第20卷 第9期 控 制 与 决 策 2005年9月
Vol 20 No. 9 Control and Decision Sept. 2005

文章编号: 1001-0920(2005)09-1002-04

不确定网络控制系统具有H∞性能界的鲁棒控制

黄 剑, 关治洪, 王仲东
(华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074)

摘 要: 针对闭环网络控制系统, 在考虑网络数据传输可能发生丢包的情况下, 提出了一类不确定切换系统模型. 为了量化网络数据丢失的影响, 根据网络特点给出了网络传输数据丢包率的数学定义, 进一步研究了此类切换系统在某种程度的数据丢包率影响下具有一定H_∞性能界的鲁棒状态反馈控制问题. 应用H_∞鲁棒控制理论及线性矩阵不等式技术得到了全状态反馈控制器的设计方法, 以一组线性矩阵不等式表示其主要结果. 最后给出了一个具体的数值示例.

关键词: 网络控制系统; 切换系统; 鲁棒控制; H_∞性能; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Robust Control with H∞ Performance Bound for Networked Control Systems with Data Packet Dropouts

HUANG Jian, GUAN Zhi-hong, WANG Zhong-dong
(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: HUANG Jian, E-mail: huang_jan531@126.com)

Abstract: Networked control systems with data packet dropouts are described by an uncertain switched system model. According to characteristics of data networks a networked data packet dropouts ratio is defined to quantify the degree of data losses caused by networked transmissions. Moreover, the robust control problem with H_∞ performance bound is studied for these networked control systems. By applying H_∞ control theories and the LMI technique, the design method of the full state feedback control law is obtained. The main results are given in terms of linear matrix inequalities. A numerical example is presented to demonstrate the results.

Key words: Networked control systems; Switched systems; Robust control; H_∞ performance; LMI

1 引 言

随着控制系统规模的不断扩大, 传感器、控制器与执行器的空间位置分布特性日渐增强, 基于现场总线等控制网络的网络控制系统(NCSs)在各行各业得到了广泛的应用. 一般情况下通信信道中都存在着干扰, 这些干扰有可能使通信过程失败, 从而导致分组(Packet)的丢失, 即所谓的丢包现象. 一般将可能发生数据传输丢包的网络控制系统称为有损网络控制系统. 显然, 即使NCSs在通信正常的情况下能够保证稳定性, 长时间的丢包也可能破坏系统的稳定性.

近年来已有一些关于有损网络控制系统稳定性研究的成果. Hassibi等[1]提出了异步动态系统(ADS)的概念, 并给出了该系统模型在有损网络控制系统中的应用示例; Zhang Wei等[2]针对网络传输丢包和多包发送的情况, 应用异步动态系统(ADS)理论分析了NCSs的稳定性问题. 本质上, 异步动态系统属于混合动态系统的范畴, 而在混合动态系统的研究中, 切换系统的成果尤为丰富. 文献[3～6]从各个角度研究了切换系统的稳定性和它的H_∞鲁棒控制, 文献[7]研究了切换系统的H_∞性能分析问题, 但其未考虑控制器的设计. 线性矩阵不等

收稿日期: 2004-10-22; **修回日期**: 2005-03-01.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274004).
作者简介: 黄剑(1975—), 男, 湖北浠水人, 博士生, 讲师, 从事管控一体化、网络控制系统的研究; 关治洪(1955—), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士生导师, 从事脉冲与混合系统、非线性复杂系统控制等研究.

式(LMI)已逐渐成为鲁棒控制方面研究的共同语言[8], 本文的主要结论均以LMI形式给出

本文首先根据已有的结果和网络丢包的特点, 提出了一个特殊的不确定切换系统模型, 进一步研究了该模型具有H_∞性能界的鲁棒状态反馈控制问题, 得到的状态反馈控制器既可在一定的数据丢包程度下保持系统渐近稳定, 又可使系统满足一定的H_∞性能界的要求

符号说明如下: $R^+ = [0, \infty)$ 为非负实数, $N = \{1, 2, \cdots\}$ 为自然数; A^T 为矩阵A 的转置, I 为合适维数的单位矩阵, $\|\cdot\|$ 为向量或矩阵的欧氏范数, $\lambda_{\max}(\cdot)$ ($\lambda_{\min}(\cdot)$) 为矩阵的最大(小) 特征值; $L_2[0, \infty)$ 为定义在R^+ 上的所有平方可积函数构成的空间

2　问题的描述

一种简化的有损网络控制系统如图 1 所示

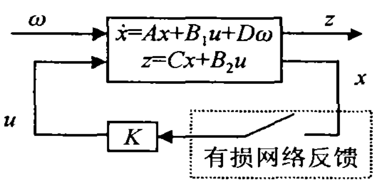

图 1　有损网络控制系统模型

该有损网络控制系统模型满足以下一些假设:

1) 网络传输速度非常快, 当网络传输正常时可忽略传输延迟的影响, 系统近似看作无时滞连续反馈控制系统;

2) 使用一个采样开关表示网络的状态 当网络通信正常时, 此开关闭合, 表示状态反馈无损失地传输到控制中心, 系统等价于一个通常的连续反馈控制系统; 当丢包发生过程中, 此开关断开, 没有新的状态信息反馈回来, 为简化处理, 此时将控制输入u保持为 0;

3) 丢包总的发生时刻在整个系统时间定义域内小于等于一定比率, 反之系统在演化过程中, 正常工作的时刻在整个时间定义域内大于一定的比率

网络持续丢包和通信恢复正常事件是交替发生的 记这些事件交替的起始时刻集合为 $\Gamma = \{t_0, t_1, t_2, \cdots | 0 \le t_0 < t_1 < t_2 < \cdots\}$, 即从 $t_0 \to t_1$ 期间通信正常, 从 $t_1 \to t_2$ 期间持续丢包, $\cdots$, (依次类推). 那么这两类事件持续发生的时间区间集合分别为持续通信正常时间区间集合$\Omega_1 = \bigcup_{k=1}^{\infty}\{(t_{2k-2}, t_{2k-1}]\}$ 和持续丢包时间区间集合 $\Omega_2 = \bigcup_{k=1}^{\infty}\{(t_{2k-1}, t_{2k}]\}, k \in N$.

综合以上假设并考虑到系统对象的不确定性, 得到一个特殊的不确定切换系统模型如下:

$$\begin{cases}\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B_1 + \Delta B_1)u(t) + D\omega(t), \\ z(t) = Cx(t) + B_2u(t), t \in \Omega_1;\end{cases} \tag{1a}$$

$$\begin{cases}\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + D\omega(t), \\ z(t) = Cx(t), t \in \Omega_2\end{cases} \tag{1b}$$

其中: x, u, z 分别为系统的状态向量、控制输入向量和被控输出向量; $\omega \in L_2[0, \infty)$ 为外界扰动信号; A, B_1, B_2 为合适维数的非零矩阵 参数不确定项 $\Delta A, \Delta B_1$ 满足

$$[\Delta A \quad \Delta B_1] = GH(t)[E_a \quad E_b], \tag{2}$$

其中G, E_a, E_b 为已知的描述不确定部分上界的实数矩阵, 时变部分$H(t)$ 满足

$$H^T(t)H(t) \le I. \tag{3}$$

不失一般性, 可设 $t_0 = 0$, 系统的初始条件为 $x(t_0) = x(0) = x_0$ 且在 $t = 0$ 处 $x(t)$ 连续

取状态反馈控制器$u(t) = Kx(t)$, 代入系统(1) 中可得其闭环形式如下:

$$\begin{cases}\dot{x}(t) = \tilde{A}_L x(t) + D\omega(t), \\ z(t) = C_L x(t), t \in \Omega_1;\end{cases} \tag{4a}$$

$$\begin{cases}\dot{x}(t) = \tilde{A} x(t) + D\omega(t), \\ z(t) = Cx(t), t \in \Omega_2\end{cases} \tag{4b}$$

其中: $\tilde{A}_L = A_L + \Delta A_L, \tilde{A} = A + \Delta A, C_L = C + B_2K, A_L = A + B_1K, \Delta A_L = GH(t)(E_a + E_bK)$, 其他相关的描述与系统(1) 基本一致

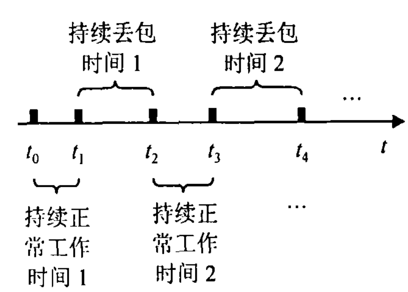

图 2　有损网络控制系统丢包时序图

对 $\forall t, \tau \in R^+, t > \tau$, 引入符号 $T_0(\tau, t), T_1(\tau, t)$ 分别表示在时间区间$[\tau, t]$ 内无数据反馈(持续丢包) 的总时间长度和有数据反馈(系统正常工作) 的总时间长度, 则有

$$T_0(\tau, t) + T_1(\tau, t) = t - \tau \tag{5}$$

成立 进而给出如下定义描述数据丢包的程度:

定义 1　若对 $\forall t, \tau \in R^+, t > \tau$, 存在常数 $\lambda^* \in (0, 1), T_u > 0$ 使得

$$T_0(\tau, t) \le \lambda^*(t - \tau) + T_u \tag{6}$$

成立, 则称有损网络控制系统(1) 具有不大于 λ^* 的数据丢包率 相应的, λ^* 称为系统(1) 的最大丢包率

引理 1[9] 对给定的具有适当维数的矩阵 Y, H 和 E, 其中 Y 是对称的, 则对所有满足 $F^{\mathrm{T}}F \le I$ 的矩阵 F, 有 $Y + HFE + E^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}H^{\mathrm{T}} < 0$ 成立, 当且仅当存在一个常数 $\epsilon > 0$, 使得 $Y + \epsilon HH^{\mathrm{T}} + \epsilon^{-1}E^{\mathrm{T}}E < 0$.

本文的目的是在最大丢包率 λ^* 一定的情况下, 找出状态反馈控制律 $u(t) = Kx(t)$, 使得到的闭环系统(4) 渐近稳定且对外部扰动信号 ω 具有一定的 H_∞ 性能界.

3 主要结果

首先给出系统(1) 的具有 H_∞ 性能界的鲁棒状态反馈控制律的存在性定理.

定理 1 对于最大丢包率为 λ^* 的不确定有损网络控制系统(1), 若存在矩阵 K、正定对称阵 P 和正数 λ_0、λ_1 和 γ_0 使得下列不等式

$$\tilde{A}^{\mathrm{T}}P + P\tilde{A} + \gamma_0^{-2}PDD^{\mathrm{T}}P + C^{\mathrm{T}}C - \lambda_0 P < 0, \tag{7}$$

$$\tilde{A}_L^{\mathrm{T}}P + P\tilde{A}_L + \gamma_0^{-2}PDD^{\mathrm{T}}P + C_L^{\mathrm{T}}C_L + \lambda_1 P < 0, \tag{8}$$

$$\lambda_0 \cdot \lambda^* < \lambda_1 \cdot (1 - \lambda^*) \tag{9}$$

成立, 则得到的闭环系统(4) 渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能指标 γ, 这里 γ 满足

$$\gamma = \sqrt{\frac{\lambda_1 \cdot \mathrm{e}^{(\lambda_1+\lambda_0)T_u}}{\lambda_1(1-\lambda^*) - \lambda_0\lambda^*}} \cdot \gamma_0. \tag{10}$$

证明 参考 Zhai[7] 在研究切换系统扰动性能分析中的思想, 可以给出以下证明:

1) 当扰动 $\omega = 0$ 时, 闭环系统的渐近稳定性. 由不等式(7), (8) 可推出

$$\tilde{A}^{\mathrm{T}}P + P\tilde{A} - \lambda_0 P < -\gamma_0^{-2}PDD^{\mathrm{T}}P - C^{\mathrm{T}}C < 0,$$

$$\tilde{A}_L^{\mathrm{T}}P + P\tilde{A}_L + \lambda_1 P < -\gamma_0^{-2}PDD^{\mathrm{T}}P - C_L^{\mathrm{T}}C_L < 0.$$

对于闭环系统(4), 构造函数 $V(t) = x^{\mathrm{T}}(t)Px(t)$, 将 $V(t)$ 沿系统(4) 的解求导可得

$$\mathring{V}(t) \le \lambda_0 V(t),\ t \in \Omega_2;$$

$$\mathring{V}(t) \le -\lambda_1 V(t),\ t \in \Omega_1.$$

根据比较原理可推出

$$V(t) \le \mathrm{e}^{\lambda_0(t-t_{2k-1})}V(t_{2k-1}),\quad t \in (t_{2k-1}, t_{2k}],\ k \in N;$$

$$V(t) \le \mathrm{e}^{-\lambda_1(t-t_{2k-2})}V(t_{2k-2}),\ t \in (t_{2k-2}, t_{2k-1}].$$

进一步对 $\forall t \in R^+$ 有

$$V(t) \le \mathrm{e}^{\lambda_0 T_0(0,t) - \lambda_1 T_1(0,t)}V(0). \tag{11}$$

根据式(5) 和(6) 可得, $\forall t, \tau \in R^+$, $t > \tau$ 有

$$T_1(\tau, t) = t - \tau - T_0(\tau, t) \ge (1-\lambda^*)(t-\tau) - T_u. \tag{12}$$

由式(6), (11) 和(12), 根据欧氏范数的定义有

$$\|x(t)\| \le \|x(0)\| \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)} c\mathrm{e}^{[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)]t}}$$

成立, 其中 $c = \mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}$, $t \in R^+$. 由不等式(9), 可知系统(4) 渐近稳定.

2) 系统(4) 具有 H_∞ 性能指标 γ. 由不等式(7) 和(8) 可得

$$\mathring{V}(t) \le \lambda_0 V(t) - z^{\mathrm{T}}(t)z(t) + \gamma_0^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t),\quad t \in \Omega_2;$$

$$\mathring{V}(t) \le -\lambda_1 V(t) - z^{\mathrm{T}}(t)z(t) + \gamma_0^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t),\quad t \in \Omega_1.$$

令 $\Gamma(t) = z^{\mathrm{T}}(t)z(t) - \gamma_0^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)$, 则根据比较原理可推出对 $\forall t \in R^+$ 有

$$V(t) \le V(0)\mathrm{e}^{\lambda_0 T_0(0,t) - \lambda_1 T_1(0,t)} - \int \mathrm{e}^{\lambda_0 T_0(\tau,t) - \lambda_1 T_1(\tau,t)}\Gamma(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{13}$$

由 $z^{\mathrm{T}}(\tau)z(\tau)$, $\omega^{\mathrm{T}}(\tau)\omega(\tau)$ 和 $V(t)$ 的非负性以及不等式(6) 和(12), $\forall t \in R^+$ 有

$$\int \mathrm{e}^{-\lambda_1(t-\tau)}z^{\mathrm{T}}(\tau)z(\tau)\mathrm{d}\tau \le V(0)\mathrm{e}^{[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)]t}\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u} + \gamma_0^2\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}\int \mathrm{e}^{[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)](t-\tau)}\omega^{\mathrm{T}}(\tau)\omega(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{14}$$

将式(14) 两边对 t 从 $0 \to \infty$ 进行积分有

$$\iint \mathrm{e}^{-\lambda_1(t-\tau)}z^{\mathrm{T}}(\tau)z(\tau)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}t = \int\left(\int \mathrm{e}^{-\lambda_1 t}\mathrm{d}t\right)\mathrm{e}^{\lambda_1\tau}z^{\mathrm{T}}(\tau)z(\tau)\mathrm{d}\tau \le$$

$$V(0)\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}\int \mathrm{e}^{[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)]t}\mathrm{d}t + \gamma_0^2\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}\iint \mathrm{e}^{[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)](t-\tau)}\omega^{\mathrm{T}}(\tau)\omega(\tau)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}t =$$

$$\frac{\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}}{\lambda_1(1-\lambda^*) - \lambda_0\lambda^*}V(0) + \gamma_0^2\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}\int\left\{\int \mathrm{e}^{[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)]t}\mathrm{d}t\right\} \cdot \mathrm{e}^{-[\lambda_0\lambda^* - \lambda_1(1-\lambda^*)]\tau}\omega^{\mathrm{T}}(\tau)\omega(\tau)\mathrm{d}\tau$$

注意到 $V(0) = 0$, 可得

$$\frac{1}{\lambda_1}\int z^{\mathrm{T}}(\tau)z(\tau)\mathrm{d}\tau \le \gamma_0^2\frac{\mathrm{e}^{(\lambda_0+\lambda_1)T_u}}{\lambda_1(1-\lambda^*) - \lambda_0\lambda^*}\int \omega^{\mathrm{T}}(\tau)\omega(\tau)\mathrm{d}\tau$$

根据式(10) 的定义, 上述不等式意味着

$$\int z^{\mathrm{T}}(\tau)z(\tau)\mathrm{d}\tau \le \gamma^2\int \omega^{\mathrm{T}}(\tau)\omega(\tau)\mathrm{d}\tau,$$

即系统(4) 具有 H_∞ 性能指标 γ. 综合 1), 2) 的结果, 定理得证. □

注 1 从式(10) 可以看出, 当待定参数 λ_0, λ_1, γ_0

和最大丢包率λ^*确定时，影响H_∞性能指标γ的最大因素为T_u。由于T_u的指数函数与γ^2呈比例关系，其变动较小时对H_∞性能界γ的估计影响就很大。

定理 2　对于最大丢包率为λ^*的不确定有损网络控制系统(1)，若存在矩阵W、正数$\tilde{\lambda}_0, \tilde{\lambda}_1, \rho, \beta, \epsilon_0$和$\epsilon_1$使得下列线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} S_{11} & \beta E_a^{\mathrm{T}} & D & \beta C^{\mathrm{T}} \\ \beta E_a & -\epsilon_0 I & 0 & 0 \\ D^{\mathrm{T}} & 0 & -\rho I & 0 \\ \beta C & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{S}_{11} & \beta E_a^{\mathrm{T}} + W^{\mathrm{T}} E_b^{\mathrm{T}} & D & \beta C^{\mathrm{T}} + W^{\mathrm{T}} B_2^{\mathrm{T}} \\ \beta E_a + E_b W & -\epsilon_1 I & 0 & 0 \\ D^{\mathrm{T}} & 0 & -\rho I & 0 \\ \beta C + B_2 W & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{16}$$

$$\tilde{\lambda}_0 \lambda^* - \tilde{\lambda}_1 (1 - \lambda^*) < 0 \tag{17}$$

成立，其中I为单位矩阵，S_{11}和$\tilde{S}_{11}$满足

$$S_{11} = \beta(A + A^{\mathrm{T}}) - \tilde{\lambda}_0 I + \epsilon_0 G G^{\mathrm{T}},$$

$$\tilde{S}_{11} = \beta(A + A^{\mathrm{T}}) + B_1 W + W^{\mathrm{T}} B_1^{\mathrm{T}} + \tilde{\lambda}_1 I + \epsilon_1 G G^{\mathrm{T}},$$

则存在控制律$u(t) = \beta^{-1} W x(t)$使得到的闭环系统(4)渐近稳定，且具有满足式(10)的H_∞性能指标γ，并有$\lambda_0 = \tilde{\lambda}_0/\beta, \lambda_1 = \tilde{\lambda}_1/\beta, \gamma_0 = \sqrt{\rho}$.

证明　不等式(7)可写为

$$A^{\mathrm{T}} P + PA - \lambda_0 P + PGH(t) E_a + E_a^{\mathrm{T}} H^{\mathrm{T}}(t)(PG)^{\mathrm{T}} + \gamma_0^{-2} PDD^{\mathrm{T}} P + C^{\mathrm{T}} C < 0. \tag{18}$$

根据引理 1 及 Schur 补定理，并引入常数$\epsilon_0 > 0$，令$X = P^{-1}$可得式(18)等价于

$$\begin{bmatrix} XA^{\mathrm{T}} + AX - \lambda_0 X + \epsilon_0 GG^{\mathrm{T}} & XE_a^{\mathrm{T}} & D & XC^{\mathrm{T}} \\ E_a X & -\epsilon_0 I & 0 & 0 \\ D^{\mathrm{T}} & 0 & -\gamma_0^2 I & 0 \\ CX & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{19}$$

注意到上述矩阵不等式是一个双线性矩阵不等式(BMI)，文献[10]已经证明了求解BMI的可行性问题是一个NP-Hard问题，因此这里需要进行如下处理以便于求解：

令$X = \beta I, \tilde{\lambda}_0 = \lambda_0 \beta, \rho = \gamma_0^2$，代入式(19)可得

$$\begin{bmatrix} \beta(A^{\mathrm{T}} + A) - \tilde{\lambda}_0 I + \epsilon_0 GG^{\mathrm{T}} & \beta E_a^{\mathrm{T}} & D & \beta C^{\mathrm{T}} \\ \beta E_a & -\epsilon_0 I & 0 & 0 \\ D^{\mathrm{T}} & 0 & -\rho I & 0 \\ \beta C & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{20}$$

式(20)即为式(15)所示的关于变量$\tilde{\lambda}_0, \rho, \beta$和$\epsilon_0$的线性矩阵不等式。

使用类似的处理方法并令$W = \beta K, \tilde{\lambda}_1 = \lambda_1 \beta$，可以将不等式(8)转换成为形如(16)的LMI，相应的不等式(9)可转化为式(17)所示的LMI。根据定理 1 的结果，得证。□

4　数值示例

研究不确定有损网络控制系统(1)，参数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 4.8 \\ 0.8 & -1 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.75 & 0.8 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.8 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix},$$

$$H(t) = \begin{bmatrix} \sin t & 0 \\ 0 & \cos t \end{bmatrix}, E_a = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix},$$

$$E_b = 0.$$

设系统最大丢包率$\lambda^* = 0.1$，根据定理 2 的 3 个LMI利用Matlab软件工具箱可以计算出：$\lambda_0 = 5.942\,3$，$\lambda_1 = 1.785\,5$，$\epsilon_0 = 0.231\,6$，$\epsilon_1 = 0.163\,1$，鲁棒控制器反馈矩阵

$$K = \begin{bmatrix} -8.047\,3 & -5.051 \\ 5.677\,8 & -2.560\,1 \end{bmatrix}.$$

若$T_u = 1$ s，相应的H_∞性能界为$\gamma = 113.937\,4$；若$T_u = 0.5$ s，相应的H_∞性能界迅速下降为$\gamma = 16.505\,5$。

5　结　　论

本文研究了受传输信息丢包影响的有损网络控制系统的建模与具有H_∞性能界的鲁棒控制问题。在实际网络控制系统中，数据丢包的影响通常是无法忽略的。本文针对此类系统建立了不确定切换系统模型，在对网络数据通信中的丢包现象进行定量描述的基础上，提出了能够忍受一定程度数据丢包影响的具有H_∞性能界的鲁棒状态反馈控制律的设计方法，并用数值仿真实验对得到的理论成果进行了验证。这些结果对于研究网络化环境下的鲁棒控制问题具有一定的理论和实际意义。

(下转第1011页)

裂解炉DCS 系统每分钟记录一次过程参数值, 图3 给出了15 天中报警系统优化管理前后的报警次数对比 其中点划线为EEMUA 推荐的报警评价指标, 实线为采用算法前的报警次数, 虚线为采用算法后的报警次数 由此可见, 基于物元概念的流程报警系统的重构, 实现相关信息集成和聚类分析处理后的报警次数大大下降, 在不影响正常报警的前提下, 有效地提高了操作员处理报警的效率

6 结　　语

现代化工流程关系非常复杂, 无论是数据一致性处理还是相似矩阵计算, 建立全流程系统的相似矩阵在实施上都存在一定的困难, 因此有必要按照各种应用的需要组成不同的子系统, 在实际应用时, 再根据应用目的将相关子系统按照可拓学原理进行重构, 生成面向应用的有限重构空间 为解决重构空间计算的复杂性, 可采用基于关联函数的聚类算法, 对所考虑的系统空间进行简化 本文通过流程工业报警系统的应用实例, 验证了基于物元的系统重构和信息集成方法是有效实用的 对于流程工业更为复杂的实际应用, 本文提出的方法还需要进一步完善

参考文献(References)

[1] Cavallo R E, Klir G J. Reconstructability Analysis[J]. *Int J of General System*, 1981, 7: 7-32.

[2] Jones B. A Program for Reconstructability Analysis [J]. *Int J of General System*, 1989, 15: 7-32.

[3] Shu G F. Meta-synthetic System Reconstruction and Applications in Macro-economic Researches[J]. *J of Systems Science and Systems Engineering*, 2001, 16(5): 349-353.

[4] 蔡文. *物元模型及其应用*[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
(CaiW. *Matter-elementModel and ItsApplication*[M]. Beijing: Scientific and Technical Document Publishing House, 1994.)

[5] Dang Y G, Liang B S, Ye Y J. Construction of the Dependent Function in Cluster Analysis [J]. *J of Guangdong University of Technology*, 1998, 15(2): 121-124.

[6] Sudipto Guha, Rajeev Rastogi, Kyuseok Shim. CURE: An Efficient Clustering Algorithm for Large Database [J]. *Information System*, 2001, 26(1): 35-58.

[7] The Engineering Equipment and Materials Users Association (EEMUA). *Alarm Systems — A Guide to Design, Management and Procurement*[M]. London: Publication No191, 1999.

(上接第1005 页)

参考文献(References)

[1] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of Asynchronous Dynamical Systems with Rate Constraints on Events [A]. *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 1345-1351.

[2] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of Networked Control Systems[J]. *IEEE Control System Magzine*, 2001, 21(1): 84-99.

[3] Branicky M S. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems [J]. *IEEE Trans on AC*, 1998, 43(4): 475-482.

[4] Peleties P, Decarlo R. Asymptotic Stability of *m*-switched Systems Using Lyapunov-like Functions [A]. *Proc of American Control Conference* [C]. Boston, 1991: 1679-1648.

[5] Morse A S. Supervisory Control of Families of Linear Set-point Controllers—— Part 1: Exact Matching [J]. *IEEE Trans on AC*, 1996, 41(10): 1413-1431.

[6] Hespanha J P. Stability of Switched Systems with Average Dwell-time [A]. *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Phoenix, 1999: 2655-2660.

[7] Zhai G, Hu B, Yasuda K, et al. Disturbance Attenuation Property of Time-controlled Switched Systems [J]. *J of Franklin Institute*, 2001, 338(7): 765-779.

[8] 俞立. *鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 41-67.
(Yu L. *Robust Control-Linear Matrix Inequality Mehod* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 41-67.)

[9] Xie L H. Output Feedback H_∞ Control with Parameter Uncertainty[J]. *Int J Control*, 1996, 63(4): 741-750.

[10] Toker O, Ozbay H. On the NP-hardness of Solving Bilinear Linear Matrix Inequalities and Simultaneous Stabilization with Static Output Feedback [A]. *Proc of American Control Conference* [C]. Piscataway, 1995: 2525-2526.