

文章编号: 1005-2615(2001) 03-0259-04

基于故障检测滤波器的歼击机结构故障检测

胡寿松 刘文聪

(南京航空航天大学自动化学院 南京, 210016)

摘要 提出一种新的适用于多种故障类型的故障检测滤波器设计方法,该方法基于故障输出空间,通过配置左特征向量来设计检测增益阵以实现对系统参数的小范围变化,具有较好的鲁棒性,避免了采用多个检测滤波器对不同的故障进行检测。同时,研究了残差与控制输入和故障程度的关系,提出了自适应检测阈值设计方法,并将其应用于歼击机的结构故障检测。

关键词: 故障检测滤波器;残差;自适应阈值

中图分类号: V 249

文献标识码: A

1 检测滤波器问题

考虑如下方程描述的动态系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

其中, $x \in R^n$, $u \in R^r$, $y \in R^m$ 分别为状态向量、控制向量和输出向量。

假设故障检测滤波器具有如下状态观测器的形式

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (3)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (4)$$

其中, $\hat{x}(t)$, $\hat{y}(t)$ 分别为状态估计和输出估计, L 为检测增益阵。若定义状态估计误差 $e = x(t) - \hat{x}(t)$, 输出残差 $X(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, 则应选择 L 使得输出残差 X 在发生故障的情况下具有方向特性。在无故障情况下, 定义

$$G = A - LC \quad (5)$$

则闭环误差方程为

$$\dot{e}(t) = Ge(t) \quad (6)$$

系统结构故障通常可建模为迭加到式 (1) 的一项, 而得到如下方程

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f_i \mu_i(t) \quad (7)$$

其中, $f_i \in R^n$ 定义为第 i 个故障的故障事件向量, $\mu_i(t)$ 为未知有界时变标量时间函数, 可以是 $x(t)$ 或 $u(t)$ 的函数。

系统产生结构故障后, 闭环误差方程可重写为

$$\dot{e}(t) = Ge(t) + f_i \mu_i(t), X(t) = Ce(t) \quad (8)$$

定义 1^[1] (检测滤波器问题) 对于给定的系统 (1), 求一组子空间 $W_i \subseteq X$, $i = 1, \dots, q$, 使得对于 L , 满足下列条件:

(1) 子空间不变性: $(A - LC)W_i \subseteq W_i$

(2) 故障包含性: $F_i \subseteq W_i$

(3) 输出可分离性: $CW_i \cap \left(\sum_{j \neq i} CW_j \right) = 0$

2 检测滤波器设计

假设 $T_i^* \subseteq X$ 为故障向量 f_i 的 v_i 维的检测空间, 则其化零空间 $(T_i^*)^\perp \subseteq \text{Ker}(f_i^T)$, 并且其维数为 $n - v_i$ 。令 $\hat{\Lambda}_i = \{\lambda_{i_1}, \dots, \lambda_{i_{n-v_i}}\}$ 为一组相异的共轭复数, 并且 $\hat{\Lambda}_i$ 中的元素不得为 (f_i^T, A^T, C^T) 的不变零点, T_i^* 的化零空间满足下式

$$(T_i^*)^\perp = \text{Im}(V_{i,1}) + \dots + \text{Im}(V_{i,n-v_i})$$

其中, $\text{Im}(\cdot)$ 表示线性映射的值域, $V_{i,j}$ 和 $W_{i,j}$ 可通过求解下列方程得到^[2]

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 69974021)、航空科学重点基金 (编号: 98Z51002) 及博士点基金 (编号: 2000028704) 资助项目。

收稿日期: 2000-07-24; 修订日期: 2001-01-09

作者简介: 胡寿松, 男, 教授, 博士生导师, 1937 年 2 月生; 刘文聪, 男, 硕士研究生, 1974 年 5 月生。

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$\begin{bmatrix} A^T - \lambda_{i,j} I & C^H \\ f_i^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{i,j} \\ W_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$j = 1, \dots, n - v_i, \lambda_{i,j} \in \hat{\Lambda}_i$

求解下列方程

$$\begin{bmatrix} A^T - \lambda_{i,j} I & C^H \\ f_i^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i,j} \\ w_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

可以得到张成 $(T_i^*)^\perp$ 的一组线性无关的左特征向量 $\{v_{i,1}, \dots, v_{i,n-v_i}\}$

为求检测滤波器增益,构造两个矩阵

$$\hat{V}_i = [v_{i,1}, \dots, v_{i,n-v_i}] \quad \hat{W}_i = [w_{i,1}, \dots, w_{i,n-v_i}] \quad (11)$$

并求解下列方程

$$L_i^T \hat{V}_i = \hat{W}_i \quad (12)$$

因为 $[v_{i,1}, \dots, v_{i,n-v_i}]$ 线性无关,并且配置的特征值和特征向量成对共轭,方程 (12)总是有解的^[3]。最后,增益阵 L_i 满足 $(A - LC)T_i^* \subseteq T_i^*$,并且 $(A - LC)$ 的极点被配置为 $\hat{\Lambda}_i$

由于检测滤波器有 q 个检测空间, $T_1^*, \dots, T_q^* \subseteq X$,因此,检测滤波器增益阵 L 对 $i = 1, \dots, q$ 都要满足方程 (12)

在因子空间 X/T_i^* 上的频谱为 $e(A - LC|X/T_i^*) = e(A^T - C^T L^T | (T_i^*)^\perp) = \hat{\Lambda}_i$,假设 Λ_i 是 $(A - LC)$ 的被限制到不变子空间 T_i^* 中的频谱,则 $(A - LC)$ 的频谱为

$$\Lambda = e(A - LC) = \Lambda_i \cup \hat{\Lambda}_i \quad (13)$$

现在,由于故障输出可分离且 (C, A) 可观,检测子空间 T_1^*, \dots, T_q^* 是相互独立的,这样一来,就有

$$\Lambda = \Lambda_1 \cup \dots \cup \Lambda_q \cup \Lambda_0$$

其中, $\Lambda_0 = e(A - LC|X \sum_{i=1}^q T_i^*)$ 。这样,从方程 (6)

可以得到

$$\hat{\Lambda}_i = \bigcup_{\substack{K=0 \\ K \neq i}}^q \Lambda_K \quad (14)$$

由于配置的闭环极点组 $\hat{\Lambda}_i$ 相交,求解方程 (9)得向量组 $v_{i,j}, w_{i,j}$

检测增益矩阵可按如下步骤计算:

(1)求 $v_i = \dim(T_i^*), i = 1, 2, \dots, q$,并定义 $v_0 = n - \sum_{i=1}^q v_i$;

(2)定义 $q+1$ 个补故障向量

$$\hat{F}_i = \begin{cases} [F_1, \dots, F_q] & i = 0 \\ [F_1, \dots, F_{i-1}, F_{i+1}, \dots, F_q] & 1 \leq i \leq q \end{cases} \quad (15)$$

定义 $q+1$ 组相异的共轭复数 $\Lambda_0, \Lambda_1, \dots, \Lambda_q$,其中,

$\dim(\Lambda_i) = v_i$,并且 Λ_i 中的元素不得为 (C, A, F_i) 的零点,在 (C, A) 可观,检测空间 T_i^* 相互可检测的条件下, $q+1$ 组相异的复数 $\Lambda_0, \Lambda_1, \dots, \Lambda_q$,除共轭约束外,可以任意配置。

(3)对 $i = 0, 1, \dots, q; j = 1, \dots, v_i$,且 $\lambda_i \in \Lambda_i$,求解下列方程

$$\begin{bmatrix} A^T - \lambda_{i,j} I & C^H \\ \hat{F}_i^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i,j} \\ w_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

得向量对 $(v_{i,j}, w_{i,j})$,其中, $v_{i,j}$ 对所有的 i, j 线性无关。且令

$$\tilde{V}_i = [v_{i,1}, \dots, v_{i,v_i}], \tilde{W}_i = [w_{i,1}, \dots, w_{i,v_i}]$$

$$V = [\tilde{V}_0, \tilde{V}_1, \dots, \tilde{V}_q], W = [\tilde{W}_0, \tilde{W}_1, \dots, \tilde{W}_q]$$

(4)按下式计算检测滤波器增益矩阵 L

$$[V_0^T, V_1^T, \dots, V_q^T]^T L = [W_0^T, W_1^T, \dots, W_q^T]^T$$

3 故障检测的自适应阈值原理

对于基于检测滤波器的故障检测和诊断方法,如何选择最优的阈值,以尽可能降低漏警率和误警率,是故障检测和诊断的一个关键问题^[4]。研究表明:线性系统的残差序列的幅值还随系统的输入的变化而变化。特别是在大机动的情况下,这种变化将非常大,以至会导致误报警。在这种情况下,采用自适应的阈值可以既保证能及时地检测故障又保证一定的可以接受的误报警率。故障检测方框图如图 1 所示,其中 $r(t)$ 为残差,非负实数 $T(t)$ 为检测阈值

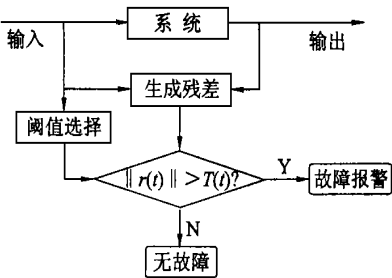


图 1 自适应阈值的故障检测方框图

对于闭环误差系统 (8),输出残差与控制输入和故障程度的关系由下面的定理给出

定理 1 对于闭环误差系统方程 (8),若初值为 $e(0) = 0$,则当故障度一定时,输出残差与控制输入成正比,即对于两个控制输入 $u_{i1}(t) = k u_{i2}$ 有 $X(t) = k X(t)$;当控制输入一定时,输出残差与故障程度成正比,即对于两个故障程度 $Z_{i1} = l Z_{i2}$,有 $X(t) = l X(t)$,其中 k, l 为实常数。

证明 重写闭环误差系统方程 (8)如下式

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= \mathbf{G}e(t) + \mathbf{f}_{i-}i(t) \\ \dot{X}(t) &= \mathbf{C}e(t)\end{aligned}\tag{16}$$

其中, \mathbf{f}_i 为控制阵 \mathbf{B} 中与某一故障相对应的列, i 为时间函数, 且根据故障建模知识, 有

$$i(t) = -Z\mathbf{u}(t)\tag{17}$$

其中, $\mathbf{u}(t)$ 为控制向量中与 \mathbf{f}_i 为对应的控制分量, Z 为舵面缺损程度

由式 (16, 17) 可得到

$$\dot{X}(t) = \mathbf{C}e^{\mathbf{G}t}e(0) + (-Z)\int_0^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df$$

因假设 $e(0) = 0$, 上式变为

$$\dot{X}(t) = (-Z)\int_0^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df\tag{18}$$

当故障程度确定时, Z 为常值 则对于两个控制输入 $\mathbf{u}_1 = k\mathbf{u}_2(t)$, 根据式 (18) 显然有 $\dot{X}(t) = k\dot{X}(t)$, 即输出残差与控制输入成正比

同样, 当控制输入确定, 即 $\mathbf{u}_1(t) = \mathbf{u}_2(t)$ 时, 对于两个故障程度 $Z_1 = lZ_2$, 根据式 (18) 显然有 $\dot{X}(t) = k\dot{X}(t)$, 即输出残差与控制输入成正比

4 故障程度估计

这里采用构造参考残差方法来完成故障程度的估计。

定理 2 对闭环误差系统 (8), 若构造参考残差系统如下

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{e}} &= \mathbf{G}\tilde{e} + \mathbf{f}_i\tilde{\mathbf{u}}(t), \tilde{e}(0) = 0 \\ \dot{\tilde{X}}(t) &= \mathbf{C}\tilde{e}(t)\end{aligned}\tag{19}$$

其中, \mathbf{f}_i 为与检测故障相应的故障向量, $\tilde{\mathbf{u}}(i) = \begin{cases} 0 & t < t_{\text{df}} \\ \mathbf{u}(t) & t \geq t_{\text{df}} \end{cases}$, \mathbf{u} 为与 \mathbf{f}_i 对应的控制分量。 则故障程度可按下式计算

$$Z_i = \frac{\|\dot{X}(t) - \dot{X}_{t_{\text{df}}}\|}{\|\dot{\tilde{X}}(t)\|}\tag{20}$$

其中, t_{df} 为检测并隔离出故障的时间。

证明 由式 (16, 17) 可得到

$$e(t) = e^{\mathbf{G}t}e(0) + (-Z)\int_0^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df =$$

$$e(t_{\text{df}}) + (-Z)\int_{t_{\text{df}}}^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df$$

$$e(t) - e(t_{\text{df}}) = (-Z)\int_{t_{\text{df}}}^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df \quad t \geq t_{\text{df}}$$

所以

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) - \dot{X}_{t_{\text{df}}} &= (-Z)\int_{t_{\text{df}}}^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df \\ &\geq t_{\text{df}}\end{aligned}\tag{21}$$

又方程 (19) 的解如下

$$\dot{\tilde{X}}(t) = \int_{t_{\text{df}}}^t e^{\mathbf{G}(t-f)}\mathbf{f}_i\mathbf{u}(f)df \quad t \geq t_{\text{df}}\tag{22}$$

比较式 (21, 22), 可得

$$-Z\dot{\tilde{X}}(t) = \dot{X}(t) - \dot{X}_{t_{\text{df}}}$$

上式两边均取 2 范数并整理, 得

$$Z = \frac{\|\dot{X}(t) - \dot{X}_{t_{\text{df}}}\|}{\|\dot{\tilde{X}}(t)\|}$$

5 仿真研究

考虑某型歼击机在 0.5 km, 0.6 Ma 飞行条件下的线性化动力学方程如式 (1) 所示。 相应的状态量分别为攻角、俯仰角速度、侧滑角、滚转角速度和偏航角速度; 控制量分别为右、左平尾, 右、左副翼和方向舵的舵偏量

在设计过程中, 首先设计用于检测和隔离右、左平尾和方向舵缺损故障的故障检测滤波器

(1) 令 $\mathbf{F}_1 = [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_2 \ \mathbf{f}_3]$, 计算这 3 个故障向量的检测阶数, 得 $v_1 = \dim(T_1^*) = 1, v_2 = \dim(T_2^*) = 1, v_3 = \dim(T_3^*) = 1$, 并定义 $v_0 = n - \sum_{i=1}^3 v_i = 2$

(2) 按照式 (15) 定义 4 组补故障向量

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{F}}_0 &= [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_2 \ \mathbf{f}_3] & \hat{\mathbf{F}}_1 &= [\mathbf{f}_2 \ \mathbf{f}_3] \\ \hat{\mathbf{F}}_2 &= [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_3] & \hat{\mathbf{F}}_3 &= [\mathbf{f}_1 \ \mathbf{f}_2]\end{aligned}$$

再定义 4 组共轭的相异的复数, 由于 $\text{rank}(\mathbf{C}\hat{\mathbf{F}}_1) =$

3, 故这 3 种故障是输出可分离的; 又因 $\sum_{i=1}^3 v_i = 3$

故这 3 种故障又是可检测的。 由于系统是完全可观的, 因此这 4 组数除了共轭对称约束外, 可任意配置。 配置 4 组数如下

$$\begin{aligned}\Lambda_0 &= \{-2-3j\} & \Lambda_1 &= \{-3\} \\ \Lambda_2 &= \{-3\} & \Lambda_3 &= \{-3\}\end{aligned}$$

(3) 对 $i = 0, 1, \dots, 3; j = 1, \dots, v_i$, 且 $\lambda_j \in \Lambda_i$, 求解方程 (10), 可得 \mathbf{V}_i 的奇异值为 $\sigma(\mathbf{V}_i) = \{1.0139, 0.8819, 0.4190, 0.3987, 0.5525\}$ 可以看出, 没有小的奇异值, 也就是说, 左特征向量具有较好的条件数, 可以得到对小的系统参数变化具有鲁棒性的检测滤波器。

(4) 求解检测增益阵, 得

$$L_1 = \begin{bmatrix} -2.0521 & -1.0056 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.2725 & -2.0611 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & -2.4901 & 0.0000 & -1.0045 \\ 0.0000 & 0.0000 & 24.9406 & -1.7858 & 0.9645 \\ 0.0000 & 0.0000 & 3.4936 & 0.0311 & -2.6994 \end{bmatrix}$$

重复上面的步骤,可以设计出检测右、左副翼故障的故障检测增益阵

$$L_2 = \begin{bmatrix} -2.1302 & -1.0055 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.2837 & -2.0611 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & -2.5380 & 0.0005 & -0.9636 \\ 0.0000 & 0.0000 & 25.6793 & -1.7874 & 0.8469 \\ 0.0000 & 0.0000 & 3.6799 & 0.0318 & -2.6480 \end{bmatrix}$$

最终的检测结果如图 2所示。

参 考 文 献

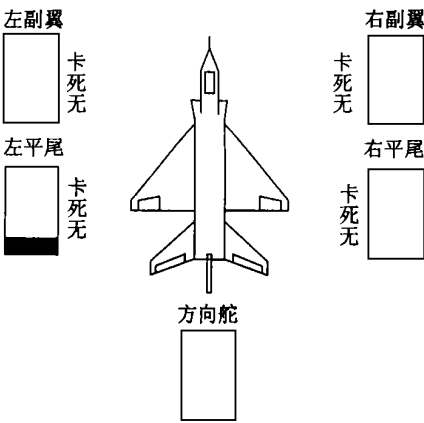


图 2 左平尾缺损 20% 时检测结果的动画显示

1 Douglas R K, Speyer J L. Roubust fault detection fileter design [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(1): 214~ 218

2 Patton R J, Chen J. Robust fault detection and isolation system [J]. Control and Dynamic Systems, 1996, 74 171~ 205

3 Shen L C, Chang S K, Hsu P C. Robust fault detec-tion and isolation with unstructured uncertainty using eigenstructure assignment [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(1): 85~ 105

4 Park J, Rizzoni C. An eigenstructure assignment algo-rithm for the design of fault detection filters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(7): 1521 ~ 1524

Structure Fault Detection Based on Fault Detection Filter (FDF) for Fighter

Hu Shousong Liu Wencong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics& Astronautics Nanjing 210016, P. R. China)

Abstract A new eigenvector assignment approach to design of fault detection filter reliable to multi-faults is proposed, which enables the designed FDF robust to small system parameter variations based on fault output space. The different faults detected by different fault detection filters are avoided. Mean-time the relation between the residual and the control input is researched and an adaptive threshold design method is developed. So the method is applied to structure fault detection for a fighter.

Key words fault detection filters (FDFs); residual; adaptive threshold