

文章编号: 1001-0920(2008)10-1186-06

基于观测器的飞行器时变控制效益估计算法

池 沛, 陈宗基, 魏 晨, 周 锐

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 研究飞行器时变控制效益的在线估计方法, 证明了系统控制效益可估计的充分条件. 针对效益矩阵分段连续时变的情形, 给出了基于观测器、方程求解和最小二乘法的在线估计方法, 分析和证明了算法的收敛性. 数值仿真结果表明, 该算法能快速估计时变控制效益, 具有良好的稳定性和鲁棒性.

关键词: 控制效益; 故障诊断; 在线估计; 观测器; 最小二乘法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Estimation algorithms of time-varying control effectiveness for flight vehicles based on observers

CHI Pei, CHEN Zong-ji, WEI Chen, ZHOU Rui

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China. Correspondent: CHI Pei, E-mail: chipei@buaa.edu.cn)

Abstract: The on-line estimation methods for the time-varying control effectiveness of linear control system are investigated. Sufficient conditions for the matrix to be estimable are given in different cases. The corresponding on-line estimation algorithms based on the observer, equation-resolving and Least-Square (LS) methods are proposed, which are proven to be convergent. The simulation results also illustrate the effectiveness and the robustness of the algorithms.

Key words: Control effectiveness; Fault diagnosis; On-line estimation; Observer; Least-square methods

1 引 言

系统的控制效益反映了单位控制输入所产生的控制效能, 其变化反映了执行机构故障、控制效应器故障、外部环境变化等不确定因素. 实时估计系统的控制效益, 对于在线了解系统和环境的不确定性, 重构系统并增加系统对不确定因素的自适应能力具有重要意义.

故障诊断是一类重要的控制效益估计问题, 主要理论方法包括基于模糊逻辑、神经网络等智能方法的故障估计^[1-4], 基于滤波器和观测器的故障诊断^[5-13], 基于参数辨识^[14]以及集成多种方法的故障诊断^[8, 14].

基于观测器的故障估计方法, 包括常规观测器^[5-9]、滑模变结构观测器^[10, 11]、自适应观测器^[12, 13]等. 例如: 文献[9]针对飞行中典型的操纵面损伤故障, 以故障检测滤波器为基础, 提出一种故障检测及

诊断算法, 但只适用于故障后系统控制效益一定时间内不再发生二次变化的情况. 文献[13]基于自适应控制方法给出一种线性时不变系统的故障诊断方法, 但不适用于一般快时变的控制效益的估计和诊断. 在由环境变化引起的时变控制效益估计中, 目前尚缺乏有效的方法. 而现有的故障诊断和基于系统参数辨识的方法, 由于慢时变等条件的制约, 不能估计连续时变控制效益.

本文给出了系统控制效益分段连续时变时可估计的充分条件, 提出了相应的估计算法, 并对其收敛性等作了必要证明和仿真分析.

2 问题描述

考虑线性定常系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), y(t) = Cx(t). \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$, $y \in R^p$, $u \in R^m$. 假设 $t_0 = 0$, 则系统(1)的解可由下式给出:

收稿日期: 2007-07-17; 修回日期: 2007-11-07.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90205011); 航空基础科学基金项目(2005ZB51019).

作者简介: 池沛(1980—), 男, 山西朔州人, 博士生, 从事自适应控制、智能控制的研究; 陈宗基(1943—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、飞行控制等研究.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2)$$

故障或控制效益变化情形的系统方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BK(t)u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中对角阵 $K(t)$ 定义为系统的控制效益矩阵,即

$$K(t) = \begin{bmatrix} k_1(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2(t) & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_m(t) \end{bmatrix}$$

第 i 个分量 $k_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 表示第 i 个控制量在 t 时刻的控制效益,即单位输入下产生的控制作用对应于初始时刻的比例(控制作用中有效部分相对于初始时刻的比例),用以表征故障估计中执行机构的损伤程度,以及一般时变情形下的控制效率变化程度。

空气密度的连续变化、执行机构的突发故障等,都会引起控制效益的变化。 k_i 的范围取决于初始时刻的选择,在故障估计中,若选系统正常运行初态

$$K_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则有 $k_i \in [0, 1]$ 。

为研究控制效益的可估计性,引入如下条件:

- 1) 系统 (A, B, C) 完全可控可观;
- 2) 系统控制矩阵 B 列满秩;
- 3) 系统控制输入分段连续,且 $u_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, m$ 。

注1 条件 1) 和 3) 容易满足,条件 2) 将在 4.2 节讨论。

3 常值跃变的控制效益估计

在故障估计中,通常遇到的一次故障定义为 t_f 时刻发生的矩阵 K 各元素的跳变,且在一定时间内保持为常值。即

$$K(t) = \begin{cases} I, & t < t_f; \\ K_c, & t \geq t_f. \end{cases}$$

其中

$$K_c = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_m \end{bmatrix}$$

这类问题具有一定的代表性。

3.1 系统可估计性

不失一般性,假设 $p = m$ 。文献[9]简要说明了系统可控可观时控制效益的可估计性,并且证明了当 $p = m$ 时,通过观测器方法可估计的最大故障维数为 $\min\{p, m\}$ 。本文给出更加严格的结论。

定理 1 对于线性系统 (1) 和故障方程 (3),如果条件 1) ~ 3) 满足,则全部控制量的控制效益可估计。

证明 因为 $K = K_c = \text{const}$,由式(2)可知,故障状态或控制效益变化后的系统输出为

$$y(t) = Ce^{At}x(0) + \int_0^t Ce^{A(t-\tau)}BK_cu(\tau)d\tau = Ce^{At}x(0) + \int_0^t Ce^{A(t-\tau)}B\bar{u}(\tau)d\tau \bar{K}_c$$

其中

$$\bar{u}(\tau) = \begin{bmatrix} u_1(\tau) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_2(\tau) & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & u_m(\tau) \end{bmatrix}, \quad \bar{K}_c = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_m]^T \quad (4)$$

对于分段连续的输入

$$u(\tau) = [u_1(\tau) \ u_2(\tau) \ \dots \ u_m(\tau)]^T,$$

显然 $Ce^{A(t-\tau)}B\bar{u}(\tau)$ 有限时间可积,即 $\int_0^t Ce^{A(t-\tau)}B\bar{u}(\tau)d\tau < \infty$,记为 R 。因此如果系统满足条件 1) ~ 3),则对角阵 K 的各元素 k_i 可由如下方程唯一确定:

$$y(t) = Ce^{At}x(0) + R\bar{K}_c \quad (5)$$

由此定理得证。

3.2 常值跃变的控制效益估计算法

对于常值跃变的控制效益,引入故障矩阵为对角阵

$$K_s = \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{s2} & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_{sm} \end{bmatrix}$$

该矩阵反映了故障发生后控制效能损失的比例,且满足 $K = I - K_s$ 。故障发生后,系统方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B(I - K_s)u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

故障诊断观测器为

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (7)$$

令估计误差 $e = x - \hat{x}$,则有

$$\begin{cases} \dot{e} = (A - LC) - BK_s u \\ e_1 = C - y - C\hat{x}, \quad e_1 \in R^p \end{cases} \quad (8)$$

定理 2 假设 $p = m$, 选择 L 使 $A - LC$ 稳定, 定义 $\bar{1} = [C(A - LC)^{-1}B]^{-1}$. 如果输入 $u(t)$ 为常值, 则系统故障矩阵对角线各元素 k_{si} 由下式给出:

$$k_{si} = \bar{1}_i / u_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

证明 由于 $p = m, A - LC$ 稳定, 如果输入 $u(t)$ 为常值, 则有界且趋于常值. 由式(8)可知 $\dot{1} = (A - LC)1 - BK_s u$ 也有界, 因此 $1 = (A - LC)1$ 有界, 1 一致连续. 根据巴巴拉特引理, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\dot{1} \rightarrow 0$, 因此稳态时 $0 = (A - LC)1 - BK_s u$, 所以

$$\begin{cases} 1 = (A - LC)^{-1}BK_s u, \\ \bar{1} = C = C(A - LC)^{-1}BK_s u. \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中 $\bar{1}$ 和 $K_s u$ 成比例, 由系统矩阵和观测器的闭环系统矩阵唯一确定. 初始 $K = I$ 时, 该诊断观测器相当于普通状态观测器, 稳态输出为 0. 故障时 k_{si} 可由下式给出:

$$\begin{aligned} \bar{1} &= [C(A - LC)^{-1}B]^{-1}1 = K_s u, \\ \bar{1}_i / u_i &= k_{si}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

由此定理得证.

计算各控制量的控制效益 $k_i = 1 - k_{si}$. 由于 K 为常值, 利用式(9)可保证残差在稳态时收敛. 在非正常值输入下, 通常不能直接利用上述估计算法.

4 时变控制效益估计

在工程应用中, 控制效益不一定是常值跳变. 例如空天飞行器穿越大气层时, 控制矩阵随高度变化而变化. 假设飞行器匀速下降, 以纵向短周期运动为例, 其控制矩阵 B 中的力矩系数满足

$$M = -\frac{1}{l_y} \left(\frac{1}{2} V_0^2 c_A S_w C_m e \right) \triangleq C. \quad (11)$$

其中: l_y, c_A, S_w 为飞行器气动外形参数; ρ 为大气密度; V_0 为空速.

空气密度随高度的变化可用某二次多项式拟合. 图 1 给出了对高度在 0 ~ 20 km 范围内空气密度变化的拟合曲线, 近似为

$$\rho(H) = 0.0026 H^2 - 0.1076 H + 1.2156. \quad (12)$$

以飞行器匀速下降为例, 有 $H = H_0 + v_h t$. 代入式(11), 可知 M_c 满足

$$M_c = at^2 + bt + c. \quad (13)$$

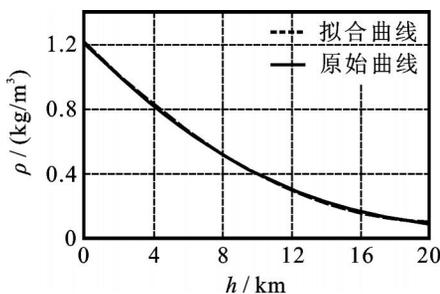


图 1 多项式拟合密度 - 高度的函数关系

其中: H 为飞行高度; H_0 为其初始值; v_h 和 t 分别为垂直速度和时间; a, b, c 为常值系数.

在飞控领域, 类似时变规律的控制效益较为常见. 以下研究基于函数拟合的估计算法.

4.1 系统可估计性

首先研究控制效益矩阵按时间的幂次规律变化 (即 $K(t) = K_c t^N$ 或 $k_i(t) = K_i t^N$) 的估计方法.

定理 3 考虑线性系统(3), 假设控制效益矩阵按如下规律变化:

$$K(t) = K_c t^N = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & k_m \end{bmatrix} t^N. \quad (14)$$

其中: $N > 0$ 为已知常数, $k_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为未知常数. 如果条件 1) ~ 3) 满足, 则系统全部控制量的控制效益可估计.

证明 因为 $k_i(t) = K_i t^N (i = 1, 2, \dots, m)$, 由式(2)可知, 故障状态或控制效益变化后的系统输出为

$$\begin{aligned} y(t) &= Ce^{At} x(0) + \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B K_c t^N u(\tau) d\tau = \\ &= Ce^{At} x(0) + \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) t^N d\tau \bar{K}_c, \end{aligned}$$

其中 \bar{K}_c 和 $\bar{u}(\tau)$ 由式(4)给出. 对于分段连续的输入 $u(t)$ 和有限自然数 N , $Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) t^N$ 有限时间可积, 即 $\int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) t^N d\tau < \infty$, 记为 $R(t)$. 如果条件 1) ~ 3) 满足, 则 $k_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 可由如下方程唯一确定:

$$y(t) = Ce^{At} x(0) + R(t) \bar{K}_c. \quad (15)$$

由此定理得证.

对于控制效益按多项式规律变化的情形, 有如下定理:

定理 4 考虑线性系统(3), 假设第 i 个控制效益

$$k_i(t) = k_{i0} + k_{i1} t + \dots + k_{iN} t^N. \quad (16)$$

其中: $k_{ij} = \text{const}, i = 1, 2, \dots, m, j = 0, 1, \dots, N$. 如果条件 1) ~ 3) 满足, 则系统全部控制量的控制效益可估计.

证明 记 $k_{cj} = [k_{1j}, k_{2j}, \dots, k_{mj}]^T, j = 0, 1, \dots, N$, 其中 $k_{ij} = \text{const}$. 由式(3)知

$$\begin{aligned} y(t) &= Ce^{At} x(0) + \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B K(\tau) u(\tau) d\tau = \\ &= Ce^{At} x(0) + \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) \bar{K}(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\bar{K}(\tau) = [k_1(\tau), k_2(\tau), \dots, k_m(\tau)]^T$. 为简化起见, 记 $\bar{y}(\tau) = y(\tau) - Ce^{A\tau} x(0)$, 则有

$$\bar{y}(t) = \int_0^t \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) d k_{cj}. \quad (18)$$

对于分段连续的输入和确定的自然数 N , 易知 $Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) d$ 有限时间可积, 即 $\int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) d < \infty$, 记为 $R_j(t)$. 因此

$$\bar{y}(t) = \int_0^t R_j(t) k_{cj}. \quad (19)$$

其中: $\bar{y}(t) \in R^{p \times 1}$, $R_j(t) \in R^{p \times m}$, $k_{cj} \in R^{m \times 1}$. 重新整理并记

$$R(t) = [R_0(t) \quad R_1(t) \quad \dots \quad R_N(t)],$$

$$a = [k_{10} \quad \dots \quad k_{m0} \quad k_{11} \quad \dots \quad k_{m1} \quad \dots \quad k_{1N} \quad \dots \quad k_{mN}]^T.$$

其中: $R(t) \in R^{p \times (N+1)m}$, $a \in R^{(N+1)m \times 1}$, 式(19)可整理成

$$\bar{y}(t) = R(t) a. \quad (20)$$

根据假设 $p = m$, 取 $N + 1$ 个时间点 $t_l (l = 0, 1, \dots, N)$, 构成如下矩阵方程:

$$Y = Wa. \quad (21)$$

其中

$$Y = \begin{bmatrix} \bar{y}(t_0) \\ \bar{y}(t_1) \\ \dots \\ \bar{y}(t_N) \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} R(t_0) \\ R(t_1) \\ \dots \\ R(t_N) \end{bmatrix}.$$

如果满足条件 1) ~ 3), 则当初态已知或可估计时, k_{ij} 可由方程(21) 唯一确定. 当 W 奇异或系统存在干扰和噪声影响时, 通过解方程的方法求解 k_{ij} 便不再适用, 可采用最小二乘法估计

$$\hat{a} = (W^T W)^{-1} W^T Y. \quad (22)$$

由此定理得证.

定理 3 和定理 4 的结论可推广到更一般的情形.

定理 5 考虑线性系统(3), 假设第 i 个控制效益按如下规律变化:

$$k_i = k_{i0} \phi_i(t) + k_{i1} \psi_i(t) + \dots + k_{iN} \chi_i(t).$$

其中: $\phi_i(t)$ 分段连续且已知; $i = 0, 1, \dots, m$. 如果条件 1) ~ 3) 满足, 则系统全部控制量的控制效益可估计.

4.2 估计算法

时变控制效益估计的算法步骤总结如下:

步骤 1: 首先检验系统是否符合定理 5 条件, 如果符合, 则可利用下面的算法估计.

步骤 2: 选取采样时刻 $t_k (k = 0, 1, \dots, N)$, 求解 t_k 时的矩阵 $R(t_k) = [R_0(t_k) \quad \dots \quad R_N(t_k)]$, 其中 $R_j(t) = \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) d$. 进而利用 $N + 1$ 个 $R(t_k)$ 构造矩阵 W .

步骤 3: 选择初值, 利用式(22) 并用最小二乘法建立估计器, 估计时变控制效益 K . 对于病态方程问题, 可以利用 H 变换求解.

在估计算法步骤 2 中, W 的确定要求求解 $R_j = \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}(\tau) d$. 为此引入变量

$$S_j = \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B u(\tau) d. \quad (23)$$

S_j 即为原系统控制效益矩阵为单位阵, 输入为 $u(t)$ 时的零初态输出, 可以设计观测器进行跟踪, 将 $\bar{u}(\tau)$ 分块为

$$\bar{u}(\tau) = \begin{bmatrix} u_1(\tau) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_2(\tau) & \ddots & \dots \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & u_m(\tau) \end{bmatrix} = [\bar{u}_1(\tau) \quad \bar{u}_2(\tau) \quad \dots \quad \bar{u}_m(\tau)]. \quad (24)$$

则有

$$R_j = \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B [\bar{u}_1(\tau), \bar{u}_2(\tau), \dots, \bar{u}_m(\tau)] d = \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}_1(\tau) d, \dots, \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} B \bar{u}_m(\tau) d d]. \quad (25)$$

引入输入

$$u_{s1}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dots, \quad u_{sm}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ u_m(t) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

相应地, 利用原系统的数学模型或观测器, 构造出单位控制效益矩阵下的零初态输出

$$y_{s1}(t) = \begin{bmatrix} y_{s11}(t) \\ y_{s12}(t) \\ \dots \\ y_{s1p}(t) \end{bmatrix}, \quad \dots, \quad y_{sm}(t) = \begin{bmatrix} y_{sm1}(t) \\ y_{sm2}(t) \\ \dots \\ y_{smp}(t) \end{bmatrix}. \quad (27)$$

当初态非零时, 由于实际系统状态的可测性, 可用测量或估计所得的初始条件计算式(27) 中的输出值, 故有

$$R_j = [y_{s1} \quad y_{s2} \quad \dots \quad y_{sm}]. \quad (28)$$

定理条件 2) 在 $m = n$ 时易于满足, 但该条件并非必要条件. 例如当 $m < n$ 时, 该条件有时并不满足. 对于广泛使用的冗余异类操纵面, 有 $m > n$, 条件 2) 无法满足列满秩. 此时若在式(21) 中选择 $t_l (l = 0, 1, \dots, N)$ 使 W 满秩, 则控制效益仍可以前述方法辨识, 故定理条件易于满足. 对于某未知变化规律

的控制效益阵,可选择满足条件的基底进行拟合和在线估计.

5 仿真算例

以某空天飞行器纵向短周期运动的控制为例,对前述算法进行仿真.控制系统为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_0 K(t) u(t), y(t) = Cx(t).$$

选取状态变量 $x = \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}$ 分别为攻角和俯仰角速度,

控制输入 $u = \begin{bmatrix} \delta \\ \mu \end{bmatrix}$ 分别为升降舵和襟翼偏转角度.

飞行器在 20 km 时,空气密度约为 0.1036 kg/m³,矩阵

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0.0004 & -0.0360 \\ 0.0584 & -0.2113 \end{bmatrix}.$$

假设该飞行器以 0.4 km/s 的垂直速度匀速下降,对由密度变化引起的时变控制效益矩阵在线估计.选择变化结构

$$K = \begin{bmatrix} k_{10} + k_{11}t + k_{12}t^2 & 0 \\ 0 & k_{20} + k_{21}t + k_{22}t^2 \end{bmatrix},$$

拟合控制效益矩阵,容易验证系统可控可观,且矩阵 B 满秩.配平状态下系统输入为 $u(t) = [-4.3, -3.2]^T$,可知系统符合定理 5 的条件,控制效益矩阵可估计.分别利用方程求解法和最小二乘法估计有无噪声干扰时的控制效益矩阵.

无噪声扰动时用直接求解方程的方法,取若干数据点构造方阵 w ,对 K 进行估计.图 2 给出了 K 的动态估计过程.可见控制效益估计值收敛快,动态过程平稳,动态特性较好.图 3 给出了对应的

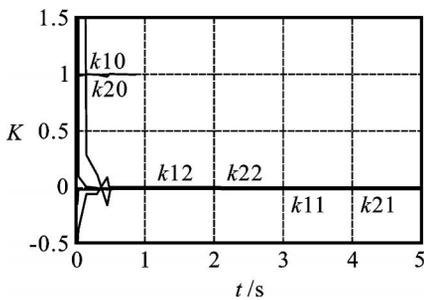


图 2 无噪声时用解方程法估计 K

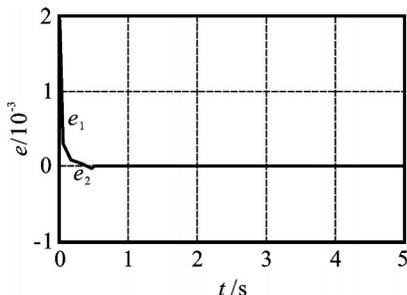


图 3 无噪声时用解方程法估计 $B_0 K(t) u(t)$ 的误差

$B_0 K(t) u(t)$ 估计误差.可见系统能迅速收敛至 10^{-4} 数量级, $k_{10} = k_{20} = 1, k_{11} = k_{21} = -0.0135, k_{12} = k_{22} = 0.004$,可准确估计和拟合实际变化规律.

给系统输出施加等幅零均值白噪声干扰,仿真结果如图 4 所示.可见直接求解方程的估计方法对噪声不具有抑制作用,估计结果不平稳,出现了非平滑跳变.相比之下,图 5 利用限定记忆的最小二乘法,对噪声具有良好的抑制作用,估计结果受噪声影响较小.

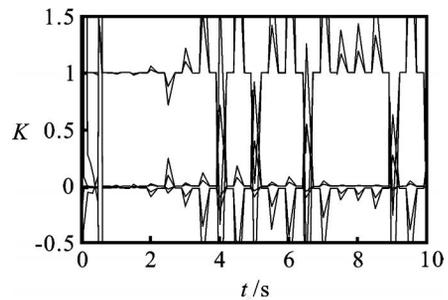


图 4 有噪声时用解方程法估计 K

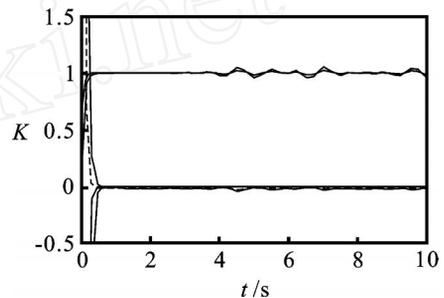


图 5 有噪声时用最小二乘法估计 K

时变控制效益估计算法具有简单稳定、快速鲁棒等特点,可从原理上解决对时变控制效益的估计问题,但其工程实用性还需在实践中进一步提高和验证.

6 结 论

本文研究飞行器时变控制效益的可估计问题,给出了飞行器控制效益的定义,以及系统控制效益矩阵几种时变情况下可估计的充分条件.基于最小二乘法给出了在线估计算法.

典型的故障诊断算法大多针对突发的跳变故障等情形,对一般的连续时变控制效益还缺乏研究.本文结论适用于一般连续时变的控制效益估计,可用于故障估计与自修复系统、空天飞行器的自主控制等领域.

参考文献(References)

- [1] Patton R J, Chen J, Siew T M. Fault diagnosis in nonlinear dynamic systems via neural networks[C]. Int Conf on Control. Corentry, 1994, 2: 1346-1351.
- [2] Patton R J, Chen J, Lopez C J. Fuzzy observers for nonlinear dynamic systems fault diagnosis[C]. Proc of

- 37th IEEE Conf on Decision and Control. Tampa, 1998, 1: 84-89.
- [3] Ning Lv, Xiaoyang Yu, Junfeng Wu. A fault diagnosis model through GK fuzzy clustering[C]. 2004 IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. The Hague, 2004, 6: 5114-5118.
- [4] Laukonen E G, Passino K M, Krishnaswami V, et al. Fault detection and isolation for an experimental internal combustion engine via fuzzy identification [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1995, 3(3): 347-355.
- [5] Jaehong Park, Rizzoni G. An eigenstructure assignment algorithm for the design of fault detection filters [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(7): 1521-1524.
- [6] Diego Del Gobbo, Marcello Napolitano, Parviz Famouri, et al. Experimental application of extended Kalman filtering for sensor validation[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2001, 9(2): 376-380.
- [7] Kabore P, Wang H. Design of fault diagnosis filters and fault-tolerant control for a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(11): 1805-1810.
- [8] Gianluca Antonelli, Fabrizio Caccavale, Carlo Sansone, et al. Fault diagnosis for AUVs using support vector machines [C]. Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Robotics & Automation. New Orleans, 2004: 4486-4491.
- [9] 张平, 陈宗基. 用于检测操纵面损伤的故障检测滤波器 [J]. 航空学报, 1999, 20(4): 371-373.
(Zhang P, Chen Z J. Fault detection filter for the control surface failures of aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(4): 371-373.)
- [10] Jiang B, Staroswiechi M, Cocquempot V. Fault estimation in nonlinear uncertain systems using robust/sliding-mode observers [J]. IEE Proc of Control Theory Application, 2004, 151(1): 29-37.
- [11] Yi Xiong, Mehrdad Saif. Robust and nonlinear fault diagnosis using sliding mode observers [C]. Proc of 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 567-572.
- [12] Marcel Staroswiechi, Bin Jiang. Fault identification for a class of linear systems based on adaptive observer [C]. Proc of 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 2283-2288.
- [13] Hong Wang, Zhen Huang, Steve Daley. On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis[J]. Automatica, 1997, 33(2): 217-225.
- [14] Cesare Fantuzzi, Silvio Simani, Sergio Beghelli. Robust fault diagnosis of dynamic processes using parametric identification with eigenstructure assignment approach[C]. Proc of 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 155-160.

(上接第 1185 页)

- [6] Keogh E, Chu S, Hart D, et al. Segmenting time series: A survey and novel approach[C]. Proc of IEEE Int Conf on Data Mining. Los Jose: IEEE Computer Society, 2001: 289-296.
- [7] Sylvie C, Carlos G B, Catherine C, et al. Trends extraction and analysis for complex system monitoring and decision support [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005, 18(1): 21-36.
- [8] Bakshi B R, Stephanopoulos G. Representation of process trends — : Multi-scale extraction of trends from process data [J]. Computers and Chemical Engineering, 1994, 18(4): 267-302.
- [9] Vedam H, Venkatasubramanian, V, Bhalodia M. A B-spline based method for data compression, process monitoring and diagnosis [J]. Computers and Chemical Engineering, 1998, 22(S1): 827-830.
- [10] Zhou Q, Cluett W. Recursive identification of time-varying systems via incremental estimation [J]. Automatica, 1996, 32(10): 1427-1431.
- [11] Simon H. Adaptive filter theory[M]. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- [12] Hawkins D M. Fitting multiple change-point models to data [J]. Computational Statistic & Data Analysis, 2001, 37(3): 323-341.
- [13] Wang Z J, Willett P. Joint segmentation and classification of time series using class-specific features [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics — Part B: Cybernetic, 2004, 34(2): 1056-1067.