

双容液位系统的不确定时滞的鲁棒容错控制

张芹芳,王爱平,余江,江丽

(安徽大学 计算机科学与技术学院,安徽 合肥 230601)

摘要:针对双容液位控制系统的执行器失效等故障,通过线性化建模,研究了鲁棒自适应容错控制问题。首先在系统无故障正常工作时,考虑建模误差、输入信号的稳定性、系统参数等不确定性因素,利用不确定性上界自适应估计,设计了不确定时滞鲁棒控制器。同时,对系统进行故障检测,研究了一种修正控制律的自适应鲁棒容错控制器设计方法,该控制器通过修补执行器故障所带来的影响使该系统最终有界稳定。最后,通过仿真实验,验证了提出方法的有效性。

关键词:双容水箱;自适应;时滞;执行器故障;鲁棒容错控制

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)01-0176-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.01.045

Robust Fault Tolerant Control of Dual Solution Bit Uncertain Time-delay System

ZHANG Qin-fang, WANG Ai-ping, YU Jiang, JIANG Li

(College of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the dual tank liquid level control system actuator failure, by linear modeling, study the problem of robust adaptive fault tolerant control. First when trouble-free working properly in the system, considering the uncertainties of the modeling errors, the stability of the input signal, the system parameters, use adaptive estimation of uncertainty upper bound to design the uncertain delay robust controller. At the same time, the fault detection for system is made, a modified control law adaptive robust fault-tolerant controller design method is researched. The impact of the controller through the patch actuator failure makes the system ultimately bounded stable. Finally, through simulation, verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: two-tank; adaptive; time-delay; actuator failures; robust fault-tolerant control

0 引言

双容水箱液位控制系统是工业和农业生产过程中最常见的一类数学模型,如在啤酒制造、食品加工、制药业、废油净化、溶液过滤、水产养殖等多种行业的生产加工过程中都有应用^[1-3]。双容水箱液位控制系统是一种非线性系统,已开发出来的控制算法有很多,如:预测控制、自适应控制、智能控制。但关于双容液位控制系统的时滞鲁棒容错控制问题,目前还鲜有研究^[3-11]。考虑到实际系统的环境变化、元件老化等情况可能导致系统不稳定,鲁棒性是控制系统的一个重要性能。鲁棒容错控制问题深受重视,是故障检测、容错控制领域的热点研究方向之一。

1 系统建模

双容水箱液位控制系统的结构,如图1所示。

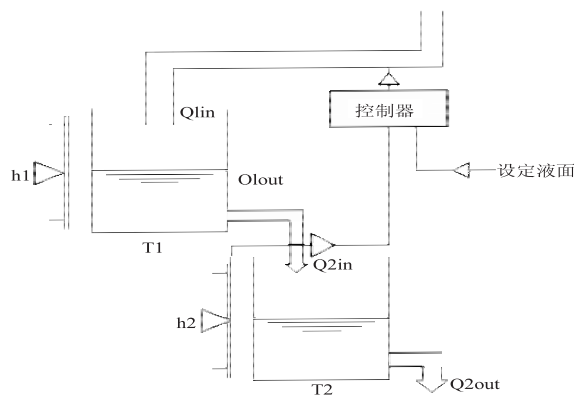


图1 双容液位控制系统

收稿日期:2013-04-05

修回日期:2013-07-10

网络时间:2013-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074071,61104022)

作者简介:张芹芳(1985-),女,山东聊城人,硕士研究生,研究方向为人工智能;王爱平,教授,研究方向为人工智能、编译技术、滤波算法收敛性。

网络地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130724.0953.017.html>

水流从水箱 1 顶部流入,从水箱 1 下部流出。
图中,水箱 T_1 和 T_2 为圆柱形,横截面积是 A_s ,连接水箱的管道横截面积为 S_p , T_1 上水流输入速率为 u ,假设 T_1 、 T_2 液位分别为 h_1 、 h_2 。

根据参考文献[4] 得系统的数学模型为

$$\begin{cases} h_1 \geq a_1 S_p \operatorname{sign}(h_1 - h_2) \\ (2g | h_1 - h_2 |)^+ / A_s + u = f_1(h_1, h_2, t) + u \\ h_2 \geq [a_1 S_p \operatorname{sign}(h_1 - h_2) \\ (2g | h_1 - h_2 |)^+ - a_2 S_p \times (2gh_2)^+] / A_s = \\ f_2(h_1, h_2, t) + u \end{cases} \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度。

设系统(1) 的期望平衡点为 $h_e = [h_{1e} h_{2e}]^T, u = u_e$, 在此平衡点对系统进行线性化,得如下系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \Delta_1 \\ \dot{x}_2 = a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + bu + \Delta_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x_1 = h_1 - h_{1e}; x_2 = h_2 - h_{2e}; \bar{u} = u - u_e; \Delta_1, \Delta_2$ 为建模不确定性; $a_{ij} = \partial f_i(x_j) / \partial x_j (i = 1, 2; j = 1, 2)$ 。

将式(2) 整理成状态空间方程描述为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \bar{\mathbf{u}}(t) + \bar{\mathbf{\Delta}}(t) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}; \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}; \bar{\mathbf{\Delta}} =$

$[\Delta_1 \quad \Delta_2]^T$ 。

进一步,考虑系统存在执行器故障,其故障系统数学建模为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} [\bar{\mathbf{u}}(t) + \boldsymbol{\eta}(x, \bar{\mathbf{u}}, \boldsymbol{\omega})] + R(t - T) \boldsymbol{\Phi}(x, \bar{\mathbf{u}}) \quad (4)$$

假设满足 $|\boldsymbol{\eta}(x, \bar{\mathbf{u}}, \boldsymbol{\omega})| \leq \rho, \boldsymbol{\Phi}(x, \bar{\mathbf{u}})$ 为非线性故障系统函数, $R(t - T)$ 表示故障发生的时间跨度,即:

$$R(t - T) = \begin{cases} 0, t < T \\ 1, t \geq T \end{cases} \quad (5)$$

式中, T 为故障发生的时间。

2 不确定性的离散时滞系统

$$\mathbf{x}(k + 1) = [\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A}(k)] \mathbf{x}(k) + [\mathbf{A}_1 + \Delta \mathbf{A}_1(k)] \mathbf{x}(k - \tau) + [\Delta \mathbf{B}(k)] \mathbf{u}(k) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{x}(k) \in R^n$ 为系统状态向量; $\mathbf{u}(k) \in R^m$ 为系统控制向量; $\mathbf{A}, \mathbf{A}_1, \mathbf{B}$ 为维数适当的定常数矩阵; $\tau > 0$ 为系统的参数不确定性,并且

$$\begin{cases} [\Delta \mathbf{A}(k) \quad \Delta \mathbf{B}(k)] = \mathbf{D}_1 \mathbf{H}_1(k) [\mathbf{E}_1 \quad \mathbf{E}_2] \\ \Delta \mathbf{A}_1(k) = \mathbf{D}_2 \mathbf{H}_2(k) \mathbf{E}_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3$ 是对应维数的常数矩阵; $\mathbf{H}_1(k), \mathbf{H}_2(k)$ 是时变实值连续矩阵函数,其元素 Lebesgue 是可测的,且满足

$$\mathbf{H}_i^T(k) \mathbf{H}_i(k) \leq \mathbf{I}, i = 1, 2 \quad (8)$$

系统的初始条件为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{0}, k < 0; \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (9)$$

设 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 可控,采用有记忆状态反馈控制器:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{G}_1 \mathbf{x}(k) + \mathbf{G}_2 \mathbf{x}(k - h) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ 为状态反馈增益矩阵; $h > 0$ 为选取的状态反馈时滞常数。

对于水箱执行器失效的情况,引入表示执行器故障的矩阵 \mathbf{L} ,且 $\mathbf{L} = \operatorname{diag}(l_1, l_2, \cdots, l_m)$ 。

把它放在矩阵 \mathbf{B} 与反馈阵 $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ 之间,其中:

$$l_i = \begin{cases} 1, \text{当第 } i \text{ 个执行器正常时} \\ 0, \text{当第 } i \text{ 个执行器失效时} \end{cases}$$

用 Ω 表示所有的开关阵组成的集合 ($\mathbf{L} = \mathbf{0}$ 除外), 执行器失效时的故障闭环系统为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k + 1) = & [\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A} + (\Delta \mathbf{B}(k) \mathbf{L} \mathbf{G}_1)] \times \mathbf{x}(k) + \\ & [\mathbf{A}_1 + \Delta \mathbf{A}_1(k)] \mathbf{x}(k - \tau) + \\ & [\mathbf{B} + \Delta \mathbf{B}(k)] \mathbf{L} \mathbf{G}_2 \mathbf{x}(k - h) \end{aligned} \quad (11)$$

对系统(6) 的时滞性鲁棒容错控制的研究目标是:寻找状态反馈控制器(10),使得对所有执行器故障 $\mathbf{L} \in \Omega$ 相容,故障闭环系统是渐进稳定的,系统在兼容故障时仍继续工作。

3 不确定时滞相关鲁棒控制

时滞相关有界引理:首先考虑没有控制作用的时滞系统:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) = & \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_h \mathbf{x}(t - h) + \mathbf{B}_\omega \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{Z}(t) = & \begin{bmatrix} \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_\omega \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{C}_h \mathbf{x}(t - h) \\ \mathbf{D}_u \mathbf{x}(t) \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}(t) = & \boldsymbol{\varphi}(t) \end{aligned} \right\} i$$

对该系统,改进的时滞相关实引理如下:

定理:针对正常数 γ 和标量 h ,假如存在合适维数

的矩阵 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ * & p_{22} \end{bmatrix} > \mathbf{0}, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ * & R_{22} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0},$

以及任意适当维数的矩阵 $\mathbf{N}_i, \mathbf{T}_i (i = 1, 2, 3)$,使得下列线性矩阵不等式成立:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ * & \mathbf{A}_3 \end{bmatrix} < \mathbf{0}$$

则系统 i 渐进稳定,并对所有非零向量 $\boldsymbol{\omega}(t) \in L_2[0, \infty]$,有 $\|\mathbf{z}(t)\|_2 \leq \gamma \|\boldsymbol{\omega}(t)\|_2$ 成立。

证明:证明系统 i 的渐进稳定性。由牛顿 — 莱布尼茨公式和系统方程 i , 对于任意矩阵 $\mathbf{N}_i, \mathbf{T}_i (i = 1, 2, 3)$, 有

$$2[\mathbf{x}^T(t) \mathbf{N}_1 + \mathbf{x}^T(t - h) + \mathbf{x}^T(t) \mathbf{N}_3] \times [\mathbf{x}(t) -$$

$$\mathbf{x}(t-h) - \int_{t-h}^t \mathbf{x}(s) ds = 0$$

$$2[\mathbf{x}^T(t)\mathbf{T}_1 + \mathbf{x}^T(t-h)\mathbf{T}_2 + \mathbf{x}^T(t)\mathbf{T}_3] \times [\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{A}_h\mathbf{x}(t-h) - \mathbf{B}_\omega\boldsymbol{\omega}(t)] = 0$$

构造如下形式的 Lyapunov - Krasovskii 泛函:

$$\nu(x_i) = \boldsymbol{\xi}_1^T(t)\mathbf{P}\boldsymbol{\xi}_1(t) + \int_{t-h}^t \mathbf{x}^T(s) ds + \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \boldsymbol{\xi}_2^T(s)\mathbf{R}\boldsymbol{\xi}_2(s) ds d\theta$$

计算 $\nu(x_i)$ 沿系统 i 对时间 t 的倒数, 根据上式, 整理可得

$$\boldsymbol{\eta}_1^T(t) = [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t-h) \quad \dot{\mathbf{x}}^T(t)]$$

$$\boldsymbol{\eta}^T(t,s) = [\boldsymbol{\eta}_1^T(t) \quad \mathbf{x}^T(s) \quad \dot{\mathbf{x}}^T(s)]$$

$$\mathbf{T}^T = [\mathbf{T}_1^T \quad \mathbf{T}_2^T \quad \mathbf{T}_3^T]$$

因此时滞系统 i 是渐进稳定的。

4 结束语

文中基于双容液位控制系统建立的数学模型, 研究了该系统的不确定时滞鲁棒容错控制问题。对双容水箱系统进行监控, 给出了一种新的阈值更低的鲁棒故障检测算法^[12], 并利用 Lyapunov 稳定性理论论证了系统最终一致有界的结论。

参考文献:

- [1] 王志新, 谷云东. 随机出、入水双容水箱液位控制实验及被控对象的数学模型[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(2): 13-16.

(上接第 175 页)

参考文献:

- [1] Jain A, Kant K, Tripathy M R. Security solutions for wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE second international conference on advanced computing & communication technologies (ACCT). [s. l.]: [s. n.], 2012: 430-433.
- [2] Karl H, Willig A. Protocols and architectures for wireless sensor networks[M]. [s. l.]: Wiley-Interscience, 2007.
- [3] Li Jianzhong, Hong Gao. Survey on sensor network research [J]. Journal of computer research and development, 2008, 45(1): 1-15.
- [4] Akyildiz I, Kasimoglu I. Wireless sensor and actor networks: Research challenges[J]. Elsevier Ad Hoc networks, 2004, 2(4): 351-367.
- [5] 裴庆祺, 沈玉龙, 马建峰. 无线传感器网络安全技术综述[J]. 通信学报, 2007, 28(8): 113-122.
- [6] Liu Xianyan. Mobile terminal for open platform - Android [J]. Information communication technology, 2011, 5(4): 50

- [2] 陈薇, 吴刚. 非线性双容水箱建模与预测控制[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2078-2081.
- [3] 康月宁, 吴楠, 韩晓鹏, 等. 基于模糊故障树的计算机硬件故障诊断[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(5): 10-13.
- [4] 徐艳雷, 韩兵. 基于自适应数值滤波器的空调系统故障诊断[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(12): 182-185.
- [5] 杨丹, 孙向南, 张小洪. 一种分层渐进匹配的鲁棒估计算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 36-38.
- [6] 俞伟新, 杨善超, 龚声蓉. 一种基于小波变换的图像鲁棒性盲水印算法[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(7): 140-143.
- [7] Richard J. Time-delay systems: An overview of some recent advances and open problems[J]. Automatic, 2003, 39(10): 1667-1694.
- [8] 张先明, 吴敏, 何勇. 不确定多变时滞系统的时滞相关鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 496-500.
- [9] Yue D. Robust stabilization of uncertain systems with unknown input delay[J]. Automatic, 2004, 40(2): 331-336.
- [10] Wahed M A, Wahba K. Data mining based-assistant tools for physicians to diagnose diseases[C]//Proceedings of the 46th IEEE international midwest symposium on circuits and systems. Cairo: DEC, 2003: 27-30.
- [11] Folio E N, Lele S R, Chang Y C. Integrating AVHRR satellite data and NOAA ground observation to predict surface air temperature: A statistical approach[J]. International journal of remote sensing, 2004, 25(15): 2979-2994.
- [12] Alexandridis A, Sarimveis H, Bafas G. A new algorithm for online structure and parameter adaptation of RBF networks [J]. Neural networks, 2003, 16(7): 1003-1017.

-53.

- [7] Ishiguro H. Android science[J]. ISCIE journal, 2005, 49: 47-52.
- [8] Rogers R, Lombardo J, Mednieks Z, et al. Android application development: Programming with the Google SDK[M]. [s. l.]: O'Reilly Media Inc., 2009.
- [9] Enck W, Ongtang M, McDaniel P. Understanding Android security[J]. IEEE security & privacy, 2009, 7(1): 50-57.
- [10] 樊志刚. Android 手机的发展综述[J]. 中国科技博览, 2012(10): 3-4.
- [11] Li Liang, Zhu Shan. Java-based implementation on serial communication[J]. Chinese journal of electron device, 2007, 30(2): 715-720.
- [12] Zandy V C, Miller B P. Reliable network connections[C]//Proceedings of the 8th annual international conference on mobile computing and networking. [s. l.]: ACM, 2002: 95-106.

双容液位系统的不确定时滞的鲁棒容错控制

作者：

张芹芳，[王爱平](#)，[余江](#)，[江丽](#)，[ZHANG Qin-fang](#)，[WANG Ai-ping](#)，[YU Jiang](#)，[JIANG Li](#)

作者单位：

[安徽大学 计算机科学与技术学院, 安徽 合肥, 230601](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2014(1)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201401045.aspx