

一类不确定时滞系统的时滞依赖鲁棒可靠镇定*

王景成 李志虎 邵惠鹤

(上海交通大学自动化系·上海, 200030)

摘要: 主要研究了一类状态时滞不确定线性系统的时滞依赖鲁棒可靠镇定问题, 系统状态矩阵和时滞状态矩阵中存在着范数有界的时变参数不确定性, 故障执行器集合是执行器集合的子集. 采用双积分型 Lyapunov 函数, 最终将问题归结为求解 LMI. 最后给出一个数值例子验证方法的可行性.

关键词: 可靠控制; 鲁棒控制; 不确定性; 执行器故障; 时滞

文献标识码: A

Delay-Dependent Robust and Reliable Stabilization for Uncertain State-Delayed Systems with Actuator Failures

WANG Jingcheng, LI Zhihu and SHAO Huihe

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University · Shanghai, 200030, P.R. China)

Abstract: This paper focuses on the synthesis problem of robust and reliable stabilization for linear systems with norm-bounded time-varying parameter uncertainty in the state and delayed-state matrices and also with actuator failures among a pre-specified subset of actuators. LMI (linear matrix inequality) method is given for the memoryless state feedback synthesis problem to quadratically stabilize the given systems. The results depend on the size of the time-delay via Lyapunov candidate with double integral. Finally, an example is given to illustrate the feasibility of the proposed method.

Key words: reliable control; robust control; uncertainty; actuator failure; time-delay

1 引言(Introduction)

动态时滞系统在化工过程控制中经常遇到, 时滞系统控制也吸引了很多科研人员的研究兴趣, 已经有一些研究结果不仅考虑了时滞影响, 而且还考虑了不确定性因素^[1-3]. 在工程实际中有时会出现执行器故障状况. 引发的基本控制问题是如何在执行器故障情形下镇定闭环系统, 这一研究领域已经有了一些研究结果^[4,5]. 基于这些考虑, 本文将重点研究在执行器故障情形下不确定时滞系统的鲁棒可靠镇定问题.

2 描述和定义(Description and definition)

考虑线性不确定状态滞后系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \bar{A}(t)x(t) + \bar{A}_1(t)x(t-h) + Bu(t) = \\ & (A + \Delta A(t))x(t) + (A_1 + \Delta A_1(t))x(t-h) + Bu(t), \quad h \leq \tau, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 h 是表示状态时滞量的非负常数, τ 表示状态时滞量 h 的上确界.

假设系统 (1) 中的不确定结构满足:

$$\Delta A(t) = M_1 F_1(t) N_1, \quad \Delta A_1(t) = M_2 F_2(t) N_2, \quad (2)$$

$$F_i^T(t) F_i(t) \leq I, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

考虑采用无记忆状态反馈控制律:

$$u(t) = -Kx(t) = -\frac{1}{2\epsilon} B^T P x(t). \quad (4)$$

执行器集合中容易出现故障状况的集合用符号 $\Omega \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$ (m 为 $u(t)$ 的维数) 来表示, 而其他执行器很难出现故障状况, 不妨假设它们不会出现故障状况, 并用符号 $\bar{\Omega} = \{1, 2, \dots, m\} - \Omega$ 来表示. 引入分解形式 $B = B_\Omega + B_{\bar{\Omega}}$, 其中 B_Ω 和 $B_{\bar{\Omega}}$ 是分别取 B 中对应于集合 Ω 和 $\bar{\Omega}$ 相应的列为零的情况下产生的.

定义 ω 表示给定系统 (1) 中执行器实际故障集合, 该集合是 Ω 的子集, 即 $\omega \subseteq \Omega$. 引入如前类似的分解形式 $B = B_\omega + B_{\bar{\omega}}$. 考虑执行器故障实际存在的情形, (1) 和 (4) 可分别改写为:

$$\dot{x}(t) = \bar{A}(t)x(t) + \bar{A}_1(t)x(t-h) + B_\omega u(t),$$

$$u(t) = -K_\omega x(t) = -\frac{1}{2\epsilon} B_\omega^T P x(t).$$

* 基金项目: 国家自然科学基金(60004001)资助项目.

收稿日期: 1999-12-29; 收修改稿日期: 2000-09-14.

为方便起见,引入记号 $\bar{A}_0(t) = \bar{A}(t) - B_w K_w$, 并引入下述的重要引理和定义.

引理 1 给定矩阵 A, M, N , 给定满足 $F^T F \leq I$ 的矩阵 F . 则对于任意实标量 $\beta > 0$, 下述不等式成立.

$$a) MFN + N^T F^T M^T \leq \beta^{-1} MM^T + \beta N^T N.$$

b) 对于满足 $\beta I - NPN^T > 0$ 的任意矩阵 $P > 0$, 下式成立:

$$(A + MFN)P(A + MFN)^T \leq APA^T + APN^T(\beta I - NPN^T)^{-1}NPA^T + \beta MM^T.$$

c) 对于满足 $P - \beta MM^T > 0$ 的任意矩阵 $P > 0$, 下式成立:

$$(A + MFN)^T P^{-1}(A + MFN) \leq A^T(P - \beta MM^T)^{-1}A + \beta^{-1}NN^T.$$

定义 1 如果存在一正定对称矩阵 P 和一正常数 α 使得对于任意容许不确定性和对应于 $\omega \subseteq \Omega$ 的执行器故障情形下, 所选取的 Lyapunov 函数 $V(x(t), t)$ 对于时间 t 的导数满足 $dV(x(t), t)/dt \leq -\alpha \|x\|^2$, 则系统(1)($u(t) = 0$ 时)被称为在执行器故障情形下是二次稳定的. 如果存在一状态反馈控制器使得闭环控制系统在执行器故障情形下二次稳定, 则闭环系统(1)和(4)被称为在执行器故障情形下是二次稳定的.

3 鲁棒可靠镇定(Robust and reliable stabilization)

本节中将给出鲁棒可靠镇定控制器设计方法以确保闭环系统(1)和(4)在执行器故障情形下是二次稳定的.

下面的定理将给出本节主要结论.

定理 1 对属于 $\omega \subseteq \Omega$ 的任意执行器故障状况和正常数 $\epsilon, \beta_i, i = 1, 2, \dots, 6$, 若存在正定对称矩阵 P, P_1, P_2 满足下述 LMI

$$\begin{bmatrix} W & H_0 & H_1 & H_2 & H_3 & H_4 \\ H_0^T & -J_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_1^T & 0 & -J_1 & 0 & 0 & 0 \\ H_2^T & 0 & 0 & -J_2 & 0 & 0 \\ H_3^T & 0 & 0 & 0 & -J_3 & 0 \\ H_4^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -J_4 \end{bmatrix} < 0. \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} S &= P^{-1}, \\ W &= S(A + A_1)^T + (A + A_1)S - \epsilon^{-1}B_w B_w^T + \\ &\beta_1 M_1 M_1^T + \beta_2 M_2 M_2^T + \tau A_1 P_1 A_1^T + \end{aligned}$$

$$\tau A_1 P_2 A_1^T + \tau \beta_3 M_2 M_2^T + \tau \beta_4 M_2 M_2^T,$$

$$H_0 = \tau B_w B_w^T, J_0 = 2\tau \epsilon^2(P_1 - \beta_5 M_1 M_1^T),$$

$$H_1 = [SN_1^T \quad SN_2^T], J_1 = \text{diag}[\beta_1 I \quad \beta_2 I],$$

$$H_2 = [\tau A_1 P_1 N_2^T \quad \tau A_1 P_2 N_2^T],$$

$$J_2 = \text{diag}[\tau(\beta_3 I - N_2 P_1 N_2^T) \quad \tau(\beta_4 I - N_2 P_2 N_2^T)],$$

$$H_3 = [\sqrt{2}\tau SA^T \quad \tau SA_1^T],$$

$$J_3 = \text{diag}[\tau(P_1 - \beta_5 M_1 M_1^T) \quad \tau(P_2 - \beta_6 M_2 M_2^T)],$$

$$H_4 = [\tau SN_1 \quad \tau SN_2], J_4 = \text{diag}[\tau \beta_5 I \quad \tau \beta_6 I],$$

则闭环系统(1)和(4)在执行器故障情况下是二次稳定的.

证 考虑对应属于 $\omega \subseteq \Omega$ 的故障执行器情形, 选取如下表述的 Lyapunov 函数形式:

$$V(x(t), t) = x^T(t)Px(t) + W(x(t), t).$$

其中

$$\begin{aligned} W(x(t), t) &= \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t x^T(s) \bar{A}_0^T(s) P_1^{-1} \bar{A}_0(s) x(s) ds d\theta + \\ &\int_{-h}^0 \int_{t-h+\theta}^t x^T(s) \bar{A}_1^T(s+h) P_2^{-1} \bar{A}_1(s+h) x(s) ds d\theta. \end{aligned}$$

通过 Lyapunov 函数对时间 t 的求导及一系列推导可知: 如果对于正常数 $\epsilon, \beta_i, i = 1, 2, \dots, 6$, 存在正定对称矩阵解 P, P_1, P_2 , 并且满足不等式

$$\begin{aligned} R(t) \triangleq & [\bar{A}_0(t) + \bar{A}_1(t)]^T P + P[\bar{A}_0(t) + \bar{A}_1(t)] + \\ & h P \bar{A}_1(t) P_1 \bar{A}_1^T(t) P + h P \bar{A}_1(t) P_2 \bar{A}_1^T(t) P + \\ & h \bar{A}_0^T(t) P_1^{-1} \bar{A}_0(t) + h \bar{A}_1^T(t+h) P_2^{-1} \bar{A}_1(t+h) < 0, \end{aligned} \quad (6)$$

则存在正常数 c 使得满足 $dV/dt \leq -c \|x\|^2 < 0$.

由定义 1, 闭环系统在执行器故障情形下是二次稳定的. 进一步由引理 1、(2)、(3)、 $h \leq \tau, B_w B_w^T \leq B_w B_w^T$, 并且通过一些推导变换和 Schur 补技术, 对不等式(6)左乘和右乘 P^{-1} 可得出(5)隐含(6).

证毕.

4 数值例子(Numerical example)

本节将给出一个算例来说明鲁棒可靠镇定控制器的设计方法. 考虑系统(1), 其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & -0.5 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.01 \\ 0.1 & -0.2 & 0 \\ 1.2 & 1 & 1.1 \end{bmatrix},$$

$$\Delta A = 0.1 \sin t * I, \Delta A_1 = 0.05 \cos t * I, \tau = 2.$$

不确定形式相应分解后可得, $M_1 = 0.4I, M_2 = 0.1I, N_1 = 0.25I, N_2 = 0.5I$, 其中 I 为单位阵.

考虑 $\Omega = \{1\}$ 的情形, 则 $\bar{\Omega} = \{2, 3\}$, 矩阵 B 可分解如下

$$B_{\Omega} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 \\ 1.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{\bar{\Omega}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.01 \\ 0 & -0.2 & 0 \\ 0 & 1 & 1.1 \end{bmatrix}.$$

选取 $\epsilon = 10$, 应用 MATLAB 中的 LMI 工具包可得到鲁棒可靠镇定控制器:

$$u(t) = Kx(t) = \begin{bmatrix} 1.84 & -10.85 & -6.35 \\ 3.28 & -7.19 & -4.49 \\ 5.62 & -10.76 & -8.18 \end{bmatrix} x(t).$$

5 小结(Conclusion)

本文重点研究了在执行器故障情形下具有状态时滞的一类时滞不确定连续系统的鲁棒可靠镇定问题, 该不确定性是未知但有界的, 并且不必满足匹配条件. 基于二次可靠镇定概念, 通过构造双积分型 Lyapunov 函数, 导出了结构预先给定的无记忆状态反馈控制律来实现系统鲁棒可靠镇定的充分条件, 通过 LMI 的求解得到了无记忆鲁棒可靠镇定控制器设计算法, 该求解过程无需参数调节. 最后给出一个数值例子来验证本文提出方法的可行性.

参考文献(References)

- [1] Xie L and Souza C E. Robust H^∞ control for linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty [J]. IEEE Trans Automat Contr., 1992, 37(8): 1188 ~ 1191
- [2] Wang J, Su H and Chu J. Robust H^∞ controller design for linear uncertain systems with delayed state and control [J] J Franklin Inst., 1998, 335B(3): 517 ~ 524
- [3] Cao Y and Sun Y. Delay-dependent robust H^∞ control for uncertain state delayed systems [J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(2): 230 ~ 235
- [4] Veillette R J, Medanic J V and Perkins W R. Design of reliable control systems [J]. IEEE Trans Automat. Contr., 1992, 37(3): 290 ~ 304
- [5] Seo C J and Kim B K. Robust and reliable H^∞ control for linear systems with parameter uncertainty and actuator failure [J] Automatica, 1996, 32(3): 465 ~ 467

本文作者简介

王景成 1972 年生, 1998 年在浙江大学获博士学位. 现为上海交通大学副教授, 德国洪堡学者. 主要研究兴趣是鲁棒控制, 时滞系统控制, 预测控制, 工业系统过控等.

李志虎 1963 年生, 副教授, 1991 年在湖南大学获硕士学位, 现为上海交通大学博士生. 主要研究方向为时滞系统的鲁棒控制等.

邵惠鹤 见本刊 2001 年第 2 期第 194 页.

第 12 届中国过程控制年会在沈阳召开

第 12 届中国过程控制年会于 2001 年 8 月 5 日 ~ 8 日在辽宁省沈阳市举行, 本届年会由中国自动化学会过程控制专业委员会和中国有色金属学会计算机学术委员会共同主办, 东北大学自动化研究中心和中南大学信息科学与工程学院共同承办.

本届会议收到稿件共 290 余篇, 共录用 173 篇论文, 从应用行业上看, 包括冶金、电力、化工、航天、国防、轻工、通讯等许多工业领域. 这些论文研究内容丰富, 研究领域广泛, 体现了当前中国自动化高新技术的研发及应用的水平. 本届会议共有来自中国大陆、香港、英国、日本、澳大利亚等地的 170 余位学者和专家参加. 与历届中国过程控制年会相比, 本届年会收稿最多, 录用稿件最多, 代表参加人数最多, 企业界人士最多.

开幕式上, 辽宁省科技厅领导和沈阳市科委的领导以及东北大学领导发表了热情洋溢的讲话. 大会程序委员会双主席之一东北大学柴天佑教授致开幕辞.

本届年会共安排了 5 场大会特邀报告. 报告题目和报告人分别是: 自动化学科现状与发展的讨论(吴澄院士); 十五 863 先进制造与自动化领域战略发展的思考(孙家广院士); 基于 BPS/MES/PCS 三级结构的流程工业现代集成制造系统(柴天佑教授); 新型非线性实用控制技术——自抗扰控制技术(韩京清研究员); 过程模型及其方法(任德祥教授级高工).

本届年会共设 10 个讲演报告组. 与会代表围绕着先进控制、智能控制、过程建模及优化、生产过程综合自动化等主题展开了热烈的讨论. 会议期间, 由褚健教授主持举行了题为“流程工业综合自动化”的圆桌讨论会.

会议期间, 过程控制专业委员会和大会程序委员会举行了联席会议, 听取了会议秘书长岳恒博士和会议组织委员会主任陈欢副教授关于本届会议筹备工作的汇报. 联席会议对承办单位的筹备工作表示满意和感谢; 并经过讨论和投票, 同意 2002 年中国过程控制年会由华南理工大学信息学院承办, 2003 年中国过程控制年会由中南大学信息科学与工程学院承办.

闭幕式上, 由浙江大学钱积新教授代表本届年会程序委员会双主席之一浙江大学孙优贤院士致闭幕辞. 由张仲俊青年优秀论文奖评奖委员会主席、上海交通大学邵惠鹤教授宣布, 经评奖委员会投票评选, 东北大学自动化研究中心陶钧博士的论文“转炉炼钢智能控制方法及应用”获得一等奖; 宝钢技术中心自动化所王笑波博士的论文“一种多层次递阶建模方法”和上海交通大学自动化研究所的王学雷博士的论文“一种实现有滞后 SISO 系统频域参数辨识的新算法”分别获得二等奖.

本届年会以《控制理论与应用》增刊、《系统仿真学报》增刊、《基础自动化》正刊及增刊出版了会议论文集.

(岳恒)