

利用逆系统的故障诊断方法

夏常弟

万百五

(海信集团公司技术中心·青岛, 266071) (西安交通大学系统工程研究所·西安, 710049)

摘要: 故障诊断在现代控制系统中是一个重要的分支. 本文提出了一种新的故障诊断方法, 利用系统的逆检测故障, 并对故障源进行唯一定位且求出故障大小. 仿真和理论都证明了方法的正确性.

关键词: 逆系统; 故障诊断; 观测器

An Approach of Fault Diagnosis Using Inversion of System

Xia Changdi

(Center of Technology, Hisense Group Corporation·Qingdao, 266071, P. R. China)

Wan Baiwu

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University·Xi'an, 710049, P. R. China)

Abstract: Fault diagnosis is an important branch of modern control system. This paper presents a new approach of fault diagnosis, which makes use of the inversion of system to detect faults and can solely isolate the fault source and can get the magnitude of fault. The theory and simulation results show the correctness of this method.

Key words: inversion of system; fault diagnosis; observer

1 引言 (Introduction)

随着现代控制系统复杂性的增加, 人们对控制系统的可靠性要求也越来越高. 故障诊断技术是提高系统可靠性的有效方法之一. 因此故障诊断已成为控制系统研究的一个新领域. 本文针对线性系统提出了一种新的故障诊断方法, 该方法先使用一个观测器对系统的状态进行估计, 利用估计的状态构造 k 个稳定的逆系统, 每个逆系统对应于一种故障模式. 实际在线运行时, 只要运行一个逆系统. 当检测到故障时, 运行 k 个逆系统, 采用一定的方法进行故障定位并求出故障大小. 它与多模型滤波器方法比较, 前者不需要各种故障模式的先验概率. 故障检测时计算量不大, 并能得出故障的大小. 因此有着一定的应用价值. 本文第 2 节将简单介绍线性系统的逆, 第 3 节将详细论述新的故障诊断方法, 第 4 节将给出一个数字仿真实验结果.

2 逆系统简介 (Profile of inverse system)

动态系统的逆已广泛应用于控制、滤波、编码等^[1,2], 但用于故障诊断目前还未见到相应的文献. 设系统方程为

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{X} = AX + BU, & X(t_0) = X_0, \\ Y = CX + DU. \end{cases} \quad (1)$$

(2)

式中 $X \in \mathbb{R}^n$, $U \in \mathbb{R}^m$, $Y \in \mathbb{R}^p$, A, B, C, D 为恰当维数的矩阵.

定义 1 方程(1),(2)的系统 $\Sigma: U \rightarrow Y$, 如果存在一个相应的系统 $\Sigma^{-1}: Y \rightarrow U$ 使得当 $V(t) = Y(t)$ 时, 有 $W(t) = U(t)$ 成立, 则称系统 Σ^{-1} 为系统 Σ 的左逆系统. 简称系统 Σ 可逆.

定理 1 系统 Σ 的逆系统 Σ^{-1} 是渐近稳定的, 当且仅当对所有右半平面的复数 λ 即 $\text{Re}(\lambda) \geq 0$, 有 $\text{rank } M(\lambda) = n + m$ 成立. 式中:

$$M(\lambda) \triangleq \begin{bmatrix} A - \lambda I & B \\ C & D \end{bmatrix}.$$

如果系统 Σ 的逆系统 Σ^{-1} 是渐近稳定的, 可以使用文献[2]的算法构造出来.

3 诊断方法 (Diagnosis approach)

设被诊断对象的数学模型为:

$$\Sigma^*: \begin{cases} \dot{X} = AX + BU + f_i d_i, & X(t_0) = X_0, \\ Y = CX. \end{cases} \quad (3)$$

(4)

式中, X, U, Y, A, B, C 同 Σ 式, $f_i \in \mathbb{R}^n$ 为故障向量, d_i 为标量, 它代表故障大小, $i = 1, 2, \dots, k$.

定义 2 对于系统 Σ^* , 当它只发生单故障时, 如果 $i \leq k, j \leq k, i \neq j, d_i \neq 0, d_j \neq 0$ 时, $f_i d_i$ 引起的系统响应 Y_i 与 $f_j d_j$ 引起的系统响应 Y_j 不相同即 $Y_i(\cdot) \neq Y_j(\cdot)$ 则称故障模式 f_i 与故障模式 f_j 是可区

分的. 如果系统的任意两个不同的故障模式是可区分的, 则称系统为单故障源可隔离的.

定理 2 系统 Σ^* 单故障源可隔离的充分必要条件是 $\forall i \leq k$, 对于任意 $j \neq i$ 且 $j \leq k$, 有 Cf_i 与 Cf_j 线性无关.

3.1 故障检测 (Fault detection)

现在, 我们将系统 Σ^* 看为 d_i 为输入、 Y 为输出的 k 个系统, 分别称为系统 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 并假定它们都满足定理 1 的渐近稳定逆的条件, 则我们按文献[2] 可构造逆系统 $\Sigma_1^{-1}, \Sigma_2^{-1}, \dots, \Sigma_k^{-1}$. 然而对于 $\Sigma_1^{-1}, \Sigma_2^{-1}, \dots, \Sigma_k^{-1}$, 必须已知 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 的整个时刻的状态来构造 $\Sigma_1^{-1}, \Sigma_2^{-1}, \dots, \Sigma_k^{-1}$, 或者已知 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 的初始状态, 逆系统自己进行动态运算. 在已知 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 的整个时刻的状态下, 逆系统不需要进行动态运算, 其计算量要少得多. 无故障情况下 Σ^* 的状态即为 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 的状态, 因此, 在 Σ^* 可观时, 构造 Σ^* 的状态观测器 $\tilde{\Sigma}$, 无故障情况下 $\tilde{\Sigma}$ 的状态 $\tilde{X}$ 作为 Σ^* 的状态 X , $\Sigma_1^{-1}, \Sigma_2^{-1}, \dots, \Sigma_k^{-1}$ 不需要进行动态运算, 只需经过加、减、乘代数运算就能得出 $d_1, \dots, d_k$. 此外构造出的逆系统 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_k$ 可能还需 Y 的导数, $\dot{Y}$ 甚至高阶导数作为输入量. 这在工程实际环境中是有噪声情况下是难以实现的, 因此将 Y 的各分量通过低通滤波器 $T(s)$, 由于 Σ^{-1} 为线性系统, 其另一个输入也必须通过同样的低通滤波器, 才能保证 $\tilde{d}_i$ 是 d_i 通过同样低通滤波器的结果.

$$\tilde{U}(s) = T(s)U(s).$$

上式中, $T(s)$ 为标量. 在无故障情况下 $d_i = 0$, 由于 $\tilde{d}_i = T(s)d_i(s)$ 所以逆系统的输出

$$\tilde{d}_i = 0.$$

定理 3 对于 k 种故障模式, 系统 Σ^* 分别对应于系统 $\Sigma_1, \dots, \Sigma_k$. 它们的渐近稳定逆系统存在. 系统在 $t = t_0$ 时发生永久性故障, 则 $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}$ 在 $t = t_0$ 瞬态及稳态有

$$\tilde{d}_i(t) \neq 0.$$

3.2 故障定位 (Fault isolation)

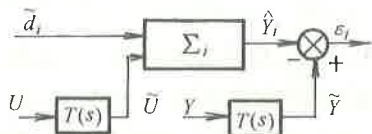


图 1 故障定位单元

Fig. 1 Fault isolation unit

当检测到系统发生故障时, 由定理 3 得知对所有 i , 有 $|\tilde{d}_i| \neq 0$. 因此, 简单地由 $\tilde{d}_i$ 信息无法直接进行故障定位. 这里我们先给出故障定位方法, 最后, 我们

给出证明. 图 1 为故障定位的一个计算单元.

故障隔离算法:

1) 设 $i = 1$;

2) 当在时刻 t 检测到系统发生故障时, 这时 $\tilde{\Sigma}$ 不能作为原系统的状态观测器, 停止 $\tilde{\Sigma}$ 运算, 选一适当小的正数 Δ , 因 $t - \Delta$ 时刻系统正常, 这时 $\tilde{\Sigma}$ 的状态作为初始状态给 Σ_i^{-1} , Σ_i^{-1} 自己进行动态运算得出正确的 $\tilde{d}_i$.

3) 将 $\tilde{d}_i, \tilde{U}$ 作为系统 Σ_i 的输入, 如图 1 所示. 给定一个正阈值 τ_1 , 如果 $\|\epsilon_i\| = \|\tilde{Y} - \hat{Y}_i\| < \tau_1$, 则系统故障为第 i 种故障, 结束. 否则进行第 4) 步;

4) $i = i + 1$, 转第 2) 步.

定理 4 上面给出的故障隔离算法对满足定理 2 条件的系统能做到单故障源的唯一故障定位.

4 仿真实验 (Simulation experiments)

设控制系统为

$$\dot{X} = AX + BU + f_i d_i,$$

$$Y = CX.$$

式中

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ -4 & -3 & 4 \\ -2 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$f_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, f_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, f_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, f_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$d_i = (i = 1, 2, 3, 4)$ 为标量, 它表示故障大小. 可以验证它满足定理 2、定理 1 的条件, 因此单故障源完全可隔离, 并能用逆方法求解. 用文献[2] 中求逆方法求解, 系统变换为

$$\dot{X}' = AX' + BU + f'_i d_i, \quad Y' = \tilde{C}X'.$$

式中 X, A, B, f_i, d_i 同前,

$$Y' = (y_1 \ y_2)^T, \quad \tilde{C} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \end{pmatrix}.$$

设

$$X' = TX, \quad T = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 1 & 2 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \end{pmatrix},$$

系统变为:

$$\dot{X}' = A'X' + B'U + f'_i d_i, \quad Y' = C'X'.$$

对于 d_1, d_2, d_3, d_4 分别得 4 个逆系统, 并且这 4 个逆

系统中都含有 $\dot{y}_1$ 或 $\dot{y}_2$, 因实际系统会有干扰, $\dot{y}_1$ 或 $\dot{y}_2$ 是很难测量的, 所以设计低通滤波器 $T(s) = \frac{12}{s + 12}$ 使这个低通滤波器只通过 y 的有效成分, 噪声被滤去. $T(s)$ 的选取原则是低通滤波器的频带正好是输出信号的频带, 因为 $\tilde{y}(s) = T(s)y(s)$, 所以 $\dot{\tilde{y}}(s) = 12y(s) - \frac{144}{s + 12}y(s)$ 它使导数 $\dot{y}_1$ 或 $\dot{y}_2$ 消失, 便于工程实现. 由线性系统性质可知, U 通过 $T(s)$ 后, 可确保逆系统的输出 $\tilde{d}_i$ 也是 d_i 通过 $T(s)$ 的滤波结果. 以上逆系统计算时, 须知 x'_1 状态, 它实

际为系统状态 X 通过 T 变换后的结果, 因此只要设计系统的观测器就能知道状态 x'_1 , 避免了逆系统的动态计算, 只须利用逆系统的输出方程就能求出 d_i . 图 2 为系统故障检测仿真波形图. 系统在 $t = 25$ 秒时出现第 1 种故障, 故障大小为 $d_1 = 2$, 图 2(a), (b), (c), (d) 分别为 $f_1 d_1, f_2 d_2, f_3 d_3, f_4 d_4$ 对应的逆系统所对应的输出 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \tilde{d}_3, \tilde{d}_4$. 从图看出, 大约在 $t < 8$ 秒时 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \tilde{d}_3, \tilde{d}_4$ 都不为零, 这是由于此时状态观测器尚未进入稳态, 在 $t \geq 8$ 秒时状态观测器进入稳态, $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \tilde{d}_3, \tilde{d}_4$ 都接近于零, 系统正常. 因此

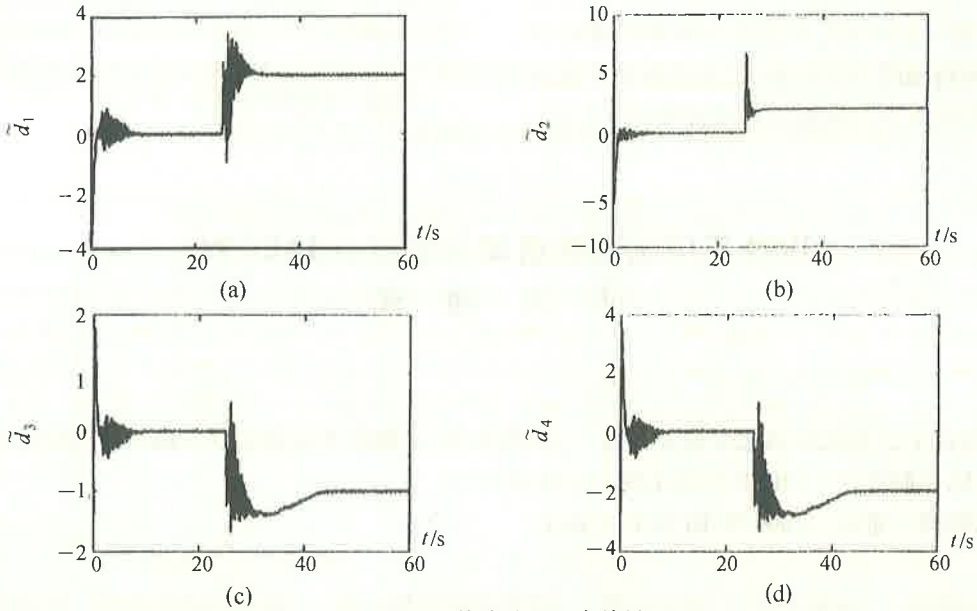


图 2 故障检测仿真结果
Fig. 2 Result of fault detection

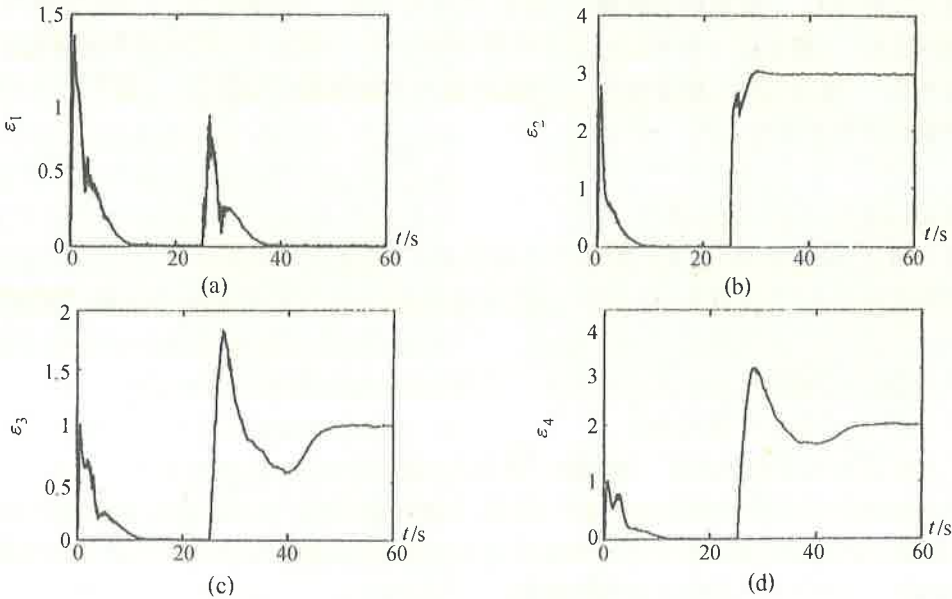


图 3 故障定位仿真结果
Fig. 3 Result of fault isolation

故障检测应在状态观测器进入稳态后进行. 在 $t > 25$ 秒时 $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3, \bar{d}_4$ 都不为零, 所以此时检测到系统发生故障. 图 3 为相应的故障定位仿真结果. 图 3(a)、(b)、(c)、(d) 分别为输出 $\|\epsilon_1\|, \|\epsilon_2\|, \|\epsilon_3\|, \|\epsilon_4\|$ 的波形, 从图看出稳态时 $\|\epsilon_1\| = 0$, 而 $\|\epsilon_2\|, \|\epsilon_3\|, \|\epsilon_4\|$ 都不为零. 因此故障源为第 1 种故障. 从图 2(a) 看出在 $t > 25$ 秒时 $\bar{d}_1$ 的稳态值为 2, 所以故障大小为 2. 这与理论结果一致.

5 结论(Conclusion)

本文提出利用系统逆的故障诊断方法, 理论分析和仿真实验都证明了方法的正确性. 本文的方法与多模型滤波器方法比较, 不需要各种故障模式的先验概率. 故障检测时计算量不大, 并能得出故障的大小. 本文提出的方法与故障灵敏滤波器方法比较,

它能求出故障大小与故障时的系统状态, 这样便于实现容错控制. 因此有着一定的应用价值.

参考文献(References)

- 1 李春文, 冯元琨. 多变量非线性系统的逆系统方法. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 2 Moylan P J. Stable inversion of linear systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, 22(1): 74 - 78

本文作者简介

夏常弟 1963 年生. 1994 年在西南交通大学获博士学位. 1995 年至 1997 年在西安交通大学系统工程研究所控制科学与工程博士后流动站做研究工作. 现在青岛海信集团公司空调研究所从事研究开发工作. 主要研究兴趣为系统故障诊断、智能控制等.

万百五 见本刊 1999 年第 1 期 38 页.

1999 年中国智能自动化会议(CIAC'99)

征 文 通 知

主办单位

·中国自动化学会智能自动化专业委员会 ·重庆大学 ·解放军后勤工程学院 ·中国人工智能学会计算机视觉及智能控制学会 ·IEEE 控制系统学会北京分会

会议地点时间 重庆 1999 年 10 月 13 - 16 日

征文范围

·人工神经网络 ·模糊系统 ·进化计算 ·计算智能及软计算 ·基于知识的控制 ·分层递阶智能控制 ·自适应、自组织、自学习及变结构等先进控制方法和技术 ·智能过程控制 ·机器人 ·人工智能及应用 ·智能管理与智能决策 ·智能信息处理 ·规划、调度与优化 ·智能设计 ·智能建模与仿真 ·智能制造 ·智能故障诊断 ·智能技术在通信与信息网络中的应用 ·智能人机界面及多媒体技术 ·虚拟现实技术 ·计算机视觉 ·模式识别与图象处理 ·智能测量及多传感器信息融合 ·智能自动化装置 ·智能交通系统 ·智能自动化系统及应用 ·其它

论文要求

- 在国内外杂志或会议上未曾发表过.
- 篇幅一般不超过 A4 纸 6 页, 论文后面请附不超过 200 字的主要作者简介.
- 本次会议将评选出 1~2 篇青年(35 岁以下)优秀论文, 除颁发获奖证书外, 并每篇奖励 1000 元.

关键日期

- 1999 年 4 月 30 日之前投送符合清稿要求的全文两份(不论录用与否, 恕不退还).
- 1999 年 5 月 31 日之前发出录用通知.

通信地址: 北京清华大学计算机系 100084 联系人: 钱宗华

电话: (010)62788939(O) (010)62784458(H) 传真: (010)62771138 e-mail: szq-dcs@mail.tsinghua.edu.cn

注 智能自动化会议论文集由清华大学出版社正式出版, 欲投稿者可向联系人索要论文规格要求, 稿件请注明投哪个会议.

中国自动化学会
智能自动化专业委员会