

具有多通道数据传输的飞行器网络控制系统故障检测

王青^{1a}, 王昭磊^{1a}, 祁成东^{1a}, 董朝阳^{1b}, 牛尔卓²

(1. 北京航空航天大学 a. 自动化科学与电气工程学院, b. 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 中航工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要: 研究具有多通道数据传输的飞行器网络控制系统故障检测滤波器(FDF)设计问题. 考虑每个通道存在各自的网络时延, 且丢包符合 Markov 随机过程. 首先, 将系统建模为转移概率部分已知的离散 Markov 跳变线性系统, 并设计了基于观测器的故障检测滤波器, 将故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题; 然后, 利用 LMI 工具给出了 FDF 的可解条件和求解方法; 最后, 通过某飞行器网络控制系统的数值仿真实验验证了所提出方法的有效性.

关键词: 故障检测; 网络控制系统; 多通道数据传输; Markov 跳变系统

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault detection for networked flight control systems with multiple channels data transmission

WANG Qing^{1a}, WANG Zhao-lei^{1a}, QI Cheng-dong^{1a}, DONG Chao-yang^{1b}, NIU Er-zhuo²

(1a. School of Automation Science and Electrical Engineering, 1b. School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China. 2. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China. Correspondent: WANG Zhao-lei, E-mail: beiliwz1123@163.com)

Abstract: The fault detection filter(FDF) design problem for a class of networked flight control systems with multiple channels data transmission is studied. Considering the network-induced delay and packet dropouts of each channel, discrete-time Markov jump linear system model with partly known transition probabilities is established. Based on the obtained model, observer-based FDF is designed. Then the addressed fault detection problem is converted into a problem of H_∞ filtering. Sufficient conditions to guarantee the existence of the FDF and solutions of this problem are simultaneity derived. Finally, a simulation experiment on a networked flight control system validates the effectiveness of the proposed method.

Key words: fault detection; networked control systems; multiple channels data transmission; Markovian jump systems

0 引言

新一代飞行器常利用分布式数据总线构建内部管控网络, 形成了飞行器网络控制系统. 网络的引入能够很好地解决系统内部日益复杂的数据共享和数据传输问题, 克服了传统的点对点传输方式布线复杂、维护成本高、体积庞大等缺陷^[1-3]. 但是, 网络带来的时延和丢包问题势必会给系统带来影响, 而控制系统的稳定性和可靠性至关重要^[4-5], 因此, 研究网络控制系统故障检测问题有重要的理论和实际意义^[6-7].

目前, 在该领域已取得了一定的成果, 其中文献[8]将故障观测器构建成随机时延切换系统, 将系统均方渐近稳定条件归结为 LMI 求解问题; 文献[9]采用自适应观测器方法研究了 Markov 跳变系统的鲁棒

故障检测问题; 文献[10]结合多速率采样和状态推广方法, 将具有随机长时延的网络控制系统建模为 Markov 跳变系统, 同时给出了 H_∞ 检测滤波器设计方法. 上述方法都将传感器输出作为一路通道, 采用同一个时延和丢包特性来描述. 然而, 实际系统中每个传感器向数据总线传输数据是相对自主的, 数据传输具有多通道的特性. 对此, 文献[4]研究了具有多通道的网络控制系统故障检测问题, 但只考虑时延和丢包对检测系统的影响, 未考虑其对控制系统的影响. 在实际闭环系统中, 控制器会用到来自传感器的反馈信息, 而这些信息的延迟或丢失会对控制系统产生影响, 进而影响故障检测系统的性能. 因此, 对于故障检测, 必须考虑上述问题, 这也是本文研究的出发点.

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074027).

作者简介: 王青(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事飞行器控制、故障诊断等研究; 王昭磊(1986—), 男, 博士生, 从事网络控制、故障检测的研究.

本文针对具有多通道数据传输的飞行器网络控制系统,在考虑各通道数据传输相对自主,各通道时延不尽相同,且丢包符合 Markov 随机过程的前提下,在文献[4]的基础上,考虑了时延和丢包对控制系统的影响,针对状态转移概率完全已知、部分已知以及完全未知 3 种情况,分别设计了基于观测器的故障检测滤波器,将检测问题转化为 H_∞ 滤波问题. 具体仿真实例表明,本文提出的方法具有较好的检测效果.

1 问题描述

图 1 为飞行器网络控制系统结构. 如图 1 所示,本文考虑飞行器网络控制系统中执行器与控制器间采用点对点直接连接,控制器与传感器间通过多通道总线网络连接.

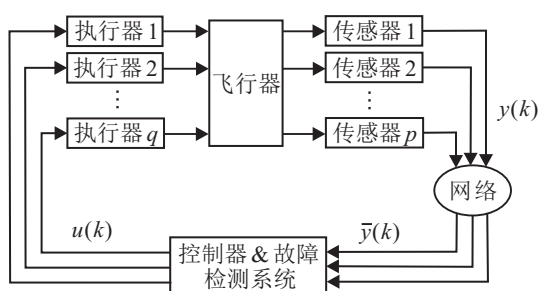


图 1 飞行器网络控制系统结构

考虑具有如下形式的网络控制系统模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ Ax(k) + B_u u(k) + B_d d(k) + B_f f(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 为系统状态; $y(k) \in R^p$ 为输出信号; $u(k) \in R^q$ 为系统输入; $d(k) \in R^s$ 和 $f(k) \in R^v$ 分别为 L_2 范数有界的未知扰动和故障信号; 系数阵 A, B_u, B_d, B_f, C 为常数阵, 且分别具有适当的维数.

为了方便描述,对系统作如下假设:

假设 1 传感器、控制器和执行器节点均为时间驱动; 时延系统状态因丢包而不可全部获得, 因此控制器采用状态估计反馈.

假设 2 网络传输是多通道的, 各通道时延、丢包情况不一致, 时延有界且为采样周期的整数倍, 丢包符合 Markov 过程.

考虑实际系统中每个传感器向数据总线传输数据是相对自主的, 这里用 $y_l(k)$ 表示第 l 个传感器的输出, $\sigma_l(k) \in Z = \{0, 1\}$ 表示该通道的传输状态, 当取值为 1 时表示数据传输成功, 当取值为 0 时表示数据包丢失. 同时考虑网络时延 $\tau_l(k) \in N$, 且满足 $\tau \leq \tau_l(k) \leq \bar{\tau}$, 其中 $\bar{\tau}, \tau \in N$ 分别为时延的上下界, 则检测系统实际收到的第 l 个通道的信号可以表示为

$$\bar{y}_l(k) = \sigma_l(k) y_l(k - \tau_l(k)), \quad l = 1, 2, \dots, p. \quad (2)$$

为了方便描述, 定义 k 时刻传输状态矩阵 $M_{\mu(k)} = \text{diag}\{\sigma_1(k), \dots, \sigma_p(k)\}$. 因为每条通道有 2 种传输状态, 所以 p 条通道共有 2^p 种传输情况, 从而下标 $\mu(k) \in \Gamma = \{1, 2, \dots, 2^p\}$ 可描述为有限模态 Markov 链, $M_{\mu(k)}$ 值可取为 $M_1 = \text{diag}\{0, \dots, 0\}, M_2 = \text{diag}\{0, \dots, 1\}, \dots, M_{2^p} = \text{diag}\{1, \dots, 1\}$.

定义 Markov 模态转移概率矩阵为 $\Pi = (\pi_{ij})$, 其中 $\pi_{ij} = \text{Prob}(\mu(k+1) = j | \mu(k) = i) (\forall i, j \in \Gamma)$ 表示从模态 i 到 j 的转移概率, 并且有 $\sum_{j=1}^{2^p} \pi_{ij} = 1 (\forall i \in \Gamma)$.

综合所有通道, 数据传输动态模型可以表示为

$$\bar{y}(k) = M_{\mu(k)} y(k - \tau(k)), \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} y(k - \tau(k)) &\triangleq \\ [y_1^T(k - \tau_1(k)), \dots, y_p^T(k - \tau_p(k))]^T. \end{aligned}$$

注 1 由于网络带宽有限, 在每个采样时刻 k , 只有部分传感器输出信号能够成功传输. 因此, 本文将每一路传感器视为一路信息通道, 将多输入多输出系统描述为多通道数据传输. 另一方面, 实际系统中时延和丢包往往同时出现, 将其描述为式 (3) 的形式较为符合实际.

注 2 不少文献将丢包描述为符合 Bernoulli 分布的随机模型, 将每个通道的一次传输看成是一次 Bernoulli 实验^[1]. 然而, 实际多通道网络不同通道间的传输状态可能相互影响, 而采用 Markov 跳变模型能够很好地体现这种传输特点. 值得注意的是, 若将 Bernoulli 随机变量看成 Markov 链, 则 Bernoulli 模型可视为 Markov 跳变模型的一个特例.

结合图 1 所描述的系统, 构造基于观测器的故障检测滤波器为

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \\ A\hat{x}(k) + B_u u(k) + L_{\mu(k)} (\bar{y}(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k), \\ r(k) = V_{\mu(k)} (\bar{y}(k) - \hat{y}(k)). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\hat{x}(k) \in R^n$ 和 $\hat{y}(k) \in R^p$ 分别为滤波器的状态向量和输出向量, $\bar{y}(k)$ 为经过延迟和丢包后的系统输出, $r(k)$ 为残差信号, $u(k) = K\hat{x}(k)$, K 为反馈增益阵, $L_{\mu(k)}$ 和 $V_{\mu(k)}$ 为待求滤波器参数阵.

注 3 由于存在丢包, 系统状态往往不能全部获得, 因此这里采用状态估计反馈 $u(k) = K\hat{x}(k)$. 由式 (4) 可知, $\hat{x}(k)$ 中包含了时延和丢包信息, 因此控制量 $u(k)$ 中也包含了时延和丢包信息, 从而给系统带来影响, 且是无法避免的. 而文献[4]未考虑网络影响, 在系统已稳定的情况下设计滤波器, 忽略了系统与滤波

器间的耦合, 从此观点看, 本文的考虑更符合实际.

由于控制系统与检测滤波器间存在耦合, 在设计滤波器时需要考虑控制系统的影响. 令状态估计误差为 $e_1(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, 结合式 (1) 和 (4) 可得如下误差系统:

$$e_1(k+1) = (A - L_{\mu(k)}C)e_1(k) + L_{\mu(k)}Cx(k) + B_d d(k) - L_{\mu(k)}M_{\mu(k)}Cx(k - \tau(k)) + B_f f(k). \quad (5)$$

令 $e(k) = [x^T(k), e_1^T(k)]^T$, $w(k) = [d^T(k), f^T(k)]^T$, $r_e(k) = r(k) - f(k)$, 结合式 (1)~(5) 可得如下增广系统:

$$\begin{cases} e(k+1) = A_{1\mu(k)}He(k - \tau(k)) + A_{\mu(k)}e(k) + Bw(k), \\ r_e(k) = C_{1\mu(k)}He(k - \tau(k)) + C_{\mu(k)}e(k) + Dw(k), \\ e(0) = e_0, \\ \mu(0) = \mu_0. \end{cases} \quad (6)$$

其中: e_0 和 μ_0 分别为 $e(k)$ 和 $\mu(k)$ 的初始值, 且有

$$A_{\mu(k)} = \begin{bmatrix} A + B_u K & -B_u K \\ L_{\mu(k)}C & A - L_{\mu(k)}C \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} B_d & B_f \\ B_d & B_f \end{bmatrix}, \quad A_{1\mu(k)} = \begin{bmatrix} 0 \\ -L_{\mu(k)}M_{\mu(k)}C \end{bmatrix},$$

$$D = [0, -I], \quad H = [I, 0],$$

$$C_{\mu(k)} = [-V_{\mu(k)}C, V_{\mu(k)}C],$$

$$C_{1\mu(k)} = V_{\mu(k)}M_{\mu(k)}C.$$

定义 1 当 $w(k) = 0$ 时, 如果对于任意初始值 (e_0, μ_0) , 有 $E\left(\sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2 | e_0, \mu_0\right) < \infty$, 则称闭环网络控制系统 (6) 是随机稳定的^[12].

综上所述, 本文目标是确定故障检测滤波器 (4) 的参数阵 $L_{\mu(k)}$ 和 $V_{\mu(k)}$, 使系统 (6) 在 $w(k) = 0$ 时随机稳定, 且对于任意非零 $w(k) \in L_2[0, \infty)$, 系统 (6) 满足如下 H_∞ 性能指标:

$$\sum_{k=0}^{\infty} E\{\|r_e(k)\|^2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|w(k)\|^2, \quad (7)$$

其中 $\gamma > 0$ 为给定的标量.

为了完成故障检测, 给出残差评估函数和故障报警阈值

$$\begin{cases} J(k) = \left\{ \sum_{l=0}^k r_e^T(l)r_e(l) \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ J_{th} = \sup_{w \in L_2[0, \infty), f=0} E(J(k)). \end{cases} \quad (8)$$

则故障可以通过以下检测逻辑检测出来:

$$\begin{cases} J(k) > J_{th} \Rightarrow \text{故障}; \\ J(k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{正常}. \end{cases} \quad (9)$$

2 主要结论

下面给出具有多通道时延和 Markov 丢包的网络控制系统故障检测滤波器设计方法. 定理 1 给出了系统 (6) 随机稳定且满足式 (7) 所示 H_∞ 性能指标的充分条件; 定理 2 给出了故障检测滤波器参数的求解方法. 此外, 假设模态 $\mu(k)$ 的转移概率矩阵是部分已知的, 为了方便描述, 定义 $\Gamma = \Gamma_k^i + \Gamma_{uk}^i$, 其中

$$\Gamma_k^i = \{j : \pi_{ij} \text{ 已知}\}, \quad \Gamma_{uk}^i = \{j : \pi_{ij} \text{ 未知}\},$$

$$\pi_k^i = \sum_{j \in \Gamma_k^i} \pi_{ij}.$$

且对于任意的 $\mu(k) = i \in \Gamma$, 记 $A_{\mu(k)} = A_i, A_{1\mu(k)} = A_{1i}, C_{\mu(k)} = C_i, C_{1\mu(k)} = C_{1i}, L_{\mu(k)} = L_i, V_{\mu(k)} = V_i, M_{\mu(k)} = M_i$.

定理 1 给定标量 $0 \leq \tau \leq \bar{\tau}$ 以及 $\gamma > 0$, 若存在矩阵 $P_i > 0, Q > 0, i \in \Gamma$, 使如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \pi_k^i \Xi_1^i & 0 & \pi_k^i \Sigma_1^i & \Sigma_2^i P_k^i \\ * & -\pi_k^i \gamma^2 I & \pi_k^i D^T & B^T P_k^i \\ * & * & -\pi_k^i I & 0 \\ * & * & * & -P_k^i \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Xi_1^i & 0 & \Sigma_1^i & \Sigma_2^i P_j^i \\ * & -\gamma^2 I & D^T & B^T P_j^i \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -P_j^i \end{bmatrix} < 0, \quad \forall j \in \Gamma_{uk}^i. \quad (11)$$

则系统 (6) 随机稳定且满足式 (7) 所示 H_∞ 性能指标. 其中 * 代表对称矩阵中的对称项, 且有

$$\Xi_1^i = \begin{bmatrix} (\hat{\tau} + 1)\bar{Q} - P_i & 0 \\ * & -Q \end{bmatrix},$$

$$\hat{\tau} = \bar{\tau} - \tau, \quad \bar{Q} = H^T Q H,$$

$$\Sigma_1^i = [C_i, C_{1i}]^T, \quad \Sigma_2^i = [A_i, A_{1i}]^T,$$

$$P_k^i = \sum_{j \in \Gamma_k^i} \pi_{ij} P_j.$$

证明 构造 Lyapunov 函数

$$V_k = e^T(k)P_i e(k) + \sum_{s=k-\tau(k)}^{k-1} e^T(s)\bar{Q}e(s) + \sum_{h=-\bar{\tau}+2}^{-\tau+1} \sum_{s=k-1+h}^{k-1} e^T(s)\bar{Q}e(s),$$

则有

$$E\{\Delta V_k\} = E\{V_{k+1}|e(k)\} - V_k = e^T(k+1) \sum_{j \in \Gamma} \pi_{ij} P_j e(k+1) - e^T(k)P_i e(k) + (\hat{\tau} + 1)e^T(k)\bar{Q}e(k) -$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{s=k-\bar{\tau}+1}^{k-\tau} e^T(s)\bar{Q}e(s)- \\
 & e^T(k-\tau(k))\bar{Q}e(k-\tau(k))+ \\
 & \sum_{s=k-\tau(k)+1}^{k-\tau(k)} e^T(s)\bar{Q}e(s) \leq \\
 & e^T(k+1) \sum_{j \in \Gamma} \pi_{ij} P_j e(k+1)- \\
 & e^T(k) P_i e(k) + (\hat{\tau}+1) e^T(k) \bar{Q} e(k)- \\
 & \sum_{s=k-\bar{\tau}+1}^{k-\tau} e^T(s)\bar{Q}e(s)- \\
 & e^T(k-\tau(k))\bar{Q}e(k-\tau(k))+ \\
 & \sum_{s=k-\bar{\tau}+1}^{k-\tau} e^T(s)\bar{Q}e(s) = \\
 & e^T(k+1) \sum_{j \in \Gamma} \pi_{ij} P_j e(k+1)- \\
 & e^T(k) P_i e(k) + (\hat{\tau}+1) e^T(k) \bar{Q} e(k)- \\
 & e^T(k-\tau(k))\bar{Q}e(k-\tau(k)). \tag{12}
 \end{aligned}$$

令 $\zeta(k) = [e^T(k) \quad e^T(k-\tau(k))H^T]^T$, 结合式(6)和(12)可得

$$\begin{aligned}
 & E\{\Delta V_k\} \leq \\
 & e^T(k+1) \sum_{j \in \Gamma} \pi_{ij} P_j e(k+1) + \zeta^T(k) \Xi_1^i \zeta(k) = \\
 & e^T(k+1) \left[P_k^i + \sum_{j \in \Gamma_{uk}^i} \pi_{ij} P_j \right] e(k+1) + \\
 & \zeta^T(k) \left[\pi_k^i + \sum_{j \in \Gamma_{uk}^i} \pi_{ij} \right] \Xi_1^i \zeta(k) = \\
 & \zeta^T(k) \left\{ [\pi_k^i \Xi_1^i + \Xi_2^i] + \sum_{j \in \Gamma_{uk}^i} \pi_{ij} (\Xi_1^i + \Xi_3^i) \right\} \zeta(k). \tag{13}
 \end{aligned}$$

其中: $\Xi_2^i = \Sigma_2^i P_k^i (\Sigma_2^i)^T$, $\Xi_3^i = \Sigma_2^i P_j (\Sigma_2^i)^T$.

对式(10)进行矩阵分块, 并运用 Schur 补引理可得

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \pi_k^i \Xi_1^i & 0 \\ * & -\pi_k^i \gamma^2 I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \pi_k^i \Sigma_1^i & \Sigma_2^i P_k^i \\ \pi_k^i D^T & B^T P_k^i \end{bmatrix} \times \\
 & \begin{bmatrix} -\pi_k^i I & 0 \\ * & -P_k^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \pi_k^i \Sigma_1^i & \Sigma_2^i P_k^i \\ \pi_k^i D^T & B^T P_k^i \end{bmatrix}^T < 0. \tag{14}
 \end{aligned}$$

合并上式矩阵, 由其(1,1)分块可知

$$\pi_k^i \Xi_1^i + \Sigma_2^i P_k^i (\Sigma_2^i)^T + \pi_k^i \Sigma_1^i (\Sigma_1^i)^T < 0.$$

由于 $\pi_k^i \Sigma_1^i (\Sigma_1^i)^T \geq 0$, 根据矩阵 Ξ_1^i, Ξ_2^i 定义可得 $\pi_k^i \Xi_1^i + \Xi_2^i < 0$, 用相同方法对式(11)进行操作可得 $\Xi_1^i + \Xi_3^i < 0$. 故结合不等式(13)可得

$$\begin{aligned}
 & E\{\Delta V_k\} \leq \\
 & -\lambda_{\min}[-\pi_k^i \Xi_1^i - \Xi_2^i] \zeta^T(k) \zeta(k) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in \Gamma_{uk}^i} \pi_{ij} \lambda_{\min}[-(\Xi_1^i + \Xi_3^i)] \zeta^T(k) \zeta(k) \leq \\
 & -(\beta_1 + \beta_2) \zeta^T(k) \zeta(k), \tag{15}
 \end{aligned}$$

其中 $\lambda_{\min}[\cdot]$ 表示矩阵的最小特征值, 且有

$$\begin{aligned}
 & \beta_1 = \inf\{\lambda_{\min}[-\pi_k^i \Xi_1^i - \Xi_2^i]\}, \\
 & \beta_2 = \inf\{(1 - \pi_k^i) \lambda_{\min}[-(\Xi_1^i + \Xi_3^i)]\}.
 \end{aligned}$$

由此可得, 对 $\forall N > 0$, 总有

$$E\{V_{N+1} - V_0\} \leq -(\beta_1 + \beta_2) \sum_{k=0}^N E\{\zeta^T(k) \zeta(k)\}, \tag{16}$$

即

$$\sum_{k=0}^N E\{\zeta^T(k) \zeta(k)\} \leq \frac{1}{(\beta_1 + \beta_2)} E\{V_0\} < \infty.$$

由此证得 $w(k) = 0$ 时, 系统(6)随机稳定.

接下来证明 H_∞ 性能指标. 考虑如下指标:

$$J_N = E\left\{ \sum_{k=0}^N [r_e^T(k) r_e(k) - \gamma^2 w^T(k) w(k)] \right\}.$$

在零初始条件下有

$$\begin{aligned}
 & J_N = E\left\{ \sum_{k=0}^N [r_e^T(k) r_e(k) - \right. \\
 & \left. \gamma^2 w^T(k) w(k) + \Delta V_k] \right\} - E\{V_{N+1}\} \leq \\
 & E\left\{ \sum_{k=0}^N [r_e^T(k) r_e(k) - \gamma^2 w^T(k) w(k) + \Delta V_k] \right\} = \\
 & \sum_{k=0}^{\infty} \psi^T(k) \left\{ (\pi_k^i \Xi_1^i + \Xi_2^i) + \sum_{j \in \Gamma_{uk}^i} \pi_{ij} (\Xi_1^i + \Xi_3^i) \right\} \psi(k), \tag{17}
 \end{aligned}$$

其中 $\psi(k) = [\zeta^T(k), w^T(k)]^T$, 且有如下矩阵定义:

$$\begin{aligned}
 & \bar{\Xi}_1^i = \begin{bmatrix} \Xi_1^i + \Omega_1^i & \Omega_2^i \\ * & \Omega_3^i \end{bmatrix}, \\
 & \bar{\Xi}_2^i = \begin{bmatrix} \Xi_2^i & \bar{\Omega}_2^i \\ * & \bar{\Omega}_3^i \end{bmatrix}, \quad \bar{\Xi}_3^i = \begin{bmatrix} \Xi_3^i & \bar{\Omega}_2^i \\ * & \bar{\Omega}_3^i \end{bmatrix}, \\
 & \Omega_1^i = \Sigma_1^i (\Sigma_1^i)^T, \quad \Omega_2^i = \Sigma_1^i D, \quad \Omega_3^i = D^T D - \gamma^2 I, \\
 & \bar{\Omega}_2^i = \Sigma_2^i P_k^i B, \quad \bar{\Omega}_3^i = B^T P_k^i B, \\
 & \bar{\bar{\Omega}}_2^i = \Sigma_2^i P_j B, \quad \bar{\bar{\Omega}}_3^i = B^T P_j B.
 \end{aligned}$$

合并式(14), 结合上述矩阵定义可将其改写为

$$\pi_k^i \begin{bmatrix} \bar{\Xi}_1^i + \Omega_1^i & \Omega_2^i \\ * & \Omega_3^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\Xi}_2^i & \bar{\Omega}_2^i \\ * & \bar{\Omega}_3^i \end{bmatrix} < 0.$$

整理可得 $\pi_k^i \bar{\Xi}_1^i + \bar{\Xi}_2^i < 0$. 用同样方法由式(11)进行 Schur 补可得 $\bar{\Xi}_1^i + \bar{\Xi}_3^i < 0$, 故可证得 $(\pi_k^i \bar{\Xi}_1^i + \bar{\Xi}_2^i) + \sum_{j \in \Gamma_{uk}^i} \pi_{ij} (\bar{\Xi}_1^i + \bar{\Xi}_3^i) < 0$. 结合式(17)可得 $J_\infty < 0$, 即 $\sum_{k=0}^{\infty} E\{\|r_e(k)\|^2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|w(k)\|^2$, 定理 1 得证. \square

注 4 在转移概率部分已知时, 定理 1 给出了系统 (6) 随机稳定且满足式 (7) 所示 H_∞ 性能指标的充分条件. 考虑两种极端情况, 当转移概率完全已知时, 不等式 (10)、(11) 退化为 (10), 即传统 Markov 跳变系统故障检测问题^[13]; 当概率完全未知时, 不等式 (10)、(11) 退化为 (11), 即转化为传统的切换系统故障检测问题^[14]. 故本文考虑的转移概率部分已知的检测方法更具有普适性.

由于不等式 (10) 和 (11) 中包含未知矩阵相乘项 $\Sigma_2^i P_k^i, \Sigma_2^i P_j$ 等, 无法用 LMI 工具求解. 为求解参数阵 L_i 和 V_i , 给出如下定理.

定理 2 给定标量 $0 \leq \tau \leq \bar{\tau}$ 以及 $\gamma > 0$, 如果存在矩阵 $P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} & P_{2i} \\ * & P_{3i} \end{bmatrix} > 0 (i \in \Gamma), Q > 0$, 以及 $\bar{L}_i, \bar{V}_i, X_i, Y_i, U_i$, 使如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & 0 & \Theta_{13} \\ * & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ * & * & \Theta_{33} \end{bmatrix} < 0, \quad (18)$$

则系统 (6) 随机稳定且满足式 (7) 所示 H_∞ 性能指标. 其中

$$\Theta_{11} = \begin{bmatrix} (\hat{\tau} + 1)Q - P_{1i} & -P_{2i} & 0 \\ * & -P_{3i} & 0 \\ * & * & -Q \end{bmatrix};$$

$$\Theta_{13} =$$

$$\begin{bmatrix} -C^T \bar{V}_i^T & (A + B_u K)^T X_i + C^T \bar{L}_i \\ C^T \bar{V}_i^T & -(B_u K)^T X_i + A^T Y_i - C^T \bar{L}_i \rightarrow \\ C^T M_i \bar{V}_i^T & -C^T M_i \bar{L}_i \\ (A + B_u K)^T U_i + C^T \bar{L}_i \\ \leftarrow -(B_u K)^T U_i + A^T Y_i - C^T \bar{L}_i \\ -C^T M_i \bar{L}_i \end{bmatrix};$$

$$\Theta_{22} = \text{diag}\{-\gamma^2 I, -\gamma^2 I\};$$

$$\Theta_{23} = \begin{bmatrix} 0 & B_d^T X_i + B_d^T Y_i & B_d^T U_i + B_d^T Y_i \\ -I & B_f^T X_i + B_f^T Y_i & B_f^T U_i + B_f^T Y_i \end{bmatrix};$$

$$\Theta_{33} = \begin{bmatrix} -I & 0 & 0 \\ * & \Upsilon_{1j} - X_i - X_i^T & \Upsilon_{2j} - X_i - Y_i^T \\ * & * & \Upsilon_{3j} - Y_i - Y_i^T \end{bmatrix}.$$

对于 $\forall j \in \Gamma_{uk}^i$, 有

$$\Upsilon_{1j} \triangleq P_{1j}, \Upsilon_{2j} \triangleq P_{2j}, \Upsilon_{3j} \triangleq P_{3j};$$

对于 $\forall j \in \Gamma_k^i$, 有

$$\Upsilon_{1j} \triangleq \frac{1}{\pi_k^i} \sum_{j \in \Gamma_k^i} \pi_{ij} P_{1j},$$

$$\Upsilon_{2j} \triangleq \frac{1}{\pi_k^i} \sum_{j \in \Gamma_k^i} \pi_{ij} P_{2j},$$

$$\Upsilon_{3j} \triangleq \frac{1}{\pi_k^i} \sum_{j \in \Gamma_k^i} \pi_{ij} P_{3j}.$$

若式 (18) 有解, 则滤波器参数为

$$L_i = (Y_i^{-1})^T \bar{L}_i^T, V_i = \bar{V}_i. \quad (19)$$

证明 定义 $\Upsilon_j = \begin{bmatrix} \Upsilon_{1j} & \Upsilon_{2j} \\ * & \Upsilon_{3j} \end{bmatrix} > 0, R_i = \begin{bmatrix} X_i & U_i \\ Y_i & Y_i \end{bmatrix}$, 则定理 1 中的式 (10)、(11) 可以写成

$$\begin{bmatrix} \Xi_1^i & 0 & \Sigma_1^i & \Sigma_2^i \Upsilon_j \\ * & -\gamma^2 I & D^T & B^T \Upsilon_j \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -\Upsilon_j \end{bmatrix} < 0. \quad (20)$$

先用 $\text{diag}\{I, I, I, \Upsilon_j^{-1} R_i\}$ 对式 (20) 进行全等变换, 再考虑到 $\Upsilon_j > 0$, 有 $(\Upsilon_j - R_i)^T \Upsilon_j^{-1} (\Upsilon_j - R_i) \geq 0$, 展开得 $\Upsilon_j - R_i - R_i^T \geq -R_i^T \Upsilon_j^{-1} R_i$. 利用此不等式, 可得式 (20) 成立的充分条件为

$$\begin{bmatrix} \Xi_1^i & 0 & \Sigma_1^i & \Sigma_2^i R_i \\ * & -\gamma^2 I & D^T & B^T R_i \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & \Upsilon_j - R_i - R_i^T \end{bmatrix} < 0. \quad (21)$$

将 Υ_j, R_i 代入式 (21), 容易得到 (18), 定理 2 得证. \square

3 数值算例

某飞行器网络控制系统连续模型^[15]为

$$\dot{x}(t) = A_p x(t) + B_p u(t).$$

其中: $x = [x_\alpha, x_q]^T$ 为迎角和俯仰角速率, $u = [\xi_e, \xi_v, \xi_c]^T$ 为升降舵、升降舵补助翼和鸭翼舵偏. 取采样周期 $T = 0.025$ s, 经离散化得到形如式 (1) 所示的模型, 其系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0.9881 & 0.0242 \\ 0.1376 & 0.9826 \end{bmatrix},$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B_u = \begin{bmatrix} -0.0047 & -0.0033 & 0.0013 \\ -0.2172 & -0.1557 & 0.1168 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

反馈增益阵取为

$$K = \begin{bmatrix} 267.2 & 3.6 \\ 144.6 & 2.5 \\ 688.5 & 0.8 \end{bmatrix}.$$

考虑具有双通道数据传输的网络控制系统, 则有如下传输状态矩阵:

$$M_1 = \text{diag}\{0, 0\}, M_2 = \text{diag}\{0, 1\},$$

$$M_3 = \text{diag}\{1, 0\}, M_4 = \text{diag}\{1, 1\}.$$

给定时延的上下界分别为 $\tau = 0, \bar{\tau} = 1, H_\infty$ 性能指标 $\gamma = 0.1$, 假设转移概率阵为

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.6 \\ 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.5 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$\Pi_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & ? & ? \\ 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.5 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix},$$

而 Π_3 完全未知, 其中 ? 表示未知的转移概率.

根据定理 2, 故障检测滤波器 (4) 的参数如下.

1) Π 完全已知时

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0.687 & -0.0265 \\ 0.0157 & 0.9104 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0.677 & 0.0044 \\ 0.0233 & 0.4746 \end{bmatrix},$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 0.3961 & 0.035 \\ 0.0205 & 0.9532 \end{bmatrix}, L_4 = \begin{bmatrix} 0.4956 & 0.0275 \\ 0.0187 & 0.6256 \end{bmatrix};$$

$$V_1 = [0.002 \ 0.0021], V_2 = [0.0014 \ 0.0002],$$

$$V_3 = [0.0015 \ 0.0006], V_4 = [0.0024 \ 0.0001].$$

2) Π 部分已知时

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0.661 & -0.0402 \\ 0.003 & 0.8826 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0.665 & -0.0001 \\ -0.0069 & 0.5302 \end{bmatrix},$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 0.3715 & 0.0031 \\ 0.0138 & 0.9128 \end{bmatrix}, L_4 = \begin{bmatrix} 0.4357 & 0.0073 \\ 0.0049 & 0.5463 \end{bmatrix};$$

$$V_1 = [0.0023 \ 0.0018], V_2 = [0.0025 \ 0.0004],$$

$$V_3 = [0.0014 \ 0.0006], V_4 = [0.0019 \ -0.0002].$$

3) Π 完全未知时

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0.6682 & -0.0384 \\ 0.0084 & 0.8828 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0.6726 & 0.0146 \\ -0.003 & 0.5438 \end{bmatrix},$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 0.3766 & 0.0075 \\ 0.0165 & 0.9025 \end{bmatrix}, L_4 = \begin{bmatrix} 0.4472 & 0.0111 \\ 0.0042 & 0.5627 \end{bmatrix};$$

$$V_1 = [0.0019 \ 0.0018], V_2 = [0.0031 \ 0.0007],$$

$$V_3 = [0.0001 \ 0], V_4 = [0.002 \ -0.0001].$$

假设扰动信号 $d(k)$ 为幅值小于 0.4, 均值为 0 的随机信号, 而故障信号具有如下形式:

$$f(k) = \begin{cases} 1, & 3s \leq t \leq 5s; \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

Markov 模态切换信号如图 2 所示.

考虑转移概率矩阵 Π 分别为已知、部分已知和完全未知 3 种情况, 对应的仿真结果分别如图 3~图 5 所示.

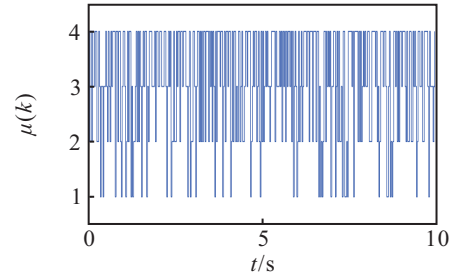


图 2 模态 μ 切换信号

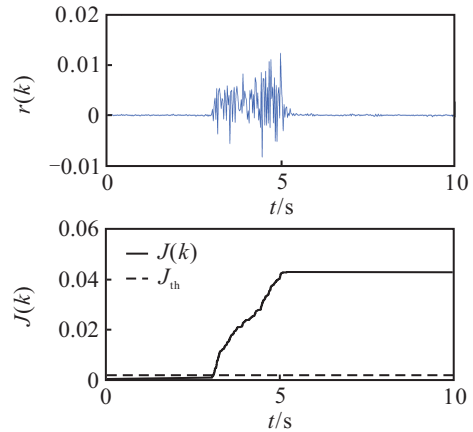


图 3 完全已知时残差 $r(k)$ 和残差评估函数 $J(k)$

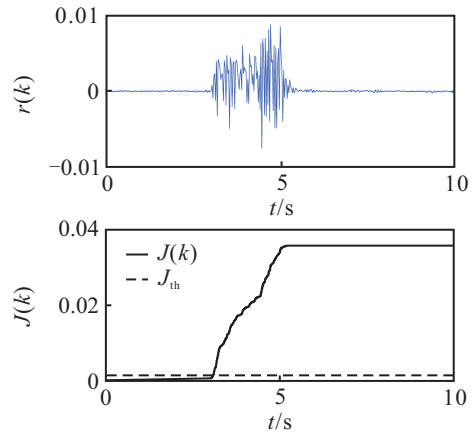


图 4 部分已知时残差 $r(k)$ 和残差评估函数 $J(k)$

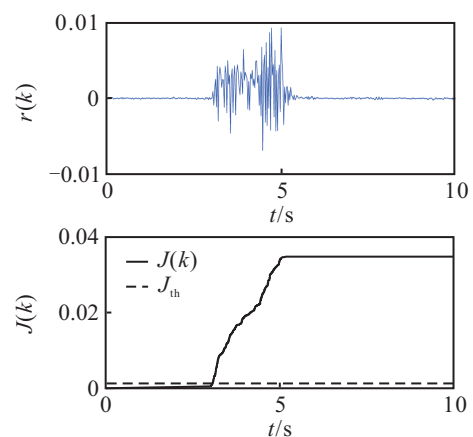


图 5 完全未知时残差 $r(k)$ 和残差评估函数 $J(k)$

针对 Π 为完全已知、部分已知及完全未知的 3 种情况, 阈值 J_{th} 和故障报警时间如表 1 所示.

表1 阈值与报警时间

	完全已知	部分已知	完全未知
阈值 J_{th}	0.001 449	0.001 148	0.001 208
报警时间/s	3.050	3.075	3.125

从表1可以看出,当故障发生时,3种情况下系统均能快速检测出故障,且转移概率矩阵 Π 中已知信息越多,检测出故障时间越早。

4 结 论

本文针对一类具有多通道数据传输的飞行器网络控制系统,研究了其故障检测的问题。在每个通道时延不尽相同,丢包情况不完全一致的情况下,将系统建模为Markov跳变系统。因为存在丢包,系统状态不能全部获得,所以控制器采用状态估计反馈。考虑转移概率完全已知、部分已知和完全未知的3种情况,分别设计了基于观测器的故障检测滤波器,将故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题。仿真结果表明:在没有发生故障时,控制器能保证系统的稳定性;当发生故障时,残差能够迅速发生跳变,从而检测出故障。

参考文献(References)

- [1] Niu Y G, Jia T G, Wang X Y, et al. Output-feedback control design for NCSs subject to quantization and dropout[J]. Information Sciences, 2009, 179(21): 3804-3813.
- [2] Zhang L, Gao H, Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems — A survey[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 403-416.
- [3] Long Y, Yang G H. Fault detection in finite frequency domain for networked control systems with missing measurements[J]. J of the Franklin Institute, 2013, 350(9): 2605-2626.
- [4] Zhang Y, Liu Z X, Fang H J, et al. H_∞ fault detection for nonlinear networked systems with multiple channels data transmission pattern[J]. Information Sciences, 2013, 221: 534-543.
- [5] Mao Z H, Jiang B, Shi P. Fault-tolerant control for a class of nonlinear sampled-data systems via a Euler approximate observer[J]. Automatica, 2010, 46(11): 1852-1859.
- [6] Wang Y Q, Ye H, Ding S X, et al. Residual generation and evaluation of networked control systems subject to random packet dropout[J]. Automatica, 2009, 45(10): 2427-2434.
- [7] Mao Z, Jiang B, Shi P. Fault detection for a class of nonlinear networked control systems[J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 2010, 24(7): 610-622.
- [8] 张捷, 薄煜明, 吕明. 存在时延和数据包丢失的网络控制系统故障检测[J]. 控制与决策, 2011, 26(6): 933-939. (Zhang J, Bo Y M, Lv M. Fault detection for networked control systems with delays and data packet dropout[J]. Control and Decision, 2011, 26(6): 933-939.)
- [9] 丁强, 钟麦英. 一类线性Markov跳跃区间时滞系统的鲁棒 H_∞ 故障检测滤波器设计[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 712-716. (Ding Q, Zhong M Y. Design of robust H_∞ fault detection filter for a class of linear Markovian jump systems with interval time-delay[J]. Control and Decision, 2011, 26(5): 712-716.)
- [10] Mao Z H, Jiang B, Shi P. H_∞ fault detection filter design for networked control systems modelled by discrete Markovian jump systems[J]. IET Control Theory and Application, 2007, 1(5): 1336-1343.
- [11] Hristu-Varsakelis D. Short-period communication and the role of zero-order holding in networked control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(5): 1285-1290.
- [12] Xiong J, Lam J, Gao H, et al. On robust stabilization of Markovian jump systems with uncertain switching probabilities[J]. Automatica, 2005, 41(5): 897-903.
- [13] Zhong M Y, Ding S X, Lam J, et al. Fault detection for Markovian jump systems[J]. IET Control Theory and Application, 2005, 152(4): 543-550.
- [14] Wang D, Wang W, Shi P. Robust fault detection for switched linear systems with state delays[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2009, 39(3): 800-805.
- [15] Hartmann G L, Barrett M F, Greene C S. Control design for an unstable vehicle[R]. NASA CR-170393, 1979.

(责任编辑: 齐 霖)