

控制与决策

Control and Decision



高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制

胡开宇, 陈复扬, 程子安

引用本文:

胡开宇, 陈复扬, 程子安. 高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2627–2636.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制

Adaptive prescribed performance control of quadrotor with unknown actuator fault

控制与决策. 2021, 36(9): 2103–2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0083>

基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法

Early warning resource allocation method for hypersonic vehicle based on bi-level programming

控制与决策. 2021, 36(2): 443–449 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0717>

标签Petri网的路径信息在故障诊断中的应用

Application of path information of labeled Petri nets in fault diagnosis

控制与决策. 2021, 36(2): 325–334 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0698>

高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制

胡开宇[†], 陈复扬, 程子安

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106)

摘要: 提出一种外部扰动/内部白噪声复合干扰和间歇性故障下的再入段变结构高超声速飞行器故障诊断和容错控制方法. 首先给出再入姿态系统模型以及间歇故障模型. 然后基于所研究的随机固定幅值故障模式对角速率系统中的周期性外部扰动进行预处理, 根据处理结果, 通过引入滑动时间窗设计一种残差信号. 由于系统中存在白噪声, 根据噪声分布特性并基于改进的残差信号提出两个假设检验, 进而设计检测故障的两个阈值区间以检测间歇故障的发生和消失时间. 与传统残差设计方法相比, 改进的残差信号对于故障发生和消失时间的检测更准确. 基于扩张系统设计一个自适应估计律用于估计故障, 并使得估计误差满足 L_2 -增益干扰抑制. 最后提出一个自适应容错控制算法使得系统的姿态角输出能够跟踪给定的参考信号. 利用 Lyapunov 函数证明了系统的稳定性, Matlab 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

关键词: 间歇故障; 干扰; 高超声速飞行器; 假设检验; 故障诊断; 容错控制

中图分类号: TP277

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0483

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 胡开宇, 陈复扬, 程子安. 高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2627-2636.

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

HU Kai-yu[†], CHEN Fu-yang, CHENG Zi-an

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper proposes the fault diagnosis and fault-tolerant control (FTC) for reentry hypersonic vehicles with external disturbance/interior white noise composite interference and intermittent faults. First, the reentry attitude system model and the intermittent failure model are given. Then, based on the random fixed-amplitude failure mode, the periodic external disturbance in the angular rate system is pre-processed. Due to the existence of white noise in the system, two hypothesis tests are proposed based on the noise distribution characteristics and the improved residual signal, and then two threshold intervals for detecting faults are designed to detect the occurrence and disappearance time of intermittent faults. Compared with the traditional residual design method, the improved residual detection is more accurate. Based on the expanded system, an adaptive estimation law is designed to estimate the faults and make the estimation error satisfy L_2 -gain interference suppression. Finally, an adaptive FTC algorithm is proposed to make the system's angle output track a given reference signal. Lyapunov functions prove the stability of the proposed method, and Matlab simulation verifies its effectiveness.

Keywords: intermittent faults; disturbance; hypersonic flight vehicle; hypothesis tests; fault diagnosis; fault-tolerant control

0 引言

高超声速飞行器(hypersonic flight vehicle, HFV)在军事与民用领域具有极高的战略价值,其控制技术的发展直接关系到远程无人打击武器的机动突

防能力和未来空天飞机的质量^[1]. 故障诊断(fault diagnosis, FD)和故障容错控制(fault-tolerant control, FTC)技术的引入可进一步增强飞控系统的可靠性,因此,针对HFV的故障自修复技术在航空航

收稿日期: 2020-04-25; 修回日期: 2020-08-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61533009, 61873127); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB857100).

责任编辑: 方华京.

[†]通讯作者. E-mail: hukaiyuluran@126.com.

天和理论学科中具有重要的研究价值,近年来催生出诸多研究进展^[2].但是仍有不少问题存在,例如:不同变化规律的干扰复合信号使系统难以准确估计故障;随机间歇故障发生时间和结束时间难以准确检测;传统控制算法难以灵活适应正常工作状态和故障状态等.本文致力于解决上述问题,提出一种在复杂干扰条件下能对间歇故障进行有效检测、估计和自修复控制的方法,同时对不同控制要求均具有适应性.

干扰在控制技术中普遍存在,近年来,对于更复杂的干扰问题出现了多种新颖的控制方法.文献[3]提出一种HFV抗干扰及故障诊断跟踪控制策略,对于外部干扰,通过设计干扰观测器对其进行估计和抵消以达到抗干扰目的.文献[4]利用模糊逻辑系统并结合自适应技术在线逼近模型参数不确定项,然后采用非线性干扰观测器补偿模糊系统逼近误差和飞行器建模误差.本文采用设计观测器的方法应对外部周期干扰,并借助鲁棒控制思想排除内部白噪声干扰对FD和FTC的影响.

自适应FD和FTC技术使系统能灵活有效地在标称态与故障态之间切换,近年来受到广泛关注.文献[5]针对飞机舵面故障产生的未建模动态、系统不确定参数、未知输入增益等问题,提出一种匹配/非匹配不确定性的飞机舵面故障 L_1 自适应FTC方法.文献[6]根据推导的容错参数与故障参数的匹配条件,得到对容错参数的约束条件,并运用Nussbaum增益函数自适应估计由舵面故障引起的不确定控制信号.文献[7]在不知晓故障信息及外部干扰的条件下,用自适应律在线估计未知量,并设计鲁棒自适应容错控制器,使得无论是否有故障发生,主从两个混沌系统都能够实现同步.本文在设计FTC控制器时,采用自适应变参数思想,使HFV在无故障标称状态和舵面故障修复状态下均能正常工作,完成稳定跟踪控制.

假设检验是一个能在随机噪声内部准确判断信号统计分布特性的方法,多用于特征提取和测控技术领域^[8].文献[9]为满足间歇故障的检测要求,提出两个假设检验分别用于检测间歇故障的发生和消失时刻.本文在检测间歇故障时将借鉴文献[9]的手法并深度改进,以期后续FD和FTC创造条件.随着数字电路和计算机技术的发展,很多领域中的大部分故障形式都是间歇性的.间歇故障具有随机幅值、随机发生和随机消失等特性,因此对其诊断有两个目的:

一是检测故障出现时间和消失时间,二是估计故障幅值^[10].间歇故障的表现形式多样化,如时变间歇故障、固定幅值间歇故障、周期性间歇故障和非周期性间歇故障^[11].目前在解决HFV中很少见存在间歇故障的,但间歇故障会使传统的故障诊断难以完全适用.本文考虑随机固定幅值的间歇故障形式,设计改进的残差信号来进行故障检测.

本文针对再入段HFV设计间歇故障的自适应诊断和自修复算法,其主要创新点在于:

1) 在变结构再入段HFV系统中,设计复合扰动下针对外部干扰的自适应观测器,实现白噪声干扰屏蔽和外部干扰跟踪;

2) 设计滑动时间窗和两个假设检验准则,在带自然指数改进残差的观测器中,检测执行器间歇故障的发生和消失时间;

3) 设计间歇故障估计算法和自适应FTC算法并实现复合扰动和间歇故障下的鲁棒稳定姿态跟踪控制.

综上,本文首先描述变结构HFV动力学以及间歇故障;然后设计改进残差和滑动时间窗,提出一种间歇故障FD方法;进而给出再入姿态系统FTC;最后,针对再入模型进行仿真分析以验证所提出算法的有效性.

1 问题描述

本节介绍带有复合干扰的变结构HFV再入姿态模型以及间歇故障模型,并明确控制问题与目标.

1.1 再入姿态模型

变结构高超声速再入飞行器的动力学描述如下:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = R\omega + \nu(t) + d_1(t), \\ \dot{\omega} = \\ \quad -(J + \Delta J)^{-1}\Omega(J + \Delta J)\omega + \\ \quad (J + \Delta J)^{-1}T + \xi(t) + d_2(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\gamma = [\phi, \beta, \alpha]^T$; ϕ 、 β 、 α 分别表示倾斜角、侧滑角和迎角; $\omega = [p, q, r]^T$ 是角速率向量; p 、 q 、 r 分别是滚转角速率、俯仰角速率和偏航角速率; $J \in R^{3 \times 3}$ 是对称正定惯性矩阵; ΔJ 是已知的可变结构摄动; $T \in R^3$ 是力矩向量,同时也是系统的输入信号; $d_1(t)$ 、 $d_2(t) \in R^3$ 代表外部干扰,其波形在有限时间内可保持明显的周期规律; $\nu(t)$ 、 $\xi(t) \in R^3$ 表示独立的高斯白噪声信号且均值为零;矩阵 Ω 、 R 如下所示:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

假设1 高斯噪声干扰 $\zeta(t)$ 和 $v(t)$ 有界,即在边缘分布为小概率可忽略事件,且满足 $\|\zeta(t)\| \leq M_\zeta$, $\|v(t)\| \leq M_v$,微分 $\|d\zeta\| \leq M_{d\zeta}$. 参数 M_ζ 、 M_v 、 $M_{d\zeta}$ 是已知常数,干扰 $d_1(t)$ 、 $d_2(t)$ 有一阶和二阶导数.

本文采用如下可参数化的外部扰动模型:

$$d_i(t) = d_{i0}(t) + \sum_{k=1}^q d_{ik} f_{ik}(t) = \theta_i^* \varphi_i, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

其中: d_{i0} 、 d_{ik} 、 θ_i^* 是未知常值参数, f_{ik} 、 φ_i 是选定的已知基函数. 当 $q = 0$ 时, $d_i(t) = d_{i0}(t)$ 表征常值扰动;当 $q > 0$ 时,可以利用式(2)来逼近时变扰动信号. 例如取 $q = 1$, $f_{i1}(t) = \sin t$,则 $d_i(t)$ 代表正弦干扰信号. 因此所考虑的干扰可表示为

$$\begin{cases} d_1(t) = \theta_1^* \varphi_1, \\ d_2(t) = \theta_2^* \varphi_2. \end{cases} \quad (3)$$

1.2 间歇故障模型

由于舵面气流场不稳定,间歇性气流冲力会产生间歇性舵面转角偏差;空地多源电磁干扰也会导致HFV在几个干扰源作用范围内外飞入飞出时,出现舵面控制信号间歇失真. 基于上述物理背景,本文主要研究非周期间歇性故障,故障的数学模型为

$$F_i(t) = \sum_{s=1}^{\infty} (\Gamma(t - \tau_{i,s}) - \Gamma(t - v_{i,s})) f_i(s). \quad (4)$$

其中: $\tau_{i,s}$ 、 $v_{i,s}$ 分别代表第 s 个故障随机发生时间和随机消失时间,并满足 $\tau_{i,s} < v_{i,s} < \tau_{i+1,s}$; $\Gamma(t)$ 是阶跃函数; $f_i(s) : N^+ \rightarrow R$ 是第 s 个故障的随机常数幅

值. 第 s 个故障的持续时间和间隔时间定义为

$$\begin{cases} \mu_{i,s}^{\text{dur}} = v_{i,s} - \tau_{i,s}, \\ \mu_{i,s}^{\text{in}} = \tau_{i,s+1} - v_{i,s}. \end{cases} \quad (5)$$

注1 持续时间和间隔时间的最小值分别定义为 $\tilde{\mu}_i^{\text{dur}} = \inf_{s \in N^+} (\mu_{i,s}^{\text{dur}})$, $\tilde{\mu}_i^{\text{in}} = \inf_{s \in N^+} (\mu_{i,s}^{\text{in}})$. 设定 $\vartheta_i = \min\{\tilde{\mu}_i^{\text{dur}}, \tilde{\mu}_i^{\text{in}}\}$,且最小值 ϑ_i 是已知的.

假设2 存在常数 ρ_i ,使得故障幅值 $f_i(s)$ 满足 $|f_i(s)| \geq \rho_i > 0, i \in \{1, 2, 3\}$.

综上,带有间歇故障的变结构高超声速再入飞行器的模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = R\omega + v(t) + d_1(t), \\ \dot{\omega} = \\ -(J + \Delta J)^{-1} \Omega (J + \Delta J) \omega + (J + \\ \Delta J)^{-1} T + \sum_{i=1}^3 b_i F_i(t) + \xi(t) + d_2(t). \end{cases} \quad (6)$$

其中: $b_{(i)} \in R^3$ 是 $(J + \Delta J)^{-1}$ 的第 i 列, $F(t) = [F_1(t); F_2(t); F_3(t)]$.

1.3 问题与目标

本文主要研究的是带有间歇故障的变结构HFV控制问题,通过设计控制输入力矩信号 T 使得系统(1)闭环稳定,且姿态跟踪给定参考信号 γ_d . 为实现控制目标,需要解决以下几个技术难题:

- 1) 由于干扰的存在,如何设计故障检测算法来对干扰进行隔离;
- 2) 考虑间歇故障具有发生时间和消失时间的特性,如何设计故障检测阈值能够更准确地检测两个时间;
- 3) 考虑系统存在的故障,如何设计FTC以保证系统闭环稳定.

图1清楚地显示了整个控制系统结构,接下来的内容将围绕整个结构展开,最终完成控制目标.

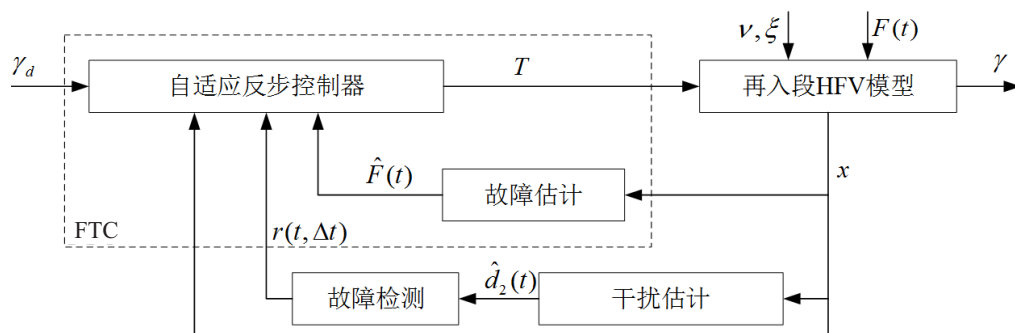


图1 FTC结构框图

假设3 γ_d 连续,且有一阶和二阶导数.

假设4 本文所用反步法的微分反演次数低. 根据文献[12]所示基于多GPU并行计算的飞行器,本文假设硬件上能够解决低次数反演的微分爆炸问题.

2 间歇故障诊断方法设计

考虑如下带有间歇故障的角速率通道模型:

$$\dot{\omega} = f(\omega) + (J + \Delta J)^{-1}T + \sum_{i=1}^3 b_i F_i(t) + \xi(t) + d_2(t), \quad (7)$$

其中 $f(\omega) = -(J + \Delta J)^{-1}\Omega(J + \Delta J)^{-1}\omega$. 通常的故障检测方法是设计观测器来构造残差. 当系统不考虑干扰情况时,残差定义为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(\omega) + (J + \Delta J)^{-1}T - K(\omega - x), \\ r = \|\omega - x\|; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{e} = Ke + \sum_{i=1}^3 b_i F_i(t), \\ r = \|e\|. \end{cases} \quad (8)$$

从上式可以看出:如果发生故障,则残差不为零,如果没有故障,则残差趋于零. 如果考虑干扰,则残差变为

$$\begin{cases} \dot{e} = Ke + \sum_{i=1}^3 b_i F_i(t) + \xi(t) + d_2(t), \\ r = \|e\|. \end{cases} \quad (9)$$

可以看出扰动和间歇故障对误差系统 e 的影响是线性相关的,即扰动和故障不能用几何方法隔离. 因此,需要对系统中的外部干扰进行预处理,然后才能更准确地检测故障的发生和消失时间.

2.1 干扰预处理

本文主要研究非周期固定幅值的间歇故障. 根据式(4)和(7),可以得到

$$\begin{aligned} \ddot{\omega} &= \dot{f}(\omega) + (J + \Delta J)^{-1}\dot{T} + \dot{\xi}(t) + \dot{d}_2(t) = \\ &= \dot{f}(\omega) + (J + \Delta J)^{-1}\dot{T} + \dot{\xi}(t) + \theta_2^{*T}\dot{\varphi}_2. \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10)可以发现系统与间歇故障 $F(t)$ 无关,只与干扰 $d_2(t)$ 的一阶导数有关. 接下来针对此系统的干扰进行预处理,设计如下观测器:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{f}(\omega) + (J + \Delta J)^{-1}\dot{T} + \dot{\hat{d}}_2(t) - H(\dot{\omega} - x) + v_c = \\ &= \dot{f}(\omega) + (J + \Delta J)^{-1}\dot{T} + \theta_2^T\dot{\varphi}_2 - H(\dot{\omega} - x) + v_c. \end{aligned} \quad (11)$$

其中: θ_2 是 θ_2^* 的估计值, $\hat{d}_2(t)$ 是 $d_2(t)$ 的估计值, $x \in$

R^3 是观测器的状态量, $H \in R^{3 \times 3}$ 是待设计的参数矩阵, v_c 是待设计的变量. 定义观测器状态误差为 $e = \dot{\omega} - x$, 误差系统动态方程为

$$\dot{e} = He + \dot{\xi}(t) + \tilde{\theta}_2^T\dot{\varphi}_2 - v_c, \quad (12)$$

其中

$$\tilde{\theta}_2 = \theta_2^* - \theta_2. \quad (13)$$

选取如下参数自适应律:

$$\dot{\theta}_2 = \dot{\varphi}_2 e^T P, \quad (14)$$

其中 $P \in R^{3 \times 3}$ 是待设计的正定对称矩阵.

引理1^[13] 对于任意正数 χ 和正定对称矩阵 P , 以下不等式成立:

$$2x^T P y \leq \chi x^T P x + \chi^{-1} y^T P y, \quad x, y \in R^n. \quad (15)$$

定理1 对于误差系统(12),如果存在矩阵 H 和正定对称矩阵 P 满足不等式 $H^T P + PH < 0$, 则状态估计误差 e 和干扰未知参数估计误差 $\tilde{\theta}_2$ 是有界的.

证明 采用如下Lyapunov函数:

$$V = e^T P e + \text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \tilde{\theta}_2). \quad (16)$$

可以得到Lyapunov函数的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (He + \dot{\xi}(t) + \tilde{\theta}_2^T\dot{\varphi}_2 - v_c)^T P e + e^T P (He + \\ &\quad \dot{\xi}(t) + \tilde{\theta}_2^T\dot{\varphi}_2 - v_c) - 2\text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \dot{\theta}_2) = \\ &\quad e^T (H^T P + PH)e + 2e^T P \dot{\xi}(t) + 2e^T P \tilde{\theta}_2^T \dot{\varphi}_2 - \\ &\quad 2e^T P v_c - 2\text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \dot{\theta}_2) = \\ &\quad e^T (H^T P + PH)e + 2e^T P \dot{\xi}(t) - 2e^T P v_c. \end{aligned} \quad (17)$$

设计额外的控制变量 $v_c = M_{\xi} \text{sign}(e^T P)$, 把 v_c 代入式(17)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (H^T P + PH)e + 2e^T P \dot{\xi}(t) - 2e^T P v_c = \\ &= e^T (H^T P + PH)e + 2e^T P (\dot{\xi}(t) - v_c) \leq \\ &= e^T (H^T P + PH)e + 2\|e^T P\|(M_{\xi} - M_{\dot{\xi}}) = \\ &= e^T (H^T P + PH)e \leq 0. \end{aligned} \quad (18)$$

因此,状态估计误差和干扰估计误差一致最终有界. $\square$

假设扰动的初始估计误差为零,即

$$d_2(t) - \hat{d}_2(t) = 0, \quad (19)$$

为方便后续故障检测分析,可近似认定

$$d_2(t) - \hat{d}_2(t) = d_2(0) - \hat{d}_2(0) + \int_0^t \tilde{\theta}_2^T \varphi_2 dt \approx 0. \quad (20)$$

对 $d_2(t)$ 的稳定估计为后续间歇故障检测、故障估计和鲁棒FTC创造了条件。

2.2 基于滑动时间窗的改进残差设计

针对系统(5),本文设计一个残差向量 r ,使得每个残差元素 r_i 仅对 $F_i(t)$ 敏感而与 $F_j(t)(j \neq i)$ 无关。残差生成器结构设计如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}} = (J + \Delta J)^{-1}T - (J + \Delta J)^{-1}\Omega(J + \Delta J)\omega + \\ (J + \Delta J)^{-1}D(J + \Delta J)(\hat{\omega} - \omega) + \hat{d}_2(t), \\ r(t) = D(J + \Delta J)\hat{\omega} - D(J + \Delta J)\omega. \end{cases} \quad (21)$$

其中: $\hat{\omega} \in R^{3 \times 3}$ 为残差生成器的状态向量; $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, $\lambda_i < 0$ 。

注2 本文所在团队研究的高超声速飞行器在陀螺传感器系统上存有硬件备份,这是高精度导航制导的内在需求,同时确保了不存在因传感器故障而导致的状态 ω 不可测问题。定义

$$\varepsilon(t) = (J + \Delta J)\hat{\omega} - (J + \Delta J)\omega, \quad (22)$$

可以得到

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = D\varepsilon(t) - F(t) - (J + \Delta J)\xi(t) - \\ (J + \Delta J)(d_2(t) - \hat{d}(t)), \\ r(t) = D\varepsilon(t). \end{cases} \quad (23)$$

因此在干扰预处理之后,对于每个故障 $F_i(t)$,相应的残差可表示为

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_i(t) = \lambda_i \varepsilon_i(t) - F_i(t) - (J_i + \Delta J_i)\varpi(t), \\ r_i(t) = \lambda_i \varepsilon_i(t). \end{cases} \quad (24)$$

其中: $\varepsilon_i(t)$ 是 $\varepsilon(t)$ 的第 i 个元素, J_i 是 J 的第 i 行, ΔJ_i 是可变结构摄动 ΔJ 的第 i 行。

间歇故障在检测时需要检测故障发生时间和故障消失时间,因此引入滑动时间窗口,通过滚动旧数据来包含新信息,减少前一时刻信号数据对残差的影响,提高检测精度。基于滑动时间窗口 $[t - \Delta t_i, t]$ 的改进残差生成器可以表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_i(t, \Delta t_i) = \varepsilon_i(t) - e^{\lambda_i \Delta t_i} \varepsilon_i(t - \Delta t_i), \\ r_i(t, \Delta t_i) = \lambda_i \varepsilon_i(t, \Delta t_i), \end{cases} \quad (25)$$

其中 $\Delta t_i \in (0, \theta_i)$ 是滑动时间窗的长度。

注3 $\varepsilon_i(t, \Delta t)$ 仅与滑动时间窗口 $[t - \Delta t_i, t]$ 期间的间歇性故障 $F_i(t)$ 相关。因此,与 $\varepsilon_i(t)$ 相比, $\varepsilon_i(t, \Delta t)$ 对 $F_i(t)$ 的出现和消失时间更敏感。残差 $r_i(t, \Delta t_i)$ 可以表示为

$$r_i(t, \Delta t_i) = r_{i1}(t, \Delta t_i) + r_{i2}(t, \Delta t_i). \quad (26)$$

其中

$$r_{i1}(t, \Delta t_i) = -\lambda_i \int_{t-\Delta t_i}^t e^{\lambda_i(t-\tau)} F_i(\tau) d\tau,$$

$$r_{i2}(t, \Delta t_i) = -\lambda_i \int_{t-\Delta t_i}^t e^{\lambda_i(t-\tau)} (J_i + \Delta J_i) \xi(\tau) d\tau. \quad (27)$$

因为 $\xi(t)$ 是具有高斯分布特征的有界信号,所以 $r_{i2}(t, \Delta t_i)$ 也是高斯信号,均值为 $E[r_{i2}(t, \Delta t_i)] = 0$ 。 $r_{i2}(t, \Delta t_i)$ 的方差 ι_i^2 为

$$\begin{aligned} \iota_i^2 &= \lambda_i^2 E \left[\int_{t-\Delta t_i}^t e^{\lambda_i(t-\tau)} (J_i + \Delta J_i) \xi(\tau) d\tau \times \right. \\ &\quad \left. \int_{t-\Delta t_i}^t e^{\lambda_i(t-\tau)} [(J_i + \Delta J_i) \xi(\tau)]^T d\tau \right] = \\ &= \lambda_i^2 E \left[\int_{t-\Delta t_i}^t \int_{t-\Delta t_i}^t e^{\lambda_i(2t-\tau_1-\tau_2)} (J_i + \right. \\ &\quad \left. \Delta J_i) \xi(\tau) [(J_i + \Delta J_i) \xi(\tau)]^T d\tau_1 d\tau_2 \right] = \\ &= \lambda_i^2 \int_{t-\Delta t_i}^t \int_{t-\Delta t_i}^t e^{\lambda_i(2t-\tau_1-\tau_2)} (J_i + \\ &\quad \Delta J_i) R_\xi (J_i^T + \Delta J_i^T) d\tau_1 d\tau_2 = \\ &= (1 - e^{\lambda_i \Delta t_i})^2 (J_i + \Delta J_i) R_\xi (J_i^T + \Delta J_i^T), \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $R_\xi = E(\xi \xi^T)$ 。因此 $r_{i2}(t, \Delta t_i) \sim \Phi(0, \iota_i^2)$, $\Phi(\cdot)$ 表示高斯分布。

$r_{i1}(t, \Delta t_i)$ 具有如下特征:当 $v_{i,s-1} < t$, $\Delta t_i < t < \tau_{i,s}$ 时,有

$$r_{i1}(t, \Delta t_i) = 0; \quad (29)$$

当 $t - \Delta t_i < \tau_{i,s} < t$ 时,有

$$r_{i1}(t, \Delta t_i) = f_i(s)(1 - e^{\lambda_i(t-\tau_{i,s})}); \quad (30)$$

当 $\tau_{i,s} < t - \Delta t_i < t < v_{i,s}$ 时,有

$$r_{i1}(t, \Delta t_i) = f_i(s)(1 - e^{\lambda_i \Delta t_i}); \quad (31)$$

当 $t - \Delta t_i < v_{i,s} < t$ 时,有

$$r_{i1}(t, \Delta t_i) = f_i(s)(e^{\lambda_i(t-v_{i,s})} - e^{\lambda_i \Delta t_i}). \quad (32)$$

通过分析残差 $r_i(t, \Delta t_i)$ 的特征,下面提出两个假设检验来确定所有故障的发生和消失时间。

2.3 发生时间 $\tau_{i,s}$ 检测

根据残差的属性分析,当 $v_{i,s-1} < t - \Delta t_i < t < \tau_{i,s}$ 时,式(29)成立。当第 s 个间歇故障发生时($t > \tau_{i,s}$), $r_{i1}(t, \Delta t_i)$ 不等于零。因此,本文引入以下假设检验来检测第 s 个故障发生时间 $\tau_{i,s}$:

$$\begin{cases} H_{i,0}^A: E(r_i(t, \Delta t_i)) = 0, \\ H_{i,1}^A: E(r_i(t, \Delta t_i)) \neq 0. \end{cases} \quad (33)$$

对于给定的置信水平 ϱ_{i1} ,可以获得假设(33)的接受区间为

$$\Omega_i = (-h_{\varrho_{i1}/2} \iota_i, h_{\varrho_{i1}/2} \iota_i), \quad (34)$$

其中 $h_{\varrho_{i1}/2}$ 表示标准高斯分布变量有 $\varrho_{i1}/2$ 的可能性落在区间 $[h_{\varrho_{i1}/2}, \infty)$ 内。把检测到的 $F_i(t)$ 的第 s 个故

障发生时间定义为以下随机变量:

$$\tau_{i,s}^d = \min\{\inf\{t > \tau_{i,s} : r_i(t, \Delta t_i) \notin \Omega_i\}\}. \quad (35)$$

对于给定的 Δt_i , 可以总结检测到的发生时间变量 $\tau_{i,s}$ 存在以下规则:

$$\tau_{i,s} < \tau_{i,s}^d < v_{i,s}; \quad (36)$$

$$r_i(t, \Delta t_i) \in \Omega_i, \forall t \in (\tau_{i,s}, \tau_{i,s}^d); \quad (37)$$

$$r_i(\tau_{i,s}^d, \Delta t_i) \notin \Omega_i, \forall t \in (\tau_{i,s}^d, v_{i,s}). \quad (38)$$

2.4 消失时间 $v_{i,s}$ 检测

下述不等式是残差值在滑动时间窗口经过故障区间内时满足的条件:

$$\begin{cases} \tau_{i,s} < t - \Delta t_i < t < v_{i,s}, \\ |r_{i1}(t, \Delta t_i)| \geq \rho_i(1 - e^{\lambda_i \Delta t_i}) = \kappa_i, \end{cases} \quad (39)$$

且第 s 个间歇故障消失后, $|r_{i1}(t, \Delta t_i)|$ 逐渐减少到零. 检测消失时间的假设检验如下:

$$\begin{cases} H_{i,0}^D : |E(r_i(t, \Delta t_i))| \geq \kappa_i, \\ H_{i,1}^D : |E(r_i(t, \Delta t_i))| < \kappa_i. \end{cases} \quad (40)$$

对于给定置信水平 ϱ_{i2} , 可得到假设检验 (40) 的接受区域为

$$\Theta_i = (-\infty, -\kappa_i + h_{\varrho_{i2}\Delta t_i}] \cup [\kappa_i - h_{\varrho_{i2}\Delta t_i}, +\infty). \quad (41)$$

把检测到的 $F_i(t)$ 的第 s 个故障消失时间定义为以下随机变量 $\tau_{i,s}$:

$$v_{i,s}^d = \min\{\inf\{t > v_{i,s} : r_i(t, \Delta t_i) \notin \Theta_i\}\}. \quad (42)$$

对于给定 Δt_i , 能总结出关于确定检测到的故障消失时间 $v_{i,s}^d$ 存在以下规则:

$$v_{i,s} < v_{i,s}^d < \tau_{i,s+1}; \quad (43)$$

$$r_i(t, \Delta t_i) \in \Theta_i, \forall t \in (v_{i,s}, v_{i,s}^d); \quad (44)$$

$$r_i(v_{i,s}^d, \Delta t_i) \notin \Theta_i, \forall t \in (v_{i,s}^d, \tau_{i,s+1}). \quad (45)$$

注4 为了使得检测到的故障发生时间在故障消失时间之前, 故障检测区间应满足 $\Pi = \{\Delta t_i : \Omega_i \cap \Theta_i = \emptyset, 0 < \Delta t_i < \vartheta_i\}$, 其中 Π 是检测间歇故障所允许的 Δt_i 的集合. 它代表滑动时间窗口长度和最大延迟.

2.5 自适应间歇故障估计

当 $t \in (\tau_s, v_s)$ 时, 系统发生间歇故障, 设计如下的间歇故障估计观测器以估计 $F(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -(J + \Delta J)^{-1} \Omega (J + \Delta J) \omega + (J + \Delta J)^{-1} T - \\ &K(\omega - x) + (J + \Delta J)^{-1} \hat{F} + \hat{d}_2(t). \end{aligned} \quad (46)$$

其中: $x \in R^3$ 是观测器的状态量, $K \in R^{3 \times 3}$ 是待设计的增益矩阵. 根据定理1, 可得误差动态系统

$$\dot{e}_\omega = K e_\omega + (J + \Delta J)^{-1} \tilde{F} + \xi(t). \quad (47)$$

其中故障估计误差和状态误差为

$$\begin{cases} \tilde{F} = F - \hat{F}, \\ e_\omega = \omega - x. \end{cases} \quad (48)$$

设计如下自适应故障估计律:

$$\dot{\tilde{F}} = -G(e_\omega + \dot{e}_\omega), \quad (49)$$

其中 $G \in R^{3 \times 3}$. 从而得到

$$\dot{\tilde{F}} = (G + GK)e_\omega + G(J + \Delta J)^{-1} \tilde{F} + G\xi. \quad (50)$$

为了抑制干扰对故障估计的影响, 设计如下扩张观测系统:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= \begin{bmatrix} K & (J + \Delta J)^{-1} \\ G + GK & G(J + \Delta J)^{-1} \end{bmatrix} \zeta + \begin{bmatrix} I \\ G \end{bmatrix} \xi = \\ &\bar{A}\zeta + \bar{B}\xi, \end{aligned} \quad (51)$$

其中 $\zeta = [e_\omega, \tilde{F}]$.

引理2^[5] 如果从 ξ 到故障估计误差的 L_2 -增益小于 γ_ξ , 即满足以下条件:

$$\int_0^t \tilde{F}^T \tilde{F} dt - \gamma_\xi^2 \int_0^t \varpi^T \varpi dt < 0, \quad (52)$$

则可认为故障估计误差满足干扰 ξ 抑制水平.

定理2 对于系统 (51) 和给定正数 γ_ξ , 如果存在合适参数 $K \in R^{3 \times 3}, G \in R^{3 \times 3}$, 正定对称矩阵 $P_1 \in R^{3 \times 3}, P_2 \in R^{3 \times 3}, P = \text{diag}(P_1, P_2)$, 使如下矩阵不等式成立, 则故障估计误差最终有界且满足干扰抑制水平 γ_ξ :

$$\begin{bmatrix} K^T P_1 + P_1 K & S_1 & P_1 \\ * & S_2 & P_2 G \\ * & * & -\gamma_\xi^2 I \end{bmatrix} < 0. \quad (53)$$

其中

$$S_1 = G^T P_2 + K^T G^T P_2 + P_1 (J + \Delta J)^{-1},$$

$$S_2 = (J + \Delta J)^{-1} G^T P_2 + P_2 G (J + \Delta J)^{-1} + I.$$

证明 取如下函数:

$$V_\zeta = \zeta^T P \zeta, \quad (54)$$

对时间求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\zeta &= (\bar{A}\zeta + \bar{B}\xi)^T P \zeta + \zeta^T P (\bar{A}\zeta + \bar{B}\xi) = \\ &\zeta^T (\bar{A}^T P + P \bar{A}) \zeta + 2\zeta^T P \bar{B} \xi. \end{aligned} \quad (55)$$

取

$$V = V_\zeta + \int_0^t \tilde{F}^T \tilde{F} dt - \int_0^t \gamma_\xi^2 \xi^T \xi dt, \quad (56)$$

对时间求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_\zeta + \tilde{F}^T \tilde{F} - \gamma_\xi^2 \xi^T \xi = \\ &\dot{V}_\zeta + \zeta^T H^T H \zeta - \gamma_\xi^2 \xi^T \xi = \end{aligned}$$

$$\zeta^T(\bar{A}^T P + P\bar{A} + H^T H)\zeta + 2\zeta^T P\bar{B}\xi - \gamma_\xi^2 \xi^T \xi =$$

$$[\zeta^T \ \xi^T] \begin{bmatrix} \bar{A}^T P + P\bar{A} + H^T H & P\bar{B} \\ * & -\gamma_\xi^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \xi \end{bmatrix}, \quad (57)$$

其中 $H = [0_{3 \times 3}, I_{3 \times 3}]$. 根据 Schur 补集定理, 如果式 (53) 成立, 则 $\dot{V} < 0$, 进而有

$$V = \int_0^t \dot{V} dt < 0. \quad (58)$$

因为 $V_\zeta > 0$, 故式 (52) 成立, 因此可得

$$\|\tilde{F}\| \leq \gamma_\xi \|\xi\|. \quad (59)$$

所以故障估计误差动态 (51) 有界且满足干扰抑制水平. $\square$

实验中, 通过配置 3 个参数 G 、 K 和 P 可使不等式 (53) 成立, 进而使故障估计器稳定. 利用 Matlab 中的矩阵不等式求解工具可计算得到满足式 (53) 的特解 G 、 K 、 P . 如果希望简化计算, 则可先固定部分参数. 例如, 先取定 G 和 P , 根据式 (53) 求解得到 K 的取值范围, 在范围内计算机自动随机取值.

3 自适应控制器设计

3.1 标称控制器设计

在本节中, 针对无故障动态系统 (1), 设计一个标称控制器, 使姿态角可以跟踪给定值.

定理 3 针对无故障系统 (1), 在下式表示的标称控制器 T :

$$T =$$

$$(J + \Delta J)[\dot{v}_d + (J + \Delta J)^{-1} \Omega(J + \Delta J)\omega - R^T z_1 - c_2 z_2 - \theta_2^T \varphi_2], \quad (60)$$

$$v_d = R^{-1}(-c_1 z_1 + \dot{\gamma}_d - \theta_1^T \varphi_1), \quad (61)$$

以及未知参数自适应律

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \varphi_1 z_1^T, \\ \dot{\theta}_2 = \varphi_2 z_2^T \end{cases} \quad (62)$$

的作用下, 可以保证闭环系统稳定并且姿态跟踪误差 $\gamma - \gamma_d$ 有界. 其中: 跟踪误差 $z_1 = \gamma - \gamma_d$, $z_2 = \omega - v_d$; $c_1 > 0$, $c_2 > 0$; θ_1 和 θ_2 分别是 θ_1^* 和 θ_2^* 的估计值.

证明 1) 取 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^T z_1 + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\theta}_1^T \tilde{\theta}_1), \quad (63)$$

其中 $\tilde{\theta}_1 = \theta_1^* - \theta_1$ 是参数估计误差. V_1 对时间求导, 得

$$\dot{V}_1 = z_1^T (R\omega + \nu + d_1(t) - \dot{\gamma}_d) =$$

$$z_1^T (R\omega + \nu + \theta_1^{*T} \varphi_1 - \dot{\gamma}_d). \quad (64)$$

引入跟踪误差 z_2 并代入式 (62), 得到

$$\dot{V}_1 =$$

$$z_1^T [R(z_2 + v_d) + \nu + \theta_1^{*T} \varphi_1 - \dot{\gamma}_d] - \text{tr}(\tilde{\theta}_1^T \dot{\theta}_1) =$$

$$-c_1 z_1^T z_1 + z_1^T R z_2 + z_1^T \nu + z_1^T \tilde{\theta}_1^T \varphi_1 - \text{tr}(\tilde{\theta}_1^T \dot{\theta}_1) \leq$$

$$-c_1 z_1^T z_1 + z_1^T R z_2 + z_1^T \nu + \frac{1}{4} \nu^T \nu =$$

$$-(c_1 - 1) z_1^T z_1 + z_1^T R z_2 + \frac{1}{4} \|\nu\|^2. \quad (65)$$

2) Lyapunov 函数取为

$$V = V_1 + \frac{1}{2} z_2^T z_2 + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \tilde{\theta}_2). \quad (66)$$

对 V 求导, 可得

$$\dot{V} \leq -(c_1 - 1) z_1^T z_1 + z_1^T R z_2 + \frac{1}{4} \|\nu\|^2 +$$

$$z_2^T \dot{z}_2 - \text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \dot{\theta}_2) =$$

$$-c_2 z_2^T z_2 - (c_1 - 1) z_1^T z_1 + \frac{1}{4} \|\nu\|^2 +$$

$$z_2^T \xi + z_2^T \tilde{\theta}_2^T \varphi_2 - \text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \dot{\theta}_2) \leq$$

$$-c_2 z_2^T z_2 - (c_1 - 1) z_1^T z_1 + \frac{1}{4} \|\nu\|^2 +$$

$$z_2^T z_2 + \frac{1}{4} \xi^T \xi =$$

$$-(c_1 - 1) z_1^T z_1 - (c_2 - 1) z_2^T z_2 +$$

$$\frac{1}{4} (\|\xi\|^2 + \|\nu\|^2) - \eta_1 Z + \Pi_1. \quad (67)$$

其中

$$\eta_1 = \min(c_1 - 1, c_2 - 1), \quad (68)$$

$$\Pi_1 = \frac{1}{4} (M_\xi^2 + M_\nu^2), \quad (69)$$

$$Z = \|z_1\| + \|z_2\|. \quad (70)$$

即 Z 收敛到区间 $Z: Z < \Pi_1/\eta_1$, 通过调节参数 c_1 和 c_2 使得 $\eta_1 > 0$, 可得姿态向量跟踪误差 z_1 有界. $\square$

3.2 FTC 控制器设计

在本节中, 针对带有故障的动态系统 (6), 设计一个容错控制器, 产生所需的控制力矩 T , 使得姿态角跟踪给定命令.

定理 4 考虑带有间歇故障和干扰的姿态系统 (6), 在如下 FTC 和参数自适应律 (62) 的作用下, 可以保证闭环系统稳定且姿态跟踪误差有界:

$$T = (J + \Delta J)[\dot{v}_d + (J + \Delta J)^{-1} \Omega(J + \Delta J)\omega -$$

$$R^T z_1 - c_2 z_2 - \theta_2^T \varphi_2] - \hat{F}(t), \quad (71)$$

$$v_d = R^{-1}(-c_1 z_1 + \dot{\gamma}_d - \theta_1^T \varphi_1). \quad (72)$$

其中: 跟踪误差 $z_1 = \gamma - \gamma_d$, $z_2 = \omega - v_d$; $c_1 > 0$, $c_2 > 0$.

证明 取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} z_1^T z_1 + \frac{1}{2} z_2^T z_2 + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\theta}_1^T \tilde{\theta}_1) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\theta}_2^T \tilde{\theta}_2), \quad (73)$$

对 V 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -(c_1 - 1)z_1^T z_1 - (c_2 - 1)z_2^T z_2 + \\ & \frac{1}{4}(\|\xi\|^2 + \|\nu\|^2) + z_2^T (J + \Delta J)^{-1} \tilde{F} \leq \\ & -(c_1 - 1)z_1^T z_1 - (c_2 - 2)z_2^T z_2 + \frac{1}{4}\tilde{F}^T (J + \\ & \Delta J)^{-T} (J + \Delta J)^{-1} \tilde{F} + \frac{1}{4}(\|\xi\|^2 + \|\nu\|^2) \leq \\ & -(c_1 - 1)z_1^T z_1 - (c_2 - 2)z_2^T z_2 + \frac{1}{4}(\|\xi\|^2 + \\ & \|\nu\|^2 + \lambda_J \gamma_\xi^2 M_\xi^2) = \\ & -\eta_2 Z + \Pi_2. \end{aligned} \quad (74)$$

其中

$$\eta_2 = \min(c_1 - 1, c_2 - 2), \quad (75)$$

$$\lambda_J = \max\{\text{eig}[(J + \Delta J)^{-T} (J + \Delta J)^{-1}]\}, \quad (76)$$

$$\Pi_2 = (M_\xi^2 + M_\nu^2 + \lambda_J \gamma_\xi^2 M_\xi^2)/4. \quad (77)$$

通过调节参数 c_1 和 c_2 可使得 $\eta_2 > 0$, 因此, 跟踪误差 z_1 最终有界, 且闭环系统稳定. $\square$

对控制器 (60) 和 (71) 的设计, 可使变结构 HFV 再入姿态系统在无故障飞行状态和间歇故障飞行状态下均能稳定输出给定姿态角, 完成控制目标.

4 仿真分析

考虑故障检测和 FTC 两种情况, 本节利用 Matlab 对所提出方法进行仿真以验证算法的有效性. 其中惯性矩阵 $J = [554.486, 0, -23.002; 0, 1136.949, 0; -23.002, 0, 1376.852] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\Delta J = [50, 0, 0; 0, 50, 0; 0, 0, 50] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 初始飞行条件: $\phi_0 = 0.3, \beta_0 = 0.2, \alpha_0 = 1, p_0 = 0.1, q_0 = 0.05, r_0 = 0.05$. 姿态角跟踪命令: $\phi_d = 1, \beta_d = 0, \alpha_d = 2$. 白噪声干扰 $\xi(t)$ 和 $\nu(t)$ 的协方差分别是 0.01 和 0.02. 外部干扰信号为三角函数, $d_2(t) = [d_{21}; d_{22}; d_{23}]$, $d_{21} = d_{22} = d_{23}$.

4.1 仿真实验 1 (故障检测)

根据所提出算法设置如下参数:

$$\begin{aligned} \Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 0.4, \quad \rho_1 = 49\,000, \\ \rho_2 = 79\,000, \quad \rho_3 = 79\,000, \quad \varrho_{i1} = \varrho_{i2} = 0.2, \\ D = \text{diag}(-1, -1, -1). \end{aligned}$$

故障检测区间分别是:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= (-4\,967.8, 4\,967.8), \quad \Omega_2 = (-10\,177, 10\,177), \\ \Omega_3 &= (-12\,327, 12\,327); \\ \Theta_1 &= (-\infty, -11\,678] \cup [11\,678, +\infty), \\ \Theta_2 &= (-\infty, -16\,874] \cup [16\,874, +\infty), \\ \Theta_3 &= (-\infty, -14\,937] \cup [14\,937, +\infty). \end{aligned}$$

间歇故障为

$$(F_1(t), F_2(t)) = \begin{cases} (50\,000, 0), & t \in [15, 20); \\ (0, 80\,000), & t \in [20, 30); \\ (80\,000, 100\,000), & t \in [40, 60); \\ (100\,000, 120\,000), & t \in [80, 85); \end{cases}$$

$$F_3(t) = 0.$$

变结构扰动 ΔJ 从仿真的第 15 s 开始为非零.

干扰预处理的结果如图 2 所示. 本文所提出方法利用自适应律来估计干扰模型中的未知参数, 进而得到干扰信号的估计值. 仿真结果表明, 该方法能够在系统存在高斯噪声和故障的情况下准确估计干扰值.

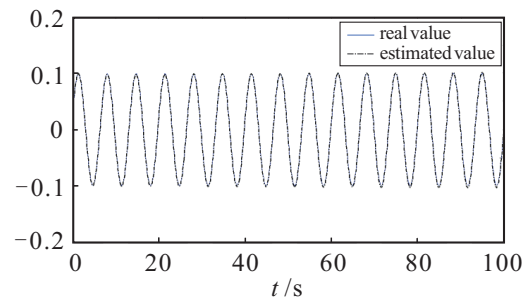


图 2 干扰估计响应曲线

本文所提出的故障检测方案的仿真结果如图 3 所示. 由图 3 可以发现, 残差 $r_1(t, \Delta t_1)$ 仅受 $F_1(t)$ 的影响, 残差 $r_2(t, \Delta t_2)$ 仅受 $F_2(t)$ 的影响. 第 3 个回路无故障, 残差 r_3 与 F_1 和 F_2 都无关, 在此不做展示. 因此, 本文所构造的残差满足要求, 即残差 r_i 对故障 $F_i(t)$ 敏感, 而与 $F_j(t) (i \neq j)$ 无关, 进而可以确定故障发生的位置.

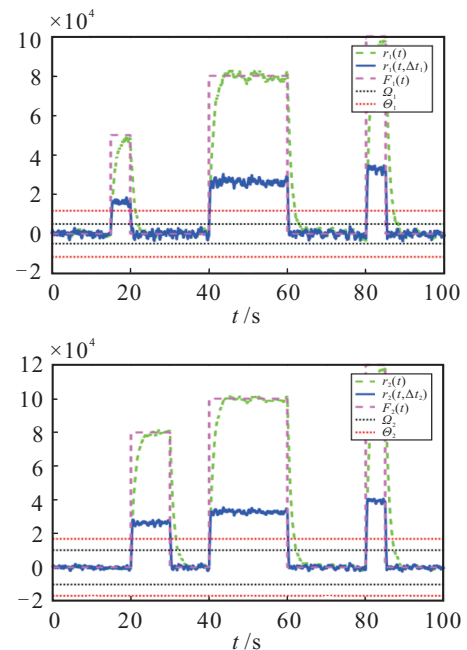


图 3 残差响应曲线

对比两个残差响应曲线 $r_i(t)$ 和 $r_i(t, \Delta t_i)$, 通过滑动时间窗 Δt_i 构造的改进残差 $r_i(t, \Delta t_i)$ 所检测出的故障发生和消失时间比 $r_i(t)$ 更准确. 检测时间的仿真结果如表 1 和表 2 所示, 其中 $\tilde{\tau}_{i,s}^d$ 和 $\tilde{v}_{i,s}^d$ 分别是通过残差 $r_i(t)$ 检测到的 $\tau_{i,s}$ 和 $v_{i,s}$ 的值. 当第 s 个故障发生时, 残差 $r_i(t)$ 和 $r_i(t, \Delta t_i)$ 几乎同时超过检测阈值 Ω_i , 从而确保故障 $F_i(t)$ 中第 s 个故障发生时间 $\tau_{i,s}$ 可以被检测到. 但与 $r_i(t, \Delta t_i)$ 相比, $r_i(t)$ 需要更多时间超过检测阈值 Θ_i , 它检测出的消失时间比 $r_i(t, \Delta t_i)$ 慢很多.

表 1 $F_1(t)$ 的发生和消失时间检测结果

sth 故障	$\tau_{i,s}$	$\tau_{i,s}^d$	$\tilde{\tau}_{i,s}^d$	$v_{i,s}$	$v_{i,s}^d$	$\tilde{v}_{i,s}^d$
1	15	15.12	15.12	20	20.10	21.44
2	40	40.08	40.08	60	60.22	62.94
3	80	80.06	80.06	85	85.24	88.12

表 2 $F_2(t)$ 的发生和消失时间检测结果

sth 故障	$\tau_{i,s}$	$\tau_{i,s}^d$	$\tilde{\tau}_{i,s}^d$	$v_{i,s}$	$v_{i,s}^d$	$\tilde{v}_{i,s}^d$
1	20	15.12	15.12	30	30.10	32.24
2	40	40.08	40.08	60	60.21	63.04
3	80	80.06	80.06	85	85.20	88.10

4.2 仿真实验 2(故障估计和 FTC)

通过线性矩阵不等式, 可得到估计算法参数矩阵 $K = [-1, 0, 0; 0, -1, 0; 0, 0, -1]$, $G = [-20.52, 0, -0.49; 0, -4.23, 0; -0.49, 0, -2.82]$, 故障估计的仿真结果如图 4 所示. 该响应曲线表明自适应故障估计律可以有效且快速地估计故障值, 可抑制干扰, 估计误差最终有界.

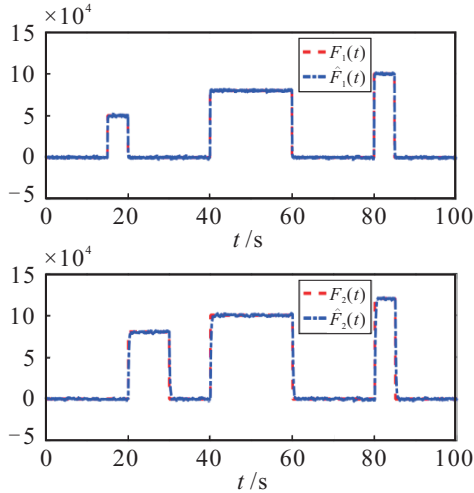


图 4 故障估计响应曲线

设置 $c_1 = 4, c_2 = 3$. 图 5 显示了在间歇故障的作用下, 标称控制器和 FTC 作用下的姿态角的响应曲线. 当故障发生时, 在没有故障补偿的标称控制器(实

线)作用下, 姿态角在跟踪过程中有很大的波动误差, 无法满足跟踪需求; 而在自适应 FTC 控制器(虚线)作用下, 姿态角则快速跟踪参考指令, 跟踪误差最终有界, 表明 FTC 具有良好性能.

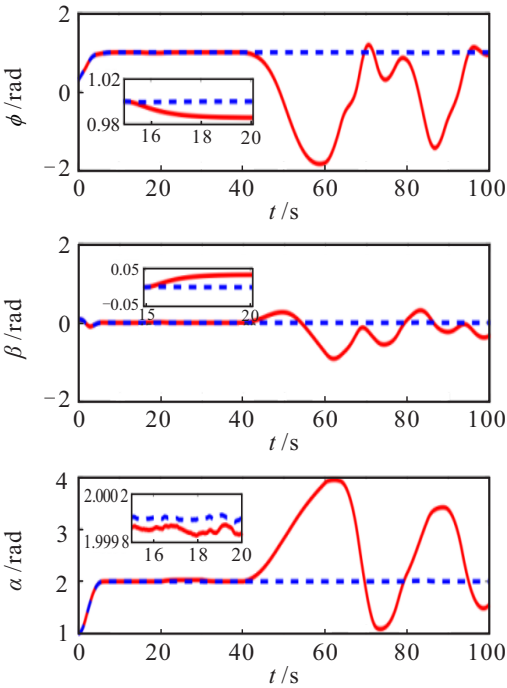


图 5 故障条件下标称控制器和 FTC 控制器姿态跟踪曲线

从图 5 可以看出, 标称控制器在 15~30 s 之间有轻微的震颤, 而在 40 s 之后则有较大的过冲. 原因是在 15~30 s 之间, 每个时间只有一个方向有故障 ($F_1(t)$ 或 $F_2(t)$), 而在其余时间中两个方向同时有故障. 表明多故障条件下所提出的 FTC 控制器更有优势.

表 3 给出了本文方法 (new method, NM) 和文献 [9] 的方法 (traditional method, TM) 分别应用于间歇故障下 HFV 控制系统时的性能对比分析, 其中 e_s 和 t_r 分别表示故障估计的均方根稳态误差和响应时间. 对比分析表明: NM 在检测故障发生和消失时

表 3 检测时间与诊断跟踪性能对比分析

性能指标	方法	$F_1(t)$			$F_2(t)$		
		1	2	3	1	2	3
$\tau_{i,s}^d$	NM	15.12	40.08	80.06	15.12	40.08	80.06
	TM	16.43	41.26	80.91	16.42	41.28	80.93
$v_{i,s}^d$	NM	20.10	60.22	85.24	30.10	60.21	85.20
	TM	21.52	63.39	89.21	31.64	63.69	88.27
e_s	NM	121	203	269	232	207	299
	TM	1 068	2 124	2 339	2 095	2 176	2 683
t_r	NM	0.06	0.06	0.09	0.08	0.11	0.12
	TM	1.13	1.16	1.01	1.12	1.38	1.29

间上比TM快约1s,导致估计响应时间优化超过10倍;NM的均方根稳态误差只是TM的约0.1倍,说明NM的估计更精准,具有更强的鲁棒镇定性,不受干扰影响;NM未改进的残差 $r_i(t)$ 的检测时间也好于TM.这表明本文方法大大优化了现有方法,更能适应HFV的复杂工况.

5 结论

本文解决了具有间歇故障和干扰的变结构HFV姿态系统的FD和FTC问题.首先成功建立了带有故障和干扰的HFV模型;然后根据对故障特征的分析,对外部不确定干扰进行了预处理,进而构建了改进的残差;根据带有高斯噪声的残差信号分布特性,结合假设检验得到了故障检测阈值,与原始残差相比,改进残差能更快地检测间歇故障的发生和消失时间;通过自适应估计算法快速估计了故障,并且其估计结果对复合干扰有抑制作用;根据故障估计结果设计FTC控制器,该控制器能够使得姿态角跟踪给定参考指令.仿真结果验证了本文所提出方案的有效性和相对于现有方法的优越性.

参考文献(References)

- [1] Yu X, Li P, Zhang Y M. The design of fixed-time observer and finite-time fault-tolerant control for hypersonic gliding vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4135-4144.
- [2] Meng Y Z, Jiang B, Qi R Y. Adaptive non-singular fault-tolerant control for hypersonic vehicle with unexpected centroid shift[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(12): 1773-1785.
- [3] Hu Q L, Wang C L, Li Y, et al. Adaptive control for hypersonic vehicles with time-varying faults[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(3): 1442-1455.
- [4] Kim E. A fuzzy disturbance observer and its application to control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(1): 77-84.
- [5] 马骏,倪世宏,解武杰,等.存在匹配/非匹配不确定性的飞机舵面故障 L_1 容错控制[J].控制与决策,2017,32(6): 967-975.
(Ma J, Ni S H, Xie W J, et al. L_1 fault tolerant control for aircraft actuator fault with matched and unmatched uncertainties[J]. Control and Decision, 2017, 32(6): 967-975.)
- [6] Xu B Y, Qi R Y, Jiang B. Adaptive fault-tolerant control for HSV with unknown control direction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 2743-2758.
- [7] Huang C, Naghdy F, Du H P. Fault tolerant sliding mode predictive control for uncertain steer-by-wire system[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(1): 261-272.
- [8] 魏艳华,王丙参,邢永忠.基于蒙特卡洛方法的假设检验问题探讨[J].统计与决策,2018,34(24): 75-78.
(Wei Y H, Wang B C, Xing Y Z. Discussion on hypothesis testing based on Monte Carlo method[J]. Statistics & Decision, 2018, 34(24): 75-78.)
- [9] 鄢谔易,何潇,周东华.一类存在参数摄动的线性随机系统的鲁棒间歇故障诊断方法[J].自动化学报,2016,42(7): 1004-1013.
(Yan R Y, He X, Zhou D H. Robust diagnosis of intermittent faults for linear stochastic systems subject to time-varying perturbations[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(7): 1004-1013.)
- [10] 冯刚,杨志勇,刘永进.基于未知输入观测器的导弹间歇故障诊断[J].测控技术,2017,36(9): 43-46.
(Feng G, Yang Z Y, Liu Y J. Missile intermittent faults diagnosis based on unknown input observer[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36 (9): 43-46.)
- [11] 周东华,史建涛,何潇.动态系统间歇故障诊断技术综述[J].自动化学报,2014,40(2): 161-171.
(Zhou D H, Shi J T, He X. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2): 161-171.)
- [12] Hu B X, Li X G. Real-time simulation and optimization of elastic aircraft vehicle based on multi-GPU workstation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 155659-155670.
- [13] Chen M Y, Xu G B, Yan R Y, et al. Detecting scalar intermittent faults in linear stochastic dynamic systems[J]. International Journal of Systems Science, 2015, 46(8): 1337-1348.

作者简介

胡开宇(1990—),男,博士生,从事飞行控制、自适应控制、非高斯随机分布系统、故障容错控制等研究, E-mail: hukaiyuluran@126.com;

陈复扬(1968—),男,教授,博士生导师,从事自适应控制、飞行控制、自修复控制等研究, E-mail: cfynuaa@163.com;

程子安(1989—),男,博士生,从事高超声速飞行器的自适应控制、保证性能控制和容错跟踪控制等研究, E-mail: zian_cheng@126.com.

(责任编辑:李君玲)