



# 航空动力系统 滑模控制

肖玲斐 著

Sliding Mode Control for  
Aerospace Power System



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

# 航空动力系统 滑模控制

肖玲斐 著

Sliding Mode Control for  
Aerospace Power System



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

航空动力系统滑模控制 / 肖玲斐著. —杭州: 浙江大学出版社, 2018. 3  
ISBN 978-7-308-16966-0

I. ①航… II. ①肖… III. ①航空—动力系统—控制—研究 IV. ①V228

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 126775 号

## 航空动力系统滑模控制

肖玲斐 著

---

责任编辑 王 波  
责任校对 汪淑芳  
封面设计 续设计  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 杭州中大图文设计有限公司  
印 刷 虎彩印艺股份有限公司  
开 本 710mm×1000mm 1/16  
印 张 10  
字 数 174 千  
版 次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-16966-0  
定 价 32.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbss.tmall.com>

本书由 中央高校基本科研业务费专项资助资金  
(No.NS2016027) 资助出版

## 内容简介

本书深入浅出地介绍了滑模控制理论及方法在航空动力系统中的应用。本书第1章介绍航空动力系统的历史和发展及其主要控制理论与方法,第2章介绍航空发动机控制系统数学模型,第3章介绍基于线性滑模面的航空发动机滑模控制,第4章介绍基于积分滑模面的航空发动机滑模控制,第5章介绍基于高阶滑模面的航空发动机滑模控制,第6章介绍基于终端滑模面的航空发动机滑模控制,第7章介绍基于滑模观测器的航空发动机控制系统设计,第8章介绍航空动力系统其他部件的滑模控制。

本书可作为航空航天、自动化、能源与动力相关领域从事系统建模、控制、分析与设计等研究与应用工作的科研人员、工程技术人员和高等院校相关专业的教师、高年级本科生、硕士生和博士生的参考书。

# 前 言

航空动力系统向飞机提供向前运动的推力,为飞机的升空提供必要的速度,其最主要的部分是航空发动机。随着各国经济和科技的发展,人们对航空动力系统控制性能的要求也越来越高,这无疑增加了航空动力系统的控制难度。

滑模控制方法由于其变结构的自身特征,对参数摄动及外干扰等不确定因素具有良好的鲁棒性,同时算法结构相对简单,容易实现,因此受到控制领域越来越多的关注。

目前我国航空航天事业发展迅猛,高校航空航天类专业学生及科研人员规模不断扩大,对航空航天类专业相关书籍的需求旺盛。鉴于此,本人通过总结多年的教学经验与科研成果,针对航空动力控制系统,以滑模控制理论和方法为主线,撰写了本书。

本书主要以航空发动机为对象,研究多种滑模控制设计方法,并开展了仿真验证工作。具体包括:首先,介绍航空发动机的建模方法和数学模型,为后续的研究提供基础;其次,先后基于线性滑模面、积分滑模面、二(高)阶滑模面和终端滑模面设计了不同的航空发动机滑模控制器;最后,针对航空发动机状态不完全可测问题,研究了滑模观测器的设计方法。此外,本书还以航空发动机燃油控制系统和磁悬浮轴承转子系统为对象,介绍滑模控制在航空动力系统其他部件中的应用情况。

本人衷心地感谢我的老师、同仁、学生和家人,感谢你们对本书撰写提供的

帮助和支持。

在本书的编辑出版过程中,浙江大学出版社的许多工作人员付出了辛勤的劳动,本人在此一并表示感谢。

限于本人能力,本书难免有不足甚至错误之处,恳请读者和各界专家学者批评指正。

肖玲斐

2017年9月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 航空动力系统的历史和发展 .....	1
1.2 航空发动机控制系统发展 .....	2
1.3 航空发动机控制系统要求 .....	3
1.4 航空动力系统在现代控制理论与方法 .....	4
1.4.1 线性二次型最优控制 .....	4
1.4.2 鲁棒控制 .....	5
1.4.3 自适应控制 .....	5
1.4.4 预测控制 .....	6
1.4.5 智能 PID 控制 .....	7
1.4.6 滑模控制 .....	7
1.5 本书结构 .....	9
第 2 章 航空发动机控制系统数学模型 .....	11
2.1 引 言 .....	11
2.2 航空发动机非线性部件级模型建立 .....	12
2.2.1 涡轴发动机各个部件模型 .....	14
2.2.2 涡轴发动机稳态模型 .....	22
2.2.3 涡轴发动机动态模型 .....	24
2.3 航空发动机线性状态空间模型建立 .....	26
2.3.1 基于非线性部件级模型线性化建立发动机线性模型 .....	27



2.3.2 基于各部件线性化构成发动机简化线性模型 .....	30
2.4 本章小结 .....	33
<b>第3章 基于线性滑模面的航空发动机滑模控制 .....</b>	<b>34</b>
3.1 引言 .....	34
3.2 滑模控制理论简介 .....	35
3.2.1 滑动模态 .....	35
3.2.2 滑模控制器一般结构 .....	37
3.2.3 线性滑模控制器设计要求 .....	39
3.2.4 线性滑模面设计方法 .....	39
3.2.5 滑模控制抖振问题 .....	42
3.3 基于趋近律的航空发动机滑模控制 .....	44
3.3.1 基于指数趋近律的滑模控制 .....	44
3.3.2 基于PVC趋近律和PID趋近律的滑模控制 .....	52
3.4 本章小结 .....	59
<b>第4章 基于积分滑模面的航空发动机滑模控制 .....</b>	<b>60</b>
4.1 引言 .....	60
4.2 基于常规积分滑模面的航空发动机滑模控制 .....	60
4.2.1 航空发动机常规积分滑模控制器设计 .....	60
4.2.2 仿真验证 .....	62
4.3 基于二次积分滑模面的航空发动机滑模控制 .....	70
4.3.1 航空发动机二次积分滑模控制器设计 .....	70
4.3.2 仿真验证 .....	73
4.4 本章小结 .....	79
<b>第5章 基于高阶滑模面的航空发动机滑模控制 .....</b>	<b>80</b>
5.1 引言 .....	80
5.2 高阶滑模控制方法简介 .....	82
5.2.1 高阶滑模的定义 .....	82
5.2.2 二阶滑模控制 .....	82
5.2.3 任意阶滑模控制 .....	83

5.2.4	鲁棒精确微分器 .....	83
5.3	基于二阶滑模面的航空发动机控制器 .....	84
5.3.1	航空发动机二阶滑模控制器设计 .....	84
5.3.2	仿真验证 .....	84
5.4	基于任意阶滑模面的航空发动机控制器 .....	93
5.4.1	航空发动机任意阶滑模控制器设计 .....	93
5.4.2	仿真验证 .....	93
5.5	二阶滑模控制与任意阶滑模控制对比分析 .....	101
5.6	本章小结 .....	102
<b>第 6 章</b>	<b>基于终端滑模面的航空发动机滑模控制 .....</b>	<b>103</b>
6.1	引 言 .....	103
6.2	非奇异终端滑模控制器 .....	104
6.2.1	航空发动机非奇异滑模控制器设计 .....	104
6.2.2	仿真验证 .....	105
6.3	五种滑模控制方法对比研究 .....	112
6.4	本章小结 .....	114
<b>第 7 章</b>	<b>基于滑模观测器的航空发动机控制系统设计 .....</b>	<b>115</b>
7.1	引 言 .....	115
7.1.1	全维状态观测器 .....	115
7.1.2	滑模状态观测器 .....	116
7.2	基于 Utkin 滑模观测器的航空发动机滑模控制系统设计 .....	116
7.2.1	Utkin 滑模观测器设计 .....	116
7.2.2	带 Utkin 滑模观测器的滑模控制系统设计 .....	117
7.2.3	仿真验证 .....	118
7.3	基于 Walcott-Zak 滑模观测器的滑模控制系统设计 .....	122
7.3.1	Walcott-Zak 滑模观测器设计 .....	122
7.3.2	带 Walcott-Zak 滑模观测器的线性滑模控制系统设计 .....	123
7.3.3	航空发动机控制仿真验证 .....	123
7.4	本章小结 .....	127

第 8 章 航空动力系统其他部件滑模控制 .....	128
8.1 引 言 .....	128
8.2 航空发动机燃油系统滑模控制 .....	128
8.3 磁悬浮轴承转子系统微分滑模控制 .....	131
8.3.1 五自由度磁悬浮转子系统模型 .....	131
8.3.2 微分滑模面设计 .....	132
8.3.3 含干扰估计的状态观测器设计 .....	133
8.3.4 输出反馈微分滑模控制器设计 .....	134
8.3.5 稳定性分析 .....	135
8.3.6 仿真验证 .....	138
8.4 本章小结 .....	141
参考文献 .....	142

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 航空动力系统的历史和发展

航空动力系统由飞行器上的发动机、进气和排气装置等组成,有的航空动力系统还包括螺旋桨,其中发动机是动力系统的主要组成部分,进气装置常称为进气道,排气装置常称为尾喷管。航空动力系统是飞行器的动力源,用于产生飞行器飞行所需要的推力或力矩,常被比喻为飞行器的心脏,是飞机性能的决定因素之一。航空动力系统通过控制系统控制发动机的工作状态来改变推力或功率,借此满足飞行器在不同飞行条件以及工作状况下的要求,发动机控制系统常被比喻为动力系统的神经中枢<sup>[1-9]</sup>。

航空发动机将燃料的热能或其他形式的能转变为机械能,它的性能是决定飞行器性能的主要因素之一。飞机的飞行速度、飞行高度、航程、载重量和机动作战能力的提高,在很大程度上取决于发动机的改进和发展。现代航空发动机具有推重比大,迎风面积小,起动、加速快,适应机动飞行,使用维修简便,工作可靠等优点。军用飞机发动机主要有用于战斗机/攻击机、教练机/轻型攻击机的发动机和巡航导弹、靶机及其他遥控飞行器用的短寿命发动机<sup>[2]</sup>。

不断提高飞机性能的要求,刺激着发动机技术的发展。到 20 世纪 30—40 年代,活塞式发动机技术已发展到很高的水平,但是它的进一步发展受到自身工作方式的严酷限制,不能满足进一步提高飞行速度的要求。因为飞机要求的功率随飞行速度的 3 次方增长,且活塞发动机重量也随功率的 3 次方增长,则发动机重量随飞行速度的 9 次方增长,当飞行速度超过某限值后,发动机的重

量将使飞机不能承受<sup>[3]</sup>。20世纪40年代初,英国和德国先后发明了燃气涡轮发动机,在到21世纪初的短短的60多年,航空动力技术进步巨大,对航空工业的迅猛发展起到了关键性的作用,飞机每一个大的飞跃都与动力的更新换代密切相关<sup>[2]</sup>。自20世纪40年代至21世纪初,军用发动机大致经历了从涡喷到涡扇发动机的4次更新换代,其中第一代已全部退役;第二代除英、美外其他国家还在部分使用;第三和第四代为世界各国现役主战机种的动力装置。第四代发动机具有高推重比、小涵道比、高增压比、高涡轮进口温度、结构简单可靠、耐久性和可维护性好及低寿命期费用等特点。民用飞机的动力装置同样经历了从涡喷到涡扇发动机的发展过程,现在涡扇发动机已成为民用大型干线客机和新型支线客机的主要动力装置。目前,民用大涵道比涡扇发动机相比于早期的涡喷发动机,在性能、经济性、安全可靠、噪声和污染排放等指标上均有了很大提高<sup>[4]</sup>。

今后,世界航空发动机技术将呈加速发展的态势,向高推重比、高速度、宽使用范围、高可靠性和适用性、低油耗、低噪声、低污染、低成本的方向发展<sup>[5]</sup>。

## 1.2 航空发动机控制系统发展

现代航空发动机一般为燃气涡轮式发动机,主要包括涡喷发动机、涡扇发动机、涡轴发动机和涡桨发动机。随着飞机和发动机性能的不不断提高,航空发动机控制系统也已逐步由20世纪40年代的简单液压机械式控制系统发展为现代的全权限数字式电子控制(Full Authority Digital Electronic Control, FADEC)系统,从单变量控制发展为多变量控制,从推进系统独立控制向飞机一推进系统综合控制发展,并进一步由集中式控制向分布式控制发展。例如,早期的J17涡喷发动机通过控制燃油流量这一个变量来保证系统的稳定工作,对于这种系统,液压机械控制器可以完全控制,且其工作较为可靠;而后的F100加力涡扇发动机具有七个控制变量,借助计算机产业的迅猛发展,采用了具有较强功能的数字电子控制装置<sup>[5-8]</sup>。

自20世纪90年代,世界先进工业国家已经完成了航空发动机控制系统从液压机械控制向数字电子控制的技术转变,21世纪初美国在飞机猛禽F22上的发动机F119-PW-100上安装了第4代FADEC系统。现今,航空发动机FADEC系统的研究和验证工作仍在先进工业国家持续进行。

在 FADEC 系统中,航空发动机的所有控制功能全部由数字式电子控制器负责,除此它还负责 FADEC 系统的容错控制、故障诊断和发动机的状态监测,以提高控制系统的稳定性和可靠性。数字式控制器具有计算精度高、逻辑功能强、运算速度快等良好特性,使得 FADEC 系统提高了系统的控制精度,实现了复杂规律控制,提高了可靠性,其灵活性可设计出最佳控制规律,降低研制成本,缩短研制周期<sup>[1,6]</sup>。

为满足日益严格的航空发动机控制需求,控制系统设计必须采用新的方法和技术来达到这些要求,其中应用现代控制理论和先进控制算法是一个重要方面。例如,以 F119 发动机为典型代表的现代先进发动机控制系统,采用了机载自适应实时优化控制、主动控制、容错控制、健康管理、延寿控制等先进的发动机控制方法与技术。

为了不断满足发动机发展的需求,未来控制系统的发展目标是提高性能,减轻重量,耐恶劣环境能力加强,提高可靠性和维护性,因此控制系统将向综合化和智能化方向发展<sup>[5]</sup>。经过众多专家学者多年的探索,国际上对航空发动机控制系统的发展方向给出以下几点指引和建议<sup>[7]</sup>:

- (1) 提高发动机的性能。使航空发动机获得更加优异的动力性能。
- (2) 改善发动机安全可靠。在获得优异动力性能的同时,使发动机运行更加安全可靠,降低事故发生率。
- (3) 延长使用年限。在考虑提升发动机可靠性的条件下增加它的工作年限,延长返厂大修周期。
- (4) 基本不改变硬件余度。使发动机的硬件余度结构不过于复杂,不为发动机的运行增加额外负担。
- (5) 缩短研制、生产周期。研制生产过程更加程式化,提高生产效率。
- (6) 降低制造、维修的成本。在不降低发动机性能的条件降低成本。
- (7) 提高 FADEC 的技术水平。应用微电子技术的最新科研成果,尝试将新的、优异的控制技术应用于控制系统,使控制系统研发保持一个良好成长空间。

### 1.3 航空发动机控制系统要求

航空发动机控制的目标是在整个飞行包线内提供可靠和稳定的工作,需要

在发动机的各个机械设计限制、气动热力限制之内,提供保证飞机各种工作状态所需要的控制量,适当调节一些可变几何参数,从而得出安全的发动机性能,并且迅速响应。

对于航空发动机控制系统的要求,主要有以下几点:

(1) 稳定性良好,任何控制系统都必须稳定,即在飞行条件发生变化或受到干扰时,始终能按照预定的规律保持稳定状态或能迅速恢复到原始状态;

(2) 动态品质良好,发动机工作状态过渡时,能快速操纵,过渡时间短,且不超温、不超转、不喘振、不熄火;

(3) 控制精度高;

(4) 便于调整,移植性好;

(5) 容错性强,可靠性高,且便于维护。

## 1.4 航空动力系统在现代控制理论与方法

航空动力系统向飞机提供向前运动的推力,为飞机的升空提供必要的速度,包括发动机、动力辅助装置等,最主要的部分是航空发动机。随着航空发动机的不断改进与提高,过去液压机械式的发动机控制系统很难满足人们对发动机控制系统日益增长的性能需求。近年来,伴随着航空发动机全权限数字电子控制研究的迅速发展,很多现代先进控制理论与方法在航空动力系统中得到广泛关注与深入研究,如线性二次型最优控制、鲁棒控制、自适应控制、预测控制、智能 PID 控制、滑模控制等。

### 1.4.1 线性二次型最优控制

对于早期的单输入单输出系统,完全可以采用经典控制理论进行设计,并且可以取得良好的控制效果,但是随着计算机技术的进步和航空发动机控制变量的增多,经典控制理论已经不能满足要求,相对而言,多变量控制系统得以迅速发展。现代控制理论的一些方法已经成功运用到航空发动机控制中。线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)是航空发动机多变量控制中最先出现的研究方法。美国飞行研究实验室(现为美国技术研究中心)首次在发动机控制器设计中采用了 LQR 多变量控制技术。美国空军莱特航空试验室(现为空军研究实验室)于 1973 年开始将这一技术应用到 J85 发动机上,并从

1975年到1978年,和NASA刘易斯实验室共同研制多变量控制,在LQR控制器中加入简单的过渡态逻辑技术和极值参数限制技术,有效地实现了大过渡态控制,研制的多变量数字电子控制器装备用在F-15飞机上的F100发动机上,并在美国航天局高空试验台上成功验证,促进了以高度综合数字电子控制为核心,包括综合飞行推进控制、发动机自适应控制、发动机延长寿命控制和进气道一体化控制在内的综合控制技术的发展<sup>[9]</sup>。

### 1.4.2 鲁棒控制

航空发动机对于控制来说是比较特殊的对象,其不仅是多输入多输出系统,结构复杂,而且还具有一定程度的不确定性。想要确保航空发动机控制系统在整个飞行包线内都正常稳定工作且动、静态性能品质达标是一件不容易的事。

多变量控制中的鲁棒控制方法可以克服一定的系统模型误差,适用于像航空发动机这样复杂的难以精确建模的系统。与自适应控制相比,鲁棒控制无须自动调整控制器参数,只需使发动机对参数变化和外界干扰不敏感。采用鲁棒控制设计方法,当系统受到外界干扰或内部参数变化时,发动机仍能保持良好的稳定性和动态特性。

鲁棒控制方法包括LQG/LTR控制理论、 $H_{\infty}$ 控制理论等。国外针对GE21、F100、T700等发动机开展过线性二次高斯控制/回路传递恢复控制(linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery, LQG/LTR)研究<sup>[10-13]</sup>,针对Spey MK202、RM12等开展过 $H_{\infty}$ 控制的研究<sup>[14-16]</sup>。20世纪90年代后,国内也出现了许多航空发动机多变量鲁棒控制研究报告,航空发动机多变量鲁棒控制研究的理论水平和先进国家差距较小,由于试验设备和条件的限制,试验研究和国外尚有差距<sup>[17-22]</sup>。

### 1.4.3 自适应控制

航空发动机在不同的飞行条件下工作,内部参数变化较大,使得特性相应发生变化。而自适应控制可以在被控对象和环境的数学描述不完全确定的情况下设计相应的控制,可以自动调整参数控制规律以达到指定的性能指标,自适应控制也已被应用于航空发动机的控制中<sup>[23-29]</sup>。

在国外,20世纪80年代就开始进行先进自适应控制策略在航空发动机上的应用研究,如美国在F-15战斗机发动机上开展自适应控制研究<sup>[23]</sup>。在国内,



文[24]提出了仅利用输入输出测量值的多变量模型参考自适应分散控制方案,并将该方案应用于双转子涡喷发动机控制系统,其参数调节律也是比例—积分型。文[25]研究了神经网络自适应控制方法及其在航空发动机控制中的应用。文[26]提出了一种基于相似理论的航空发动机自适应 PID 控制和航空发动机自校正控制方案。文[27]基于神经网络获得了飞行状态与自适应律参数之间的映射关系,建立了能够根据发动机工作条件而自我调节的智能调节机构,从而设计出一种航空发动机多变量自适应控制系统。文[28]以航空发动机为研究对象,采用数字仿真与实物在回路仿真试验相结合的方法,从工程实用的角度,对航空发动机开展模型参考自适应控制和基于自适应控制的神经网络补偿技术研究。文[29]针对涡轴发动机提出了一种模糊自适应 PI 控制方法。

#### 1.4.4 预测控制

预测控制是在工业实践过程中发展起来的一种基于模型的闭环优化控制策略,在实际复杂生产过程控制中,显示出较好的鲁棒性能和良好的应用效果<sup>[30]</sup>。随着计算机技术的飞速发展,预测控制的应用领域也迅速扩展到包括航空、航天在内的众多工程领域<sup>[31-37]</sup>。

以航空涡轴发动机为例,涡轴发动机控制系统的主要功能之一是保持直升机旋翼转速恒定,当旋翼总距发生较大变化时,一般的 PID 控制方法较难获得良好的动态性能。随着 FADEC 控制系统的日益发展,越来越多的科研人员尝试用各种先进控制方法设计发动机控制系统。文[32]通过原始高阶物理模型获得降价模型,设计了用于燃气轮机的非线性预测控制方法。文[33]在某实验室的燃气涡轮装置上进行了非线性预测控制实验。文[34]针对某军用发动机,基于简单的实时模型和扩张 Kalman 滤波器,设计了非线性预测控制器,实现了输出反馈控制。文[35]对涡轴发动机进行了非线性模型预测控制研究,但是基于神经网络建立的预测模型泛化能力有限,算法相对复杂,对实时性有一定影响。文[36]通过建立数值稳态非线性模型和 ARX(Auto Regressive eXogenous)动态线性模型相并联的涡轴发动机组合模型,基于多步输出预测和在线滚动优化,设计了非线性预测控制器,实现了当旋翼负载变化时,功率涡轮转速恒定,而且收敛速度快,稳态精度高,超调量小。文[37]针对涡轴发动机,建立了数值稳态非线性模型和 ARX 动态线性模型相串联的组合模型,并将其作为预测模型,设计了非线性预测控制器,由于优化求解控制器时避免了非线性规划问题,控制系统的实时性得以保证。