

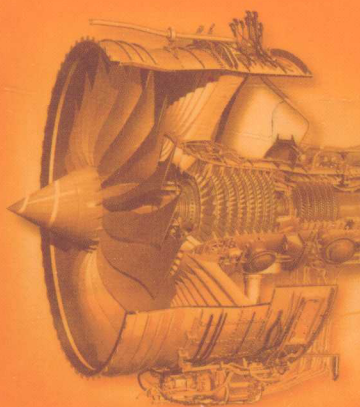


大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

飞机推进

Aircraft Propulsion

【美】赛义德·法罗基 著
刘洪 陈方 杜朝辉 译



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



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

飞机推进

【美】赛义德·法罗基 著
刘洪 陈方 杜朝辉 译



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

内 容 提 要

本书是大飞机出版工程系列推进系统方面的一本专著,它系统地叙述了飞行器发动机设计和分析的基础知识。全书共分 11 个章节,讲述了发动机的发展历程以及发动机和飞行器设计中的概念;回顾了带有热和摩擦的可压缩流动;论述了发动机推力和性能参数,发动机实际循环和理想循环的特征,以及发动机进气道和喷管;还讨论了轴流式压气机和离心式压气机,涡轮气动特性及其冷却技术以及部件匹配和非设计条件下的发动机参数;并论述化学反应的基础理论及化学火箭和高超声速推进。

本书可作为航空航天和机械工程等有关专业研究生和高年级本科生的教材或教学参考书,也可作为从事发动机和飞机设计的高校教师、科研技术人员及工程师的参考用书。

(飞机推进)

© S. Farokhi

This translation of *Aircraft Propulsion* is published by arrangement with John Wiley & Sons, Inc., III River Street, Hoboken, NJ 07030, USA

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Shanghai Jiaotong University Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

上海市版权局著作权合同登记章图字:09-2010-491

图书在版编目(CIP)数据

飞机推进/(美)赛义德·法罗基著;刘洪,陈方,杜朝辉译. —上海:上海交通大学出版社,2010

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-07015-9

I. ①飞… II. ①赛…②刘…③陈…④杜… III. ①航空发动机 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 257390 号

飞 机 推 进

赛义德·法罗基 著

刘 洪 陈 方 杜朝辉 译

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

昆山市亭林印刷有限责任公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 55.5 字数: 1108 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07015-9/V 定价: 198.00 元

版权所有 侵权必究

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副主任、两院院士)

副总主编:

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司副董事长、总经理)

马德秀(上海交通大学党委书记、教授)

编委:(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、院士)

王宗光(上海交通大学原党委书记、教授)

刘洪(上海交通大学航空航天学院教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、教授)

杨育中(中国航空工业集团公司原副总经理、研究员)

吴光辉(中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员)

汪海(上海交通大学航空航天学院副院长、研究员)

沈元康(国家民航总局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学副校长、教授)

陈迎春(中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员)

林忠钦(上海交通大学副校长、教授)

金兴明(上海市经济与信息化委副主任、研究员)

金德琨(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

崔德刚(中国航空工业集团公司科技委委员、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)

傅山(上海交通大学航空航天学院研究员)

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、重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,应用和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使我们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 B737 和

空客 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《飞机性能捷算法》,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5000问》、《英汉航空双向词典》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

在顾诵芬院士的推荐下,上海交大出版社引进了美国 2008 年出版的 *Aircraft Propulsion*。这本书是堪萨斯大学著名教授赛义德·法罗基(Saeed Farokhi)多年来从事推进课程教学的讲义笔记,包括对推进系统基础问题和国外最新科技的诠释,体系严谨、材料翔实,是一本系统深入的推进理论专著,在美国高校教学使用非常广泛。

飞机推进系统既为飞行器提供推力,也推动了航空事业的发展。为满足现代各种飞行器发展的要求,航空发达国家从 20 世纪 80 年代已经开始实施新的发动机技术发展计划以提高性能、降低成本,同时探索了很多新概念发动机,如适用于高超声速推进的超燃冲压发动机。这本 *Aircraft Propulsion* 将经验认识系统化并上升到了指导设计的高度,因此引进并翻译本书不仅对于研究大型飞机和发动机具有非常重要的现实意义,而且对于探索航空航天领域的新概念推进系统具有启发和引导意义。

本书系统全面地进行了发动机部件及总体性能分析,对于指导发动机设计具有很高的参考价值,这是国内发动机专业常用教材不多见的。它侧重论述了发动机涉及流动/燃烧现象的物理模型和推导过程,有助于认识和理解发动机性能及其影响因素。本书还列举了很多运用理论知识解决实际问题的例子,阐明了理论模型的物理涵义和应用方向,对我们从事发动机研究具有启发和借鉴作用。此外,这些内容大多体现了近年来最新研究成果和发展方向,而这恰恰是一般发动机教材所缺乏的。

本书主要译者刘洪、陈方和杜朝辉等三位同志分别毕业于南京航空航天大学、北京航空航天大学和西北工业大学发动机专业,非常荣幸地承担了主要章节

的译校工作。部分章节由余文胜、董威、白丹、饶宇等多位同志进行译校,还得到了陈勇、荣臻和多位研究生的协助,特别是美国加州大学欧文分校刘锋教授的审校,在此译者一并表示深切的谢意。本书知识点丰富、涉及专业术语复杂,译著难免错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

刘 洪

2011年1月11日

上海交通大学

序 言

读者对象

写这本书的目的是向飞行器发动机设计和分析者提供基础知识。这本书的读者对象是航空航天和机械工程专业的高年级学生、大学本科生和一年级研究生。在燃气涡轮和飞机制造企业从事实际工作的工程师也将从本书综合和系统的论述中获益。本书假定读者具有基础的热力学和流体力学背景。

本书目的

在从事 23 年大学本科和研究生的推进课程教学中,我积累了大量以前所采用的教程中没有涉及的补充笔记。这些补充材料内容丰富,包括从推进系统综合的有关问题到世界上各研究中心所取得的技术进步。我会继续将补充材料添加到我的课堂教学中,只是对大学本科生的表述方式(从教学上)要不同于研究生。例如,忽略工程原理的许多推导过程会使大部分大学本科生感到困惑。尽管理解原理的实质比掌握它们的推导方法更重要,但是如果不让学生知道推导过程,他们也不能深刻理解原理的实质。注意分析细节的另一个目的是,我坚信回到实质性问题和向(学生)展示最终结果是怎么得到的,会使课程易于理解同时增加学生对他们自身能力的信心。

数学水平

本书有意将数学水平保持在积分和基本的微分方程水平上,从而使这本书对于工科本科生来说易于理解。数学关系式的物理解释总是以文字的形式给出的,将有助于学生理解这些公式隐藏的和内在的物理意义。这种方式揭开了那些公式的神秘面纱,使工科学生摆脱符号的困扰,从而加深对概念的理解。

章节内容和专题报道

第1章是吸气式飞机发动机的引言,分为两个部分。第一部分回顾了燃气涡轮发动机的发展历史,第二部分强调了飞机发动机和飞行器设计的现代概念。材料、制造、冷却技术、计算方法、传感器、致动器和控制方面的进步在飞机发动机设计方面提供了新的机会和方向,这使得年轻的工科学生非常乐意去争取这些机会和方向。对高超声速吸气式发动机,尤其是超燃冲压发动机研究兴趣的重新燃起以及对无人特技飞行器研究兴趣的继续,使曾经一度流行的X系列飞行器获得新生。

第1章首先向学生讲述历史知识,但更重要的是激起他们对于未来航空航天工程的兴趣。

第2章在是对带有热和摩擦的可压缩流动的回顾。首先回顾了守恒原理,然后将它应用到正激波和斜激波、锥型激波、膨胀波、管内准一维流动以及瑞利流和法诺流。在结束的时候,介绍了冲量概念以及它在燃气涡轮发动机部件中的应用。

第3章是关于发动机推力和性能参数的内容。这里,介绍了飞机发动机内部和外部的性能以及它们的安装效应。

第4章描述了飞机燃气涡轮发动机循环。这一章也同时描述了发动机部件真实的和理想的行为特征:在第4章里,对于每个发动机部件的效率、损失以及性能参数从物理和数学两方面予以定义。一旦定义了一个循环里所有部件的真实行为,就可以继续计算发动机性能参数,例如单位推力、单位燃料消耗和推进效率。理想循环成了实际循环在所有部件效率为1时的特殊情况。

接下来的第5章叙述飞机发动机部件。第5章主要论述飞机进气道和喷管。尽管本书通篇强调发动机部件的内部性能,但是从平衡角度,外部或安装对飞机推进的影响也有所论述。作为飞机进气道空气动力学的一个模块,我们全面回顾二维锥型扩压器的性能,论述进气道整流罩的内部和外部的一些设计准则。也论述过渡管道的气动性能在设计和对飞机进气道的理解方面起的重要作用。超声速和高超声速进气道以及伴随它们的激波损失、边界层处理和不稳定性(如出现嗡鸣和起动问题)包含在第5章进气道部分里。对飞机排气系统的研究包含在第5章后面的部分里。除了性能参数,也比较了收敛喷管和德-拉伐尔喷管(或收敛-扩张喷管)的性能。对反向和矢量推力要求的研究在介绍推力反向器和现代推力矢量喷

管的部分中。在高超声速范围内,排气喷管与飞行器高度一体化。描述了初步设计概念和偏离设计的问题。针对高性能军用飞机发动机排气系统介绍了喷管冷却技术,同时考虑了伴随产生的性能损失和限制条件。介绍了塞式喷管和它在设计点和偏离设计点时的性能。因为混合器是长管道涡轮风扇发动机的主要组成部分,所以在第5章的喷管部分系统地阐述了它们对提高总推力的影响。

在第6章,论述了有关化学反应的基础知识。化学平衡和动力学的基本原理被用来计算化学反应中燃烧产物的组成,计算火焰温度和污染物的构成,这些推动了现代飞机燃气涡轮喷气式发动机燃烧室的设计。火焰的速度、稳定性和火焰稳定器的进一步细节在燃烧室和加力燃烧室设计中介绍。论述了污染物的构成和它对臭氧层的有害影响以及排出的温室气体,使学生充分了解现代喷气式发动机燃烧室中的设计问题。航空燃料和它们的性质以及为人所知的啸叫燃烧不稳定性的简要讨论也包含在第6章里面。

涡轮机械的介绍有三章。

第7章论述二维和三维轴流式压气机。导出轴流式压气机的气动性能和多级性能参数。论述了在二维设计中级联数据的作用。整章强调的是描述导致压气机损失的物理现象。介绍了激波损失和跨声速风扇。描述了在失速和喘振时的压气机稳定性的物理知识。概述了 Greizer 提出的简单模型,该模型讲解了特征时间尺度值和压气机稳定性之间的关系。

第8章讨论了离心式压气机的性能和气动特性。强调了离心式压气机独有的特征,并与轴流式压气机进行了比较。

第9章论述了涡轮机的气动特性和冷却技术。

第10章讨论了部件匹配和发动机参数的研究。

最后,第11章论述了化学火箭和高超声速推进。

教师资源

下面的资源对于采用本书作为教材的教师是有用的。请访问网址 www.wiley.com/college/farokhi 获取这些资源要有密码。

- 解答指南
- 图片库

致 谢

向有助于我理解流体力学和推进的所有人士致以诚挚的感谢。其中应该提及的是我在 Illinois 和 MIT 的教授。Hermann Krier, Jack Kerrebrock, James McCune, William Hawthorne 和 Ed Greitzer 对我的帮助最大。在燃气轮机实验室的研究也对此有帮助。Choon Tan, Macher El-Masri, Allan Epstein, Arun Sehra, Mohammad Durali, Wai Cheng, Segun Adebayo, James Fabunmi 和 Anthony Nebo 和我讨论了他们的专题论文,同时也帮助我理解我自己的专题论文。在瑞士巴登 Brown, Boveri 公司的燃气轮机部门,我了解到硬件工程和测试的价值、先进产品的开发以及部件研究。我的同事,Meinhard Schobeiri, Konrad Voegeler, Hans Jakob Graf, Peter Boenzli 和 Horst Stoff 帮助我了解企业是怎么运行的以及它怎样设计新产品。在堪萨斯州立大学,我的硕士生是我研究上的搭档,我们一起加深了我们对流体力学和推进的认识。我的博士生, Ray Taghavi, Gary Cheng, Charley Wu, Ron Barret 和 Kyle Wetzel 对我帮助最大。我感谢我曾指导过他们论文的 30 名理学硕士对我们所进行研究的贡献。在 NASA-Lewis 的同事赞助了我的研究,在 Cleveland 夏季的几个月中,和我进行有深刻见解的讨论和给予我殷勤的招待。他们是 Ed Rice, Khairul Zaman, Ganesh Raman, Bernie Anderson, Reda Mankbadi, James Scott 和 Charlie Towne。Charlie Towne 欢迎我去他们的实验室(和他们的家),并且我们一起享受富有成效的研究带来的乐趣。堪萨斯州立大学航空航天工程系的全体教职员在过去 23 年里一直非常支持我的工作,我向他们表示诚挚的感谢。Vince Muirhead, Jan Roskam, Eddie Lan, Dave Downing, Howard Smith, Dave Ellis, Tae Lim, John Ogg, James Locke, Mark Ewing, Rick Hale 和 Trevor

Sorenson 使我对他们在航空航天工程方面的学科有了解。我同在 GE 飞机发动机的同事一起向 FAA 和 NASA 的工程师讲授推进系统设计和一体化的短期课程许多年。从 GE 的 Don Dusa 和 Jim Younghans 以及 KSR 的 Bill Schweikhard 那里,我获得了一些推进工程和飞行测试方面相当复杂的知识。

我非常感谢以下对原稿给予复审的同事:

David Benson, 凯特林大学

Kirby S. Chapman, 堪萨斯州立大学

Mohamed Gad-el-Hak, 弗吉尼亚州立邦联大学

Knox Millsaps, 海军研究生院

Alex Moutsoglou, 南达科塔州立大学

Norbert Mueller, 密歇根州立大学

Meinhard T. Schobeiri, 德州农工大学

Ali R. Ahmadi, 美国加州州立理工大学波莫那分校

Ganesh Raman, 伊利诺伊理工大学

最后,我向伴随我 36 年的妻子—Mariam 以及我的三个可爱的女儿, Kamelia, Parisa 和 Farima 表示特别的感谢。她们是我努力的真正鼓舞者。没有她们的爱、理解、鼓励和支持,我不可能仔细地考虑如此巨大的工程。我把它归功于她们。

赛义德·法罗基

劳伦斯,堪萨斯

2007 年 3 月 16 日

符 号 表

符号	定义	单位
a	当地声速	m/s, ft/s
a	进气道椭圆入口(内部)半长轴	m, ft
a	旋流形状参数	—
a_t	总温下的声速	m/s, ft/s
A	面积	m^2 , ft^2
A_n	法向投影面积	m^2 , ft^2
A_9	尾喷管出口面积	m^2 , ft^2
A_{ref}	参考面积	m^2 , ft^2
A_0	进气道(来流)捕获面积	m^2 , ft^2
A_1	进气道捕获面积	m^2 , ft^2
A_8, A_{8geo}	喷管出口面积(几何面积)	m^2 , ft^2
A_{8eff}	喷管有效出口面积	m^2 , ft^2
A_B	堵塞面积(起因于边界层)	m^2 , ft^2
A_b	固体火箭发动机中药柱燃烧面积	m^2 , ft^2
A_E	有效面积	m^2 , ft^2
A_{HL}	进气道高亮面积	m^2 , ft^2
A_M	发动机短舱最大面积	m^2 , ft^2
A_{th}	进气喉道面积	m^2 , ft^2

符号	定义	单位
A^*	声速喉道, 节流面积	m^2, ft^2
b	进气道椭圆入口(内部)半短轴	m, ft
b	旋流形状参数	—
B	堵塞面积	—
B	压气机 Greitzer 不稳定参数	—
C	绝对速度矢量	$\text{m/s}, \text{ft/s}$
C	绝对流动速度, 即 $\sqrt{C_r^2 + C_\theta^2 + C_z^2}$	$\text{m/s}, \text{ft/s}$
c	弦长	m, ft
c	火箭有效排气速度	$\text{m/s}, \text{ft/s}$
c^*	火箭特征速度	$\text{m/s}, \text{ft/s}$
C_r, C_θ, C_z	分别是绝对坐标系中径向、切向、轴向的速度分量	$\text{m/s}, \text{ft/s}$
C_D	阻力系数	—
C_f	摩擦阻力系数	—
c_f	当地表面摩擦系数	—
C_F	推力系数	—
C_p	压力系数	—
C_{PR}	扩压器静压恢复系数	—
C_A	喷管棱角损失系数	—
C_{D8}	喷管(喉道)流量系数	—
C_{fg}	喷管总推力系数	—
C_V	喷管出口速度系数	—
C_d	剖面型阻系数	—
C_{Di}	诱导阻力系数	—
C_l	剖面升力系数	—
C_h	由 Koch 效应引起压升的等效焓	—

符号	定义	单位
c_p	比定压热容	J/(kg · K)
c_v	比定容热容	J/(kg · K)
$\bar{C}_{p, m}$	摩尔定压热容	J/(kmol · K)
d	火焰稳定器宽度	m, ft
D	直径, 空气阻力	m, N
D	液体燃料液滴直径	micron
$D_{\text{flameholder}}$	火焰稳定器阻力	N, lbf
D_{add}	附加阻力	N, lbf
D_{nacelle}	发动机短舱阻力	N, lbf
D_{pylon}	发动机吊架阻力	N, lbf
D_r	冲压阻力	N, lbf
D_{spillage}	溢流阻力	N, lbf
$D_{\text{aft-end}}$	喷管尾端阻力	N, lbf
D_{boattail}	喷管尾部阻力	N, lbf
$D_{\text{plug-friction}}$	塞式喷管摩擦阻力	N, lbf
D	扩散系数	—
D'	二维或剖面型阻	N/m
e	单位矢量	—
e	比内能	J/kg
e_c, e_t	压气机或涡轮多变效率	—
E	内能	J
E_a	活化能	kcal/mol
f	油气比	—
f_{stoich}	计量油气比	—
F_g	总推力	N, lbf
F_{lip}	唇口吸力	N, lbf