

文章编号: 1671-7848(2006)06-0513-05

## 无人机自修复飞行控制系统研究综述

齐晓慧<sup>1,2</sup>, 杨志军<sup>2</sup>, 吴晓蓓<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094; 2. 军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)



**摘 要:** 针对现代飞控系统作为无人机系统的核心之一, 正朝着自修复方向发展的现状, 总结了自修复飞行控制系统所涉及的故障检测与辨识、重构控制律、自修复飞行控制的仿真及试验等主要内容。分析了目前国内外自修复飞行控制系统的研究现状、技术水平, 特别是自修复飞控系统的故障检测与诊断、控制律重构、仿真及试验研究等。指出了现存的问题及研究动态。分析表明, 伴随着对智能控制不断深入的研究, 智能自修复技术, 包括智能故障诊断和智能重构控制律的设计, 将是这一领域研究的方向。

**关键词:** 飞行控制系统; 自修复技术; 重构控制; 故障检测; 故障诊断

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

## Survey Study of Self-repairing Flight Control System on UAV

QI Xiao-hui<sup>1,2</sup>, YANG Zhi-jun<sup>2</sup>, WU Xiao-bei<sup>1</sup>

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Department of Optics and Electronics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** As the core of UAV systems, the development of modern flight control system has a trend to be self-repairing ones. A survey of the current situation and the technical level of self-repairing control in correlative field, such as fault detection and identification, reconfigurable control, the simulation and testing research are presented. The recent development of self-repairing flight control in this important aspects is analyzed. Then the main problems and potential resolve methods or research direction are pointed out. Along with the development of intelligent control, the self-repairing technology including intelligent fault diagnosis and intelligent reconfigurable control will be a focus in this area.

**Key words:** flight control system; self-repairing technology; reconfigurable control; fault detection; fault diagnosis

### 1 引言

无人机的自修复控制, 是指在设计飞行控制系统时, 利用其控制机构本身的功能冗余, 来提高飞控系统对其机构故障及损伤的适应性, 使故障后的飞机不但能够幸存, 而且仍可安全飞行。自修复控制的目的<sup>[1]</sup>是解决飞控系统的可靠性和可维护性问题, 降低寿命周期费用, 同时也极大地提高飞机的生存性。

1982年, 美国国家宇航局(NASA)提出了“自修复控制”概念。美国空军飞行动力学试验室于1984年开始实施自修复飞行控制计划, 从此开始了自修复飞行控制系统关键技术和可靠性的研究, 以及系统设计、实现和试飞验证。

### 2 自修复控制与自修复飞行控制系统

自修复控制是在容错控制的基础上发展起来的, 涉及到故障诊断、控制律重构、系统的时序匹

配及无痕切换等技术。当飞机的某个控制面损坏后, 自修复控制的具体任务依次是<sup>[2]</sup>:

①由故障检测模块判断是否发生了控制面故障; ②自动切换至鲁棒性极强的应急控制律, 保证飞机在短时间内不失控; ③精确地检测故障, 确定故障的位置、性质和程度, 即常规的故障检测与识别(FDI); ④根据FDI的结果, 重构控制律, 最低要求是保持飞机的稳定, 并在此基础上尽可能地恢复原来的操纵品质。

在自修复控制提出的20多年中, 出现了多种形式的飞机自修复控制方案, 如果抛开表现形式上的差异, 那么它们实质上是完全一致的。自修复飞行控制系统典型结构, 如图1所示。

从图中可以看出, 典型的自修复控制系统包含三个重要组成部分: 故障检测与辨识部件、基本控制器和自修复机构。后两部分合在一起, 常称为可重构控制系统。这样, 自修复控制系统可归结为两

大模块：故障检测与辨识、可重构控制系统。

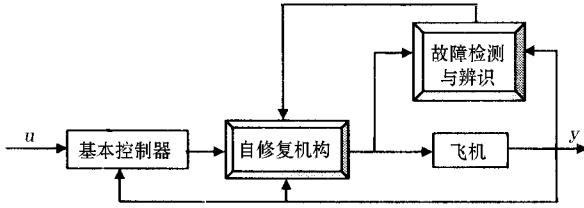


图1 自修复飞行控制系统的典型结构图

为了研究问题方便，对自修复控制进行分类。

1) 从基于的数学模型来分类，自修复飞行控制方法主要可分为线性化方法和非线性方法两类<sup>[3,4]</sup>。

①基于线性化模型的自修复控制 这类方法主要是针对飞行小扰动线性化模型进行设计的。早期的自修复控制就是采用这一类方法。1986年，兰利研究中心的A.J. 奥斯特洛夫和阿尔法泰克联合公司的J.L. 威斯等人提出的自修复控制的特点是：飞机的数学模型是线性定常的，故障应是可准确检测与辨识的，小故障利用自动配平系统处理，而大故障则通过重组控制律来保持飞机正常飞行。实际上，飞机的数学模型是强耦合、变参数、非线性的，当飞机出现突发性的结构故障时将会失稳并产生较大幅度的偏离平衡点的运动，用小扰动法得到的线性模型显然不能表征受损飞机的运动特性，故基于线性化模型的自修复控制方法有较大的局限性。

②基于非线性模型的自修复控制 在非线性自修复控制方法中，目前广泛应用的有反馈线性化方法（包括微分几何法、非线性动态逆方法）、Backstepping方法、增益预置方法等。由于非线性系统本身的复杂性，基于非线性模型的自修复控制方法还存在许多问题，远没有达到实用的要求。

2) 从修复时序来分类，自修复飞行控制方法主要有间接自修复控制和直接自修复控制两类<sup>[4]</sup>。

①间接自修复控制 间接飞行控制律重构方法的实施流程是，先进行故障检测和隔离，得到故障类型和大小，然后在线切换至自修复控制律修复。该方法的优点是：物理概念清晰、继承性好，可直接从原有的正常飞行控制律基础上增加控制混合器即可；其缺点是：故障检测算法的速度和精度难以权衡，存在实时性问题和误报警问题。因此，前期自修复飞行控制系统研究主要集中在故障检测算法方面；此外，其自修复控制律只针对有限故障模式，研究一次故障问题。

用间接自修复控制方法对飞机故障进行修复的方式是，先辨识故障后重构控制律，这里的重构控制律是依赖故障信息的。显然，这种方式存在着先天不足。概括地说，主要有两点需要注意：

a) 重构控制律需要知道故障的部位、类型、

大小，否则就不能进行正确重构。而故障本身是很复杂的，在实际应用中容易出现故障误判的情况，从而影响控制律的重构。目前，人们已经在故障辨识方面做了很多的理论研究，提出了很多方案，但都没能较好地解决故障辨识的快速性、准确性问题，离实际应用还有很大的距离。

b) 在故障辨识过程中，起作用的还是原来的控制律，飞行品质还在持续恶化，只有等故障辨识完成，控制律重构才可以进行，因而自修复的过渡品质很差。若这个过程过长的话，飞机可能会失去控制。间接自修复控制系统的原理结构，如图2所示。

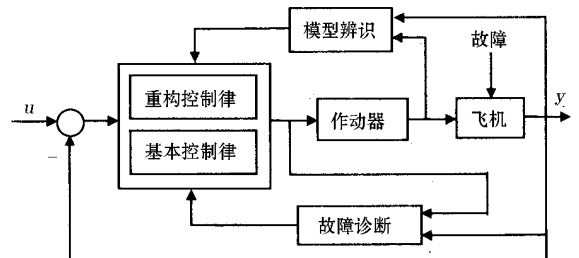


图2 间接自修复飞控系统的典型结构

②直接自修复控制 直接自修复控制不依赖于飞机故障或损伤准确信息的方法。其基本思想是在修复过程中，可以先不进行故障辨识，重构在故障发生的第一时间内就发生作用，从而从根本上解决故障辨识所带来的问题。该方法彻底抛弃了间接飞行控制律重构方法的时序结构，让修复作用在故障发生时就立即开始工作，而不必等到具体弄清故障之后。直接自修复控制方法是在非线性系统控制和自适应控制研究基础上发展起来的。但是要想在不依赖于故障模型的情况下，设计出一类对各类故障都有较好适应性的控制律，也不是件容易的事情。直接自修复控制系统的原理结构，如图3所示。

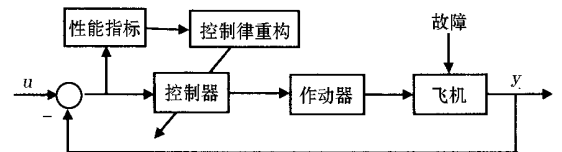


图3 直接自修复飞控系统的典型结构

自修复控制和自修复飞行控制系统不仅涉及大量的理论问题，而且也需要通过仿真、试验等技术手段进行验证；此外，自修复后飞控系统性能的评估也是必须要考虑的问题。对此，许多学者都进行了卓有成效的研究，取得了许多成果。

### 3 自修复飞行控制系统的理论研究

自修复飞行控制系统的理论研究，主要围绕着飞行控制系统的故障检测与诊断、重构控制方法两

大核心内容展开。

1) 飞控系统的故障检测与诊断 自修复飞控系统的一项关键技术,就是故障的全局检测、隔离和估计。一方面,要求故障诊断响应时间极短,这样才有可能消除由于故障引起的暂态加速和航迹偏离;另一方面,还要避免虚警和漏警,并且使隔离误差率最低。

飞控系统是一个复杂的控制系统,其故障模式也具有多样性。目前对飞行控制系统的故障检测和诊断方法主要有基于系统动态模型方法和不依赖于动态模型方法两大类。

①基于系统动态模型诊断方法 利用观测器或滤波器对控制系统的状态或参数进行重构,构成残差序列,然后采用一些措施来增强或突出残差序列中包含的故障信息,抑制模型误差等非故障信息。通过对残差序列的统计分析,可以检测出故障,并进行隔离。现在已有许多比较成熟的方法,如检测滤波器法、等价空间法<sup>[5]</sup>、广义似然比法、参数估计法、马氏链法<sup>[6]</sup>、鲁棒观测器法<sup>[7]</sup>等。其中,采用检测滤波器法对 F-16 进行了仿真;对于 F-8, F-15, C131H 等机型,则是利用了等价空间法进行了仿真和试飞验证。

②不依赖于动态模型诊断方法 主要包括基于专家系统的方法<sup>[8]</sup>、基于故障树的方法<sup>[9]</sup>、基于模式识别的方法、基于模糊数学的方法<sup>[5]</sup>、基于人工神经网络的方法<sup>[10]</sup>等。这一类方法的特点是适应性好、应用灵活,但故障诊断较困难,不便于故障的在线估计。对 F-16, F-18, 也应用了专家系统、模糊逻辑和神经网络对其进行辅助检测。

2) 飞控系统控制律的重构 飞控系统重构是指利用剩余的无故障元件,针对当前系统模型重构控制律,使系统达到某种要求。目前对重构控制策略的研究已取得了较大进展,研究者们已经提出了许多重构控制方案。

①基于故障信息进行重构设计的方法 主要有伪逆法、多模型自适应法、定量反馈重构法等。

a) 伪逆法<sup>[11]</sup>是一个重要的重构控制方法。其主要思想是:当操纵面发生故障时,可利用剩余无故障操纵面进行适当的线性组合,重构故障操纵面信号,这通常表现为在原输入阵前乘以一个伪逆阵,故称为伪逆法。许多学者都对其在飞控系统重构控制方面的应用做了大量的理论研究和仿真计算,并在 F-15 验证机上进行了飞行验证。结果表明,该方法是一种有效的重构控制方法。伪逆法可对未知故障进行在线计算和调整,但可能会出现一些问题,致使该方法失效,即系统的解无法保证重

构系统的稳定性,这对于它在线调整是不利的。文献[11]分析了伪逆法在重构控制中的稳定性,将控制重构问题描述为约束最小化问题,给出了一种改进伪逆法,并应用于一类单输入多输出系统,确保重构控制系统的稳定。张平、陈宗基<sup>[12]</sup>给出了在实时参数描述下的针对非线性飞控系统的伪逆可重构条件和伪逆算法。

b) 多模型自适应法<sup>[13,14]</sup> 通过离线训练、设计与在线识别、决策的巧妙结合,将有限个简单控制器的控制规则有机结合起来,以形成一种能在大范围内具有较高鲁棒性的系统。实际应用时要注意两个问题,一是如何选择设计模型和控制器,二是何时切换模型及控制器。

c) 定量反馈重构法<sup>[15]</sup> 利用了定量反馈理论来设计重构控制律,是一种离线设计、在线选择的方法。其设计结果是一套固定的控制器,由于该控制器可以容许对象参数有很大的不确定性,因而保证设计结果具有较强的鲁棒性。

以上这些方法的共同特点,是必须由故障检测与诊断模块提供故障信息,是实时选择、针对不同故障形式所设计的控制律。

②不需要故障信息,通过对飞机进行在线实时参数辨识、在线设计控制律的方法主要有:隐模型跟随控制方法、显模型跟随控制方法、反馈线性化控制方法、模型参考自适应控制等。

a) 模型跟随控制方法<sup>[16]</sup>是飞控系统重构的另一种主要方法。其实质是使实际系统的输出能够精确地跟踪参考模型,显然它需要进行实时参数辨识,属于自适应控制。模型跟随控制方法有隐模型跟随控制和显模型跟随控制两大类,其中隐模型跟随控制的特点是参考模型没有显式地加以实现,而只是在重构控制律的获取时才能体现出来。Ki-Seok Kim 等人<sup>[17]</sup>给出了一种采用直接自适应控制规则模型跟随重构飞行控制系统设计方法;文献[18]提出了基于径向基函数神经网络的模型跟随非线性自修复控制方法,这种方法可不必精确已知故障的位置及程度,即可重构控制律,使系统在故障情况下的输出精确跟踪期望参考模型的输出,并采用神经网络控制器以补偿故障引起的非线性因素的影响;Chandler, Mears 和 Pachtel<sup>[19]</sup>利用最小二乘系统辨识方法对系统参数进行在线估计,然后采用 Hopfield 网络通过最优模型跟随控制来完成飞控系统重构。

b) 反馈线性化控制方法 基本思想是通过采用反馈线性化对飞机的非线性动力学模型进行线性解耦,并以此来设计重构控制律。采用反馈线性化方法的优势在于,可以避免大量的增益调度表的设

计和试验,降低对飞行控制计算机的存储容量的要求,且能够适应更为复杂的飞行状况。特别是神经网络补偿逆系统的方法<sup>[20]</sup>,解决了逆系统方法对建模误差的敏感性问题,使逆系统方法具有了较强的实用性。

c) 模型参考自适应控制 其实质是根据参考模型(可由机载计算机软件实现)与被控飞机模型状态变量之间的运动偏差来重构控制律,通过实时辨识、实时调整来达到消除偏差的目的。

3) 自修复飞行控制的仿真及试验研究 为了对自修复飞控系统的故障检测和重构理论、方法等关键技术进行仿真研究及系统性能的评估,需组建自修复飞行控制的全数字仿真平台或含实物的半物理仿真平台,这有助于自修复控制的理论进一步实用化。但目前这方面的文献不多,特别是开展含实物的半物理仿真。文献[21]开发的基于 Matlab 的自修复飞控系统仿真平台,其软件结构包含用户库类、系统设置、系统仿真和数据处理 4 大部分。文献[22]对自修复控制进行了可视化研究,采用三维动画技术显示自修复控制过程。此外,自修复飞行控制系统试验研究在近年来受到大量关注,主要实例有:美国空军的 X-36 先进无尾战斗验证机(TAFA)RESTORE 计划、美国航空宇航局(NASA)X-33 计划、F-18 自修复飞行控制系统(SRFCS)计划、F-15 高集成数字电子设备(HIDEC)的 SRFCS 计划和 MD-11 的推力控制飞机(PCA)的项目实施等。

#### 4 存在的问题及研究动态

自修复控制技术经过多年的发展,在理论和应用方面都取得了一系列成果,但这些成果主要限于线性的被控对象,对于非线性系统的自修复控制,仍有大量理论、试验工作有待研究,且存在许多难点,这些难点也正是目前自修复控制研究的前沿课题。目前自修复控制还存在以下主要问题<sup>[23]</sup>。

①缺乏实用性 飞机本身的动力学及其结构故障通常表现出严重的非线性,因而小扰动线性化模型难以正确地描述故障飞机的动力学特性,使基于线性化模型的自修复控制方法失效。②缺乏实时性

由于飞机这一被控对象为高速运动的物体,系统状态参数变化极快,因而常规递推辨识和卡尔曼滤波等串行算法,不能满足实时重构控制的要求。目前基于知识的专家故障诊断方法、基于神经网络及模糊推理等的智能故障诊断方法的实时性也有待提高。③缺乏鲁棒性 由于飞行器动力学特性具有本质非线性,结构及参数具有强耦合性、时变性,传统基于模型的故障诊断方法和重构控制方法又过分

依赖于系统的数学模型,对于建模误差、参数摄动、噪声和干扰非常敏感,因而诊断和重构控制都缺乏鲁棒性。④缺乏一般性 现有的自修复控制方法仅针对某一具体飞机进行研究,无法应用于其他领域被控对象的自修复控制,尚未形成普遍适用的自修复控制理论与方法。

此外,对自修复飞行控制系统建立科学的效能评估体系,也是迫切需要解决的问题。目前这方面的文献鲜见报道,文献[4]对此做了有意义的工作。

智能控制方法为解决复杂的非线性系统的控制提供了强有力的手段,也为自修复控制朝着智能方向发展开辟了道路。目前智能自修复控制主要采用神经网络、模糊集合与推理及专家系统等技术,进行故障诊断系统和重构控制器的研究与设计。

智能自修复控制的研究主要体现在两方面:一是智能故障诊断方法研究,它是间接重构控制的前提和基础;二是智能重构控制律的设计。

智能故障诊断方法<sup>[24]</sup>的研究,主要集中在基于神经网络非线性滤波器的故障诊断、基于专家系统的故障诊断、基于小波分析的故障诊断、分层分布式神经网络故障诊断和基于模糊神经网络的故障诊断等分支上;智能重构控制律的设计<sup>[25]</sup>主要涉及的方法有非线性智能重构控制、基于输入重组的重构控制、反馈线性化控制、基于遗传算法的专家模糊控制器设计和基于神经网络的自适应重构<sup>[25]</sup>等。无论是故障诊断还是重构控制的设计,都还有许多问题有待研究。

#### 5 结 语

自修复飞行控制系统是未来战斗机、先进无人机飞行控制系统的发展方向,它涉及到许多有待进一步解决的理论、方法和技术。伴随着对智能控制不断深入的研究,智能自修复技术,包括智能故障诊断和智能重构控制律的设计,将是这一领域研究的热点问题。

#### 参考文献:

- [1] Kuberbus D. Self-repairing flight control systems overview[M]. USA NAECON, 1983.
- [2] 邵华章,陈宗基. 自修复飞控系统设计研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1): 30-33.
- [3] 黄卫. 非线性自修复控制方法及仿真研究[J]. 合肥工业大学学报, 2001, 24(1): 17-22.
- [4] 徐德文. 粗集信息分析在故障诊断中的应用及自修复飞行控制系统效能评估[D]. 南京 南京航空航天大学, 2002.
- [5] Gerard S, Gopisetty S M, Stengel R F. A fuzzy logic-parity space approach to actuator failure detection and identification[C]. Reno 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1998.

(下转第 549 页)