

文章编号: 1001-0920(2008)03-0273-05

Delta 算子描述的离散系统故障检测滤波器

张爱玲, 张端金

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052)

摘要: 研究基于 Delta 算子模型的离散时间系统故障检测问题. 推导了 Delta 算子系统的故障可检测和可分离条件, 给出了 Delta 算子模型的故障检测滤波器设计方法. 研究表明, 在采样周期很小时, Delta 算子故障检测趋近于连续模型的相应结果, 可统一处理连续系统和离散系统故障检测的相关问题. 仿真实例验证了该方法的有效性.

关键词: 离散时间系统; 故障检测; 滤波器; Delta 算子

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fault detection filter for Delta operator formulated discrete time systems

ZHANG Ai-ling, ZHANG Duan-jin

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China. Correspondent: ZHANG Duan-jin, E-mail: djzhang@zzu.edu.cn)

Abstract: The problem of fault detection for Delta operator formulated discrete time system is studied. Some sufficient conditions are developed for fault detection and isolation (FDI) of Delta operator system. The design method of the Delta operator-based fault detection filter is proposed. When the sampling period is very small, the FDI method using Delta operator will approach the corresponding FDI results for continuous time cases, thus the related problems of fault detection for continuous time system and discrete time system can be considered in the unified Delta operator framework. A numerical example illustrates the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Discrete time systems; Fault detection; Filter; Delta operator

1 引言

故障检测与诊断是为满足监控系统的需要而发展起来的一门应用型边缘学科, 现已成为自动控制领域的重要研究方向之一^[1,2]. 检测滤波器方法是由 Beard 提出的, 后来不少学者对其进行了发展和完善^[3-5].

现有的故障检测滤波器是针对连续系统或离散系统分别设计的. Delta 算子作为一种新的离散化方法, 不仅能避免在高速采样时移位算子方法所产生的病态条件问题, 而且可将连续系统和离散系统的许多结果纳入到 Delta 算子统一框架, 在控制和信号处理中获得许多研究成果^[6,7]. Delta 算子方法在故障诊断和容错控制中的应用也取得了一些结果. 文献[8]基于 Delta 算子构造出格形故障检测滤波器, 它具有灵敏度高, 计算量小, 不需太多故障先验

知识, 可实现实时在线检测等优点. 文献[9]给出了 Delta 算子系统在执行器出现故障时, 基于状态反馈实现区域极点配置的充分条件和控制器设计方法.

本文基于 Delta 算子模型, 在故障可检测和可分离的条件下, 将连续系统和离散系统故障检测滤波器的设计统一到 Delta 算子框架, 使离散系统检测结果趋于连续系统的相应结果.

2 系统描述

Delta 算子定义为^[7]

$$x(T) = \begin{cases} dx(t)/dt, & T = 0; \\ [x(t+T) - x(t)]/T, & T > 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中 T 为采样周期.

考虑发生部件或执行机构故障时的连续系统模型

收稿日期: 2006-12-08; 修回日期: 2007-03-20.

基金项目: 河南省自然科学基金项目(0311011600).

作者简介: 张爱玲(1981—), 女, 河南沈丘人, 硕士, 从事故障检测、系统滤波的研究; 张端金(1966—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士, 从事高速信号处理、故障诊断等研究.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + f_{ic} n_i(t) + D_c d(t), \\ y(t) = C_c x(t). \end{cases} \quad (2a)$$

其中: $x \in R^n$ 为状态; $u \in R^k$ 为控制输入; n_i 为未知故障; $d \in R^d$ 为系统噪声; $y \in R^m$ 为系统输出; $f_{ic} \in R^{n \times d}$ 为已知故障向量; A_c, B_c, C_c, D_c 是已知相应维数矩阵.

系统(2a)的移位算子离散模型为

$$\begin{cases} qx(k) = A_q x(k) + B_q u(k) + f_{iq} n_i(k) + D_q d(k), \\ y(k) = C_q x(k). \end{cases} \quad (2b)$$

其中

$$A_q = I + R(T)A_c, \quad B_q = R(T)B_c, \\ C_q = C_c, \quad D_q = R(T)D_c, \quad f_{iq} = R(T)f_{ic},$$

$$R(T) = \int_0^T e^{A_c t} dt = T \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(A_c T)^k}{(k+1)!}$$

$$\text{当 } T \rightarrow 0 \text{ 时, } \lim_{T \rightarrow 0} A_q = I, \lim_{T \rightarrow 0} B_q = 0, \lim_{T \rightarrow 0} f_{iq} = 0, \lim_{T \rightarrow 0} D_q = 0.$$

系统(2a)的Delta算子离散模型为

$$\begin{cases} x(k) = A x(k) + B u(k) + f_i n_i(k) + D d(k), \\ y(k) = C x(k). \end{cases} \quad (2c)$$

其中

$$A = R(T)A_c, \quad B = R(T)B_c, \quad C = C_c,$$

$$D = R(T)D_c, \quad f_i = R(T)f_{ic},$$

$$R(T) = I + \frac{A_c T}{2!} + \frac{A_c^2 T^2}{3!} + \dots$$

$$\text{当 } T \rightarrow 0 \text{ 时, } R(T) \rightarrow I, \lim_{T \rightarrow 0} A = A_c, \lim_{T \rightarrow 0} B = B_c, \lim_{T \rightarrow 0} f_i = f_{ic}, \lim_{T \rightarrow 0} D = D_c.$$

以上结果表明,当 $T \rightarrow 0$ 时, q 算子模型不趋于相应的连续模型,算子模型收敛于相应的连续模型.与系统(2c)相对应的检测滤波器方程为

$$\begin{cases} \hat{x}(k) = A \hat{x}(k) + B u(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = C \hat{x}(k). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\hat{x}(k)$ 和 $\hat{y}(k)$ 分别为状态和输出估计, L 为检测增益阵.

定义状态估计误差 $(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, 由式(2c)和(3)得到闭环误差系统方程

$$\begin{cases} (k) = (A - LC) (k) + f_i n_i(k) + D d(k), \\ r(k) = C (k). \end{cases} \quad (4)$$

令 $G = A - LC$, $r(k)$ 为输出残差.

3 检测滤波器设计

本节在文献[5]的基础上,给出Delta算子离散

系统故障检测滤波器的设计.

3.1 系统假设

假设系统满足:

- 1) (A, C) 是可观测的, (G, f_i) 是可控制的;
- 2) $CF = C[f_1, f_2, \dots, f_r]$ 的秩为 r , 它是输出可分离性条件;
- 3) $r = m$, 使检测滤波器能识别最大数目的故障;

- 4) G 的闭环特征值 λ_j 互不相同, $j = 1, 2, \dots, n$.

3.2 故障可检测性

定义1 系统(4)中与 f_i 相对应的故障可检测的充分条件是:存在滤波器增益阵 L , 使得:

- 1) 输出残差 $r(k)$ 具有限定的方向性;
- 2) 除了共轭对称约束外, 在稳定域 $(G) \subset D(-1/T, 1/T)$ 内, G 的所有闭环特征值 λ_j 都可任意配置, 其中 $D(-1/T, 1/T)$ 表示以 $(-1/T, 0)$ 为圆心、半径为 $1/T$ 的稳定圆域.

条件1)使滤波器输出残差方向 $r(k)$ 与故障方向 f_i 相关; 条件2)保证检测滤波器稳定, 共轭对称约束限制闭环特征向量与复数共轭特征值对应.

3.3 闭环特征向量的约束条件

为满足定义1, G 的互不相等的特征值 λ_j 与特征向量 v_j 由下式确定:

$$(\lambda_j I - G) v_j = 0. \quad (5)$$

由系统的可观测性知 $C v_j \neq 0$, v_j 相互独立且覆盖误差变量状态空间. 因此, 设计的故障向量 f_i 可写成闭环特征向量的线性组合, 即

$$f_i = \sum_{j=1}^{n_i} a_j^i v_j^i. \quad (6)$$

其中: 上标 i 表示构成 f_i 的特征向量和系数, n_i 是非零的 a_j^i 的数目.

引理1 满足定义1中条件1)的充要条件是 $\text{rank}(C W_i) = 1$, 其中可控性矩阵

$$W_i = [f_i, G f_i, \dots, G^{n-1} f_i]. \quad (7)$$

证明 充分性: 由于 (k) 必定位于 W_i 的列空间, 则 (k) 可写成 W_i 列的线性组合 $(k) = W_i g(k)$, 输出残差可表示为 $r(k) = C (k) = C W_i g(k)$, 其中 $g(k)$ 是 $n \times 1$ 的系数向量. 因此 $\text{rank}(C W_i) = 1$ 可使 $r(k)$ 对于任何的 $g(k)$ 保持单向性.

必要性: 在 f_i 对应于 G 的可控空间中, (k) 可由 $n_i(k)$ 驱动到达任何状态, 因此定义1中条件1)成立的必要条件是 $\text{rank}(C W_i) = 1$.

引理2 $\text{rank}(C W_i) = 1$ 的充要条件是对于所有的 $j = 1, 2, \dots, n_i$, $C f_i$ 与 $C v_j^i$ 共线.

证明 为了简便, 省略 v_j^i , λ_j^i 和 a_j^i 的上标 i .

充分性: 将式(6) 代入 CW_i , 由式(5) 可得

$$CW_i = \begin{bmatrix} a_j C v_j, & a_j C v_j, & \dots, & a_j C v_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

如果 Cf_i 与 Cv_j 共线, 则有

$$Cv_j = \bar{c}_j Cf_i, \quad (9)$$

其中 \bar{c}_j 是标量常数. 式(9) 代入式(8), 得

$$CW_i = [\bar{c}_1 Cf_i, \bar{c}_2 Cf_i, \dots, \bar{c}_{n-1} Cf_i], \quad (10)$$

其中 $\bar{c}_j (j = 1, 2, \dots, n-1)$ 表示各项总的系数. 显然有 $\text{rank}(CW_i) = 1$.

必要性: 只需证明 $\text{rank}(CW_i) = 1, r(k)$ 是单向的. 方程(4) 的解为

$$r(k) = (I + GT)^k (0) + T \sum_{m=0}^{k-1} (I + GT)^{k-m-1} \times f_i n_i(m) + T \sum_{m=0}^{k-1} (I + GT)^{k-m-1} D d(m), \quad (11)$$

其中 $(I + GT)^k$ 为系统转移矩阵, 对应于连续系统的 e^{Gt} . 考虑到可取 $(0) = 0$, 或 G_c 稳定, $e^{G_c t}$ 将衰减为零, 从而 $(I + GT)^k (0)$ 可看作零. 则输出残差为

$$r(k) = T \sum_{m=0}^{k-1} C (I + GT)^{k-m-1} f_i n_i(m) + T \sum_{m=0}^{k-1} C (I + GT)^{k-m-1} D d(m). \quad (12)$$

假设 $n_i(m) = c$ (c 为常数), 所得结果对于任意 $n_i(k)$ 都适用, 因为 $n_i(m) = c$ 仍是一种故障模式. 则有

$$r(k) = cr_i(k) + \tilde{r}(k). \quad (13)$$

其中

$$r_i(k) = T \sum_{m=0}^{k-1} C (I + GT)^{k-m-1} f_i, \quad \tilde{r}(k) = T \sum_{m=0}^{k-1} C (I + GT)^{k-m-1} D d(m).$$

根据式(5), 把式(6) 代入式(13), 得

$$r(k) = Tc \sum_{j=1}^{n_i} a_j C (I + GT)^{k-m-1} v_j + \tilde{r}(k) = Tc \sum_{j=1}^{n_i} a_j C (I + jTI)^{k-m-1} v_j + \tilde{r}(k) = Tc \sum_{j=1}^{n_i} a_j C (1 + jT)^{k-m-1} Iv_j + \tilde{r}(k) = Tc \sum_{j=1}^{n_i} a_j (1 + jT)^{k-m-1} Cv_j + \tilde{r}(k). \quad (14)$$

不考虑系统噪声的影响, 式(14) 可变为

$$r(k) = Tc \sum_{j=1}^{n_i} a_j (1 + jT)^{k-m-1} Cv_j. \quad (15)$$

当系统存在噪声时, $\tilde{r}(k)$ 由高频噪声引起, 而故障信号是确定的. 通过噪声滤波和残差强化处理, 可将其限定在较小的范围内. $\tilde{r}(k)$ 和 $r_i(k)$ 相对独立, 在统计意义下可得

$$r^T(k) r(k) = c^2 r_i(k)^2 + \tilde{r}(k)^2.$$

如果 $\tilde{r}(k)^2 = 0$, 则在 $c = 0$ 时有 $r^T(k) r(k) > 0$, 因此不能用 $r^T(k) r(k) = 0$ 来判断是否存在故障. 当 $r^T(k) r(k) > \tilde{r}(k)^2$ 时, 才表示有故障发生. 令 $\tilde{r}(k)^2$ 为门限值, 当 $r^T(k) r(k) > \tilde{r}(k)^2$ 时, 表示有故障发生. 值与噪声有关, 可由实验结果分析得到.

由式(10) 知, 如果 $\text{rank}(CW_i) = 1$, 则 Cv_j 只能是与 j 无关而与故障 i 有关的向量. 由式(14) 和(15) 知 $r(k)$ 是单向的.

定理 1 满足定义 1 中条件 1) 的充分条件是 Cf_i 与 Cv_j^i 对于所有的 $j = 1, 2, \dots, n_i$ 是共线的.

由引理 1 和引理 2 的结合直接可以证明.

注 1 通过对 v_j^i 标准化, 使得 $Cv_j^i = Cf_i, i = 1, 2, \dots, m$. 定理 1 对闭环特征向量施加约束, 以确保输出残差的单向性. 定义 1 中条件 2) 要求检测滤波器的特征值可以任意配置.

检测滤波器问题可表达为求解下列方程组:

$$\begin{bmatrix} jI - A & L \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_j^i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_j \end{bmatrix}. \quad (16)$$

其中: $V_i = Cv_j^i = Cf_i, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n_i, n_i$. 特征值及特征向量的数目 n_i 待定.

3.4 检测空间

现在讨论关于单个故障方向的检测增益阵和 n_i

的计算问题. 由式(6) 和 $Cv_j^i = Cf_i$ 得 $a_j^i = 1$. 将式(16) 中对应于式(6) 非零 a_j^i 的方程合并为

$$LCf_i = Af_i - \sum_{j=1}^{n_i} a_j^i jv_j^i. \quad (17)$$

引理 3 如果 $L \in R^{n \times m}, S \in R^{m \times r}, Q \in R^{n \times r}, n > m > r, \text{rank}(S) = r$, 则方程 $LS = Q$ 的通解为

$$L = QS^+ + L_1[I - SS^+]. \quad (18)$$

其中: L_1 为任意 $n \times m$ 维矩阵, $S^+ = (S^T S)^{-1} S^T$ 是广义逆.

由引理 3 可得式(17) 的解

$$L = \left(Af_i - \sum_{j=1}^{n_i} a_j^i jv_j^i \right) (Cf_i)^+ + L_1[I - (Cf_i)(Cf_i)^+]. \quad (19)$$

式(19) 代入 $G = A - LC$, 得

$$A - LC = A_i - L_i C_i \quad (20)$$

其中

$$A_i = A - \left(A f_i - \sum_{j=1}^{n_i} a_j^i v_j^i \right) \times (C f_i)^+ C, \\ C_i = [I - (C f_i)(C f_i)^+] C.$$

引理 4 如果 $A_i \in R^{n \times n}, C_i \in R^{m \times n}, L_i \in R^{n \times m}$, 则矩阵 $A_i - L_i C_i$ 通过自由选取 L_i , 可任意配置的特征值数目为 $q_i = \text{rank}(M_i)$, 其中

$$M_i = [(C_i)^T, (C_i A_i)^T, \dots, (C_i A_i^{n-1})^T]^T \quad (21)$$

剩余 $v_i = (n - q_i)$ 个 $(A_i - L_i C_i)$ 的特征值等于相应的 A_i 的特征值, 它们也是 G 相应于 f_i 的特征值.

证明 q_i 和 v_i 分别表示相对于 (A_i, C_i) 可观矩阵的秩和零空间或不可观空间的维数. 因此 q_i 个闭环特征向量覆盖 M_i, v_i 个剩余特征向量满足 $C_i v_j^i = 0, j = 1, 2, \dots, v_i$. 这可推导如下:

将式(20)后乘 $v_j^i, j = 1, 2, \dots, v_i$, 得

$$A_i v_j^i = (A - LC) v_j^i + L_i C_i v_j^i \quad (22)$$

由式(5)和(22)得

$$A_i v_j^i = v_j^i + L_i C_i v_j^i \quad (23)$$

式(23)右边最后一项对于 M_i 零空间的所有特征向量均为零, 因此这些特征向量必定是 A_i 的特征向量, 并且不受 L_i 的影响.

注 2 由于 A_i 中所含的 v_j^i 未知, 引理 4 不可实现. 式(21)中 A_i 可用 $K_i = A [I - f_i (C f_i)^+ C]$ 代替, 其中 A_i 与 K_i 的等价性可由 $C_i K_i^l v_j^i = 0 (l = 0, 1, \dots, n - 1)$ 确定^[10].

定义 2 M_i 的零空间是 f_i 的检测空间.

定义 3 f_i 检测空间的维数为 f_i 的检测阶 $v_i = n - q_i$.

定义 4 故障向量 f_i 与故障 i 是检测等价的, 如果: 1) 每个 f_i 的检测滤波器也是 f_j 的检测滤波器; 2) $C f_i = C f_j$, 其中 C 是非零常数, $C f_i \neq 0, C f_j \neq 0$.

引理 4 和定义 3 表示 v_i 个特征值所对应的特征向量覆盖 f_i 的检测空间. 由定理 1 知, 式(6)中 n_i 个特征向量也位于检测空间, 则 $v_i \geq n_i - 1$. 对于所有检测等价的 f_j , 满足定理 1 共线条件的特征向量共 v_i 个, 所以求解方程(16)必须有 $\bar{n}_i = v_i$ 个特征值和特征向量, 以满足 $C f_i$ 的约束条件.

定义 5 如果 F 的向量是输出可分的, 则 F 的故障向量 f_i 相互可检测的充要条件是 $\sum_{i=1}^m v_i = n$.

3.5 方程(16)的解

定理 2 在给定的 4 个假设条件下, 条件 $\sum_{i=1}^m v_i$

$= n$ 可保证方程(16)对增益阵 L 及闭环特征向量 v_j^i 可解, $j = 1, 2, \dots, v_i$.

证明参见文献[10].

4 设计举例

考虑系统(2a)所示的三阶连续线性系统

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1.5 \end{bmatrix}, \\ C_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, f_{1c} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, f_{2c} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

当 $T = 0.005$ s 时, 对应于式(2b)和(2c)的离散系统系数矩阵分别为

$$A_q = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.005 & 1 & 0.005 & 0 \\ 0.005 & 0 & 1.010 & 1 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.010 & 1 & 1.005 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_q = \begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ 0.000 & 0 \\ 0.005 & 0 \end{bmatrix}, D_q = \begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ 0.010 & 1 \\ 0.007 & 6 \end{bmatrix},$$

$$f_{1q} = \begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ -0.005 & 0 \\ 0.000 & 0 \end{bmatrix}, f_{2q} = \begin{bmatrix} 0.010 & 0 \\ 0.005 & 1 \\ 0.005 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.002 & 5 & 1.010 & 0 & 1.002 & 5 \\ 1.005 & 0 & 2.012 & 6 & 0.002 & 5 \\ 0.005 & 0 & 2.015 & 1 & 1.002 & 5 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.002 & 5 \\ 0.002 & 5 \\ 1.002 & 5 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1.008 & 8 \\ 2.012 & 6 \\ 1.513 & 6 \end{bmatrix},$$

$$f_1 = \begin{bmatrix} 0.997 & 5 \\ -1.002 & 5 \\ 0.005 & 0 \end{bmatrix}, f_2 = \begin{bmatrix} 2.005 & 0 \\ 1.010 & 0 \\ 1.007 & 5 \end{bmatrix},$$

$$C = C_q = C_c.$$

比较系数矩阵知, 当 $T \rightarrow 0$ 时, q 算子模型出现矩阵奇异现象, 算子模型参数趋于相应的连续模型参数, 减小了从离散模型到连续模型的近似误差.

对于方程(4), 设其闭环特征值不相同, $r = m$. 由 $\text{rank}(CF) = 2$ 知, 故障 f_1 与 f_2 可分离. 因为 $q_1 = \text{rank}(M_1) = 1, q_2 = \text{rank}(M_2) = 2, v_1 = 2, v_2 = 1, v_1 + v_2 = 3 = n$, 所以 F 中故障互相可检测.

对于 $v_1 = 2$, 在 $(G) \subset D(-1/T, 1/T)$ 内, 可任选与 f_1 检测空间相对应的特征值 $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -2$; 对于 $v_2 = 1$, 选取 $\lambda_3 = -3$ 对应于 f_2 的检测空间. 应用方程(16)可求得增益阵

$$L = \begin{bmatrix} 3.007 & 5 & 5.015 & 1 & 2.015 & 1 \\ 4.990 & 1 & 2.010 & 0 & 4.012 & 5 \end{bmatrix}^T.$$

系统无故障时的输出残差如图 1 所示. 在 $k =$

400 时发生单位阶跃型故障 $m(k)$ 和 $n_2(k)$, $d(k)$ 是零均值白噪声, 系统输出残差如图 2 所示. 连续系统的仿真结果如图 3 所示.

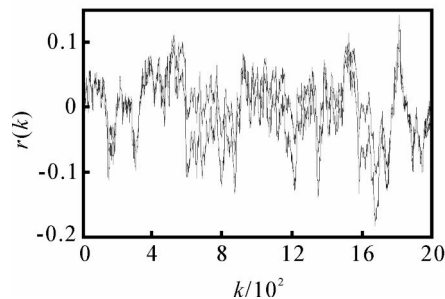


图 1 无故障时仿真结果

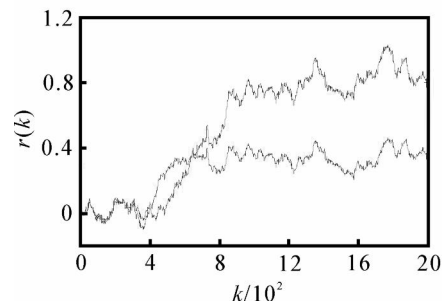


图 2 基于 Delta 算子的故障检测

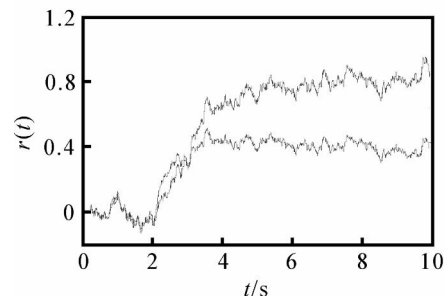


图 3 连续系统的检测结果

从图 1 和图 2 可以看出, 基于 Delta 算子的故障检测滤波器能检测出故障, 故障 f_1 和 f_2 输出可分离, 故障检测灵敏度高, 计算量小, 并可实现在线实时检测. 由图 2 和图 3 可知, 在采样周期较小时, Delta 算子离散系统的检测结果接近于连续系统的检测结果.

5 结 论

本文给出了基于 Delta 算子模型描述的离散系统故障检测滤波器的设计. Delta 算子是统一的模型描述形式, 可将连续系统和离散系统的故障检测滤波器的设计统一到 Delta 算子框架. 仿真结果证明, 该方法能避免出现病态条件问题, 具有良好的故障分离性能, 检测灵敏度高, 计算量小, 并可实时检测.

参考文献 (References)

[1] 张萍, 王桂增, 周东华. 动态系统的故障诊断方法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(2): 153-158.

(Zhang Ping, Wang Gui-zeng, Zhou Dong-hua. Fault diagnosis methods for dynamic systems [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(2): 153-158.)

[2] 张爱玲, 张文英, 张端金. 控制系统故障检测与诊断技术的最新进展[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 659-664.

(Zhang Ai-ling, Zhang Wen-ying, Zhang Duan-jin. Survey on fault detection and diagnosis for control systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 659-664.)

[3] Beard R V. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1971.

[4] 彭涛, 桂卫华, Ding S X, 等. 一种故障检测滤波器的多目标优化设计方法[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 773-777.

(Peng Tao, Gui Wui-hua, Ding S X, et al. Multi-objective optimal design approach to fault detection filters [J]. Control and Decision, 2005, 20(7): 773-777.)

[5] 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

(Zhou Duan-hua, Sun Your-xian. Fault detection and diagnosis for control systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.)

[6] 张端金, 王忠勇, 吴捷. 系统控制和信号处理中的 Delta 算子方法[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 385-391.

(Zhang Duan-jin, Wang Zhong-yong, Wu Jie. Survey on system control and signal processing using the Delta operator [J]. Control and Decision, 2003, 18(4): 385-391.)

[7] Middleton R H, Goodwin G C. Improved finite word length characteristics in digital control using Delta operator [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1986, 31(11): 1015-1021.

[8] 李渭华, 萧德云, 方崇智. 基于算子的格形故障检测滤波器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 413-419.

(Li Wei-hua, Xiao De-yun, Fang Chong-zhi. Delta operator-based lattice fault detection filter [J]. Acta Automatica Sinica, 1994, 20(4): 413-419.)

[9] 刘满, 井元伟, 张嗣瀛. Delta 算子系统 D 稳定鲁棒容错控制[J]. 东北大学学报, 2004, 25(8): 715-718.

(Liu Man, Jing Yuan-wei, Zhang Si-ying. D -stable robust fault tolerant control for Delta operator systems [J]. J of Northeastern University, 2004, 25(8): 715-718.)

[10] White J E, Speyer J L. Detection filter design: Spectral theory and algorithms [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1987, 32(7): 593-603.