第 27 卷第 2 期
2010 年 2 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 27 No. 2
Feb. 2010

文章编号: 1000−8152(2010)02−0269−04

带有执行器故障的网络控制系统的自适应容错H_∞控制

邓玮瑋, 费敏锐

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200072)

摘要: 针对带有执行器故障的网络控制系统, 提出了一种自适应容错控制方法. 首先基于最近提出的一种新的网络诱导时滞模型, 设计了状态反馈形式的自适应容错控制器. 然后以线性矩阵不等式的形式给出了控制器存在的充分条件. 该条件不仅保证了系统在执行器故障和正常情形下均能达到稳定, 而且使得其H_∞性能最优. 最后通过一个数值例子证明了所提方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 自适应控制; 故障容错; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273　　　**文标识码:** A

Adaptive fault-tolerant H-infinity control for networked control systems with actuator faults

DENG Wei-hua, FEI Min-rui

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronical Engineering & Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: An adaptive fault-tolerant control approach to networked control systems(NCSs) with actuator faults is presented. Based on a new network-induced delay model proposed recently, we design an adaptive state feedback controller. A sufficient condition of existence of a controller is given in terms of linear matrix inequality(LMI), which guarantees in the H-infinity sense the stability of NCSs under normal and faulty conditions. An example illustrates effectiveness of the proposed method.

Key words: networked control systems; adaptive control; fault-tolerant; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

在许多实际控制系统中故障是经常发生的, 这会降低系统性能甚至会使得系统不稳定. 而有一种被称为故障容错控制或可靠控制的控制方法, 它不仅能够保证系统的稳定而且还能够满足系统的某些性能要求. 因此设计这一类控制器是十分有意义的. 最近许多研究者都在进行故障容错控制相关方面的研究. 例如文[1]提出了带有执行器和传感器故障的线性系统的可靠控制方法, 文[2]研究了补偿执行器故障的可靠状态反馈控制. 以上工作都属于被动的故障容错控制方法, 实现起来比较容易. 还有一种积极的方法, 它是通过预先计算的自适应律来在线的补偿故障, 所以这种方法比被动的方法更加有优越性,容错能力更强. 自适应方法就是其中之一, 并在近几年该方法的研究工作取得了显著的成效. 例如文[3]针对传感器故障设计了的自适应故障容错控制器, 文[4]考虑了由输出反馈的自适应故障补偿. 然而, 不论是被动方法还是积极的方法, 将它们应用于网络控制系统的故障容错控制研究还比较少.

在过去的几年网络控制系统[5]也受到了越来越多的关注. 一个网络控制系统是指它的各种组件如传感器, 控制器和执行器等分布在不同的空间位置并且他们是通过一个共享的网络通道来交换信息的. 由于共享通道的带宽是有限的, 系统经常会有时滞和丢包现象. 关于这些问题的提出和解决方法已经在文[6～8]中被充分的讨论. 除此之外, 文[9～11]还分别研究了网络控制系统的保性能控制, 输出跟踪控制和故障检测等问题. 迄今为止, 关于带有执行器故障的网络控制系统的自适应故障容错控制还没有被考虑. 本文的目的是设计一个自适应故障容错控制器使得闭环网络控制系统稳定并使得其H_∞性能达到最小.

2 问题描述(Problem statement)

被控对象的模型如下:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu^{\mathrm{F}}(t) + E\omega(t),\\ y(t) &= Cx(t) + Du^{\mathrm{F}}(t) + F\omega(t).\end{aligned} \tag{1}$$

收稿日期: 2009−07−25; 收修改稿日期: 2009−09−03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60834002, 60774059); 国家"863"计划课题(2007AA04Z174); 上海市教委曙光计划跟踪项目(06GG10); 上海市优秀学科带头人计划项目(08XD14018).

其中: $x(t)\in\mathbb{R}^n$是状态向量, $u(t)\in\mathbb{R}^m$是控制输入, $y(t)\in\mathbb{R}^q$是输出, 并且$\omega(t)\in\mathbb{R}^l$ 是属于$\mathrm{L}_2[0,\infty)$类的干扰输入, A,B,C,D,E,F是具有合适维数的系数矩阵.

以下执行器故障模式[3]被考虑:

$$u^{\mathrm{F}}(t)=(I-\rho)u(t). \tag{2}$$

其中: $\rho=\mathrm{diag}\{\rho_1,\rho_2,\cdots,\rho_{\mathrm{m}}\}$, $\rho_i\in\{0,1\}$是未知常数, $\rho_i=1$ 和$\rho_i=0$分别代表第i个执行器有故障或正常. 在此不考虑所有的执行器均有故障的情形. 那么把式(2)代入式(1)得

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+B(I-\rho)u(t)+E\omega(t),\\ y(t)=Cx(t)+D(I-\rho)u(t)+F\omega(t).\end{cases} \tag{3}$$

状态反馈控制器采取以下形式:

$$u(t)=K(\hat{\rho}(t))x(t_k-\eta_k),\ t_k\leqslant t\leqslant t_{k+1}. \tag{4}$$

其中: $t_k(k=1,\cdots,\infty)$和$\eta_k\in[\eta_{\mathrm{m}},\eta_{\mathrm{M}}]$依次代表零阶保持器更新时刻和传递时滞. 时滞包括从传感器到控制器和从控制器到零阶保持器之间的时滞. 采样周期和最大丢包数设为h 和$\bar{\delta}$. 假如设$\eta(t)=t-t_k+\eta_k-\eta_{\mathrm{m}}$, 那么$t_k-\eta_k$可以被重新写为$t-d(t), d(t)=\eta_{\mathrm{m}}+\eta(t)\ \eta(t)\in[0,\kappa]\ \kappa=\eta_{\mathrm{M}}-\eta_{\mathrm{m}}+(\bar{\delta}+1)h$. 这里的时滞和丢包模型是基于文[8]的. 将式(4)带入式(3), 则闭环系统如下:

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=Ax(t)+B(I-\rho)K(\hat{\rho})x(t-d(t))+E\omega(t),\\ y(t)=Cx(t)+D(I-\rho)K(\hat{\rho})x(t-d(t))+F\omega(t).\end{cases} \tag{5}$$

本文的控制目标是设计控制器(4)使得: 1) 在执行器故障和正常情形闭环系统(5)都保持渐近稳定; 2) 使系统的H_∞ 性能达到最小.

以下引理[12]将被用于定理1的证明.

引理 1 考虑如下一个$\theta\in\mathbb{R}^r$的二次标量函数:

$$f(\theta_1,\cdots,\theta_r)=\\ \alpha_0+\sum_i\alpha_i\theta_i+\sum_{i<j}\beta_{ij}\theta_i\theta_j+\sum_i\gamma_i\theta_i^2. \tag{6}$$

其中$\theta_i(i=1,\cdots,r)$为标量, 并假设$f(\cdot)$是多突的, 即

$$2\gamma_i=\frac{\partial^2 f}{\partial\theta_i^2}\geqslant 0,\ i=1,\cdots,r. \tag{7}$$

那么对于所有的θ 在集合$\Omega:=\{(\theta_1,\cdots,\theta_{\mathrm{r}}):\theta_{\mathrm{i}}\in\{\breve{\theta}_{\mathrm{i}},\widehat{\theta}_{\mathrm{i}}\}\}$ 中, $f(\theta)<0$.

3 自适应容错H_∞控制器设计(Adaptive fault-tolerant H-infinity controller design)

先做一些假设和准备工作. 设 $\Delta_{\hat{\rho}}=\{\hat{\rho}=\mathrm{diag}\{\hat{\rho}_1,\cdots,\hat{\rho}_{\mathrm{m}}\}:\hat{\rho}_i\in\{0,1\},i=1,\cdots,m\}$. 状态反馈控制器按如下形式给出:

$$u(t)=K(\hat{\rho}(t))x(t-d(t))=\\ (K_0+K_{\mathrm{a}}(\hat{\rho}(t))+K_{\mathrm{b}}(\hat{\rho}(t)))x(t-d(t)).$$

其中:

$$K_{\mathrm{a}}(\hat{\rho}(t))=\sum_{i=1}^m K_{\mathrm{a}i}\hat{\rho}_i(t),\ K_{\mathrm{b}}(\hat{\rho}(t))=\sum_{i=1}^m K_{\mathrm{b}i}\hat{\rho}_i(t),$$

并且$\hat{\rho}_i(t)$是ρ_i的估计; $K_{\mathrm{a}i},K_{\mathrm{b}i}(i=1,\cdots,m)$和$K_0$是将被设计的控制器增益. 自适应律的设计采取文[3]的形式:

$$\dot{\hat{\rho}}_i=\mathrm{Proj}_{[0,1]}L_i=\begin{cases}0,\quad \hat{\rho}_i=0\text{且}L_i\leqslant 0,\text{或}\\ \qquad \hat{\rho}_i=1\text{且}L_i\geqslant 0;\\ L_i,\ \text{其他}.\end{cases} \tag{8}$$

其中: $L_i=-l_ix^{\mathrm{T}}(t)P[B^iK_{\mathrm{b}}(\hat{\rho})+BK_{\mathrm{a}i}]x(t-d(t))$, $l_i>0(i=1,\cdots,m)$是自适应增益; $\mathrm{Proj}\{\cdot\}$代表投影操作, 它的作用就是把$\hat{\rho}_i$的估计值投影到区间$[0,1]$. 主要结果由如下定理给出:

定理 1 设$\gamma_{\mathrm{f}}>\gamma_{\mathrm{n}}>0$是常数. 假如存在正定矩阵$X,\bar{Q},\bar{R},\bar{Q}_1,\bar{Q}_2,\bar{M}$和矩阵$\bar{S},\bar{T},\bar{U},\bar{V},Y_0,Y_{\mathrm{a}i}$, $Y_{\mathrm{b}i}$, $i=1,\cdots,m$使得以下线性矩阵不等式对于$\Delta_{\hat{\rho}}$满足

$$\Pi_4(i)\geqslant 0(i=1,\cdots,m), \tag{9}$$

并且对于$\rho=0$, 即在正常情形, 满足

$$\begin{bmatrix}\bar{\Phi}_1+\bar{\Phi}_2+\bar{\Phi}_2^{\mathrm{T}}+\phi & \bar{\Phi}_3 & \bar{\Phi}_5 & \bar{\Phi}_7\\ * & \bar{\Phi}_4 & 0 & 0\\ * & * & \bar{\Phi}_6 & 0\\ * & * & * & -I\end{bmatrix}<0. \tag{10}$$

对于$\rho\in\{\rho^1,\cdots,\rho^S\}$, 即在故障情形, S是故障模式个数, 满足

$$(\bar{10}). \tag{11}$$

其中$(\bar{10})$由式(10)中ϕ置换为$\bar{\phi}$得到, 另外

$$\bar{\Phi}_1=\begin{bmatrix}AX+XA^{\mathrm{T}}+\bar{Q}+\bar{R} & 0 & \bar{\Lambda} & 0 & E\\ * & -\bar{Q} & 0 & 0 & 0\\ * & * & 0 & 0 & 0\\ * & * & * & -\bar{R} & 0\\ * & * & * & * & 0\end{bmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_2=[\bar{S}+\bar{T}\quad \bar{U}-\bar{T}\quad \bar{V}-\bar{U}\quad -\bar{V}-\bar{S}\quad 0],$$

$$\bar{\Phi}_3=[\bar{S}\ \ \bar{T}\ \ \bar{U}\ \ \bar{V}],\ \bar{d}=\eta_{\mathrm{m}}+\kappa,$$

$$\bar{\Phi}_4=\mathrm{diag}\{\eta_{\mathrm{m}}^{-1}(\bar{Q}_1-2X),\bar{d}^{-1}(\bar{Q}_2-2X),\\ \kappa^{-1}(\bar{Q}_2-2X),\bar{d}^{-1}(\bar{M}-2X)\},$$

$$\varphi=\mathrm{diag}\{0,0,0,0,-\gamma_{\mathrm{n}}^2I\},\ \bar{\Lambda}_{32}(i)=-B^iY_{\mathrm{b}i},$$

$$\bar{\varphi}=\mathrm{diag}\{0,0,0,0,-\gamma_{\mathrm{f}}^2I\},\ H=[I\ \ I\ \ I],$$

$$\bar{\Phi}_{53}=B(I-\rho)(Y_0+\sum_{i=1}^m Y_{\mathrm{a}i}\hat{\rho}_i+\sum_{i=1}^m Y_{\mathrm{b}i}\hat{\rho}_i),$$

$\bar{\Phi}_5 = [AX\ \ 0\ \ \bar{\Phi}_{53}\ \ 0\ \ E]^{\mathrm{T}}H,$

$\bar{\Phi}_6 = \mathrm{diag}\{-\eta_{\mathrm{m}}^{-1}\bar{Q}_1, -\kappa^{-1}\bar{Q}_2, -\bar{d}^{-1}\bar{M}\},$

$\bar{\Phi}_{73} = D(I-\rho)(Y_0 + \sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{a}i}\hat{\rho}_i + \sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{b}i}\hat{\rho}_i),$

$\bar{\Phi}_7 = [CX\ \ 0\ \ \bar{\Phi}_{73}\ \ 0\ \ F]^{\mathrm{T}},$

$$\bar{\Lambda} = B((I-\rho)Y_0 + \sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{a}i}\rho_i - \rho\sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{a}i}\hat{\rho}_i + (I-\hat{\rho})\sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{b}i}\hat{\rho}_i),$$

$$\Pi_4(i) = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{132}(i) & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 \\ * & * & 0 & 0 \\ * & * & * & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_{132}(i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{\Lambda}_{32}(i) & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & 0 & 0 \\ * & * & * & * & 0 \end{bmatrix},$$

并且$\hat{\rho}_i$由式(8)确定, 那么对于$\hat{\rho}_i(t) \in [0,1]$, $i = 1,\cdots,m$, 闭环系统(5)是渐近稳定的并且对$x(0) = 0$满足:

在正常情形:

$$\int_0^{\infty} y^{\mathrm{T}}(t)y(t)\mathrm{d}t \leqslant \gamma_{\mathrm{n}}^2 \int_0^{\infty} \omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)\mathrm{d}t + \sum_{i=1}^{m} \frac{\tilde{\rho}_i^2(0)}{l_i}.$$

在故障情形:

$$\int_0^{\infty} y^{\mathrm{T}}(t)y(t)\mathrm{d}t \leqslant \gamma_{\mathrm{f}}^2 \int_0^{\infty} \omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)\mathrm{d}t + \sum_{i=1}^{m} \frac{\tilde{\rho}_i^2(0)}{l_i}.$$

其中$\tilde{\rho}_i(t) = \hat{\rho}_i - \rho_i$. 进一步, 控制器为

$$u(t) = (Y_0X^{-1} + \sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{a}i}X^{-1}\hat{\rho}_i + \sum_{i=1}^{m} Y_{\mathrm{b}i}X^{-1}\hat{\rho}_i)x(t-d(t)).$$

证 选取以下Lyapunov-Krasovskii函数[8]:

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) + V_4(t) + V_5(t), \tag{12}$$

$V_1(t) = x^{\mathrm{T}}(t)Px(t)$, $V_2(t) = \int_{t-\eta_{\mathrm{m}}}^{t} x^{\mathrm{T}}(s)Qx(s)\mathrm{d}s$,

$V_3(t) = \int_{t-\bar{d}}^{t} x^{\mathrm{T}}(s)Rx(s)\mathrm{d}s$, $V_5(t) = \sum_{i=1}^{m} \frac{\tilde{\rho}_i^2(t)}{l_i}$,

$$V_4(t) = \int_{-\eta_{\mathrm{m}}}^{0}\int_{\beta}^{0} \dot{x}^{\mathrm{T}}(t+\alpha)Q_1\dot{x}(t+\alpha)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta + \int_{-\bar{d}}^{-\eta_{\mathrm{m}}}\int_{\beta}^{0} \dot{x}^{\mathrm{T}}(t+\alpha)Q_2\dot{x}(t+\alpha)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta + \int_{-\bar{d}}^{0}\int_{\beta}^{0} \dot{x}^{\mathrm{T}}(t+\alpha)M\dot{x}(t+\alpha)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta.$$

其中: $P > 0$, $Q > 0$, $Q_1 \geqslant Q_2 > 0$, $R > 0$和$M > 0$是待确定的矩阵. 那么对$V(t)$求导数, 并由Newton-Leibniz公式, 对任意合适维数的矩阵S, T, U, V容易得到

$$\dot{V}(t) \leqslant \varepsilon^{\mathrm{T}}[\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_2^{\mathrm{T}} + \Phi_3 + \Phi_4]\varepsilon + \sum_{i=1}^{4} M_i + 2\sum_{i=1}^{m} \frac{\dot{\hat{\rho}}_i(t)\tilde{\rho}_i(t)}{l_i} + 2x^{\mathrm{T}}(t)PB[K_{\mathrm{a}}(\tilde{\rho}) + \tilde{\rho}K_{\mathrm{b}}(\hat{\rho}(t))]x(t-d(t)). \tag{13}$$

其中:

$\varepsilon = [x^{\mathrm{T}}(t)\ \ x^{\mathrm{T}}(t-\eta_{\mathrm{m}})\ \ x^{\mathrm{T}}(t-d(t))\ \ x^{\mathrm{T}}(t-\bar{d})\ \ \omega^{\mathrm{T}}],$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} PA + A^{\mathrm{T}}P + Q + R & 0 & \Lambda & 0 & PE \\ * & -Q & 0 & 0 & 0 \\ * & * & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -R & 0 \\ * & * & * & * & 0 \end{bmatrix},$$

$\Phi_2 = [S+T\ \ \ U-T\ \ \ V-U\ \ \ -V-S\ \ \ 0],$

$\Phi_3 = \Phi_{31}^{\mathrm{T}}\left[\eta_{\mathrm{m}}Q_1 + \kappa Q_2 + \bar{d}M\right]\Phi_{31},$

$\Phi_{31} = [A\ \ \ 0\ \ \ B(I-\rho)K(\hat{\rho})\ \ \ 0\ \ \ E],$

$\Phi_4 = \eta_{\mathrm{m}}SQ_1^{-1}S^{\mathrm{T}} + \bar{d}TQ_2^{-1}T^{\mathrm{T}} + \kappa UQ_2^{-1}U^{\mathrm{T}} + \bar{d}VM^{-1}V^{\mathrm{T}},$

$M_1 = -\int_{t-\eta_{\mathrm{m}}}^{t} M_{11}^{\mathrm{T}}Q_1^{-1}M_{11}\mathrm{d}\alpha,$

$M_{11} = S^{\mathrm{T}}\varepsilon + Q_1\dot{x}(\alpha),$

$M_2 = -\int_{t-d(t)}^{t-\eta_{\mathrm{m}}} M_{21}^{\mathrm{T}}Q_2^{-1}M_{21}\mathrm{d}\alpha,$

$M_{21} = T^{\mathrm{T}}\varepsilon + Q_2\dot{x}(\alpha),$

$M_3 = -\int_{t-\bar{d}}^{t-d(t)_{\mathrm{m}}} M_{31}^{\mathrm{T}}Q_2^{-1}M_{31}\mathrm{d}\alpha,$

$M_{31} = U^{\mathrm{T}}\varepsilon + Q_2\dot{x}(\alpha),$

$M_4 = -\int_{t-\bar{d}}^{t} M_{41}^{\mathrm{T}}M^{-1}M_{41}\mathrm{d}\alpha,$

$M_{41} = V^{\mathrm{T}}\varepsilon + M\dot{x}(\alpha).$

设$B = [b^1,\cdots,b^m]$, $B^i = [0,\cdots,b^i,\cdots,0]$, 那么得到下式[3]:

$$\begin{aligned} K_{\mathrm{b}}(\hat{\rho}) &= \sum_{i=1}^{m} \tilde{\rho}_i PB^iK_{\mathrm{b}}(\hat{\rho}), \\ PB\tilde{\rho}K_{\mathrm{a}}(\tilde{\rho}) &= \sum_{i=1}^{m} \tilde{\rho}_i PBK_{\mathrm{a}i}. \end{aligned} \tag{14}$$

结合式(8)(13)和(14)得到

$$\dot{V}(t) + y^{\mathrm{T}}(t)y(t) - \gamma_{\mathrm{f}}^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t) \leqslant \varepsilon^{\mathrm{T}}[\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_2^{\mathrm{T}} + \Phi_3 + \Phi_4 + \bar{\phi} + \Phi_5]\varepsilon. \tag{15}$$

其中: $\Phi_5 = \Phi_{51}^{\mathrm{T}}\Phi_{51}$, $\Phi_{51} = [C\ \ 0\ \ D(I-\rho)K(\hat{\rho})\ \ 0\ \ F]^{\mathrm{T}}$.

选取$\mathrm{diag}\{N_1, N_2, N_3, I\}$, 其中

$N_1 = \mathrm{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, I\},$

$N_2 = \mathrm{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}\},$

$$N_3 = \mathrm{diag}\{Q_1^{-1}, Q_2^{-1}, M^{-1}\}.$$

再做变量替换:

$$X = P^{-1},\ \bar{M} = M^{-1},\ \bar{Q}_1 = Q_1^{-1},$$
$$\bar{Q}_2 = Q_2^{-1},\ \bar{Q} = P^{-1}QP^{-1},\ \bar{R} = P^{-1}RP^{-1},$$
$$[\bar{S}\ \bar{T}\ \bar{U}\ \bar{V}] = N_2[S\ T\ U\ V]N_2,\ Y_{\mathrm{a}i} = K_{\mathrm{a}i}P^{-1},$$
$$Y_{\mathrm{b}i} = K_{\mathrm{b}i}P^{-1}(i = 1, \cdots, m),\ Y_0 = K_0P^{-1},$$

然后结合引理1并参考文[3]容易得到结果，这里不再赘述. 证毕.

需要注意的是如果设$Y_{\mathrm{a}i} = 0$, $Y_{\mathrm{b}i} = 0$, 那么定理1可以降为固定增益方法的条件它是故障容错中被动方法之一.

下面通过求解以下优化问题[3], 定理1中的H_∞性能可以达到最小:

$$\min(\beta_1\gamma_1 + \beta_2\gamma_2),$$
$$\text{s.t. 式}(9)(10).$$

其中: $\gamma_{\mathrm{n}}^2 = \gamma_1$, $\gamma_{\mathrm{f}}^2 = \gamma_2$, β_1, β_2是权重系数. 由于系统一般总是在正常情形, 所以一般选取$\beta_1 > \beta_2$.

4 数值例子(Numerical example)

以下例子[8]证明了所提方法的有效性. 对象(1)的系数矩阵为

$$A=\begin{bmatrix}-1.175 & 0.9871\\ -8.458 & -0.8776\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}-0.194 & -0.03593\\ -19.29 & -3.803\end{bmatrix},$$
$$E=\begin{bmatrix}1\\4\end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix}0 & 4\\0 & 0\\0 & 0\end{bmatrix},\ D=\begin{bmatrix}0 & 0\\2 & 0\\0 & 2\end{bmatrix},\ F=0,$$

并且$h = 10$ ms, $\eta_{\mathrm{m}} = 10$ ms, $\eta_{\mathrm{M}} = 40$ ms和$\kappa = 60$ ms是采样周期和网络诱导时滞界. $\bar{\delta} = 2$是最大丢包数. 另外, β_1, β_2被设为10和1. 这里考虑3种模式: 模式1: 两个执行器都正常; 模式2: 第1个有故障第2个正常; 模式3: 第1个正常第2个有故障. 表1显示了分别用固定增益和自适应的方法得到的结果, 它证明了自适应方法的优越性.

表 1 H_∞性能比较

Table 1 Comparison of H_∞ performance

模式	方法	性能
1	固定增益	8.8196
	自适应	7.5968
2	固定增益	10.1671
	自适应	8.1165
3	固定增益	10.1763
	自适应	7.9019

5 结论(Conclusions)

本文提出了一个带有执行器故障的网络控制系统的自适应容错控制设计方法. 以线性矩阵不等式的形式给出了控制器存在的充分条件. 得到了在执行器正常和故障两种情形下的网络控制系统的最优性能. 通过比较证明了对于带有执行器故障的网络控制系统, 自适应设计方法优于固定增益的设计方法. 一个数值仿真例子也证明了以上的观点.

参考文(References):

[1] LIAO F, WANG J L. Reliable robust flight tracking control: an LMI approach[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(1): 76 – 89.

[2] ZHANG Q, JIANG J. Reliable state feedback control system design against actuator failures[J]. *Automatica*, 1998, 34(10): 1267 – 1272.

[3] YANG G H, YE D. Adaptive fault-tolerant control against sensor failures[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(2): 95 – 107.

[4] TAO G, CHEN S H. An adaptive actuator failure compensation controller using output feedback[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(3): 506 – 511.

[5] HESPANHA J, NAGHSHTABRIZI P, XU Y. A survey of recent results in networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138 – 162.

[6] WALSH G C, YE H, BUSHNELL L. Stability analysis of networked systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(5): 438 – 446.

[7] MATIAS G R, ANTONIO B. Analysis of networked control systems with drops and variable delays[J]. *Automatica*, 2007, 43(3): 2054 – 2059.

[8] GAO H J, CHEN T W. A new delay system approach to network-based control[J]. *Automatica*, 2008, 44(3): 39 – 52.

[9] 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.
(TANG Bin, LIU Guoping, GUI Weihua. Networked guaranteed cost control of uncertain systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 105 – 110.)

[10] GAO H J, CHEN T W. Network-based H_∞ output tracking control[J]. *IEEE Transactions on Automatic control*, 2008, 53(3): 655 – 667.

[11] ZHENG Y, FANG H J, WANG H O. Takagi-sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with Markov delays[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part B: Cybernetics*, 2006, 36(4): 924 – 929.

[12] PASCAL G, PIERRE A, CHILALI M. Affine arameter-dependent Lyapunov functions and real parametric uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic control*, 1996, 41(3): 436 – 442.

作者简介:

邓玮璋 (1978—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为网络控制、智能控制, E-mail: dwh197859@126.com;

费敏锐 (1961—), 男, 教授, 目前研究方向为智能控制、复杂系统建模、网络控制等, E-mail: mrfei888@x263.net.