



RONGCUO FEIXING KONGZHI XITONG

容错飞行控制系统

杨伟 等编著

西北工业大学出版社

容错飞行控制系统

杨 伟 章卫国 杨朝旭 刘小雄 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书比较全面系统地阐述了容错飞行控制系统的基本理论和设计方法,为先进飞机容错飞行控制系统的研究奠定了基础。其主要研究内容包括飞行控制系统的故障诊断与容错控制的结构特点、基本原理和实现方法。在简要介绍容错飞行控制系统的研究内容和余度容错技术之后,用较大的篇幅讨论了容错飞行控制系统故障诊断方法,研究主动容错飞行控制系统设计,自适应和智能容错飞行控制系统设计方法,并给出了仿真应用实例。

本书可作为从事飞行控制系统研制、过程控制、故障诊断等领域工程技术人员的参考书,同时也可作为航空院校工业自动化、控制理论与应用、计算机应用、机械电子工程等专业高年级学生和研究生的教材与参考书。

图书在版编目(CIP)数据

容错飞行控制系统/杨伟等编著. —西安:西北工业大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-5612-2186-0

I. 容… II. 杨… III. 容错技术—飞行控制系统 IV. V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 027544 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029) 88493844 88491147

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:13.75

字数:227 千字

版次:2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

定价:29.00 元(平装) 46.00 元(精装)

前 言

容错控制是一门新兴的交叉性学科,具有很强的应用背景。容错技术的发展除了受到相关学科技术进步的推动外,实际需求是推动容错控制发展的原动力。容错飞行控制技术在先进飞行器设计方面的应用研究正在受到国内外研究机构的高度重视。

由于其任务的特殊性,飞行控制系统对安全与可靠性有严格要求。在飞行控制系统中,容错控制主要用来提高系统的安全性和可靠性。对于飞行控制系统任何部件的故障,要求容错控制系统快速、准确地检测故障,确定隔离策略,制定容错方案,保证系统持续、稳定运行。容错飞行控制技术的发展趋势是将自适应控制技术、智能控制技术和鲁棒控制技术等先进控制理论与容错控制方法相结合,形成一种新的自适应容错控制理论和自适应容错飞行控制技术,以满足高性能飞行控制系统的设计需要。

作者长期从事容错飞行控制技术研究,根据自己的研究总结与体会,结合本领域的新成果和新进展,对容错飞行控制系统的故障诊断与容错控制理论做了系统性的介绍。我们相信,本书的出版将有利于加深对容错飞行控制系统的物理概念和关键技术认识,为完善容错飞行控制技术奠定基础,对容错飞行控制系统的研究起到推动作用。

本书第1章介绍了容错飞行控制系统研究的内容和意义。第2章主要讨论了基于余度设计的容错飞行控制系统。第3章主要介绍了飞行控制系统故障诊断的基本概念、主要方法和存在的问题。第4章主要研究了主动容错飞行控制系统的设计。第5章研究了自适应容错飞行控制系统设计技术。第6章主要研究了基于神经网络的智能容错飞行控制系统设计技术。第7章以仿真验证为手段,主要研究了容错飞行控制系统应用技术,对飞行控制系统的作动器和传感器分别进行故障诊断和容错控制。第8章对全文的研究工作做了总结,阐述了目前研究中存在的问题和今后的发展趋势。

本书的编写得到了西北工业大学科技处和出版社的支持与关怀,同时在写作过程中作者参阅了大量国内外文献专著和学位论文,受益匪浅,在此向文献作者和相关单位表示谢意。

由于理论水平有限,书中难免有许多错误,恳请广大读者批评指正。

编著者

2006年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1. 1 容错飞行控制系统概述	1
1. 2 容错飞行控制系统研究的内容	6
1. 3 本书的内容概述	12
1. 4 本章小结	13
第 2 章 基于余度设计的容错飞行控制系统	14
2. 1 引言	14
2. 2 余度容错设计的基本内容	14
2. 3 电传飞行控制系统余度设计技术	16
2. 4 余度系统的可靠性	26
2. 5 本章小结	29
第 3 章 容错飞行控制系统故障诊断方法	30
3. 1 引言	30
3. 2 飞行控制系统故障类型	30
3. 3 基于解析余度的故障诊断	35
3. 4 基于观测器的故障诊断	40
3. 5 基于滤波器的故障诊断	50
3. 6 基于径向基神经网络观测器的故障诊断	61
3. 7 基于小波神经网络的故障模式识别	70
3. 8 故障维护诊断专家系统	90
3. 9 自监控技术与故障趋势预测方法	97
3. 10 本章小结	102

第 4 章 主动容错飞行控制系统	104
4. 1 引言	104
4. 2 容错飞行控制系统的控制律重构设计	104
4. 3 容错飞行控制系统的伪逆方法	107
4. 4 基于特征结构配置的主动容错飞行控制	114
4. 5 本章小结	125
第 5 章 自适应容错飞行控制系统	127
5. 1 引言	127
5. 2 模型跟随自适应控制	128
5. 3 多模型自适应容错飞行控制系统设计	129
5. 4 直接自适应容错飞行控制系统设计	139
5. 5 本章小结	152
第 6 章 基于神经网络的智能容错飞行控制系统	154
6. 1 引言	154
6. 2 神经网络自适应控制技术	155
6. 3 神经网络自适应容错飞行控制	158
6. 4 本章小结	166
第 7 章 飞行控制系统容错技术应用	167
7. 1 传感器故障隔离与容错控制	167
7. 2 作动器故障隔离与容错控制	185
7. 3 本章小结	196
第 8 章 结束语	197
参考文献	199

第1章 绪论

飞行控制系统的高可靠性是飞行安全的重要保证。当飞机出现故障或者遭到意外损伤时,飞行控制系统如果能够依据故障特性和损伤特性迅速改变控制策略,通过控制系统的重构或者重组实现飞机最低安全性要求,这对于保证飞机飞行任务的继续执行或者安全返航具有重要的意义。所以,未来先进飞机的飞行控制系统应该具备较强的容错能力,以满足高可靠性的要求。容错飞行控制系统的研究正是为了解决飞行控制系统的可靠性和可维护性,降低寿命周期费用,提高飞机的生存性,减轻驾驶员的负担。到目前为止,容错飞行控制系统理论尚在蓬勃发展之中,成为各国航空界的主要研究课题。本章主要对容错飞行控制系统的有关概念,研究的目的、意义及研究内容进行简要的阐述。

1.1 容错飞行控制系统概述

1.1.1 容错技术概述

容错技术是指系统对故障的容忍技术,也就是指处于工作状态的系统中一个或多个关键部分发生故障或差错时,系统能自动检测与诊断,并能采取相应的措施保证维持其规定功能或维持其功能在可接受的范围内的技术。根据容错方法的不同,容错控制可分为被动容错控制和主动容错控制。被动容错控制设计的出发点是减少系统对单个部件运行情况的依靠性,即使在出现故障又无校正作用的情况下,系统仍能工作;主动容错控制首先要能自动地适时检测并诊断出系统的故障,然后采取对故障的控制或处理的策略,因此主动容错技术通常情况下包括对系统的故障诊断和重构设计。

容错控制是20世纪80年代发展起来的一种高可靠性技术。在1986年美国国家科学基金委员会和IEEE控制系统学会联合举办的一次专题讨论会上,国际控制界著名专家会聚于美国 Santa Clara 大学,讨论控制科学的发展和当前面临的挑战,以美国学者

A. H. Levis等为首的 52 位知名专家提出的一份题为“Challenges to Control”的集体研究报告中,将容错控制列为七个挑战性课题之一,并预言其将很快在工程中得到应用。目前,容错技术的研究已经有了很大的发展,并取得了许多重要研究成果。

在飞行控制系统中,容错控制的主要目的是提高系统的安全性和可靠性。对飞行控制系统中的故障部件,要求容错控制系统能够快速、准确地隔离故障,并采用相应的重构手段保证系统持续、稳定、安全地运行。因此,实时、稳定的重构控制方法是容错飞行控制的主要目标,而对故障系统进行快速、准确的判断是容错飞行控制系统所要解决的关键问题。

1.1.2 研究的目的、意义

容错控制是一门新兴交叉学科,促使这门学科迅速发展的一个最重要的动力来源于航空航天领域。西方先进国家从 20 世纪 70 年代起就不断投入巨资对容错控制技术进行研究,为开发出具有强容错能力的高性能先进飞行器服务,期望达到在飞行器飞行系统某个部件发生故障甚至在多个部件发生故障时,依靠容错控制也能够保证飞行器的生存和较理想的飞行特性。

飞行控制系统是飞机最重要的组成部分,它对飞机的飞行性能和安全性起着决定性作用。现代先进飞机由于系统结构日趋复杂和庞大,飞行环境相对恶劣,飞机性能要求严格,其安全可靠已成为飞行控制系统设计中首先考虑的问题。未来先进飞机的飞行控制系统必须具备自主决策与控制功能、自适应容错能力,以满足高可靠性的要求。

电传操纵是现代先进飞行控制系统普遍采用的操纵方法,它将飞行控制系统中信号检测系统、信息处理系统、执行系统和数量众多的传感器等通过电信号进行连接,任何细小的故障和错误都可能导致整个系统出现异常,进而导致飞机安全性出现不可预见的问题,因此对电传操纵飞行控制系统,系统的可靠性变得更加重要。当飞机出现意外故障或者遭到意外损伤时,飞行控制系统如果能够依据故障特性和损伤特性迅速改变控制策略,通过控制系统重构实现飞机的最低安全性要求,保证飞机飞行任务的继续执行或者保证飞机安全返航无疑具有十分重要的意义。所以,容错飞行控制技术是解决现代飞行控制系统安全性、可靠性的先进技术,对降低飞机的寿命周期费用、减轻驾驶员负担等也有积极作用。

从先进高可靠性飞行控制系统发展来看,为保证飞机能够可靠地完成战略任务,现代先进的飞行控制系统都采用余度技术以提高系统的可靠性和容错能力。随着系统集成度的提高以及对重量、空间和维修性的考虑,除一些重要的部件外,其余部件余度配置较低,这样就需要快速稳定的故障隔离和重构控制算法以满足系统的高可靠性要求。利用容错技术的飞行控制系统可实时地进行飞行控制系统故障检测和隔离,并对系统进行重构控制,注重充分开发无故障元件的潜能,补偿故障元件的功能。

1.1.3 研究概况

目前,容错飞行控制技术在先进飞行器设计方面的应用研究受到工业发达国家的高度重视,国外研究机构很早就开始了这方面的研究工作,并且先后在验证机和无人机上都对容错飞行控制系统的各项关键技术进行了全面的飞行试验和评估,取得了令人鼓舞的结果。当前,容错的概念已经深入到当代各种新型飞行器的设计过程中。在各种先进战斗机和航天飞行器的研制中,都包含了容错功能要求,所有新型飞行器都要求可以进行自主维护和控制重构。一些大型的航空制造公司在一些先进的民用客机上也都采用了容错控制技术,如波音 777 和空客 A320 采用非相似余度容错控制技术。20 世纪 90 年代美国空军飞行动力学试验室开始实施了容错飞行控制计划,进行了容错飞行控制系统关键技术和可靠性研究以及系统设计、实现和试飞验证。在容错飞行控制系统关键技术及可靠性研究方面,对于故障检测与隔离技术、控制律重构技术、自主式维修诊断技术以及驾驶员主动告警技术等研究方面均取得了突破性的成果。可以说,容错技术有无对于飞行器来说,已经成为改善生存性、增加可靠性的重要标志之一^[1-3]。

在国内,很多研究所与院校对容错飞行控制系统的关键技术也进行了大量的研究,特别是各航空院校在这方面已经积累了大量的研究经验和理论基础,在飞行控制系统的故障诊断与重构,自修复飞行控制系统的研究方面都取得了相当多的研究结果,在先进飞机电传飞行控制系统和容错技术研究领域开展了大量的研究工作,某些关键技术已取得了阶段性的研究成果。目前,国内虽然在容错飞行控制系统的故障隔离与重构控制的一些关键技术已取得了一些研究成果,但是还未形成一个完整的理论体系,本书结合作者多年的研究成果,对容错飞行控制系统的各项技术进行整理和分析,力争使得对容错飞行控制系统的研究设计形成一个完整的理论体系。

故障隔离与重构控制作为容错飞行控制系统研究的主要内容,其研究的目的是要尽量保证飞行控制系统在发生故障时仍然可以安全、稳定地运行,并具有可以接受的性能指标。因此,故障隔离与重构控制成为提高飞行控制系统可靠性的有效途径。但是对于复杂的飞行控制系统,系统的在线故障隔离、快速稳定的重构控制算法,以及对干扰的鲁棒性和对环境的自适应能力都是困扰容错飞行控制系统发展的制约因素,如何找到一种快速实时的故障隔离和具有很强自适应能力的重构控制算法是解决容错飞行控制系统的关键问题。

1.1.4 发展趋势

最初飞行控制系统的容错设计是基于硬件余度(余度部件、余度系统)而实现的,如三余度和四余度系统,通过简单的表决逻辑来判断故障。硬件余度遇到的主要问题是重量大、体积大、费用高、飞行器承载能力小。同时相似余度系统具有相同的寿命周期,系统容易受共性故障的影响。但用非相似余度系统又难以保证表决检验的一致性。为了使整个系统可靠、安全,并且提高系统的容错能力,因此有必要研究新的方法消除或减少硬件余度。

随着计算机技术及其计算能力、可靠性的提高,现代控制理论的产生和发展,出现了以解析余度取代物理(硬件)余度的容错设计思想。在故障检测中出现了这种新方式,其设计思想是用不同传感器测量系统的变量,产生完全不同的信号,通过不同输出信号之间的相互关系建立输出之间的解析模型,从而检测传感器故障,尽管是异类传感器,但所有信号都是由系统中同一状态激励的,因此具有某种功能关系。这种方式的容错技术称为解析余度技术。解析余度方式是利用状态估计、参数估计、自适应滤波、变量阈值逻辑、统计决策理论和综合逻辑的容错处理技术。

近年来,容错控制技术得到迅速发展,特别是先进自适应技术、鲁棒控制和智能控制技术在容错控制领域的进一步应用,在容错飞行控制领域形成了许多研究热点,也取得了一系列研究成果。但是从学科的要求来看,无论是在理论体系的构建方面,还是在解决实际问题方面,仍有一段艰巨的路程要走。实际应用中还存在许多应该注意的问题,主要表现在以下几个方面:未能体现先进容错飞行控制系统的自适应、自组织与自决策能力;容错飞行控制系统的重构控制缺乏进一步创新和应用实现,重构控制理论有待进一步完善;

对飞行控制系统故障检测与隔离未能达到实时、快速的目的;未能很好地抑制故障的虚警率,杜绝故障的误报率;对非线性飞行控制系统的故障隔离与重构控制的研究还缺乏有效和实用的方法;对容错飞行控制系统的故障预报与维护技术需要进一步加强。

对容错飞行控制系统的研究,应该进行多学科渗透与综合,将智能技术、信号处理技术、统计决策方法和现代控制理论进行有效的结合,从而突破制约容错飞行控制系统发展的限制,达到实用有效的目的。容错飞行控制系统在以下几个方面将是未来研究的重点:

(1)基于余度设计的容错飞行控制系统研究。常规余度设计的重点是余度管理技术,非相似余度设计的关键是软件设计技术与硬件的选型,解析余度算法的研究趋势是针对实时系统的快速在线故障诊断与系统重构,功能余度实现的关键在于任务分割、任务调度、任务监控,以及飞机的气动布局。

(2)鲁棒容错飞行控制系统研究。鲁棒性是所有容错控制理论、方法和系统所面临的重要问题。鲁棒性研究的目的是在存在各种干扰的情况下,检测出尽可能小的故障,同时使得设计的重构控制系统具有很强的抗干扰能力。

(3)混合智能型容错飞行控制系统。随着智能技术的发展与应用,将基于知识的方法、解析余度技术、数据处理技术和现代控制理论有效地结合,进行一种混合智能型容错处理,从而提高系统的可靠性。

(4)非线性容错飞行控制系统研究。随着现代飞机执行任务的复杂性以及机动性能的提高,使得飞行控制系统的非线性表现突出,研究非线性系统的容错技术已成为现代容错飞行控制系统发展的必然趋势。

(5)自适应容错飞行控制系统。飞机的飞行环境随着飞机的运动在不断发生变化,飞行控制系统必须适应飞行环境的改变。容错飞行控制系统设计针对的是一个模型和参数可能都在不断变化的对象,因此容错控制必须同时解决系统的自适应性。

(6)容错飞行控制系统的实时性与稳定性。为了适应航空、航天技术的快速发展,针对实时系统的快速在线故障诊断与容错控制算法也是研究的趋势,寻找一种简单快速的算法对于解决突发性故障具有很高的实用价值。

容错控制技术本质上是一门与具体应用目的紧密相关的技术,其发展除了受到相关学科技术进步推动外,实际需求是推动容错控制理论发展的原动力。从理论研究、技术可

行性及应用角度来看,未来高可靠性的容错飞行控制系统的设计应是对自适应技术的进一步发展,是对自适应控制理论、现代控制方法、智能控制、容错控制以及统计决策理论的全面应用,包括对系统进行在线故障检测与隔离,实时稳定的、具有高度自适应和自主决策能力的重构控制,从而形成一种新型的容错飞行控制理论和容错飞行控制技术,以满足高性能飞行控制系统设计的需要。

1.2 容错飞行控制系统研究的内容

根据现代电传飞行控制系统的特点以及容错技术的研究目的,容错飞行控制系统主要在以下几个方面开展研究。

(1)余度容错技术。现代电传飞行控制系统都采用余度技术以提高系统的可靠性和容错能力,余度设计的重点是讨论余度设计的内容、方法及余度管理技术。

(2)容错飞行控制系统故障诊断技术研究。采用相应的技术,飞行控制系统能及时发现故障,给出故障信息,并确定故障的部位、类型和严重程度,同时自动地隔离故障,给出故障告警。

(3)容错控制技术研究。针对飞行控制系统故障的不同部位,故障的类型和影响程度,给出相应的容错处理方案,并进行快速的系统重构控制。同时自动对故障进行削弱、补偿、切换、消除和修复,以保证飞行控制系统出现故障时的性能尽可能地接近原来正常工作时的性能,或以牺牲部分性能指标代价来保证系统继续完成其规定功能。

(4)容错飞行控制系统故障趋势预测技术研究。能自动预测飞行控制系统各部分的运行状态、使用寿命、故障发生的趋势。根据飞行数据和测试数据,建立飞行控制系统的故障预测模型,对系统的运行情况进行状态监控管理,同时根据数据融合理论对大量数据进行分析研究,从而完成故障的趋势分析和预测。

(5)系统维护技术研究。根据故障诊断和预测结果,对飞行控制系统进行维修决策,对故障单元进行更换维修,减少维修费用,提高部件利用率。

根据容错飞行控制系统的研究内容,结合近几年国内外在容错飞行控制系统领域的研究成果,本节对飞行控制系统故障检测与隔离技术、自修复飞行控制系统、飞行控制系统重构控制技术进行简单的介绍。

1.2.1 飞行控制系统故障诊断技术

故障诊断是容错控制研究的主要内容。故障诊断的目的是为故障控制提供预警能力,以提高系统可靠性与安全性,因此,故障诊断必须对各种误差与干扰具有很强的鲁棒性,对故障发生时的检测与诊断具有实时性。随着科学技术的发展,故障隔离技术在不断完善。实践中,从硬件余度,到解析余度,再到智能诊断方法,研究内容非常广泛,但总的来说可归纳为两类:一是不依赖解析模型的故障检测与诊断理论和方法,如基于信息处理、知识推理、人工智能、专家系统的诊断方法等,这种方法通常用于对故障的早期预报与预测以及对系统的监控;二是基于系统解析模型的方法,这种方法是现代控制理论、优化方法和决策统计知识为指导,以系统的数学模型为依据,利用观测器/滤波器、等价关系方程、参数估计和辨识等方法产生残差,然后基于某种统计准则或阈值对残差进行评价和决策,从而进行系统的故障隔离。从飞行控制系统研究的角度来看,基于数学模型的故障诊断技术仍然是研究的重点。

飞行控制系统故障检测研究的主要理论基础是 Richard V. Beard 于 1971 年提出的检测滤波器法, Harold L. Jones 于 1973 年和 M. A. Massoumnia 于 1986 年在 MIT 航空航天系的博士学位论文中做了进一步研究。该方法通过设计对特定故障敏感的状态观测器,从而突出特定故障信息,随之拉开了故障诊断算法研究的序幕,一系列适合于航空航天领域的故障诊断算法应运而生。其中具有代表性的是等价空间、系统参数辨识、卡尔曼滤波器、未知输入观测器等方法。以上几种方法中因观测器/滤波器法抗干扰能力强而应用最为广泛。除上述基于常规解析模型的故障诊断方法外,基于知识的人工智能故障诊断方案也逐渐成熟,并已成功地运用于航空航天领域^[14-29]。

最初故障检测与隔离系统的主要研究对象是飞行控制传感器(飞行控制系统的测量元件)故障。为了减小传感器的余度数目,在 20 世纪 70 年代初期,国外曾利用非相似飞行控制系统传感器之间的解析关系构造出被检测传感器的解析值,从而实现了双物理余度加单解析余度的三余度故障检测表决机制,解决了传感器的故障诊断问题。进而,研究重点转向作动器、操纵舵面(飞行控制系统的控制元件)的故障检测与隔离研究。

70 年代至 80 年代故障检测与隔离的研究重点主要是运用观测器/滤波器技术进行飞行控制系统的故障诊断,例如 VISTA/F-16 验证机采用检测滤波器方法可同时检测传

传感器和作动器的故障。

80 年代末至 90 年代中期主要采用等价空间法进行故障诊断,针对 F—15,C—131H 验证机型,实现了对飞行控制系统作动器和舵面损伤的部分自修复检测与隔离功能。

随着智能控制技术和计算机运算速度的提高,使用神经网络和模糊方法的故障隔离技术在航空航天领域也得到了研究和验证,波音公司采用神经网络自适应控制算法成功地进行了 X—36 无尾翼飞机的重构飞行试验。

从应用的角度看,参数辨识方法对模型的结构要求很高,由于建模误差等因素的影响,基于参数辨识的故障检测方法的检验门限难以确定。等价空间方法虽然物理意义明确、算法简单,但是等价空间阶的选择仍然是难点,同时由于等价空间没有考虑系统的闭环性质,因而其应用受到一定的限制。基于观测器/滤波器方法的最大好处是其结构上的特点,由于观测器的闭环性质,使得生成的残差具有很强的鲁棒性,而基于多模态控制的飞行控制系统,可以很容易地建立系统的估计模型,因而基于观测器/滤波器方法仍然是目前研究与应用最多的方法。应用神经网络或者模糊技术建立的系统辨识模型为基于观测器/滤波器的故障诊断方法开拓了思路。

飞行控制系统故障检测与隔离的主要特点:一是实时性,要求在飞机未出现严重失控前迅速查出故障。由于飞行控制系统的鲁棒性设计,飞机不受小故障影响,对较严重的故障也能延迟恶化时间,因而故障实时检测主要是针对较强的故障形式。二是可靠性,要求较小的虚警率和漏报率,算法不能发散,要能适应较宽的故障范围。

1.2.2 自修复飞行控制系统

自修复飞行控制系统是一种采用了主动容错控制技术的容错飞行控制系统。研究的目的是为了提高系统的可靠性和可维护性,降低寿命周期费用,提高飞机的生存性,减轻驾驶员的负担,使飞机具有故障后继续完成任务或安全返航的能力。同时还提供实时自主诊断,对故障进行迅速检测和隔离,从而有效地降低成本,提高可靠性^[30]。

自修复飞行控制系统能对飞行控制系统中的故障实时进行检测、隔离和恢复,注重于使得元件获得最大使用效益,同时它还具有强大的自主维修诊断功能,大大地简化了地勤维修工作,使得可靠性和维护性指标全面提高。自修复飞行控制系统的关键技术包括下述四个方面。

(1)故障检测与隔离技术。在自修复飞行控制系统中,故障检测和隔离系统实时监控作动器、操纵面、飞行传感器等辅助系统的故障情况,为及时预警以及进行飞行控制系统重构和自主维修诊断提供相关信息和依据。故障检测和隔离一般可以通过残差产生和决策两个步骤来实现。残差产生实际上是对系统解析余度开发的过程,决策则是利用开发出来的余度关系检测和隔离故障的过程。故障检测和隔离是自修复飞行控制系统的一项重要内容,它对于及时判断故障发生的原因和部位,预测潜在故障的发生都具有重要的意义。

(2)重构飞行控制技术。重构飞行控制系统是利用操纵面的气动余度,对操纵面损伤等故障进行主动容错控制,以保证飞机的安全可靠。根据重构控制方法的不同,可能需要故障检测信息来进行重构控制,如伪逆法;也可能只需要飞行传感器的信息而直接进行重构控制,如模型跟随方法等。重构控制是自修复飞行控制系统的一项关键技术,先进飞机正是由于具有了飞行控制系统重构功能,才可以降低对飞行控制系统硬件余度的要求,并且提高了飞机的安全可靠性以及生存能力。

(3)自主式维修诊断技术。目前,自主维修诊断系统主要是通过应用人工智能及专家系统技术,对飞行控制闭环系统提供在线的故障检测、诊断以及地面的辅助诊断功能。自主维修诊断系统接收由故障检测、隔离系统,以及总线、表决系统等所有可能的信息源传来的数据,对飞行控制系统内部所有故障进行诊断,并将故障隔离至航线可替换单元,减少了飞行控制系统故障平均诊断时间,提高了飞机的可维护性。

(4)驾驶员主动告警技术。驾驶员主动告警系统,是为驾驶员提供的实时决策系统,它可以给驾驶员提供当前飞机状态的信息,并提供相应的建议。当发生故障时,则通过显示屏或者语音系统提供需要立刻进行的操纵建议,对于更多的细节以及不需要紧急处理的信息,则采用多功能显示的方法予以提示,多功能显示一般包括重构前后的飞机状态信息、飞行控制系统状态信息以及应急处理信息。驾驶员主动告警系统可以帮助驾驶员根据情况进行选择决策,采取最有效操纵和应急措施。

自修复飞行控制系统的以上四部分功能,显示出了其巨大的优越性。它解决了飞行控制系统的可靠性和可维护性问题,降低了寿命周期费用,同时也极大地提高了飞机的作战生存能力,已成为新一代先进战斗机飞行控制系统的发展方向。

综上所述,作为主动容错控制的一项重要研究内容,自修复飞行控制系统已经在一

系列关键技术取得了突破性进展,这些技术正在逐步移植到目前及未来的战斗机上,已成为可靠而又经济的先进飞行控制系统的技术支持,而自修复飞行控制系统也已成为未来先进飞机飞行控制系统的发展方向。

1.2.3 飞行控制系统重构控制技术

重构控制技术是容错飞行控制系统的另一项核心内容。飞行控制系统重构控制技术是美国国家航空宇航局 1982 年首先提出的新概念,该宇航局曾组织了格鲁门公司、空军莱特研究所等单位进行了可重构战斗机的构型研究^[31]。重构控制的思想是在传统余度控制理论的基础上发展起来的。对飞机而言,这种硬件余度会增加系统的成本,而重构控制则是针对系统的各种结构损伤,充分利用系统的功能余度来实现控制律的重构。具体地讲,在飞机某些舵面/作动器发生故障后,通过重构控制策略,将失效舵面的控制效果分配给健全的舵面,以补偿失效舵面的影响,保证飞机安全飞行或着陆。重构控制实质上是减少了传统余度控制中多重硬件余度和软件余度的方法,依托系统自身的功能余度,使系统性能在发生故障时能得以恢复或维持。因此,重构控制的研究更具挑战性。

目前,对重构控制策略的研究已取得了很大进展,研究者们已经提出了许多重构控制方案。其中伪逆法因为结构简单,而在早期的重构系统设计中得到广泛应用,并在验证机上进行飞行验证,都达到了预期的效果。此外,还有多模型自适应控制方法、定量反馈重构控制方法等,以上这些方法的共同特点都是需要由故障诊断模块提供故障信息,实时选择针对不同故障形式所设计的控制律。重构控制系统的另外一些设计方法不是通过故障诊断模块获取故障信息,而是对飞机进行在线实时参数辨识,在线设计控制律。这类方法主要有模型跟随控制方法、反馈线性化控制方法和线性二次型控制等重构控制方法。1989 年, Napolitano 等人提出了一种重构飞行控制方法,利用多模态卡尔曼滤波器估计部件受损飞机的线性动力学模型,并据此产生控制重组算法。在 1996 年夏天,国外对可重构飞行控制系统进行的飞行验证中,采用参考模型跟踪的方法对 VISTA/F-16 飞机进行重构控制。随着智能控制的发展,模糊逻辑和神经网络控制技术也被用于飞行重构控制的研究,并且取得了一定的成功。目前重构控制方法的研究已由理论走向实践,1991 年国外在 F-15 验证机上进行了成功的重构控制试飞实验。先进研究机构曾预言,未来飞行控制系统研究目标之一就是实用的重构飞行控制系统。

重构飞行控制技术就是在系统中发生不同部件故障或者遭受意外损伤时,适时地调整控制器的参数或结构,重构或重建系统的一种容错控制方法,它使得飞行控制系统具有适应未知故障和损伤的能力,从而可以有效地保证系统安全性和维持适当的操纵品质。目前,对重构控制技术研究取得了很大进展,研究者们已经提出了许多重构控制方法,如定量反馈法、特征结构配置法、伪逆法、变结构法、基于自适应控制和基于神经网络的智能重构方法等。下面对几种主要的重构控制方法进行简单的介绍。

定量反馈重构控制方法是一种离线设计、在线选择的控制方法,该方法的主要特点是将滤波器和补偿器串联使得设计结果具有鲁棒性,并且不需要对故障系统进行辨识。

使用特征结构配置方法进行重构控制的思想是运用特征配置算法对故障系统进行重构设计,使得闭环系统的特征值和特征向量得到最大程度的恢复。

伪逆重构法需要系统准确的故障信息,利用这些信息修改反馈增益,使得重构后的系统接近正常情况下的性能,其设计算法简单,但是求逆运算以及系统的稳定性问题是制约其发展的关键因素。

变结构重构控制是建立在滑模变结构控制理论上,滑模变结构控制对扰动以及对象不确定性不敏感,所以设计的重构控制律具有很强的鲁棒性,但是使用这种方法需要保证飞机发生故障时滑模变结构重构控制的不变性。

基于自适应控制的重构方法主要是采用模型参考自适应控制技术,使得被控对象的输出跟踪参考模型的输出。目前的研究主要集中在对自适应律的选取和实时重构控制上,考虑到飞行控制系统实时性与鲁棒性的要求,模型跟随自适应以及由此理论演变的方法仍是重构控制研究的重点和热点。

智能重构方法主要是采用神经网络或模糊技术对系统进行辨识和控制,从而完成系统的重构。该方法主要是应用神经网络强大的逼近能力,通过训练使其能准确地估计出故障的大小,然后采用补偿技术来完成系统的重构。这种方法是目前非线性控制系统研究的重点。

从研究的动态来看,鲁棒控制技术、自适应控制和智能控制在重构控制概念下的交叉、融合已经奠定了先进飞行控制重构技术的基础,并成为一个最具有应用前景的发展方向。