

文章编号: 1001-0920(2008)06-0672-05

分布式网络化控制系统故障诊断方法的研究

宗 群, 刘文静, 窦立谦, 孙连坤
(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘 要: 为了避免分布式网络化控制系统由于网络负载过大而造成的时延和丢包问题, 引入基于包的传输机制, 并针对此特殊结构设计中心故障诊断单元. 在诊断单元设计中, 由于各子系统工作周期不同以及传输包的大小不同, 将系统看作多速率采样系统, 采用提升技术获得系统的离散模型. 在此基础上设计状态观测器, 实现分布式网络化控制系统的故障诊断. 最后通过仿真验证了所提出方法的有效性.

关键词: 分布式网络化控制系统; 故障诊断; 基于包传输; 多速率采样系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fault diagnosis of distributed networked control system

ZONG Qun, LIU Wenjing, DOU Li-qian, SUN Lian-kun

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Correspondent: LIU Wenjing, E-mail: liuwenjingsvm@yahoo.com.cn)

Abstract: In order to avoid the transmission delays and packet loss of the distributed networked control system(NCS) caused by the network overload, the packet-based transmission mechanism is introduced, and the center fault diagnosis unit is designed for this special structure. In the course of the design, the distributed NCS is regarded as multi-rate sampled-data system according to the difference of the sample periods and the packet sizes among the subsystems. The discrete model is obtained by using the lifting technique, based on which the state observer is designed to achieve the fault diagnosis of distributed NCS. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Distributed networked control systems; Fault diagnosis; Packet-based transmission; Multi-rate sampled-data system

1 引 言

网络化控制系统由于其资源共享、低成本、灵活性高等优点,在工业过程中得到了广泛应用.目前,针对分布式网络化控制系统进行故障诊断的研究相对较少.文献[1]对双层分布式网络化控制系统结构、子系统与中心单元的信息交换,以及基于观测器的故障诊断方法进行了详细介绍;[2]为了减少网络负载,避免因时延、丢包引起的不确定的影响,引入了周期通信序列,在每个采样时间内,只允许部分传感器和执行器利用网络,针对此特殊结构的双层分布式系统进行故障诊断;[3]通过基于图论的结构分析方法对故障的可检测性和可分离性条件进行了讨论.

本文针对双层分布式网络化控制系统,设计了

中心故障诊断单元.为了减少中心故障诊断单元与各子系统之间的网络负载,借鉴文献[4]的思想,采用基于包的传输机制,减少由于网络拥挤所造成的时延和丢包.同时,由于各子系统工作周期不同,本文将整个系统看作多速率采样系统来设计状态观测器,实现了中心故障诊断,并进行了仿真验证.

2 分布式网络化控制系统介绍

分布式网络化控制系统总体结构如图 1 所示(C 为控制器, S 为传感器, A 为执行器).各个子系统内部具有完整的系统组成,但由于可利用信息较少,只能实现局部且受限的系统性能.而中心单元则在综合考虑整体系统信息的基础上,实现对各子系统的监视和控制.关于分布式网络化控制系统的详细内容可参见文献[1].

收稿日期: 2007-03-24; 修回日期: 2007-07-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574055); 天津市重点攻关项目(06YFGZGX01700); 教育部博士点基金项目(20050056037); 天津市面上项目(08JCYBJC11900).

作者简介: 宗群(1961—),男,天津人,教授,博士生导师,从事网络化控制系统故障诊断及容错控制等研究; 刘文静(1980—),女,河北保定人,博士生,从事故障诊断的研究.

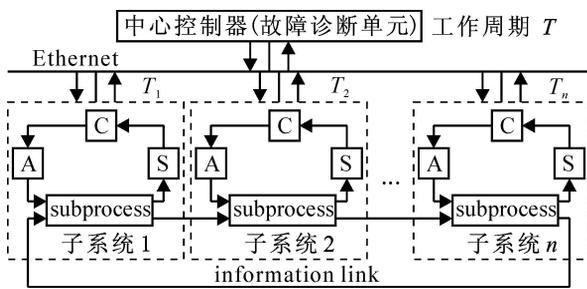


图 1 分布式网络化控制系统的总体结构

假设每个子系统的模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_{ii}x_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{ij}x_j(t) + B_iu_i(t) + E_id(t) + F_if(t), \\ y_i(t) &= C_ix_i(t) + D_iu_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 n 为子系统的个数. 则系统的整体模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t). \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} E_1 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix}, \\ F &= \begin{bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & B_n \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & C_n \end{bmatrix}, \\ D &= \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & D_n \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

3 分布式网络化控制系统优化设计与建模

由图 1 可知,在分布式网络化控制系统中,当各子系统传输的数据量增多,特别是当挂接于网络上的子系统增加时,势必造成网络拥塞,出现时延或丢包现象,这将在很大程度上影响故障诊断的性能.为了避免这种现象的发生,本文采用基于包的传输机制,在不减少故障诊断所需信息的前提下,减少网络中传输数据的次数.

由于各子系统工作周期不同以及每次传输的包大小不同,各子系统向中心故障诊断单元传输数据的速度也不尽相同.因此,可将分布式网络化控制系统看作多速率采样系统.但与其他文献中提到的多速率采样系统有所不同,如文献 [5,6] 针对输出多速率采样系统进行故障诊断.本文研究的多速率采样系统是广义输出多速率采样系统.为得到该系统的线性时不变模型,需采用提升 (lifting) 技术进

行处理^[7].

设每个子系统的工作周期为 h_i , 每 m_i 个工作周期的数据打成 1 个包进行传输,因此子系统的发送数据周期为 $T_i = h_i \times m_i$,则中心故障诊断单元的工作周期(暂且称之为系统工作周期) T 为 T_i 的最小公倍数.而在每个系统工作周期内,子系统 i 发送数据包个数为 $q_i = T/T_i$,设 T 为每个子系统工作周期 h_i 的最大公约数, $p = T/h_i$,根据此传输机制对分布式网络化控制系统模型进行离散化处理.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + Ff(k), \\ \underline{y}(k) &= Cx(k) + Du(k) + Ed(k) + Ff(k), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y'_i &= \begin{bmatrix} y_i(m_i h_i) \\ y_i(m_i h_i + h_i) \\ \vdots \\ y_i(m_i h_i + (m_i - 1)h_i) \end{bmatrix}, \\ u'_i &= \begin{bmatrix} u_i(m_i h_i) \\ u_i(m_i h_i + h_i) \\ \vdots \\ u_i(m_i h_i + (m_i - 1)h_i) \end{bmatrix}, \\ u &= \begin{bmatrix} u'_1(kT) \\ u'_1(kT + T_1) \\ \vdots \\ u'_1(kT + (q_1 - 1)T_1) \\ \vdots \\ u'_n(kT) \\ u'_n(kT + T_n) \\ \vdots \\ u'_n(kT + (q_n - 1)T_n) \end{bmatrix}, \\ y &= \begin{bmatrix} y'_1(kT) \\ y'_1(kT + T_1) \\ \vdots \\ y'_1(kT + (q_1 - 1)T_1) \\ \vdots \\ y'_n(kT) \\ y'_n(kT + T_n) \\ \vdots \\ y'_n(kT + (q_n - 1)T_n) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= e^{AT}, \\ B &= [e^{A(p-1)T} B \quad e^{A(p-2)T} B \quad \dots \quad B], \\ C &= [C \quad C * S \quad C * S^2 \quad \dots \quad C * S^{p-1}], \\ D &= C * B = [D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_p], \\ E &= C * E_d = [E_1 \quad E_2 \quad \dots \quad E_p], \\ F &= C * E_f = [F_1 \quad F_2 \quad \dots \quad F_p], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_f &= [e^{A(p-1)T} F \quad e^{A(p-2)T} F \quad \dots \quad F], \\
 E_d &= [e^{A(p-1)T} E \quad e^{A(p-2)T} E \quad \dots \quad E], \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ D_p & 0 & 0 & \dots & \\ D_{p-1} & D_p & \ddots & & \dots \\ \dots & \ddots & & \ddots & \\ D_2 & D_3 & \dots & D_p & 0 \end{bmatrix}, \\
 E_d &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ E_p & 0 & 0 & \dots & \\ E_{p-1} & E_p & \ddots & & \dots \\ \dots & \ddots & & \ddots & \\ E_2 & E_3 & \dots & E_p & 0 \end{bmatrix}, \\
 E_f &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ F_p & 0 & 0 & \dots & \\ F_{p-1} & F_p & \ddots & & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ F_2 & F_3 & \dots & F_p & 0 \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

其中 $S = e^{A \cdot T}$.

4 分布式网络化控制系统的故障诊断

根据分布式网络化控制系统离散模型(3),设计状态观测器和残差生成器:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(k+1) &= \Delta \hat{x}(k) + B u(k) + L(\underline{y}(k) - \hat{x}(k)), \\
 \hat{x}(k) &= \mathcal{L} \hat{x}(k) + D u(k), \\
 r(k) &= W(\underline{y}(k) - \hat{x}(k)). \tag{4}
 \end{aligned}$$

其中 $r(k)$ 为系统残差, L 为状态观测器增益, W 为加权矩阵.

根据式(3)和(4),可得出以下表达式:

$$\begin{aligned}
 r(z) &= W(G_{r,d}d(z) + G_{r,f}f(z)), \\
 G_{r,d} &= E_d + \mathcal{L}(zI - \Delta + LC)^{-1}(E_d - LE_d), \\
 G_{r,f} &= E_f + \mathcal{L}(zI - \Delta + LC)^{-1}(E_f - LE_f). \tag{5}
 \end{aligned}$$

为了保证故障诊断的鲁棒性和灵敏性, L 和 W 的值可通过求解以下的优化问题获得:

$$\min_{L, W} J = \min_{L, W} (W G_{r,d} / W G_{r,f}). \tag{6}$$

根据引理 1 可求解上式的优化问题.

引理 1 假定 $(\Delta, E_d, \mathcal{L}, E_d)$ 在单位圆上没有零点, 没有不可达空模式和不可观模式, 且 (\mathcal{L}, Δ) 可检测, 则式(6)的最优解为 $W = W_0 L = -L_0^T$, 其中 W_0 为列满秩矩阵 H 的左逆矩阵, 满足

$$H H^T = CXC + F_d F_d,$$

而 (X, L_0) 是下面 DTARS(Discrete-time Algebraic Riccati System) 的稳定解.

引理 1 的证明过程可参考文献[8]. 但是, 文献[8]并没有给出 DTARS 具体求解方法.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \Delta - X + E_d E_d & \Delta X C + E_d E_d \\ \mathcal{L} X \Delta + F_d E_d & CXC + F_d F_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ L_0 \end{bmatrix} = 0. \tag{7}$$

根据式(7)可得

$$\begin{aligned}
 \Delta X \Delta - X + E_d E_d (\Delta X C + E_d E_d) L_0 &= 0, \\
 \mathcal{L} X \Delta + F_d E_d + (CXC + F_d F_d) L_0 &= 0. \tag{8}
 \end{aligned}$$

对式(8)变形^[9],得

$$\begin{aligned}
 \Delta X \Delta - X - (\Delta X C + E_d E_d) (\mathcal{L} X C + \\ E_d E_d)^{-1} (\mathcal{L} X \Delta + F_d E_d) + E_d E_d &= 0. \tag{9}
 \end{aligned}$$

通过 Matlab 中的标准函数 dare 得到式(9)的解 X , 而 $L_0 = -(\mathcal{L} X C + E_d E_d)^{-1} (\mathcal{L} X \Delta + F_d E_d)$.

5 仿真实例

考虑如下的分布式网络化控制系统^[10]:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed + Ff,$$

$$y = Cx,$$

$$x =$$

$$[x_{11} \quad x_{12} \quad x_{13} \quad x_{14} \quad x_{15} \quad x_{21} \quad x_{22} \quad x_{23} \quad x_{24} \quad x_{25}],$$

$$B = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right],$$

$$u = [u_1 \quad u_2],$$

$$C =$$

$$\left[\begin{array}{cccc|cccc} 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{array} \right],$$

$$E = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right],$$

$$F = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

$$A = \left[\begin{array}{cccc|cccc} -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right].$$

仿真结构见如图 2. 网络化控制系统由 2 个子系统组成, 都采用 PID 控制. 图中 Node1 和 Node2 是 Truetime 工具, 主要实现数据的基于包传输. 设

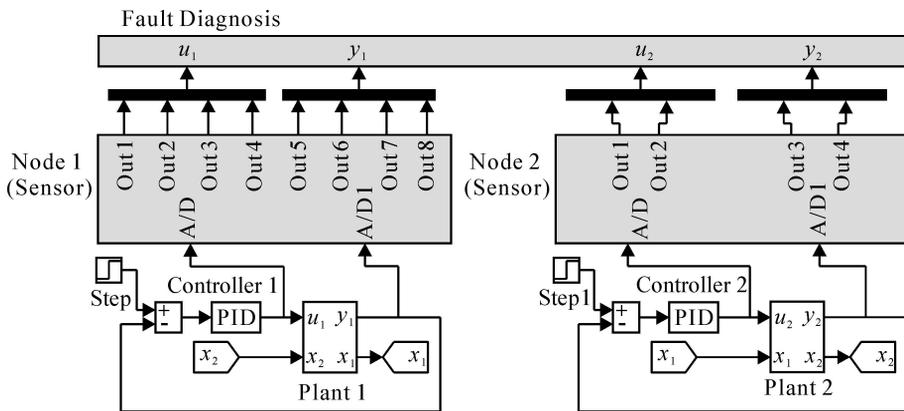


图 2 仿真结构图

第 1 个子系统的工作周期 $h_1 = 0.05$, 每 4 个工作周期的数据打成 1 个包, 第 2 个子系统的工作周期为 $h_2 = 1$, 每 2 个工作周期的数据打成 1 个包传输. 因此可得出以下参数: $T_1 = 0.2, T_2 = 0.2, T = 0.2, T = 0.05, m_1 = 4, m_2 = 2, q_1 = q_2 = 1, p = 4$.

根据式 (3) 可得分布式网络化控制系统的离散化模型如下:

$$x(k+1) = \underline{A}x(k) + \underline{B}u(k) + \underline{E}_d d(k) + \underline{E}_f f(k),$$

$$\underline{y}(k) = \underline{C}x(k) + \underline{D}u(k) + \underline{E}_d d(k) + \underline{E}_f f(k),$$

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} u_1(KT) \\ u_2(KT) \\ u_1(KT + 0.05) \\ u_1(KT + 0.1) \\ u_2(KT + 0.1) \\ u_1(KT + 0.15) \end{bmatrix}, \underline{y} = \begin{bmatrix} y_1(KT) \\ y_2(KT) \\ y_1(KT + 0.05) \\ y_1(KT + 0.1) \\ y_2(KT + 0.1) \\ y_1(KT + 0.15) \end{bmatrix},$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0.9048 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0002 & 0.9802 & 0 & -0.0002 & 0 \\ 0.0002 & 0 & 0.9958 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9802 & 0 \\ 0.0187 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0196 & 0 & 0 & 0 \\ 0.019 & 0 & -0.01999 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0002 & 0 & 0.0196 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0196 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0194 & 0.0002 & 0 & -0.0196 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0199 & 0 & 0 \\ 0.0194 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9608 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0002 & 0.9802 & 0 & 0.0002 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9958 & 0 & 0 \\ 0.0002 & -0.0196 & 0 & 0.9802 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9802 \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0.9277 & 0 & 0.9512 & 0.9753 & 0 & 1 \\ 0.985 & -0.0148 & 0.99 & 0.995 & -0.005 & 1 \\ 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0142 & 0 & 0.0097 & 0.0049 & 0 & 0 \\ -0.0148 & 0.0001 & -0.0099 & -0.005 & 0 & 0 \\ 0.0144 & 0 & 0.0097 & 0.0049 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0.9851 & 0 & 0 & 0.995 & 0 \\ 0 & 0.9851 & 0 & 0 & 0.995 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{E}_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0148 & 0 & 0 & -0.005 & 0 \\ 0.9969 & 0 & 0.998 & 0.999 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.015 & 0 & -0.01 & -0.005 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9851 & 0 & 0 & 0.995 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{E}_d = \begin{bmatrix} 0.9277 & 0 & 0.9512 & 0.9753 & 0 & 1 \\ -0.0001 & -0.0147 & 0 & 0 & -0.005 & 0 \\ 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9851 & 0 & 0.99 & 0.995 & 0 & 1 \\ 0.0142 & 0 & 0.0097 & 0.0049 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9852 & 0 & 0 & 0.995 & 0 \\ 0.0144 & 0 & 0.0097 & 0.0049 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9703 & 0 & 0 & 0.99 & 0 \\ 0.0148 & 0.9851 & 0.0099 & 0.005 & 0.995 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0975 & 0 & 0.1998 & 0.0995 & 0.0995 \\ 0.0951 & 0 & 0.1996 & 0.099 & 0.099 \\ 0.001 & -0.001 & 0 & 0.001 & 0.002 \\ 0.0928 & 0 & 0.1994 & 0.0985 & 0.0985 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0.2 \\ 0.0005 & 0 & 0.001 & 0 & 0 \\ 0.001 & 0 & 0.002 & 0 & 0 \\ 0.098 & 0.098 & 0 & 0.099 & 0.198 \\ 0 & 0 & 0.003 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.098 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.299 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.095 & 0 & 0.098 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1998 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0995 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1996 & 0 & 0.1998 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.197 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0015 & 0.3975 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1941 & 0 & 0.197 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

根据系统模型,设计状态观测器如式(4)所示.

$$W = \begin{bmatrix} 5 & 0 & -4.9259 \\ 0 & 2.5157 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.06 & 0 & 0.0591 \\ 0 & 0.1193 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} -0.0007 & -0.0186 & -0.0007 \\ 0 & -2.4845 & 0 \\ -4.9259 & -0.0187 & -0.0007 \\ 5 & 0 & -4.9259 \\ 0 & 2.5157 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 0.0582 & 0.0009 & 0.0574 \\ 0 & 0.1178 & 0 \\ 0.0591 & 0.0004 & 0.0582 \\ 0.06 & 0 & 0.0591 \\ 0 & 0.1193 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 \end{bmatrix}.$$

无故障时,中心故障诊断单元收到各子系统经过包传输后的输出数据如图3所示(为便于观察,将采样周期变为0.4s,且只显示5s的数据).

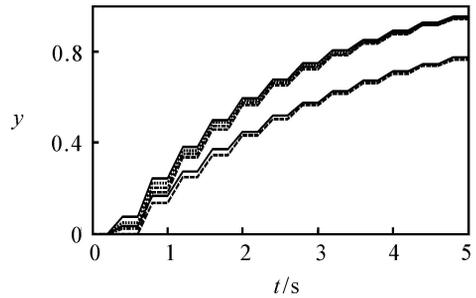


图3 在基于包传输机制下获得的输出数据

子系统1在10~15s之间发生 $f=3$ 的故障.图4和图5是根据子系统的输入和输出产生的残差信号.从基于包的传输机制可知,图4和图5中4条线都是子系统1的输出数据,只根据采样时间不同而得到,因而只分析其中的1条线即可.现以实线为例进行分析.根据图4,若将阈值设为0.55,对比图4和图5可知系统发生故障,实现了故障检测.因为子系统2产生的残差在故障前后没有发生明显变化,因此没有列出相关图.

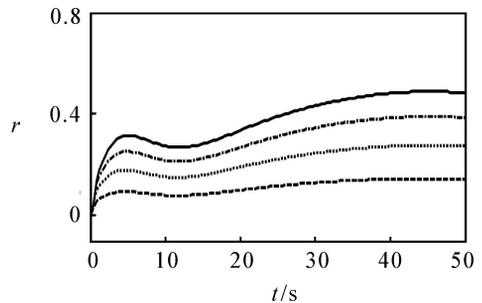


图4 无故障的情况下子系统1产生的残差

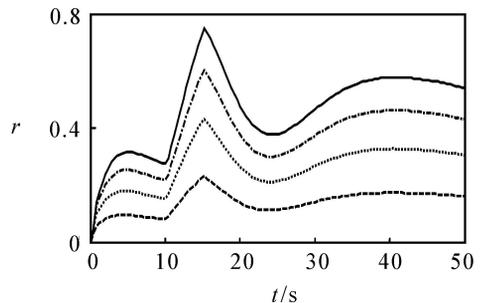


图5 有故障的情况下子系统1产生的残差

6 结 论

本文首先介绍了分布式网络化控制系统,并引入了包的传输机制;然后针对此特殊结构进行故障诊断方法的研究.从仿真结果可看出,本文提出的故障诊断方法对于基于包传输的分布式网络化控制系统是有效的.

(下转第680页)

则最优值是 $T_{\max} = 5$, 最优分批是 $B_{11} = \{J_{11}, J_{12}, J_{13}, J_{14}\}$, $B_{12} = \{J_{15}, J_{16}\}$, $B_{21} = \{J_{21}, J_{22}\}$, $B_{22} = \{J_{23}, J_{24}, J_{25}\}$, 加工过程如图 2 所示.

4 结 论

链式约束下连续型批调度问题的模型来源于钢铁工业加热炉对板坯的生产过程. 在实际生产中, 加热炉加热只是中间生产环节. 加工顺序被给定的情况在实际问题中普遍存在, 且工件带有的释放时间和工期同序的限制问题更为普遍. 本文讨论了极小化最大拖期问题, 对于这一模型的其他目标函数, 如极小化拖期工件数、拖期惩罚等问题的研究同样具有意义.

参考文献(References)

- [1] 赵玉芳, 唐立新. 极小化最大完工时间的单机连续型批调度问题[J]. 自动化学报, 2006, 32(5): 730-737.
(Zhao Y F, Tang L X. Scheduling a single continuous batch processing machine to minimize makespan [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(5): 730-737.)
- [2] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production [J]. European J of Operational Research, 2001, 133(1): 1-20.
- [3] Zhao Y F, Tang L X. Scheduling with agreeable processing times and due dates on a semi-continuous batch processing machine[C]. Proc of the 4th Int Conf on Impulsive and Hybrid Dynamical Systems. Nanning: Watam Press, 2007: 2406-2409.
- [4] Potts C N, Kovalyov M Y. Scheduling with batching [J]. European J of Operational Research, 2000, 120(2): 228-249.
- [5] Lee C Y, Uzsoy R, Martin-Vega L A. Efficient algorithms for scheduling semiconductor burn-in operations[J]. Operations Research, 1992, 40(4): 764-775.
- [6] Brucker P, Gladky A, Hoogeveen H, et al. Scheduling a batching machine[J]. J of Scheduling, 1998, 1(1): 31-54.
- [7] Ng C T, Cheng T C E, Yuan J J. A note on the single machine serial batching scheduling problem to minimize maximum lateness with precedence constraints [J]. Operations Research Letters, 2002, 30(1): 66-68.
- [8] 刘朝晖, 俞文熹. 链式先后关系下的单机分批排序问题[J]. 运筹学学报, 1999, 3(1): 65-68.
(Liu Z H, Yu W C. One-machine scheduling with batching under chain-like precedence constraints [J]. Operations Research Transactions, 1999, 3(1): 65-68.)
- [9] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-Completeness [M]. San Francisco: Freeman, 1979.

(上接第 676 页)

参考文献(References)

- [1] Ding S X, Zhang P. Observer-based monitoring of distributed networked control systems[C]. Proc of the IFAC Safeprocess Conf. Beijing, 2006: 337-342.
- [2] Ping Zhang, Steven X Ding. Fault detection of networked control systems with limited communication [C]. Proc of the IFAC Safeprocess Conf. Beijing, 2006: 1135-1140.
- [3] Dominique Sauter, Taha Boukhobza, Frédéric Hamelin. Decentralized and autonomous design for FDI/FTC of networked control systems [C]. Proc of the IFAC Safeprocess Conf. Beijing, 2006: 163-168.
- [4] Daniel Georgiev, Dawn M Tilbury. Packet-based control: The H_2 -optimal solution [J]. Automatica, 2006, 42(1): 137-144.
- [5] Weihua Li, Zhengang Han, Sirish L Shah. Subspace identification for FDI in systems with non-uniformly sampled multirate data[J]. Automatica, 2006, 42(4): 619-627.
- [6] Iman Izadi, Qing Zhao, Tongwen Chen. An H approach to fast rate fault detection for multirate sampled-data systems[J]. J of Process Control, 2006, 16(6): 651-658.
- [7] 肖建. 多采样率数字控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
(Xiao J. Multirate digital control systems[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [8] Zhang P, Ding S X, Wang G, et al. An H approach to fault detection for sampled-data systems [C]. Proc of American Control Conf. Anchorage, 2002: 2196-2201.
- [9] Cristian Oar, Vlad Ionescu. Singular riccati theory via extended symplectic pencils[C]. Proc of the 34th Conf on Decision & Control. New Orleans, 1995: 1881-1886.
- [10] Kambhampati C, Patton R J, Uppal F J. Reconfiguration in networked control systems: Fault tolerant control and plug-and-play [C]. Proc of the IFAC Safeprocess Conf. Beijing, 2006: 151-156.