国家自然科学基金重点项目研究成果

飞行控制系统的自愈合控制

陈复扬 王 瑾◎著

RESILIENT CONTROL OF FLIGHT CONTROL SYSTEM



2015年国家自然科学基金重点项目(61533009)

“结构不确定非线性系统的功能自愈合理论及其高超声速飞行器控制研究” 研究成果

中国工信出版集团

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

国家自然科学基金重点项目(61533009)研究成果
——结构不确定非线性系统的功能自愈合理论及其高超声速飞行器控制研究

飞行控制系统的自愈合控制

Resilient Control of Flight Control System

陈复扬　王　瑾　著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书为2015年国家自然科学基金重点项目（61533009）“结构不确定非线性系统的功能自愈合理论及其高超声速飞行器控制研究”的最新研究成果，主要介绍了双旋翼直升机、四旋翼直升机、高超声速飞行器的故障诊断方法及自愈合控制方法。第1章作为绪论简单介绍了自愈合控制技术的发展概况，第2、3章研究了基于观测器设计的双旋翼直升机故障诊断方法及多故障下的自愈合控制方法，第4~9章针对四旋翼直升机介绍了基于前馈补偿、鲁棒反步滑模、故障观测器、组合多模型等自愈合控制方法，第10章讨论了高超声速飞行器的多故障鲁棒自适应控制方法。

本书可供高等院校从事飞行控制、故障诊断与容错控制等相关领域理论研究的教师与研究生阅读；亦可供各研究所与国防企业从事控制相关类工程实践的各专业技术人员，以及对自愈合控制感兴趣的读者参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

飞行控制系统的自愈合控制 / 陈复扬，王瑾著. —北京：电子工业出版社，2017.11
ISBN 978-7-121-33171-8

Ⅰ. ①飞… Ⅱ. ①陈… ②王… Ⅲ. ①飞行控制系统—研究 Ⅳ. ①V249

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第295721号

责任编辑：杨秋奎
印　　刷：三河市鑫金马印装有限公司
装　　订：三河市鑫金马印装有限公司
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路173信箱　邮编 100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：12.75　字数：285千字
版　　次：2017年11月第1版
印　　次：2017年11月第1次印刷
定　　价：79.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254694。

前 言

功能自愈合是指系统在出现由多重故障和结构损伤导致的大幅度参数变化和结构不确定的情况下，通过自身的自动调节而恢复并保持理想的系统特性。功能自愈合的实现需要更高效的故障诊断和容错控制技术。

美国国家航空航天局（NASA）统计数据显示，在 126 起飞机失控事故中，94% 事故由不利机载条件引起；其中，由系统故障、损伤和错误引起的事故占 45%。2007 年，NASA 开启了名为“Integrated Resilient Aircraft Control”（综合自愈合飞行控制）的研究计划，以增强飞控系统的自愈合能力。2009 年，美国爱达荷国家实验室的 Rieger 等人首次提出了自愈合控制的概念。NASA 兰利研究中心考虑航空器中的失控事故，解决了非正常飞行条件下安全关键自愈合飞行控制系统的设计问题；麻省理工学院与 NASA 兰利研究中心合作，针对通用运输机模型，研究其模型重心不确定和时延故障情况下的自愈合控制技术；NASA 德莱顿飞行研究中心将有关测试飞机（改进的 F/A-18A）用于自愈合控制技术研究的飞行测试。

2012 年，美国国家科学基金会开启了名为“Failure-Resistant Systems”（故障自愈合系统）的研究计划，旨在把自愈合控制系统的概念进一步推广。我国“十二五”“十三五”规划明确把这个航空航天重大科学问题列入有关科学技术发展部分，以推动故障诊断和容错控制技术的研究。本书是沿着这一重要战略研究方向完成的。

本书主要内容包括高超声速飞行器、双旋翼直升机、四旋翼直升机的故障诊断方法及自愈合控制方法。主要介绍了多故障鲁棒自适应控制、融合前馈补偿和直接自适

应控制、组合多模型、H^{∞}故障观测器、反步控制和干扰观测器结合、鲁棒反步滑模控制等在自愈合控制研究中的尝试。本书可为读者研究探索自愈合控制提供参考，希望本书的研究结果能为促进自愈合控制技术的发展，起到抛砖引玉的作用。

本书由南京航空航天大学陈复扬教授与南京邮电大学王瑾博士共同完成，陈复扬、王瑾负责内容设计、组织安排编写。前言、第 1~5 章由陈复扬编写，第 6~10 章由王瑾编写，全书由陈复扬、王瑾共同统稿及排版。研究生张世俊、吴庆波、王正、张康康等也为本书的出版贡献了自己的聪明才智，在此一并表示诚挚的谢意。

由于著者水平和经验所限，书中难免存在错误和不足之处，恳请广大读者不吝指正。

著者 E-mail：chenfuyang@nuaa.edu.cn

著　者

中国南京

2017 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论 ……1

1.1 自愈合控制的研究背景 ……1

1.2 国内外研究现状 ……2

1.3 最新研究成果 ……6

第 2 章 基于观测器设计的双旋翼直升机故障诊断方法 ……9

2.1 引言 ……9

2.2 双旋翼直升机控制系统建模及半物理仿真平台 ……10

2.2.1 纵列式双旋翼直升机 ……10

2.2.2 双旋翼直升机半物理仿真平台 ……13

2.3 基于自适应观测器的多执行器卡死故障诊断 ……22

2.3.1 执行器卡死故障系统描述 ……22

2.3.2 鲁棒快速自适应故障估计方法 ……23

2.3.3 多模型故障诊断方法 ……26

2.3.4 仿真与分析 ……29

2.4 基于自适应滑模观测器的执行器时变故障诊断 ……34

2.4.1 系统描述 ……35

2.4.2 基于自适应滑模观测器的故障诊断方法 ……36

2.4.3 仿真与分析 ……39

2.5 相对阶大于 1 的非线性系统执行器故障诊断……44
2.5.1 微分几何基本知识……44
2.5.2 三自由度双旋翼直升机非线性模型分析……45
2.5.3 基于构造辅助输出的执行器故障诊断……46
2.5.4 仿真与分析……50
2.6 本章小结……53
第 3 章 基于自适应控制的双旋翼直升机多故障自愈合控制……54
3.1 引言……54
3.2 三自由度双旋翼直升机改进模型……55
3.3 基于自适应控制的多故障自愈合控制器设计……58
3.4 系统仿真验证与分析……60
3.5 本章小结……63
第 4 章 含有未知参数的四旋翼直升机多故障自愈合控制……64
4.1 引言……64
4.2 四旋翼直升机动力学模型……66
4.3 联级控制系统基本控制器设计……67
4.4 针对执行器部分失效故障的滑模自愈合控制器设计……71
4.5 针对未知参数的自适应容错控制器设计……75
4.6 各控制器间的时间尺度分析……77
4.7 系统仿真验证与分析……78
4.8 本章小结……84
第 5 章 基于前馈补偿和直接自适应的四旋翼直升机自愈合控制……85
5.1 引言……85
5.2 四旋翼直升机控制系统与问题描述……86
5.3 自愈合控制方案设计……87
5.3.1 内环基础控制律设计……87
5.3.2 直接自适应重构控制器设计……87
5.3.3 前馈补偿器设计……90
5.4 系统仿真验证与分析……92
5.5 本章小结……95

第 6 章　基于组合多模型的四旋翼直升机自愈合控制……96

6.1　引言……96
6.2　飞行控制系统问题描述……97
6.3　自愈合控制系统设计……98
6.3.1　参考模型优化设计……98
6.3.2　自适应重构控制律设计……99
6.3.3　多模型集建立及控制器设计……101
6.4　系统仿真验证与分析……104
6.5　本章小结……108

第 7 章　基于 H^{∞} 故障观测器的四旋翼直升机自愈合控制……109

7.1　引言……109
7.2　控制系统及故障描述……110
7.3　自愈合控制系统设计……111
7.3.1　带故障补偿项的自适应控制律设计……111
7.3.2　H^{∞} 故障观测器设计……114
7.4　系统仿真验证与分析……117
7.5　本章小结……120

第 8 章　基于反步控制与干扰观测器的四旋翼无人机自愈合控制……121

8.1　引言……121
8.2　带干扰块的四旋翼无人机数学模型……122
8.3　非线性干扰观测器设计……127
8.4　反步控制器设计……130
8.4.1　反步控制相关知识……130
8.4.2　欠驱动系统的反步设计……135
8.4.3　全驱动系统的反步设计……138
8.4.4　反步输入控制……139
8.4.5　反步控制器的容错设计……140
8.5　系统仿真验证与分析……142
8.6　本章小结……147

第 9 章　四旋翼无人机的鲁棒反步滑模控制设计 ……148

9.1　引言 ……148

9.2　四旋翼无人机数学模型 ……149

9.3　姿态角系统轨迹跟踪滑模控制设计 ……150

9.3.1　滑模控制相关知识 ……150

9.3.2　姿态角滑模跟踪控制设计 ……154

9.4　位置轨迹跟踪的反步滑模控制设计 ……157

9.5　系统仿真验证与分析 ……164

9.6　本章小结 ……167

第 10 章　高超声速飞行器的多故障鲁棒自适应控制 ……168

10.1　引言 ……168

10.2　高超声速飞行器的非线性纵向模型 ……169

10.3　针对完全失效故障的自适应观测器设计 ……171

10.4　针对缓变故障和模型不确定性的支持向量机补偿控制器设计 ……174

10.5　系统仿真验证与分析 ……178

10.6　本章小结 ……182

参考文献 ……183

第 1 章

绪 论

1.1 自愈合控制的研究背景

随着科学技术的发展，出现了一些具有大数目执行器和传感器网络、大规模系统动态性能关键的新型应用系统，如航空航天器、核反应堆、微电子机械系统以及智能电网系统。这些新型系统的主要特点是：工作变化范围大、系统动态范围复杂、元部件较多，因此具有很强的非线性特性，存在大幅度的参数和结构的不确定性，且可能遭受结构损伤，多个元部件故障会同时发生。例如，我国正在研究的新型飞行器：高超声速飞行器、智能变体飞机和倾转旋翼机等。这些系统的出现和发展对控制系统的安全性和可靠性带来了挑战，美国国家航空航天局（NASA）统计数据[1]显示，在 126 起飞机失控事故中，94%事故由不利机载条件引起；其中，由系统故障、损伤和错误引起的事故占 45%。例如，1989 年美联航 232 航班的飞机事故涉及执行器（方向舵、升降舵等）的液压系统故障，1994 年美联航 427 航班在匹兹堡的事故和方向舵故障有关，2000 年阿拉斯加航空 261 航班的事故中水平稳定器出现了故障。此外，因系统故障引起的事故也出现在工业过程和高速铁路系统中，如 2005 年发生的 BP 炼油厂爆炸事故就是由系统部件失灵造成的。另外，在事后对这些事故的研究中发现，故障后的系统实际上还具有足以用来实施安全控制的冗余驱动能力，如果能够有效地加以利用，可以避免事故的发生，这为新型应用系统容错控制的研究提供了依据和动力。

功能自愈合是指系统在出现由多重故障和结构损伤导致的大幅度参数变化和结构不

确定的情况下，通过自身的自动调节而恢复并保持理想的系统特性。功能自愈合的实现需要更高效的故障诊断和容错控制技术。

2009 年，美国爱达荷国家实验室的研究员在第二届人类系统交互会议上发表论文，并在会议中报告他们的工作，提出了“自愈合控制系统”的概念，并指出自愈合控制系统本质上是指系统具备自愈合功能，保障工业控制系统在遭受到任何可能降低系统性能有害行为的情况下仍然恢复理想系统性能。

与此同时，2007 年 NASA 开启了名为“综合自愈合飞行控制”的研究计划，以增强飞控系统的自愈合能力。2012 年，美国国家基金委开启了名为“故障自愈合系统”的研究计划，旨在把自愈合系统的概念进一步推广。

我国有关“十二五”科学技术发展规划也确定了该航空航天重大科学问题，并推动故障诊断和容错控制技术的研究。本书的研究沿着这一重要的战略研究方向，以飞行器为主要应用对象，针对可能导致性能关键系统出现结构不确定性的执行器故障、结构损伤和函数不确定性，探索自愈合控制新方法。

1.2 国内外研究现状

1. 国外研究现状分析

NASA 围绕航空安全计划创建了融合自愈合航天控制项目，项目主要负责人 Joseph Totah 指出航空安全计划是国家航空研究和发展政策中的首要任务，航空安全计划的最终目标之一是发展有效的技术、工具和方法来提高新一代飞行器的内在安全属性。融合了自愈合的航天控制项目主要目标是发展有效的、多学科融合的航天控制设计工具和技术，来实现飞行器在不利条件（故障、损伤和紊乱）下的安全飞行。并且强调指出：自适应控制具有不断地改变自身来适应被控系统和环境变化的特点，从而维护系统安全和获得令人满意的控制性能。因此自适应控制可以和鲁棒控制或智能控制相结合，是用途最广泛的一种控制技术。

NASA 兰利研究中心的 Christine M. Belcastro 考虑航空器中的失控事故，解决非正常飞行条件下安全关键自愈合飞行系统研究的基本问题。“失控”是指飞行器飞行过程中可能发生的不利机载条件（如飞行器损伤、系统软件故障和执行器故障等）、外部风险和障碍以及不利飞行环境（如能见度差、湍流、恶劣天气等）。

麻省理工学院的 Travis E. Gibson 等与 NASA 兰利研究中心的 Sean P. Kenny 合作，针对 NASA 兰利研究中心提供的通用运输机模型，研究其模型故障（重心不确定和时延）情况下的自适应控制技术。不同于麻省理工学院和 NASA 兰利研究中心（两者主要集中于当前和下一代运输机），NASA 德莱顿飞行研究中心将改进的 F/A-18A 飞机用于项目飞行测试。

近年来国外与自愈合控制相关的学术活动也频繁出现。在 2012 年国际原子能机构技术会议上，自愈合工程协会会长 Jean Pariès 提出了题为“航空自愈合：意想不到的挑战”的报告。2015 年，自愈合工程协会在葡萄牙里斯本举办第六届关于自愈合工程的专题讨论会，该讨论会的主题为“管理自愈合：提高在不可预测世界中的适应能力和主动性”，通过 2011 年航空器失控事故“澳航 A380 飞机因引擎故障在新加坡迫降”来深入讨论航空系统的自愈合性。2013 年 1 月，美国国防部在华盛顿召开小组报告会，该报告的题目为“自愈合的军事系统和先进的网络威胁”，主题是“探讨国防科学委员会自愈合军事系统工作组的最终报告”。

飞控系统的自愈合控制主要是基于主动容错控制技术，对发生的故障进行实时检测和辨识，并充分利用飞行控制系统的冗余有效控制机能来进行控制律的重构设计，使飞行器能够补偿故障带来的影响。重构控制技术可以降低飞行器对硬件冗余的要求，允许在出现较严重故障或者外部干扰的情况下，仍能保证飞行器的相关有效性能，使得飞行员能够继续完成任务或者安全返航。早在 1984 年，NASA 就已经实施自修复飞行控制系统研究计划，在自修复飞控系统设计的一些关键技术上取得了突破性的进展，这些研究成果正在逐步应用到现今以及未来的战斗机上，为先进飞行控制系统自愈合控制的研究提供了技术支持。目前，对于飞行器（如直升机、固定翼飞机、近空间飞行器、卫星等）的重构控制技术的研究已经取得了很多的研究成果，研究学者们也提出了很多解决飞行器控制问题的重构控制方法。这些方法主要可分为两大类：一类是基于故障检测和隔离环节提供的故障诊断信息，针对不同的故障模式所设计的控制方法，如伪逆法、定量反馈控制方法等；另一类是不需要故障检测和隔离环节来获得故障信息，而是直接对飞控系统进行在线参数辨识，动态地设计控制器。

从国外研究现状分析可知，飞控系统自愈合控制的研究有以下亟待解决的问题：

（1）复合故障、多故障问题。目前，对于飞控系统重构控制技术的研究大多只针对执行器或传感器发生单一故障的情形；而飞行器的飞行任务和飞行环境越来越复杂，执行器或传感器发生多故障以及执行器和传感器发生复合故障都是常出现的情况。如何解决复合故障、多故障情况下的自愈合控制问题，原有的重构控制系统能否再适用，是需要进一步研究的。

（2）鲁棒性设计问题。自愈合控制律的设计不仅考虑到被控对象的特性，还需要考虑到故障检测环节、参数辨识环节、重构控制器的鲁棒性，而这些机构又是相互作用的，因此整个闭环系统的鲁棒性是受诸多因素影响的，需要进行综合分析和设计。

（3）非线性问题。大多数飞控系统本身是一个非线性、强耦合的系统，又加之极易受到外部干扰的影响，因此设计有效的控制算法必须考虑到模型的非线性影响和干扰影响。在某些特定的条件下，系统的非线性因素不能够被忽略，这将给自愈合控制器的设计带来更大的挑战。

2. 国内研究现状分析

我国在 2011 年发起名为“智能配电网自愈控制技术研究与开发”的国家高技术研究发展计划（863 计划），并于 2015 年 1 月 27 日在广州佛山成功验收。智能配电网自愈控制可以描述为，在含分布式电源的配电网不同层次和区域内实施充分协调且技术经济优化的控制手段与策略，使其具有自我感知、自我诊断、自我决策、自我恢复的能力，实现配电网在不同状态下的安全、可靠与经济运行。但关于航空系统中研究自愈合控制的报道很少。

虽然专门开展自愈合控制研究的时间不长，但故障诊断和容错控制技术已得到了深入、广泛的研究，各国学者提出了众多可行的方法，并已经在飞机自动驾驶、人造卫星、航天飞机等领域得到了广泛的应用，取得了大量的应用成果，创造了巨大的经济效益，也发表了大量的专著[2-4]。目前，国内外有关飞行控制系统的故障诊断及容错控制的研究已有一些结果。

任章等针对高超声速飞行器飞行过程系统参数大范围剧烈变化以及存在严重不确定性的特点，同时考虑外界环境干扰复杂，内部干扰严重的特殊问题，提出了一种新型强鲁棒自适应控制器构型[5]；宗群等综合考虑密度变化、声速变化、发动机推力变化及地球引力等因素对飞行轨迹的影响，研究临近空间飞行器上升段轨迹优化问题，并对相关气动参数进行高精度拟合[6]；陶钢等针对具有未知扰动和不确定执行器故障的临近空间飞行器，设计一种自适应的补偿控制方案，以实现临近空间飞行器的姿态跟踪控制[7]；宋超等针对高超声速飞行器再入过程中可能出现的执行器部分失效或卡死故障，设计了一种飞行器自适应容错控制器[8]；王青等针对高超声速飞行器执行机构饱和的控制器设计问题，提出一种多回路抗饱和鲁棒自适应切换控制方法[9]；姜斌等针对发生时变横偏差故障和时变控制增益故障的高超声速飞行器姿态控制系统，通过设计一个滑模观测器来提供故障诊断信息，并利用李雅普诺夫稳定性理论证明了故障估计误差系统的一致有界性[10]；孙长银等针对含有外部扰动和执行器故障的高超声速飞行器纵向飞行动力学模型设计了一个容错跟踪控制器，可以保证飞行器的高度和速度指数收敛速度快速的趋近于参考轨迹[11]；通过对

飞行器的国内外研究现状进行梳理，可看出，目前飞行器的容错控制理论正由线性控制理论向非线性理论过渡，而目前的非线性控制方法研究对模型准确性的依赖较大，而系统故障容易造成系统模型发生大的不确定性变化，因此，需要发展新的自愈合控制理论提高飞行器的安全性和可靠性。

近年来，容错的思想与现代控制理论的经典方法相结合，形成了针对执行器故障的大量的容错控制算法，如基于观测器的方法[12-14]、基于线性二次型调节器的方法[15]、基于特征结构配置的方法[16]、基于自适应的方法等[17-22]。其中，自适应控制因其能有效地处理系统参数、结构和环境的不确定性，被广泛地用于故障补偿；文献[17]基于间接自适应控制方法设计控制器补偿飞行器的舵面损伤。文献[18]采用自适应控制算法对已知系统的未知执行器故障进行了补偿。文献[19]对一类具有二阶执行器动态的飞行器的线性化模型设计了可重构自适应控制器，使其在多个执行器同时发生故障时仍能保证闭环信号有界和实现渐近跟踪。文献[20]针对一类具有执行器故障的多输入多输出随机系统，设计了实时故障估计算法，通过重构控制器实现了执行器故障的补偿。文献[21]设计了直接自适应控制器，使系统在发生执行器损伤或饱和后，仍能达到期望的系统性能。文献[22]研究了一类具有不确定性的多输入单输出（MISO）非线性系统的执行器故障补偿问题，通过对系统和故障的参数化，设计了自适应 backstepping 控制器，保证了闭环信号的有界性和渐近跟踪性能。近年来，方华京等总结了其在网络控制系统的故障诊断方向取得的一些主要思想和成果[23]；杨光红等针对具有不确定执行器故障和外部扰动的不确定非线性系统，采用模糊逼近理论和反步技术，提出一种新的自适应模糊控制方法[24]；陶钢等针对具有未知执行器故障的线性系统，进行直接自适应的状态反馈设计，以保证系统稳定性和实现状态跟踪[25]，研究了基于输出反馈的自适应控制设计，以保证系统的输出跟踪性能[26]；近来，部分学者将基于多模型的自适应方法用于飞行器的容错控制设计[27-30]。该方法针对不同故障情况下的系统模型分别设计能实现期望控制目标的控制器组成控制器集合，并设计切换机制选择最接近故障后系统模型的控制器作为当前控制器，补偿因执行器故障造成的不确定性。此外，国内外学者对欠驱动系统的控制问题也进行了大量的研究，如水面船舶[31-32]、直升机[33-34]、航天飞机[35]和航空器。但大部分欠驱动的故障问题都是假设欠驱动的执行器故障是已知，这些方法很难应用于执行器故障未知的情况。

在处理结构损伤方面，国内外学者也进行了大量的研究，其成果主要集中在飞行器的结构损伤上。Krishnakumar K.针对飞行器的左翼、垂直和水平尾翼发生部分损伤的问题，采用基于自适应的神经网络算法实现了对存在不对称结构损伤的结构不确定性飞行器的控制[36]；Bacon B. J.研究了具有非对称质量损失的飞行器的控制问题[37]；Lombaerts 研究了损伤后模型的辨识问题[38]；Nguyen N. T.采用基于神经网络的估计策略设计了混合自适

应控制方法以实现具有结构损伤的飞行器的控制[39]、用基于直接自适应律的神经网络参数估计设计控制器对具有未知结构损伤的飞行器进行了控制[40]；陶钢等基于高频增益矩阵的 LDS 分解设计了模型参考自适应控制系统对出现多处机翼损伤的飞行器进行了控制[41]、研究了出现结构损伤后，非线性飞行器模型的线性化，并对其进行模型参考自适应控制设计[42]、针对 NASA 通用运输机出现执行故障和结构损伤的问题，设计自适应的补偿控制方案，以保证系统的跟踪性能[43]。虽然，对于飞行器的损伤补偿已经取得了不少的研究成果，但仍有很多开放性的问题尚未解决，如损伤引起系统相对阶结构、驱动方向和匹配条件等关键性能的变化。

从 20 世纪 80 年代开始，具有不确定参数的非线性系统自适应控制问题已经被广泛研究，并已取得很多重要成果。系统参数的不确定分为线性化参数不确定和非线性化参数不确定两种类型。目前，针对线性参数化不确定非线性系统的自适应控制问题已经取得了丰富的研究成果[44-45]，并且理论发展的也较为成熟。从 20 世纪 90 年代中期开始到现在，众多学者针对未知参数以非线性形式出现的更广泛的非线性系统的自适应控制问题进行了广泛深入的研究，并且该领域仍然是自适应控制学界研究的热点和难点之一，很多重要问题仍然没有完全解决，如现有的很多结果在未知参数上施加了限制条件，常见的如未知参数边界已知[46]等，不附加参数条件的非线性参数化系统的全局自适应调节和自适应输出跟踪一直被认为是一个富有挑战性的问题。

1.3 最新研究成果

本书主要内容包括双旋翼直升机、四旋翼直升机、高超声速飞行器的故障诊断方法及自愈合控制方法。主要介绍了多故障鲁棒自适应控制、融合前馈补偿和直接自适应控制、组合多模型、H^{∞} 故障观测器、反步控制和干扰观测器结合、鲁棒反步滑模控制等在自愈合控制研究中的尝试。本书共分 10 章，作者的主要研究工作及成果安排如下：

第 1 章绪论。本章主要介绍飞行控制系统自愈合控制的研究背景，分析自愈合控制、故障诊断与容错控制的国内外发展概况及研究进展。

第 2 章基于观测器设计的双旋翼直升机故障诊断方法。本章主要研究三自由度双旋翼直升机控制系统的执行器故障诊断问题，主要从理论方面采用了基于数学模型的观测器设计方法，对三自由度双旋翼直升机飞行控制系统在发生执行器故障情况下的故障诊断问题进行了较为深入的分析和研究，同时基于三自由度双旋翼直升机仿真平台对算法在实际中的应用尝试做了部分实现工作。

第 3 章基于自适应控制的双旋翼直升机多故障自愈合控制。本章修正了三自由度直升机的线性模型，提出了基于模型参考自适应方法的故障自愈合算法。在分析非线性模型时准确考虑了力矩作用，改进了非线性模型；控制方法仿真比较表明，提出的自愈合控制方法可有效补偿系统故障、外界干扰及建模不确定性，保证了良好的跟踪精度和自愈合性能。

第 4 章含有未知参数的四旋翼直升机多故障自愈合控制。本章为实现四旋翼直升机良好的位置跟踪和姿态的调整能力，在具有参数不确定性、外部干扰和多执行器故障下，提出了基于时间尺度分析的多回路结构，设计了基于滑模故障观测器和自适应估计方法的自愈合控制器。仿真结果表明，提出的控制方法可实现良好的跟踪精度和自愈合性能。

第 5 章基于前馈补偿和直接自适应的四旋翼直升机自愈合控制。本章提出了一种基于前馈补偿和直接自适应控制的自愈合控制算法。同时考虑了系统具有建模不确定性、外部干扰和驱动器 LOE 故障的情况，即系统的鲁棒控制问题和容错控制问题。针对系统建模的不确定性和外部干扰，保证系统能够在正常状态下能有效运行，设计了线性二次型控制来作为内环反馈控制器。设计了前馈补偿器以满足系统几乎严格正实性的要求，该补偿器是根据每一个发生故障的子系统来综合设计，可使得所有的故障子系统稳定。在仿真中，针对系统在不同的情况下，包括有参数不确定性和外部干扰以及发生不同程度的故障等一系列情况进行数值仿真，验证了所提方法的有效性。

第 6 章基于组合多模型的四旋翼直升机自愈合控制。本章针对具有驱动器卡死故障和外部干扰的四旋翼直升机线性化模型，设计了基于自适应控制和组合多模型方法的自愈合控制方案。基于最优控制以及最小值原则，将原始系统依据最优性能指标进行优化，进而得到了可以使得系统实现渐近跟踪的参考模型。对自适应重构控制律以及自适应参数调整律的设计进行了稳定性的证明，用来确保系统的跟踪误差收敛。在传统的多模型方法的基础上，将固定模型与自适应模型的结合进行了扩充，加入了重新初始化的自适应模型，可根据当前系统的状态，将自适应模型重置为距离对象真实模型最近的固定模型，以达到提高收敛速度的目的。最后的仿真结果证明了所提出的自愈合控制方案的优越控制性能。

第 7 章基于 H^{∞} 故障观测器的四旋翼直升机自愈合控制。本章针对发生驱动器故障的四旋翼直升机，设计了基于 H^{∞} 故障观测器和自适应控制的自愈合控制方法。针对执行器 LIP 故障，设计带有故障补偿项的自适应重构控制律；设计引入 H^{∞} 性能指标的故障观测器，获取准确的故障估计信息来实现控制系统重构，以减轻自适应重构控制律的控制负担。采用这样的故障辨识算法，可使估计误差按指数收敛，提高整个系统的鲁棒性和自愈合能力，在仿真中验证了其有效性。

第 8 章基于反步控制与干扰观测器的四旋翼无人机自愈合控制。本章为四旋翼无人机设计了具有一定容错能力的轨迹跟踪控制器，在构建控制器的过程中，设计了干扰观测器，

用来估计模型中建模的干扰块，所得到的扰动估计项继而在反步控制器的设计中被加以利用，实现了对系统扰动的补偿。针对执行器失效故障，对控制器进行了容错能力的设计，从而使得所设计的控制器能够在干扰和故障的情况下保证系统一定程度的性能要求。仿真结果表明了所设计的控制器能够较好地实现轨迹跟踪的控制目标，并且对干扰和故障具有一定的容错能力，达到较好的自愈合控制效果。

第 9 章四旋翼无人机的鲁棒反步滑模控制设计。本章为四旋翼无人机设计了基于滑模控制的反步控制器，实现了系统对干扰和模型不确定性的鲁棒能力。针对姿态角所设计的常规滑模控制器能够实现角度的快速跟踪，利用反步控制技术和滑模控制技术为四旋翼无人机的位置子系统设计了虚拟控制器和对应的滑模面，实现位置的轨迹跟踪控制。基于李雅普诺夫稳定性定理的分析保证了系统的稳定性。针对模型不确定性以及干扰的仿真实验表明了所提出的控制方法具有良好的跟踪精度和容错能力，达到较好的自愈合控制效果。

第 10 章高超声速飞行器的多故障鲁棒自适应控制。本章设计了高超声速飞行器的多故障自适应容错控制控制器。介绍了具有不确定性的纵向动力学模型，利用动态逆控制器作为其基础控制器，应用自适应控制和支持向量机控制理论，设计其自愈合控制方案。考虑到突变故障和缓变故障的不同特点，分别设计了自适应控制器和支持向量机自适应补偿器。基于李雅普诺夫稳定性理论证明了系统的稳定性。仿真结果表明，提出的控制方法可以达到良好的跟踪精度和容错性能。