第8卷第4期 空 军 工 程 大 学 学 报(自然科学版) Vol.8 No.4
2007年8月 JOURNAL OF AIR FORCE ENGINEERING UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE EDITION) Aug. 2007

基于信息调度的网络控制系统的故障诊断

杨 方, 方华京
(华中科技大学 控制科学与工程系,武汉 430074)

摘 要:研究了基于静态信息调度框架的网络控制的故障诊断问题。表征故障信息的残差信号由一个周期性的未知输入观测器观测出的系统状态和参考模型的状态构造而来。文中给出了此类观测器存在的充分条件,并根据状态估计误差和 Lyapunov 理论推导出观测器稳定的条件。最后给出了仿真实例验证了提出方法的有效性。

关键词:网络控制系统;信息调度;未知输入观测器;渐近稳定

中图分类号: TP273 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-3516(2007)04-0035-04

通过网络闭环的反馈控制系统称网络控制系统(networked control systems,简称 NCS)[1-2],其特点是系统各组件(传感器、控制器、执行器)之间可以通过网络交换信息。因此,与传统意义上的控制系统相比,NCS 中控制回路的性能不仅依赖于控制策略的设计,还依赖于网络资源的调度,目前有不少文献对控制网络的信息调度进行了研究[1,3-5]。根据调度序列随时间与否,可将调度算法分为静态调度算法和动态调度算法。研究者多是从稳定性角度来分析调度算法对控制系统的影响,而随着系统中网络的引入和规模的不断扩大,可靠性要求也不断提高。尽早地诊断并分离出系统中出现的故障对网络化控制系统的设计和应用具有重要意义[6]。基于模型的鲁棒故障诊断经过多年深入的发展已取得了大量的研究成果,其核心是对表征故障信息的残差信号的构造。常用的设计方法有未知输入观测器方法、特征结构配置方法、等价空间方法等[7]。但这些方法主要应用在线性时不变系统的故障诊断中。

1 基于信息调度的 NCS 的系统模型

典型的 NCS 结构中传感器、执行器以及控制器均为网络中的独立节点与网络相连。由于网络带宽有限,在同一时刻网络只能传送系统的有限输入输出信号,这表明有部分系统信号丢失了,因此有可能造成系统不稳定或系统性能达不到要求。而在传统的控制系统中不存在网络资源的分配问题。为了更好地分析网络带来的影响,我们将信息调度方法考虑进来得到基于信息调度的系统模型图1。此时的信息调度也就是在有通信约束的情形下,网络对控制系统施加的影响。图中,G 为被控对象,$\bar{y}_k$,$\bar{u}_k$,y_k,u_k 分别为系统输出信号、系统输入信号、控制器输入信号和控制器输出信号,它们均为离散信号。

设被控对象 G 的离散状态方程描述为

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \bar{A}x_k + \bar{B}\bar{u}_k + \bar{B}_d d_k + \bar{B}_f f_k \\ \bar{y}_k &= \bar{C}x_k \end{aligned} \tag{1}$$

式中:d 是未知干扰向量;f 是故障向量。信息调度算法 Sc 的状态方程为

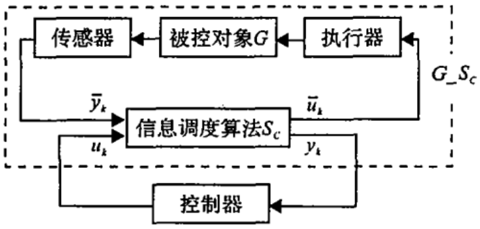

图1 基于信息调度 NCS 框图

收稿日期:2007-03-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60574088,60274014)
作者简介:杨 方(1979-),女,湖北随州人,博士生,主要从事网络控制系统的故障诊断与容错研究;
方华京(1955-),男,浙江黄岩人,教授,博士,主要从事网络化控制系统,故障诊断与容错控制研究.

$$\begin{aligned} \bar{x}_{k+1} &= \bar{A}_i \bar{x}_k + \bar{B}_{1i} \bar{y}_k + \bar{B}_{2i} u_k \\ \bar{u}_k &= \bar{C}_{1i} \bar{x}_k + \bar{D}_{11i} \bar{y}_k + \bar{B}_{12i} u_k \\ \bar{y}_k &= \bar{C}_{2i} \bar{x}_k + \bar{D}_{21i} \bar{y}_k + \bar{B}_{22i} u_k \end{aligned} \tag{2}$$

式中:$\bar{x}$ 维数可根据需要确定,系统矩阵 $\bar{A}_i$,$\bar{B}_{1i}$等均为常数矩阵,它们的值取决于信息调度方法。由被控对象和信息调度方法的状态方程可知,在有通信约束情形下网络化控制系统的故障检测模型 G_Sc 为

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= A_k X_k + B_k u_k + B_{dk} d_k + B_{fk} f_k \\ y_k &= C_k X_k + D_k u_k \end{aligned} \tag{3}$$

式中:$X_k = \begin{bmatrix} x_k \\ - \\ x_k \end{bmatrix}$,$A_k = \begin{bmatrix} \bar{A} + \bar{B}\bar{D}_{11i}\bar{C} & \bar{B}\bar{C}_{1i} \\ \bar{B}_{1i}\bar{C} & \bar{A}_i \end{bmatrix}$,$B_k = \begin{bmatrix} \bar{B}\bar{D}_{12i} \\ \bar{B}_{2i} \end{bmatrix}$,$B_{dk} = \begin{bmatrix} \bar{B}_d \\ 0 \end{bmatrix}$,$B_{fk} = \begin{bmatrix} \bar{B}_f \\ 0 \end{bmatrix}$,$C_k = [\bar{D}_{21i}\bar{C} \quad \bar{C}_{2i}]$,$D_k = \bar{D}_{22i}$,$X_k \in R^n$,$u_k \in R^k$,$d_k \in R^m$,$y_k \in R^p$,假定 $p \geqslant m$,同时为保持系统正则,可令 $D_k = 0$。

由于静态信息调度方法是周期性的,因此 G_Sc 也是周期系数的线性系统,不妨假设其周期为 N,则有 $\begin{bmatrix} A_k & B_k & B_{dk} & B_{fk} \\ C_k & & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{k+N} & B_{k+N} & B_{d(k+N)} & B_{f(k+N)} \\ C_{k+N} & & & \end{bmatrix}$,其中等号表示对应位置的矩阵块相等。

2 未知输入观测器的设计

至此,我们将基于信息调度的 NCS 建模为一个周期系数的离散系统,对于这类系统的故障诊断问题,一些研究者利用周期离散系统的提升形式将系统转化为一个时不变系统,并分别从时域、频域角度分析系统的响应特性,建立周期系统分析法的统一框架。在此框架下一般的故障诊断方法也可为此类系统提供鲁棒故障诊断。但是这种方法对于高阶或周期长的系统会在数值计算上遇到很大麻烦,而且它相当于是在一个周期的最后一拍才进行故障诊断,对于速度要求高的控制回路说就人为的引入了过长的诊断延时。更好的策略是要充分及时地利用可得的测量数据来进行故障诊断。下面我们将研究这类系统中未知输入观测器的设计问题。系统的未知输入观测器可构造为

$$\begin{aligned} Z_{k+1} &= N_k Z_k + G_k u_k + L_k y_k \\ \hat{X}_{k+1} &= Z_{k+1} - E_{k+1} y_{k+1} \end{aligned} \tag{4}$$

式中:N_k,G_k,L_k,E_k都是未知的周期为 N 的周期矩阵。观测器观测误差定义为 $e_k = \hat{X}_k - X_k$,于是

$$e_{k+1} = \hat{X}_{k+1} - X_{k+1} = N_k e_k + [N_k P_k + L_k C_k - P_{k+1} A_k] X_k + [G_k - P_{k+1} B_k] u_k - P_{k+1} B_{dk} d_k - P_{k+1} B_{fk} f_k \tag{5}$$

式中:$P_k = I_n + E_k C_k$。如果以下条件满足

$$N_k P_k + L_k C_k - P_{k+1} A_k = 0 \tag{6}$$

$$G_k - P_{k+1} B_k = 0 \tag{7}$$

$$P_{k+1} B_{dk} = 0 \tag{8}$$

则 $e_{k+1} = N_k e_k - P_{k+1} B_{fk} f_k$

在文献[8]中作者研究了线性定常系统未知输入观测器存在的充要条件。综合文献[8]定理 1 和定理 2,我们可得出如下的未知输入观测器存在的充分条件。

定理 1 对于系统(3),当以下条件满足时,未知输入观测器(4)存在。

1)$C_{k+1} B_{dk}$的秩和 B_{dk}的秩相等且为 m。

2)($P_{k+1} A_k$,C_k) 可检测。

条件 1)的成立保证了式(8)中 E_{k+1}解的存在。

条件 2)成立,($P_{k+1} A_k$,C_k) 可检测,那么我们就可选择适当 E_k 使得

$$N_k = P_{k+1} A_k - K_k C_k \tag{9}$$

是 Hurwitzde。由式(6)、式(9)可得:

$$L_k = K_k - N_k E_k \tag{10}$$

这样未知输入观测器的参数 N_k,G_k,L_k,E_k就可由式(7)、式(8)、式(9)和式(10)求取出来。

注释 1:由文献[8]定理 1 和定理 2 可知,这里 1)和 2)给出的条件保证了以这些同时刻参数为线性定常系统参数时,稳定未知输入观测器的存在。但由于这里基于信息调度的网络控制系统系统和未知输入观测

器都建模为周期为 N 的周期系统。系统是时变的。因此1)和2)只能保证时变观测器(4)存在,还不能保证其稳定。因此需要进一步研究其稳定的条件。

考虑式(9)无故障的情形,即

$$e_{k+1}=N_k e_k \tag{11}$$

定理2 如果存在正定对称的周期矩阵 Q_k,周期为 N,满足如下线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} Q_{k+1} & N_k^{\mathrm{T}}Q_{k+1} \\ Q_{k+1}N_k & Q_k \end{bmatrix}>0 \tag{12}$$

则满足**定理**1的未知输入观测器可使状态估计误差(11)渐近稳定。

证明 令 Lyapunov 函数为 $V(e_k)=e_k^{\mathrm{T}}Q_k e_k$,其中 Q_k 是对称正定矩阵,且 $Q_k=Q_{k+N}$,即 Q_k 是周期为 N 的周期矩阵。由 Lyapunov 稳定性理论知,系统渐近稳定需 $\Delta V_k<0$,即

$$\Delta V_k=V(e_{k+1})-V(e_k)=e_{k+1}^{\mathrm{T}}Q_{k+1}e_{k+1}-e_k^{\mathrm{T}}Q_k e_k=e_k^{\mathrm{T}}[N_k^{\mathrm{T}}Q_{k+1}N_k-Q_k]e_k<0 \tag{13}$$

从而可得 $N_k^{\mathrm{T}}Q_{k+1}N_k-Q_k<0$,等价于(12)。

基于模型的故障诊断过程的核心就是表征故障信息的残差信号的构造。如果参考模型能够精确反映系统的运行状况,那么观测器的观测状态和系统状态真值之间的差值就可用作残差来判断系统是否出现故障。对于我们所研究的基于静态信息调度的网络控制器上面未知输入观测器的观测误差就可用做残差信号。根据残差信号与设定阈值之间的关系判定系统中是否出现了故障,若发生了故障,则确定故障发生的时刻。当残差小于域值时,判定系统处于正常状态,没有故障出现;当差值大于等于域值时,则判定系统发生了故障。

3 仿真实例

假定在系统(1)中,$\bar{A}=\begin{bmatrix} -0.3 & 0 \\ 0.3 & -0.2 \end{bmatrix}$,$\bar{B}=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$,$\bar{C}=\begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$,$\bar{B}_d=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$,$\bar{B}_f=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$。同时假定系统噪声是白噪声,故障信号只是出现在这个时间段[5,9],幅值为8。

采用的信息调度方式:控制器信息间隔着占用通信线路传送信息。其实际应用背景是网络带宽资源是有限的。在控制系统中有些数据是很重要的,例如一些只采集一次的原始的传感器信息,而有些数据在必要的情况要是可以延迟一下或者丢弃的,例如一些轨迹控制信号。$\bar{u}(i)=\begin{cases} u(i-1) & \text{if } i\text{ 是偶数} \\ u(i) & \text{if } i\text{ 是奇数} \end{cases}$ 调度算法 Sc 的状态方程(2)中系数表示为:

当 i 是偶数

$$\bar{A}_i=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\bar{B}_{1i}=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\bar{B}_{2i}=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},\bar{C}_{1i}=[1 \quad 0],\bar{C}_{2i}=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\bar{D}_{11i}=[0 \quad 0],\bar{D}_{12i}=0,\bar{D}_{21i}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\bar{D}_{22i}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

当 i 是奇数

$$\bar{A}_i=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\bar{B}_{1i}=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\bar{B}_{2i}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},\bar{C}_{1i}=[0 \quad 0],\bar{C}_{2i}=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},\bar{D}_{11i}=[0 \quad 0],\bar{D}_{12i}=1,\bar{D}_{21i}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\bar{D}_{22i}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

应用**定理**1的原理设计未知输入观测器,计算得到的参数为:

当 i 为偶数时:$F=\begin{bmatrix} -8 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -7 & 0 & 0 \\ -15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,$T=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,$B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$,$K=\begin{bmatrix} 25.667 & 0 \\ 0 & 0 \\ 51 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,$H=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

当 i 为奇数时:$F=\begin{bmatrix} -3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,$T=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,$B=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$,$K=\begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 0 \\ 51 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,$H=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 5 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

应用此未知输入观测器观测到的状态误差也就是故障诊断用残差信号见图2。

通过与设定域值的比较即可得出故障发生的时刻。

4 结论

本文将静态信息调度模型引入网络控制系统的故障诊断中,探讨了传统的未知输入观测器在这种考虑了网络调度算法的情形下的设计问题。并利用设计出的未知输入观测器观测的系统状态和参考模型的状态构造出残差信号对网络控制系统进行故障诊断。仿真结果表明了该方法对带宽有限的串行网络控制系统是有效的。关于信息调度方式及周期大小对故障诊断的影响,将在后续研究中完成。

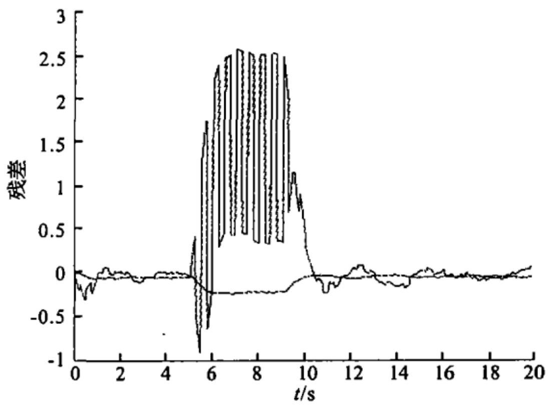

图2 残差信号图

参考文献:

[1] Gregory C Walsh, Hong Ye, Linda Bushnell. Stability Analysis of Networked Control Systems[A]. Proc of the American Control Conf[C]. San Diego, California,June 1999. 2876 -2880.

[2] Wei Zhang, Michael S. Branicky, Stephen M. Phillips. Stability of Networked Control Systems[J]. IEEE Control Systems Magazine,2001,21(1):84 -99.

[3] Michael S Branicky, Stephen M Phillips, Wei Zhang. Scheduling and Feedback Co - Design for Networked Control Systems [A]. Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control[C]. Las Vegas, Nevada USA,December 2002. 1211 -1217.

[4] 谢林柏, 方华京, 王华. 网络化控制系统的信息调度与稳定性研究[J]. 控制与决策,2004,19(5):589 -591.

[5] 谢林柏, 纪志成, 潘庭龙,等. 基于信息调度的网络化控制系统[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(3):449 -452.

[6] Fang Huajing, Ye hao, Zhong Maiying. Fault Diagnosis of Networked Control Systems[A]. The 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes[C]. Beijing, P. R. China,2006. 1 -12.

[7] Jie Chen, Ron J Patton. Roubust Model - Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems[M]. Kluwer Academic Publishers,1999.

[8] Darouach M, Zasadzinski M, Xu SJ. Full - Order Observers for Linear Systems With Unknown Inputs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1994,39(3):606 -609.

(编辑:姚树峰)

Fault Diagnosis for Networked Control Systems with Information - scheduling

YANG Fang, FANG Hua - jing

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In networked control systems the information is exchanged using a network among control system components. The performance of the closed - loop system is not only determined by the characteristics of the control system, but also determined by the scheduling manner imposed by network. The designer of fault diagnosis should take the new peculiarities into account. In this paper, networked control systems are modeled based on information scheduling scheme and the fault detection problems of them are studied. The residual signal is generated using an unknown input observer. Sufficient conditions for the existence of unknown input observer are derived. Several stability results regarding the state estimation error are established. Simulation results are given to show the effectiveness of the design.

Key words: networked control systems; information scheduling; unknown input observer; asymptotically stable