

文章编号: 1002-0411(2000)04-0297-07

一类基于非线性状态观测器的鲁棒故障检测

周 川¹ 吴晓蓓¹ 陈庆伟¹ 胡维礼¹ 周 雨²

(1. 南京理工大学自动化系 南京 210094; 2. 武汉军事经济学院基础部计算机中心 武汉 430035)

摘 要: 本文提出了一种新的基于非线性状态观测器的鲁棒故障诊断策略. 该方法在传统故障检测滤波器(FDF)的基础上, 针对一类满足 Lipschitz 条件的仿射非线性系统, 构造了非线性故障检测滤波器, 给出了故障检测增益阵的设计算法及其闭环观测误差系统稳定性的证明, 解决了非线性系统的故障可检测性问题. 在残差决策阶段, 采用模糊自适应门限的判决方法, 提高了故障检测的鲁棒性. 最后, 针对歼击机结构故障的仿真, 验证了本文方法的有效性.

关键词: 故障检测, 非线性观测器, 模糊决策, 歼击机

中图分类号: TP13

文献标识码: B

1 引言

传统的基于状态观测器的故障诊断方法目前面临两方面的困难, 其一是对于一般的非线性系统缺乏有效手段; 其二是当系统存在不确定性和扰动时如何保证故障检测与定位的鲁棒性^[1-4]. 故障检测滤波器(FDF, Fault Detection Filter)作为一种重要的故障检测方法最早由 Beard 于 1971 年提出, 它实质上是一个全阶状态观测器, 通过选取特殊的检测增益阵, 使得残差与特定的故障相联系, 并利用残差的方向性来进行故障的检测与定位. 1973 年 Jones 和 Massoumnia 提出了检测空间的概念, 给出了 FDF 方法的几何解释. 其后, White 和 Speyer 进一步发展了该方法, 即通过闭环特征结构配置来确定 FDF 的检测增益阵. 已有的故障检测滤波器方法对于非线性系统只能通过在工作点线性化以后再采用 FDF 方法进行检测. 因此, 本文首先在传统的故障检测滤波器方法的基础上, 将该方法推广到一类满足 Lipschitz 条件的非线性系统, 给出了稳定的非线性状态观测器的设计方法, 证明了基于残差信息的故障可检测性; 为了提高故障检测的鲁棒性, 在残差决策阶段引入模糊自适应阈值的方法, 从而克服模型误差和外部扰动等不确定因素对残差判决的影响.

2 系统描述

考虑如下非线性动态系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \mathcal{Q}(x, u, t) + \delta(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^p$ 分别为系统的状态、输入和输出向量, $\delta(t) \in R^n$ 为有界故障向量, 即 $\|\delta(t)\| \leq D$. $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{p \times n}$ 均为常数阵, $\mathcal{Q}(x, u, t)$ 为非线性项.

定义 1 对于函数 $f(x)$, 如果存在一个常数 γ 对任意的 $x_1, x_2 \in R^n$ 均满足以下不等式:

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq \gamma \|x_1 - x_2\| \quad (2)$$

收稿日期: 1999-07-05
基金项目: 国家自然科学基金(69974021)、中国博士后科学基金及高校博士点基金资助项目

则称 $f(x)$ 为全局 Lipschitz 函数.

在进行故障检测滤波器设计前, 对系统作如下假设:

假设 1

(1) 非线性高阶项 $\mathcal{Q}(x, u, t)$ 为全局 Lipschitz 函数.

(2) 系统 (A, C) 可观

(3) $C\Delta = [C\delta_1, C\delta_2, \dots, C\delta_r]$ 的秩为 r , 即故障模式在输出空间中独立, $\Delta \in R^{n \times r}$ 为已知的故障模式集

3 非线性故障检测滤波器设计

3.1 非线性观测器设计

若系统无故障, 即 $\delta(t) = 0$, 则对方程(1)构造如下形式的观测器:

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Ly + Bu + \mathcal{Q}(\hat{x}, u, t) \quad (3)$$

其中 \hat{x} 为状态估计值, $L \in R^{n \times p}$ 为观测器增益阵. 定义状态估计误差 $e = \hat{x} - x$, 则闭环误差系统为

$$\dot{e} = (A - LC)e + \mathcal{Q}(\hat{x}, u, t) - \mathcal{Q}(x, u, t) \quad (4)$$

观测器的设计问题就是选择合适的 L 阵使估计误差渐近趋于零.

下面给出一种直接稳定闭环误差系统的非线性观测器设计方法.

引理 1^[5] 对于给定的非线性系统(1)及其观测器(3), 如果 P 为任意对称正定矩阵, 则 $2e^T(\mathcal{Q}(x, u, t) - \mathcal{Q}(\hat{x}, u, t)) \leq \gamma^2 e^T P P e + e^T e$.

定理 1 对于给定的非线性系统(1)及其观测器(3), 若存在标量 $\eta > 0$, 使得如下代数 Riccati 方程

$$AP + PA^T + P(\gamma^2 I - \frac{1}{\eta} C^T C)P + I + \eta I = 0 \quad (5)$$

有对称正定解 P , 对所有的非线性项 $\mathcal{Q}(x, u, t)$ 和 Lipschitz 常数 γ , 选取观测器增益阵 L 为

$$L = (1/2\eta)PC^T \quad (6)$$

则闭环误差系统(4)稳定.

证明 由定理 2 假定, 对于一个标量 $\eta > 0$, 可以找到 Riccati 方程的对称正定解 P , 将 $L = (1/2\eta)PC^T$ 代入式(5)得

$$(A - LC)P + P(A - LC)^T + \gamma^2 PP + I + \eta I = 0 \quad (7)$$

由于 $\eta > 0$, 显然有

$$(A - LC)P + P(A - LC)^T + \gamma^2 PP + I < 0 \quad (8)$$

因上述矩阵不等式负定, 可知 $(A - LC)P + P(A - LC)^T < 0$, 则 $(A - LC)$ 为稳定矩阵.

取李亚普诺夫函数 $V = e^T P e$, 对其求一阶导数

$$\dot{V} = e^T [(A - LC)^T P + P(A - LC)]e + 2e^T P [\mathcal{Q}(x, u, t) - \mathcal{Q}(\hat{x}, u, t)] \quad (9)$$

由引理 1, 可得

$$\dot{V} \leq e^T [(A - LC)^T P + P(A - LC)]e + \gamma^2 e^T P P e + e^T e$$

由式(8)知 $\dot{V} < 0$, 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$, 即闭环误差系统(4)稳定.

定理 1 给出了闭环误差系统稳定的充分条件, 观测器增益阵 L 的求解算法如下:

算法 1 (解算观测器增益阵)

(1) 设 η 置为一正值;

(2) 求解式(5)的代数 Riccati 方程;

(3) 如果 P 为对称正定矩阵, 则选定观测器增益阵 $L = (1/2\eta)PC^T$, 使闭环误差系统(4)稳定; 否则, 设置 $\eta = \eta/2$, 返回(2)重新计算.

3.2 非线性故障检测滤波器设计

当系统存在故障时, 采用的故障检测滤波器(FDF)具有式(3)的形式. 令 $G = A - LC$, 若 C 所有特征值互异, 分别为 $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$, 设定的故障向量可写成闭环特征向量的线性组合

$$\delta_i = \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j^i v_j \quad (10)$$

则有 $LC\delta_i = A\delta_i - \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j^i \lambda_i v_j$, 即满足 $(A - LC)\Delta = \lambda\Delta$, 其中 $\Delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r]$.

引理 2 若矩阵 $L \in R^{n \times m}, S \in R^{m \times r}, Q \in R^{m \times r}$ 且 $n \geq m \geq r, \text{rank} S = r$, 则矩阵方程 $LS = Q$ 的解为

$$L = QS^+ + E[I - SS^+] \quad (11)$$

其中 $E \in R^{n \times n}$ 为任意矩阵, 且 $S^+ = (S^T S)^{-1} S^T$, 而 $E[I - SS^+]$ 为满足 $LS = Q$ 的 L 所具有的自由度.

由引理 2 可得方程 $(A - LC)\Delta = \lambda\Delta$ 的解为

$$L = (A - \lambda I)\Delta(C\Delta)^+ + E[I - (C\Delta)(C\Delta)^+] \quad (12)$$

由此对于系统的线性部分有

$$A - LC = A_\delta - EC_\delta$$

其中 $A_\delta = A - (A - \lambda I)\Delta(C\Delta)^+ C, C_\delta = (I - (C\Delta)(C\Delta)^+)C$

上式中的矩阵 E 为故障检测增益阵 L 的设计余度.

算法 2 (计算检测增益阵)

(1) 构造如下代数 Riccati 方程

$$A_\delta P + P A_\delta^T + P(\lambda^2 I - \frac{1}{\eta} C_\delta^T C_\delta)P + I + \eta I = 0 \quad (13)$$

求出其对称正定解 P .

(2) 由算法 1 计算观测器余度增益阵:

$$E = (1/2\eta)PC_\delta^T$$

(3) 选定故障模式集 $\Delta = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_r]$, 对故障向量 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r$ 进行正交化处理得故障空间的基向量 v_1, v_2, \dots, v_r .

(4) 令 $V = [v_1, v_2, \dots, v_r]$, 由下式计算检测增益阵 L

$$L = (A - \lambda I)V(CV)^+ + E[I - (CV)(CV)^+]$$

(5) 检验 $(A - LC)$ 的特征值是否在左半平面, 若不满足则通过调整 E 阵来实现.

对线性系统若 (A, C) 可观, 则可保证对由观测器构成的闭环误差系统的故障是可检测的.

下面讨论非线性系统故障的可检测性问题.

定理 2 对于式(1)描述的非线性系统,采用观测器(3)和算法 2,则该观测器对故障是可检测的.

证明 要证明观测器(3)对故障是可检测的,只要证明含非线性项的闭环误差系统与线性闭环误差系统对故障具有相同的检测性即可.首先比较闭环误差系统(4)在相同初始条件下,有无非线性项时的状态估计误差.定义 $\zeta = \tilde{x}_{nl} - \tilde{x}_l$ 为非线性项和线性系统状态误差之间的偏离.只要证明 $\|\zeta\|$ 有界,则表明二者具有相同的可检测性.

在发生故障时,闭环误差系统(4)线性部分的响应为:

$$\tilde{x}_l = \int_0^T e^{G(t-\tau)} \delta_i \mu_i(\tau) d\tau + e^{GT} \tilde{x}_l(0) \quad (14)$$

考虑非线性项时的估计误差响应为

$$\tilde{x}_{nl} = \int_0^T e^{G(t-\tau)} (\delta_i \mu_i(\tau) + \mathcal{Q}x, u, t) - \mathcal{Q}\hat{x}, u, t) d\tau + e^{GT} \tilde{x}_{nl}(0) \quad (15)$$

式(15)减去(14),当初始条件相同 $\tilde{x}_l(0) = \tilde{x}_{nl}(0)$ 时,有

$$\zeta = \int_0^T e^{G(t-\tau)} (\mathcal{Q}x, u, t) - \mathcal{Q}\hat{x}, u, t) d\tau \quad (16)$$

在故障发生时,对式(16)两边取范数

$$\|\zeta\| \leq \int_0^T \|e^{G(t-\tau)}\| \|\mathcal{Q}x, u, t) - \mathcal{Q}\hat{x}, u, t)\| d\tau + \|e^{GT}\| \|\zeta(0)\| \quad (17)$$

考虑到 G 的指数稳定性,即 $\exists m > 0, \|e^{Gt}\| \leq m e^{-\lambda_m t}$, 其中 $\lambda_m = -\max\{\operatorname{Re}(\lambda)\}$, λ 表示 G 的特征值集合;同时对 $\mathcal{Q}x, u, t)$ 应用 Lipschitz 条件,有

$$\|\zeta\| \leq \int_0^T m \mathcal{Y} \|e^{-\lambda_m(t-\tau)}\| \|x - \hat{x}\| d\tau \quad (18)$$

由于观测器是稳定的,估计误差 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 有界,即 $\sup \|x - \hat{x}\| = \epsilon$. 在故障发生时有以下关系成立

$$\|\zeta\| \leq m \mathcal{Y} \epsilon (1 - e^{-\lambda_m t}) / \lambda_m < m \mathcal{Y} \epsilon / \lambda_m \quad (19)$$

即 $\|\zeta\|$ 有界,故该非线性观测器对故障也具有可检测性.

4 基于模糊推理的鲁棒残差决策

基于以上非线性观测器的输出残差 $\epsilon = \hat{y} - y = C(\hat{x} - x) = C\epsilon$. 该残差向量包含了故障的时间和位置信息,因此可通过适当的逻辑判决实现故障的检测与分类.

选定故障检测门限 J_{th} , 定义决策函数 $D(r) = r^T(t)Qr(t)$, 其中 Q 为对角正定加权阵,则故障检测与隔离(FDI)问题可描述如下:

$$\begin{cases} D(r_i) < J_{thi} & \text{for } \delta_i(t) = 0 \\ D(r_i) > J_{thi} & \text{for } \delta_i(t) \neq 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

其中 n 为故障的模式数.

实际中,由于各种未建模因素和测量噪声的影响,使得无故障时残差不为零.因此,采用固定门限的检测方法难以保证故障检测的准确性和鲁棒性.

在残差决策时,可利用系统的启发性或先验知识设计出门限的自适应规律.即根据系统事

先已知的不确定性范围, 确定出门限的上、下界.

自适应门限由两部分组成, 一部分为固定值 J_0 , 另一部分为自适应项 ΔJ , 它由启发式模糊规则决定, 门限为 $J(y, u) = J_0 + \Delta J(y, u)$. 基于模糊自适应阈值的鲁棒残差决策结构如图 1 所示.

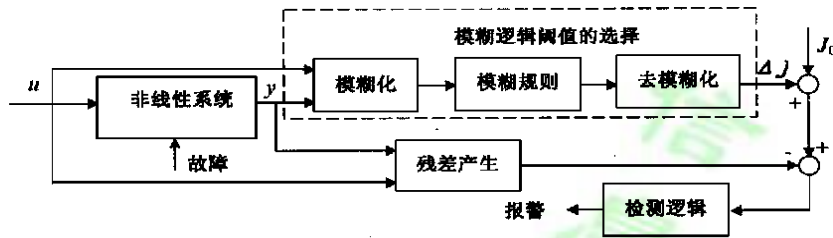


图 1 基于模糊自适应阈值的鲁棒残差决策

在以上故障检测的自适应阈值中, 固定值 J_0 为系统在理想条件下的基准阈值, 而引入自适应项 ΔJ 的主要目的在克服系统运行状况改变、外部扰动以及建模误差造成的不利影响, 避免误报.

基于模糊推理的自适应阈值可由以下四步构成:

- 1) 设置并观察系统在各种扰动和不确定性因素下, 系统的运行工况和误报警之间的关系, 确定阈值变化的规律
- 2) 将以上经验总结成一系列规则
- 3) 选择适当的模糊变量和隶属度函数
- 4) 根据 2)、3) 构造模糊规则表

通过模糊自适应阈值方法, 可以将各种结构参数不确定性和外部扰动包含在决策过程中, 因此能较好地解决故障判决的鲁棒性问题.

5 仿真算例

对如下 A-7D digitacII 六自由度飞机非线性动力学模型的故障检测进行仿真验证.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \mathcal{Q}(x, u, t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$A = \begin{pmatrix} -0.00829 & 5.478 & 0 & -32.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.000178 & -0.996 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00038 & -8.155 & -0.593 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.161 & 0.00089 & -0.997 & 0.507 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -26.23 & -3.008 & 0.961 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.547 & 0.587 & -0.531 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} -16.43 & -16.43 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0673 & -0.0673 & 0 & -0.0478 & 0.0478 \\ -7.955 & -7.955 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0453 & -0.00581 & 0.00581 \\ 8.04 & -8.04 & 5.967 & 17.19 & 17.19 \\ -0.601 & 0.601 & -5.198 & 0.0298 & -0.0298 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0 \end{pmatrix}, \quad \mathcal{Q}(x) = \begin{pmatrix} 0.15\cos(x_2) \\ 0 \\ 0.27\sin(x_7) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.53x_7\cos(x_4) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$C = I_{8 \times 8}, D = 0_{8 \times 5}$, 以上方程中的各状态变量分别为前向速度、攻角、俯仰角速度、俯仰角、侧滑角、滚转角速度、偏航角速度和滚转角, 控制输入分别为左右平尾、方向舵和左右副翼的舵偏角.

根据算法 2 进行非线性观测器的设计, 其中选取 Lipschitz 常数 $\gamma = 1, \eta = 0.5$, 所求的非线性故障检测滤波器的增益阵为:

$$L = \begin{pmatrix} 0.3290 & 0.1297 & -0.0372 & -1.1696 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1297 & 2.3462 & -0.5824 & -1.3731 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0372 & -0.5824 & 0.5458 & 0.7772 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -1.1696 & -1.3731 & 0.7772 & 8.5420 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 5.2036 & -0.6749 & -0.7758 & -0.2029 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.6749 & 0.2392 & 0.2043 & 0.1368 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.7758 & 0.2043 & 1.2213 & -0.0857 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.2029 & 0.1368 & -0.0857 & 1.1077 \end{pmatrix}$$

闭环误差系统的线性部分 $(A - LC)$ 的特征值为 $\lambda_{1,2} = -4.5998 \pm 4.3063i, \lambda_{3,4} = -2.0803 \pm 3.3802i, \lambda_{5,6} = -4.0744 \pm 3.9617i, \lambda_7 = -1.7984, \lambda_8 = -1.5247$.

在进行残差判决时, 采用以上模糊自适应阈值的方法, 设置固定的阈值 $J_0 = 0.5$, 定义 $E(k) = |\epsilon(k)| - J_0, EC(k) = E(k) - E(k-1)$, 并对 E, EC 模糊化, 取其相应的语言变量为 $E = EC = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$, 而 ΔJ 则按以下模糊规则表确定.

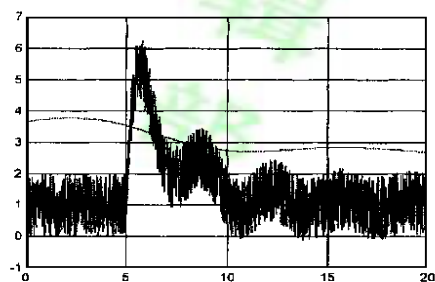


图 2 模糊自适应阈值与残差响应

表 1 ΔJ 的模糊调整规则

$EC \backslash E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	PS	PS
NS	NB	NS	NS	PS	PB
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NB	NS	PS	PS	PB
PB	NS	NS	PS	PB	PB

设定飞机在 5 至 10s 间发生故障, 滚转角速度残差的响应及其模糊阈值的变化规律如图 2 所示. 可以看出, 如果仍按固定的阈值 0.5 进行检测, 则会在初始的 0 到 5s 阶段产生误报警. 而根据以上模糊自适应门限(如图 2 中细线所示)进行检测, 不仅可避免由噪声和扰动引起的误报, 并可在 5.092s 检测出故障, 保证了故障检测的准确性和鲁棒性.

参 考 文 献

- 1 Park J and Rizzoni G. An Eigenstructure Assignment Algorithm for the Design of Fault Detection Filters. IEEE Trans. Automatic Control. 1997, **39**(7): 1521 ~ 1524
- 2 Hou M and Muller P C. Fault Detection and Isolation Observer. Int. J. Control, 1994, **60**(5): 827~ 846
- 3 Frank P M. Enhancement of Robustness in Observer-based Fault Detection. Int. J. Control, 1994, **59**(4): 955~ 981
- 4 Kondo A and Didier M. Nonlinear Observer-based Fault Detection. IEEE Conference on Control Application, 1994: 1115 ~ 1120
- 5 Sakhar R and Karl J H. Observer Design for a Class of Nonlinear Systems. Int. J. Control, 1994, **59**(2): 515~ 528

ROBUST FAULT DETECTION BASED ON A CLASS OF NONLINEAR STATE OBSERVER

ZHOU Chuan¹ WU Xiao-pe¹ CHEN Qing-wei¹ HU Wei-li¹ ZHOU Yu²

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094;

2. Computer Center of Wuhan Military Economics Institute, Wuhan 430035)

Abstract: A new type of robust fault diagnosis strategy based on nonlinear state observer is presented in this paper. In this method, a nonlinear fault detection filter (FDF) is constructed for a class of Lipschitz affine nonlinear system on the basis of traditional FDF method, the algorithm of detection gain is given and the stability of closed-loop error system is proved. Furthermore the equivalence between nonlinear FDF and linear FDF is proofed and the fault detectability is guaranteed. At the stage of residual decision, an adaptive fuzzy threshold method is used to enhance the robustness of fault detection. Finally, this method is applied to the fighter's structure fault detection, simulation results show that the presented method is effective.

Keywords: fault detection, nonlinear observer, fuzzy decision, fighter

作者简介

周 川(1970-), 1999 年在南京航空航天大学控制理论与控制工程专业获博士学位, 现在南京理工大学自动化系从事博士后研究. 研究领域为故障诊断及智能控制理论.

吴晓蓓(1958-), 副教授, 硕士. 研究领域为智能控制理论及计算机控制系统等.

陈庆伟(1963-), 高级工程师, 硕士. 研究领域为计算机控制系统及交流伺服系统的研究与设计.

胡维礼(1941-), 1965 年毕业于清华大学自动控制专业, 现为南京理工大学自动化系教授, 博士生导师. 研究领域为自适应控制, 故障诊断及现代高性能伺服系统的研究.