

# 一类降阶故障检测滤波器设计 及其在飞行器中的应用

王 青<sup>1</sup>, 王明明<sup>1</sup>, 董朝阳<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 针对飞行器控制周期较短且资源与计算能力受限的情况, 提出了一种适合飞行器控制系统的降阶故障检测滤波器设计算法。首先利用小扰动理论将飞行器非线性动力学方程在平衡点线性化, 针对线性状态方程设计降阶故障检测滤波器。将降阶故障检测滤波器存在可行解问题转化为线性矩阵不等式描述的非凸优化问题, 利用交替映射算法求解非凸优化问题的局部最优解。然后利用上述可行解存在的条件, 计算降阶故障检测滤波器参数。最后将提出的降阶故障检测滤波算法应用到某小型无人直升机偏航控制系统的故障检测中, 仿真结果表明该算法在保证检测效果的前提下降低故障检测滤波器的阶次, 验证了算法的有效性。

**关键词:** 飞行器; 降阶故障检测; 非凸优化; 交替映射

中图分类号: TP277 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)01-0061-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.01.009

## Design of a Kind of Reduced-Order Fault Detection Filtering Algorithm and Its Application in Space Vehicles

WANG Qing<sup>1</sup>, WANG Ming-ming<sup>1</sup>, DONG Chao-yang<sup>2</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Aeronautical Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Under the condition of a short sampling period, limited resource and computational capacity, a method for designing reduced-order fault detection filtering algorithm is proposed in this paper. Small perturbation theory and a Taylor series expansion about the balance point are used to linearize the nonlinear dynamics equations of space vehicles. Then the reduced-order fault detection filter is designed for the linear state-space equation. The problem of feasible solution of the reduced-order fault detection filtering algorithm is transformed into a nonconvex optimization problem expressed in terms of linear matrix inequalities. The local optimal solution of the nonconvex optimization is achieved by an alternate mapping algorithm. The reduced-order fault detection filtering algorithm is obtained under the condition that the feasible solution exists. Finally, the reduced-order fault detection algorithm is applied to the fault detection of the yaw control system in a small-scale autonomous helicopter. Simulation results are presented to show effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** Space vehicle; Reduced fault detection; Nonconvex optimization; Alternate mapping

### 0 引 言

通常,飞行器的高可靠性通过软硬件的高可靠性和冗余来保证。但是,由于飞行环境的复杂性以

及飞行器测试的局限性,仍然会出现飞行器运行异常或系统故障等问题<sup>[1]</sup>。故障检测为提高系统的可靠性、可维护性和有效性开辟了一条新的途径,为飞行器的容错设计奠定了基础,越来越受到重视。

收稿日期: 2012-03-11; 修回日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61074027 60974014)

飞行控制系统作为飞行器的关键系统之一,主要承担着抑制扰动、提高飞行稳定裕度、改善固有特性和操作特性从而改善飞行品质的作用,是飞行器安全飞行和完成复杂飞行任务的保证。同时,控制系统也是飞行器中最容易发生故障的分系统,因此研究飞行器控制系统故障检测有重要的意义。

目前,国内外学者针对飞行器控制系统的故障检测开展了一系列研究<sup>[2-5]</sup>。文献[2]针对 Boeing 747 的纵向 LPV 模型,提出了一种基于几何方法的故障检测与隔离算法。文献[3]针对多个飞行器之间通信链路存在丢包的情况,将多飞行器系统建模为马尔可夫跳变系统,从而研究马尔可夫跳变系统的故障检测问题。文献[4]针对航天器控制系统的闭环特性和星载计算机资源受限的特点,采用互质分解技术和 Youla 参数化方法,给出只与控制器信号和控制误差相关的残差生成方法,实现控制系统的故障检测。

基于滤波器的故障检测算法广泛应用于控制系统的故障检测中。文献[5]研究了离散不确定系统的故障检测问题,提出利用无约束优化算法设计故障检测滤波器,该方法在不牺牲故障检测敏感性的同时增强了故障检测对不确定性的鲁棒性。文献[6]研究了一类含有扰动的线性系统鲁棒故障诊断滤波器设计问题,并将其应用到某近地卫星的控制系统故障检测中。文献[7]将多个传感器故障转化为伪执行器故障,利用几何方法将故障分解到相互正交的不变子空间中,设计残差生成器进行故障检测。文献[8]研究了具有随机丢包的网络控制系统的故障检测问题。以上基于滤波器的故障检测算法并没有考虑滤波器的阶次对计算量的影响,当面向采样周期短且处理能力受限的飞行器控制系统故障检测时会导致正常运行模式的软件可靠性下降。

本文针对飞行器控制系统采样周期较短,对控制算法和故障检测算法的计算量要求较高的情况,将文献[9]中的降阶滤波器思想应用到飞行器控制系统的故障检测中,提出了一种降阶故障检测滤波器设计方法。最后,将该方法应用到小型无人直升机偏航控制系统的故障检测实例中验证了算法的有效性。

## 1 问题描述

考虑飞行器刚体动力学方程<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} F_x = m(\dot{u} + qw - rv) \\ F_y = m(\dot{v} + ru - pw) \\ F_z = m(\dot{w} + pv - qu) \\ M_x = I_x \dot{p} - I_{xz} \dot{r} + qr(I_z - I_y) - I_{xz}pq \\ M_y = I_y \dot{q} + rp(I_x - I_z) + I_{xz}(p^2 - r^2) \\ M_z = I_z \dot{r} - I_{xz} \dot{p} + pq(I_y - I_x) + I_{xz}qr \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  分别为沿  $Ox$ 、 $Oy$  和  $Oz$  轴的力,  $I_x$ 、 $I_y$  和  $I_z$  分别为绕  $Ox$ 、 $Oy$  和  $Oz$  轴的转动惯量,  $M_x$ 、 $M_y$  和  $M_z$  分别为滚转力矩、俯仰力矩和偏航力矩,  $m$  为质量,  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为纵向、侧向和垂直速度,  $p$ 、 $q$  和  $r$  分别为滚转、俯仰和偏航角速度。

方程(1)为非线性方程组,通常,为了便于系统分析和控制系统设计,将此非线性方程组在不同配平点利用小扰动理论进行线性化,线性化后的运动方程可由状态空间方程(2)描述

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_p(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}_p(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}_p(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{x}_p(t) \in \mathbf{R}^n$  为状态向量,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^l$  为控制输入,  $\mathbf{y}_p(t) \in \mathbf{R}^g$  为系统输出,  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为系统矩阵,  $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times l}$  为控制矩阵,  $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{g \times n}$  为输出矩阵,  $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{g \times l}$  为描述输入与输出耦合关系的矩阵(对飞行器应用,通常为零)。

考虑控制器具有如下结构:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{x}_p(t) \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{K}_p$  为已知的状态反馈控制增益常矩阵。

将式(3)代入式(2)中,考虑干扰和故障情况下的系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_p(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_p) \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{E}_d \mathbf{d}(t) + \mathbf{E}_f \mathbf{f}(t) \\ \mathbf{y}_p(t) = (\mathbf{C} + \mathbf{D}\mathbf{K}_p) \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{F}_d \mathbf{d}(t) + \mathbf{F}_f \mathbf{f}(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{d}(t) \in \mathbf{R}^{n_d}$ ,  $\mathbf{f}(t) \in \mathbf{R}^{n_f}$ ,  $\mathbf{E}_d$ ,  $\mathbf{E}_f$ ,  $\mathbf{F}_d$  和  $\mathbf{F}_f$  分别为具有适当维数的已知矩阵。

为了便于分析,将式(4)变形为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_p(t) = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x}_p(t) + \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}_p(t) = \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{x}_p(t) + \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{w}(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_p$ ,  $\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C} + \mathbf{D}\mathbf{K}_p$ ,  $\tilde{\mathbf{E}} = [\mathbf{E}_d \quad \mathbf{E}_f]$ ,  $\tilde{\mathbf{F}} = [\mathbf{F}_d \quad \mathbf{F}_f]$ ,  $\mathbf{w}(t) = [\mathbf{d}^T(t) \quad \mathbf{f}^T(t)]^T$ 。

为检测飞行器控制系统故障,设计  $\hat{n}$  ( $\hat{n} \leq n$ ) 阶线性时不变故障检测滤波器

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_f(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}_f(t) + \mathbf{L}\mathbf{y}_p(t) \\ \mathbf{r}(t) = \mathbf{M}\mathbf{x}_f(t) + \mathbf{N}\mathbf{y}_p(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{x}_f(t) \in \mathbf{R}^{\hat{n}}$  为滤波器状态,  $\mathbf{r}(t) \in \mathbf{R}^{n_f}$  为残差,  $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{\hat{n} \times \hat{n}}$ ,  $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{\hat{n} \times g}$ ,  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{n_f \times \hat{n}}$  和  $\mathbf{N} \in \mathbf{R}^{n_f \times g}$  分别为故障检测滤波器未知参数矩阵。

定义误差  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{f}(t)$ , 则闭环系统误差动态方程如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_e \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_e \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{e}(t) = \mathbf{C}_e \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_e \mathbf{w}(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p(t) \\ \mathbf{x}_f(t) \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}\tilde{\mathbf{C}} & \mathbf{K} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}} \\ \mathbf{L}\tilde{\mathbf{F}} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{C}_e = [\mathbf{N}\tilde{\mathbf{C}} \quad \mathbf{M}]$ ,  $\mathbf{D}_e = [\mathbf{N}\tilde{\mathbf{F}} + \tilde{\mathbf{G}}] \tilde{\mathbf{G}} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{I}]$ 。

基于  $H_\infty$  滤波的最优故障检测滤波器设计问题可表述为设计故障检测滤波器使得广义干扰  $\mathbf{w}(t)$  到估计误差  $\mathbf{e}(t)$  的能量增益最小, 即

$$\min \sup_{\mathbf{w}(t) \in L_2 - \{0\}} \frac{\|\mathbf{e}(t)\|_{L_2}}{\|\mathbf{w}(t)\|_{L_2}} \quad (8)$$

其中,  $\|\mathbf{e}(t)\|_{L_2}^2 = \int_0^\infty \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) dt$ 。

根据  $H_\infty$  范数的性质, 可知式(8)等价于

$$\min \|T_{we}(s)\|_\infty \quad (9)$$

其中:  $T_{we}(s)$  为广义干扰  $\mathbf{w}(t)$  到估计误差  $\mathbf{e}(t)$  的传递函数,  $\|T_{we}(s)\|_\infty = \max_{\omega} \bar{\sigma}(T_{we}(j\omega))$ ,  $\bar{\sigma}(\cdot)$  为矩阵的最大奇异值。

由于优化问题(9)较难求解, 可以设计次最优  $H_\infty$  故障检测滤波器, 即给定标量  $\gamma > 0$ , 寻找滤波器(若存在), 使其满足

$$\|T_{we}(s)\|_\infty < \gamma \quad (10)$$

为实现飞行器控制系统故障检测的目的, 需对残差信号  $\mathbf{r}(k)$  进行评估。本文使用残差信号的评估函数  $J(r)$  以及阈值  $J_{th}$  分别如式(11)和式(12)所示

$$J(r) = \left( \int_{t_0}^{t_0+\tau} \mathbf{r}^T(t) \mathbf{r}(t) dt \right)^{1/2} \quad (11)$$

其中:  $t_0$  为初始评价时刻,  $\tau$  为评价时间窗长度。

$$J_{th} = \sup_{\mathbf{w}(t) \in L_2, f=0} \|\mathbf{r}(t)\|_{L_2} \quad (12)$$

若  $J(r) \geq J_{th}$ , 则飞行器控制系统故障; 否则控制系统运行正常。

## 2 降阶故障检测滤波器设计

在给出本文的  $H_\infty$  故障检测滤波器之前, 首先

引入几个定义和引理。

定义 1. 设  $\mathbf{A}_c \in \mathbf{R}^{n_c \times m_c}$ , 若  $\mathbf{A}_c^\perp \mathbf{A}_c = \mathbf{0}$  且  $\mathbf{A}_c^\perp (\mathbf{A}_c^\perp)^\top > \mathbf{0}$ , 则  $\mathbf{A}_c^\perp \in \mathbf{R}^{(n_c-r_c) \times m_c}$  为  $\mathbf{A}_c$  的正交补矩阵, 其中  $r_c$  为  $\mathbf{A}_c$  的秩。

矩阵  $\mathbf{A}_c$  的正交补  $\mathbf{A}_c^\perp$  并不唯一, 可令  $\mathbf{A}_c^\top = \mathbf{T}\mathbf{U}_2^\top$ , 其中, 矩阵  $\mathbf{T}$  为任意非奇异矩阵,  $\mathbf{U}_2$  可由矩阵  $\mathbf{A}_c$  的奇异值分解得到

$$\mathbf{A}_c = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^\top \\ \mathbf{V}_2^\top \end{bmatrix}$$

引理 1<sup>[11]</sup>. 考虑线性时不变系统(2), 给定常数标量  $\gamma > 0$ , 传递函数矩阵  $\mathbf{T}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$ , 若系统(2) 稳定且满足  $\|\mathbf{T}(s)\|_\infty < \gamma$ , 则当且仅当存在矩阵  $\mathbf{P} > \mathbf{0}$  满足矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^\top \mathbf{P} & \mathbf{P}\mathbf{B} & \mathbf{C}^\top \\ \mathbf{B}^\top \mathbf{P} & -\gamma^2 \mathbf{I} & \mathbf{D}^\top \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (13)$$

引理 2<sup>[11]</sup>. 给定矩阵  $\boldsymbol{\Theta} = \boldsymbol{\Theta}^\top, \boldsymbol{\Gamma}, \mathbf{A}$ , 存在矩阵  $\mathbf{F}$  为矩阵不等式(14) 的解

$$\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{F}\mathbf{A} + (\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{F}\mathbf{A})^\top + \boldsymbol{\Theta} < \mathbf{0} \quad (14)$$

当且仅当以下不等式成立:

$$\boldsymbol{\Gamma}^\perp \boldsymbol{\Theta} (\boldsymbol{\Gamma}^\perp)^\top < \mathbf{0} \quad (15)$$

$$(\mathbf{A}^\top)^\perp \boldsymbol{\Theta} [(\mathbf{A}^\top)^\perp]^\top < \mathbf{0} \quad (16)$$

并且不等式的解  $\mathbf{F}$  为

$$\mathbf{F} = -\mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\Gamma}^\top \boldsymbol{\Phi} \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\Psi} + \boldsymbol{\Omega}^{1/2} \mathbf{U} \boldsymbol{\Psi}^{1/2} \quad (17)$$

其中:  $\mathbf{R}, \mathbf{U}, \boldsymbol{\Phi}$  为任意矩阵且满足  $\mathbf{R} > \mathbf{0}$ ,  $\bar{\sigma}(\mathbf{U}) < 1$ ,  $\boldsymbol{\Phi} = (\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\Gamma}^\top - \boldsymbol{\Theta})^{-1} > \mathbf{0}$ , 矩阵  $\boldsymbol{\Psi}$  和  $\boldsymbol{\Omega}$  分别为

$$\boldsymbol{\Psi} = (\mathbf{A} \boldsymbol{\Phi} \mathbf{A}^\top)^{-1}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{R}^{-1} - \mathbf{R}^{-1} \boldsymbol{\Gamma}^\top (\boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\Psi} \mathbf{A} \boldsymbol{\Phi}) \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{R}^{-1}$$

定理 1. 考虑系统(5), 存在形如式(6) 的次最优  $H_\infty$  降阶故障检测滤波器, 则当且仅当存在矩阵  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ , 满足如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \gamma \\ \text{s. t.} \quad & \begin{bmatrix} \mathbf{X}\tilde{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{X} & \mathbf{X}\tilde{\mathbf{E}} \\ \tilde{\mathbf{E}}^\top \mathbf{X} & -\gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^\top \\ \tilde{\mathbf{F}}^\top \end{bmatrix}^\perp \begin{bmatrix} \mathbf{Y}\tilde{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{Y} & \mathbf{Y}\tilde{\mathbf{E}} \\ \tilde{\mathbf{E}}^\top \mathbf{Y} & \tilde{\mathbf{G}}^\top \tilde{\mathbf{G}} - \gamma^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^\top \\ \tilde{\mathbf{F}}^\top \end{bmatrix}^\perp < \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\mathbf{Y} \geq \mathbf{X} > \mathbf{0} \quad (20)$$

$$\text{rank}(\mathbf{X} - \mathbf{Y}) \leq \hat{n} \quad (21)$$

证. 将闭环系统误差动态方程(7) 做如下变换:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (\bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{M})x(t) + (\bar{D} + \bar{B}\bar{F}\bar{E})w(t) \\ e(t) = \bar{H}\bar{F}\bar{M}x(t) + (\bar{G} + \bar{H}\bar{F}\bar{E})w(t) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } \bar{A} &= \begin{bmatrix} \tilde{A}_{n \times n} & \mathbf{0}_{n \times \hat{n}} \\ \mathbf{0}_{\hat{n} \times n} & \mathbf{0}_{\hat{n} \times \hat{n}} \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n_f} & \mathbf{0}_{n \times \hat{n}} \\ \mathbf{0}_{\hat{n} \times n_f} & I_{\hat{n} \times \hat{n}} \end{bmatrix}, \\ \bar{D} &= \begin{bmatrix} \tilde{E}_{n \times (n_d + n_f)} \\ \mathbf{0}_{\hat{n} \times (n_d + n_f)} \end{bmatrix}, \bar{M} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{m \times n} & \mathbf{0}_{m \times \hat{n}} \\ \mathbf{0}_{\hat{n} \times n} & I_{\hat{n} \times \hat{n}} \end{bmatrix}, \bar{F} = \begin{bmatrix} N & M \\ L & K \end{bmatrix}, \\ \bar{E} &= \begin{bmatrix} \tilde{F}_{m \times (n_d + n_f)} \\ \mathbf{0}_{\hat{n} \times (n_d + n_f)} \end{bmatrix}, \bar{H} = [I_{n_f \times n_f} \quad \mathbf{0}_{n_f \times \hat{n}}], \bar{G} = \tilde{G}. \end{aligned}$$

根据引理 1, 可得

$$\begin{bmatrix} PA_e + A_e^T P & PB_e & C_e^T \\ B_e^T P & -\gamma^2 I & D_e^T \\ C_e & D_e & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

其中:  $A_e = \bar{A} + \bar{B}\bar{F}\bar{M}$ ,  $B_e = \bar{D} + \bar{B}\bar{F}\bar{E}$ ,  $C_e = \bar{H}\bar{F}\bar{M}$ ,  $D_e = \bar{G} + \bar{H}\bar{F}\bar{E}$ .

将式(23)变形为引理 2 中(14)的形式

$$IF\bar{A} + (IF\bar{A})^T + \Theta < 0 \quad (24)$$

$$\text{其中: } \Theta = \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P & P\bar{D} & \mathbf{0} \\ \bar{D}^T P & -\gamma^2 I & \bar{G}^T \\ \mathbf{0} & \bar{G} & -I \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} \bar{M}^T \\ \bar{E}^T \\ \mathbf{0}_{n_f \times (m + \hat{n})} \end{bmatrix}^T, F = \begin{bmatrix} P\bar{B} \\ \mathbf{0}_{(n_d + n_f) \times (m + \hat{n})} \\ \bar{H} \end{bmatrix}.$$

接下来, 首先证明引理 2 中的不等式(15)。

根据定义 1, 可得  $\Gamma$  的正交补

$$\begin{aligned} \Gamma^\perp &= \begin{bmatrix} [\bar{B}]^\perp & \mathbf{0}_{n \times (n_d + n_f)} \\ \bar{H} & \mathbf{0}_{\hat{n} \times (n_d + n_f)} \\ \mathbf{0}_{(n_d + n_f) \times (n + \hat{n} + n_f)} & I_{(n_d + n_f)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I_{n_f} \\ \mathbf{0} & I_{(n_d + n_f)} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I_{(n_d + n_f)} & \mathbf{0}_{n \times \hat{n}} & \mathbf{0}_{n \times n_f} & \mathbf{0}_{n \times (n_d + n_f)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & I_{(n_d + n_f)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I_{n_f} \\ \mathbf{0} & I_{(n_d + n_f)} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\text{令 } P^{-1} = \begin{bmatrix} Z & Z_{12} \\ Z_{12}^T & Z_{22} \end{bmatrix} > 0 \text{ 将 } \Gamma^\perp \text{ 和 } \Theta \text{ 代入不等}$$

式(15)并简化可得

$$X\tilde{A} + \tilde{A}^T X + \frac{1}{\gamma^2} X\tilde{E}\tilde{E}^T X < 0 \quad (25)$$

其中,  $X = Z^{-1}$ 。

根据 Schur 补引理可得

$$\begin{bmatrix} X\tilde{A} + \tilde{A}^T X & X\tilde{E} \\ \tilde{E}^T X & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0$$

接下来证明引理 2 中矩阵不等式(16)。

根据定义 1, 可得  $A^T$  的正交补

$$(A^T)^\perp = \begin{bmatrix} \bar{M}^T \\ \bar{E}^T \\ \mathbf{0}_{n_f \times (m + \hat{n})} \end{bmatrix}^\perp = \begin{bmatrix} [\bar{M}^T]^\perp & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I_{n_f} \end{bmatrix} \quad (26)$$

将矩阵  $A^T$  和  $\Theta$  代入引理 2 中不等式(16)可得

$$\begin{aligned} A^{T\perp} \Theta [A^T]^\perp &= \begin{bmatrix} [\bar{M}^T]^\perp & \mathbf{0} \\ \bar{E}^T & I_{n_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P & P\bar{D} & \mathbf{0} \\ \bar{D}^T P & -\gamma^2 I & \bar{G}^T \\ \mathbf{0} & \bar{G} & -I \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} [\bar{M}^T]^\perp & \mathbf{0} \\ \bar{E}^T & I_{n_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi\psi\phi^T & \phi\delta \\ (\phi\delta)^T & -I_{n_f} \end{bmatrix} < 0 \quad (27) \end{aligned}$$

其中:

$$\phi = \begin{bmatrix} \bar{M}^T \\ \bar{E}^T \end{bmatrix}^\perp, \psi = \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P & P\bar{D} \\ \bar{D}^T P & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \delta = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \bar{G}^T \end{bmatrix}$$

根据 Schur 补引理, 由于  $-I_{n_f} < 0$ , 因此

$$\phi\psi\phi^T + \phi\delta\delta^T\phi^T = \phi(\psi + \delta\delta^T)\phi^T < 0 \quad (28)$$

将式(27)中矩阵代入式(28)并化简得

$$\begin{bmatrix} \bar{M}^T \\ \bar{E}^T \end{bmatrix}^\perp \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P & P\bar{D} \\ \bar{D}^T P & \bar{G}^T \bar{G} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{M}^T \\ \bar{E}^T \end{bmatrix}^\perp \right\}^T < 0 \quad (29)$$

$$\text{令 } P = \begin{bmatrix} Y & Y_{12} \\ Y_{12}^T & Y_{22} \end{bmatrix} > 0, \text{ 又有}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{M}^T \\ \bar{E}^T \end{bmatrix}^\perp &= \begin{bmatrix} \tilde{C}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I_{\hat{n}} \\ \tilde{F}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}^\perp \\ &= \left[ \begin{bmatrix} \tilde{C}^T \\ \tilde{F}^T \end{bmatrix}^\perp \quad \mathbf{0} \right] \begin{bmatrix} I_n & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I_{(n_d + n_f)} \\ \mathbf{0} & I_{\hat{n}} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

代入式(29)可得

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}^T \\ \tilde{F}^T \end{bmatrix}^\perp \begin{bmatrix} Y\tilde{A} + \tilde{A}^T Y & Y\tilde{E} \\ \tilde{E}^T Y & \tilde{G}^T \tilde{G} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{C}^T \\ \tilde{F}^T \end{bmatrix}^\perp < 0 \quad (30)$$

最后, 根据  $P$  和  $P^{-1}$  分块矩阵可得

$$Y - Z^{-1} = Y - X = Y_{12} Y_{22}^{-1} Y_{12}^T \geq 0 \quad (31)$$

又因为  $Y_{22}$  为  $\hat{n} \times \hat{n}$  阶正定矩阵, 因此  $Y \geq X > 0$  且  $\text{rank}(X - Y) \leq \hat{n}$ 。

注 1. 当控制系统故障检测滤波器(6)的阶次与动态系统(5)的阶次相同时, 定理 1 中的式(21)始终成立。定理 1 可简化为式(18) - (20) 约束的凸优化问题, 可直接利用 MATLAB 中的 YALMIP 工具箱求最优解。但是, 当利用定理 1 设计降阶故障检测滤波器时, 约束条件(21)不能忽略。又由于式(21)为秩约束, 使得该优化问题属于非凸优化, 无法获得全局最优解。为了解决降阶控制器时的非凸优化问题求解, 文献[11]提出了利用交替映射算法求解非凸优化的局部最优解的方法, 本文的非凸优化问题求解可以利用文献[11]中的思想求得局部最优解。

若定理 1 存在可行解, 则表明系统(5)存在降阶故障检测滤波器(6), 此时降阶故障检测滤波器的参数可根据定理 2 计算。

定理 2. 考虑系统(5), 若存在形如(6)所示的故障检测滤波器, 即定理 1 中的优化问题存在可行解  $X$  和  $Y$ , 则故障检测滤波器(6)的参数解为:

$$\begin{bmatrix} N & M \\ L & K \end{bmatrix} = -R^{-1} \Gamma^T \Phi \Lambda^T \Psi + \Omega^{1/2} U \Psi^{1/2} \quad (32)$$

其中:  $U$  为满足  $\bar{\sigma}(U) < 1$  的任意矩阵,  $\Phi$  为满足  $\Phi = (\Gamma R^{-1} \Gamma^T - \Theta)^{-1} > 0$  的任意矩阵,  $R$  为任意正定矩阵,  $\Omega = R^{-1} - R^{-1} \Gamma^T (\Phi - \Phi \Lambda^T \Psi \Lambda \Phi) \Gamma R^{-1}$ ,

$$\Psi = (\Lambda \Phi \Lambda^T)^{-1}, \Lambda = [\bar{M} \quad \bar{E} \quad \mathbf{0}_{(m+\hat{n}) \times n_f}],$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P & P\bar{D} & \mathbf{0} \\ \bar{D}^T P & -\gamma^2 I & \bar{G}^T \\ \mathbf{0} & \bar{G} & -I \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} P\bar{B} \\ \mathbf{0}_{(n_d+n_f) \times (m+\hat{n})} \\ \bar{H} \end{bmatrix}$$

证. 由定理 1 的证明过程可知, 系统误差方程(7)稳定且满足  $\|T(s)\|_\infty < \gamma$ , 则引理 2 中的式(14)成立, 其中矩阵  $\Lambda$ 、 $\Theta$  和  $\Gamma$  与式(24)中矩阵相同。

根据定理 1, 优化问题存在可行解  $X$  和  $Y$ , 则式(15)和(16)成立。

因此, 根据引理 2 可知, 故障检测滤波器(6)的滤波器参数为

$$\begin{bmatrix} N & M \\ L & K \end{bmatrix} = -R^{-1} \Gamma^T \Phi \Lambda^T \Psi + \Omega^{1/2} U \Psi^{1/2}$$

其中:  $R$ 、 $U$  和  $\Phi$  分别为满足  $R > 0$ 、 $\bar{\sigma}(U) < 1$ 、 $\Phi = (\Gamma R^{-1} \Gamma^T - \Theta)^{-1} > 0$  的任意矩阵,  $\Psi$  和  $\Omega$  为:  $\Psi =$

$$(\Lambda \Phi \Lambda^T)^{-1}, \Omega = R^{-1} - R^{-1} \Gamma^T (\Phi - \Phi \Lambda^T \Psi \Lambda \Phi) \Gamma R^{-1}.$$

### 3 仿真实例

本节以某小型自主无人直升机偏航控制系统的故障检测为例验证本文提出算法。该无人自主直升机由 Raptor90 直升机改装而成, 在原有基础上集成以下航电系统: (1) 机载计算机; (2) 测量传感器和舵机; (3) 地面站与直升机通信系统<sup>[12]</sup>。

考虑干扰和故障情况下的系统模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_d d(t) \end{cases} \quad (33)$$

其中: 各参数的含义见参考文献[12], 系统矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} -2.6571 & 21.9350 & 3.8290 & 6.0497 \\ -31.0290 & -3.5154 & 17.0990 & -3.0897 \\ 6.1059 & -6.9623 & -9.7553 & -96.375 \\ 17.1690 & 25.7330 & 37.1760 & -33.0820 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.6258 \\ 6.2175 \\ -29.1990 \\ -14.6430 \end{bmatrix}, E_d = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, E_f = \begin{bmatrix} 0.6258 \\ 6.2175 \\ -29.1990 \\ -14.6430 \end{bmatrix},$$

$$C = [15.3190 \quad -10.3210 \quad 0.7307 \quad -4.7274],$$

$$F_d = 1.$$

设计状态反馈控制器  $u(t) = K_p x(t)$ , 其中控制器增益矩阵

$$K_p = [0.8198 \quad 0.3857 \quad -0.3968 \quad 4.1252].$$

仿真时间为 15 秒, 采样周期为 0.01 秒。假设干扰信号  $d(t)$  为符合  $N(0, 0.05)$  分布的白噪声。控制器输出  $u(t) \in [-1, 1]$ , 从第 5 秒开始, 向执行器注入恒偏差故障, 故障模式为

$$f(t) = \begin{cases} 0.02, & t \geq 5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

#### 3.1 故障检测滤波器设计

按照定理 1 和定理 2, 分别设计全阶和降阶故障检测滤波器。

##### (1) 全阶故障检测滤波器设计

当故障检测滤波器的阶次与系统阶次相同时, 利用 YALMIP 工具箱求解定理 1 中的优化问题可得

$$\gamma = 0.6517$$

$$X = \begin{bmatrix} 0.6000 & 0.0547 & 0.0249 & 0.0633 \\ 0.0547 & 0.4445 & 0.1216 & -0.0723 \\ 0.0249 & 0.1216 & 0.1146 & -0.1153 \\ 0.0633 & -0.0723 & -0.1153 & 0.2820 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0.6184 & 0.0578 & 0.0274 & 0.0727 \\ 0.0578 & 0.4454 & 0.1225 & -0.0709 \\ 0.0274 & 0.1225 & 0.1157 & -0.1140 \\ 0.0727 & -0.0709 & -0.1140 & 0.2873 \end{bmatrix}$$

根据定理 2 设计控制系统的全阶故障检测滤波器(6), 其中, 滤波器状态向量  $x_f(t) \in \mathbf{R}^4$ , 各滤波器参数为

$K =$

$$\begin{bmatrix} -63.8370 & 14.9333 & -40.3856 & 20.3740 \\ -29.7749 & -211.7502 & -100.6417 & -38.6642 \\ -141.2909 & -125.4807 & -392.4431 & -44.4710 \\ -48.1447 & -46.7380 & -48.3377 & -439.6956 \end{bmatrix}$$

$$L = [-0.9572 \quad 0.0523 \quad 0.0712 \quad 0.2601]^T$$

$$M = [0.2803 \quad 0.4604 \quad 0.7842 \quad 0.8030]$$

$$N = 2.6580$$

图 1 为四阶故障检测滤波器的残差输出值。图 2 为该故障检测滤波器的残差评估结果, 实线为根据式(11)计算的残差评估函数值, 评估时间窗长度  $\tau = 0.1$  秒, 虚线为根据式(12)计算的阈值。

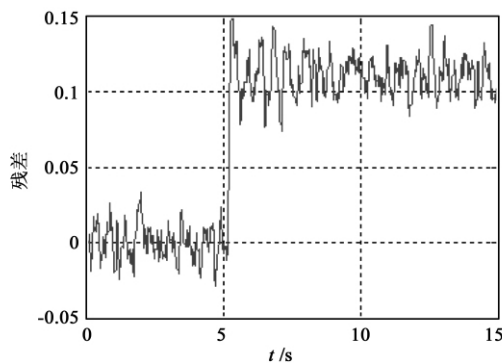


图 1 四阶故障检测滤波器残差值

Fig. 1 Residual of fourth-order fault detection filtering

由图 2 可知, 当执行器发生故障后, 本文算法设计的全阶故障检测滤波器能够立即检测到该故障的发生。

## (2) 降阶故障检测滤波器设计

根据定理 1, 利用文献[11]中的交替映射法求解最优问题的局部最优解为

$$\gamma = 1.2213$$

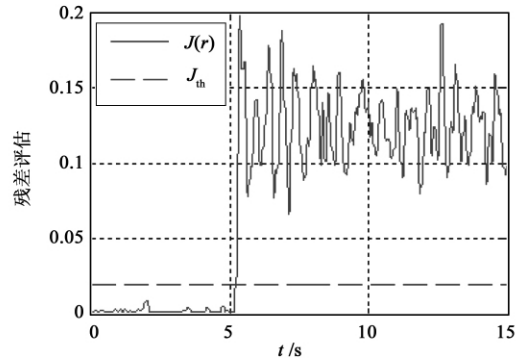


图 2 四阶故障检测滤波器残差评估结果

Fig. 2 Residual evaluation of fourth-order fault detection filtering

$$X = \begin{bmatrix} 1.4631 & 0.1615 & 0.0864 & 0.1474 \\ 0.1615 & 1.0514 & 0.3278 & -0.2024 \\ 0.0864 & 0.3278 & 0.3080 & -0.3078 \\ 0.1474 & -0.2024 & -0.3078 & 0.7619 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1.7520 & 0.3546 & 0.0864 & 0.1474 \\ 0.3546 & 1.2600 & 0.3278 & -0.2024 \\ 0.0864 & 0.3278 & 0.3080 & -0.3078 \\ 0.1474 & -0.2024 & -0.3078 & 0.7619 \end{bmatrix}$$

根据定理 2 设计控制系统的全阶故障检测滤波器(6), 其中, 滤波器状态向量  $x_f(t) \in \mathbf{R}^2$ , 各滤波器参数为

$$K = \begin{bmatrix} -15.8084 & 30.0945 \\ -534542 & -57.7217 \end{bmatrix}$$

$$L = [0.4193 \quad 0.0079]^T$$

$$M = [0.2339 \quad 2.5857] \quad N = 2.5450$$

图 3 为二阶故障检测滤波器的残差输出值。图 4 为该故障检测滤波器的残差评估结果, 实线为根据式(11)计算的残差评估函数值, 评估时间窗长度  $\tau = 0.1$  秒, 虚线为根据式(12)计算的阈值。

由图 4 可知, 当执行器发生故障后, 本文算法设计的二阶故障检测滤波器同样能够立即检测到该故障的发生。

## 3.2 故障检测结果对比与分析

为验证本文提出算法的有效性, 本节将 3.1 中设计的故障检测滤波器与文献[7]中提出的故障检测滤波器设计方法进行对比。

利用文献[7]中方法设计故障检测滤波器为

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = F_p w(t) - E_p y(t) + G_p u(t) \\ r(t) = M_p w(t) - H_p y(t) \end{cases} \quad (34)$$

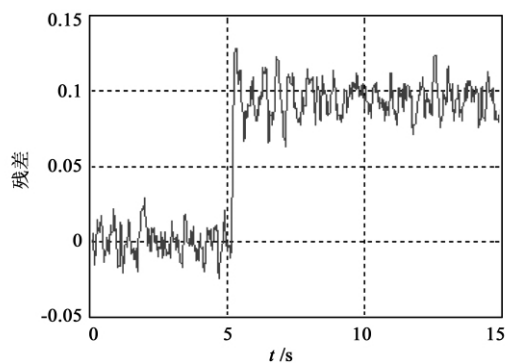


图 3 二阶故障检测滤波器残差值

Fig. 3 Residual of second-order fault detection filtering

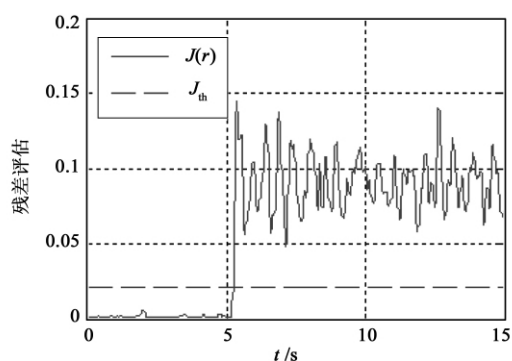


图 4 二阶故障检测滤波器残差评估结果

Fig. 4 Residual evaluation of second-order fault detection filtering

其中,各参数含义见文献[7] 滤波器参数分别为

$$F_p = \begin{bmatrix} -8.3666 & 25.7817 & 3.5567 & 7.8117 \\ -44.7976 & 5.7610 & 16.4423 & 1.1593 \\ 21.9819 & -17.6586 & -8.9980 & -101.2743 \\ -18.2421 & 49.5908 & 35.4846 & -22.1542 \end{bmatrix}$$

$$E_p = \begin{bmatrix} -0.3727 \\ -0.8988 \\ 1.0364 \\ -2.3116 \end{bmatrix} \quad G_p = \begin{bmatrix} 0.6258 \\ 6.2175 \\ -29.1990 \\ -14.6430 \end{bmatrix}$$

$$H_p = \begin{bmatrix} 0.0421 \\ -0.0283 \\ 0.0020 \\ -0.0130 \end{bmatrix}$$

$$M_p = \begin{bmatrix} 0.6446 & -0.4343 & 0.0307 & -0.1989 \\ -0.4343 & 0.2926 & -0.0207 & 0.1340 \\ 0.0307 & -0.0207 & 0.0015 & -0.0095 \\ -0.1989 & 0.1340 & -0.0095 & 0.0614 \end{bmatrix}$$

为了便于分析和对比,本节仅考虑 2~7 秒内的

500 个采样点,利用残差评估函数(35)和阈值(36)进行对比说明。

$$J(r) = \left( \sum_{k=0}^{500} r^T(k) r(k) \right)^{1/2} \quad (35)$$

$$J_{th} = \sup_{d \in L_2, f=0} \left\{ E \left[ \sum_{k=0}^{500} r^T(k) r(k) \right] \right\}^{1/2} \quad (36)$$

图 5、图 6 和图 7 分别为四阶故障检测滤波器、二阶故障检测滤波器以及文献[7]中的故障检测滤波器的残差评估结果。

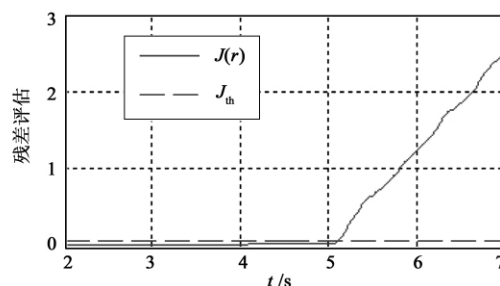


图 5 基于式(35)和(36)的四阶故障检测滤波器残差评估结果

Fig. 5 Residual evaluation of fourth-order fault detection filtering under (35) and (36)

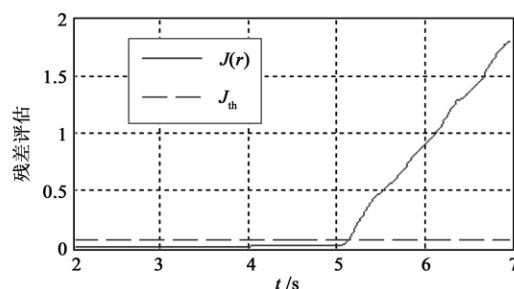


图 6 基于式(35)和(36)的二阶故障检测滤波器残差评估结果

Fig. 6 Residual evaluation of second-order fault detection filtering under (35) and (36)

图 5~7 中的残差评估的具体数据见表 1,包含三种故障检测滤波器的阈值、报警时刻以及报警时残差评估函数(35)的值。仿真数据表明,当执行机构发生恒偏差故障时,三种故障检测滤波器几乎在同一时刻检测到该故障的发生。文献[7]中的方法设计的故障检测滤波器(34)为四阶滤波器且残差  $r(t) \in \mathbf{R}^4$ ,按照式(35)进行评估时计算量最大;本文提出的四阶故障检测滤波器,其残差  $r(t) \in \mathbf{R}^1$ ,计算量次之;二阶故障检测滤波器的计算量在三种滤波器中最小,但是几乎与另外两个滤波器同时

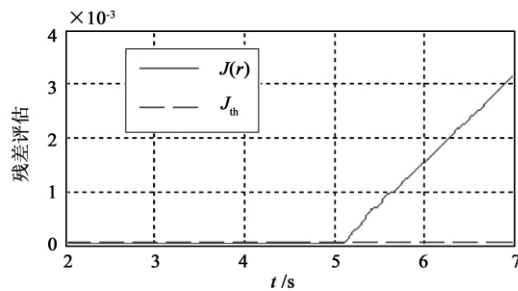


图 7 基于式(35)和(36)的文献[7]故障检测滤波器  
残差评估结果

Fig. 7 Residual evaluation of fault detection filtering  
in [7] under (35) and (36)

(仅差 0.01 秒) 检测到该恒偏差故障。

表 1 三种故障检测滤波器对比结果

Table 1 Comparison of three fault detection filterings

方法	阈值	报警时刻	报警时评估函数值
四阶滤波器	0.0714	313	0.0830
二阶滤波器	0.0572	314	0.0605
文献[7]滤波器	$3.9918 \times 10^{-5}$	313	$4.4251 \times 10^{-5}$

从以上仿真结果可以看出,本文提出的降阶故障检测滤波器设计方法能够在降低计算量的同时保证故障检测的及时性,验证了算法的有效性。

#### 4 结 论

本文提出一种面向飞行器控制系统的故障检测算法。通常飞行器系统模型阶次较高,设计的全阶或高阶故障检测滤波器计算量大,在较短的控制周期内以及受限的资源下使得系统的可靠性降低。利用交替映射方法求解非凸优化问题得到故障检测滤波器存在的条件,利用该可行解计算降阶故障检测滤波器参数。仿真结果表明本文提出的降阶故障检测滤波器在保证故障检测性能的前提下减少了计算量,适合于飞行器控制系统的故障检测。

#### 参 考 文 献

- [1] 邢琰,吴宏鑫,王晓磊,等. 航天器故障诊断与容错控制技术综述[J]. 宇航学报,2003,14(3): 221-227. [Xing Yan, Wu Hong-xin, Wang Xiao-lei, et al. Survey of fault diagnosis and fault-tolerance control technology for spacecraft [J]. Journal of Astronautics, 2003, 14(3): 221-227.]
- [2] Szaszi I, Marcos A, Balas G J, et al. Linear parameter-varying detection filter design for a Boeing 747-100/200 aircraft [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2005, 28(3): 461

-470.

- [3] Meskin N, Khorasani K. Fault detection and isolation of discrete-time markovian jump linear systems with application to a network of multi-agent systems having imperfect communication channels [J]. Automatica, 2009, 45(9): 2032-2040.
- [4] 刘文静,王南华. 面向资源约束航天器控制系统的故障检测研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1527-1533. [Liu Wen-jing, Wang Nan-hua. FD for spacecraft control system with resource constraint [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1527-1533.]
- [5] Wang H B, Lam J. Robust fault detection for uncertain discrete-time systems [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2002, 25(2): 291-301.
- [6] 王小丽,宋红敏,倪茂林. 一种基于 LMI 的鲁棒故障诊断滤波器设计[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(5): 550-554. [Wang Xiao-li, Song Hong-min, Ni Mao-lin. The design of a robust fault-detection filter: the LMI approach [J]. 2009, 26(5): 550-554.]
- [7] 侯彦东,文成林,陈志国. 多传感器故障检测与隔离的残差产生器设计方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 429-434. [Hou Yan-dong, Wen Cheng-lin, Chen Zhi-guo. Designing methods of residual generator for multi-sensor fault detection and isolation [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(2): 429-434.]
- [8] 黄鹤,谢德晓,韩笑冬,等. 具有随机丢包的一类网络控制系统的故障检测[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(1): 79-86. [Huang He, Xie De-xiao, Han Xiao-dong, et al. Fault detection for networked control systems with random packet dropout [J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(1): 79-86.]
- [9] Darouach M, Zasadzinski M. Optimal unbiased reduced order filtering for discrete-time descriptor systems via LMI [J]. Systems and Control Letters, 2009, 58(6): 436-444.
- [10] Bhandari S, Colgren R. 6-DoF dynamic model for a raptor 50 UAV helicopter including stabilizer bar dynamics [C]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Keystone, Colgren, August 21-24, 2006.
- [11] Grigoriadis K M, Skelton R E. Low-order control design for LMI problems using alternating projection methods [J]. Automatica, 1996, 32(8): 1117-1125.
- [12] Cai W G, Chen B M, Peng K M, et al. Modeling and control of the yaw channel of a UAV helicopter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(9): 3426-3433.

#### 作者简介:

王青(1968-),女,教授,博士生导师,主要从事飞行器制导与控制、切换控制、故障诊断等方面研究。

通信地址:北京航空航天大学 305 教研室(100191)

电话:(010) 82316409

E-mail: wangqing@buaa.edu.cn

(编辑:曹亚君)