



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

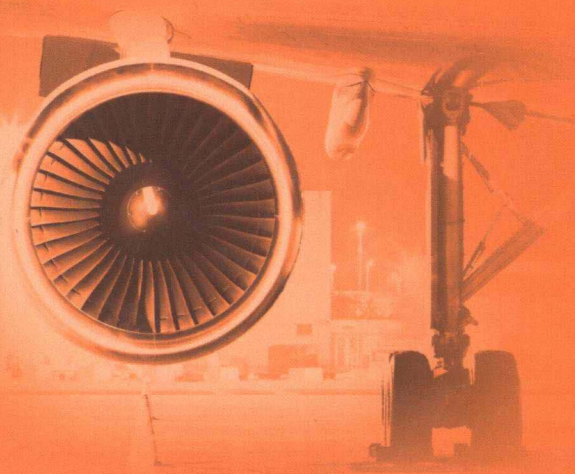
喷气推进

喷气发动机气体动力学、
热力学设计和性能简要指导
(第3版)

Jet Propulsion

A Simple Guide to the Aerodynamics and
Thermodynamic Design and Performance of Jet Engines (Third Edition)

【英】尼古拉斯·昆普斯蒂 安德鲁·海斯 著
陈迎春 滕金芳 王鹏 等 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

喷气推进

喷气发动机气体动力学、 热力学设计和性能简要指导

(第3版)

Jet Propulsion

A Simple Guide to the Aerodynamics and
Thermodynamic Design and Performance of Jet Engines
(Third Edition)

【英】尼古拉斯·昆普斯蒂 安德鲁·海斯 著
陈迎春 滕金芳 王鹏 等 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机读者俱乐部

内容提要

本书介绍了现代民用和军用喷气发动机所涉及的气动及热力设计。内容以为一款大型客机及一款新型战斗机研发的两款发动机为例,对现代发动机的设计进行了阐释。本书涵盖飞机需求、气动力学、燃气涡轮发动机及喷气式发动机原理、可压缩流体力学基础知识、涵道比选择、缩放及无量纲化分析、涡轮压气机设计和特性、设计优化以及非设计点性能等内容。本书可供高等院校航空发动机专业作为教材使用,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

喷气推进 / (英) 尼古拉斯·昆普斯蒂
(Nicholas Cumpsty), (英) 安德鲁·海斯
(Andrew Heyes) 著; 陈迎春, 滕金芳, 王鹏等译. —上
海: 上海交通大学出版社, 2018
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-19637-8

I. ①喷… II. ①尼… ②安… ③陈… ④滕… ⑤王
… III. ①喷气推进—研究 IV. ①V235

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 145719 号

喷气推进

著 者: [英] 尼古拉斯·昆普斯蒂
[英] 安德鲁·海斯

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 当纳利(上海)信息技术有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 436 千字

版 次: 2018 年 9 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-19637-8/V

定 价: 180.00 元

译 者: 陈迎春 滕金芳 王 鹏等

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 22.75

印 次: 2018 年 9 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-31011198

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委原副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

贺东风（中国商用飞机有限责任公司董事长）

林忠钦（上海交通大学校长、中国工程院院士）

编委会（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

李明（中国航空工业集团沈阳飞机设计研究所科技委委员、中国工程院院士）

刘洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

任和（中国商飞上海飞机客户服务公司副总工程师、教授）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、中国工程院院士）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

张新国（中国航空工业集团副总经理、研究员）

张卫红（西北工业大学副校长、教授）

陈宗基（北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司 CR919 飞机常务副总设计师、研究员）

陈勇（中国商用飞机有限责任公司 ARJ21 飞机总设计师、研究员）

陈懋章（北京航空航天大学能源与动力工程学院教授、中国工程院院士）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

赵越让（中国商用飞机有限责任公司副总经理、研究员）

姜丽萍（中国商用飞机有限责任公司总工程师、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

曹春晓（中国航空工业集团北京航空材料研究院研究员、中国工程院院士）

傅山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

译 校 人 员

陈迎春 滕金芳 王 鹏 颜 颜
赵 强 崔 凝 仲伟兴 束家熠
郑 辰 曾 涛

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动标志着我国的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音公司

B737 和空客公司 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》), 由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶; 国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作; 也有《民机设计1000问》《英汉航空缩略语词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助, 体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命, 凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果, 具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性, 既可作为实际工作指导用书, 亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养, 有益于航空工业的发展, 有益于大飞机的成功研制。同时, 希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空, 并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

译者序

本书通过介绍一款类似空客 A380 的新型大型双发客机的发动机设计和一款军用发动机设计,结合飞机需求在发动机重要参数的选取方面做了非常有益的探索,是一部从专业角度讨论飞机喷气推进系统的完整教材。通读本书可以看出,本书与其他教材相比具有几个鲜明的特色:一是深入浅出、循序渐进,并配备有丰富的教学练习题,能帮助读者深入理解民用和军用发动机设计中的逻辑顺序;二是把军用发动机的多个方面与民用发动机问题相关联;三是突出简化手段和理念,利用简单的公式就可以对一款发动机性能进行合理估计。通过本书作者的观点,我们可以看到一些并不熟悉的规律,并且非常值得借鉴。因此,本书既适合作为飞机发动机设计方面本科学生相关课程的参考教科书,也可以用于飞机发动机工业领域的专业人士完整理解喷气推进系统组成和工作原理。建议读者根据自身情况有选择地阅读书中相关章节,第 1 版序言给出了如何选择阅读章节的建议。

本书的翻译工作由中国商用飞机有限责任公司、中国商飞上海飞机设计研究院动力燃油部门的研发人员和上海交通大学的师生共同完成,其中初稿翻译分别由以下译者完成:曾涛负责第 1 章;付涵负责第 2 章;方超负责第 3 章;钱梦成负责第 4 章;李崇负责附录;郑辰负责第 5 章和第 20 章;仲伟兴负责第 6 章~第 8 章、第 10 章、第 19 章;赵强负责第 9 章、第 11 章、第 18 章;颜颜负责第 13 章~第 15 章;束家熠负责第 12 章、第 16 章、第 17 章;崔凝负责飞机术语以及第 19 章和第 20 章和附录校核;滕金芳完成第 2 章~第 4 章的校核;王鹏完成图、表、公式、术语的整理和第 1 章、第 5 章~第 18 章的校核;滕金芳完成全书的二校;陈迎春完成全书的最终校核审阅工作。

最后,感谢为本书顺利出版给予关心、帮助和支持的所有人。在本书的翻译过程中,译者得到许多同行和专家的指导和帮助,在此一并表示感谢!

同时感谢为本书出版做了大量图文编辑工作的上海交通大学出版社的编辑。

由于本书所涉知识分布广泛、工程背景要求繁杂,译者学识水平有限,加之翻译时间仓促,书中存在的错误和遗漏之处,敬请读者批评指正。

译者

2017年11月

第3版序言

民用飞机空客公司的 A380, 类似于本书前版第 1 部分中提到的新型大型飞机, 已投入商业运营多年。随着对轮挡燃油降低的进一步重视, 飞机工业的注意力已转移至双发飞机上, 因此本书第 1 部分设计的飞机型号是一款新型高效飞机(new efficient aircraft, NEA), 一个以高效率为目标的双发飞机。同时, 另一项值得注意的改变是使用风扇压比而不是涵道比作为独立的设计变量。自从第 1 版出版以来, 典型的风扇压比不断下降导致相应设计问题的复杂性明显上升, 该变化对于军用发动机的影响则相对较小。

另一个主要变化是引入了共同作者。Andy Heyes 之前在帝国理工学院执教时一直使用本书的第 2 版作为教材, 因此他对本书前版的认识和经验在第 3 版的编写中起了重要作用。

在此我还要感谢一些朋友和同事对本书第 3 版编写工作的额外帮助。他们是来自罗罗公司的 Conrad Banks、John Bolger、Simon Gallimore、Peter Hopkins、Glen Knight、Paul Madden、Alan Newby、Ian Rainbow 和 Joe Walsh, 来自普惠发动机公司的 Yuan Dong、Alan Epstein 和 Jayant Sabnis, 来自斯坦福大学的 Juan Alonso 和 Anil Variyar, 来自剑桥大学的 Chez Hall 和 John Young, 来自帝国理工学院的 Aaron Costall、Ricardo Martinez-Botas 和 Peter Newton, 来自俄亥俄州的 Mike Dunn, 从 NASA 退休的 Tony Strazisar, 从通用电气公司退休的 Meyer Benzakein 以及从空客公司退休的 Jeff Jupp。

第 2 版 序 言

本书介绍了现代民用和军用喷气发动机所涉及的气动及热力设计。内容以为一款大型客机及一款新型战斗机研发的两款发动机为例,对现代发动机的设计进行了阐释。本书各章节涵盖飞机需求、气动力学、燃气涡轮发动机及喷气式发动机原理、可压缩流体力学基础知识、涵道比选择、缩放及无量纲化分析、涡轮压气机设计和特性、设计优化以及非设计点性能等内容。

本书前版第 1 部分主要介绍民用飞机空客公司的 A380 多年商业运营的经验。伴随着对轮挡燃油降低的进一步重视,航空工业的注意力已转移至双发飞机上。因此本书第 1 部分所使用的飞机型号为假设的一款高经济型的双发飞机。

Nicholas Cumpsty 是帝国理工学院的荣誉教授。他曾是剑桥大学气动热力学技术方面的教授,直到 2000 年成为英国罗尔斯-罗伊斯公司(简称罗罗公司)的首席技术专家。从罗罗公司退休后,他成为帝国理工学院机械工程专业的教授,直到 2008 年退休。他还是麻省理工学院的访问教授以及皇家工程学会、美国机械工程师学会(ASME)和美国航空航天学会(AIAA)的成员。

Andrew Heyes 是机械工程专业的教授以及斯特拉斯克莱德大学机械及航空航天工程系的系主任。他曾在利兹大学及帝国理工学院任职,其间常年执教发动机设计课程并使用本书第 2 版作为教材。在前往帝国理工学院任教之前,他曾在英国罗罗公司及英国航空航天公司(Warton, 军用飞机分部)工作。他还是美国机械工程师学会的认证工程师和成员。

第1版序言

本书的前10章基于大学本科课程教材编写,主要介绍一款新型600座级长航程飞机发动机的设计。本科课程对于热力学以及流体力学的基本介绍主要针对拥有相关学术背景的读者,但其内容同时也适合具有工程或物理背景的毕业生阅读。本书涉猎范围有意限制在喷气推进相关的热力学及气体动力学方面,这本身已经是范围很广的命题。除了一些经验信息,如基于经验的最大叶尖速度等,本书没有包含更多关于发动机机械方面的内容。如果包含发动机机械设计方面的内容,则内容要比本书现有体量更大,而且我在这方面的知识有限。

在准备该课程的过程中,我必须学习很多新的知识,因此获得了许多来自工业界,尤其是罗罗公司的朋友和同事的帮助。这使得我认识到知识领域的分工已经十分专业化,以至几乎没有人能够全面深入地掌握其所涉及领域以外的知识。另外,在这些拥有广泛知识范围的人当中很大一部分已经接近退休年龄,其知识和经验都面临流失。因此,编写一本覆盖更广泛领域而不是仅针对学生用书的想法应运而生,即也可以满足飞机发动机工业领域想要了解更多关于发动机整体设计知识人员的需求。我希望,即使没有在书架上展示,工业界的许多人依然可以发现这本书有用,并把这本书作为参考书。

原来的课程内容(本书第1章~第10章)主要集中在对一款可能(甚至十分可能)用于新型大型民用飞机的发动机的基本设计上。因此初衷是把最重要的想法与最小的复杂性结合,所以我采用了一系列的简化方法,如对于空气及燃烧室排出的气体采用相等且固定的比热容,且忽略发动机涡轮冷却气流的影响等。

但当决定要写这本书的时候,我将涉猎内容进一步增加了第11章~第19章的部分,第11章涉及部件性能,第12章涉及民用发动机非设计点匹配,第13

章~第18章则着眼于军用发动机的多个方面,该军用发动机基于第1章~第10章所涉及的民用发动机及新型战斗机的相关要求发展而来,并将之前章节对军用发动机所采用的假设取消;第19章是基于第13章~第18章所涉及的改进措施,再重新对民用发动机进行审视。

整本书的重点在于尽可能在简单的基础上对发生的事情进行真实的描述。这使得本书可以对内容进行一些简化处理。但更重要的是,这意味着只要掌握简单的公式就可以对一款发动机的性能进行合理准确的估计,且可以评估在运行条件或部件特性改变的情况下发动机在性能上产生的变化。较早的一些书由于使用了大量的代数而变得复杂,此外为了保证代数内容便于处理,通常会使用近似不令人满意。近期的书越来越多地使用一些数学计算,且通过利用电脑和计算,数值运算几乎是微不足道的。本书包含了大量与前几章涉及的民用发动机设计以及后几章涉及的军用发动机设计相关的练习题。这些练习题构成了书中不可分割的一部分,并且尽可能遵循民用和军用发动机初始设计中的逻辑步骤。这些练习题可以帮助深入系统地理解书中内容。

由于第1章~第10章的内容是针对本科生的,所以一些章节涉及的命题(燃气涡轮热力学、可压缩流体力学以及旋转机械)比较基础,但只有理解了这些章节才能更好地理解其他章节的内容。考虑到一些读者的学术背景可能与空气动力学以及热力学相距甚远,而这些基础章节的概述内容会起到很大的帮助,因此我决定保留这些基础性的内容。

致 谢

我非常荣幸能有机会对在编写这本书时得到的各位朋友和同事的帮助表示感谢。他们大部分受雇于(或退休于)罗罗公司,他们是 Alec Collins、Derek Cook、Chris Freeman、Simon Gallimore、Keith Garwood、John Hawkins、Geoffery Hodges、Dave Hope、Tony Jackson、Brian Lowrie、Sandy Mitchell、James Place、Paul Simkin、Terry Thake 和 Darrell Williams。其中我要特别向 Tim Camp 表达谢意,他对所有的练习题都一一进行解答并提出很多改进意见;我还要感谢就职于国防部的 Mike Paramour;我还要特别对 John Young 以及我的学生 Peter Seitz 和 Rajesh Khan 表达谢意;同时我也感激在校对终稿时提供帮助的其他学生。另外,还有来自北美的 Ed Greitzer 和 Jack Kerrebrock(麻省理工学院燃气涡轮实验室), Bill Heiser(空军学会), Phil Hill(英属哥伦比亚大学), Bill Steenken、Dave Wisler(通用电气航空发动机公司)和 Robert Shaw。我特别要感谢来自麻省理工学院燃气涡轮实验室的 Ian Waitz,他对本书所涉及的观点及表述做了全面的审视和推敲,没有他的帮助本书将逊色不少。除了以上提到的人,我必须感谢参加这门课程学习的学生以及多年来对本领域感兴趣并为我获取相关知识提供帮助的人。

练 习 题

与发动机设计相关的练习题是本书很重要的一部分。为了使这些可行,有必要对许多参数进行数值假设,因此假设适当的值使练习变得实际。这些数值在某些情况下采取了必要的估算。但是习题答案还是基于更准确的数值,而不是根据这些近似值得到的。这样可以给读者参考答案时提供帮助,并确保某些参数的一致性。聪明的读者会发现,与实际情况相比,一些经典图示中所表述的规律的真实性要比答案中的数值所表述的结果高。

通过练习题可极大地增进读者对本书所述内容的理解。在一些情况下,不同练习题之间互相联系,其计算量不大,一个简单的计算器就能满足;另一些情况则要求变参数计算,需要使用计算机。带星号(*)练习题提供的结果,可以用于新型高效飞机(new efficient aircraft, NEA)和新型战斗机的设计表中。

习 题 解 答

可发邮件到出版社邮箱 solutions@cambridge.org 索取所有习题的解答。