

文章编号: 1001-0920(2007)07-0800-05

基于传感器最优配置的等价空间故障检测方法

桂卫华¹, 彭涛², DING Steven X³, 何蓓¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南工业大学 电气工程系, 湖南 株洲 412008; 3. 杜伊斯堡-埃森大学 自动控制和复杂系统研究所, 杜伊斯堡 47048)

摘要: 提出一种基于传感器最优配置的等价空间故障检测方法. 针对线性时不变动态系统, 给出了传感器最优配置问题的描述, 以及基于传感器最优配置的故障检测多目标优化问题的描述. 在系统可供测量的 N 个变量中, 选择能获得关于系统故障尽可能多信息的 m 个变量作为测量变量, 在满足对故障具有尽可能高的灵敏度, 同时对扰动等未知信号具有尽可能强的鲁棒性的条件下, 使整个系统测量成本达到最低. 仿真算例说明了所提出设计方法及算法的有效性.

关键词: 故障检测; 传感器最优配置; 等价空间方法; 多目标优化

中图分类号: TP277 **文献标识码:** A

Parity space approach to fault detection based on optimal sensor location

GUI Wei-hua¹, PENG Tao², DING Steven X³, HE Bei¹

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Electrical Engineering, Hu 'nan University of Technology, Zhuzhou 412008, China; 3. Institute of Automatic Control and Complex Systems, University of Duisburg-Essen, Duisburg 47048, Germany. Correspondent: PENG Tao, E-mail: pandtao@163.com)

Abstract: A parity space approach to fault detection based on optimal sensor location is proposed. A problem for optimal sensor location and a multi-objective optimal problem based on optimal sensor location are formulated for linear time invariant system. m variables that can attain the amount of information about the fault of process as much as possible out of N available process measurements are selected for measurement outputs. A minimum total measurement cost is achieved when the system is designed to be as sensitive as possible to faults and simultaneously as robust as possible to the unknown inputs such as disturbance. The simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Fault detection; Optimal sensor location; Parity space approach; Multi-objective optimization

1 引言

传感器最优配置问题的研究始于 20 世纪 70 年代末, 主要用于状态估计、数据调和、可靠性分析等^[1]. 随着过程监测在工业过程中的地位日益凸显, 以故障诊断为目的的传感器最优配置问题也日渐受到关注^[2-5]. 1977 年, Lambert^[6] 用故障树并基于故障源对过程变量的影响分析了传感器的配置问题; Iri 等^[7] 于 1979 提出基于有向图 (SDG 或 DG) 对系统故障进行了因果分析. 此后, Kramer 等^[8-10] 对用

有向图构建基于规则的故障诊断系统进行了系统的研究. 近年来, Raghuraj 等^[11] 以及 Bhushan 等^[13,12] 将此技术应用于基于故障诊断的传感器最优配置研究中. 然而, 这些研究方法都是基于知识或基于数据驱动的^[13], 文献 [14] 虽是一种基于模型的方法, 但仍需将解析模型转变为双向图的形式, 再应用图论技术获得传感器配置的最优解.

等价空间法是一种基于模型的线性系统故障检测方法, 多年来已经取得了不俗的研究成果^[15-17]. 但

收稿日期: 2006-03-18; 修回日期: 2006-08-29.

基金项目: 国家 973 计划项目 (2002CB312200); 湖南省自然科学基金项目 (06JJ2064); 湖南省教育厅科研项目 (04C719).

作者简介: 桂卫华 (1950—), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事工业大系统递阶和分散控制理论及应用等研究; 彭涛 (1965—), 女, 湖南汉寿人, 教授, 博士, 从事系统故障检测与诊断的研究.

这些研究都默认传感器配置(包括数量或类型、位置)是给定的,对于如何选择最优测量变量及传感器数量来获得尽可能多的关于系统故障的信息的研究,目前尚未见报道。

本文针对线性时不变动态系统,提出一种基于传感器最优配置的等价空间故障检测方法.期望在满足对故障具有尽可能高的灵敏度,同时对扰动等未知信号具有尽可能强的鲁棒性的条件下,使整个系统测量成本达到最低。

2 传感器最优配置问题描述

考虑线性时不变离散系统的状态空间描述为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + F_d d(k) + F_f f(k). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$, $u(k) \in R^{k_u}$ 和 $y(k) \in R^m$ 分别表示系统的状态、控制输入和输出; $d(k) \in R^{k_d}$ 表示包括干扰、噪声或界定在 d_2 范围内的模型结构不确定性等未知输入; $f(k) \in R^{k_f}$ 为表征必须检测出的系统所有可能的加性故障,即执行器故障、元部件故障及传感器故障等; $A, B, C, D, E_d, E_f, F_d$ 和 F_f 为具有合适维数的已知系数矩阵。

假设系统用可提供的 M 个传感器构成 N 个测量点(测量变量),则系统可提供的测量输出方程为

$$z_a(k) = C_a x(k) + D_a u(k) + F_{ad} d(k) + F_{af} f(k). \quad (2)$$

其中: $z_a \in R^N$; C_a, D_a, F_{ad} 和 F_{af} 均为已知的具有合适维数的矩阵;下标 a 表示系统可提供的测量输出参数.并假设:

- 1) (C_a, A) 是可检测的;
- 2) $\begin{bmatrix} A - j I & E_d \\ C_a & F_{ad} \end{bmatrix}$ 对于所有 j 行满秩.

引入矩阵 Q ,用于在可提供的 N 个测量点(测量变量)中选 $m(m < N)$ 个作为测量输出.这种选择应该是最优的,即通过选择这 m 个测量输出,能以最小的测量成本获得关于故障的最大量信息.矩阵 $Q \in R^{N \times N}$ 中的元素 q_{ij} 是二值性值,定义为

$$q_{ij} = \begin{cases} q_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } z_{ai} \text{ 被选为测量输出;} \\ 0, & \text{如果 } z_{ai} \text{ 未被选为测量输出;} \end{cases} \\ q_{ij} = 0, & i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (3)$$

于是,系统的状态空间描述为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y_a(k) &= Qz_a(k) = \end{aligned}$$

$$Q(C_a x(k) + D_a u(k) + F_{ad} d(k) + F_{af} f(k)). \quad (4)$$

按 Bagajewicz^[1] 和 Chmielewski^[3] 的定义,系统的测量成本为

$$\phi = \sum_{i=1}^M q_{ii} \phi_a, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

式中: ϕ_a 为系统可提供的 M 个传感器的总成本, i 为用系统可提供的 M 个传感器构成的 N 个测量点(测量变量)中第 i 个测量点所用传感器的成本.则传感器最优配置问题可描述为如何最优地确定选择矩阵 Q ,以满足系统性能要求。

3 基于传感器最优配置的故障检测问题描述

对于系统(4),用数据窗 $[(k-s)T, kT]$ 中 $s+1$ 个测量数据 $y(k-s), y(k-s+1), \dots, y(k)$, 构造一个基于等价空间的故障检测残差生成器

$$r(k) = V_s (y_s(k) - Q_s H_{au,s} u_s(k)), \quad (6)$$

或描述为

$$r(k) = V_s Q_s (H_{ad,s} d_s(k) + H_{af,s} f_s(k)). \quad (7)$$

式(6)和(7)中的 $V_s \in R^{s \times (s+1)N}$ 是由 $P_s = \{v_s^i / v_s^i Q_s H_{\omega,s} = 0, v_s^i = [v_{s,0}^i \ v_{s,1}^i \ \dots \ v_{s,s}^i], i = 1, 2, \dots, s\}$ 构成的等价空间 P_s 的等价矩阵,其行向量 $v_s^i \in R^{1 \times (s+1)N}$ 为等价空间的等价向量, s 为残差生成器阶次, s 为等价空间维数.最优地选择等价向量 v_s^i , 可使所生成的残差对故障灵敏且同时对扰动等未知信号鲁棒.其他符号定义如下:

$$y_s(k) = \begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \dots \\ y(k) \end{bmatrix},$$

$$u_s(k) = \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \dots \\ u(k) \end{bmatrix},$$

$$f_s(k) = \begin{bmatrix} f(k-s) \\ f(k-s+1) \\ \dots \\ f(k) \end{bmatrix},$$

$$d_s(k) = \begin{bmatrix} d(k-s) \\ d(k-s+1) \\ \dots \\ d(k) \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q & \ddots & 0 \\ \dots & \ddots & \ddots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & Q \end{bmatrix} \in R^{(s+1)N \times (s+1)N},$$

$$H_{\omega,s} = \begin{bmatrix} C_a \\ C_a A \\ \dots \\ C_a A^s \end{bmatrix} R^{(s+1)N \times n},$$

$$H_{au,s} = \begin{bmatrix} D_a & 0 & \dots & 0 \\ C_a B & D_a & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ C_a A^{s-1} B & \dots & C_a B & D_a \end{bmatrix} R^{(s+1)N \times (s+1)k_u},$$

$$H_{ad,s} = \begin{bmatrix} F_{ad} & 0 & \dots & 0 \\ C_a E_d & F_{ad} & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ C_a A^{s-1} E_d & \dots & C_a E_d & F_{ad} \end{bmatrix} R^{(s+1)N \times (s+1)k_d},$$

$$H_{af,s} = \begin{bmatrix} F_{af} & 0 & \dots & 0 \\ C_a E_f & F_{af} & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ C_a A^{s-1} E_f & \dots & C_a E_f & F_{af} \end{bmatrix} R^{(s+1)N \times (s+1)k_f}.$$

将式(7)残差生成器写为

$$r(k) = P_s N_{b,s} Q_s (H_{ad,s} d_s(k) + H_{af,s} f_s(k)). \quad (8)$$

式中: $N_{b,s} \in R^{N \times (s+1)N}$ 为等价空间 P_s 的广义基矩阵, P_s 为在 $N_{b,s}$ 基下的等价矩阵.

综上所述,可用矩阵 $P_s N_{b,s} Q_s H_{ad,s}$ 的一个诱导范数来评价系统对于未知输入的鲁棒性,即

$$R_d := \sup_{d_s \neq 0} \frac{P_s N_{b,s} Q_s H_{ad,s} d_s(k)}{d_s(k)}. \quad (9)$$

用故障对残差向量的最小影响指数来评价系统对于故障的灵敏度,即

$$S_{f,s} = \inf_{f_s \neq 0} \frac{P_s N_{b,s} Q_s H_{af,s} f_s(k)}{f_s(k)}. \quad (10)$$

采用残差向量的 2-范数作为残差评价函数,其阈值为

$$J_{th} = \sup_{d_s, f_s=0} r^2 = \sup_{d_s(k)} P_s N_{b,s} Q_s H_{ad,s} d_s(k)^2. \quad (11)$$

设未知输入是有界的,即

$$\left(\sum_{i=0}^s d^T(k-i) d(k-i) \right)^{1/2} \leq d. \quad (12)$$

根据上述鲁棒性和灵敏度定义,可将设计一个故障检测系统的任务描述为多目标优化问题,即对于式(8),寻找 P_s 和 Q_s ,使得 $R_d \rightarrow \min, S_{f,s} \rightarrow \max$.

采用 Ding 等^[15]建议的性能指标,以充分加强故障对残差的作用,并尽量抑制扰动等未知输入对

残差的影响,即

$$\min_{P_s} J_{R/S} = \min_{P_s} \frac{R_d}{S_{f,s}}. \quad (13)$$

于是,基于传感器最优配置的故障检测系统设计可描述为:在可供测量的 N 个变量中选择其中 m 个作为测量变量,使系统所获得关于故障的信息尽可能多,而测量成本尽可能小.即对于残差生成器(8),寻找最优选择矩阵 Q 以及等价矩阵 P_s ,使得系统渐近稳定,且

$$J_{R/S} \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$\phi \rightarrow \min. \quad (15)$$

4 优化设计方法

首先考虑故障检测性能优化问题的求解.将式(14)写为

$$\min_{P_s} J_{R/S} = \min_{P_s} \frac{R_d}{S_{f,s}} = \min_P \frac{p_{s,\min} N_{b,s} Q_s H_{ad,s} H_{ad,s}^T Q_s^T N_{b,s}^T P_{s,\min}^T}{p_{s,\min} N_{b,s} Q_s H_{af,s} H_{af,s}^T Q_s^T N_{b,s}^T P_{s,\min}^T}. \quad (16)$$

定理 1 对于一个线性离散系统(4),式(16)的最优解可由

$$v_{s,\text{opt}} = p_{s,\min} N_{b,s} Q_s \quad (17)$$

给出.其中 $p_{s,\min}$ 为对应于下面广义特征值-特征向量问题的最小特征值 \min 的特征向量:

$$v_{s,\text{opt}} (H_{ad,s} H_{ad,s}^T - \min H_{af,s} H_{af,s}^T) = 0. \quad (18)$$

证明参见文献[18].

其次,考虑系统成本优化问题的求解.将式(15)写成带约束的单目标优化形式,即

$$\begin{aligned} \phi &\rightarrow \min, \\ \text{s.t. } v_{s,\text{opt}} &= p_{s,\min} N_{b,s} Q_s. \end{aligned} \quad (19)$$

综上所述,基于传感器最优配置的等价空间故障检测方法优化设计步骤如下:

Step 1: 给定残差生成器阶次 s 为一个不小于 $s_{\max} = n - m + 1$ 的较小值;

Step 2: 计算 $H_{\omega,s}, H_{au,s}, H_{ad,s}, H_{af,s}$;

Step 3: 计算等价空间维数以及等价空间的广义基矩阵 $N_{b,s}$;

Step 4: 求解广义特征向量问题(18),确定最优等价向量 $v_{s,\text{opt}}$;

Step 5: 求解带约束的单目标优化问题(19),确定 Q 值;

Step 6: 构造形如式(8)的残差生成器;

Step 7: 按式(11)确定阈值,并进行残差评价.

5 仿真研究

假设采样周期为 0.1 s,扰动 $d(k)$ 为带宽受限的白噪声,其最大 noise power 值取 0.5,并以幅值为 10 的脉冲信号为故障信号.以模型(20)为例,在

Matlab 环境下进行仿真. 给定 $s = 3$, 设在 4 个测量点安装传感器的成本向量为

$$\phi = [10.0 \quad 19.0 \quad 35.0 \quad 64.0].$$

根据上节方法求得 $Q = \text{diag}(1 \quad 1 \quad 1 \quad 0)$, 即对式 (20) 所示的系统仅在第 1 个、第 2 个和第 3 个测量点上安装传感器. 构造的残差生成器为

$$r(k) = [-0.419 \ 5 \quad -0.274 \ 0 \quad -0.334 \ 3 \quad -0.249 \ 7]d(k) + [-1.784 \ 1 \quad -0.994 \ 0 \quad -0.521 \ 7 \quad -0.249 \ 7]f(k).$$

其残差信号、残差评价函数曲线分别如图 1 和图 2 所示.

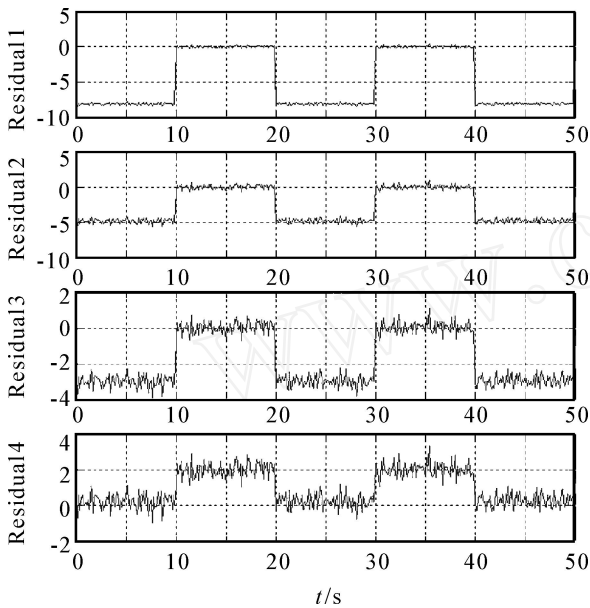


图 1 经传感器优化配置后的残差信号曲线

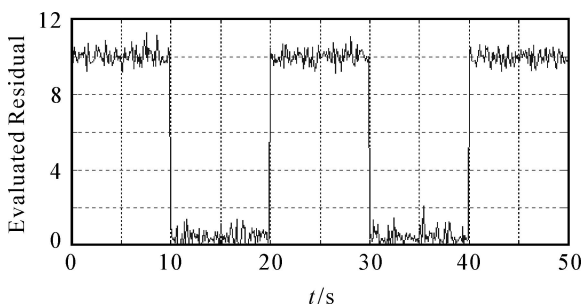


图 2 经传感器优化配置后的残差评价函数曲线

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.7 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.6 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} d(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} f(k),$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_3(k) \\ y_4(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.4 & 1.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(k). \quad (20)$$

为验证所提出方法的有效性, 对式 (20) 所示的系统在 4 个测量点上均安装传感器. 构造的残差生成器为

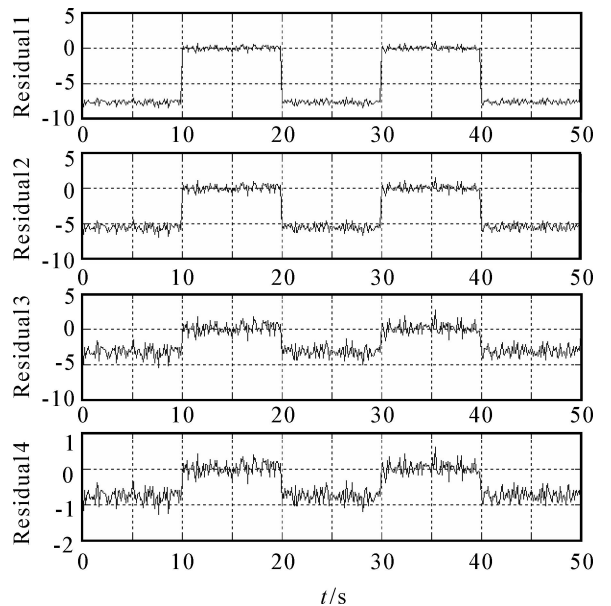


图 3 未经传感器优化配置的残差信号曲线

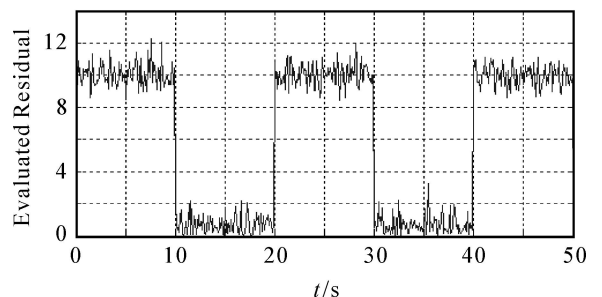


图 4 未经传感器优化配置的残差评价函数曲线

$$r(k) = [-0.2414 \quad -0.3357 \quad -0.4139 \quad -0.0565]d(k) + [-1.6835 \quad -1.0304 \quad -0.4195 \quad -0.0565]f(k).$$

其残差信号与残差评价函数曲线分别如图 3 和图 4 所示。

从传感器优化配置前后的残差曲线可以看出,虽然残差信号有细微差别,但其残差评价函数曲线基本一致.即如果仅在该系统第 1 个、第 2 个和第 3 个测量点安装传感器,可获得与在 4 个测量点上均安装传感器同等强度的残差信号。

6 结 语

本文针对线性时不变动态系统,给出了传感器最优配置问题的描述以及基于传感器最优配置的故障检测多目标优化问题的描述.通过最优地选择测量变量,获得关于系统故障尽可能多的信息,在满足对故障具有尽可能好的检测性能情况下,使系统测量成本达到最低.仿真算例说明了所提出设计方法及算法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] Bagajewicz M J. Process plant instrumentation: Design and upgrade[M]. Lancaster: Technomic Publishing Co., 2001.
- [2] Bhushan M, Rengaswamy R. Design of sensor location based on various fault diagnostic observability and reliability criteria [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(2-7): 735-741.
- [3] Chmielewski D J, Tasha P, Vasilios M. On the theory of optimal sensor placement [J]. AIChE J, 2002, 48(5): 1001-1012.
- [4] Yu D, Pansoo K, Dariusz C, et al. Optimal sensor distribution for variation diagnosis in multistation assembly processes [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 543-556.
- [5] Löhner R, Camelli F. Optimal placement of sensors for contaminant detection based on detailed 3D CFD simulations engineering computations [J]. Int J for Computer-Aided Engineering, 2005, 22(3): 260-273.
- [6] Lambert H E. Fault trees for locating sensors in process systems[J]. Chemical Engineering Progress, 1977, 8(1): 81-86.
- [7] Iri M, Aoki K, O 'Shima E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. Computer and Chemical Engineering, 1979, 3(1-4): 489-493.
- [8] Kramer M A, Palowitch B L. A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph [J]. AIChEJ, 1987, 33(7): 1067-1071.
- [9] Chang C C, Yu C C. On-line fault diagnosis using the signed directed graph [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1990, 29(7): 1290-1298.
- [10] Mohindra S, Clark P A. A distributed fault diagnosis method based on digraph models: Steady-state analysis [J]. Computer and Chemical Engineering, 1993, 17(2): 193-209.
- [11] Raghuraj R, Bhushan M, Rengaswamy R. Locating sensors in complex chemical plants based on faulty diagnostic observability criteria[J]. AIChEJ, 1999, 45(2): 310-322.
- [12] Bhushan M, Rengaswamy R. Comprehensive design of a sensor network for chemical plants based on various diagnosability and reliability criteria I: Framework[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 41(7): 1826-1839.
- [13] Zamprohna E, Barolo M, Seborg D E. Optimal selection of sensors inputs for batch distillation columns using principal component analysis [J]. J of Process Control, 2005, 15(1): 39-52.
- [14] Commault C, Dion J-M. Sensor location for diagnosis in linear structured systems with disturbances [C]. Proc of the 42th IEEE Conf on Decision and Control. Maui: Hawaii, 2003: 1443-1448.
- [15] Ding S X, Guo L. An approach to time domain optimization of observer-based fault detection systems [J]. Int J of Control, 1998, 69(3): 419-442.
- [16] 张萍, Ding S X, 王桂增, 等. 采样数据系统的故障检测[J]. 自动化学报, 2003, 29(2): 306-311. (Zhang Ping, Ding S X, Wang Gui-zeng, et al. Fault detection for sampled-data systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(2): 306-311.)
- [17] Ye H, Wang G Z, Ding S X. A new parity space approach for fault detection based on stationary wavelet transform [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(2): 281-287.
- [18] 彭涛. 基于传感器最优配置的故障检测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005. (Peng Tao. Fault detection methods based on optimal sensor location [D]. Changsha: Central South University, 2005.)