

网络化控制系统的时延观测器设计及其状态反馈控制

傅 磊, 戴冠中

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 研究了一种网络化控制系统, 其输出时延和控制时延均大于采样周期, 且控制时延服从已知随机分布. 基于现今值观测器原理, 采用设置缓冲区和带有时戳的传感数据传输方法, 给出了一种具有时延补偿功能的时延观测器, 并证明了在系统可观的条件下可实现观测器极点的任意配置. 之后, 基于该观测器设计了状态反馈控制系统, 并证明了复合系统的分离性原理. 通过仿真验证了所提方法的有效性.

关键词: 网络化控制系统; 时延观测器; 状态反馈; 分离性原理

中图分类号: TP273, TP393 **文献标识码:** A

Time-delay observer and state feedback control of networked control system

FU Lei, DAI Guan-zhong

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: We study a networked control system in which both values of the output time-delay and the control time-delay are greater than the sampling period, and the control time-delay follows a given random distribution law. Based on the current observer principle, we propose a time-delay observer with time-delay compensation by employing buffer and the time-stamping on the transmission data of sensor. The poles of the observer can be arbitrarily placed if the system is observable. The state feedback control system based on the proposed observer is designed. The separation principle of the compound system is proved. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation.

Key words: networked control system; time-delay observer; state feedback; separation principle

1 引言(Introduction)

网络化控制系统(NCS, networked control system)是指传感器、控制器、执行器通过网络构成回路的反馈控制系统^[1]. 具有网络诱导时延的NCS成为近年来的研究热点并获得许多成果. 如文献[2,3]研究了具有恒定或随机时延的NCS稳定性问题, 文献[4,5]讨论了NCS的观测器设计问题. 但所设计的均为预测观测器, 均会由于其单步延迟特性而降低系统精度^[6], 且文献[4]仅考虑了系统存在输出时延的情况, 文献[5]仅考虑了回路时延整体小于采样周期的情况. 在实际的工业控制中, 控制和输出时延往往会由于执行器群和传感器群的不同而具有不同的网络特性, 且通常会出现大于采样周期的情况, 同时控制延迟对系统安全运行尤为重要. 基于上述考虑, 本文研究了在NCS中同时存在大于采样周期的输出时延和控制时延的情况, 在输出时延和控制时延均有界且控制时延服从已知随机分布的条件下, 利用

现今值观测器原理^[6], 采用设置缓冲区和带有时戳的传感数据传输的方法, 给出了一种具有时延补偿功能的时延观测器, 并研究了其极点配置及状态反馈控制系统设计问题, 同时证明了复合系统的分离原理, 最后通过仿真验证了本文方法的有效性.

2 问题描述(Problem description)

针对本文的研究作如下假设: 1) 控制回路一次处理的控制数据和带有时戳的传感数据均采用单包传输; 2) 忽略控制器计算时延; 3) 输出时延 λ_{sc} 和控制时延 λ_{ca} 均有界且 λ_{ca} 服从已知随机分布, 即 $\lambda_{sc} \in [\lambda_{sc}^{\min}, \lambda_{sc}^{\max}]$, $\lambda_{ca} \in [\lambda_{ca}^{\min}, \lambda_{ca}^{\max}]$. 据此考虑如下连续被控过程 S_P :

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_c(t - \lambda_{ca}), \\ y_p(t) = C_p x_p(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_p(t) \in \mathbb{R}^n$, $y_p(t) \in \mathbb{R}^m$, $u_c(t) \in \mathbb{R}$ 分别为系统状态、输出和输入; A_p, B_p, C_p 为适维矩阵,

且 (A_p, B_p) 可控, (A_p, C_p) 可观. 设采样周期为 h , d_{ca} 为控制时延拍数, $\tau_{ca} \in (0, h]$, 令 $\lambda_{ca} = (d_{ca} - 1)h + \tau_{ca}$, 据此得到离散化模型 S_{PD} ^[7]:

$$\begin{cases} x_p(k+1) = \Phi x_p(k) + \Gamma(h, d_{ca}) \mathbf{u}(k, d_{ca}), \\ y_p(k) = \Psi x_p(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_p(k)$, $y_p(k)$ 为离散系统状态和输出, Ψ 为输出矩阵, 且

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{A_p h}, \\ \Gamma(h, \tau_{ca}) &= [\Gamma_0(h, \tau_{ca}) \ \Gamma_1(h, \tau_{ca})], \\ \Gamma_0(h, \tau_{ca}) &= \int_0^{h-\tau_{ca}} e^{A_p \tau} d\tau \cdot B_p, \\ \Gamma_1(h, \tau_{ca}) &= \int_{h-\tau_{ca}}^h e^{A_p \tau} d\tau \cdot B_p, \\ \mathbf{u}(k, d_{ca}) &= [u_c(k - d_{ca} + 1), u_c(k - d_{ca})]^T. \end{aligned}$$

3 时延观测器设计(Design of time delay observer)

考虑输出时延 λ_{sc} . 设 d_{sc} 为输出时延拍数, $\tau_{sc} \in (0, h]$, 则有 $\lambda_{sc} = (d_{sc} - 1)h + \tau_{sc}$, 对应 k 时刻观测器获得系统输出为 $y_p(k - d_{sc})$. 依据现今值观测器原理, 已知 k 时刻的观测值 $\hat{x}_p(k)$, 预测 $k+1$ 时刻的状态 $\bar{x}_p(k+1)$, 此时可设计一个观测误差依赖于时延系统输出的观测器^[6], 但很难用常规方法获得观测器增益 L , 据此本文设计如下时延观测器 S_O :

$$\begin{cases} \hat{x}_p(k) = \\ \bar{x}_p(k) + L[y_p(k - d_{sc}) - \Psi \Phi^{-d_{sc}} \bar{x}_p(k) + \\ \Psi \Phi^{-d_{sc}} \sum_{i=1}^{d_{sc}} \Phi^{i-1} \Gamma(h, \tau_{ca}) \mathbf{u}(k, d_{ca}, i)], \\ \bar{x}_p(k+1) = \Phi \bar{x}_p(k) + \Gamma(h, \tau_{ca}) \mathbf{u}(k, d_{ca}). \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{u}(k, d_{ca}, i) = \begin{bmatrix} u_c[k - (d_{ca} - 1) - i] \\ u_c[k - d_{ca} - i] \end{bmatrix}.$$

由式(2)可得到

$$\begin{aligned} y_p(k - d_{sc} + 1) &= \\ \Psi \Phi^{-d_{sc}} x_p(k+1) - \\ \Psi \Phi^{-d_{sc}} \sum_{i=1}^{d_{sc}} \Phi^{i-1} \Gamma(h, \tau_{ca}) \mathbf{u}(k+1, d_{ca}, i). \end{aligned} \quad (4)$$

结合式(3)可得观测器误差方程为

$$\begin{aligned} \tilde{x}_p(k+1) &= x_p(k+1) - \hat{x}_p(k+1) = \\ &(\Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}). \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)所示的观测器误差方程独立于系统输入, 若 $(\Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1})$ 快速收敛, 则对于任意初始误

差 $\tilde{x}_p(0)$, $\tilde{x}_p(k)$ 将快速收敛为零.

推论 1 若式(2)描述的NCS有 (Φ, Ψ) 可观, 则对于任意 λ_{sc} , 选择增益 L 可任意配置时延观测器极点.

证 由文献[4]可知 $(\Phi, \Psi\Phi^{-d_{sc}})$ 可观, 简单推导后可得 $(\Phi, \Psi\Phi^{-d_{sc}+1})$ 也可观. 即可选择 L 利用 $(\Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1})$ 实现观测器极点任意配置. 证毕.

4 状态反馈控制系统设计(Design of state feedback control system)

改写时延观测器为 S_O :

$$\begin{aligned} \hat{x}_p(k+1) &= \\ L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}x_p(k) &+ (\Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1})\hat{x}_p(k) + \\ \Gamma(h, \tau_{ca})\mathbf{u}(k, d_{ca}), \end{aligned} \quad (6)$$

则带有观测器的NCS可表示为 S_{OD} :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_p(k+1) \\ \hat{x}_p(k+1) \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}(\Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(k) \\ \hat{x}_p(k) \end{bmatrix} &+ \\ \begin{bmatrix} \Gamma(h, \tau_{ca}) \\ \Gamma(h, \tau_{ca}) \end{bmatrix} \mathbf{u}(k, d_{ca}). \end{aligned} \quad (7)$$

基于上述观测器, 考虑控制时延 λ_{ca} , 设计状态反馈控制律 S_K :

$$u_c(k - d_{ca}) = -K\hat{x}_p(k). \quad (8)$$

定理 1 若 S_{PD} 描述的NCS可控可观, 则由 S_{OD} 和 S_K 构成的复合系统 S_{KOD} 满足分离原理, 即时延观测器的引入不影响 S_K 的特征值配置, 状态反馈的引入不影响 S_{OD} 的特征值配置. 复合系统的状态反馈控制律和时延观测器可分离设计.

证 由 S_{OD} 和 S_K 构成的复合系统 S_{KOD} 为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_p(k+1) \\ \hat{x}_p(k+1) \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}(\Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(k) \\ \hat{x}_p(k) \end{bmatrix} &+ \\ \begin{bmatrix} \Gamma(h, \tau_{ca}) \\ \Gamma(h, \tau_{ca}) \end{bmatrix} K \begin{bmatrix} \hat{x}_p(k+1) \\ \hat{x}_p(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

整理为用 $x_p(k)$ 和 $\hat{x}_p(k)$ 表示, 再经推导可得用 $[x_p(k+1) \ \tilde{x}_p(k+1)]^T$ 表示的闭环系统为

$$\begin{bmatrix} x_p(k+1) \\ \tilde{x}_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_K & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(k) \\ \tilde{x}_p(k) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Sigma_K &= [I - \Gamma_0(h, \tau_{ca})K(I + \\ &\Gamma_0(h, \tau_{ca})K)^{-1}](\Phi - \Gamma_1(h, \tau_{ca})K), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma_{12} &= \Gamma_0(h, \tau_{ca})K(I + \Gamma_0(h, \tau_{ca})K)^{-1}(\Phi - \\ &\quad L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1} - \Gamma_1(h, \tau_{ca})K) + \Gamma_1(h, \tau_{ca})K, \\ \Sigma_{21} &= \mathbf{0}, \Sigma_L = \Phi - L\Psi\Phi^{-d_{sc}+1}.\end{aligned}$$

则复合系统 S_{KOD} 由 $|zI - \Sigma_K||zI - \Sigma_L| = 0$ 确定。可以看到: K 只影响 S_K 的极点配置, L 只影响 S_{OD} 的极点配置, 即 K 和 L 可独立设计。证毕。

综上, 基于时延观测器的状态反馈控制系统设计过程为: 由系统性能指标获得期望闭环极点; 建立闭环特征方程和观测器特征方程, 根据假设1)3), 结合式(2)和式(10)确定的特征方程计算 K 和 L 。由文献[4,8]可知, 网络负载剧烈变化时, 每步得到的 K 和 L 可能不同, 系统可能不稳定, 此时采用缓冲区的方法, 根据最大时延拍数 $d_{ca}^{\max}$ 和 $d_{sc}^{\max}$ 设置控制输入和系统输出缓冲区, k 时刻用 $k - d_{ca}^{\max}$ 和 $k - d_{ca}^{\max} + 1$ 时刻的控制输入以及 $k - d_{sc}^{\max}$ 时刻的系统输出构成观测器, 将时变时延转化为固定时延; 网络负载变化较慢时不会出现系统不稳定的情况, 依据上述方法计算, 每步获得 K 和 L 并构造闭环系统即可。

5 仿真研究(Simulation research)

考虑连续被控过程:

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x_p(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_c(t), \\ y_p(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x_p(t). \end{cases} \quad (11)$$

设采样周期为200 ms, 控制时延 λ_{ca} 和输出时延 λ_{sc} 服从随机均匀分布, 性能指标取超调量 $\zeta\% \leq 5\%$, 上升时间 $t_r = 1.8$ s, 期望观测极点 $z_{1,2} = 0.4 \pm 0.12i$, 得离散系统为

$$\begin{cases} x_p(k+1) = \\ \begin{bmatrix} 1 & 0.2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_p(k) + \Gamma_0(0.2, \tau_{ca})u_c(k-d_{ca}+ \\ 1) + \Gamma_1(0.2, \tau_{ca})u_c(k-d_{ca}), \\ y_p(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x_p(k). \end{cases} \quad (12)$$

计算得闭环极点 $z_{1,2} = 0.86 \pm 0.12i$, 选择期望观测极点 $z_{1,2} = 0.4 \pm 0.12i$, 根据时延上界 $d_{ca}^{\max}$ 和 $d_{sc}^{\max}$ 设置控制和输出缓冲区。仿真中获得每步时延, 由式(10)确定的特征方程得到 K 和 L 。

图1比较给出了控制时延和输出时延均为[0, 600] ms, 采用时延观测器(图1(a))与常规现今值观测器(图1(b))的控制效果, 可以看到前者能够获得期望的控制性能, 后者使系统振荡发散。图2给出了采用不同时延仿真采样周期(dT_s)时的系统响应, 可看到时延接近连续变化($dT_s = 0.01$ s)或长时间不变($dT_s = 2$ s)时的控制效果将优于时延变化等于采样周期($dT_s = 0.2$ s)的情况。 $dT_s = 0.2$ s时, 时延影响完全作用于系统; 时延接近连续变化时,

对系统作用相对小; 时延变化快且接近采样周期时($dT_s = 0.4$ s)和($dT_s = 0.1$ s), 控制性能会差些。由此验证了前述时延变化速度对系统的影响。

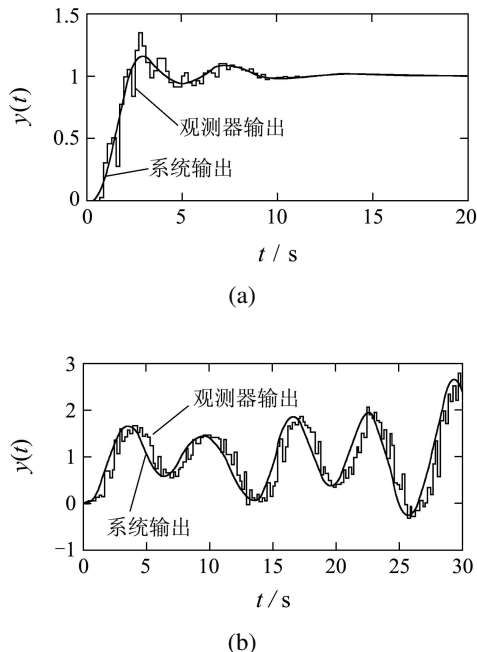


图1 时延观测器和现今值观测器效果比较

Fig. 1 Compare of time delay observer & current observer

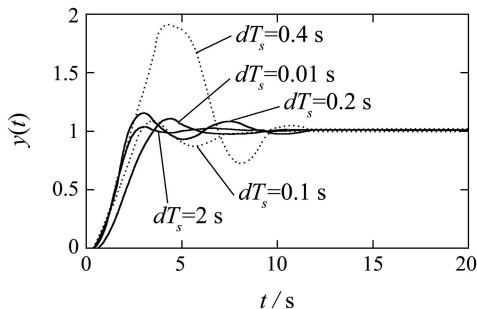


图2 网络时延变化速度对系统的影响

Fig. 2 Effect of time delay change speed on system

6 总结(Summary)

本文设计了一种具有随机有界控制时延和输出时延补偿功能的NCS时延观测器, 并给出了极点任意配置条件, 进而给出了基于该观测器的状态反馈控制系统设计方法, 并证明了复合系统的分离设计原理。仿真结果验证了本文方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] WALSH G C, YE H, BUSHNELL L G. Stability analysis of networked control systems[C]//Proceeding of the American Control Conference. New York: IEEE Press, 1999: 2876 - 2880.
- [2] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control System Magazine, 2001, 21(2): 84 - 99.

- [4] DURRANT-WHYTE H F, RYE D, NEBOT E. Localization of autonomous guided vehicles[C]//*Proceedings of International Symp on Robotics Research*. New York: Springer-Verlag, 1995: 613 – 625.
- [5] SHATKAY H. *Learning models for robot navigation*[D]. USA: Brown University, 1998.
- [6] SHATKAY H, KAEHLBLING L. Learning topological maps with weak local odometric information[C]//*Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1997: 920 – 927.
- [7] THRUN S. A probabilistic online mapping algorithm for teams of mobile robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, 20(5): 335 – 363.
- [8] CASTELLANOS J, TARDOS J. *Mobile robot localization and map building: a multisensor fusion approach*[R]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [9] CSORBA M. *Simultaneous localization and map building*[D]. England: University of Oxford, 1997.
- [10] DISSANAYAKE G, NEWMAN P, CLARK S, et al. A solution to the simultaneous localization and map building(SLAM) problem[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 229 – 241.
- [11] MONTEMERIO M, THRUN S, KOLLER D, et al. Fast-SLAM: A factored solution to simultaneous mapping and localization[C]//*Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*. Edmonton, Canada: AAAI Press, 2002: 593 – 598.
- [12] MONTEMERLO M, THRUN S. Simultaneous localization and mapping with unknown data association using Fast-SLAM[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Taipei: IEEE Press, 2003: 1985 – 1991.
- [13] BORGES G A, ALDON M J. A split-and-merge segmentation algorithm for line extraction in 2d range images[C]//*Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2000: 1441 – 1444.
- [14] JENSEL P, CHRISTENSEN H I. Laser based position acquisition and tracking in an indoor environment[C]//*Proceedings of International Symposium on Robotics and Automation*. Coahuila, Mexico: IEEE Press, 1981: 331 – 338.
- [15] EUSTICE R, WALTER M, LEONARD J. Sparse extended information filters: Insights into sparsification[C]//*Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Canada: IEEE Press, 2005: 641 – 648.

作者简介:

陈家乾 (1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为多传感器信息融合、机器人的定位与地图生成, E-mail: street_zju@yahoo.com.cn;

何衍 (1973—), 男, 副教授, 研究方向为信息融合、多机器人协作;

蒋静坪 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能系统与智能控制、电力传动自动化。

(上接第766页)

- [3] 朱其新, 胡寿松, 刘亚. 无限时间长时延网络控制系统的随机最优控制[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(3): 321 – 326.
(ZHU Qixin, HU Shousong, LIU Ya. Infinite time stochastic optimal control of networked control systems with long delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 321 – 326.)
- [4] 于之训, 蒋平, 陈辉堂. 具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计[J]. *信息与控制*, 2000, 29(2): 125 – 130.
(YU Zhixun, JIANG Ping, CHEN Huitang. Design of status observer for networked control system with transfer delay[J]. *Information and Control*, 2000, 29(2): 125 – 130.)
- [5] 朱张青, 周川, 胡维礼. 短时延网络控制系统的鲁棒 H_2/H_∞ 状态观测器设计[J]. *控制与决策*, 2005, 20(3): 280 – 284.
(ZHU Zhangqing, ZHOU Chuan, HU Weili. Design of robust H_2/H_∞ states observer for networked control systems with short time-delay[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 280 – 284.)
- [6] 周雪琴, 安锦文. 计算机控制系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 158 – 165.
- [7] BJÖRN W, NILSSON J, TÖRNGREN M. Timing problems in real-time control systems[C]//*Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE Press, 1995, 6: 2000 – 2004.
- [8] KRTOLICA R. Stability of linear feedback systems with random communication delays[J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(4): 925 – 953.

作者简介:

傅磊 (1978—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为工业以太网、网络化控制系统, E-mail: raymail@msn.com;

戴冠中 (1937—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为自动控制、信息安全, E-mail: daigz@nwpu.edu.cn.