

Aircraft Engine Controls

Design, System Analysis, and Health Monitoring

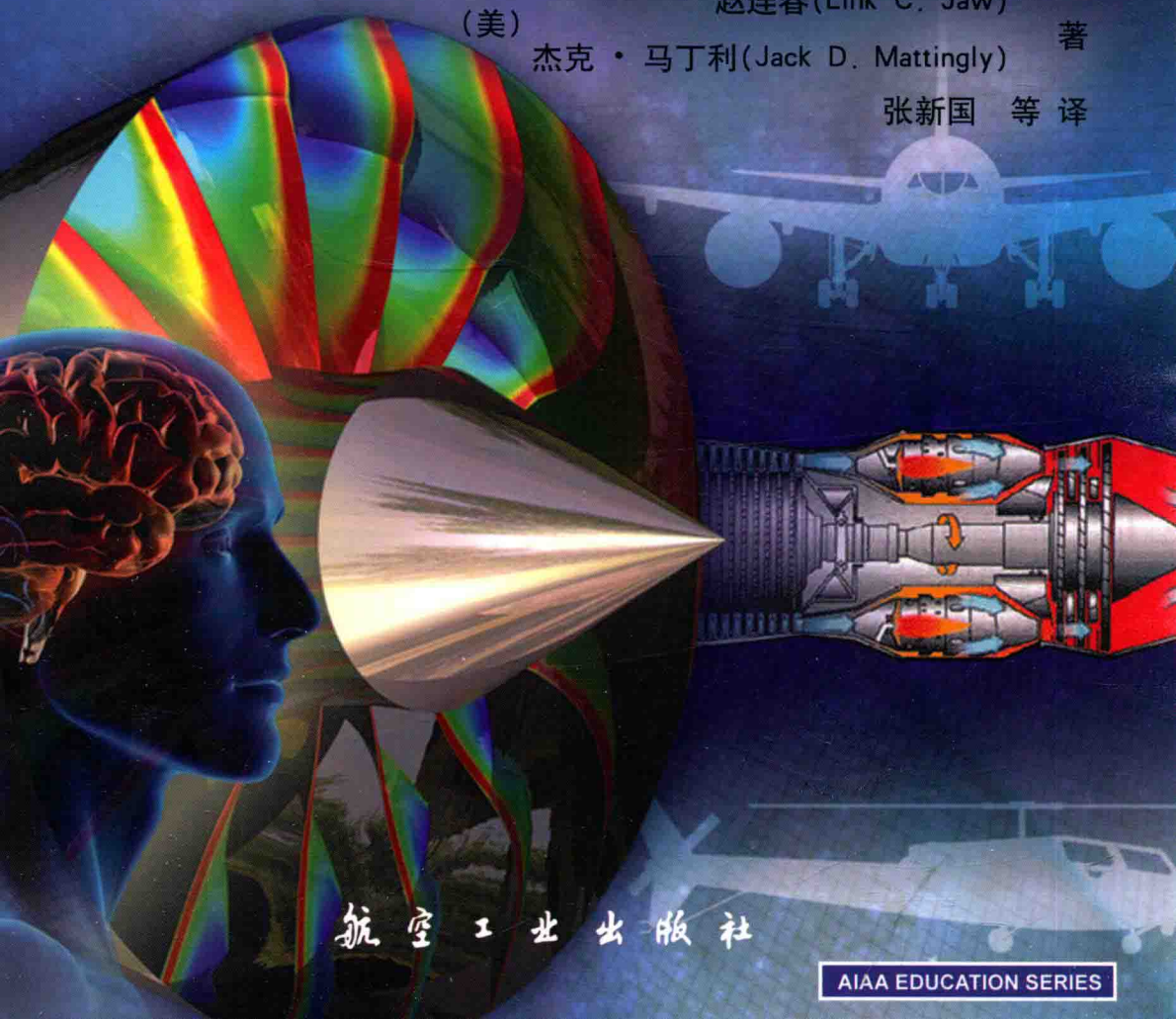
飞机发动机控制

——设计、系统分析和健康监视

(美) 赵连春(Link C. Jaw)
杰克·马丁利(Jack D. Mattingly)

著

张新国 等 译



航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

飞机发动机控制

——设计、系统分析和健康监视

(美) 赵连春 (Link C. Jaw) 著
杰克·马丁利 (Jack D. Mattingly)
张新国 等 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是美国航空航天学会 (AIAA) 最新出版的航空发动机系列教材之一, 内容包括航空发动机控制和监视系统的基础理论、最新进展和成果, 运用发动机控制理论和工程知识解决实际问题的案例分析, 发动机控制的新概念和新思路, 并针对涡扇与涡轴发动机, 介绍了航空发动机控制和监视系统的综合设计方法。本书可为我国航空发动机管理人员和专业技术人员了解航空发动机控制和监视系统的发展提供参考, 也可供相关专业院校师生教学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机发动机控制: 设计、系统分析和健康监视 /
(美) 赵连春, (美) 马丁利 (Mattingly, J. D.) 著; 张
新国等译. --北京: 航空工业出版社, 2012. 12

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文: Aircraft Engine Controls: Design,
System Analysis, and Health Monitoring

ISBN 978-7-5165-0108-5

I. ①飞… II. ①赵… ②马… ③张… III. ①航空发
动机—设计②航空发动机—监视控制 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 280277 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2010-6336

Translated from the English language edition: Aircraft Engine Controls: Design, System Analysis, and Health Monitoring. By Link C. Jaw with Jack D. Mattingly. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-60086-705-7. Copyright © 2009 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

飞机发动机控制

——设计、系统分析和健康监视

Feiji Fadongji Kongzhi

——Sheji, Xitong Fenxi he Jiankang Jianshi

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2012 年 12 月第 1 版

2012 年 12 月第 1 次印刷

开本: 710×1000 1/16 印张: 22 插页: 16 字数: 475 千字

印数: 1—2000

定价: 110.00 元

《AIAA 航空航天技术丛书》审委会

顾问：(按姓氏笔画排列)

尹泽勇	石屏	冯培德	刘大响	关桥	杨凤田	李天
李明	宋文聰	张彦仲	陈一坚	陈祥宝	赵振业	唐长红
顾诵芬	曹春晓	颜鸣皋				

主任：林左鸣

副主任：谭瑞松 顾惠忠 吴献东 张新国

委员：(按姓氏笔画排列)

王坚	王之林	王向阳	王英杰	王润孝	卢广山	曲景文
华俊	刘选民	刘春晖	杨圣军	李晓红	吴松	汪亚卫
陈元先	陈灌军	庞为	郭恩明	都本正	彭卫东	葛子干
蔡毅	魏金钟					

《AIAA 航空航天技术丛书》编委会

主任：张新国

副主任：王英杰 魏金钟

委员：(按姓氏笔画排列)

丁文强	丁全心	王永庆	王永明	王明皓	王聪梅	车宏
牛文生	邓景辉	尹红顺	艾俊强	帅朝林	田泽	白晓东
冯子明	巩水利	朱知寿	朱荣刚	刘永泉	江和甫	孙聪
杨伟	杨旭	杨超	杨朝旭	苏炳君	李文正	李东杰
李孝堂	李宏新	李周复	严成忠	吴希明	吴良斌	吴学仁
何胜强	沈锡钢	宋笔锋	张弘	张波	张明习	张继高
陆志东	陆虎敏	陈聪慧	范彦铭	欧阳绍修	罗安阳	周自全
赵霞	侯敏杰	姚华	袁立	聂海涛	徐华胜	郭德伦
益小苏	陶春虎	桑建华	黄佑	黄传跃	曹奇凯	章怡宁
梁相文	梁晓庚	董建鸿	强宝平	童明波	曾军	曾元松
蒲小勃	褚林塘	臧军	廖志忠	樊会涛		

编委会办公室

主任：刘鑫

副主任：史晋蕾 李苏楠

成员：(按姓氏笔画排列)

安玉彦 李金梅 郭玮 郭倩旒

丛书序（一）

中国航空工业要融入世界航空产业链，进行国际化开拓，参与国际合作和竞争，与世界航空航天企业共谋发展，需要的是强大的技术支撑。构建先进的技术研发平台，加速推进前沿科学技术的研究，加速推进航空发动机技术和航空先进材料技术领域的基础及应用技术研究、新产品研发与技术创新，关键是要有一批具有高水平、高素质的航空航天专业人才。而人才的培养离不开知识的传承，这套《AIAA 航空航天技术丛书》就为我们提供了一个很好的资源。

习人之长，补己之短，正视不足，奋发崛起，社会发展规律普遍如此。从这套书中，我们不仅能读到长久以来人类在探索天空的过程中积跬步而形成的基础的、科学的、先进的专业知识和技术，以及崭新的思维方式和解决问题的技巧及方法，更重要的是能在学习这些成功经验的同时，多注意看看前车之鉴，避免陷阱。在这里我想要与大家共勉的是，即使是在百科全书中也不能找到所有问题的答案，科学发展永无止境，航空航天业的进步带动着社会高精尖技术的发展，其中还有很多领域及问题需要我们去探索 and 解决，因此，我们要抱着虚心的态度去学习，勇于探索的态度去思考，用好这些书，读好这些书。

科技的进步是整个社会的进步。愿我们的科技工作者、科研管理人员和广大的院校师生，既能够从中学习到知识、寻找到答案，更能够汲取精华，并能积极探索，与自身的知识、技术和经验相结合，在中国航空工业整翼飞升之时，迸发出更加绚丽的思想火花。



中国航空工业集团公司董事长

丛书序（二）

航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略性产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

相比欧美等发达国家，我国并没有系统地经历科学革命和工业革命的洗礼。科学技术和工业基础落后，是导致我们高端制造业发展缓慢的原因之一。科学技术的进步非一朝一夕之力。通常来讲，一个产业发展所依托的先进技术至少需要10~20年的储备周期。以前的飞机材料都是单一金属的，现在随着材料技术、制造技术的进步，发展到铝合金、铝镁合金、钛合金以及碳纤维材料。这种科学技术的进步改进了飞机的性能和功能，包括后期出现的预警机、加油机、空天飞机等，其背后凭借的也是飞机的电子设备、任务系统、功能系统等的不断升级，依靠的是一系列科学技术的积累。

夯实技术基础并谋求创新，除了依靠自身积极探索、不断积累技术成果，还要吸纳国外先进的技术成果和经验，建立开放式的科学技术发展架构。

着眼于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）从美国航空航天学会（AIAA）的专业出版物中选择优秀图书引进翻译出版为中文版，推出了这套《AIAA 航空航天技术丛书》。熟悉AIAA的同行们都知道，AIAA的出版物专注于航空航天领域，包括专业图书、期刊、会议论文和标准等，是为航空航天业提供信息服务的重要组成部分。AIAA的图书工作委员会及其严格的审查制度保证了其图书具有较高的学术水平和技术含量。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》涵盖飞行器的结构技术、材料技术、制造技术、气动技术、推进技术、试验技术、控制技术、航电系统和武器系统等方面，是对国内有关专业领域的有益补充。这次引进翻译出版工作所涉及的专业领域较多，工作繁杂，难度很大，需要协调的事情也很多，衷心希望最终能够达到预期目的，真正为促进国际化的交流与合作、为培养高素质的航空航天专业人才、为前沿科学技术的探索和创新起到应有的作用。



中国航空工业集团公司副总经理

给 AIAA 中文版丛书的序言

美国航空航天学会 (AIAA) 由成立于 1930 年的美国火箭协会和成立于 1932 年的美国航空科学学会于 1963 年合并而成。自此, AIAA 就作为最早的平台服务于美国及全球航空航天技术的创新者、卓越者和引领人。广为人们所熟悉的奥维尔·莱特, 尼尔·阿姆斯特朗, 弗兰克·惠特尔, 凯利·约翰逊, 西奥多·冯·卡门和沃纳·冯·布朗都是 AIAA 的会员, 而每 6 名 AIAA 的会员中就有超过 1 名会员来自美国以外的国家或地区。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》是 AIAA 和中航出版传媒有限责任公司 (航空工业出版社) 良好合作的硕果。这种合作关系使得 AIAA 与中国航空学会之间以及 AIAA 与中国宇航学会之间的合作相得益彰。作为世界上最大的服务于航空航天业的技术学会, 由我们来推进 AIAA 图书中文版及双语版的出版和促成我们会员之间的交流是极为恰当之事。

我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的, 最初主要关注在对 AIAA 技术图书的翻译上, 采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书, 现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨, 而当我们展望未来时, 我们感到非常高兴的是这套 AIAA 中文版图书包含了 AIAA 所出版的所有类别的图书: 教育系列 (大学教材)、航空航天进展系列 (科技) 以及飞行图书馆系列 (大众爱好)。

另外, 最近几年里, AIAA 的所有图书、期刊文章和技术会议论文都已进行电子版存档, 我们也希望我们的国际会员和合作伙伴能够很方便地访问这个强大的航空航天信息图书馆。

由最初在出版上的合作开始, AIAA 已增强了其与中国的合作关系, 包括代表团互访和交流等活动。这些互惠活动使美国和中国的航空航天团体之间的联系纽带更加牢固, 也使双方收获了重要的友谊。各种开拓性的互动将使我们的国家间拥有更好的相互理解与合作关系。AIAA 非常感谢中国航空工业集团公司的张新国副总经理、中航工业经济技术研究院王英杰院长、中航出版传媒有限责任公司的刘鑫总经理和李苏楠主任为此次合作所做出的努力。

AIAA 致力于服务广大会员和航空航天业。如今，AIAA 有许多来自中国的会员，随着更多的学生和专业人士通过这套丛书、AIAA 的其他出版物和直接的交流而对 AIAA 有更多的了解，我们希望来自中国的会员数量将会不断增多。而对于如何改善我们的服务，我们认为最好的想法是来自于我们的读者和会员。欢迎你们提出建议，并且我相信中航出版传媒有限责任公司会将你们提出的建议转达给 AIAA。

我们期待着未来长期且富有成效的合作。



罗伯特·迪克曼
美国航空航天学会主席

序

航空发动机控制系统是决定航空发动机性能的一个关键功能系统，航空发动机控制是航空发动机专业的一个重要分支，在航空发动机的发展中占有举足轻重的地位。航空发动机控制系统的作用是在整个飞行包线内，在发动机各个气动、热力和机械设计限制内及在发动机所有功率范围内，根据外界干扰或油门杆的指令，通过控制器改变可控变量（如供油量、尾喷口截面积等）的大小，以保证发动机被控量（如转速、增压比等）等于常数或按预定的规律变化，使发动机安全、可靠、稳定工作，并获得最佳性能。

过去 60 年，随着航空发动机技术的不断进步和飞机对发动机性能要求的不断提高，发动机控制系统已从简单的开环液压机械系统发展到复杂的闭环液压机械系统，到今天已经发展成高度复杂的、闭环、模型基、多变量、时变、非线性、多功能的计算机电子控制系统，成为集现代先进光、机、电、信息与控制技术为一体的高科技产品。发动机控制系统除了具有强大的控制功能外，还具有健康管理、自动和精确诊断故障的能力。将来，发动机控制技术将向数字化、综合控制、分布控制、主动控制、多变量控制、容错控制和智能控制等方向发展。发动机控制系统的功能也将超出推进控制的范畴，而发展成为一种能平衡推进控制要求、配电和管理要求、状态监视系统的机载管理系统，成为综合的控制系统，即飞行/推进综合控制以及火力/飞行/推进综合控制，将对发动机性能发挥日益重要的作用。

航空发动机是飞机的“心脏”，而控制系统是保证这个“心脏”高效、稳定工作的关键因素之一。目前，国内关于航空发动机控制和监视系统设计的专业书籍十分缺乏，全面、系统阐述航空发动机控制系统设计的专业书籍更是少之又少。中国航空工业集团公司张新国副总经理亲自组织引进翻译出版的《飞机发动机控制——设计、系统分析和健康监视》一书，是美国航空航天学会（AIAA）2009 年最新出版的航空发动机系列教材之一，内容包括航空发动机控制和监视系统的基础理论、最新进展和成果，运用发动机控制理论和工程知识解决实际问题的案例分析，发动机控制的新概念和新思路，并从涡扇与涡轴发动机两个方面介绍了航空发动机控制和监视系统的综合设计方法。其中关于航空发动机控制系统基础理论、发展历程和趋势的介绍，可为我国航空发动机管理人员和专业技术人员了解发动机控制和监视系统的发展提供参考；所论述的建模技术、设计方法和解决

问题的方式，可为我国航空发动机控制和监视技术的发展提供借鉴。

本书是我们学习了解航空发动机控制和监视系统的好教材，希望本书的出版能帮助业内人士开拓视野、启发思路、完善设计、提升能力，为促进我国航空发动机的快速发展作出积极贡献！

林右鸣

2010年6月1日

原版序

美国空军从 20 世纪 70 年代末就开始致力于提供最新的飞机燃气涡轮发动机教材，本书就是这项工作的最新成果。飞机燃气涡轮发动机教材最初只涉及空气热力学技术、控制技术和结构技术 3 个领域。该项工作由俄亥俄州 Wright - Patterson 空军基地怀特实验室航空推进系统理事会发起，首批成果包括 Gordon C. Oates 编写的空气热力学教材（3 册）、由马丁利、Heiser 和 Pratt 编写的飞机发动机设计教材（1 册）。这些教材现已被 AIAA 教育系列丛书收录。

本书是关于燃气涡轮发动机控制系统的最新教材。这项工作由俄克拉何马州 Tinker 空军基地的推进系统理事会发起，由 Timothy Dues 领导完成。2003 年，Dues 要求我主持这项工作并确定作者人选。经过大范围筛选之后，我找到了由美国国家航空航天局（NASA）格伦研究中心的 Sanjay Grag 先生和美国空军研究实验室的 Timothy Lewis 先生向我大力推荐的赵连春博士。赵连春博士是燃气涡轮发动机控制系统和健康监视系统领域的专家，正是编写本书的最佳人选。2005—2007 年，赵连春博士编写了一本学时一周的燃气涡轮发动机控制系统教程，用于空军、海军和陆军工程师培训，本书的大部分内容都出自这本教程。本书中介绍发动机控制系统的内容有 6 章，其余部分分别介绍了发动机控制系统与飞机控制的集成、发动机控制新概念、发动机监视和健康管理技术。

杰克·马丁利

原版前言

燃气涡轮发动机的发明可以追溯到 20 世纪 30 年代早期 ~ 40 年代末之间，到 20 世纪 50 年代燃气涡轮发动机已经成为飞机推进系统的主要动力源。如今，燃气涡轮发动机及其相关技术代表了一种最高效的发电方式；燃气涡轮发动机之所以能够成为航空推进系统的首选，除了因其具有的高效率，还因其在工作过程中的可靠性表现满足了苛刻的飞行安全性要求。

设计一台燃气涡轮发动机要求具备包括空气动力学、流体力学、固体力学、热力学、化学和材料学等多学科知识，而只有全面、透彻地了解发动机系统的性能，才能控制这样一个复杂的机械设备。在某些航空应用领域，燃气涡轮发动机要能够在整个发动机工作包线范围内提供各类可预测、可重复的推力特性，而发动机工作包线涵盖的飞行高度下至海平面以下，上至数万英尺高空。飞机在从起飞到超声速飞行的过程中，随着飞行速度的变化，飞行高度也随之改变，致使发动机进口温度、进口压力和出口压力同时发生变化。除了发动机本身的复杂性以外，大范围变化的工作条件、不断提高的推力控制精确度和工作可靠性要求，都是发动机控制系统设计过程中要面临的首要问题。

变更控制系统一直都是发动机遭遇外场意外故障时最理想的、“一步到位”的解决方式，因为变更控制逻辑和几行代码要比重新设计、制造和安装新的发动机部件容易得多。

虽然人们都承认燃气涡轮发动机控制系统的重要意义，但是即使是在燃气涡轮发动机发明 70 多年后，系统、全面阐述发动机控制系统设计的公开刊物鲜有出现。目前已知的关于发动机控制系统的最近著作发行于 1963 年，由 Sobey 和 Suggs 编写。他们的著作奠定了飞机动力装置控制技术的基础，但是书中的内容并不足以囊括近 50 年来发动机控制和监视系统技术领域中出现的最引人瞩目而又意义重大的最新进展。所以，本书的编写就是为了保证燃气涡轮发动机控制和监视系统知识的连续性。

21 世纪初，NASA 格伦研究中心为纪念莱特兄弟 1903 年首飞成功 100 周年，考虑出版一份关于美国飞机发动机控制系统发展史的技术报告，而我则很荣幸地被选为这项工作的主要执笔人。在完成这篇有关发动机控制系统发展情况的报告之后不久，我又受 NASA 之邀撰写发动机健康管理技术发展情况的研究报告。正是因为这两份报告，美国空军热情邀请我准备关于飞机发动机控制和监视系统设

计的短期课程，并在 2005 年和 2007 年各举办了一次课程讲座。本书就是以这些短期课程的教学材料为基础编写的。为感谢所有给予我教诲和鼓励的人们，我接受了这项艰巨的任务，但是我明白我并不是承担这项任务的最佳人选。编写本书的难点在于要将飞机发动机控制系统 50 多年来的知识消化吸收，而且还要将这些知识以精炼的表述形式呈现给专业背景宽广的读者。因篇幅所限，我在本书的编写过程中经常为一些论题和参考资料的取舍而伤脑筋。所以，我承认本书可能遗漏了一些读者感兴趣的话题，而增加了读者不甚关注的话题，而这样的缺憾是在所难免的。

本书的关注点不在于控制和监视系统的理论知识，而在于如何运用控制理论和工程知识解决实际问题。本书关注较多的是如何透彻地理解问题而非彻底地解决问题。本书以飞机发动机作为目标应用系统。我认为本书中所论述的建模技术、设计方法和解决问题的方式也可以应用到其他工程系统和行业，因为涡轮发动机是世界上现有的最复杂的物理系统之一，而到目前为止其他行业使用的控制和监视技术都是最先应用在飞机发动机上的。本书可供控制系统和监视系统设计专业的工程技术人员、高年级本科生和低年级研究生使用。

赵连春

2009 年 8 月

致 谢

我要对所有给予我帮助和言传身教的人表示衷心感谢，他们教授的知识在我编写本书时发挥了重要作用。由于篇幅所限，我不能向所有帮助过我的人一一致谢，在此仅向其中的一些人表达我的感激之情：感谢我在 Scientific Monitoring 公司的同事——Walter Merrill, Hoang Tran Van, Jim (Yu - tsung) Wang 和 George Mink；感谢 20 世纪 80 年代时我在加雷特涡轮发动机 (Garret Turbine Engine) 公司工作时的同事——Richard Ling, Glen High, Larry Yee 和 Robert McCarty；感谢在发动机控制专业方面给予我指导的加雷特公司（该公司现在已经成为了霍尼韦尔国际 (Honeywell International) 公司的一部分）的 Glen Schwent、NASA 格伦研究中心的 Sanjay Garg 和 Ten - Hui Guo、美国空军研究实验室的 Timothy Lewis 和 Jeffrey Stricker、通用电气 (GE) 公司的 Ki - Young Chung 和 Lee Lapierre、普·惠公司的 Bruce Wood、Allan Volponi 和已故的 Frank D. Gass。2009 年 5 月，我在机缘巧合时见到了 Albert Sobey 先生，他为我讲述了 1963 年出版的《飞机发动机控制系统》一书背后的故事，我深感荣幸。

我衷心感谢加雷特公司赠与我的博士奖学金，这在当时是没有先例的，这笔奖学金使我得以脱离繁重的日常工作，从而有充裕的时间前往斯坦福大学继续专注于学业。我特别感谢 Jack Fredlake、John Mason 和 Joan Cudahy，为帮助我获得奖学金他们做了大量工作。在斯坦福大学，我有幸师从于 Arthur E. Bryson 教授并在他的指导下开始了愉快的学习生活和研究工作。Bryson 教授不仅学识渊博，而且工作勤奋、为人谦逊，堪称学术的权威和治学的典范。

我同样衷心感谢美国空军的慷慨解囊，为我编写的发动机控制和监视系统设计两个短期课程教材提供资金支持，这为本书的最终成稿打下了基础。我要感谢所有短期课程学员反馈给我的信息和建议，正是他们的积极反映为我完成此书提供了不竭的动力。特别感谢 Fred Kimler 和 Douglas Decker，与他们进行的讨论使我受益良多，他们的真知灼见更让我获益匪浅。

感谢杰克·马丁利，没有他就不会有本书的付梓发行。杰克·马丁利指导我如何编写技术专业书籍，为我重新制作了大量图片，他的修改和润色更好地突出了本书的专业性。杰克·马丁利还负责编写书中附录 B 部分的内容，主要介绍发动机性能和可操作性，这使本书得到了进一步完善。感谢 AIAA 的编辑 Pat DuMoulin 和她的团队，他们为本书的编辑做了大量工作。

感谢我的女儿 Jessica，她与其他出版商联系请他们允许我们在本书中借用一些插图和照片。感谢我的孩子 Timothy 和 Stacey，他们是以超乎寻常的耐心等待此书的完成并不断给我鼓励。感谢我的母亲张家鸾，是她将奉献、坚持和不断学习价值观灌输给了我。最后我要感谢我的妻子朱嘉玫，她一如既往地支持我、爱我，给我快乐。她是我今生的至爱。

赵连春

符 号 表

A	面积, in^2 ^① 或 m^2
$\mathbf{A}$	状态方程的状态矩阵
a	声速, ft^2/s 或 m/s
$A(s)$	作用传递函数
$\mathbf{B}$	状态方程的输入矩阵
$\mathbf{C}$	状态方程的输出矩阵
c_d	流量系数
c_p	空气或气体的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_m	涡轮金属的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$\mathbf{D}$	状态方程的前馈矩阵
F	力或推力, lbf ^③ 或 N
$\mathbf{F}$	离散时间状态方程的动态矩阵
f	状态函数; 油气比 (燃油流量与质量流量之比)
$\mathbf{G}$	离散时间状态方程的输入矩阵 (同连续系统中的 $\mathbf{B}$)
$\mathbf{G}(s)$	系统或过程传递函数
g	输出函数
$\mathbf{H}$	离散时间状态方程的输出矩阵 (同连续系统中的 $\mathbf{C}$)
$\mathbf{H}(s)$	测量值反馈传递函数
h	比焓, J/kg
I	电流、惯量或脉冲函数, $\mathbf{A}$; 转动惯量或质量惯性矩, $\text{lb}^4 \cdot \text{ft}^2$ 或 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; 单位矩阵 (黑体)
I_{ZQ}	每个叶片围绕超前一滞后转折点的惯性矩, in^4 或 m^4
IGV	进口导向叶片角度或位置, rad , in 或 m
$\mathbf{K}(s)$	控制器传递函数
K_d	微分控制增益
K_e	发动机增益常数
K_i	积分控制增益
K_p	比例控制增益