飞行器网络控制系统在线故障检测算法

王明明 王 青 董朝阳

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191) (北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对飞行器网络控制系统具有网络诱导时延且采样周期较短的情况,提出了一种飞行器网络控制系统在线故障检测算法. 考虑未知时延对网络控制系统的影响,建立飞行器网络化控制系统故障检测模型. 基于此模型,构造了残差生成器,将故障检测问题转化为最小化优化问题. 以矩阵 Moore-Penrose 逆的形式给出该最小化优化问题的解,在每个采样周期内进行飞行器网络控制系统在线故障检测. 数值算例表明:当飞行器网络控制系统存在未知时延时,该故障检测算法对故障敏感,同时对未知时延引起的扰动具有鲁棒性.

关 键 词: 飞行器; 网络控制系统; 故障检测; Moore-Penrose 逆

中图分类号: TP 273

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)06-0750-05

Online fault detection of networked control systems for flight vehicles

Wang Mingming Wang Qing

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Dong Chaoyang

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An online fault detection algorithm for the networked control system of flight vehicle was proposed considering the network-induced delay and the short sampling period. The fault detection model was established for the impact of the unknown time-delay. Based on the model, the residual generator was constructed and the fault detection of networked control systems was converted to the minimum optimization problem. Furthermore, the solution of the problem was given in the form of Moore-Penrose Inverse of matrix, and the fault detection algorithm was optimized in every sampling period. The numerical example shows that the proposed fault detection method is sensitive to the fault, and it is also robust to the unknown disturbance caused by the unknown delay.

Key words: flight vehicle; networked control system; fault detection; Moore-Penrose inverse

随着计算机技术、信息技术、控制技术以及航空航天技术的飞速发展,越来越多的飞行器引入数据总线解决系统内部日益复杂的数据共享和数据传输问题[1-3],克服了传统的点对点传输方式布线复杂、故障频发、维护成本高、体积庞大等缺陷. 当飞行器通过数据总线等网络构成控制系统的闭环回路时,就组成了网络控制系统[4-5]. 然而,由于通信网络的引入,飞行器网络控制系统带来了新的问题和挑战,如网络时延[6-7]、网络丢包[8]及量化误差等. 故障检测是提高飞行器控制系统安全性和可靠性的一项重要技术,但是将网络引入飞行器控制系统后,已有的故障检测方法已不能直接应用于网络化控制系统,因此飞行器网络控制系统故障检测越来越受到重视.

目前,存在网络诱导时延情况下的网络控制系统故障检测分为 3 类:时延已知、时延概率特性

收稿日期: 2011-03-29; **网络出版时间**: 2012-06-15 15:44

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1544.037.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974014,61074027)

作者简介: 王明明(1982 -),男,河北石家庄人,博士生,wangmm0107@gmail.com.

已知和时延未知. 文献[9 – 10]将时延限制在离散有限的集合内,假设时延变化服从马尔可夫过程,通过 H_∞ 滤波的方法,利用线性矩阵不等式(LMI, Linear Matrix Inequality)优化工具设计了跳变故障检测滤波器,实现故障的检测. 针对网络诱导时延未知的情况,文献[11]假设网络时延小于采样周期,提出基于结构矩阵的方法. 该方法形式直观,但是需要实时在线计算残差发生器参数,计算量大,而飞行器网络控制系统的采样周期一般为5 ~ 20 ms,在采样周期内无法获得阈值最优解,只能固定某参数得到次优解. 文献[12]提出基于观测器和奇偶空间方法对故障检测系统进行时域优化,该方法计算量小且易于工程实现,但是文献[12]未考虑存在网络时延的控制系统故障检测.

本文在文献[12]的研究基础上,针对存在未知时延的飞行器网络控制系统,提出了一种基于矩阵 Moore-Penrose 逆的飞行器网络控制系统故障检测算法.

1　飞行器网络控制系统模型

假设 1　网络系统的采样时间为 h,不存在丢包和时序错乱,传感器采用时钟驱动,控制器和执行器均采用事件驱动. 假设网络诱导时延 $\tau_k \leqslant \Delta_\tau \leqslant h, \Delta_\tau$ 为给定值.

考虑飞行器控制系统连续模型如下:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{d}(t) + \boldsymbol{E}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{x}(t) \in \mathbf{R}^m$ 为系统状态;$\boldsymbol{u}(t) \in \mathbf{R}^n$ 为控制输入;$\boldsymbol{y}(t) \in \mathbf{R}^p$ 为系统输出;$\boldsymbol{f}(t) \in \mathbf{R}^q$ 为故障向量函数,表示过程故障、执行器故障或传感器故障;矩阵 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{C}, \boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}, \boldsymbol{E}_{\mathrm{f}}$ 为适当维数的已知矩阵;过程噪声 $\boldsymbol{d}(t) \in \mathbf{R}^i$ 为有界零均值随机序列,且上界满足:

$$\left[\sum_{i=0}^{\alpha} \boldsymbol{d}^{\mathrm{T}}(k+i)\boldsymbol{d}(k+i)\right]^{1/2} \leqslant \Delta_{\mathrm{d}} \tag{2}$$

其中,α 为时间窗口.

模型(1)的采样系统模型如下:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}_{k+1} &= \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h}\boldsymbol{x}_k + \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t\boldsymbol{u}_k + \int_{h-\tau_k}^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t\Delta\boldsymbol{u}_k + \\ &\quad \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}\mathrm{d}t\boldsymbol{d}_k + \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{E}_{\mathrm{f}}\mathrm{d}t\boldsymbol{f}_k \\ \boldsymbol{y}_k &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_k \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

其中,$\Delta\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{u}_{k-1} - \boldsymbol{u}_k$.

由于 τ_k 未知,因此网络诱导时延使飞行器控制系统增加时变扰动项. 该时变扰动使传统的鲁棒故障检测方法无法保证扰动的鲁棒性.

通常,飞行器网络控制系统闭环控制周期为 5 ~ 20 ms,因此,采样周期远小于系统时间常数,根据 $\mathrm{e}^{-\boldsymbol{A}\tau_k}$ 的一阶泰勒近似 $\mathrm{e}^{-\boldsymbol{A}\tau_k} \approx \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}\tau_k$,得

$$\begin{aligned} &\int_{h-\tau_k}^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t\Delta\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{A}^{-1}\int_{h-\tau_k}^h \boldsymbol{A}\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\mathrm{d}t\boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}_k = \\ &\boldsymbol{A}^{-1}[\boldsymbol{I} - \mathrm{e}^{-\boldsymbol{A}\tau_k}]\mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h}\boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}_k \approx \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h}\boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}_k\tau_k \end{aligned} \tag{4}$$

综上,飞行器网络控制系统离散模型为

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}_{k+1} &= \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h}\boldsymbol{x}_k + \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{E}_{\tau,k}\tau_k + \\ &\quad \boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}\boldsymbol{d}_k + \boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}\boldsymbol{f}_k \\ \boldsymbol{y}_k &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_k \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}_{\tau,k} &= \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h}\boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}_k \\ \boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}} &= \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}}\mathrm{d}t \\ \boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}} &= \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{E}_{\mathrm{f}}\mathrm{d}t \end{aligned}$$

2　网络控制系统故障检测优化算法

2.1　残差生成器

构造基于全阶观测器的残差生成器:

$$\left.\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{x}}_{k+1} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}\hat{\boldsymbol{x}}_k + \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{L}\boldsymbol{y}_k \\ \hat{\boldsymbol{y}}_k &= \boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}_k \\ \boldsymbol{r}_k &= \boldsymbol{V}(z)(\boldsymbol{y}_k - \hat{\boldsymbol{y}}_k) \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{L}$ 为增益矩阵;$\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}} = \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h} - \boldsymbol{L}\boldsymbol{C}$;$\boldsymbol{r}_k \in \mathbf{R}^r$ 为残差序列;$\boldsymbol{V}(z)$ 为后置滤波器,$\boldsymbol{V}(z) = \boldsymbol{V}_s + \boldsymbol{V}_{s-1}z^{-1} + \cdots + \boldsymbol{V}_0 z^{-s}$,$\boldsymbol{V}_i \in \mathbf{R}^{(s+1)q\times p}$,$i = 0, 1, \cdots, s$,$s$ 为 $\boldsymbol{V}(z)$ 的阶次. 理论上,s 为任意值,考虑到在线故障检测算法的计算量与 s 取值有关,通常设置其小于等于 m. $\boldsymbol{L}$ 的设计可采用传统的特征值法进行,保证系统稳定和式(6)的快速响应即可.

引入状态向量 $\boldsymbol{\beta}_k$:

$$\boldsymbol{\beta}_{k+1} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{\beta}_k + \boldsymbol{E}_{\tau,k}\tau_k + \boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}\boldsymbol{d}_k + \boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}\boldsymbol{f}_k \tag{7}$$

将式(6)应用于式(5),得到残差序列如下:

$$\boldsymbol{r}_k = \boldsymbol{V}(\boldsymbol{H}_0\boldsymbol{\beta}_{k-s} + \boldsymbol{H}_{\tau,k}\boldsymbol{\tau}_{s,k} + \boldsymbol{H}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{d}_{s,k} + \boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k}) \tag{8}$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{V} &= [\boldsymbol{V}_0 \quad \boldsymbol{V}_1 \quad \cdots \quad \boldsymbol{V}_{s-1} \quad \boldsymbol{V}_s] \\ \boldsymbol{\tau}_{s,k} &= [\tau_{k-s} \quad \tau_{k-s+1} \quad \cdots \quad \tau_{k-1} \quad \tau_k]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{d}_{s,k} &= [\boldsymbol{d}_{k-s} \quad \boldsymbol{d}_{k-s+1} \quad \cdots \quad \boldsymbol{d}_{k-1} \quad \boldsymbol{d}_k]^T \\ \boldsymbol{f}_{s,k} &= [\boldsymbol{f}_{k-s} \quad \boldsymbol{f}_{k-s+1} \quad \cdots \quad \boldsymbol{f}_{k-1} \quad \boldsymbol{f}_k]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{H}_0 &= [\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} \quad \cdots \quad (\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}^{s-1})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} \quad (\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}^{s})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CE}_{\mathrm{dk}}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}&\boldsymbol{CE}_{\mathrm{dk}}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-1}\boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}&\boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-2}\boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}&\boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-3}\boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}&\cdots&\boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CE}_{\mathrm{fk}}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}&\boldsymbol{CE}_{\mathrm{fk}}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-1}\boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}&\boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-2}\boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}&\boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-3}\boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}&\cdots&\boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}_{\tau,k}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CE}_{\tau,k-s}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{E}_{\tau,k-s}&\boldsymbol{CE}_{\tau,k-s+1}&\boldsymbol{0}&\cdots&\boldsymbol{0}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-1}\boldsymbol{E}_{\tau,k-s}&\boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-2}\boldsymbol{E}_{\tau,k-s+1}&\boldsymbol{CA}_{\mathrm{L}}^{s-3}\boldsymbol{E}_{\tau,k-s+2}&\cdots&\boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

2.2 残差评估

残差用来测试故障出现的可能性,而确定故障是否发生则需要采用决策规则进行残差评估. 残差评估包括残差评估函数选择和阈值确定.

2.2.1 残差评估函数

残差评估函数的选择在故障检测中起关键作用,直接影响故障检测系统的性能. 本文采用均方根函数作为残差评估函数,该函数表征残差信号 $\boldsymbol{r}_k$ 的平均能量. 时域均方根函数描述如下:

$$\|\boldsymbol{r}_k\|_{\mathrm{e}}=\left[\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=k}^{k+\alpha}\boldsymbol{r}_k^{\mathrm{T}}(i)\boldsymbol{r}_k(i)\right]^{1/2}\tag{9}$$

其中,$\|\boldsymbol{r}_k\|_{\mathrm{e}}$ 为残差评估函数;α 为时域中故障检测时间窗口,通常 α 的选取远大于 s.

2.2.2 阈 值

故障检测系统的主要需求之一是减少或预防误报故障,无故障发生时,$\|\boldsymbol{r}_k\|_{\mathrm{e}}$ 小于阈值 J_{th},即

$$J_{\mathrm{th}}=\sup_{d,\tau,f=0}\|\boldsymbol{r}_k\|_{\mathrm{e}}\tag{10}$$

为便于推导,将式(8)变化如下:

$$\boldsymbol{r}_k=\boldsymbol{V}(\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}\boldsymbol{d}_{\tau,s,k}+\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k})\tag{11}$$

其中

$$\boldsymbol{d}_{\tau,s,k}=[\boldsymbol{\beta}_{k-s}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{d}_{s,k}^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{\tau}_{s,k}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}=[\boldsymbol{H}_0\quad\boldsymbol{H}_{\mathrm{d}}\quad\boldsymbol{H}_{\tau,k}]$$

综上可得

$$J_{\mathrm{th}}\leqslant\sigma_{\max}^2(\boldsymbol{VH}_{d,\tau,k})\sup_{d,\tau}\left\{\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=k}^{k+\alpha}\left[\boldsymbol{\beta}_{i-s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}_{i-s}+\sum_{j=0}^{s}\boldsymbol{d}_{i-j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}_{i-j}+\sum_{j=0}^{s}(\tau_{i-j})^2\right]\right\}^{1/2}\tag{12}$$

其中,$\sigma_{\max}(\boldsymbol{VH}_{d,\tau,k})$ 为矩阵 $\boldsymbol{VH}_{d,\tau,k}$ 的最大奇异值.

式(7)变换如下:

$$\boldsymbol{\beta}_{k+1}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{\beta}_k+\boldsymbol{E}_{\tau,d,k}\boldsymbol{d}_{\tau,d,k}+\boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}\boldsymbol{f}_k\tag{13}$$

其中,$\boldsymbol{E}_{\tau,d,k}=[\boldsymbol{E}_{\tau,k}\quad\boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}]$;$\boldsymbol{d}_{\tau,d,k}=[\tau_k\quad\boldsymbol{d}_k]^{\mathrm{T}}$.

根据式(13),可得[12]

$$\left(\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=k}^{k+\alpha}\boldsymbol{\beta}_{i-s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}_{i-s}\right)^{1/2}\leqslant\frac{\Delta_{\mathrm{d}}+(\alpha-1)^{1/2}\Delta_\tau}{(\alpha+1)^{1/2}}\cdot\sup_w\sigma_{\max}[(\mathrm{e}^{\mathrm{j}w}\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}})^{-1}\boldsymbol{E}_{\tau,d,k}]=\sup_w\sigma_{\max}[(\mathrm{e}^{\mathrm{j}w}\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}})^{-1}\boldsymbol{E}_{\tau,d,k}]\left(\frac{\Delta_{\mathrm{d}}}{(\alpha+1)^{1/2}}+\Delta_\tau\right)\tag{14}$$

根据式(2)和 $\tau_k\leqslant\Delta_\tau$,可得

$$\left[\sum_{i=k}^{k+\alpha}\left(\sum_{j=0}^{s}\boldsymbol{d}_{i-j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}_{i-j}+\sum_{j=0}^{s}\boldsymbol{\tau}_{i-j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau}_{i-j}\right)\right]^{1/2}\leqslant(s-1)^{1/2}\Delta_{\mathrm{d}}+[(s+1)(\alpha+1)]^{1/2}\Delta_\tau=(s+1)^{1/2}[\Delta_{\mathrm{d}}+(\alpha+1)^{1/2}\Delta_\tau]\tag{15}$$

联立式(14)和式(15),可得

$$\sup_{d,\tau}\left\{\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=k}^{k+\alpha}\left[\boldsymbol{\beta}_{i-s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}_{i-s}+\sum_{j=0}^{s}\boldsymbol{d}_{i-j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}_{i-j}+\sum_{j=0}^{s}(\tau_{i-j})^2\right]\right\}^{1/2}\leqslant(\lambda_{\mathrm{d}}+s+1)^{1/2}\Delta_{\mathrm{d}}+(\alpha+1)^{1/2}\Delta_\tau[\lambda_{\mathrm{d}}+(s+1)^{1/2}]\tag{16}$$

其中,$\lambda_{\mathrm{d}}=\sigma_{\max}[(\mathrm{e}^{\mathrm{j}w}\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_{\mathrm{L}})^{-1}\boldsymbol{E}_{\tau,d,k}]$.

综上所述,可得到阈值为

$$J_{\mathrm{th}}=\sigma_{\max}^2(\boldsymbol{VH}_{d,\tau,k})\left\{\left(\frac{\lambda_{\mathrm{d}}+s+1}{\alpha+1}\right)^{1/2}\Delta_{\mathrm{d}}+\Delta_\tau[\lambda_{\mathrm{d}}+(s+1)^{1/2}]\right\}\tag{17}$$

2.3 故障检测系统时域优化

故障检测系统优化的目标是:通过增强系统对故障的敏感性和对扰动的鲁棒性来预防误报的故障. 由式(8)可知,残差信号不仅仅受到故障的影响,同样受到未知扰动的影响,因此,需要增强残差对故障的敏感性以及对未知扰动的鲁棒性.

本节推导出故障检测系统的最优问题,并以 Moore-Penrose 逆的形式给出最优问题的解.

2.3.1 系统优化问题描述

定义 1 最小可测故障 $\boldsymbol{f}_{\min}$ 为使 $\inf_{d,\tau}\|\boldsymbol{r}\|_{\mathrm{e}}$ 最小化的故障;最大最小可测故障 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}\min}$ 定义如下:

$$\|\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}\min}\|_2=\max_{f_{\min}}\left(\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\min k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\min k+i}\right)^{1/2}\tag{18}$$

如 2.2.1 节所述,均方根函数表征残差信号 $\boldsymbol{r}_k$ 平均能量. 最大最小可测故障表征具有最大能量的最小可测故障. $\boldsymbol{f}_{\mathrm{m}\min}$ 越小,可检测故障越多. 因此,网络控制系统故障检测的优化目标如下:

$$\min_{\boldsymbol{V}}\left[\max_{f_{\min}}\left(\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\min k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\min k+i}\right)^{1/2}\right]\tag{19}$$

残差评估函数值大于阈值则故障可测,因此,残差评估函数和阈值满足:

$$\inf_{d,\tau}\| \boldsymbol{r}_k \|_{\mathrm{e}} \geqslant J_{\mathrm{th}} \tag{20}$$

根据式(11)描述的残差序列定义,可得

$$\| \boldsymbol{r}_k \|_{\mathrm{e}} \geqslant \| \boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k} \|_{\mathrm{e}} - \sup_{d,\tau}\| \boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}\boldsymbol{d}_{\tau,s,k} \|_{\mathrm{e}} \tag{21}$$

$$\inf_{\boldsymbol{d},\boldsymbol{\tau}}\| \boldsymbol{r}_k \|_{\mathrm{e}} = \| \boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k} \|_{\mathrm{e}} - \sup_{d,\tau,f=0}\| \boldsymbol{r}_k \|_{\mathrm{e}} \tag{22}$$

因此,可得

$$\sup_{d,\tau}\| \boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}\boldsymbol{d}_{\tau,s,k} \|_{\mathrm{e}} = \sup_{d,\tau,f=0}\| \boldsymbol{r}_k \|_{\mathrm{e}} = J_{\mathrm{th}} \tag{23}$$

联立式(20)、式(22)和式(23),可得

$$\| \boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k} \|_{\mathrm{e}} = \left(\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{s,k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k+i}\right)^{1/2} \geqslant 2J_{\mathrm{th}} \tag{24}$$

根据最小可测故障定义和式(24),可得

$$\left(\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}\right)^{1/2} = 2J_{\mathrm{th}} \tag{25}$$

因为

$$\left(\frac{1}{\alpha+1}\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{s,k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{f}_{s,k+i}\right)^{1/2} \geqslant \sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})\left(\frac{1}{\alpha+1}\sum_{j=0}^{s}\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{k+i-i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{k+i-j}\right)^{1/2} \tag{26}$$

其中,$\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})$为矩阵 $\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}$ 的最小奇异值.

联立式(25)和式(26),可得

$$\left(\frac{1}{\alpha+1}\sum_{j=0}^{s}\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i-j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i-j}\right)^{1/2} \leqslant \frac{2J_{\mathrm{th}}}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})} \tag{27}$$

式(27)等式成立,当且仅当$\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i-j}$满足:

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i} = \boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i-1} = \cdots = \boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i-s}$$

根据$f_{\mathrm{m}\,\mathrm{min}}$的定义,最终得

$$\max_{\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}}}\left(\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}\right)^{1/2} = \frac{2J_{\mathrm{th}}}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})}\left(\frac{\alpha+1}{s+1}\right)^{1/2} \tag{28}$$

将式(17)代入式(28),故障检测系统最优化问题转化为求解 $\boldsymbol{V}$,使其满足:

$$\min_{\boldsymbol{V}} J = \min_{\boldsymbol{V}}\left[\max_{\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}}}\left(\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}\right)^{1/2}\right] = 2\min_{\boldsymbol{V}}\frac{\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})}\left[\left(\frac{\lambda_{\mathrm{d}}}{s+1}+1\right)^{1/2}\Delta_{\mathrm{d}} + (\alpha+1)^{1/2}\Delta_{\tau}\left(\frac{\lambda_{\mathrm{d}}}{(s+1)^{1/2}}+1\right)\right] \tag{29}$$

由于 λ_{d},Δ_{τ} 和 Δ_{d} 在每一个采样点均为已知,因此,式(29)的优化问题等价于:

$$\min_{\boldsymbol{V}}\frac{\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})} \tag{30}$$

2.3.2　优化问题求解

引理 1[12]　给定具有适当维数的矩阵 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{P}$,$\boldsymbol{X} = -\boldsymbol{P}\boldsymbol{H}^{+}$是式(31)描述的最优问题的解:

$$\min_{\boldsymbol{X}}\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{P}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}) \tag{31}$$

其中,$\boldsymbol{H}^{+}$为矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的 Moore-Penrose 逆.

定理 1　式(19)表示的网络控制系统故障检测优化问题的解 $\boldsymbol{V}^{*}$ 为

$$\boldsymbol{V}^{*} = \boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-} - \boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})^{+}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}} \tag{32}$$

其中,$\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}$和 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}$ 分别为式(11)表示的已知矩阵,$\mathrm{rank}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}) = \gamma$,$\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}$ 满足 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{0}$,$\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}$ 满足 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}} = \boldsymbol{I}_{\gamma\times\gamma}$,$\mathrm{rank}([\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}) = p\times(s+1)$,$(\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})^{+}$为 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}$的 Moore-Penrose 逆.

证明　设 $\boldsymbol{V}^{*} = [\boldsymbol{X}_1 \quad \boldsymbol{X}]\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\\ \boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\end{bmatrix} = \boldsymbol{X}_1\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}$,其中 $\boldsymbol{X}_1 \in \mathbf{R}^{\gamma\times\gamma}$且 $\mathrm{rank}(\boldsymbol{X}_1) = \gamma$.

将 $\boldsymbol{V}^{*}$ 代入式(30),可得

$$\min_{\boldsymbol{V}}\frac{\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})} = \frac{\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{V}^{*}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{V}^{*}\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}})} = \frac{\sigma_{\mathrm{max}}[(\boldsymbol{X}_1\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}})\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}]}{\sigma_{\mathrm{min}}(\boldsymbol{X}_1)} \geqslant \sigma_{\mathrm{max}}[(\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}+\boldsymbol{X}_1^{-1}\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}})\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}] \tag{33}$$

上式等式成立,当且仅当 $\boldsymbol{X}_1 = \boldsymbol{I}_{\gamma\times\gamma}$. 可得

$$\min_{\boldsymbol{V}}\left[\max_{\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}}}\left(\sum_{i=0}^{\alpha}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{min}k+i}\right)^{1/2}\right] \Leftrightarrow \min_{\boldsymbol{X}}\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}) \tag{34}$$

由引理 1,$\min_{\boldsymbol{X}}\sigma_{\mathrm{max}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}+\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})$的最优解为

$$\boldsymbol{X} = -\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})^{+} \tag{35}$$

因此,式(19)的最优解为

$$\boldsymbol{V}^{*} = \boldsymbol{X}_1\boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}} = \boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}} = \boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-} - \boldsymbol{H}_{\mathrm{f}}^{-}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}}\boldsymbol{H}_{d,\tau,k})^{+}\boldsymbol{H}_{\mathrm{fn}} \tag{36}$$

证毕

3　仿真验证

本节以飞机纵向网络控制系统故障检测为例,利用伪执行器故障描述传感器故障,验证算法的有效性.

纵向飞行控制系统的离散时间模型为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}_{k+1} &= \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}h}\boldsymbol{x}_k + \int_0^h \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{E}_{\tau,k}\tau_k + \\ &\quad \boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}d_k + \boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}f_k\\ \boldsymbol{y}_k &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_k\end{aligned}\right\} \tag{37}$$

其中,$\boldsymbol{x}=[v \quad q \quad \theta]^{\mathrm{T}}$,$v$ 为纵向速度,q 为俯仰角速率,θ 为俯仰角;$u=[\delta_z]$,δ_z 为升降舵舵偏;系统矩阵分别为

$$\mathrm{e}^{Ah}=\begin{bmatrix}0.9944 & -0.1203 & -0.4302\\ 0.0017 & 0.9902 & -0.0747\\ 0 & 0.8187 & 0\end{bmatrix}$$

$$\int_0^h \mathrm{e}^{At}\boldsymbol{B}\mathrm{d}t=[0.4252 \quad -0.0082 \quad 0.1813]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{C}=[1 \quad 0 \quad 0]$$

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{dk}}=[0.5 \quad 0 \quad -1]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{fk}}=[0 \quad 1 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

飞机控制系统采样时间为 10 ms,未知时延 $\tau_k \leqslant \Delta_\tau = 3$ ms,$\boldsymbol{E}_{\tau,k}$ 与时延 τ_k 有关,需要在采样时刻在线计算,$V(z)$ 的阶次 $s=2$,故障检测时间窗口 $\alpha=10$,随机扰动 d_k 为有界零均值随机序列且上界 $\Delta_{\mathrm{d}}=0.5$,传感器故障 f_k 如图 1.

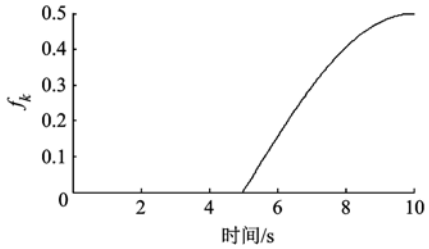


图 1 故障信号 f_k 曲线

图 2 为传感器发生缓慢故障时残差的响应情况. 残差响应表明:某一传感器出现故障后,残差会显著的发生变化,该残差可检测缓慢传感器故障,当存在建模误差和随机噪声时,亦可以准确预报故障.

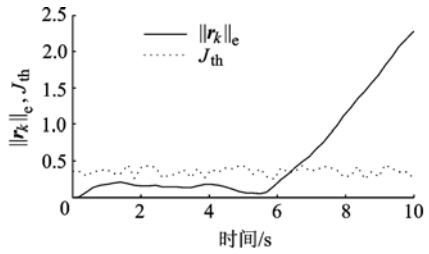


图 2 残差评估曲线

仿真结果表明:在飞机网络控制系统采样周期为 10 ms 的情况下,定理 1 的结论能够得到式(29)表示的最优化问题的最优解,实现了飞行器网络控制系统在线故障检测.

4 结 论

本文针对飞行器网络控制系统故障检测,提出一种时域在线优化算法. 飞行器网络控制系统的在线故障检测系统,利用采样时刻获得的输入输出数据以及历史数据,进行故障检测. 本文提出的基于 Moore-Penrose 逆的在线故障检测算法,结构简单,计算量小且易于工程实现. 仿真结果表明:在未知时延存在的情况下,该算法对故障敏感,对时延等因素引起的扰动具有鲁棒性,适用于飞行器网络控制系统在线故障检测.

参考文献(References)

[1] Dong Chaoyang, Xu Lijie, Chen Yu, et al. Networked flexible spacecraft attitude maneuver based on adaptive fuzzy sliding mode control[J]. Acta Astronautica, 2009, 65(11-12): 1561 – 1570

[2] 徐利杰,董朝阳,王青. 空间飞行器姿态网络控制系统的模糊变结构控制[J]. 宇航学报,2008,29(2):590 – 595
Xu Lijie, Dong Chaoyang, Wang Qing. The fuzzy variable structure control of spacecraft attitude networked control systems[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 590 – 595 (in Chinese)

[3] Patton R J, Uppal F J, Simani S, et al. Robust FDI applied to thruster faults of a satellite system[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(9): 1093 – 1109

[4] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Yonggang. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proceedings of IEEE, 2007, 95(1): 138 – 162

[5] 王永强,叶昊,王桂增. 网络化控制系统故障检测技术最新进展[J]. 控制理论与应用,2009,26(4):400 – 409
Wang Yongqiang, Ye Hao, Wang Guizeng. Recent development of fault detection techniques for networked control systems[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(4): 400 – 409 (in Chinese)

[6] Huang D, Nguang S K. Robust fault estimator design for uncertain networked control systems with random time delay: an ILMI approach[J]. Information Sciences, 2010, 180(3): 465 – 480

[7] 吕明,吴晓蓓,徐志良,等. 具有异步时钟的长时延网络控制系统故障检测[J]. 信息与控制,2007,36(3):386 – 391
Lü Ming, Wu Xiaobei, Xu Zhiliang, et al. Fault detection for networked control systems with long time delays of asynchronous clock[J]. Information and Control, 2007, 36(3): 386 – 391 (in Chinese)

[8] Gao H J, Chen T, Wang L. Robust fault detection with missing measurements[J]. International Journal of Control, 2008, 81(5): 804 – 819

[9] Ding Qiang, Zhong Maiying. On designing H_∞ fault detection filter for Markovian jump linear systems with polytopic uncertainties[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2010, 6(3A): 995 – 1004

[10] Mao Zehui, Jiang Bin, Shi Peng. H_∞ fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(5): 1336 – 1343

[11] Wang Yongqiang, Ye Hao, Wang Guizeng. Fault detection of NCS based on eigendecomposition, adaptive evaluation and adaptive threshold[J]. International Journal of Control, 2007, 80(12): 1903 – 1911

[12] Ding X, Guo L. An approach to time domain optimization of observer-based fault detection systems[J]. International Journal of Control, 1998, 69(3): 419 – 442

(编 辑:刘登敏)