

文章编号:1001-9081(2009)05-1248-03

## 基于等分采样周期的网络控制系统故障检测

张 捷, 薄煜明

(南京理工大学 自动化学院,南京 210094)

(zhangjie\_njust@163.com)

**摘要:**考虑一类时延网络控制系统,假定其存在输出时延,对其进行故障检测。通过提高控制器端的采样频率,将传感器采样周期等分,这样可以将网络时延近似看成控制器端采样周期的整数倍。在此基础上,建立了基于离散异步动态系统的故障观测器误差方程,并将观测器稳定条件归结为一个线性矩阵不等式。当系统正常时,只要给定的不等式条件成立,该观测器系统就是稳定的。当系统发生故障时,观测器残差能够迅速发生跳变,从而检测出故障的发生。最后通过仿真实例验证了方法的有效性。

**关键词:**网络控制系统;故障检测;输出时延;采样周期

中图分类号: TP273 文献标志码:A

### Fault detection for network control system based on equally divided sampling period

ZHANG Jie, BO Yu-ming

(Institute of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Considering a class of network control system with time delays, the fault detection was carried out when the output delays were present. By increasing sampling frequency in controller and equally dividing the sampling period of the sensor, the time delays could be approximated to several times of the sampling period of the controller. On this basis, the error equation of the fault observer was constructed based on a discrete asynchronous dynamical system. And a linear matrix inequality decided the stability condition of this observer. When the system is normal and the given inequality condition is satisfied, the observer system is stable. When a fault is present, the observer residue can change rapidly and the occurrence of the fault can be detected. Finally, an illustrative example was given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Network Control System (NCS); fault detection; output delay; sampling period

### 0 引言

近年来,随着控制系统规模的日益扩大,很多控制系统均采用总线形式构建系统网络,因此网络控制系统也日渐成为控制领域研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>。它的出现取代了传统控制系统点对点的连接方式,实现了控制系统向网络化、集成化、分布化、节点智能化的发展趋势。但同时由于网络的加入,也带来了许多不可避免的新问题,如网络诱导时延、数据包丢失、乱序等,如果不能合理地考虑这些问题,将会使系统的性能受到严重的影响。目前,针对网络控制系统的研究主要有控制与调度、故障检测与诊断、延时补偿等。

在传统的网络控制系统故障检测研究中,各节点按照统一的采样频率读取数据。如果节点为时间驱动方式,则已经到达接收端的数据必须等到规定的采样时刻才能被接收端使用,这相当于人为地增加了网络延时。如文献[5]考虑一类时延网络控制系统,由于节点为时间驱动,因此时延转化为了周期的整数倍,故障检测的设计过程变得相对简单,但在一定程度上影响了故障检测系统的性能。

本文针对上述情况,通过提高控制器端读取数据的频率,相当于将传感器采样周期进行了等分,从而可将网络时延近似看成控制器端采样周期的整数倍。在此基础上,设计了具有时延补偿功能的故障观测器,并将原系统的故障检测等效

为数据包丢失时的故障检测问题。假定丢包率一定,利用异步动态系统理论,对观测器误差方程进行了分析,并证明了观测器系统的稳定性。

### 1 问题描述

网络控制系统的结构如图 1 所示。被控对象模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_f x(t) + B_f u(t) + D_f f(t) \\ y(t) = C_f x(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  为状态向量,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  为输入向量,  $y(t) \in \mathbb{R}^l$  为输出向量,  $f(t) \in \mathbb{R}^n$  为故障向量。正常情况下,  $f(t)$  为零向量;当  $f(t)$  为非零向量时,表示发生了故障。 $A_f$ 、 $B_f$ 、 $C_f$ 、 $D_f$  为适维常系数矩阵。

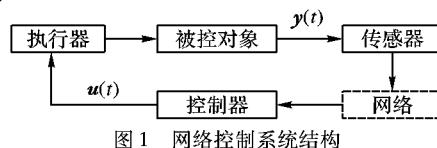


图 1 网络控制系统结构

对系统做如下假设:

假设 1 控制器和执行器位于同一个节点;

假设 2 传感器、控制器节点均为时间驱动,且时钟完全同步,采样周期为  $T_s$ ;

假设 3 传感器节点的数据包带有时标;

收稿日期:2008-11-17;修回日期:2009-01-20。

作者简介:张捷(1979-),男,湖北荆门人,助理研究员,博士研究生,主要研究方向:网络控制;薄煜明(1965-),男,江苏常熟人,研究员,博士生导师,主要研究方向:火力控制、网络控制。

假设4 输出时延可能大于  $T_s$ 。

当时延大于采样周期时,在控制器接收端可能出现数据包乱序现象。此时,控制器端利用传感器数据的时标获得其时延信息,并与上一时标进行对比。如果是较新的数据则保留并覆盖原数据,否则舍弃,从而保证用于计算控制量的始终为最新数据。

为了减小输出时延对系统的影响,在控制器端设置大容量缓存,缓存大小可以保证  $N$  个采样信号同时存储,并在控制器端以  $T_c = T_s/N$  为周期采样网络数据。按照  $T_c$  对原连续模型进行离散化,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k) + Df(k) \\ \mathbf{y}(k) = C\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $A = e^{A_f T_c}$ ,  $B = \int_0^{T_c} e^{A_f s} ds B_f$ ,  $C = C_f$ ,  $D = \int_0^{T_c} e^{A_f s} ds D_f$ ,

并假定  $(A, C)$  可观测。

由于将原采样周期等分为  $N$  份,控制器以  $T_c$  为周期读取缓存数据,频率提高了  $N$  倍。假设  $\tau^*$  为实际输出时延,只要  $N$  足够大,则延时  $\tau^*$  可以近似看成  $T_c$  的整数倍,即:

$$d = \lceil \tau^*/T_c \rceil \quad (3)$$

其中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示大于等于  $\cdot$  的最小整数,  $d$  为延时的采样周期数。

## 2 观测器设计

通过提高控制器端采样率可以更快速地获得传感器数据,从而更有利系统的故障检测,提高了故障检测的速度。此时,在控制器端采样传感器数据存在两种情况,可以分为两个事件分别进行讨论。

事件1  $k$  时刻没有传感器数据到达控制器端。仅能利用上一周期的观测器状态估计值进行计算,在控制器端构建观测器:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k-d_k+1) = A\hat{\mathbf{x}}(k-d_k) + B\mathbf{u}(k-d_k) \\ \hat{\mathbf{y}}(k-d_k) = C\hat{\mathbf{x}}(k-d_k) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $d_k$  为  $k$  时刻的网络延时。由式(3)递推可得:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = A\hat{\mathbf{x}}(k) + B\mathbf{u}(k) \\ \hat{\mathbf{y}}(k) = C\hat{\mathbf{x}}(k) \end{cases} \quad (5)$$

定义观测器状态估计误差向量:

$$\mathbf{e}(k) := \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)$$

则观测器系统的状态估计误差方程为:

$$\mathbf{e}(k+1) = A\mathbf{e}(k) \quad (6)$$

事件2  $k$  时刻有传感器数据  $y(k-d_k)$  到达控制器端。此次设计观测器:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k-d_k+1) = A\hat{\mathbf{x}}(k-d_k) + B\mathbf{u}(k-d_k) + \\ \quad L[y(k-d_k) - \hat{y}(k-d_k)] \\ \hat{\mathbf{y}}(k-d_k) = C\hat{\mathbf{x}}(k-d_k) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $L$  为观测器增益矩阵。由式(7)观测器递推可得:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = A\hat{\mathbf{x}}(k) + B\mathbf{u}(k) + L[y(k) - \hat{y}(k)] \\ \hat{\mathbf{y}}(k) = C\hat{\mathbf{x}}(k) \end{cases} \quad (8)$$

则观测器系统的状态估计误差方程为:

$$\mathbf{e}(k+1) = (A - LC)\mathbf{e}(k) \quad (9)$$

值得注意的是,在事件2出现时,由于得到传感器信号,因此预估的  $\hat{\mathbf{x}}(k)$  将比事件1更准确。此时可以用预估值  $\hat{\mathbf{x}}(k-d_k+1), \hat{\mathbf{x}}(k-d_k+2), \dots, \hat{\mathbf{x}}(k)$  代替事件1中对应时刻的估计值,这样能够更为准确地判断出系统故障的发生。

综合上述事件1的式(6)和事件2的式(9),得:

$$\mathbf{e}(k+1) = \Phi_i \mathbf{e}(k); i = 1, 2 \quad (10)$$

其中:

$$\Phi_1 = A, \Phi_2 = A - LC$$

假定事件1、事件2的发生率分别为  $\xi$  和  $1 - \xi$ 。若将事件1中没有传感器数据到达控制器端看作数据传输失败情况,事件2看作数据传输成功,则原故障检测问题可以转化为具有数据包丢失的网络控制系统故障检测问题,  $\xi$  为丢包率。当假定  $\xi$  为已知常数时,式(10)为具有两个事件的异步动态系统。

## 3 观测器稳定性分析

引理<sup>[2]</sup> 对于具有  $N$  个离散事件的异步动态系统:

$$\mathbf{x}(k+1) = f_i(\mathbf{x}(k)); i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

假定事件  $1, 2, \dots, N$  的发生率分别为  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$  ( $0 \leq \xi_i \leq 1, \sum_{i=1}^N \xi_i = 1$ )。若存在标量  $\delta > 0, \delta_i > 0$ , 满足:

$$\prod_{i=1}^N \delta_i^{\xi_i} > \delta > 1 \quad (12)$$

以及 Lyapunov 函数  $V(\mathbf{x}(k))$ , 满足:

$$V(\mathbf{x}(k+1)) \leq \delta_i^{-2} V(\mathbf{x}(k)); i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

则该异步动态系统指数稳定,且指数衰减率为  $\delta$ 。

定理 对于式(10)所示的异步动态系统,若存在对称正定矩阵  $P$  和矩阵  $Q$ , 以及标量  $\delta_1 > 0, \delta_2 > 0$ , 满足下列不等式组:

$$\begin{bmatrix} -\delta_1^{-2}P & A^T P \\ PA & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -\delta_2^{-2}P & A^T P - C^T Q \\ PA - Q^T C & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\delta_1^{1-\xi} \delta_2^\xi > 1 \quad (16)$$

其中  $\xi$  为丢包率,且  $0 \leq \xi < 1$ , 则该系统是指数稳定的。

证明 令  $N = 2$ , 取 Lyapunov 函数  $V(\mathbf{e}(k)) = \mathbf{e}(k)^T P \mathbf{e}(k)$ , 其中  $P$  为对称正定矩阵,则:

$$V(\mathbf{e}(k+1)) = \mathbf{e}(k)^T \Phi_i^T P \Phi_i \mathbf{e}(k)$$

则当满足:

$$\Phi_i^T P \Phi_i - \delta_i^{-2} P < 0 \quad (17)$$

时,有:

$$V(\mathbf{e}(k+1)) - \delta_i^{-2} V(\mathbf{e}(k)) \leq 0$$

利用 Schur 补,式(17)等价于:

$$\begin{bmatrix} -\delta_i^{-2}P & \Phi_i^T \\ \Phi_i & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

上式中同时含有  $P$  和  $P^{-1}$ , 对其进行线性化处理,两边分别左乘、右乘  $\text{diag}(I, P)$ , 可得

$$\begin{bmatrix} -\delta_i^{-2}P & \Phi_i^T P \\ P \Phi_i & -P \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

将  $\Phi_1 = A, \Phi_2 = A - LC$  带入式(19),并令:

$$Q = L^T P \quad (20)$$

即得式(14)、(15)。再将事件1、2的发生率  $\xi_1 = 1 - \xi$  和  $\xi_2 = \xi$  分别带入引理中的式(12),可得式(16)。证毕。

在观测器系统的稳定性得到保证之后,可利用式(20)求得观测器增益矩阵为:

$$L = P^{-1} Q^T \quad (21)$$

若令  $\varepsilon(k) = Zw(k)$  作为故障检测残差, 其中,  $Z$  为权矩阵, 则按照下述规则可以判断系统是否发生故障。

$$\begin{cases} (\varepsilon(k)) \leq \bar{\varepsilon}, & \text{系统正常} \\ (\varepsilon(k)) > \bar{\varepsilon}, & \text{系统故障} \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $\|\varepsilon(k)\| = \sqrt{\varepsilon(k)^T \varepsilon(k)}$  是向量的欧氏范数,  $\bar{\varepsilon}$  为选定的故障检测阈值。

#### 4 仿真示例

网络控制系统的被控对象为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 10 \\ -10 & -20 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 10 \end{bmatrix} f(t) \\ y(t) = [1 \ 0] x(t) \end{cases}$$

设传感器采样周期  $T_s = 0.1$  s, 在控制器端设置大容量缓存, 令  $N = 10$ , 则  $T_c = 0.01$  s, 用  $T_c$  离散化后的对象模型为:

$$\begin{cases} x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.9953 & 0.0905 \\ -0.0905 & 0.8144 \end{bmatrix} x(k) + \\ \quad \begin{bmatrix} 0.0047 \\ 0.0905 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0.0147 \\ 0.0900 \end{bmatrix} f(k) \\ y(k+1) = [1 \ 0] x(k) \end{cases}$$

若原系统的控制律为  $K = [-0.1259 \ -0.2718]$ , 事件 1 发生率  $\xi = 0.1$ , 则事件 2 发生率  $1 - \xi = 0.9$ 。选择满足式(15)的  $\delta_1 = 1.05$ ,  $\delta_2 = 0.85$ , 利用 LMI 工具箱的 feasp 求解器计算可得:

$$P = \begin{bmatrix} 81.233 & 0.68638 \\ 0.68638 & 88.124 \end{bmatrix}$$

观测器增益矩阵:

$$L = [0.93945 \ -0.00732]^T$$

令权矩阵  $Z = I$ , 假定系统在  $t = 4$  s 时发生阶跃型突变故障, 并选择故障检测阈值  $\bar{\varepsilon} = 0.02$ 。分别采用普通故障观测器和本文的故障观测器, 故障检测的仿真结果如图 2、3 所示。

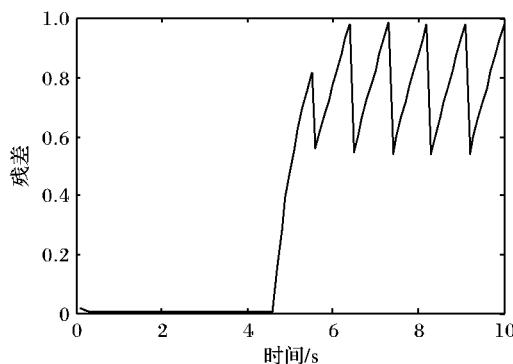


图 2 采用普通故障观测器的仿真结果

从图 2、3 可以看出, 采用等分采样故障观测器能更早检测出故障的发生, 且残差曲线更为平滑。

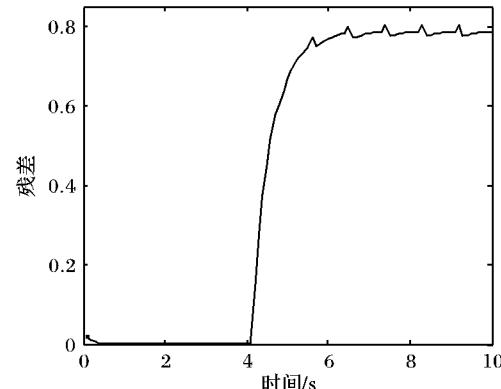


图 3 采用等分采样故障观测器的仿真结果

#### 5 结语

本文针对一类时延网络控制系统, 假定各节点采用时间驱动方式, 在控制器端提高数据读取频率, 相当于将原采样周期进行了等分, 从而可将输出时延近似看成新采样周期的整数倍。利用这种方法, 可以减少采用时间驱动对于时延的放大作用, 设计出更为准确可靠的故障观测器。此外, 通过将原系统的故障检测等效为数据丢失的故障检测问题, 利用异步动态系统理论, 对观测器稳定性进行了证明。在本文基础上, 可以进一步考虑系统具有干扰的情况, 设计基于等分采样周期的鲁棒故障观测器。

#### 参考文献:

- [1] YUE DONG, HAN QING-LONG, PENG CHEN. State feedback controller design of networked control systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, 2004, 51(11): 640–644.
- [2] RABELLO A, BHAYA A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and application [J]. IEEE Proceeding on Control Theory Application, 2003, 150(5): 546–550.
- [3] BRANICKY M S, PHILIPS S M, ZHANG WEI. Scheduling and feedback co-design for networked control systems [C]// Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Washington, DC: IEEE Press, 2002, 2: 1211–1217.
- [4] HAO YE, DING S X. Fault detection of networked control systems with network-induced delay [C]// 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision: ICARVC 2004. Washington, DC: IEEE Press, 2004, 1: 294–297.
- [5] BAO YONG, DAI QIU-QIU, CUI YING-LIU, et al. Fault detection based on robust states observer on networked control systems [C]// International Conference on Control and Automation: ICCA 2005. Washington, DC: IEEE Press, 2005, 2: 1237–1241.
- [10] Libpcap[CP/OL]. [2008-09-12]. <http://sourceforge.net/projects/libpcap/>.
- [11] CORBET J, RUBINI A. Linux device driver program[M]. [S. l.]: O'Reilly Media, 2003: 65–66.
- [12] TCPDUMP/LIBPCAP[CP/OL]. [2008-09-12]. <http://www.tcpdump.org/>.
- [13] 王发琪. 网络监听技术在 Linux 系统下的实现[J]. 科技资讯, 2006(29): 109–110.
- [14] 杨建华, 谢高岗, 李忠诚. 基于 Linux 内核的流量分析方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(8): 67–69.
- [15] 杨武, 方滨兴, 云晓春, 等. 基于 Linux 系统的报文捕获技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(26): 28–30.
- [16] 刘玮, 郭莉. 半轮询方式提高 Linux 以太网桥性能[J]. 计算机应用, 2005, 25(z1): 50–51.
- [17] ESTAN C, VARGHESE G. New directions in traffic measurement and accounting[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(4): 323–336.
- [18] 施永益, 黄忠东. 基于排队论和 QoS 的电力系统主干网带宽估算[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 50–53.

(上接第 1247 页)

- [10] Libpcap[CP/OL]. [2008-09-12]. <http://sourceforge.net/projects/libpcap/>.
- [11] CORBET J, RUBINI A. Linux device driver program[M]. [S. l.]: O'Reilly Media, 2003: 65–66.
- [12] TCPDUMP/LIBPCAP[CP/OL]. [2008-09-12]. <http://www.tcpdump.org/>.
- [13] 王发琪. 网络监听技术在 Linux 系统下的实现[J]. 科技资讯, 2006(29): 109–110.
- [14] 杨建华, 谢高岗, 李忠诚. 基于 Linux 内核的流量分析方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(8): 67–69.
- [15] 杨武, 方滨兴, 云晓春, 等. 基于 Linux 系统的报文捕获技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(26): 28–30.
- [16] 刘玮, 郭莉. 半轮询方式提高 Linux 以太网桥性能[J]. 计算机应用, 2005, 25(z1): 50–51.
- [17] ESTAN C, VARGHESE G. New directions in traffic measurement and accounting[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(4): 323–336.
- [18] 施永益, 黄忠东. 基于排队论和 QoS 的电力系统主干网带宽估算[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 50–53.