

# 近空间飞行器故障诊断与容错控制的研究进展

姜斌 赵静 齐瑞云 许德智 贺娜

(南京航空航天大学自动化学院,南京,210016)

**摘要:**近空间飞行器具有飞行速度快、飞行包线大、气动特性变化剧烈及飞行环境复杂多变等特点,故障诊断与容错控制技术对提高其安全性和可靠性具有重要意义。本文通过对近空间飞行器故障诊断与容错控制技术的国内外研究现状调研和分析,阐述了近空间飞行器动力学模型及飞控系统的故障类型,分析了近年来国内外关于近空间飞行器故障诊断与容错控制技术的主要研究成果和存在的问题,最后对近空间飞行器故障诊断与容错控制技术未来的发展方向和面临挑战进行了展望。

**关键词:**容错控制;近空间飞行器;故障类型;故障诊断

**中图分类号:**V249.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2615(2012)05-0603-08

## Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for Near Space Vehicles

*Jiang Bin, Zhao Jing, Qi Ruiyun, Xu Dezhi, He Na*

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

**Abstract:** Near space vehicle (NSV) has rapid flight speed, big flight envelope, aerodynamic characteristics of rapid change, and complex and variable environment of flight, so fault diagnosis and fault-tolerant control technology are significant to improve its safety and reliability. By analysis of the domestic and overseas development status on fault diagnosis and fault-tolerant control technology for NSV, the NSV dynamics model and the fault types of the flight control system are firstly introduced. Then, the existing main problems and shortcomings of fault diagnosis and fault-tolerant control technology for NSV in recent years and some new results are presented. Finally, the future directions of development and challenges for NSV in the field of fault diagnosis and fault-tolerant control are predicted.

**Key words:** fault-tolerant control; near space vehicle; faulty classification; fault diagnosis

近空间指距离地面高度为20 km到100 km的空间,并非传统的航空器和航天器飞行的领域。近年来,近空间的战略价值愈发引起各国的重视,情报收集、侦察监视、通信保障与对空对地作战等有重要应用价值及发展前景。近空间飞行器(Near space vehicle, NSV)是指运行在近空间领域高度层的飞行器<sup>[1]</sup>,这一概念首先由美国国家航空和航天局(NASA)提出并研制开发,主要目的用于军事采集信息。根据飞行方式和原理分类,近空间飞行

器主要包括轻于空气的飞行器、重于空气的飞行器以及新概念组合式飞行器。与飞船和航天飞机相比,近空间飞行器具有覆盖范围广、持续工作时间长、机动性强等特点,有着巨大的军事价值和潜在的经济价值。近几十年来,美国、俄罗斯、英国等都在投入大量的经费,积极开展近空间飞行器的技术研究。2005年11月在美国研制的高空哨兵飞艇成功进入近空间,留空达5 h,成为继美国攀登者之后进入近空间的第二艘平流层飞艇;俄罗斯阿夫古力

**基金项目:**国家自然科学基金(91116018)资助项目;航空科学基金(2011ZA52009)资助项目。

**修订日期:**2012-08-18

**通讯作者:**姜斌,男,教授,博士生导师,E-mail:binjiang@nuaa.edu.cn。

浮空器中心制订了“金雕”的平流层飞艇方案,飞行高度达20~22 km。此外,美国的高超声速飞行器X-43A及X51都已经成功试飞,其中X-43A最高飞行速度已达到9.6马赫数(Mach)。

从总体上来看,国外近空间飞行器技术已经处于关键技术攻关和演示验证阶段。国内从2006年开始设立多期国家自然科学基金重大研究计划,重点开展近空间飞行器的多项关键技术研究,对其控制、材料、动力等技术难点进行攻克,但与国外相比仍有一定差距。近空间飞行器在执行任务过程中,由于执行器,传感器和结构的老化、损伤引起的故障以及NSV的多任务、多工作模式、大范围高速机动、飞行包线大等特点决定其飞控系统容易发生故障并导致系统动态性能下降甚至灾难性的事故发生,从而带来人力、物力以及财力的损失。因此,如何保证NSV姿态控制的性能,提高系统的稳定性是当前NSV故障诊断与容错领域需要解决的问题。目前主要的任务有:针对NSV模型的非线性和强耦合,进行无故障时有效控制飞控系统的技术研究,这是当前一个重要的研究;当飞行器出现故障时实现有效的故障检测与诊断,并进行故障隔离与容错控制。解决近空间飞行器飞控系统故障已成为近些年研究的一个热点和难点,国内外关于NSV研究已有一定成果<sup>[2-9]</sup>。文献[3]详细地介绍了NSV的模型,文献[4~8]针对近空间飞行器进行了控制技术方面的研究,文献[4]采用了轨迹控制方案对NSV纵向飞行轨迹进行和很好地控制,文献[5]采用了滑模自适应控制技术对NSV非线性系统进行了控制研究,文献[6]采用了T-S变结构技术进行设计等均取得了较好的控制效果。近些年,考虑了NSV故障系统的研究也有较多成果<sup>[10-15]</sup>,文献[16~17]给出了对NSV近些年来的研究成果及未来展望进行了概述。

本文首先介绍NSV动力学方程以及飞控系统的故障类型;接着总结并分析了近年来国内外近空间飞行器故障诊断与容错控制技术的研究成果及存在的问题,进而提出了最新的解决途径;最后概括近空间飞行器目前面临的挑战并展望未来的发展方向。

## 1 NSV动力学方程及飞控故障类型

### 1.1 NSV动力学方程描述

#### 1.1.1 带有弹性模态的NSV纵向模型

首先,引入Bolender and Doman建立的带有弹性模态的近空间飞行器在巡航飞行状态下的纵向模型<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{m}(\mathbf{T}\cos\alpha - D) - g\sin(\theta - \alpha) \\ \dot{\alpha} &= \frac{1}{mV}(-T\sin\alpha - L) + Q + \frac{g}{V}\cos(\theta - \alpha) \\ I_{yy}\dot{Q} &= M + \tilde{\varphi}_1\eta_1 + \tilde{\varphi}_2\eta_2 \\ \dot{h} &= V\sin(\theta - \alpha) \\ \dot{\theta} &= Q \\ k_1\eta_1 &= -2\zeta_1\omega_1\eta_1 - \omega_1^2\eta_1 + N_1 - \tilde{\varphi}_1\frac{M}{I_{yy}} - \frac{\tilde{\varphi}_1\tilde{\varphi}_2\eta_2}{I_{yy}} \\ k_2\eta_2 &= -2\zeta_2\omega_2\eta_2 - \omega_2^2\eta_2 + N_2 - \tilde{\varphi}_2\frac{M}{I_{yy}} - \frac{\tilde{\varphi}_2\tilde{\varphi}_1\eta_1}{I_{yy}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $V, \alpha, Q, \theta, h, \eta_i, \dot{\eta}_i$ 分别为速度,攻角,倾斜角速率,倾斜角,飞行高度,第*i*通道的弹性系数坐标及其微分形式; $T, L, D, N_i$ 分别为推力,升力,拉力和第*i*通道的弹力; $M$ 为沿*y*轴倾斜力矩; $I_{yy}$ 为惯性力矩; $\zeta_i, \omega_i$ 为第*i*通道的弹性模态的阻尼系数;这里

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 + \frac{\tilde{\varphi}_1}{I_{yy}}, \tilde{\varphi}_1 = \int_{-L_1}^0 m_1\varepsilon\varphi_1(\varepsilon)d\varepsilon \\ k_2 &= 1 + \frac{\tilde{\varphi}_2}{I_{yy}}, \tilde{\varphi}_2 = \int_{-L_1}^0 m_2\varepsilon\varphi_2(\varepsilon)d\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $m_1, m_2$ 分别为机体前半部和后半部的质量密度; $\varphi_1(\varepsilon), \varphi_2(\varepsilon)$ 分别为机体前后的形态。

#### 1.1.2 NSV姿态角动力学方程

文献[18]介绍了关于NSV X-33的姿态动力学方程如下

$$\begin{cases} \mathbf{J}\dot{\omega} = -\boldsymbol{\Omega}\mathbf{J}\omega + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \dot{\Upsilon} = \mathbf{R}(\cdot)\omega \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix}$$

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

$\Upsilon_L = [\phi, \theta, \psi]^T$ ,  $\phi, \theta, \psi$ 分别为滚转,倾斜,偏航角; $\Upsilon = [\alpha, \beta, \gamma]^T$ ,  $\alpha, \beta, \gamma$ 分别为倾斜,侧滑,攻角; $\omega = [p, q, r]^T$ ,  $p, q, r$ 分别为滚转,倾斜,偏航角速率; $\mathbf{B}$ 为一个实时计算的分配矩阵; $\mathbf{u}$ 为气动舵面偏转和发动机推力偏转的向量。

$$\text{上升阶段: } \mathbf{R}(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta\cos\phi & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\alpha \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\phi} & \frac{\cos\phi}{\sin\phi} \end{bmatrix}$$

$$\text{再入阶段: } \mathbf{R}(\cdot) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

### 1.2 飞控系统的故障类型

故障,是指系统至少一个特性或者参数出现较大偏差,从而超出了可接受的范围。飞控系统的故障类型常见有以下3种:执行器故障、传感器故障、结构故障。本文针对系统(5)将对故障类型进行详述

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

#### 1.2.1 执行器故障

执行器故障主要有卡死、损伤、松浮和饱和<sup>[19]</sup>。执行器的故障行为会使控制系统的参数发生变化,从而影响系统的性能,具体见图1,其中, $u_c$ 为实际控制输入, $t_f$ 为故障发生时刻。

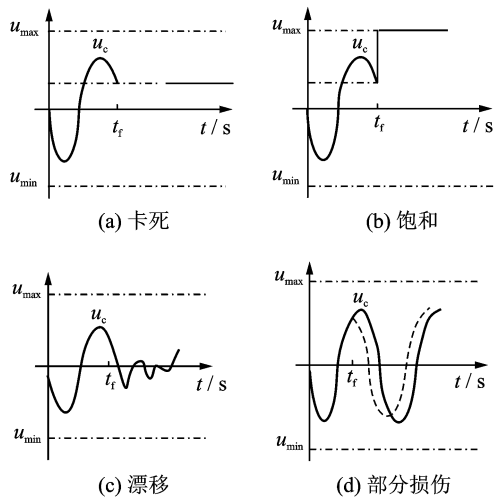


图1 执行器故障

#### 1.2.2 传感器故障

一般传感器故障分为卡死、增益变化(亦称失效)、偏差失效。传感器偏差失效故障可以细分为以下3种故障模式<sup>[20]</sup>:恒偏差、漂移、精度损伤(图2)。

#### 1.2.3 结构故障

结构故障又称系统故障,主要有两种:一是系统状态发生变化;二是系统参数发生变化。一般,飞行器机体如机身、机翼、尾翼、舵面以及发动机等受到损伤,使气动特性产生了突变。发生结构故障的主要原因是随着飞机性能的提高,对机体结构的要求越来越苛刻,例如轻质、长寿命、低成本、多功能等,结构故障大都因疲劳开裂和腐蚀失效导致。通常用以下模型表示

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = (\mathbf{C} + \Delta\mathbf{C})\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\Delta\mathbf{A}, \Delta\mathbf{B}, \Delta\mathbf{C}$ 分别为状态和输出存在的结构

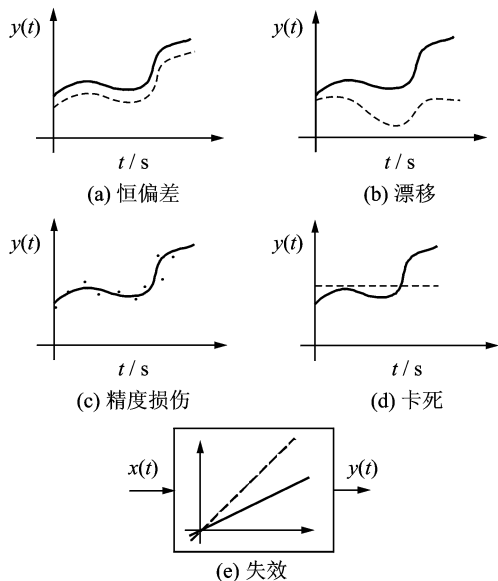


图2 传感器故障

故障,但是这种定义往往与状态不确定混淆,文献[18]采用线性变参数(Linear parameter varying, LPV)方法进行结构故障建模

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(f)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(f)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(f)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(f)\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $f$ 为故障的参数表示。这种建模方法能够深刻地描述故障对系统造成的影响,比较符合故障的物理特性,但是建模过程复杂,参数不易得到。

注1 值得注意的是,故障模型(7)中 $\mathbf{A}(f), \mathbf{B}(f), \mathbf{C}(f), \mathbf{D}(f)$ 一般是非线性的,故不适用于故障检测和诊断技术研究。由此看出,对结构故障的故障诊断技术研究仍然具有挑战性。

## 2 NSV 故障诊断与容错控制技术

### 2.1 故障诊断与容错控制技术发展

故障诊断技术是一门综合技术,它涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、信号处理、模式识别及人工智能等学科。基于现代工程技术的发展,故障诊断技术从线性系统发展到非线性系统,针对特定的过程实例,用非线性机制来解决非线性故障诊断控制问题<sup>[21-24]</sup>。故障诊断技术在航空航天领域已经有一些应用<sup>[17,19,25]</sup>,如滑模观测器的方法、LMI方法以及基于自适应观测器设计的方案等,但是目前还不成熟。文献[25]针对传感器故障利用结构分析的方法提出了一种观测器诊断与隔离的算法;文献[17]总结了可重构容错控制的故障诊断算法,并给出了应用验证;文献[26]给出一套完整的基于模型的故障诊断与隔离算法。

容错控制技术亦是控制理论与应用的一个分支,当被控系统发生故障、对控制器进行重构时,以确保故障后系统仍旧能够安全运行或在某种可以接受的程度下继续工作,具备这种容忍故障能力的控制系统成为容错控制系统。按照对故障处理的方式,容错控制技术一般分为两种:一是主动容错控制技术(Active fault tolerant control, AFTC)<sup>[21-23]</sup>;二是被动容错控制技术(Passive fault tolerant control, PFTC)<sup>[10,20,27-28]</sup>。主动容错控制技术主要思想是首先建立故障诊断机制得到故障的信息,利用这些信息重构控制器,从而满足系统的性能;而被动容错控制技术基于鲁棒的思想,主要通过抑制故障产生的影响,在线调节控制器,使其满足系统要求性能,从而达到容忍故障的能力。近年来,同时模糊控制<sup>[29-30]</sup>、神经网络控制(Neural network control, MBP)<sup>[11]</sup>等智能控制方法,反演控制<sup>[28]</sup>、模型预测控制(Model predictive control)、LPV<sup>[13]</sup>、控制分配(Control allocation)<sup>[31]</sup>、反馈线性化(Feedback linearization)<sup>[32]</sup>等技术在容错控制领域中均有相关的应用,此处不再一一列举。

## 2.2 NSV 故障诊断与容错控制研究现状

NSV 由于其任务的特殊性,飞行环境的复杂性等因素决定了系统对安全性和可靠性的要求更加严格,因此提高 NSV 控制系统运行的可靠性是控制领域必须解决的问题之一。针对 NSV 故障诊断与容错控制的研究目标是:对于飞行器任何部件故障,能够快速检测故障,确定隔离策略,制定容错方案,保证系统能够持续稳定运行(图3)。近年来,在高超声速飞行器针对故障诊断与容错控制方面的研究也有了较多成果<sup>[10-15,20,32,33]</sup>。

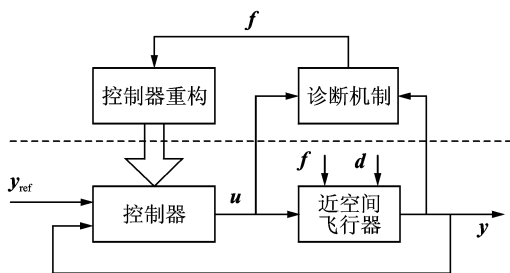


图3 NSV 故障诊断与容错控制结构图

### 2.2.1 T-S 模糊控制技术

针对纵向模型(1),文献[12]采用了T-S模糊思想将非线性NSV模型建模考虑了执行器故障故障设计了容错控制方案。文献[14]考虑了传感器的

偏差和增益两种故障形式,基于李雅普诺夫稳定性理论给出了一种新颖的故障诊断算法,通过设计自适应模糊观测器,能够准确地估计故障的信息。文献[15]考虑了传感器增益形式故障,并采用T-S建模,NSV姿态控制系统(3)可用一组T-S模糊模型来表示,所得算法能够快速准确地估计出传感器故障信息。

### 2.2.2 滑模控制技术(Sliding mode control, SMC)

滑模控制技术在处理执行器故障无需故障诊断与隔离(Fault detection and isolation, FDI)单元,传感器故障重构技术避免了重新构造控制器,尽管如此,由于传统的滑模特性,对执行器和传感器故障并没有彻底地解决。针对这种现象,利用飞控系统执行器冗余,并结合控制分配的方法,使发生故障的飞行器能够安全返航和着陆成为可能。目前关于滑模技术在NSV中的应用已经有很多成果<sup>[10-11,15,34]</sup>。针对NSV姿态模型(3),文献[10]采用分阶控制思想(注2),基于Lyapunov理论设计了自适应动态滑模容错控制方案,能够很好地对执行器故障进行抑制并达到系统性能要求;文献[11]分别考虑执行器的副翼、方向舵、升降舵3类故障形式,对内外环分别进行设计积分滑模容错控制器,此算法采用积分滑模控制思想便于控制器设计,降低了计算量从而提高工程性,但不足的是对于严重的执行器故障容错控制效果不一定能够达到所期望的值。文献[28]针对建模不确定、外部扰动以及执行器故障,基于被动容错控制的思想设计自适应滑模容错控制器,仿真结果表明所提算法能够实现姿态高度精确控制,即使存在各种不同幅度和类型的执行器故障以及外部扰动和系统未知建模因素。

注2 考虑姿态模型(3),基于分阶控制的思想,将NSV姿控系统飞行状态分为内环和外环两个回路,从内到外分回路设计控制器,简化了设计流程和复杂度(图4),而且使发生故障的NSV飞控系统仍然保持稳定并有效地跟踪制导指令。

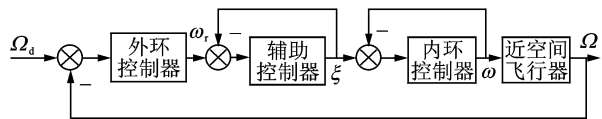


图4 NSV 内外环容错控制结构图

### 2.2.3 反演技术

反演设计方法是针对不确定性系统的一种系统化的控制器综合方法,也是将Lyapunov函数的

选取与控制器的设计相结合的一种回归设计方法。它通过从系统的最低阶次微分方程开始,引入虚拟控制的概念,一步一步设计满足要求的虚拟控制,最终设计出真正的控制律。近几年来,反演方法与自适应控制<sup>[11-12,27-28,35-36]</sup>、滑模控制等技术结合,被用于飞控系统容错控制器的设计<sup>[10,15,29]</sup>。针对传统的反演控制存在微分膨胀问题,文献[35]将滤波器引入到反演中,提出一种动态面控制方法,有效地解决微分膨胀问题。基于动态面控制方法,结合神经网络等智能方法,研究者们针对飞控系统设计相应的容错控制器。文献[11]结合了神经网络与自适应的方法,考虑了姿态模型(3)存在系统故障的情况,通过反演设计出容错控制器,并通过神经网络逼近真实故障信息并对故障进行补偿,使得在故障存在情况下系统能够保持稳定,并达到性能要求。

2.2.4 LPV 方法

文献[13]考虑了弹性模态(2)的纵向模型,首先通过在一组平衡点将非线性模型线性化为LPV线性模型;然后利用LMI设计多个LPV故障诊断机制对可能发生的执行器和传感器故障进行诊断和隔离。最后仿真结果证实了多个LPV观测器设计能够有效地估计和隔离故障,同时抑制外部扰动对故障检测的影响。但是,这种设计一般是假定在线性化模型以及参数变化较慢的情况下,所以具有一定的保守性;对于NSV本身的特性进行考虑,如何尽量减少方法的保守性,将是有待研究的一个方向。在以上研究成果的基础上,针对控制饱和、控制分配问题,下面笔者给出两种新的解决途径。

2.2.5 基于指令滤波的反演容错控制

目前绝大多数有关研究工作中均未考虑飞控系统控制饱和问题,这将会给飞行控制系统带来严重的后果,即容错控制系统产生的指令若不能被执行机构(即操纵舵面)完全执行,则会导致误差的积累,从而使系统不稳定并导致预想不到的后果。因此,在设计容错控制时必须考虑实际执行机构的物理限制(对于舵面来说即是位置和速率限制)以及输入饱和对控制系统稳定性的影响。Farrel等人<sup>[4]</sup>将约束指令滤波引入到反演控制过程中,用来消除对虚拟项的导数以及控制饱和的影响。

对于任意控制指令  $x_c^0$ ,在考虑位置、速率以及带宽等约束条件下的指令滤波结构如图5所示,其

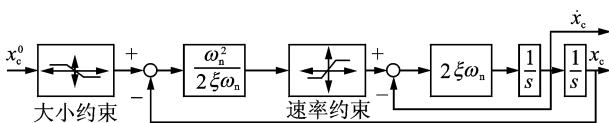


图5 约束指令滤波器结构示意图

在状态空间中的表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2 \\ 2\xi\omega_n \left( S_R \left\{ \frac{\omega_n^2}{2\xi\omega_n} [S_M(x_c^0) - q_1] \right\} - q_2 \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\omega_n, \xi$  分别为滤波器的带宽和阻比;

$$\begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

$S_M(\cdot), S_R(\cdot)$  分别为位置和速率饱和函数,其方程为

$$S_M(x) = \begin{cases} M & x \geq M \\ x & |x| < M \\ -M & x < -M \end{cases}$$

$$S_R(\dot{x}) = \begin{cases} M & \dot{x} \geq M \\ \dot{x} & |\dot{x}| < M \\ -M & \dot{x} < -M \end{cases}$$

利用如上的指令滤波技术,结合各种故障诊断技术<sup>[17,19,25]</sup>,可以设计出更为贴近实际的NSV容错控制器。

2.2.6 基于动态控制分配的容错控制

飞控系统是过驱动系统,在设计初期,便人为地设计多个冗余操纵面。飞行器在发生故障时,利用剩下的正常执行机构来实现预期的飞行目标。而控制分配无疑是首当其冲的选择。控制分配问题大致可以分为两种:静态分配和动态分配。下面简单地给出如何利用控制分配来实现容错控制。考虑如下的执行机构失效故障系统

$$\dot{x} = F(x) + G(x)Du \quad (9)$$

令  $y_{des} = G(x)Du$ ,假设失效故障  $D$  被  $\hat{D}$  估计出来,利用1范数混合优化方法,则控制分配可以表示为如下最优问题的求解

$$\min_u J_M = \min \{ \| y_{des} - G(x)Du \|_1 + \lambda \| W_p(u - u_p) \|_1 \}$$

$$s. t. u_b \leq u \leq u_d \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为相对权重;  $u_b, u_d$  为控制输入约束条件。因为  $D$  要实时估计出来,且  $G(x)$  是实时变化矩阵,所以利用式(10)难以实现动态分配。为此在文献[21]的基础上,转化为求解如下动态分配的最优问题

$$\min_u \gamma$$

$$s. t. \gamma - u^T W_u^2 u - (y_{des} - G\hat{D}u)^T W_y^2 (y_{des} - G\hat{D}u) > 0$$

$$\gamma > 0$$

$$u_b \leq u \leq u_d$$

### 3 研究趋势

目前,国内外针对近空间飞行器的故障诊断技术与容错控制技术研究还不是很完善,各种困难和挑战亟待解决,未来的研究方向应主要体现在故障的线参数辨识、控制重新设计上,使之能够适应降级飞行控制系统,并达到故障诊断与容错控制的目标,保证飞控系统在遭受一定范围的损失和出现故障状态时仍能较好维持操纵的性能。笔者认为,未来该领域的研究趋势应该包括以下几个方面:

(1) 由于NSV是高度复杂的非线性系统,很难为其建立完善精确的物理模型,在设计基于模型的故障诊断和容错控制方案时必须考虑数学模型和实际NSV系统之间的误差。因此,NSV模型的完善仍是需要研究与解决的问题。现有的NSV故障模型已经不能满足现实的要求,执行器故障与传感器故障的建模都有相对成熟的研究成果,但是对于NSV结构故障建模,目前还处于几乎空白的状态,如何建立NSV结构故障模型成为一项具有重要意义的工作;另一方面,与基于信息处理、知识推理等不依赖于模型的故障诊断与容错控制方法相结合应用于NSV,也是值得研究的方向之一。

(2) NSV飞行经过亚声速、跨声速、超声速和高超声速4个阶段,而且NSV飞行包线大,飞行速度快,在故障发生后,其动态行为难以预测,故障诊断与容错控制的设计不应该局限于NSV飞控某一个阶段或者某一个状态,而是应该考虑全航段,针对不同状态,基于多模型预测思想或LPV模型进行可靠控制研究与设计。

(3) 目前针对NSV的研究工作大多数是基于线性模型和T-S模糊模型,不能充分反映NSV的高度非线性、强耦合、快速时变等复杂特性,具有一定的局限性。因此,研究适合NSV飞行特征的基于全包络非线性模型的鲁棒故障诊断及其智能调节技术将具有挑战性和重要价值。

(4) 针对NSV在空间飞行状态的特点,当出现执行机构、传感器和结构故障时,应系统、全面、细致地设计NSV控制系统故障诊断与容错控制方案,使得NSV能够在近空间空域自主飞行并对各类执行机构/传感器异常数据具有强稳健和抗干扰能力,对控制过程突发性故障具有强容错能力。

(5) NSV故障诊断与容错控制方案目前大多还处于理论与仿真验证阶段,如何将所研究方法进行实际的工程验证,对故障的注入类型和幅值进行实际系统测试,研制NSV半物理仿真实验平台是需要进一步考虑和具有应用价值的研究方向。

### 4 结束语

NSV因其潜在的军用价值成为各国近期研究的热点。从总体上看,NSV技术尚处于关键技术攻关与演示验证阶段。在军事应用需求的牵引下,在技术发展的推动下,预计NSV进入军事应用为时不远。本文首先介绍NSV动力学方程以及飞控系统的故障类型;接着总结并分析了近年来国内外NSV故障诊断与容错控制技术的最新进展与最新成果以及存在的问题。最后,对近空间飞行器飞控系统容错控制技术未来的发展进行了探讨与展望。

#### 参考文献:

- [1] 王艳奎. 临近空间飞行器应用前景及发展分析[J]. 国防科技, 2009, 30(2): 20-24.  
Wang Yankui. The application prospects and development analysis of near space vehicle[J]. National Defense Science and Technology, 2009, 30(2): 20-24.
- [2] Buschek H, Calise A J. Uncertainty modeling and fixed-order controller design for a hypersonic vehicle model [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(1): 42-48.
- [3] Bolender M A, Doman D B. A non-linear model for the longitudinal dynamics of a hypersonic air-breathing vehicle[R]. AIAA-2005-6255, 2005.
- [4] Farrel J A, Polycarpou M M, Sharma M. Longitudinal flight path control using on-line function approximation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003, 26(6): 885-897.
- [5] Xu H, Mirmirani M D, Ioannou P A. Adaptive sliding mode control design for a hypersonic flight vehicle [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(5): 829-838.
- [6] 李菁菁, 任章, 宋剑爽. 高超声速再入滑翔飞行器的模糊变结构控制[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(2): 295-300.  
Li Jingjing, Ren Zhang, Song Jianshuang. Fuzzy sliding mode control for hypersonic re-entry vehicles [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011,

- 45(2): 295-300.
- [7] 刘燕斌,陆宇平,何真. 高超声速飞机纵向通道的多级模糊逻辑控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(6):716-721.  
Liu Yanbin, Lu Yuping, He Zhen. Longitudinal multistage fuzzy logic control for hypersonic vehicle [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007,39(6): 716-721.
- [8] 蒲明,吴庆宪,姜长生,等. 新型快速Terminal滑模及其在近空间飞行器上的应用[J]. 航空学报, 2011,32(7):1283-1291.  
Pu Ming, Wu Qingxian, Jiang Changsheng, et al. New fast terminal sliding mode and its application to near space vehicles [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011,32(7): 1283-1291.
- [9] Fidan B, Mirmirani M, Ioannou P A. Flight dynamics and control of air-breathing hypersonic vehicles: review and new directions [R]. AIAA-2003-7081, 2003.
- [10] Zhao Jing, Jiang Bin, Shi Peng. Fault tolerant control design for near space vehicles based on dynamic terminal sliding mode technique [J]. Proceedings of IME, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2012,226(6): 787-794.
- [11] Xu Yufei, Jiang Bin, Tao Gang, et al. Fault tolerant control for a class of nonlinear systems with application to near space vehicle [J]. Circuits System Signal Process, 2011, 30: 655-672.
- [12] Qi R, Tao G, Jiang B, et al. Adaptive control schemes for discrete-time T-S fuzzy systems with unknown parameters and actuator failures[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 2012,20(3): 471-486.
- [13] Cai X J, Wu F. Multi-objective fault detection and isolation for flexible air-breathing hypersonic vehicle [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011,22(1):52-62.
- [14] Shen Q K, Jiang B, Cocquempot V. Fault diagnosis and estimation for near-space hypersonic vehicle with sensor faults [J]. Proc IMechE, Part I: J Systems and Control Engineering, 2011, 226:302-312.
- [15] 高志峰. 复杂系统的容错控制技术及其在近空间飞行器中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.  
Gao Zhifeng. Fault tolerant control technology for complex systems and its application to near space vehicles [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.
- [16] 黄琳,段志生,杨剑影. 近空间高超声速飞行器对控制科学的挑战[J]. 控制理论与应用, 2011,28(10): 1496-1505.  
Huang Lin, Duan Zhisheng, Yang Jianying. The control scientific challenges of near space hypersonic vehicle [J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(10):1496-1505.
- [17] Zhang Y M, Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems [J]. Annual Reviews in Control, 2008,32:229-252.
- [18] Rodriguez A A, Dickeson J J, Sridharan S, et al. Modeling and control of scramjet-powered hypersonic vehicles: challenges, trends, & tradeoffs[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Honolulu, Hawaii: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008:1-40.
- [19] 杨伟. 容错飞行控制系统[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007:30-35.  
Yang Wei. Fault tolerant flight control system [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2007:30-35.
- [20] Boskovic J D, Prasanth R K, Mehra R K. Reconfigurable fault-tolerant flight control: algorithms, implementation and metrics [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Keystone, Colorado: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006: 1-24.
- [21] Chen J, Patton R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [22] Zhang K, Jiang B, Cocquempot V. Adaptive observer-based fast fault estimation [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2008,6(3):320-326.
- [23] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamics systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006,51(9):1578-1583.
- [24] Jiang B, Chowdhury F N. Fault estimation and accommodation for linear MIMO discrete-time systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3):493-499.
- [25] Commault C, Dion J M, Trinh D H, et al. Sensor classification for the fault detection and isolation, a structural approach [J]. Int J Adapt Control Signal

- Process, 2011, 25:1-17.
- [26] Frank P M, Ding S X, Marcu T. Model-based fault diagnosis in technical processes[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2000, 22(1): 57-101.
- [27] Tang X, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation for nonlinear MIMO systems with an aircraft control application [J]. Automatica, 2007, 43:1869-1883.
- [28] Jiang Y, Hu Q L, Ma G F. Adaptive backstepping fault-tolerant control for flexible spacecraft with unknown bounded disturbances and actuator failures [J]. ISA Transactions, 2010, 49:57-69.
- [29] Awi H, Edwards C. Fault tolerant control of a civil aircraft using a sliding mode based scheme[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005. Seville, Spain: IEEE, 2005:1011-1016.
- [30] Enns D. Control allocation approaches[R]. AIAA-98-4109, 1998.
- [31] Arun W C, Sen K S, Ray G. Dynamic control allocation for tracking time-varying control demand[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(4):1150-1157.
- [32] Rehman O U, Petersen I R. Feedback linearization and guaranteed cost control of uncertain nonlinear systems and its application to an air-breathing hypersonic flight vehicle [C] // Proceedings of the 8th Asian Control Conference 2011. Kaohsiung, Taiwan:[s. n.], 2011:688-693.
- [33] Jiang B, Gao Z, Shi P, et al. Adaptive fault-tolerant tracking control of near-space vehicles using Takagi-sugeno fuzzy models [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2010, 18(5):1000-1007.
- [34] Shtessel Y, McDuffie J, Jackson M, et al. Sliding mode control of the X-33 vehicle in launch and re-entry modes [R]. AIAA-98-4414, 1998.
- [35] Hedrick J K, Yip P P, Gerdes J C. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems [J]. IEEE TAC, 2000, 45(10):1893-1899.
- [36] Farrell J, Sharma M, Polycarpou M. Backstepping-based flight control with adaptive function approximation [J]. Guid Control Dyn, 2005, 28(6):1089-1102.