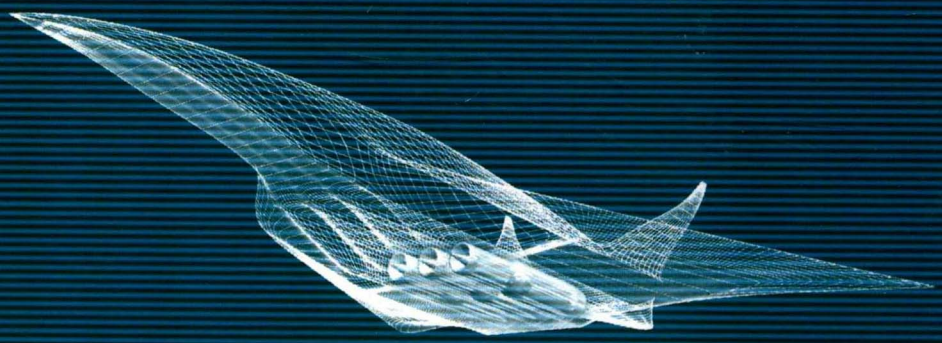
动力机械及工程热物理

国防科工委『十五』规划教材

航空发动机控制

（上册）

●樊思齐 主编



西北工業大學出版社
北京航空航天大学出版社　北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社　哈尔滨工程大学出版社

国防科工委“十五”规划教材.动力机械及工程热物理

航空发动机控制

（上册）

（元件部分）

樊思齐　主编

樊思齐　李华聪　樊　丁　等编著

西北工業大學出版社

北京航空航天大学出版社　北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社　哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书全面系统地阐述了航空发动机控制系统的理论、分析与设计方法。

全书分上、下两册。上册介绍航空发动机控制元件。下册讲述航空发动机控制系统，其内容分为两部分。第一部分介绍作为被控对象的各种类型的航空发动机及超声速进气道等的基本问题和控制规律；第二部分介绍航空发动机控制系统的分析与设计，以及超燃冲压发动机与控制的基本知识。其中，汲取了国内外近年来新的资料及研究成果，并结合科研实践，编入了大量的计算实例，每章后均有习题。

本书可作为高等院校航空动力与控制工程专业本科生教材，也可供相关专业研究生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机控制/樊思齐主编．—西安：西北工业大学出版社，2008.6

国防科工委"十五"规划教材．动力机械及工程热物理

ISBN 978-7-5612-2161-7

Ⅰ.航…　Ⅱ.樊…　Ⅲ.航空发动机—控制系统—高等学校—教材　Ⅳ.V233.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 131461 号

航空发动机控制(上册)

樊思齐　主编

责任编辑　王　璐

责任校对　杨丽云

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话：029-88493844

http://www.nwpup.com

陕西向阳印务有限公司印制　各地书店经销

开本：787 mm×960 mm　1/16

本册的印张：15.375　字数：328 千字

2008 年 6 月第 1 版　2008 年 6 月第 1 次印刷

印数：1～3 000 册

ISBN 978-7-5612-2161-7

定价：77.00 元(平装) 138.00 元(精装)　(上册)25.00 元(平装) 50.00 元(精装)

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

国防科工委“十五”规划教材编委会

（按姓氏笔画排序）

主　任：张华祝

副主任：王泽山　陈懋章　屠森林

编　委：王　祁　王文生　王泽山　田　莳　史仪凯
乔少杰　仲顺安　张华祝　张近乐　张耀春
杨志宏　肖锦清　苏秀华　辛玖林　陈光禡
陈国平　陈懋章　庞思勤　武博祎　金鸿章
贺安之　夏人伟　徐德民　聂　宏　贾宝山
郭黎利　屠森林　崔锐捷　黄文良　葛小春

总　序

国防科技工业是国家战略性产业，是国防现代化的重要工业和技术基础，也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来，在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下，国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中，取得了举世瞩目的辉煌成就；研制、生产了大量武器装备，满足了我军由单一陆军，发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要，特别是在尖端技术方面，成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术，使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备，使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路，建立了专业门类基本齐全，科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系，奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础；掌握了大量新技术、新工艺，研制了许多新设备、新材料，以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术，大大提高了国家的科技水平和竞争力，使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来，伴随着改革开放的伟大实践，国防科技工业适时地实行战略转移，大量军工技术转向民用，为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业，国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50 多年来，国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍，他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神，勇挑重担，敢于攻关，为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动，成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战，高等院校在培养国防科技人才，产生和传播国防科技

新知识、新思想，攻克国防基础科研和高技术研究难题当中，具有不可替代的作用。国防科工委高度重视，积极探索，锐意改革，大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具，但受种种客观因素的影响，现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平，不适应国防现代化的形势要求，对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况，建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系，国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量，在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上，以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者，对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审，评选出近200种教材和学术专著，覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者，他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等，具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中，国防特色专业重点教材和专著的出版，将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出，进入21世纪，我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标，对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展，提升国防实力，需要造就宏大的人才队伍，而教育是奠基的柱石。全面振兴

国防科技工业必须始终把发展作为第一要务，落实科教兴国和人才强国战略，推动国防科技工业走新型工业化道路，加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华，实现志向，提供了缤纷的舞台，希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识，树立正确的世界观、人生观、价值观，努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任，创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好，国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

前　言

在飞行包线内，航空发动机随着工作环境和工作状态的变化，其气动热力过程将发生很大的变化，航空发动机控制的目的就是使其在任何变化的条件下都能稳定、可靠地工作，并充分发挥发动机的性能效益。由于航空发动机工作过程复杂多变，因此对发动机控制问题的研究比一般控制系统更为困难，尤其是随着飞机性能的日益提高，对航空发动机提出了更高的要求；而高性能的航空发动机，其控制系统则需要应用新的控制理论进行设计。《航空发动机控制》一书正是针对研究这些问题而编写的。学习本书将为从事航空发动机控制领域的研究工作打下一定的理论基础。

全书分为上、下两册。上册讲述航空发动机控制元件，共5章。主要介绍油泵、敏感元件、执行元件、放大元件。由于控制元件的特性直接影响控制系统的性能，掌握控制元件的基本知识对设计满意的控制系统至关重要，因此本书对航空发动机控制元件作了较详细的介绍。下册讲述航空发动机控制系统，共10章。其中，第2～4章介绍作为被控对象的各种类型的航空发动机及超声速进气道和矢量喷管使用性能方面的基本问题和控制规律，以及实时与非实时、线性与非线性数学模型的建模方法，这部分内容是航空发动机控制系统研究与设计的基础；第5～10章作为本书的重点，介绍航空发动机控制系统的分析与设计，包括基于经典控制理论的机械液压式控制系统和基于现代控制理论的多变量控制系统、线性变参数(LPV)控制系统、飞行/推进系统综合控制、航空发动机全权限数字式电子控制系统，以及超燃冲压发动机与控制的基本知识。两册的内容构成了航空发动机控制系统的理论、分析与设计的完整体系。

本书内容涉及控制理论、流体力学、计算机原理及航空发动机原理等方面的知识，是综合性比较强的教材。

在编写过程中，为保证内容的先进性，我们参阅了代表本学科最新发展动态的国内外著作和文献，总结并吸收了作者近年来的科研成果；结合

科研实践编入了大量计算实例，以便于读者理论联系实际，融会贯通，举一反三，保证教材的实用性。在撰写中力求做到由浅入深、循序渐进、论述严谨、语言流畅、便于自学。

本书可作为航空推进系统控制理论与工程专业本科生教材，也可供该专业或有关专业研究生及从事航空发动机控制研究与设计的工程技术人员参考。

本书由樊思齐主编。上册第1章、第5章5.1至5.5节由樊思齐编写，第2,4章及第5章5.6节由李华聪编写，第3章由樊丁编写。下册第1章至第8章，第9章9.6节及第10章由樊思齐编写，第9章9.1至9.5节由樊丁编写，徐芸华编写了第2,3,5章的部分内容，孙护国、时瑞军、朱玉斌、任新宇分别参与了下册6.5节，6.6节和8.4节的编写。全书由樊思齐统一修改、定稿。

孟庆明教授、谢寿生教授对全书进行了审阅，提出了许多宝贵意见；吴丹、戚学锋、李吉等为本书的编写做了大量辅助工作，在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，希望读者指正。

作　者

2008年1月

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

上册目录

第1章　绪 论 …… 1

1.1　航空发动机控制元件研究的意义 …… 1

1.2　航空发动机控制元件的发展 …… 3

习　题 …… 4

第2章　油 泵 …… 5

2.1　概述 …… 5

2.2　柱塞泵 …… 6

2.3　齿轮泵 …… 25

2.4　旋板泵 …… 40

2.5　容积式油泵的特性和调节 …… 58

2.6　离心泵 …… 66

2.7　汽心泵 …… 87

习　题 …… 95

第3章　敏感元件 …… 97

3.1　概述 …… 97

3.2　机械式敏感元件 …… 98

3.3　电阻式传感器 …… 115

3.4　电感式传感器 …… 123

3.5　磁电式传感器 …… 127

3.6　热电偶传感器 …… 130

3.7　光电传感器 …… 134

3.8　光纤传感器 …… 136

习　题 …… 139

第4章　执行元件 …… 141

4.1　概述 …… 141

4.2　液压缸 …… 141

4.3　伺服电动机 …… 146

4.4 步进电动机 …… 154
习 题 …… 158
第5章 放大元件 …… 159
5.1 概述 …… 159
5.2 滑阀 …… 159
5.3 滑阀式液压放大器 …… 182
5.4 喷嘴-挡板阀 …… 193
5.5 喷嘴-挡板式液压放大器 …… 205
5.6 电液伺服阀 …… 209
习 题 …… 229
附录 …… 231
下册目录 …… 231
参考文献 …… 234

第1章 绪 论

1.1 航空发动机控制元件研究的意义

航空发动机控制系统由控制器与被控对象——航空发动机——构成。航空发动机控制器由控制元件与计算装置(对机械液压式控制系统)或数控计算机(对数字式电子控制系统)组成。航空发动机控制元件包括油泵、敏感元件、放大元件及执行元件等。

控制器的作用是在保证发动机安全可靠工作的前提下充分发挥发动机的性能。控制元件是控制器的基本组成部分,控制器的控制作用在很大程度上取决于控制元件的性能。因此,研究控制元件对航空发动机控制系统设计有着十分重要的意义。

1.1.1 油泵

航空发动机所应用的油泵包括燃油泵、液压泵和滑油泵。航空发动机控制系统所应用的油泵是燃油泵和液压泵,滑油泵是发动机滑油系统的主要组成元件。

1. 燃油泵

燃油泵是向发动机主燃烧室和加力燃烧室提供一定流量和一定压力燃油的油泵。燃油在燃烧室中通过燃烧将化学能转变为热能,并将一部分热能转变为推进功。因此,燃油泵是供给发动机能量使其产生推力的能源元件,发动机的性能与燃油泵的性能有密切关系。例如,发动机最大推力就与燃油泵能否以一定压力向燃烧室提供所需要的最大燃油量有关。高性能发动机需要流量大、压力高的高性能燃油泵。正因为如此,对燃油泵的研究,一直是航空发动机及其控制系统发展的关键技术之一。

2. 液压泵

液压泵的作用是向发动机可调尾喷口面积执行机构、风扇及压气机可调叶片角度执行机构提供一定流量的高压液压油,以推动执行机构快速运动,使可变几何面积快速响应。液压泵提供的液压油在满足一定流量要求的条件下,压力越高,执行机构响应越快。由于可变几何面积为发动机控制量,因此液压泵的性能对发动机控制系统性能有直接影响。

3. 滑油泵

滑油泵主要是向发动机轴承提供一定流量和一定压力的滑油,用于冷却并润滑轴承,将发动机高速旋转时在轴承处所产生的热量吸收,并通过滑油的流动而带走。滑油泵虽然不是发动机控制系统的组成部分,但它是保证发动机安全可靠工作的重要元件。

1.1.2 敏感元件

敏感元件也称测量元件或传感器。

航空发动机工作状态由发动机状态参数表征,例如发动机转速、有关截面压力或温度、压气机增压比、涡轮膨胀比或发动机压比等。确知发动机所处的状态必须感知有关的状态参数,这种感知状态参数的元件称为敏感元件。

为了实现对发动机控制,必须首先准确地测量到(即感知到)表征发动机状态的参数。无法准确地测量到发动机状态参数,就无从对发动机进行控制,因此敏感元件是确知发动机所处状态,并对发动机实施控制的重要环节。

为了保证控制系统的性能,敏感元件必须具有高的灵敏度、高的测量精度、高的可靠性和高的工作稳定性。由于对敏感元件要求如此之高,就使得敏感元件在发动机控制系统中成为最薄弱的环节,也即最容易产生故障的环节,对发动机数字式电子控制系统尤其如此。一旦敏感元件出现故障,控制器就无法获取信号,也就无法对发动机进行控制,而使发动机处于失控状态,这是非常危险的。为了避免这种情况的出现,在数字式电子控制系统中均采用余度技术来加以解决。余度技术包括硬件余度技术和解析余度技术。如果对同一被控参数采用2个以上传感器同时测量,则为传感器硬件余度技术;如果测量某一被控参数的传感器发生故障时,则可用测量其他有关参数的传感器测量的信号估计出这一参数值,并利用这一估计值对发动机进行控制,这种技术称为解析余度技术。

传感器在控制系统中占有非常重要的地位,传感器技术是控制系统的关键技术,先进的传感器技术往往是制约航空航天事业发展的瓶颈。

1.1.3 放大元件

将能量微弱的信号加以放大的元件称为放大元件。通常敏感元件输出的信号是微弱的力、位移或电流、电压信号,这些信号必须经过放大元件放大后,才能在控制系统中被利用。

在航空发动机机械液压式控制系统中,通常采用滑阀式液压放大器或喷嘴-挡板式液压放大器作为放大元件;在数字式电子控制系统中通常采用电液伺服阀、高速电磁阀、力矩马达以及各种类型的电子放大器作为放大元件。

放大元件必须对输入信号有足够的放大倍数,以使其输出有足够的能量或功率,必须具有对输入信号的快速响应能力,还应具有良好的稳定性、动态品质和稳态性能。放大元件是输入信号的放大环节,如果放大元件性能不好,将会对系统造成恶劣影响。放大元件的性能在很大程度上决定了控制系统性能。在控制系统设计时,对放大元件的设计是其中重要的一部分。

1.1.4 执行元件

执行元件是直接确定发动机尾喷口面积、风扇及压气机可调叶片角度、油门开关面积等控

制量大小的控制装置。

航空发动机控制系统常用的执行元件有液压缸、伺服电动机、步进电动机等。在进行控制系统的分析与设计时，执行元件常常作为放大元件的组成部分。

航空发动机控制系统执行元件必须满足工作稳定性要求，不受环境条件变化的影响，以保证高的控制精度；必须满足对输入信号的快速响应和无时间滞后要求；必须满足输出功率要求。

1.2 航空发动机控制元件的发展

为了提高发动机性能，必须应用先进的控制技术，而先进的控制技术是以先进的控制元件为基础的。因此，近十余年来许多国家为了在航空发动机上应用先进控制技术，首先对先进的控制元件进行大量的研究。

1.2.1 燃油泵

随着航空发动机推力的增加，要求燃油泵提供更大的燃油量，例如美国 F119 发动机，主燃油流量为 12 000 kg/h，加力燃油流量为 40 000 kg/h。随着燃油量的增加，油泵的体积与重量大大增加，这是高推重比发动机所不允许的。为此，采用轻质材料，提高油泵的转速，采用新的设计技术就成为燃油泵的发展方向。

用齿轮泵作为发动机主燃油泵的优点是流量大、体积小、可靠性高，齿轮泵出口压力可达到 10～12 MPa，最大流量为 10 000～15 000 kg/h。但齿轮泵是由发动机带动的定排量泵，油泵出口流量取决于发动机转速，而发动机所需要的燃油流量的调节是依靠调节回油量实现的。在高空低速飞行时，发动机仅需要很少的燃油流量，这就必须由回油阀将油泵出口的大量燃油再回流到油泵进口，这不仅是能量的耗损，而且大量回油使燃油温度迅速增加，降低了燃油冷却各部件的冷却效果。

变速变流量的齿轮泵是今后齿轮泵的发展方向，即齿轮泵不由发动机带动，而由大功率高速电动机带动，通过调节电动机转速来改变油泵转速，从而达到调节供油量的目的。由于油泵转速独立于发动机，更便于对供油量的控制，有利于控制性能的提高，此外大功率电动机还可作为发动机的起动动力，对发动机起动也是有利的。采用变速变流量的齿轮泵的困难在于大功率的电动机的体积与重量，它必须在可接受的范围。

采用离心泵作为主燃油泵和加力燃油泵的优点是结构简单、重量轻、油温温升小、可靠性高、流量大，其缺点是小流量时温升高、压力摆动大。新型离心泵采用整体式燃油泵和计量装置；各转动部件和静子采用耐高温复合材料；采用新型叶轮设计和封严技术；采用无刷直流马达作为驱动器。这些技术的应用，使离心泵能满足在全飞行包线范围内发动机从起动到最大状态的供油量和供油压力，最大燃油流量可以达到 30 000～40 000 kg/h，最大出口压力为

10 MPa,泵的重量减少 50%。

1.2.2 传感器

随着发动机性能要求的提高,控制系统越来越复杂,需要测量的发动机参数也越来越多,因此传感器数量大大增加。数字式电子控制系统需要采用传感器余度技术,这进一步使传感器数量成倍增加,使测量系统不仅变得复杂,而且重量也大为增加,这将影响发动机推重比的提高。为此,世界上许多国家将光纤传感器以及智能化传感器作为传感器的发展方向。光纤传感器重量轻、耐高温,不受电磁干扰影响,也有利于发展分布式控制。

1.2.3 执行元件

液压执行机构未来的发展方向是结构简单、采用耐高温的轻质材料,以减小体积和重量,能在 370℃以上的恶劣环境条件下可靠工作。当前液压电磁阀等执行机构还达不到这样的要求。

执行机构未来将采用电动执行机构。它是由电动机带动机械式滚珠丝杠或减速齿轮的旋转式执行机构,或是由电动机带动液压泵,再由液压泵提供动力。电动机采用开关式磁阻电动机,采用复合材料壳体、复合陶瓷轴承。

智能化执行元件也是执行元件今后的发展方向。

1.2.4 数字式电子控制器元件

随着发动机性能要求的提高,发动机被控参数越来越多,使控制系统回路、控制模式及控制算法越来越复杂,单一微处理器的计算能力已不能满足要求,为此需要发展新的途径。一种发展途径是应用多处理器并行处理技术和适用于并行处理的计算机信号,用并行处理方法完成复杂的计算。另一种发展途径是用砷化镓芯片代替常规硅芯片,以砷化镓为基础的集成电路的计算速度是硅芯片集成电路的 5 倍以上,并且它能有效地吸收光和反射光,因而还可以与光学总线一起工作。

习 题

1.1 航空发动机控制器包括哪些控制元件?它们在控制系统中各有什么作用?

1.2 在航空发动机控制系统中,控制元件应满足什么要求?

1.3 随着航空发动机的发展,对控制元件有什么新的要求?应如何发展?

试读结束,需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com