

文章编号: 1001-0920(2011)02-0293-04

具有网络丢包和时延的网络控制系统设计

陈青^{1,2}, 吴敏¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 为了降低对于网络传输的要求, 针对具有固定时延和随机丢包情况的网络系统, 采用状态增广以克服时延对网络控制系统分析的影响, 进而考虑随机丢包情况, 将增广系统转化为切换系统. 以此为基础, 提出网络鲁棒控制器设计方法. 该控制器仅仅基于被控对象的反馈状态, 因此对于网络传输的要求较低. 最后, 通过一个仿真算例验证了该系统的有效性.

关键词: 网络控制系统; 网络丢包; 切换系统; 鲁棒

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Design of networked controller for systems with packet dropout and networked-induced delays

CHEN Qing^{1,2}, WU Min¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Computer Science and Communication, Hu'nan University of Technology, Zhuzhou 412008, China.

Correspondent: CHEN Qing, E-mail: 1282347802@qq.com)

Abstract: In order to reduce the communication burden of networks, for systems with fixed networked-induced delays and random data packets dropout, the system is augmented to eliminate the effect caused by networked-induced delays. Then the augmented system is converted into a switched system to include the data packets dropout. Based on the switched system model, the design method of networked robust controller is proposed, which only adopts the feedback system state of original system and can reduce the communication request. Finally, a simulation example shows the effectiveness of the results.

Key words: networked control system; packet dropout; switched system; robust

1 引言

网络控制系统(NCS)是一种基于通信网络的全分布实时反馈控制系统, 通信网络可将地域不同的控制器和被控对象相连, 形成闭环控制回路, 因此可极大地扩展控制系统的范围. 尤其是随着高速以太网、现场总线以及现场智能设备等技术的发展和成熟, 近年来网络控制系统在工业上的应用越来越广泛.

对于网络控制系统而言, 网络的引入虽然为控制系统的组织和部署带来了方便, 但由于网络通讯不可避免地存在传输延迟和数据掉包, 这些都给控制系统带来不利影响, 甚至造成不稳定. 因此, 近年来网络控制系统的设计和分析引起了学术界和工业界的广泛关注^[1-10].

网络诱导延迟、数据包丢失是网络控制系统必

须面对的问题. 一类常见的处理方法是: 利用系统模型和额外的系统动态信息, 采用预估方法, 补偿延迟和数据包丢失的影响, 以降低设计的保守性, 从而在一定程度上改善了系统性能^[1-5]. 但此类做法通常需要增设缓存, 并且使用网络进行额外的信息传输. 这些传输包括额外系统历史状态和输入信息, 其传输量会加重通信网络的繁忙程度, 情况严重时甚至会造成拥塞. 因此, Montestruque等人^[6]建议在系统控制回路中尽量减少对网络的使用, 以改善网络的运行状况. 另一类方法是: 利用网络延迟和数据包丢失的时序、概率等信息, 通过系统建模将网络延迟和丢包情况包含到系统模型中, 进而设计网络控制器^[7-10]. 尽管这类做法可能会比前一类方法保守, 但因对网络传输的影响较小, 更有利于实施.

收稿日期: 2009-11-27; 修回日期: 2010-03-23.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(60425310).

作者简介: 陈青(1967-), 女, 博士生, 从事网络技术及应用、XML数据库等研究; 吴敏(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事过程控制、鲁棒控制等研究.

随着网络技术的发展,尤其是数据时间戳技术的应用,网络传输的时延已能通过时间戳确切计算,这非常有利于更为合理地处理网络诱导时延的影响.但数据包丢失的发生是人为无法控制和估计的.虽然,通信网络可通过数据包重发来弥补数据包丢失的影响,但对于实时控制而言,这样的手段显然是不可行的.因此,本文更关注于丢包对控制系统的影响.为了降低对通信要求,便于实施,本文针对具有固定网络诱导延迟和随机丢包的网络控制系统进行研究.通过对于原系统进行适当的状态增广,消除了延迟的影响,并将增广系统转化为一个线性切换系统.进而,基于切换系统提出网络控制器的鲁棒设计方法,并且证明该方法设计的网络控制器具有闭环稳定性保证.最后,通过一个仿真算例验证了该方法的有效性.

2 问题描述

考虑如下系统对象:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: A 为 $n \times n$ 矩阵, B 为 $n \times m$ 矩阵, C 为 $s \times n$ 矩阵. 由以上对象构成的网络控制系统结构如图 1 所示.

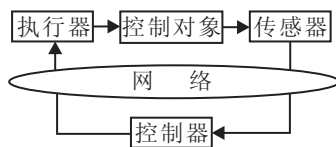


图 1 网络控制系统结构

对于如图 1 所示的网络系统而言,为了便于实施,在系统对象的执行器端和传感器端均不采用缓存装置;对于控制器而言,它得到的系统信息仅仅为系统对象的状态 $x(k-\tau)$, 这里 τ 为反馈通道的网络诱导延迟. 如何设计控制器以保证网络控制系统的稳定性,是本文将要讨论的问题. 在给出具体结果前,作以下假设:

假设 1 系统对象完全可控,且状态可测.

假设 2 网络造成的前向通道延迟为 h , 反馈通道延迟为 l , h 和 l 均为正整数.

假设 3 网络造成的前向通道连续丢包的最大长度为 d_h , 反馈通道的连续丢包的最大长度为 d_f .

假设 4 网络系统的各个部件均为时间驱动,在没有新数据到来时,控制器不输出新的控制量,而执行器维持原控制量不变.

3 网络控制系统建模

对于如图 1 所示的网络系统而言,如果不考虑数据包的丢失,则根据假设 2, 在 k 时刻系统控制器得到的反馈信息为系统对象在 $k-l$ 时刻的状态; 控制器根据得到的信息计算控制量, 并通过网络传输到执行

器; 执行器获得这个控制量的时刻为 $k+h$, 并在该时刻将控制量作用到控制对象. 因此, 对于传感器侧, 整个网络的延迟为 $h+l$, 即系统 (1) 可写成

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k-h-l). \quad (2)$$

将系统状态和系统输入组成增广状态, 则式 (2) 可改写成

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}\hat{x}(k) + \hat{B}u(k). \quad (3)$$

其中

$$\hat{x}(k) = [x^T(k), u^T(k-h-l), \dots, u^T(k)]^T,$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & I \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}.$$

式 (3) 是以传感器的参照点建立的系统模型. 其中: l 为适当维数的单位矩阵, 0 为适当维数的零矩阵. 可以看出, 上述的增广变换不会影响系统的可控性.

考虑数据包丢失的情况. 根据假设 4, 如果在 k 时刻执行器得到一个控制量后前向通道发生数据丢包的情况 (根据假设 3, 连续丢包个数不超过 d_h), 则控制器将一直执行这个最新的控制量, 直到得到新的数据包; 同时, 考虑反馈通道, 如果反馈通道出现丢包, 则控制器得不到新的数据, 故不会产生新的控制量, 从而不向执行器发送新的控制包. 因此, 对于执行器而言, 接收到的一个控制量有可能会连续执行 $d_h + d_f + 1$ 个周期. 由以上分析, 考虑到系统丢包的影响, 基于式 (3), 可以得到以下网络系统的模型:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}(k)\hat{x}(k) + \hat{B}(k)u(k), \quad (4)$$

$$\hat{A}(k) \in \{\hat{A}_1, \dots, \hat{A}_{d_h+d_f+1}\},$$

$$\hat{B}(k) \in \{\hat{B}_1, \dots, \hat{B}_{d_h+d_f+1}\}, \quad (5)$$

$$\hat{A}_i = \hat{A}^i, \quad (6)$$

$$\hat{B}_i = \hat{A}^{i-1}\hat{B} + \dots + \hat{B}. \quad (7)$$

其中: $\hat{A}(k)$ 为 $\hat{A}_i (i = 1, 2, \dots, d_h + d_f + 1)$ 中的一个; $\hat{B}(k)$ 为 $\hat{B}_i (i = 1, 2, \dots, d_h + d_f + 1)$ 中的一个. 式 (6) 和 (7) 反映了根据丢包情况的不同, 控制量 $u(k)$ 执行的情况. 显然, 式 (4)~(7) 是线性切换系统. 根据系统数据包丢失的情况, 系统模型在不同模态下随机切换.

4 网络控制器设计

通过第 3 节, 网络系统 (1) 被转化为一个切换系统, 因此网络反馈控制器的设计任务就是镇定该切换系统. 但和常见的切换系统镇定设计不同, 由于在传感器和执行器端并没有安装缓存装置, 控制器可利用的信息仅为系统的状态信息, 即 $\hat{x}(k)$ 中的 $x(k)$.

因此, 对于系统(4)~(7)而言, 其反馈控制律只能形如 $[K, 0, \dots, 0]$.

对于切换系统(4)~(7), 可以得到以下定理.

定理 1 对于网络系统(1), 如果存在矩阵 $G, Y, Q_i (i = 1, 2, \dots, d_h + d_f + 1)$, 使下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} G^T + G - Q_i & (\hat{A}_i G + \hat{B}_i Y)^T \\ \hat{A}_i G + \hat{B}_i Y & Q_j \end{bmatrix} > 0, Q_i > 0, \quad \forall i, \forall j = 1, 2, \dots, d_h + d_l + 1. \quad (8)$$

其中: 矩阵 G 形如 $\begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$, Y 形如 $[Y_1 \ 0 \ \dots \ 0]$, 均为适当维数的子矩阵. 则网络控制器的反馈律为 $K = Y_1 G_{11}^{-1}$, 且闭环系统渐近稳定.

证明 对于网络控制系统(1)而言, 不论实际系统数据包丢失满足何种随机律, 都可以归结为网络系统切换模型(4)~(7)中一个子模型切换成另一个子模型. 因此, 如果控制律 K 能够使切换系统(4)~(7)在任何切换情况下都能保证渐近稳定, 则可以保证网络控制系统的闭环渐近稳定.

对于切换系统(4)~(7)的每一个模态, 取其相对应的 Lyapunov 函数为

$$V_i(k) = \hat{x}^T(k) P_i \hat{x}(k), i = 1, 2, \dots, d_h + d_l + 1.$$

根据线性系统理论, 如果

$$\begin{aligned} V_j(k+1) - V_i(k) &< 0, \\ \forall i, \forall j = 1, 2, \dots, d_h + d_l + 1 \end{aligned} \quad (9)$$

成立, 则闭环系统渐近稳定.

对于不等式(8), 由 $Q_i > 0$ 可得

$$G^T Q_i^{-1} G \geq G^T + G - Q_i.$$

故如果式(8)成立, 则有以下式成立:

$$\begin{bmatrix} G^T Q_i^{-1} G & (\hat{A}_i G + \hat{B}_i Y)^T \\ \hat{A}_i G + \hat{B}_i Y & Q_j \end{bmatrix} > 0. \quad (10)$$

根据 Schur 补定理, 式(10)等价于

$$Q_i^{-1} - (\hat{A}_i + \hat{B}_i F)^T Q_j^{-1} (\hat{A}_i + \hat{B}_i F) > 0. \quad (11)$$

其中 $F = Y G^{-1}$. 令 $P_i = Q_i^{-1}$, 可得如果式(11)成立, 则式(9)成立. 因此, 如果式(8)成立, 则闭环系统渐近稳定.

对于矩阵 G , 可很容易地验证

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} G_{11}^{-1} & 0 \\ \Delta & G_{22}^{-1} \end{bmatrix},$$

其中 Δ 代表适当的矩阵使 $GG^{-1} = I$. 因此可得 $YG^{-1} = [Y_1 G_{11}^{-1}, 0, \dots, 0]$. 进而可得, 网络控制器的反馈律为 $K = Y_1 G_{11}^{-1}$, 闭环系统渐近稳定. \square

注 1 定理 1 针对每个模态设计不同的 Lyapunov 函数. 对于任何一种切换情况, 反馈律 K 均可使当前模态对应的 Lyapunov 函数下降, 所以保证

了系统的渐近稳定. 当然, 也可采用统一的 Lyapunov 函数进行设计, 使计算复杂度降低, 但同时会带来保守性. 另外, 式(8)为一组线性矩阵不等式, 可以采用 LMI 工具包方便求解.

为了改善网络控制的控制性能, 可通过求解下列不等式来设计反馈律:

$$\begin{bmatrix} G^T + G - Q_i & (\hat{A}_i G + \hat{B}_i Y)^T \\ \hat{A}_i G + \hat{B}_i Y & \alpha Q_j \end{bmatrix} > 0, Q_i > 0, \quad (12)$$

$$1 \geq \alpha > 0, \forall i, \forall j = 1, 2, \dots, d_h + d_l + 1,$$

其中 α 为一个事先设定的参数. α 越小, 则系统状态收敛越快.

注 2 对于实际网络系统, 如果根据网络的性能, 适当引入缓存装置和对数据打包传输, 进而采用定理 1 或式(12)进行设计, 则可进一步降低设计的保守性.

5 仿真实证

设系统对象为

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 \\ 0.2 & 0.3 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t).$$

由系统对象的状态方程可知, 该对象是不稳定的.

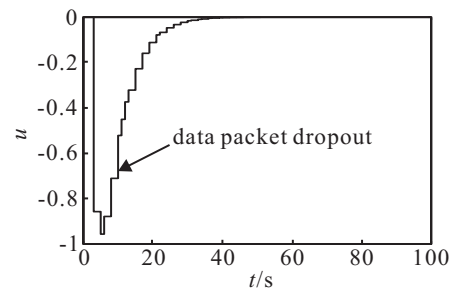
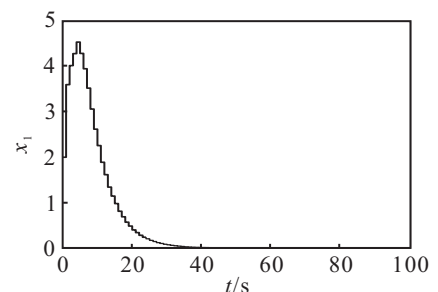
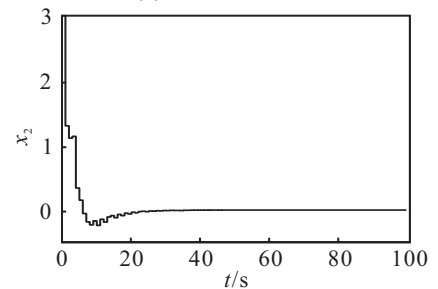


图 2 系统控制输入



(a) 状态 x_1 的响应



(a) 状态 x_2 的响应

图 3 系统状态响应

假设网络条件为: $h = 1, l = 1$, 前向和反馈通道的丢包发生满足 $(0, 1)$ 之间的平均概率, 当概率大于 0.5 时丢包发生, 且 $d_h = 2, d_f = 1$. 取 $\alpha = 1$, 根据定理 1, 可以计算得到网络控制器的反馈律为 $K = [-0.182 \quad -0.155 \quad 6]$.

取系统初始状态为 $x = [2, 3]$. 系统控制输入如图 2 所示. 当丢包发生时, 系统的控制维持不变. 图 3 为系统状态的响应情况, 由图 3 可以看出系统是稳定的, 由此验证了本文结论的正确性.

6 结 论

本文针对具有固定延迟和随机丢包情况的网络系统, 通过将系统状态增广, 进一步将网络系统转化为线性切换系统. 基于线性切换系统, 提出网络控制器的设计方法. 该设计降低了对于网络传输的要求, 并取消了系统执行器和传感器端的缓存装置, 因此便于实施. 仿真算例验证了该系统的有效性和本文结论的正确性.

参考文献(References)

- [1] Montestruque L A, Antsaklis P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1562-1572.
 - [2] 李德伟, 席裕庚. 预估网络控制系统的设计和分析[J]. 控制与决策, 2007, 22(9): 1065-1069.
(Li D W, Xi Y G. Design and analysis of predictive networked control system [J]. Control and Decision, 2007, 22(9): 1065-1069.)
 - [3] 张奇智, 张卫东. 网络控制系统中的时戳预测函数控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 126-130.
 - [4] 聂雪媛, 王恒. 网络控制系统补偿器设计及稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 217-222.
(Nie X Y, Wang H. Compensator design and stability analysis for networked control systems[J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(2): 217-222.)
 - [5] De La Pena D M, Christofides P D. Lyapunov-based model predictive control of nonlinear systems subject to data losses[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(9): 2076-2089.
 - [6] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems[J]. Automatica, 2003, 39(10): 1837-1843.
 - [7] Matveev A S, Savkin A V. The problem of state estimation via asynchronous communication channel with irregular transmission times[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(4): 670-676.
 - [8] Zhang W A, Yu L. Modeling and control of networked control systems with both network-induced delay and packet-dropout[J]. Automatica, 2008, 44(12): 3206-3210.
 - [9] Gao H J, Meng X Y, Chen T W. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(9): 2142-2148.
 - [10] Xiong J L, Lam J. Stabilization of networked control systems with a logic ZOH[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(2): 358-363.
-
- (上接第292页)
- [2] Lionel Lapierre, Didik Soetanto. Nonlinear path-following control of an AUV[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11): 1734-1744.
 - [3] Lionel Lapierre, Bruno Jouvencel. Robust nonlinear path-following control of an AUV[J]. Ocean Engineering, 2008, 33(2): 89-102.
 - [4] Repoulias F, Papadopoulos E. Trajectory planning and tracking control design of underactuated AUVs[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Spain: IEEE Press, 2005: 1622-1627.
 - [5] Filoktimon Repoulias, Evangelos Papadopoulos. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11): 1650-1667.
 - [6] Aguiar A P, Pascoal A M. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents[J]. Int J of Control, 2007, 80(7): 1092-1108.
 - [7] Morten Breivik, Thor I. Fossen. A unified control concept for autonomous underwater vehicles[C]. Proc of 2006 American Control Conf. Minneapolis: IEEE Press, 2006: 4920-4926.
 - [8] Carlos Silvestre, Rita Cunha, Nuno Paulino. A bottom-following preview controller for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2009, 17(2): 257-266.
 - [9] Wichlund K, Sordalen O, Egeland O. Control properties of underactuated vehicles[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Nagoya, 1995: 2009-2014.
 - [10] Bu Renxiang. Path following of underactuated surface ships with uncertain forward speed[C]. Chinese Control and Decision Conf. Yantai, 2008: 4053-4058.
 - [11] 程代展. 应用非线性控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 82-84.
(Cheng D Z. Applied nonlinear control[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 82-84.)