

探索文库

中国动力机械发展的关键控制

苏浩秦 于红艳 ◎ 著



光明日报出版社

探索文库

中国动力机械发展的关键控制

苏浩素 于红艳 ○ 著

光明日报出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国动力机械发展的关键控制 / 苏浩秦, 于红艳著. —北京:
光明日报出版社, 2008. 8

(探索文库)

ISBN 978-7-80206-627-4

I. 中… II. ①苏… ②于… III. 动力机械—研究—中国
IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 118469 号

探索文库·中国动力机械发展的关键控制

著 者: 苏浩秦 于红艳

责任编辑: 茹新平

版式设计: 莘海琴

责任校对: 徐为正

责任印制: 胡 骑

出版发行: 光明日报出版社

地 址: 北京市崇文区珠市口东大街 5 号, 100062

电 话: 010-67078244 (咨询), 67078945 (发行), 67078235 (邮购)

传 真: 010-67078227, 67078233, 67078255

网 址: <http://book.gmw.cn>

E - mail: gmcbs@gmw.cn

法律顾问: 北京昆仑律师事务所陶雷律师

印 刷: 北京振兴源印务有限公司

装 订: 北京振兴源印务有限公司

本书如有破损、缺页、装订错误, 请与本社发行部联系调换

开 本: 880mm×1230mm 1/32

字 数: 2160 千字 印 张: 80.25

版 次: 2008 年 8 月北京第 1 版 印 次: 2008 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-80206-627-4

定 价: 300.00 元 (全 10 册)

版权所有 翻印必究



苏浩秦 高工, 博士, 现在航天空气动力技术研究院工作。博士与博士后期间参与包括“国防预研项目”、“863”项目、自然科学基金项目和其他单位横向课题在内的若干项目, 在国内外刊物会议发表论文20余篇。研究兴趣为飞行器制导、导航与控制 and 发动机控制等。



于红艳 工程师, 硕士, 现在北京机电工程研究所工作。参与包括“国防预研项目”、“863”项目和其他单位横向课题在内的若干项目。研究兴趣为结构力学与振动控制等。



前 言

推力矢量技术是 21 世纪飞行器必备技术之一,国外对推力矢量飞行器进行了飞行验证,结果表明使用推力矢量非常有效。推力矢量使飞行包线得到扩展,在大迎角状态下飞行时,会产生更大的非线性气动耦合,非常需要飞控系统适应在线飞行参数变化,因此自适应飞控系统应是未来推力矢量飞行器发展的方向。自修复飞控系统逐渐在飞行器上开始使用,对这种控制系统的性能,目前国外正处于试飞验证阶段,将自修复功能融入间接自适应飞控系统中,将会进一步扩展飞控系统对故障适应飞行的功能,提高飞行器飞行的安全性和可靠性。

本书研究具有自修复功能的推力矢量飞行器自适应飞控系统,目标包括;开发间接自适应控制算法,包括鲁棒控制器和在线适应辨识器,满足对推力矢量飞行器快时变参数的适应控制要求;在自适应飞行控制系统基础上开发出自修复重构控制功能,满足对飞行器故障后重构控制的要求;研究推力矢量在不同飞行条件下的作为一种冗余控制舵面具有的功能。仿真验证了具有自修复功能的推力矢量飞行器间接自适应飞控系统是一个完整的,鲁棒的,稳定收敛的系统。

传统汽车自 19 世纪 80 年代末诞生以来,已经有 100 多年历史,随着汽车工业的快速发展,汽车的生产量和保有量急剧增加,由于其广泛普及使用,不仅大量消耗地球上有限石油资源,也对环境造成不同程度污染。我国必须在控制石油消耗的增长和发展节能型汽车的同时,发展和推广清洁替代能源,减少污染,保护环境。在长期汽车新能源的研发过程中,各国对汽车新型动力发展趋势有了进一步认



识:近期以开发传统内燃机新技术和代用燃料为目标;中期以研制混合动力汽车大幅度降低油耗和排放为目标;远期以电动汽车和燃料电池汽车为目标。

现有混和动力汽车能量管理算法多以源动力部件(如内燃机或燃料电池)效率最优或排放最少为控制目标,让源动力部件工作在最优工作点或最优曲线上;或是以储能元件(如蓄电池或超级电容)SOC(state of charge)为目标,接收源动力部件释放的能量对其充电。采用优化技术的控制策略是目前发展的一个方向。

本书对燃料电池混合动力系统能量管理算法进行分析,对串联式能量混合性燃料电池汽车算法进行了进一步的分析和对比,采用遗传模拟退火优化能量管理算法。仿真平台基于 MATLAB 环境下的车用仿真软件 ADVISOR 实现了二次开发。仿真结果显示,采用遗传模拟退火优化的能量管理算法相比其他算法,如恒温控制或功率跟随控制等,在保证汽车性能基础上氢燃料经济性上有了进一步提高。

本书在章节上安排如下:第 1 章为绪论;第 2 章分析了推力矢量飞行器采用自适应飞行控制系统特点和逻辑结构关系,并推导推力矢量飞行器模型;第 3 章列举了在自修复飞控系统中采用的鲁棒控制方法,并采用在线逐点线性化后退区间优化控制算法解决系统鲁棒性问题;第 4 章列举了自修复飞控系统中已有的参数辨识方法,针对推力矢量飞行器参数快时变特点,采用修改最小二乘算法实现系统鲁棒辨识;第 5 章采用概率统计方法设计自修复飞控系统的故障检测隔离方案;第 6 章,综合间接自适应飞控系统和故障检测隔离算法对推力矢量飞行器进行自修复仿真验证,并分析仿真结果;第 7 章以自修复飞控系统为基础,提出了舵面优化配置算法,可解决飞行器多舵面冗余配置的问题;第 8 章,分析了作者在燃料电池汽车能量控制方面所做的工作,分析了两种工程动力系统能量控制算法的优劣;第 9 章,分析燃料电池混合动力构型汽车特点,列举已有的能量管理算法,采用基于遗传模拟退火算法进行能量优化分配,仿真显示算法



在燃油经济性方面优于其他已有算法。

本书概括了在博士与博士后期间研究课题的主要内容,对我国动力机械在飞行器与汽车方面发展方向上的几种关键控制理论与技术进行深入探索,将一定量的研究成果汇总成书。研究课题得到了国家 863 计划、航空科学基金等项目资助,同时也综合了国内外在该领域的重要研究成果和最新发展动态。可供有关科技人员参考。

由于水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

单位:航天空气动力技术研究院



目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究具有自修复功能的推力矢量飞行器自适应飞控系统 的意义	1
1.2 推力矢量技术	2
1.3 飞行器故障检测诊断系统	3
1.4 自适应飞控系统发展	6
1.5 具有自修复功能的推力矢量飞行器自适应飞控系统方案	11
1.6 能源短缺和环境污染是新型能源汽车出现的背景	13
1.7 燃料电池汽车	16
1.7.1 电动汽车发展	16
1.7.2 燃料电池汽车发展	17
1.7.3 燃料电池	18
1.8 燃料电池汽车混合动力构型	21
1.9 本书的安排	24
参考文献	26
第二章 具有自修复功能的推力矢量飞行器自适应飞控系统建模	28
2.1 系统功能	28
2.2 系统结构	28
2.2.1 驾驶指令输入模块 CIM	29
2.2.2 在线控制器设计模块 OCD	30
2.2.3 飞行器传感器测量处理模块 SMD	30



2.2.4 线参数辨识模块 OPI	31
2.2.5 故障检测和诊断模块 FDI	31
2.2.6 其他模块	32
2.3 系统硬件和软件配置方案	33
2.4 推力矢量飞行器的非线性运动	35
2.4.1 飞行器运动坐标系	35
2.4.2 推力矢量及其简化形式	35
2.4.3 气动力和力矩	36
2.4.4 常规舵面与矢量推力产生的合力矩	37
2.4.5 推力矢量飞行器非线性微分运动方程	37
2.5 带有舵面损伤故障的飞行器非线性气动模型	39
2.5.1 无故障飞行器非线性气动模型表达式	39
2.5.2 舵面损伤系数 $k\%$ 的数学模型	40
2.6 发动机模型	44
2.7 飞行器的作动器模型	45
2.8 飞行器的传感器模型	45
2.9 龙格库塔数值积分方法	46
参考文献	47
第三章 推力矢量飞行器重构自适应控制	49
3.1 故障重构控制技术发展	49
3.2 故障重构控制方法及方案	50
3.3 逐点线性化后退区间优化控制	56
3.3.1 最优二次型控制	56
3.3.2 后退区间优化控制	57
3.3.3 逐点线性化	59
3.3.4 逐点线性化后退区间优化控制稳定性和鲁棒性分析	62
3.4 飞行器非线性运动方程逐点线性化	68
3.4.1 故障和无故障条件下包含推力矢量的飞行器非线性运动方程	68



3.4.2 飞行器运动方程非线性项的逐点线性化	73
3.4.3 飞行器非线性运动方程逐点线性化后的线性方程	80
3.5 飞行器增广运动方程模型	87
3.5.1 作动器模型	87
3.5.2 包含作动器模型的飞行器增广运动方程模型	88
3.6 状态预测模型	90
3.6.1 模型跟随方法	90
3.6.2 跟随模型	91
3.6.3 模型预测与飞行器运动方程联合增广形式	92
3.7 RHO 优化控制解法	94
3.7.1 最优控制性能二次型指标	94
3.7.2 RHO 控制 RICCATI 方程	100
参考文献	103
第四章 实时飞行参数辨识	106
4.1 概述	106
4.2 自适应飞行控制系统辨识模型	107
4.3 稳定最小二乘辨识算法	110
4.3.1 最小二乘辨识算法及性质	110
4.3.2 最小二乘算法收敛性和稳定性	113
4.3.3 稳定最小二乘算法定义	116
4.3.4 稳定最小二乘算法性质	117
4.4 改进序列加权最小二乘辨识	122
4.4.1 改进序列加权最小二乘辨识算法	122
4.4.2 MSLS 算法限制参数选取	125
4.4.3 MSLS 辨识算法稳定性和收敛性分析	127
4.5 辨识过程中激励信号处理	130
4.5.1 数字滤波	130
4.5.2 飞行器故障情况下激励弱信号处理	131
4.6 总结	132



参考文献	132
第五章 舵面故障检测隔离技术	134
5.1 飞控系统故障检测和诊断技术方法	134
5.1.1 基于数学模型方法	134
5.1.2 基于输入输出信号处理的方法	136
5.1.3 基于人工智能的故障检测和诊断	136
5.1.4 多模型匹配方法	138
5.1.5 综合诊断技术	139
5.2 舵面损伤故障检测隔离方法	141
5.2.1 全局检测残差产生	142
5.2.2 全局检测残差的故障值	147
5.3 舵面故障残差统计概率检测	149
5.3.1 二元假设检测	149
5.3.2 传感器信息融合	153
5.3.3 舵面损伤故障残差判决	155
5.4 结论	164
参考文献	165
第六章 综合仿真与分析	167
6.1 低空亚音速情况下升降舵完全失效	167
6.1.1 仿真条件和目的	167
6.1.2 间接自适应飞行控制	168
6.1.3 故障检测隔离	173
6.1.4 MSLS 辨识	176
6.1.5 结论	179
6.2 中空超低速情况下左升降舵损伤 50%	180
6.2.1 仿真条件	180
6.2.2 间接自适应飞行控制	180
6.2.3 故障检测隔离结果	183
6.2.4 辨识仿真结果	185



6.2.5 仿真结论	189
6.3 结论	189
参考文献	190
第七章 多操纵面气动布局舵面配置	192
7.1 研究背景	192
7.2 多操纵面气动布局舵面配置的基本概念	193
7.3 操纵效能与控制冗余指标	194
7.3.1 舵面配置系统模型	194
7.3.2 基于故障舵面进行重构控制的概念	195
7.3.3 控制效能的定义	196
7.3.4 操纵效能算法	197
7.4 操纵效能算例	200
7.4.1 飞行器舵面配置方案	200
7.4.2 除方向舵以外独立舵面配置的操纵效能	201
7.4.3 V型垂尾布局各种舵面配置的操纵效能	206
7.5 本章总结	208
参考文献	209
第八章 燃料电池混合动力系统客车	211
8.1 燃料电池混合动力系统性能考核	211
8.1.1 试验目标	211
8.1.2 测试环境	211
8.1.3 燃料电池混合动力系统构成	214
8.1.4 整车控制算法	217
8.1.5 试验考核结果和分析	222
8.2 燃料电池整车性能	227
8.2.1 燃料电池整车混合动力系统的匹配	227
8.2.2 整车控制算法	228
8.3 小结	236
参考文献	236



第九章 燃料电池能量管理策略	238
9.1 燃料电池能量管理研究现状	238
9.2 燃料电池混合动力汽车仿真数据与模型	240
9.3 恒压控制	241
9.3.1 恒压控制算法	241
9.3.2 恒压控制仿真	243
9.4 功率跟随能量控制	247
9.4.1 SOC 恒定的功率跟随控制算法	247
9.4.2 功率跟随控制仿真	249
9.5 恒温功率控制	255
9.5.1 恒温功率控制原理	255
9.5.2 恒温功率控制仿真	256
9.6 混合遗传模拟退火能量优化控制	260
9.6.1 能量优化分配策略模块	260
9.6.2 目标函数	260
9.6.3 混合遗传退火算法优化	266
9.6.4 混合遗传模拟退火算法对目标函数的优化 MAP 图	272
9.6.5 能量优化分配策略仿真	274
9.7 结论	279
参考文献	280



第一章 绪 论

1.1 研究具有自修复功能的推力矢量飞行器自适应飞控系统的意义

推力矢量技术是下一代飞行器必备技术之一,可使飞行器性能得到很大提高,飞行包线得到极大扩展,在改善飞行器短距起降性能、增加飞行器大迎角机动,提高舵面冗余操纵性方面发挥很大作用^[1,2]。

虽然推力矢量飞行器的出现使飞行器性能得到提高,但也为飞控系统的设计带来一定的困难。推力矢量使飞行包线得到扩展,使飞行器能在大迎角过失速状态下飞行,但相比在常规条件下,飞行器产生了更严重的非线性气动耦合现象,而工程上采用的 PID 控制只适合飞行包线内小扰动线性条件,因此需要一种全新的控制系统,它能在线适应扩展包线中出现的严重非线性气动耦合情况,满足推力矢量飞行器在极端飞行状态下的控制要求。自适应控制系统将是下一代飞行器飞控系统发展的方向,因为它能解决推力矢量飞行器在不同飞行条件下的控制要求。

现代飞控系统的设计非常复杂,且使用的软硬件都是一些综合性强的子系统,在飞行器的寿命周期内不可避免的要发生某些故障,影响飞控系统的性能,飞控系统设计的可靠性和可维修性问题已经成为下一代飞行器设计的发展方向^[3,4,5]。

从最初飞控系统到现代飞控系统,均采用硬件多余度配置方法和鲁棒控制器方法来达到足够的可靠性^[6,7,8]。硬件多余度配置方



法会使系统组件和结构变得复杂化,飞控系统平均故障间隔时间降低,而寿命周期费用增加,对飞行器安全可靠是一个潜在的威胁。鲁棒控制律设计虽可在一定限度内适应系统参数摄动,但当机体或部件出现较大的损伤,系统结构发生变化时,鲁棒控制律将无法满足不同飞行性能要求。

可维修性定义为当系统或组成系统的某部分出现故障时,系统应能重新组织余下完好的部分,并在不降低性能指标的情况下继续承担任务。这种系统冗余需要复杂的重构控制率作为基础,但它不会占用更多的硬件资源,因此国外对自修复飞控系统的研究非常重视,正处于试飞验证阶段,并取得了一定的进展。

自适应飞控系统概念提出,就是要增强飞行器对各种飞行状态下控制的鲁棒性,它要求在飞行包线不同的操纵区内、舵面或机体损伤情况下,以及在一些突变和渐变的事件中,飞行器都能提供一定的适应能力,能使飞行器在故障状态下完成一定的飞行品质要求。具有自修复功能的推力矢量飞行器自适应飞控系统可以满足上述要求,能实现对无故障飞行器的鲁棒控制,也可以实现对飞行器较大故障的重构控制,它利用飞行器在线飞行数据实现在线建模,通过在线故障检测和参数辨识方法获得飞行器故障信息,能协调推力矢量和其他操纵面之间的关系,发挥推力矢量作为冗余操纵面的能力,实现飞控要求。这将会降低了飞行器寿命周期费用,提高飞行器的生存性,减轻了驾驶员的负担,因此有重要的研究意义。

1.2 推力矢量技术

目前国外在积极进行推力矢量控制的研究,如何将推力矢量控制综合到飞控系统中,是飞行控制的一个前沿课题。它涉及对推力系统和飞行动力系统的研究,包括对发动机、尾喷管、进气道、气动布局、操纵舵面等概念的重新设计,将推力矢量作为冗余操纵面参与飞行控制,对提高飞行器的机动性、可靠性和生存性有重大的意义。国



外对推力矢量提高飞行器机动等性能进行了大量的研究,它有如下四种优点:

- 可以改善起飞降落性能(STOD)。经验证 F-15S/MTD 加装推力矢量后,起飞距离和降落距离比未加装推力矢量时分别缩短了 38% 和 60%,甚至可实现垂直起降,提高了战时飞行器的生存能力。

- 推力矢量可实现飞行器在失速大迎角条件下飞行,拓宽了飞行器飞行包线,开创了飞行器战术应用的新领域,象眼镜蛇机动、郝勃斯特机动等都是飞行器在大迎角下应用推力矢量作出的最典型的机动动作。近距格斗模拟中,加装了推力矢量的验证机 X-31 与常规飞行器 F-18 在不限制飞行迎角的条件下,X-31 的获胜率为 91%;而不加装推力矢量的 X-31 与 F-18 在限制飞行迎角小于 30° 的条件下,其获胜率仅为 15%。另外,推力矢量在飞行器尾旋的改出方面可起到重要作用,这充分利用了矢量喷管在失速大迎角下的控制能力,而此时垂尾的操纵能力几乎全部丧失^[1]。

- 推力矢量可以代替常规气动面和控制面产生力和力矩,对操纵系统形成冗余,有利于提高飞行的可靠性和机动性,也可产生偏航或滚转角加速度,增强机动性,同时也可增加升力系数,减少阻力系数。由于在操纵控制上的冗余,可以对一定飞行条件下的推力或推力偏角进行优化。当舵面或作动器故障时,推力矢量是提供控制律重构的一种选择方案,将故障部分的力和力矩转移到其他舵面和推力矢量中。

- 加装推力矢量的飞行器可以部分或全部代替平尾和垂尾的功能,从而减小尾翼面积,甚至在气动布局上形成无尾飞行器,不但减轻了飞行器重量,而且具有较小的雷达反射面积(RCS),具有良好的隐身效果^[2]。

1.3 飞行器故障检测诊断系统

美国空军飞行动力学试验室 1984 年开始实施自修复飞控系统计



划,从此开始了自修复飞控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,到九十年代中期,故障检测的重点在基于模型的信息处理算法。等价空间法和检测滤波器法有较好的实时性并能广泛适应于各类故障形式,如飞控传感器故障、作动器和舵面损伤故障。1985年 Alphatech 公司 Jerold L. Weiss 等人开发的等价空间法成功地检测出 C-131H 机型的平尾损伤故障,该公司开发的故障检测算法已于 1989 年使用 F-15 改装验证机进行了进一步试飞验证。采用以知识处理为基础的人工智能故障检测等新理论,成为自修复综合故障检测的发展趋势,九十年代出现了应用神经网络或模糊逻辑对 F-16 与 F-18,专家系统对 B-737 等的机型的飞控系统故障检测研究。

自修复飞控系统故障检测与隔离技术涉及到多门学科知识,其主要特点有:一是实时性,要求在飞行器未出现严重失控前迅速查出故障。由于飞控系统的鲁棒性设计,飞行器不受小故障影响,而对较严重的故障也能延迟恶化时间,因而自修复故障实时检测主要是针对较强的故障形式;二是可靠性,要求算法有较小的虚警率和漏报率,不能发散,要能适应较宽的故障范围。

自修复飞控系统通常由故障检测与隔离,重构飞控系统,自主式维修诊断和主动告警这四部分组成。结构如图 1.3.1 所示:

(1)故障检测、隔离与估计系统(FDIE: Failure Detection, Isolation and Estimation System)

(2)可重构飞控系统(RFCS: Reconfigurable Flight Control System)

(3)自主式维修诊断系统(AMDS: Automated Maintenance Diagnostic System)

(4)驾驶员主动告警(PAS: Pilot Alert System)

• 故障检测、隔离与估计系统(FDIE)是自修复飞控系统的核心,可实现对作动器、操纵面、飞行传感器、以及电源系统和液压系统等辅助系统的故障进行处理。每一步采样时,FDIE 对采样进行处理,与无故障模型进行对比,产生残差序列从而发现故障征兆,并进