

含大时滞和噪声的网络化控制系统的最优故障诊断

李娟^{1,2} 赵友刚³ 于洋¹ 张鹏¹ 高洪伟¹

摘要 研究含大测量时滞和噪声的网络控制系统 (Networked control systems, NCS) 的故障诊断问题, 提出一种新的基于无时滞转换方法的最优故障诊断器的设计方法. 该方法首先构造一个隐含故障状态的增广系统, 并利用无时滞转换方法将含有测量时滞的网络控制系统转换为无时滞系统. 然后给出了故障的可诊断性判据, 并利用对偶原理将最优故障诊断器的设计问题转换为状态反馈控制器设计问题. 最后, 通过构造一种满足二次型性能指标的最优故障诊断器, 实现了故障的实时诊断. 仿真示例验证了该方法的可行性和有效性.

关键词 故障诊断, 网络化控制系统, 时滞系统, 最优控制, 无时滞转换

引用格式 李娟, 赵友刚, 于洋, 张鹏, 高洪伟. 含大时滞和噪声的网络化控制系统的最优故障诊断. 自动化学报, 2012, 38(5): 858–864

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00858

Optimal Fault Diagnosis for Networked Control Systems with Large Time-delays and Noises

LI Juan^{1,2} ZHAO You-Gang³ YU Yang¹ ZHANG Peng¹ GAO Hong-Wei¹

Abstract The problem of fault diagnosis is investigated for networked control systems (NCS) with large measurement delays and noises. Based on the delay-free transformation approach, a novel design approach to optimal fault diagnoser is proposed. This scheme first establishes an augmented system with hidden fault states, and the networked control system with delays is transformed into a delay-free one by using the delay-free transformation approach. Then, a diagnosability criterion of faults is given. Furthermore, the design problem of the optimal fault diagnoser is transformed into the design problem of a state feedback controller by utilizing the duality principle. Finally, the real-time fault diagnosis is realized by constructing a novel optimal fault diagnoser which meets the quadratic performance index. The feasibility and validity of the proposed scheme are demonstrated by a simulation example.

Key words Fault diagnosis, networked control systems (NCS), time-delay systems, optimal control, delay-free transformation

Citation Li Juan, Zhao You-Gang, Yu Yang, Zhang Peng, Gao Hong-Wei. Optimal fault diagnosis for networked control systems with large time-delays and noises. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(5): 858–864

收稿日期 2011-05-31 录用日期 2011-12-01

Manuscript received May 31, 2011; accepted December 1, 2011
国家自然科学基金 (40776051), 山东省高等学校科技计划项目 (J09LG26), 青岛市公共领域科技支撑计划项目 (09-1-16-nsh), 重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室开放基金 (SLK2010B01), 青岛农业大学高层次人才启动基金项目 (630815) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (40776051), Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (J09LG26), Science and Technology Program of Qingdao (09-1-16-nsh), Open foundation from Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Waterborne Transportation Engineering (SLK2010B01), and the Starting Foundation of Qingdao Agricultural University for High-level Talents (630815)

本文责任编辑 钟麦英

Recommended by Associate Editor ZHONG Mai-Ying

1. 青岛农业大学机电工程学院 青岛 266109 2. 重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室 重庆 400074 3. 青岛农业大学理学与信息科学学院 青岛 266109

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Waterborne Transportation Engineering, Chongqing 400074 3. College of Science and Information, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109

随着科技的发展和进步, 动态系统的故障诊断技术得到学者们广泛的关注, 取得了长足的发展, 这方面的成果可见综述 [1] 及其中的文献. 另一方面, 随着网络技术的发展和网络的普及应用, 网络化控制系统 (Networked control systems, NCS) 作为一种特殊的动态系统, 其控制、故障诊断和预测等成为控制界的研究热点^[2-5]. 目前就 NCS 的故障诊断而言, 主要是基于系统解析模型的方法, 如基于观测器^[6]、基于滤波器^[7] 以及基于等价空间^[8] 等的故障诊断方法. 由于实际的 NCS 中存在信道带宽的限制、采样、延时、数据丢包、单包传输与多包传输等问题, 因而与传统的点到点连接的控制系统相比, 由网络连接带来的问题使得 NCS 的故障诊断被越来越多的学者所关注, 这方面的成果可见综述 [9-10] 及其中的文献. 由于网络诱导时延是实际网络控制系统中不可避免的问题, 因而含时延的 NCS 的故障诊断倍受学者的关注. 但就故障诊断领域所考虑的时滞类型而言, 目前国内外对时滞系统故障诊断的研究集中在含有状态时滞^[11-13]、控制时滞^[14-16] 以

及同时含这两种时滞^[16-17]的故障诊断. 对于测量时滞(输出时滞), 目前国内外绝大多数方法均为了处理方便而将网络引起的网络诱导时滞归于控制时滞^[18], 对体现在 NCS 输出端的含测量时滞的故障诊断的研究还很罕见^[19-22]. 文献 [19-21] 虽然研究了含测量时滞的 NCS 的故障诊断问题, 但没有考虑测量噪声以及故障诊断器的最优问题; 文献 [22] 虽然考虑了最优故障诊断问题, 但针对的是连续系统, 且没有考虑测量噪声. 我们目前尚未见到针对 NCS 同时考虑测量时滞和测量噪声并使故障诊断器满足二次型优化性能指标的 NCS 的故障诊断的研究成果报道. 为此, 本文通过 NCS 测量时滞的无时滞转换方法, 利用对偶原理将故障诊断问题转化为控制器设计问题的新思路, 研究含大时滞和噪声的 NCS 满足二次型性能指标的最优故障诊断问题, 给出了基于观测器的最优故障诊断器的设计方法.

1 系统描述

考虑如下的含有测量时滞和噪声的 NCS:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k) + D_1\mathbf{f}(k), \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \mathbf{y}(k) &= \begin{cases} 0, & k = 0, 1, 2, \dots, h-1 \\ C\mathbf{x}(k-h) + D_2\mathbf{f}(k-h) + E_1\mathbf{n}(k), & k = h, h+1, h+2, \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量, $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}^p$ 为控制输入向量, $\mathbf{y}(k) \in \mathbf{R}^q$ 为测量输出向量, $\mathbf{f}(k) \in \mathbf{R}^m$ 为不可直接测量的故障信号向量, $\mathbf{n}(k)$ 为测量噪声向量, 统计特性未知, 但其分量是范数有界的. A, B, C, D_1, D_2 和 E_1 是相应维数的实常数矩阵. $(\cdot)(k) = (\cdot)(kT)$, 其中 T 为系统的采样周期. h 是由传感器引起的测量时滞, 为已知的正整数.

注 1. 不同于已有的将网络诱导时滞归到控制时滞进行研究的做法, 本文的测量时滞可以视为把网络诱导时滞归到输出测量时滞中的结果. 从系统的输出来看, 无论是控制器-执行器还是传感器-控制器的网络诱导时延都体现在输出测量中. 从这一角度而言, 把网络诱导时滞归到输出测量时滞中更符合实际情况.

故障 $f(k)$ 的动态特性由以下外系统描述:

$$\begin{aligned} \varphi(k+1) &= G\varphi(k), \quad k = k_0, k_0+1, k_0+2, \dots \\ \varphi(k_0) &= \varphi_{k_0} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \varphi_a^T(\alpha) & \mathbf{0} \end{bmatrix}^T, & k_0 = \alpha < \beta \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \varphi_s^T(\beta) \end{bmatrix}^T, & k_0 = \beta < \alpha \end{cases} \\ \varphi(k) &= \mathbf{0}, \quad k = 0, 1, \dots, k_0-1 \\ \mathbf{f}(k) &= F\varphi(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi(k) &= \begin{bmatrix} \varphi_a(k) \\ \varphi_s(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_a(k) \\ \mathbf{f}_s(k) \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} G_a & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & G_s \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_a & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & F_s \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$\varphi_a(k) \in \mathbf{R}^{r_1}$ 和 $\mathbf{f}_a(k) \in \mathbf{R}^{m_1}$ 分别代表执行器故障状态向量和执行器故障向量, 执行器故障发生的初始时刻为 αT , 初始状态为 $\varphi_a(\alpha)$; $\varphi_s(k) \in \mathbf{R}^{r_2}$ 和 $\mathbf{f}_s(k) \in \mathbf{R}^{m_2}$ 分别代表传感器故障状态向量和传感器故障向量, 传感器故障发生的初始时刻为 βT , 初始状态为 $\varphi_s(\beta)$. $\varphi(k) \in \mathbf{R}^r$ 为外系统 (2) 的状态向量, $G \in \mathbf{R}^{r \times r}$ 和 $F \in \mathbf{R}^{m \times r}$ 为常量矩阵. $r = r_1 + r_2, m = m_1 + m_2, m_i \leq r_i (i = 1, 2)$. $\alpha, \varphi_a(\alpha), \beta$ 和 $\varphi_s(\beta)$ 未知. G_a, F_a, G_s 和 F_s 是适当维数的常量矩阵.

注 2. 外系统 (2) 是周期故障、阶跃故障、发散故障、衰减故障等常见的动态特性已知、发生的初始时刻和初始状态未知的 NCS 故障的一般表达式.

记 $\lambda_i(\cdot)$ 为 \cdot 的第 i 个特征值, 做如下的假设:

假设 1. 矩阵 A, G_a 和 G_s 没有相等的特征值, 即

$$\begin{aligned} \lambda_i(A) &\neq \lambda_j(G_a) \neq \lambda_k(G_s), \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ j &= 1, 2, \dots, r_1; \quad k = 1, 2, \dots, r_2 \end{aligned}$$

假设 2. $(C, A), (F_a, G_a)$ 和 (F_s, G_s) 完全可观测.

假设 3. $q \geq m_1$.

假设 4. 矩阵 G 的所有特征值 $\lambda_i(G) (i = 1, 2, \dots, r)$ 的幅值均等于或小于 1, 且幅值等于 1 的特征值只能为矩阵 G 的最小多项式的单根.

注 3. 假设 4 表明, 外系统 (2) 是稳定的, 但不一定是渐近稳定的. 假设 4 是必要的, 否则故障分量中将至少有一个趋向于无穷大, 其无限时域二次型性能指标将趋向于无穷大.

2 模型的无时滞转换

令 $\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k)^T & \varphi(k)^T \end{bmatrix}^T$. 结合式 (1) 和式 (2), 有如下增广形式的状态空间表达式:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(k+1) &= A_1\mathbf{z}(k) + B_1\mathbf{u}(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \mathbf{z}(0) &= [\mathbf{x}_0^T, \varphi^T(0)]^T \\ \mathbf{y}(k) &= \begin{cases} 0, & k = 0, 1, 2, \dots, h-1 \\ C_1\mathbf{z}(k-h) + E_1\mathbf{n}(k), & k = h, h+1, h+2, \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & [D_1 & 0]F \\ 0 & G \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} C & [0 & D_2]F \end{bmatrix}$$

对系统 (3), 有:

$$\mathbf{z}(k) = A_1^k \mathbf{z}(0) + \sum_{i=0}^{k-1} A_1^{k-i-1} B_1 \mathbf{u}(i)$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{cases} 0, & k = 0, 1, 2, \dots, h-1 \\ C_2 [A_1^k \mathbf{z}(0) + \sum_{i=0}^{k-h-1} A_1^{k-i-1} B_1 \mathbf{u}(i)] + \\ E_1 \mathbf{n}(k), & k = h, h+1, h+2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

其中, $C_2 = C_1 A_1^{-h}$.

为了对系统进行无时滞转换, 我们采用如下基于泛函的输出变换:

$$\mathbf{y}_1(k) = \mathbf{y}(k) + C_2 \sum_{i=k-h}^{k-1} A_1^{k-i-1} B_1 \mathbf{u}(i), \quad (5)$$

$$k = h, h+1, h+2, \dots$$

把式 (4) 和式 (5) 代入式 (3), 则系统 (3) 可以转换为以下形式的无时滞系统:

$$\mathbf{z}(k+1) = A_1 \mathbf{z}(k) + B_1 \mathbf{u}(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\mathbf{z}(0) = [\mathbf{x}_0^T, \boldsymbol{\varphi}^T(0)]^T$$

$$\mathbf{y}_1(k) = C_2 \mathbf{z}(k) + E_1 \mathbf{n}(k),$$

$$k = h, h+1, h+2, \dots$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{cases} 0, & k = 0, 1, 2, \dots, h-1 \\ \mathbf{y}_1(k) - C_2 \sum_{i=k-h}^{k-1} A_1^{k-i-1} B_1 \mathbf{u}(i), \\ & k = h, h+1, h+2, \dots \end{cases} \quad (6)$$

至此, 时滞系统的故障诊断问题转化为隐含时滞的系统的故障诊断问题. 本文的目的是设计一个最优的故障诊断器, 使在含有测量时滞和测量噪声的情况下诊断出系统的故障, 并使故障诊断器满足二次型性能指标最优. 从系统 (6) 可看出, 只要能观测出系统 (6) 的状态, 即可诊断出系统 (1) 的故障.

关于系统 (6) 的故障可诊断性, 给出如下引理.

引理 1. 如果假设 1~3 均成立, 则 (C_2, A_1) 完全可观测, 故障可诊断.

注 4. 该引理可通过将 A_1 的特征值 λ 分为 $\lambda = \lambda_i(A)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $\lambda = \lambda_j(G_a)$, $j = 1, 2, \dots, r_1$; $\lambda = \lambda_k(G_s)$, $k = 1, 2, \dots, r_2$ 三种情况, 并利用 PBH 特征向量可观性判据证明. 在此证明中需要 D_2 是行满秩的. 由于在实际工程中, 输出的个数与测量传感器个数相等, 因此传感器数 m_2

和系统输出个数 q 是一致的, 必有 $q = m_2$, 即 D_2 一定是行满秩的.

3 最优故障诊断器的设计

构造一个非奇异矩阵 $M = \begin{bmatrix} C_{2\perp} & C_2^T \end{bmatrix}^T \in \mathbf{R}^{(n+r) \times (n+r)}$, 其中, $C_{2\perp} \in \mathbf{R}^{(n+r) \times (n+r-q)}$ 为 C_2 的正交补, $C_2 C_{2\perp} = 0$. 令

$$H = M^{-1} = [H_1 \quad H_2]$$

$$\bar{\mathbf{z}}(k) = M \mathbf{z}(k) := \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{z}}_1(k) \\ \bar{\mathbf{z}}_2(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 矩阵 $H_1 \in \mathbf{R}^{(n+r) \times (n+r-q)}$, $H_2 \in \mathbf{R}^{(n+r) \times q}$, $\bar{\mathbf{z}}_1(k) \in \mathbf{R}^{(n+r-q) \times 1}$, $\bar{\mathbf{z}}_2(k) \in \mathbf{R}^{q \times 1}$.

则系统 (6) 可重写为

$$\bar{\mathbf{z}}_1(k+1) = C_{2\perp}^T A_1 H_1 \bar{\mathbf{z}}_1(k) + C_{2\perp}^T B_1 \mathbf{u}(k) +$$

$$C_{2\perp}^T A_1 H_2 \bar{\mathbf{z}}_2(k)$$

$$\bar{\mathbf{z}}_2(k+1) = C_2 A_1 H_1 \bar{\mathbf{z}}_1(k) + C_2 B_1 \mathbf{u}(k) +$$

$$C_2 A_1 H_2 \bar{\mathbf{z}}_2(k)$$

$$\mathbf{y}_1(k) = \bar{\mathbf{z}}_2(k) + E_1 \mathbf{n}(k), \quad k = h, h+1, h+2, \dots$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{cases} 0, & k = 0, 1, 2, \dots, h-1 \\ \mathbf{y}_1(k) - C_2 \sum_{i=k-h}^{k-1} A_1^{k-i-1} B_1 \mathbf{u}(i), \\ & k = h, h+1, h+2, \dots \end{cases} \quad (8)$$

由于 (C_2, A_1) 是完全可观测的, 从而有 $(C_2 A_1 H_1, C_{2\perp}^T A_1 H_1)$ 是完全可观测的. 引入变量代换如下:

$$\mathbf{x}_c(k) = \bar{\mathbf{z}}_1(k) - L \bar{\mathbf{z}}_2(k)$$

其中, L 是待求的增益矩阵. 则式 (8) 中的前两式变换为

$$\mathbf{x}_c(k+1) = (C_{2\perp}^T - L C_2) [A_1 H_1 \mathbf{x}_c(k) + B_1 \mathbf{u}(k) +$$

$$A_1 (H_1 L + H_2) \bar{\mathbf{z}}_2(k)]$$

$$\bar{\mathbf{z}}_1(k) = \mathbf{x}_c(k) + L \bar{\mathbf{z}}_2(k) \quad (9)$$

由式 (7) 得:

$$\mathbf{z}(k) = H_1 \bar{\mathbf{z}}_1(k) + H_2 \bar{\mathbf{z}}_2(k) \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (10), 则有:

$$\mathbf{x}_c(k+1) = (C_{2\perp}^T - L C_2) [A_1 H_1 \mathbf{x}_c(k) + B_1 \mathbf{u}(k) +$$

$$A_1 (H_1 L + H_2) \bar{\mathbf{z}}_2(k)]$$

$$\mathbf{z}(k) = H_1 \mathbf{x}_c(k) + (H_1 L + H_2) \bar{\mathbf{z}}_2(k) \quad (11)$$

至此, 可构造降维观测器如下:

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}_c(k+1) &= (C_{2\perp}^T - LC_2)[A_1H_1\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + B_1\boldsymbol{u}(k) + \\ &\quad A_1(H_1L + H_2)\bar{\boldsymbol{z}}_2(k)] \\ \hat{\boldsymbol{z}}(k) &= H_1\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + (H_1L + H_2)\bar{\boldsymbol{z}}_2(k)\end{aligned}\quad (12)$$

其中, $\hat{\boldsymbol{x}}_c(k)$ 为状态观测器的状态向量, $\hat{\boldsymbol{z}}(k)$ 为 $\boldsymbol{z}(k)$ 的估计值.

令 $H_1 = \begin{bmatrix} H_{11}^T & H_{21}^T \end{bmatrix}^T$, $H_2 = \begin{bmatrix} H_{12}^T & H_{22}^T \end{bmatrix}^T$, 其中, $H_{11} \in \mathbf{R}^{n \times (n+r-q)}$, $H_{12} \in \mathbf{R}^{n \times q}$, $H_{21} \in \mathbf{R}^{r \times (n+r-q)}$, $H_{22} \in \mathbf{R}^{r \times q}$, 则式 (12) 可重写为

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}_c(k+1) &= (C_{2\perp}^T - LC_2)[A_1H_1\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + B_1\boldsymbol{u}(k) + \\ &\quad A_1(H_1L + H_2)\bar{\boldsymbol{z}}_2(k)] \\ \hat{\boldsymbol{x}}(k) &= H_{11}\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + (H_{11}L + H_{12})\bar{\boldsymbol{z}}_2(k) \\ \hat{\boldsymbol{\varphi}}(k) &= H_{21}\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + (H_{21}L + H_{22})\bar{\boldsymbol{z}}_2(k)\end{aligned}\quad (13)$$

将式 (8) 中的第 3 个和第 4 个等式代入式 (13), 并将传感器故障和执行器故障分离, 则得如下的故障诊断器:

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}_c(k+1) &= (C_{2\perp}^T - LC_2)[A_1H_1\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + \\ &\quad B_1\boldsymbol{u}(k) + A_1(H_1L + H_2)(\boldsymbol{y}(k) + \\ &\quad C_2 \sum_{i=k-h}^{k-1} A_1^{k-i-1} B_1\boldsymbol{u}(i) - E_1\boldsymbol{n}(k))] \\ \hat{\boldsymbol{\varphi}}(k) &= H_{21}\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) + (H_{21}L + H_{22})(\boldsymbol{y}(k) + \\ &\quad C_2 \sum_{i=k-h}^{k-1} A_1^{k-i-1} B_1\boldsymbol{u}(i) - E_1\boldsymbol{n}(k)) \\ \hat{\boldsymbol{f}}(k) &= F\hat{\boldsymbol{\varphi}}(k) \\ \hat{\boldsymbol{f}}_a(k) &= [I \quad 0] \hat{\boldsymbol{f}}(k) \\ \hat{\boldsymbol{f}}_s(k) &= [0 \quad I] \hat{\boldsymbol{f}}(k)\end{aligned}\quad (14)$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\varphi}}(k)$ 为诊断出的故障状态向量, $\hat{\boldsymbol{f}}_a(k)$ 为诊断出的执行器故障向量, $\hat{\boldsymbol{f}}_s(k)$ 为诊断出的传感器故障向量, I 和 0 分别为适当维数的单位矩阵和零矩阵.

为了使故障诊断器实现最优, 问题转换为寻找故障诊断器 (14) 的反馈增益矩阵 L , 使故障诊断器 (14) 满足二次型最优性能指标, 即寻找 L 使观测器 (12) 满足二次型最优性能指标.

令观测误差为 $\tilde{\boldsymbol{x}}_c(k) = \boldsymbol{x}_c(k) - \hat{\boldsymbol{x}}_c(k)$. 由式 (11) 和式 (12), 得:

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_c(k+1) = C_{2\perp}^T A_1 H_1 \tilde{\boldsymbol{x}}_c(k) - LC_2 A_1 H_1 \tilde{\boldsymbol{x}}_c(k) \quad (15)$$

定义误差方程 (15) 的对偶系统为

$$\boldsymbol{\psi}(k+1) = (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k) - (C_2 A_1 H_1)^T L^T \boldsymbol{\psi}(k) \quad (16)$$

其中, $\boldsymbol{\psi} \in \mathbf{R}^{n+r-q}$ 为对偶系统 (16) 的状态向量.

可证明观测器 (12) 和观测误差方程的对偶系统 (16) 有相同的极点. 因此可以通过 L 的设计使观测误差方程的对偶系统 (16) 最优, 从而使观测器 (12) 最优.

令

$$\bar{\boldsymbol{u}}(k) = -L^T \boldsymbol{\psi}(k) \quad (17)$$

其中, L^T 是误差对偶系统 (16) 的等效的状态反馈增益矩阵. 则式 (16) 等价于以下开环系统:

$$\boldsymbol{\psi}(k+1) = (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k) + (C_2 A_1 H_1)^T \bar{\boldsymbol{u}}(k) \quad (18)$$

其中, $\bar{\boldsymbol{u}} \in \mathbf{R}^{q \times 1}$ 为误差对偶系统 (16) 的等效控制输入向量.

对于式 (18), 设计最优控制律 $\bar{\boldsymbol{u}}^*$. 假设外系统 (2) 是渐近稳定的, 选择以下无限时域的二次型性能指标:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\boldsymbol{\psi}^T(k) Q \boldsymbol{\psi}(k) + \bar{\boldsymbol{u}}^T(k) R \bar{\boldsymbol{u}}(k)] \quad (19)$$

其中, $Q \in \mathbf{R}^{(n+r-q) \times (n+r-q)}$ 和 $R \in \mathbf{R}^{q \times q}$ 分别为半正定和正定对称矩阵, 且满足通常的最优调节器条件.

注 5. 若外系统 (2) 不是渐近稳定的, 选择以下无限时域的二次型平均性能指标:

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N [\boldsymbol{\psi}^T(k) Q \boldsymbol{\psi}(k) + \bar{\boldsymbol{u}}^T(k) R \bar{\boldsymbol{u}}(k)] \quad (20)$$

对于式 (19) 或式 (20) 描述的性能指标, 推导过程是相同的. 考虑开环系统 (18), 选择二次型性能指标 (19). 设系统 (18) 关于二次型性能指标 (19) 的 Hamilton 函数为

$$\begin{aligned}H_k &= \frac{1}{2} [\boldsymbol{\psi}^T(k) Q \boldsymbol{\psi}(k) + \bar{\boldsymbol{u}}^T(k) R \bar{\boldsymbol{u}}(k)] + \\ &\quad \boldsymbol{\lambda}^T(k+1) [(C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k) + \\ &\quad (C_2 A_1 H_1)^T \bar{\boldsymbol{u}}(k)]\end{aligned}$$

其中, $\boldsymbol{\lambda}(k+1)$ 为引入的 Lagrange 乘子向量函数.

利用变分法和取极小值的必要条件, 可知使性能指标泛函取极值的控制和轨线必须满足:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_k}{\partial \boldsymbol{\psi}(k)} &= \boldsymbol{\lambda}(k), \quad \frac{\partial H_k}{\partial \bar{\boldsymbol{u}}(k)} = 0 \\ \frac{\partial H_k}{\partial \boldsymbol{\lambda}(k+1)} &= \boldsymbol{\psi}(k+1)\end{aligned}$$

令 $S = (C_2 A_1 H_1)^T R^{-1} (C_2 A_1 H_1)$, 则需求解如

下离散两点边值问题:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\psi}(k+1) &= (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k) - S \boldsymbol{\lambda}(k+1) \\ \boldsymbol{\lambda}(k) &= Q \boldsymbol{\psi}(k) + (C_{2\perp}^T A_1 H_1) \boldsymbol{\lambda}(k+1) \\ \boldsymbol{\lambda}(\infty) &= 0\end{aligned}\quad (21)$$

且最优控制律为

$$\bar{\boldsymbol{u}}^*(k) = -R^{-1}(C_2 A_1 H_1) \boldsymbol{\lambda}(k+1) \quad (22)$$

由分析可令

$$\boldsymbol{\lambda}(k+1) = P \boldsymbol{\psi}(k+1) \quad (23)$$

则

$$\boldsymbol{\lambda}(k) = P \boldsymbol{\psi}(k) \quad (24)$$

将式 (23) 和式 (24) 代入式 (21), 得:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\psi}(k+1) &= (I + SP)^{-1}(C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k) \\ (P - Q) \boldsymbol{\psi}(k) &= \\ &= (C_{2\perp}^T A_1 H_1) P (I + SP)^{-1} (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k)\end{aligned}\quad (25)$$

考虑上式对任意 $\boldsymbol{\psi}(k)$ 均成立, 则有:

$$(C_{2\perp}^T A_1 H_1) P (I + SP)^{-1} (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T = P - Q$$

可导出 P 满足下列离散的代数 Riccati 方程:

$$\begin{aligned}P &= (C_{2\perp}^T A_1 H_1) P (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T + Q - \\ &= (C_{2\perp}^T A_1 H_1) P (C_2 A_1 H_1)^T \times \\ &= [(C_2 A_1 H_1) P (C_2 A_1 H_1)^T + R]^{-1} \times \\ &= (C_2 A_1 H_1) P (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T\end{aligned}\quad (26)$$

将式 (25) 中的第一个等式和式 (23) 代入式 (22), 可得最优控制律为

$$\begin{aligned}\bar{\boldsymbol{u}}^*(k) &= -[(C_2 A_1 H_1) P (C_2 A_1 H_1)^T + R]^{-1} \times \\ &= (C_2 A_1 H_1) P (C_{2\perp}^T A_1 H_1)^T \boldsymbol{\psi}(k)\end{aligned}\quad (27)$$

比较式 (17) 和式 (27), 可得最优故障诊断器 (14) 的状态反馈增益矩阵 L 为

$$L = (C_{2\perp}^T A_1 H_1) P (C_2 A_1 H_1)^T \times [(C_2 A_1 H_1) P (C_2 A_1 H_1)^T + R]^{-1} \quad (28)$$

至此, 我们给出如下结论:

定理 1. 如果假设 1 ~ 3 成立, 当且仅当 P 满足式 (26) 且 L 取式 (28) 时, 对于二次型性能指标 (19) 或 (20), 故障诊断器 (14) 是最优的, 且满足

$$\begin{aligned}\lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{\boldsymbol{f}}_a(k) - \boldsymbol{f}_a(k)) &= 0 \\ \lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{\boldsymbol{f}}_s(k) - \boldsymbol{f}_s(k)) &= 0\end{aligned}\quad (29)$$

证明. 由于当系统 (18) 中 L 取式 (28) 形式时, 二次型性能指标 (19) 或 (20) 是最优的, 故式 (16) 是渐近稳定的. 由此显然可得式 (15) 是渐近稳定的, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{\boldsymbol{x}}_c(k) - \boldsymbol{x}_c(k)) = 0 \quad (30)$$

由式 (11) 和式 (12) 得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{\boldsymbol{z}}(k) - \boldsymbol{z}(k)) = 0$$

即

$$\begin{aligned}\lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{\boldsymbol{x}}(k) - \boldsymbol{x}(k)) &= 0 \\ \lim_{k \rightarrow \infty} (\hat{\boldsymbol{\varphi}}(k) - \boldsymbol{\varphi}(k)) &= 0\end{aligned}\quad (31)$$

由式 (31) 的第二个等式, 并分离传感器故障状态向量和执行器故障状态向量, 可得式 (29). \square

4 仿真实例

考虑如下由式 (1) 描述的含有故障的 NCS, 其中

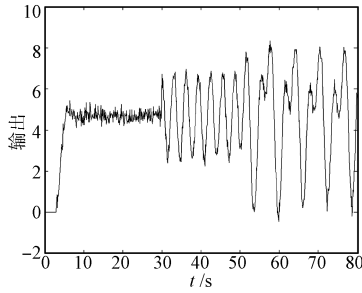
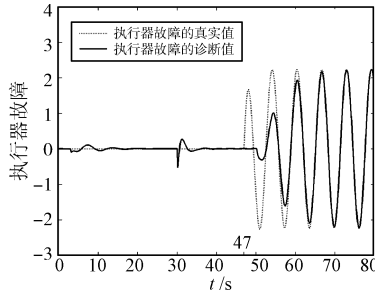
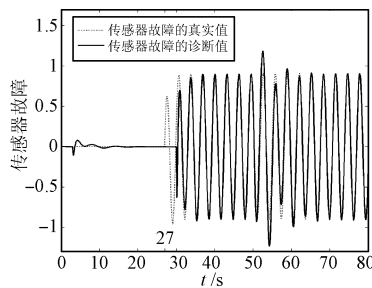
$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0.9951 & 0.0974 \\ -0.0974 & 0.9464 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} \\ C &= [1 \ 0], D_1 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0 \end{bmatrix}, E_1 = 1 \\ \boldsymbol{x}(0) &= \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.2 \end{bmatrix}, D_2 = 2, h = 30\end{aligned}\quad (32)$$

考虑由式 (2) 描述的故障, 其中

$$\begin{aligned}G &= \begin{bmatrix} 0.9950 & 0.0998 & 0 & 0 \\ -0.0998 & 0.9950 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9801 & 0.0993 \\ 0 & 0 & -0.3973 & 0.9801 \end{bmatrix} \\ F &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varphi}_a(\alpha) = [1 \ 0]^T \\ \boldsymbol{\varphi}_s(\beta) &= [0 \ 1]^T\end{aligned}\quad (33)$$

用 Matlab 进行仿真, 仿真过程中传感器故障发生在 $t = 27$ s, 执行器故障发生在 $t = 47$ s, 取采样周期 $T = 0.1$ s, 则有 $\beta = 270$, $\alpha = 470$.

在仿真中, 系统的参考输入为 $u(k) = 1$, 系统的测量输出中含有白噪声. 当系统 (32) 发生由式 (33) 描述的故障时, 系统的测量输出如图 1 所示. 为观察直观清晰, 滤波后的故障诊断器诊断出的执行器故障和传感器故障分别如图 2 和图 3 所示.

图 1 系统的测量输出 y Fig. 1 Measurement output y of the system图 2 执行器故障诊断值 \hat{f}_a Fig. 2 Diagnosed actuator fault \hat{f}_a 图 3 传感器故障诊断值 \hat{f}_s Fig. 3 Diagnosed sensor fault \hat{f}_s

由图 1 可看出, 系统的输出存在一个 3s 的测量时滞并含有测量噪声, 且在 $t = 30$ s 时有正弦型故障发生, 在 $t = 50$ s 时有一个周期型故障发生. 考虑到 3s 的测量时滞的存在, 则可推断出实际的故障应该分别发生在 $t = 27$ s 和 $t = 47$ s. 由图 2 和图 3 可看出, 在存在测量时滞和测量噪声的情况下, 故障诊断器诊断出的执行器故障和传感器故障仍能渐近趋近于实际发生的故障, 说明本文的无时滞转换方法和故障诊断方法是有效可靠的.

注 6. 注意到在图 2 和图 3 中, 系统的非故障状态下的暂态响应能影响执行器故障诊断器 $\hat{f}_a(k)$ 的暂态响应和传感器故障诊断器 $\hat{f}_s(k)$ 的暂态响应, 但由于故障的动态特性已知, 故不会将系统的暂态响应视为故障. 同样, 图 2 中执行器故障诊断器 $\hat{f}_a(k)$ 的暂态响应和图 3 中传感器故障诊断器 $\hat{f}_s(k)$ 的暂态响应相互影响, 但由于故障的动态特性已知,

不会将暂态响应的相互影响视为系统中的故障.

5 结论

本文研究了含有测量时滞以及测量噪声的 NCS 基于观测器的最优故障诊断方法, 利用无时滞转换、对偶原理和最优控制理论设计了可实时诊断故障的 NCS 的最优故障诊断器.

本文所采用的无时滞转换方法和最优故障诊断器的设计思想可推广应用于时变时滞的情况. 另外, 将故障诊断问题通过对偶原理转化为状态反馈控制器设计问题, 从而利用状态反馈理论解决故障诊断问题的思路也可推广应用于其他相关问题的解决.

References

- Zhou Dong-Hua, Hu Yan-Yan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 748–758
(周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 748–758)
- He X, Wang Z D, Ji Y D, Zhou D H. Network-based fault detection for discrete-time state-delay systems: a new measurement model. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2008, **22**(5): 510–528
- Huo Zhi-Hong, Fang Hua-Jing. Fault-tolerant control research for networked control system under communication constraints. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(5): 659–666
- Wan X B, Fang H J, Fu S. Fault detection for networked systems subject to access constraints and packet dropouts. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, **22**(1): 127–134
- Ma L F, Wang Z D, Chen X M, Guo Z. Robust control for a class of nonlinear networked systems with stochastic communication delays via sliding mode conception. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, **8**(1): 34–39
- Li X, Wu X B, Xu Z L, Huang C. Fault detection observer design for networked control system with long time-delays and packet dropout. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, **21**(5): 877–882
- Wei T, Huang Y F, Chen C L. Adaptive sensor fault detection and identification using particle filter algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C—Applications and Reviews*, 2009, **39**(2): 201–213
- Wang Y Q, Ye H, Ding S X, Cheng Y, Zhang P, Wang G Z. Fault detection of networked control systems with limited communication. *International Journal of Control*, 2009, **82**(7): 1344–1356
- Wang Yong-Qiang, Ye Hao, Wang Gui-Zeng. Recent development of fault detection techniques for networked control systems. *Control Theory & Applications*, 2009, **26**(4): 400–409
(王永强, 叶昊, 王桂增. 网络化控制系统故障检测技术的最新进展. *控制理论与应用*, 2009, **26**(4): 400–409)
- Jiang Bin, Mao Ze-Hui. Fault diagnosis for networked control systems. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, **41**(2): 145–149

(姜斌, 冒泽慧. 网络控制系统的故障诊断. 南京航空航天大学学报, 2009, **41**(2): 145–149)

- 11 Bai L S, Tian Z H, Shi S J. Robust fault detection for a class of nonlinear time-delay systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2007, **344**(6): 873–888
- 12 He Xiao, Wang Zi-Dong, Ji Yin-Dong, Zhou Dong-Hua. Robust fault detection for a class of nonlinear networked systems. *Aerospace Control and Application*, 2010, **36**(5): 7–12, 49
(何潇, 王子栋, 吉吟东, 周东华. 一类非线性网络化系统的鲁棒故障检测. 空间控制技术与应用, 2010, **36**(5): 7–12, 49)
- 13 Zhang Y M, Guo L, Wang H. Filter-based fault detection and diagnosis using output PDFs for stochastic systems with time delays. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2006, **20**(4): 175–194
- 14 Mao Z H, Jiang B. Fault estimation and accommodation for networked control systems with transfer delay. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(7): 738–743
- 15 Li Juan, Ye Ruo-Hong, Tang Gong-You. Real-time fault diagnosis and optimal fault-tolerant control for systems with control time-delay. *Control and Decision*, 2008, **23**(4): 439–444
(李娟, 叶若红, 唐功友. 含控制时滞系统的实时故障诊断和最优容错控制. 控制与决策, 2008, **23**(4): 439–444)
- 16 Mao Z H, Jiang B, Shi P. Fault detection for a class of nonlinear networked control systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2010, **24**(7): 610–622
- 17 Gao Z W, Breikin T, Wang H. Reliable observer-based control against sensor failures for systems with time delays in both state and input. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A – Systems and Humans*, 2008, **38**(5): 1018–1029
- 18 Liu Yun-Xia, Zhong Mai-Ying. Parity space-based fault detection for networked control systems. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, **28**(10): 1553–1555, 1605
(刘云霞, 钟麦英. 基于等价空间的网络控制系统故障检测问题研究. 系统工程与电子技术, 2006, **28**(10): 1553–1555, 1605)
- 19 Li J, Tang G Y. Fault diagnosis for networked control systems with delayed measurements and inputs. *IET Control Theory and Applications*, 2010, **4**(6): 1047–1054
- 20 He X, Wang Z D, Ji Y D, Zhao D. Fault detection for discrete-time systems in a networked environment. *International Journal of Systems Science*, 2010, **41**(8): 937–945
- 21 Zhang Jie, Bo Yu-Ming, Hu Wei-Li. Fault detection of networked control systems with output delays. *Control Engineering of China*, 2009, **16**(3): 254–256
(张捷, 薄煜明, 胡维礼. 具有输出时延的网络控制系统故障检测. 控制工程, 2009, **16**(3): 254–256)
- 22 Tang G Y, Li J. Optimal fault diagnosis for systems with delayed measurements. *IET Control Theory and Applications*, 2008, **2**(11): 990–998



李娟 青岛农业大学教授. 2008 年获中国海洋大学博士学位. 主要研究方向为动态系统的故障诊断和容错控制, 复杂系统的分析与设计. 本文通信作者.

E-mail: lijuan291@sina.com

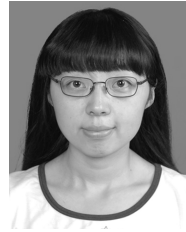
(**LI Juan** Professor at Qingdao Agricultural University. She received her Ph.D. degree from Ocean University of China in 2008. Her research interest covers fault diagnosis and fault-tolerant control of dynamic systems, and analysis and design of complex systems. Corresponding author of this paper.)



赵友刚 青岛农业大学副教授. 2008 年获中国海洋大学博士学位. 主要研究方向为自动控制技术和软件工程.

E-mail: yougangzhao@163.com

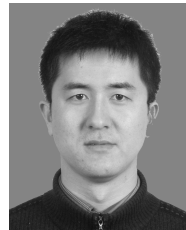
(**ZHAO You-Gang** Associate professor at Qingdao Agricultural University. He received his Ph.D. degree from Ocean University of China in 2008. His research interest covers automatic control technology and software engineering.)



于洋 青岛农业大学硕士研究生. 主要研究方向为系统故障诊断及容错控制.

E-mail: ripplefishsheep@yahoo.cn

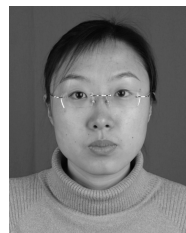
(**YU Yang** Master student at Qingdao Agricultural University. Her research interest covers fault diagnosis and fault-tolerant control of system.)



张鹏 青岛农业大学讲师. 2009 年获南京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为复杂系统建模, 故障诊断, 容错控制. E-mail: zhangpeng1998@gmail.com

(**ZHANG Peng** Lecturer at Qingdao Agricultural University. He received his Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astro-

nautics in 2009. His research interest covers complex systems modeling, fault diagnosis, and fault-tolerant control.)



高洪伟 青岛农业大学讲师. 2007 年获中国海洋大学博士学位. 主要研究方向为最优控制和扰动抑制.

E-mail: gaohw97@126.com

(**GAO Hong-Wei** Lecturer at Qingdao Agricultural University. She received her Ph.D. degree from Ocean University of China in 2007. Her research interest covers optimal control and disturbance rejection.)