳定且具有 H_∞ 范数界 γ 的容错控制器解的存在条件。最后, 通过算例验证了本方法的有效性。

关键词: 故障分布依赖; 可靠性控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.40

H_∞ reliability control for a class of discrete-time systems with stochastic input delays and failures

GU Zhou^{1,2}, WANG Dao-bo², TIAN En-gang³, LIU Jin-liang⁴

(1. School of Power Engineering, Nanjing Normal Univ., Nanjing 210042, China;

2. Coll. of Automation Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal Univ., Nanjing 210042, China;

4. Coll. of Information Science and Technology, Donghua Univ., Shanghai 201620, China)

Abstract: An H_∞ reliability control is investigated for a class of discrete-time systems with stochastic input delays and actuator failures. A new practical fault model obeying a certain probability distribution is proposed. Assuming that the input delays obey a homogenous Markovian chain and utilizing the historic information of the controllers, an augmented Markov jump system (MJS) is developed. By applying Lyapunov stability theory and linear matrix inequality (LMI) technology, the sufficient conditions is given for the existence of H_∞ reliability control based on fault distribution dependence with mean square stableness. An illustrative example is exploited to show the effectiveness of the proposed design procedure.

Keywords: fault distribution dependence; reliability control; linear matrix inequality (LMI)

0 引言

随着系统控制方式的不断改进, 远程控制、网络控制等控制方式将引入控制输入时延, 这将对控制系统的设计带来新的困难, 尤其是对某一控制组件发生故障时的可靠性控制器的设计将带来新的挑战。文献[1]把故障定义为: “系统至少一个特性或参数出现较大偏差, 超出了可以接受的范围, 此时系统性能明显低于正常水平, 难以完成系统预

期的功能”。很多情况下, 为了实现可靠性控制 (即“当控制系统中发生故障时, 系统依然能够维持其在安全状态, 并尽可能地满足一定的性能指标要求”), 采用硬件冗余技术, 但这将带来很大的硬件成本。因此, 对关键设备的故障分析, 设计合适的可靠性控制器对提高系统可靠性有着重要意义, 受到广泛重视。

Siljak 于 1980 年最先提出了容错控制中的可靠镇定的概念^[2], 到目前为止, 线性系统的容错控制理论已经基本

收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-12-06。

基金项目: 国家自然科学基金 (60704024, 60904013) 资助课题

作者简介: 顾洲 (1973-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为时滞系统的可靠性控制、鲁棒控制等。E-mail: gzh1808@163.com

发展成熟,其方法有模型跟随方法^[3]、特征空间配置方法^[4]、极点配置方法^[5]、基于 Riccati 方程的方法^[6-8]、基于鲁棒控制的方法^[9]、基于参数辨识的方法^[10]和基于交互式多模型的方法^[11]等。

由于控制时延的引入,使得采用常规的无记忆反馈状态控制器可能不再适用,如系统状态方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k-1) \quad (1)$$

如采用常规的状态反馈控制器 $\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}\mathbf{x}(k)$,无论控制器增益 \mathbf{K} 如何取值,都不能使系统稳定,因此本文将提出一种新的有记忆的控制器设计方法。

对故障的准确描述是可靠性控制中首要的和关键的一步。为了描述控制系统中执行器(传感器)的故障行为,文献[12]通过把控制矩阵 \mathbf{B} 分解为 \mathbf{B}_s 和 \mathbf{B}_f ,其中 \mathbf{B}_s 为易发生故障的集合, \mathbf{B}_f 为不发生故障的集合,且发生故障时对应的控制器输出为零;文献[13]设计了具有传感器故障的静态输出反馈控制器,其中传感器故障模型为 $\mathbf{y}^f(t) = \beta_L \mathbf{y}(t)$, $\beta_L \in \Omega = \{\text{diag}\{\beta_{L1}, \dots, \beta_{Lq}\}, \beta_{Ls} = 0, 1, s = 1, \dots, q\}$,在此模型中传感器只能有两种状态,完全失效和完好传送;文献[14-18]把执行器故障描述为 $\mathbf{u}^f(t) = \alpha \mathbf{u}(t)$,其中 $0 \leq \alpha < \alpha < \bar{\alpha} \leq 1$ 表示执行器可能发生全部失效($\alpha = 0$)、部分缺失($0 < \alpha < 1$)、完好($\alpha = 1$)。

在实际的控制系统中,传感器或执行器的确可能会发生如前所述的完全失效(如卡死、供电中断等)、部分失效(电子器件老化,增益发生负向漂移等)情况。然而把故障描述成为一种静态行为,具有一定的局限性,因为在有一些场合下,故障是动态的。众所周知,现代的传感器、执行器大多都是智能型的电子装置,在恶劣环境下(如强磁场、高温等、紫外线等)其增益容易产生时变漂移,这种漂移并不是如前所述的一种静态行为,也即大部分文献在设计控制器时首先设定某个(些)传感器、执行器为某一固定状态,事实上,这只是一种“期望”;另外,需要说明的是这种增益的变化可能会大于无故障时增益,也即尺度因子有可能大于 1。这激发了本文作者对故障模型的进一步研究。

本文的主要贡献在于:① 把系统的故障建立为更具有一般性、符合一种概率分布的随机模型;② 通过假设控制时延符合齐次 Markov 链分布,利用控制器的历史信息,把含有控制时延的离散系统,采用增广的方式转换为无时滞的 Markov 跳变系统(Markov jump system, MJS),应用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)技术设计了可靠性控制器解的存在条件。最后,通过仿真算例验证了所提出方法的有效性。

1 问题描述

考虑具有如下形式的线性离散时滞系统

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}(k-\tau(k)) + \mathbf{B}_2\boldsymbol{\omega}(k) \\ \mathbf{z}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k) = \boldsymbol{\Phi}(k), k = -h, -h+1, \dots, 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为系统的状态向量; $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}^m$ 为系统的控制输入向量; $\boldsymbol{\omega}(k) \in \mathbf{R}^l$ 为外界扰动输入向量; $\boldsymbol{\Phi}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为初始状态向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B}_1 、 \mathbf{B}_2 是适当维数的已知矩阵或向量;

$\tau(k)$ 为控制输入时延,且 $0 \leq \tau(k) \leq h$ 。

假设 1 假定输入时延 $\tau(k) = i (i \in \mathcal{L}, \mathcal{L} = \{0, 1, 2, \dots, h\})$ 在有限集 \mathcal{L} 上服从齐次 Markov 链分布,且静态转移概率矩阵 $\boldsymbol{\Lambda} = (p_{ij}, i, j \in \mathcal{L})$, 满足 $0 \leq p_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^h p_{ij} = 1$ 。控制器采用有记忆反馈控制器

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}\mathbf{X}(k) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}(k) \quad \mathbf{u}(k-h) \quad \dots \quad \mathbf{u}(k-1)]$; \mathbf{K} 为待求的状态反馈增益矩阵。

考虑到可能的执行器故障,则式(3)变为

$$\mathbf{u}^f(k) = \boldsymbol{\Xi}\mathbf{K}\mathbf{X}(k) = \sum_{i=1}^m \xi_i \mathbf{C}_i \mathbf{K}\mathbf{X}(k) \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\Xi} = \text{diag}\{\xi_1, \dots, \xi_m\}$, $\xi_i (i = 1, \dots, m)$ 为 m 个不相关的随机变量,并定义 ξ_i 的期望和方差分别为 $\mu_i (0 < \mu_i < \delta)$ 和 σ_i^2 , $\boldsymbol{\Xi}_0 = \text{diag}\{\mu_1, \dots, \mu_m\}$, $\boldsymbol{\Delta} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2\}$ 且 $\mathbf{C}_i = \text{diag}\{0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0\}$ 。

注 1 式(4)为考虑执行器故障的控制律,此处用随机变量 $\boldsymbol{\Xi}$ 来替换已有文献中的静态尺度因子。众所周知,由于执行器的老化、外部干扰(强磁场、强电场、温度变化等)以及机械装置的卡涩,可能会造成执行机构放大增益的变化,这种变化不是一种静态的,而是一种按某一概率分布变化的。显然,如果用静态的尺度因子(即在设计控制器增益时,考虑的执行器故障是完全失败或某一特定的部分失败)不能对这种现象进行准确刻画。事实上,在实际系统中,增益发生漂移,并在某一范围波动是执行器经常出现的现象。

注 2 类似文献[19]对传感器误差测量的建模方法,式(4)中 $\boldsymbol{\Xi}$ 为一表征系统执行器故障的随机矩阵,如果取 $\xi_i = 0$ 即为某一执行器彻底失败, $0 < \xi_i < 1$ 表示执行器部分失效, $\xi_i > 1$ 表示执行器的增益发生正向漂移,而 σ_i 表示执行器的增益的波动情况,因此本文采用的故障模型包含已有故障模型的情形,更具有一般性。

注 3 值得说明的是,执行器(传感器)的部分部件发生故障,可能造成增益变大或变小,而在已有的大部分文献中把执行器(传感器)的故障归结为失效或部分失效,即增益变小是具有一定局限性的。本文设计的故障模型对原有的故障模型做了扩展。

结合式(2)、式(4)及假设 1, 可得 $\tau(k)$ 在 $i (i \in \mathcal{L})$ 模式时的闭环系统模型为

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = [\mathbf{A}_i + \bar{\mathbf{B}}_1 \boldsymbol{\Xi}_0 \mathbf{K}_i + \bar{\mathbf{B}}_1 (\boldsymbol{\Xi} - \boldsymbol{\Xi}_0) \mathbf{K}_i \mathbf{X}(k) + \bar{\mathbf{B}}_2 \boldsymbol{\omega}(k)] \\ \mathbf{z}(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) \\ \mathbf{X}(i) = \boldsymbol{\Phi}(i), i = -h, \dots, -1 \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Xi}_0 &= \text{diag}\{\mu_1 \quad \mu_2 \quad \dots \quad \mu_m\} \\ \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{B} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_2 = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C^T \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

本文主要目标是:针对线性离散时滞系统(2),确定有记忆容错控制器(4)的增益 K_i ,使得在执行器发生服从某种概率分布的时变故障时,增广的闭环系统(5)均方渐近稳定。

2 主要结果

当系统(2)采用考虑执行器故障的容错控制器(4)时,定理1的结论将对容错控制器(4)中增益 K_i 的设计起着重要作用。

定理1 对于给定的 $K_i (i \in \mathcal{L})$ 、 $\mu_j, \sigma_j (j=1, 2, \dots, m)$, 如果存在适当维数的实对称矩阵 $P_i > 0$, 使得矩阵不等式(6)成立, 则系统 MJS(5) H_∞ 均方渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能指标 γ 。

$$\begin{bmatrix} -P_i & 0 & (A_i + \bar{B}_1 \Xi_i K_i)^T \bar{P}_i & \Theta & \bar{C} \\ * & -\gamma^2 I & \bar{B}_2^T \bar{P}_i & 0 & 0 \\ * & * & -\bar{P}_i & 0 & 0 \\ * & * & * & -P & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

式中, $\bar{P}_i = \sum_{j=1}^i p_{ij} P_j$; $P = \text{diag} \{ \bar{P}_1, \dots, \bar{P}_i \}$; $\Theta = [\sigma_1 K_1^T C^T B^T P_1 \dots \sigma_m K_m^T C^T B^T P_m]$; * 表示对称位置矩阵块的转置。

证明 定义如下形式的 Lyapunov 函数

$$V(X(k), k, i) = X^T(k) P_i X(k) \quad (7)$$

由式(4)定义, $\Xi_0 = \mathcal{E} \{ \Xi \}$, 则有

$$\mathcal{E} \{ \Xi - \Xi_0 \} = 0 \quad (8)$$

$$\mathcal{E} \{ (\bar{B}_1 (\Xi - \Xi_0) K_i)^T \bar{P}_i \bar{B}_1 (\Xi - \Xi_0) K_i \} = \sum_{j=1}^m \sigma_j^2 K_i^T C^T B^T \bar{P}_i B_1 C K_i \quad (9)$$

沿闭环系统(5)的运行轨迹对式(7)求差分并取其期望

$$\begin{aligned} \mathcal{E} \{ \Delta V(k) \} &= \mathcal{E} \{ [V(k+1, \tau(k)+1) | X(k), \tau(k) = i] - V(X(k), i) \} = \\ &= X^T(k) (A_i + \bar{B}_1 \Xi_0 K_i)^T \bar{P}_i (A_i + \bar{B}_1 \Xi_0 K_i) + \\ &+ \sum_{j=1}^m \sigma_j^2 (\bar{B}_1 C_j K_i)^T \bar{P}_i \bar{B}_1 C_j K_i - P_i | X(k) + \\ &+ 2(A_i + \bar{B}_1 \Xi_0 K_i)^T \bar{P}_i B_2 \omega(k) + \\ &+ \omega^T(k) \bar{B}_2^T \bar{P}_i B_2 \omega(k) + z^T(k) z(k) - \\ &- \gamma^2 \omega^T(k) \omega(k) - z^T(k) z(k) + \gamma^2 \omega^T(k) \omega(k) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\bar{P}_i = \sum_{j=1}^i p_{ij} P_j$ 。由 Schur 补可知, 如果条件(6)成立, 则

$$-\lambda | \xi^T(k) \xi(k) - \gamma^2 \omega^T(k) \omega(k) + z^T(k) z(k) | \quad (11)$$

式中, $\xi(k) = [X^T(k) \omega^T(k)]^T$ 。

由式(11)可知, 当 $\omega(k) \equiv 0$ 时

$$\mathcal{E} \{ \Delta V(k) \} \leq -\lambda | X^T(k) X(k) | \quad (12)$$

因此, 系统(5)是随机均方稳定的。

在零初始条件下, 对式(11)从0到 ∞ 求和, 得到

$$\mathcal{E} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} [z^T(k) z(k) - \gamma^2 \omega^T(k) \omega(k)] \right\} < -V(\infty) < 0$$

即

$$\mathcal{E} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} z^T(k) z(k) \right\} \leq \gamma^2 \mathcal{E} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k) \omega(k) \right\}$$

定理1给出了系统(5)的 H_∞ 均方稳定的充分条件, 下面将设计容错控制器增益 K_i 。

定理2 考虑执行器故障的闭环控制系统(5), 对于给定的 $\gamma, \mu_j, \sigma_j (j=1, 2, \dots, m)$, 如果存在适当维数的实矩阵 $\chi_i > 0$ 以及矩阵 Y_i , 满足线性矩阵不等式(13), 则存在状态反馈容错控制矩阵 $K_i = Y_i \chi_i^{-1}$ 使系统(5) H_∞ 均方渐近稳定, 则

$$\begin{bmatrix} -\chi_i & 0 & \chi_i A_i^T W_i + Y_i^T \Xi_i^T \bar{B}_1^T W_i & \tilde{\Theta} & \chi_i \bar{C}^T \\ * & -\gamma^2 I & \bar{B}_2^T W_i & 0 & 0 \\ * & * & -\tilde{\chi}_h & 0 & 0 \\ * & * & * & -J_i & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

且满足 H_∞ 性能指标 γ 。

式中, $\tilde{\Theta} = [\sigma_1 Y_1^T C^T B^T W_1 \dots \sigma_m Y_m^T C^T B^T W_m]$ ($j=1, \dots, m$); $\tilde{\chi}_h = \text{diag} \{ \chi_1, \dots, \chi_m \}$; $J_i = \text{diag} \{ \tilde{\chi}_h, \dots, \tilde{\chi}_h \}$ 。

证明 定义 $W_i = [\sqrt{p_{i1}} I, \dots, \sqrt{p_{in}} I]$, $\mathcal{P} = \text{diag} \{ P_1, \dots, P_m \}$, $\chi_i = P_i^{-1}$ 则

$$\bar{P}_i = W_i \mathcal{P} W_i^T \quad (14)$$

定理1已经证明了闭环系统(5) H_∞ 均方渐近稳定的充分条件, 将式(14)代入式(6), 进行 Schur 补转换, 对其左乘、右乘矩阵 $\text{diag} \{ \chi_i, I, I, I, I \}$ 及其转置, 并令 $Y_i = K_i \chi_i$, 则可得条件(13)。

证毕

注4 本文提出了故障分布相关(定理2中的 $K_i (i \in \mathcal{L})$ 和故障的期望 μ_j 和方差 $\sigma_j (j=1, 2, \dots, m)$ 相关)的容错控制器设计问题, 而已有文献只是对发生的静态故障行为作了可靠性设计, 这在一定程度上会增加控制器设计的保守性。同时, 也没有考虑故障为时变的问题。

3 数值算例

考虑离散线性时滞系统(2)的参数为

$$A = \begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 0 & 1.02 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad C = [0.1 \quad -0.1]$$

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.2 \end{bmatrix}, \quad k \in \{-2, -1\}$$

并假设扰动

$$\omega_k = \begin{cases} 0.1 \sin(k), & k = 10, \dots, 15 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

时滞概率转移矩阵为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

选取 $\Xi_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 1.1 \end{bmatrix}$, $\Delta = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$, 也即执行器 1 部分失效, 执行器 2 增益有 1% 的正向漂移, 且两个执行器都存在小幅波动。

通过定理 2, 在 H_∞ 性能指标 $\gamma=5$ 下, 可以求出在该情况下容错控制器(4)增益为

$$K_1 =$$

$$\begin{bmatrix} -3.8974 & 1.8699 & 0.0189 & 0.0491 & -4.0057 & 0.0457 \\ -0.0767 & -0.2148 & 0.0156 & 0.0414 & 0.1949 & -0.5743 \end{bmatrix}$$

$$K_2 =$$

$$\begin{bmatrix} -4.1928 & 1.9457 & -3.8139 & 0.0059 & -1.5954 & 0.0384 \\ -0.0880 & -0.2299 & 0.1853 & -0.5307 & 0.0773 & -0.2087 \end{bmatrix}$$

图 1 给出了时滞的模态切换图, 图 2 给出了系统在给定条件下的状态响应, 表明在发生故障后系统在可靠性控制器的作用下, 依然能够保证一定的控制性能, 说明了本方法的有效性。

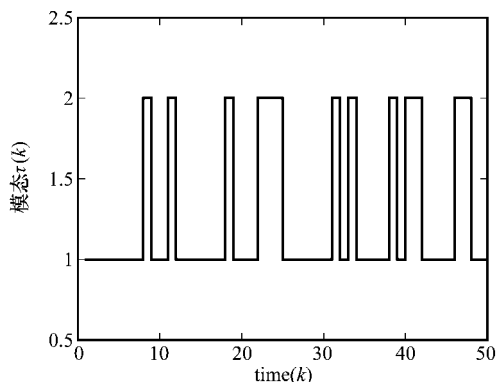


图 1 时延模态图

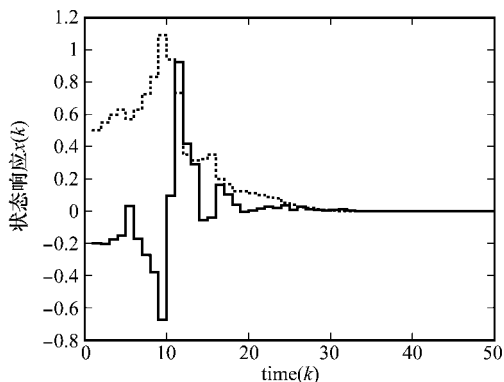


图 2 系统状态响应曲线

4 结 论

本文提出了一种更具有实际意义的随机故障模型, 针对一类具有输入时延的离散系统, 研究了考虑执行器故障的容错控制器的设计问题, 运用线性矩阵不等式的方法, 给出了

使得系统 H_∞ 均方内指数渐近稳定且具有 H_∞ 范数界的故障分布依赖的解的充分条件, 算例验证了本方法的有效性。

参考文献:

- [1] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] Saljak D D. Reliable control using multiple control system [J]. *International Journal of Control*, 1980, 32(2): 303-329.
- [3] Gao Z Q, Antsaklis P J. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems[J]. *International Journal of Control*, 1991, 53(3): 717-729.
- [4] Jiang J. Design of reconfigurable control systems using eigen-structure assignments [J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(2): 395-410.
- [5] 孙新柱, 胡寿松. 多目标约束下的满意容错控制方法[J]. *自动化学报*, 2008, 34(8): 937-942.
- [6] Shimemura E, Fujita M. A design method for linear state feedback systems possessing integrity based on a solution of a Riccati-type equation [J]. *International Journal of Control*, 1985, 42 (4): 887-899.
- [7] 张华春, 谭民. 状态反馈控制系统的容错控制器设计[J]. *控制与决策*, 2000, 15(6): 724-726.
- [8] 李娟, 叶若红, 唐功友. 含控制时滞系统的实时故障诊断和最优容错控制[J]. *控制与决策*, 2008, 23(4): 439-444.
- [9] 孙金生, 胡寿松. 鲁棒容错控制系统设计[J]. *控制理论与应用*, 1994, 11(3): 376-380.
- [10] Jiang J, Zhao Q. Reconfigurable control based on imprecise fault identification[C]// *Proc. of the American Control Conference*, 1999, 1: 114-118.
- [11] Zhang Y, Li X. Detection and diagnosis of sensor and actuator failures using IMM estimator[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(4): 1293-1313.
- [12] Wang Z D, Huang B, Burnham K J. Stochastic reliable control of a class of uncertain time-delay systems with unknown non-linearities[J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, 48(5): 647-653.
- [13] Wu H N, Zhang H Y. Reliable mixed L_2/H_∞ fuzzy static output feedback control for nonlinear systems with sensor faults[J]. *Automatica*, 2005, 41(11): 1925-1932.
- [14] Wu H N. Reliable LQ fuzzy control for continuous-time nonlinear systems with actuator faults [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2004, 34(4): 1743-1752.
- [15] 王树彬, 王执铨, 吉小鹏. 多指标约束条件下广义系统的容错控制[J]. *控制与决策*, 2008, 23(1): 103-106.
- [16] Ye D, Yang G H. Reliable guaranteed cost control for linear state delayed systems with adaptive memory state feedback controllers[J]. *Asian Journal of Control*, 2008, 10(6): 678-686.
- [17] Xia J W, Xu S Y, Zou Y. Robust reliable H_∞ control for non-linear uncertain stochastic time-delay systems with Markovian jumping parameters [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2008, 6(4): 410-414.
- [18] Fang H J, Huo Z H. Robust fault-tolerant control for networked control system with packet dropout [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2007, 18(1): 76-82.
- [19] Wei G, Wang Z, Shu H. Robust filtering with stochastic nonlinearities and multiple missing measurements[J]. *Automatica*, 2009, 45 (3): 836-841.