

文章编号: 1001-0920(2009)05-0717-06

Lurie 网络化控制系统的保性能控制

郝 飞, 赵翔辉

(北京航空航天大学 第七研究室, 北京 100191)

摘 要: 以不确定 Lurie 系统作为被控对象, 研究其在网络环境下的保性能控制问题. 在同时考虑随机网络诱导时延和数据丢包的情况下, 建立不确定 Lurie 网络化控制系统模型; 利用 Lyapunov 方法分别给出了存在结构不确定性和范数有界的不确定性时, Lurie 网络化控制系统保性能控制器的设计方法. 所得结果是以线性矩阵不等式的形式给出的, 便于数值求解. 最后以数值实例说明了所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 网络化控制系统; Lurie 系统; 保性能控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Guaranteed cost control for Lurie networked control systems

HAO Fei, ZHAO Xiang-hui

(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China.

Correspondent: HAO Fei, E-mail: fhao@buaa.edu.cn)

Abstract: Guaranteed cost control problem of networked control systems with the controlled plant being uncertain Lurie systems is studied. With the consideration of the random network-induced delay and data dropout, a model of Lurie networked control systems is established. And a simple design approach to guaranteed cost controller of Lurie networked control systems with the structured uncertainties and norm-bounded uncertainties is proposed by using Lyapunov method. Moreover, the obtained results are given in terms of linear matrix inequalities, which can be efficiently solved via standard numerical software. Finally, a numerical example illustrates the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

Key words: Networked control systems; Lurie system; Guaranteed cost control; Linear matrix inequalities

1 引 言

通过实时网络构成的闭环反馈控制系统称为网络化控制系统(NCSs). 这种分布式结构, 连线少、成本低, 便于安装和维护, 广泛应用于汽车工业、机器人控制和自动化生产系统中. 网络化控制系统的主要功能元件均通过网络连接, 有关的信号和数据须经过网络进行交换. 由于网络带宽总是有限的, 不可避免地会产生网络诱导时延、数据丢包、错序以及多包传输等问题, 使系统性能下降, 甚至破坏系统的稳定性.

近年来, 对于 NCSs 的研究已经成为国内外控制界研究的热点之一^[1-9]. Halevi 等^[3]利用状态增广的方法分析了离散 NCSs 的稳定性; Zhang^[4]将 NCSs 建模为异步动态系统, 分析了 NCSs 存在数据丢包时系统的稳定性; Gao 等^[5]考虑了时延和量化

的影响, 给出了 H 控制器的设计方法; Yu 等^[6]考虑时延和数据丢包的影响, 利用时滞系统理论分析了 NCSs 的稳定性; 邱占芝等^[7]研究了一类基于观测器的 NCS 的鲁棒稳定性和鲁棒控制器的设计. 然而, 对于 NCSs 的研究大多集中于受控对象为线性系统的网络化控制系统, 对于非线性 NCSs^[8-9]的研究相对较少. Lurie 系统是一类典型的非线性控制系统, 大多非线性物理系统可表示成 Lurie 系统的结构(即一个线性系统与满足一个扇区条件的非线性单元的反馈连接)形式. 自从 1944 年提出 Lurie 系统的绝对稳定性问题以来, 关于 Lurie 系统的绝对稳定性的研究便受到研究者们广泛的重视, 形成了相对独立的理论^[10,11]. 同时, 对于一个实际系统, 不可避免地存在着各种不确定性, 如未建模动态、参数不确定性以及外部扰动等, 所以对于不确定系统

收稿日期: 2008-04-06; 修回日期: 2008-10-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504018); 北京航空航天大学蓝天新星项目.

作者简介: 郝飞(1972—), 男, 内蒙古化德人, 副教授, 博士, 从事鲁棒控制、稳定性理论、网络化控制系统的研究;

赵翔辉(1979—), 男, 内蒙古卓资人, 硕士生, 从事网络化控制系统的研究.

而言,仅考虑其鲁棒稳定性是不够的,必须考虑其他一些性能,如最优性能、 H 性能和 L_1 性能等.因此保性能控制^[12,13]的研究具有重要的实际意义.

本文主要研究图 1 所示的 Lurie 型 NCS 的保性能控制问题.

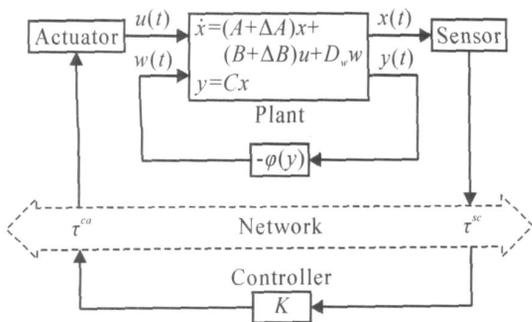


图 1 Lurie 不确定网络化系统结构图

符号说明: $\text{diag}\{ \dots \}$ 表示实对角矩阵;在任意对称矩阵中, $*$ 表示矩阵对称块部分.

2 问题描述

考虑图 1 所示 NCS,其中被控对象为如下式所描述的 Lurie 系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + D_w w(t), \\ y(t) = Cx(t), \\ w(t) = -\phi(y(t)). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ 和 $y(t) \in \mathbb{R}^q$ 分别为系统状态向量、输入向量和输出向量; A, B, C, D_w 为合适维数的实常矩阵; $\phi(\cdot) : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^q$ 的无记忆非线性函数,关于 y 满足局部 Lipschitz 条件, $\phi(0) = 0$, 且对于任意的 $y \in \mathbb{R}^q$ 满足如下扇形区条件:

$$y^T \Gamma (y) - |y|^2 \leq 0, \quad (2)$$

这里 Γ 为实对角阵,通常称这样的非线性函数 $\phi(\cdot)$ 属于扇形区域 $[0, \Gamma]$,记为 $\phi(\cdot) \in \mathbf{F}[0, \Gamma]$; A 和 B 为不确定性矩阵,满足如下的匹配条件:

$$[A \ B] = DF(t)[E_1 \ E_2]. \quad (3)$$

这里: D, E_1 和 E_2 为适当维数的实常矩阵; $F(t)$ 为一个未知的时变矩阵,且具有如下结构:

$$F \triangleq \begin{bmatrix} \text{diag}\{ \tau_1, \dots, \tau_k, \tau_{k+1}, \dots, \tau_l \} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad F < 1, \quad \tau_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}, i = 1, \dots, k, \tau_j \in \mathbb{R}^{n_j \times n_j}, j = 1, \dots, l, k, l \in \mathbb{Z}^+.$$

定义二次型性能指标

$$J = \int_{t_0}^{\infty} [x^T(t) Qx(t) + u^T(t) Ru(t)] dt. \quad (4)$$

定义 1 如果对于所有属于扇形区域 $\mathbf{F}[0, \Gamma]$ 的非线性函数 $\phi(\cdot)$, Lurie 系统(1) 都是全局渐近稳定的,则称其在 $\mathbf{F}[0, \Gamma]$ 内是绝对稳定的.

定义 2 对于系统(1) 和性能指标(4),如果存

在控制律 $u^*(t)$ 和正数 J^* ,使得对于所有允许的 uncertainty 闭环系统都是绝对稳定的,且性能指标满足 $J < J^*$,则 J^* 称为不确定系统(1) 的一个性能上界, $u^*(t)$ 称为不确定系统(1) 的一个保性能控制律.

本文的目的是对图 1 所示的 NCS 设计如下形式的保性能控制律:

$$u(t) = Kx(t). \quad (5)$$

假设系统状态是完全可测量的,传感器采用时间驱动,控制器和执行器采用事件驱动,且数据采用单包传输. τ_k^{sc} 表示从传感器到控制器的延时, τ_k^{ca} 表示从控制器到执行器的延时.式(1) 中的 $u(t)$ 通过零阶保持器实现,真实的控制输入为分段连续函数.由于采用无记忆线性状态反馈控制,可将 τ_k^{sc} 和 τ_k^{ca} 合并到一起处理,即可令 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$.这样,图 1 所示 NCS 可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + D_w w(t), \\ t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}); \\ u(t^+) = Kx(t - \tau_k), \\ t \in \{i_k h + \tau_k, k = 1, 2, \dots\}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: h 为采样周期, $i_k \in \{0, 1, \dots\}$, 表示成功从传感器传送到执行器的数据包; τ_k 表示第 $i_k h$ 个数据包从传感器端传送到执行器端所用的时间.显然

$$[i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) = [t_0, t_1), t_0 \geq 0, t_1 > t_0.$$

假设第 1 个控制信号到达对象前, $u(t) = 0$ 且存在常数 τ_0 使得 $(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} - \tau_k \geq \tau_0, k = 1, 2, \dots$ 由于执行器是事件驱动,系统(6) 可重写为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)Kx(i_k h) + D_w w(t), \\ t \in [i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}); \\ x(t) \triangleq \phi(t), t \in [t_0, t_1). \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\phi(t)$ 为系统的初态.显然,系统(7) 的解在 $[i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1})$ 是连续的.由于

$$[i_k h + \tau_k, i_{k+1} h + \tau_{k+1}) = [t_0, t_1), t_0 \geq 0, t_1 > t_0,$$

可扩展为系统(7) 的解在 $t \in [t_0, \infty)$ 是连续的.

注 1 对于 $\phi(\cdot) \in \mathbf{F}[\tau_1, \tau_2]$ 的情况,可通过环路变换将其转化为 $\phi(\cdot) \in \mathbf{F}[0, \Gamma]$,详见文献[14].故这里仅讨论 $\phi(\cdot) \in \mathbf{F}[0, \Gamma]$ 的情况.

注 2 时延 τ_k 不仅包含传感器到控制器的时延,而且包含控制器到执行器的时延;既包含传输时延,也包含等待时延和处理时延;可能是时变的,大于一个采样周期的,也可能是任意随机的.

注 3 当 $i_{k+1} < i_k$ 时,表示有错序现象发生;当

$$\begin{aligned}
 & (A + DFE_1)^T M_1^T + Q, \\
 \tilde{12} &= -N_1 + N_2^T - M_1(B + DFE_2)K - \\
 & (A + DFE_1)^T M_2^T, \\
 \tilde{13} &= N_3^T - M_1 D_w - C^T, \\
 \tilde{14} &= P + N_4^T + M_1 - (A + DFE_1)^T M_3^T, \\
 \tilde{22} &= -N_2 - N_2^T - M_2(B + DFE_2)K, \\
 \tilde{23} &= -M_2 D_w - N_3^T, \\
 \tilde{24} &= M_2 - N_4^T - K^T(B + DFE_2)^T M_3^T, \\
 \tilde{44} &= S + M_3 + M_3^T.
 \end{aligned}$$

由 Schur 补引理,有 $+NS^{-1}N^T < 0$ 等价于

$$\begin{bmatrix}
 \tilde{11} & \tilde{12} & \tilde{13} & \tilde{14} & N_1 \\
 * & \tilde{22} & \tilde{23} & \tilde{24} & N_2 \\
 * & * & -2I & -D_w^T M_3^T & N_3 \\
 * & * & * & \tilde{44} & N_4 \\
 * & * & * & * & -S
 \end{bmatrix} < 0. \quad (15)$$

而式(15)可改写为

$$\tilde{Y} + {}_1F(t) {}_2 + \frac{1}{2} F^T(t) {}_1^T < 0. \quad (16)$$

这里

$$\tilde{Y} = \begin{bmatrix}
 \tilde{Y}_{11} & \tilde{Y}_{12} & \tilde{Y}_{13} & \tilde{Y}_{14} & N_1 \\
 * & \tilde{Y}_{22} & \tilde{Y}_{23} & \tilde{Y}_{24} & N_2 \\
 * & * & -2I & -D_w^T M_3^T & N_3 \\
 * & * & * & \tilde{Y}_{44} & N_4 \\
 * & * & * & * & -S
 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{Y}_{11} &= N_1 + N_1^T - M_1 A - A^T M_1^T + Q, \\
 \tilde{Y}_{12} &= -N_1 + N_2^T - M_1 B K - A^T M_2^T, \\
 \tilde{Y}_{13} &= N_3^T - M_1 D_w - C^T, \\
 \tilde{Y}_{14} &= P + N_4^T + M_1 - A^T M_3^T, \\
 \tilde{Y}_{22} &= -N_2 - N_2^T - M_2 B K - \\
 & K^T B^T M_2^T + K^T R K, \\
 \tilde{Y}_{23} &= -M_2 D_w - N_3^T, \\
 \tilde{Y}_{24} &= M_2 - N_4^T - K^T B^T M_3^T, \\
 \tilde{Y}_{44} &= S + M_3 + M_3^T, \\
 {}_1^T &= \\
 & [-D^T M_1^T \quad -D^T M_2^T \quad 0 \quad D^T M_3^T \quad 0], \\
 {}_2 &= [E_1 \quad E_2 K \quad 0 \quad 0 \quad 0].
 \end{aligned}$$

由引理 1 知,式(16)成立等价于存在 $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$,使得

$$\begin{bmatrix}
 \tilde{Y} + \frac{1}{2} L {}_2 & {}_1 \\
 * & -L
 \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

成立. 又由 Schur 补引理知,式(17)成立等价于

$$\begin{bmatrix}
 \tilde{Y} & {}_1 & \frac{1}{2} L \\
 * & -L & 0 \\
 * & * & -L
 \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

成立. 定义 $M_2 = {}_2 M_1, M_3 = {}_3 M_1$, 令 $X = M_1^{-1}, \bar{P} = X P X, \bar{S} = X S X, \bar{N}_i = X N_i X (i = 1, 2, 4), \bar{N}_3 = N_3 X, Y = K X$. 式(18) 分别左乘和右乘 $\text{diag}\{X, X,$

$I, X, X, X, L^{-1}\}$, 并由 Schur 补引理知式(18) 成立等价于下式成立:

$$\begin{bmatrix}
 11 & 12 & 13 & 14 & \bar{N}_1 & X \\
 * & 22 & 23 & 24 & \bar{N}_2 & 0 \\
 * & * & -2I & 34 & \bar{N}_3 & 0 \\
 * & * & * & 44 & \bar{N}_4 & 0 \\
 * & * & * & * & -\bar{S} & 0 \\
 * & * & * & * & * & -Q^{-1} \\
 * & * & * & * & * & * \\
 * & * & * & * & * & * \\
 * & * & * & * & * & * \\
 0 & -DX & X E_1^T & & & \\
 Y^T & -{}_2 DX & Y^T E_2^T & & & \\
 0 & 0 & 0 & & & \\
 0 & {}_3 DX & 0 & & & \\
 0 & 0 & 0 & & & \\
 0 & 0 & 0 & & & \\
 -R^{-1} & 0 & 0 & & & \\
 * & -\bar{L} & 0 & & & \\
 * & * & -X \bar{L}^{-1} X & & &
 \end{bmatrix} < 0. \quad (19)$$

注意到由于 $\bar{L} > 0$, 必有 $(X - \bar{L}) \bar{L}^{-1} (X - \bar{L}) < 0$, 故有 $-X \bar{L}^{-1} X < \bar{L} - 2X$. 因此, 只要式(10) 成立, 便有式(19) 成立, 从而有

$$\dot{V}(t, x_t) < -x_t^T Q x_t - x^T K^T R K x < 0. \quad (20)$$

根据 Lyapunov-Krasovskii 定理知, 系统(8) 对于所有属于 $F(0, \infty)$ 的非线性函数 (\cdot) 都是渐近稳定的, 故系统(8) 在 $[t_0, \infty)$ 是绝对稳定的. 此外, 对式(20) 在 $[t_0, \infty)$ 上积分, 可得式(11).

注 5 对于固定的 α 和 β , 式(10) 是一个 LMI.

注 6 在保证式(10) 可解的情况下, 如何选择 α 和 β 使得 γ 尽可能大, 决定了结果的保守程度.

注 7 因为利用了不确定矩阵 F 的结构信息, 引入了附加矩阵 $\bar{L} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 从而会降低结果的保守性.

由于集合 \mathcal{K} 中 $k = 1, l = 0$ 时, 正是常见的范数有界不确定性, 故容易得到如下推论:

推论 1 考虑图 1 所示的 NCS, 对于给定的性能指标(5), 如果存在标量 $\alpha, \beta, \gamma > 0$, 合适维数矩阵 $\tilde{P} > 0, \tilde{S} > 0, X > 0, Y, \bar{N}_i, i = 1, 2, 3, 4$, 满足

$$\begin{bmatrix}
 \tilde{11} & \tilde{12} & \tilde{13} & \tilde{14} \\
 * & \tilde{22} & \tilde{23} & \tilde{24} \\
 * & * & -2I & -{}_3 D_w^T \\
 * & * & * & \tilde{44} \\
 * & * & * & * \\
 * & * & * & * \\
 * & * & * & *
 \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_1 & X & 0 & X E_1^T \\ \bar{N}_2 & 0 & Y^T & Y^T E_2^T \\ \bar{N}_3 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{N}_4 & 0 & 0 & 0 \\ -\tilde{S} & 0 & 0 & 0 \\ * & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & -R^{-1} & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0,$$

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_{11} &= \bar{N}_1 + \bar{N}_1^T - AX^T - XA^T + DD^T, \\ \tilde{\gamma}_{12} &= -\bar{N}_1 + \bar{N}_2^T - BY - {}_2XA^T + {}_2DD^T, \\ \tilde{\gamma}_{13} &= \bar{N}_3^T - D_w - XC^T, \\ \tilde{\gamma}_{14} &= \tilde{P} + \bar{N}_4^T + X^T - {}_3XA^T - {}_3DD^T, \\ \tilde{\gamma}_{22} &= -\bar{N}_2 - \bar{N}_2^T - {}_2BY - {}_2Y^TB^T + {}_2DD^T, \\ \tilde{\gamma}_{23} &= -\bar{N}_3 - {}_2D_w, \\ \tilde{\gamma}_{24} &= {}_2X^T - \bar{N}_4 - {}_3Y^TB^T - {}_2{}_3DD^T, \\ \tilde{\gamma}_{44} &= \tilde{S} + {}_3X + {}_3X^T + {}_2{}_3DD^T. \end{aligned}$$

则 $u^*(t) = YX^{-1}x(t)$ 是图 1 所示的 NCS 的一个保性能控制律,且

$$J = J^* = \int_{t_0}^{\infty} \phi^T(t) X^{-1} \tilde{P} X^{-T} \phi(t) dt + \int_{t_0}^{\infty} \phi^T(t) X^{-1} \tilde{S} X^{-T} \phi(t) dt. \quad (21)$$

式(11)和(21)给出的系统性能上界依赖于线性矩阵不等式的可行解以及初始状态,对于不同的解和初始状态可以导出不同的系统性能上界.显然,最小性能上界是刻画系统鲁棒性能的一个有意义的指标.参照文献[13]的方法,以结构不确定性的情况为例,通过建立和求解一个优化问题来估计系统的最小性能上界.

假设存在 γ_1, γ_2 使得下式成立:

$$X^{-1} \bar{P} X^{-T} < \gamma_1 I, X^{-1} \bar{S} X^{-T} < \gamma_2 I. \quad (22)$$

由 Schur 补引理知,式(22)等价于

$$\begin{bmatrix} -\gamma_1 I & X^{-1} \\ X^{-T} & -\bar{P}^{-1} \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} -\gamma_2 I & X^{-1} \\ X^{-T} & -\bar{S}^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (23)$$

根据式(11),可得

$$J^* = \int_{t_0}^{\infty} \phi^T(t) \phi(t) dt + \int_{t_0}^{\infty} \phi^T(t) \phi(t) dt.$$

另一方面,在有限时间区间 $t \in [t_0, t_1]$ 上,假设初始函数及其导数存在上界,即可假设 $\phi^T(t) \phi(t)$

$\leq \gamma_1, \phi^T(t) \phi(t) \leq \gamma_2$, 故有

$$J^* \leq \gamma_1 + \frac{1}{2} \gamma_2 t_1^2. \quad (24)$$

定义 $P = \bar{P}^{-1}, S = \bar{S}^{-1}, X = X^{-1}$. 结合式(11), (23), (24), 利用文献[16]中的锥补线性化的思想,

给出如下估计系统最小性能上界的算法:

Step 1: 寻找一组可行解 $\{\bar{P}_0, \tilde{P}_0, \bar{X}_0, X_0, \bar{S}_0, \tilde{S}_0\}$, 使得式(10)以及

$$\begin{bmatrix} -\gamma_1 I & X \\ X^T & -\bar{P} \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} -\gamma_2 I & X \\ X^T & -\bar{S} \end{bmatrix} < 0, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} P & I \\ I & \bar{P} \end{bmatrix} > 0, \begin{bmatrix} S & I \\ I & \bar{S} \end{bmatrix} > 0, \begin{bmatrix} X & I \\ I & X \end{bmatrix} > 0 \quad (26)$$

成立. 如果不存在, 则退出, 并设 $k = 0$.

Step 2: 求解关于 $\{\bar{P}_{k+1}, \tilde{P}_{k+1}, \bar{X}_{k+1}, X_{k+1}, \bar{S}_{k+1}, \tilde{S}_{k+1}\}$ 的优化问题

$$\begin{aligned} \min \text{Tr} & (\bar{P}_{k+1} \tilde{P}_k + \bar{P}_k \tilde{P}_{k+1} + \bar{S}_{k+1} \tilde{S}_k + \\ & \bar{S}_k \tilde{S}_{k+1} + \bar{X}_{k+1} X_k + \bar{X}_k X_{k+1}), \\ \text{s.t.} & \text{式(10), (25), (26), } \bar{P} > 0, \bar{S} > 0. \end{aligned}$$

Step 3: 如果式(22)成立, 则退出, 并输出

$$J^* = \gamma_1 + \frac{1}{2} \gamma_2 t_1^2.$$

Step 4: 如果 $k > N, N$ 为指定的迭代次数, 则退出; 否则, 令 $k = k + 1$, 返回 Step 2.

4 数值算例

考虑图 1 所示 NCS, 被控对象如式(1)所描述.

其中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -4 & 1 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0.3 \sin t & 0 \\ 0 & 0.5 \sin t \end{bmatrix}, \\ B &= [1 \ 0]^T, \quad B = [0.1 \sin t \ 0.3 \sin t]^T, \\ C &= [1 \ -0.5], \quad D_w = [0 \ 1]^T. \end{aligned}$$

将 A, B 改写为式(3)的形式

$$\begin{aligned} F(t) &= \begin{bmatrix} \sin t & 0 \\ 0 & \sin t \end{bmatrix}, \quad E_1 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \\ E_2 &= [0.1 \ 0.3]^T, \quad D = I, \end{aligned}$$

则显然有 $F(t) \leq \gamma_1 I$. 取 $\gamma_2 = -2, \gamma_3 = -3, \gamma_4 = 0.001$, 利用定理 1 可求得

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} 6.8222 & 1.5303 \\ -0.1715 & 4.0819 \end{bmatrix}, \\ Y &= [-4.6804 \ -4.6929], \end{aligned}$$

从而得

$$K = [-0.4242 \ -1.1675].$$

利用线性搜索方法可知, 最大时滞界为 $\max = 0.0147$. 当初始条件 $\phi_1(t) = e^t, \phi_2(t) = 0, \gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.4$ 时, 由定理 1 求得的保性能控制器和由式(23)求出的性能上界如表 1 所示.

表 1 对应不同的保性能控制律和性能上界

	反馈增益阵 K	性能上界 J^*
0.001	$[-0.4242 \ -1.1675]$	7.0238
0.014	$[-0.1888 \ -1.3323]$	2.5188

如果取 $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = -2$, $\alpha_3 = -3$, $\alpha_4 = 0.001$, 则利用推论 1 计算可得

$$X = \begin{bmatrix} 2.9422 & 0.2984 \\ 0.2984 & 3.2654 \end{bmatrix},$$

$$Y = [-2.405 \quad -2.1218],$$

$$K = [-0.7586 \quad -0.5805].$$

此时求得的性能上界为 5.1599.

5 结 论

本文主要给出了 Lurie 网络化控制系统的保性能控制器的设计方法. 所考虑的网络诱导时延和数据丢包都是时变的, 所给出的结果都是 LMI 的形式. 文中还利用锥补线性化方法, 给出了一种估计最小性能上界的算法. 如何选择 α_2 和 α_3 , 尽可能地降低结果的保守性是需要进一步研究的课题.

参考文献(References)

- [1] Hespanha J P, Naghshabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [2] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [3] Halevi Y, Ray A. Integrated communication and control systems: Part I — Analysis [J]. ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1988, 110(4): 367-373.
- [4] Zhang W. Stability analysis of networked control systems [D]. Cleveland: Case Western Reserve University, 2001.
- [5] Gao H, Chen T, Lam J. A new delay system approach to network-based control [J]. Automatica, 2008, 44(1): 39-52.
- [6] Yu M, Wang L, Chu T, et al. An LMI approach to networked control systems with data packet dropout and transmission delays [J]. Int J of Hybrid Systems, 2004, 3(1/2): 291-303.
- [7] 邱占芝, 张庆灵. 一类基于观测器的网络控制系统鲁棒控制器设计 [J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1165-1169.
- (Qiu Z Z, Zhang Q L. Robust controller design for a class of networked control systems based on state observer [J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1165-1169.)
- [8] Mastell S, Abdallah C T, Dorato P. Stability and finite-time stability analysis of discrete-time nonlinear networked control systems [C]. Proc of the American Control Conf. Portland, 2005: 1239-1244.
- [9] Nesi D, Teel A R. Input-to-state stability of networked control systems [J]. Automatica, 2004, 40(9): 2121-2128.
- [10] Liao X X. Absolute stability of nonlinear control systems [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [11] Hao F, Wang L, Yu M, et al. Robust stability and performance of uncertain Lurie systems with state delays [J]. Circuits Systems Signal Processing, 2004, 24(3): 299-316.
- [12] 张颖, 段广仁. 不确定离散切换系统具有极点约束的保性能控制 [J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1269-1273.
- (Zhang Y, Duan G R. Guaranteed cost control with pole constraints for uncertain discrete-time switched systems [J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1269-1273.)
- [13] Yue D, Peng C, Tang G Y. Guaranteed cost control of linear systems over networks with state and input quantisations [J]. IEE Proc Control Theory and Applications, 2006, 153(6): 658-664.
- [14] Khalil H K. Nonlinear Systems [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [15] Ghaoui L E, Lebret H. Robust solutions to least squares problems with uncertain data [J]. SIAM J Matrix Analysis and Applications, 1997, 18(4): 1035-1064.
- [16] Ghaoui L E, Oustry F, AitRami M. A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(8): 1171-1176.