



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

“十二五”国家重点图书规划项目

推进原理与设计

Jet Propulsion Principle and Design

滕金芳 羌晓青 马 威 编著



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

推进原理与设计

Jet Propulsion Principle and Design

滕金芳 羌晓青 马 威 编著



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

内容简介

本书共分 10 章和 1 个附录。前 9 章讲解航空燃气轮机发动机的原理与设计,包括航空燃气涡轮发动机综述、气动热力学基础、航空燃气涡轮发动机的基本工作原理、部件工作原理及其特性、发动机共同工作和控制规律、发动机稳态特性和过渡态特性、发动机总体性能方案设计、发动机结构设计以及发动机部件设计等内容。第 10 章讲解火箭发动机原理,包括火箭发动机概述、主要参数、热力学关系式和喷管理论、液体火箭发动机以及固体火箭发动机等内容。附录讲解叶轮机气动热力学基本方程。

本书可作为航空航天工程专业高年级本科生和航空宇航科学与技术专业研究生的教材使用,亦可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

推进原理与设计/滕金芳,羌晓青,马威编著. —上海:上海交通大学出版社,2015
ISBN 978-7-313-14280-1

I. ①推… II. ①滕…②羌…③马… III. ①航天器—推进系统—研究—高等学校—教材 IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309373 号

推进原理与设计

编 著:滕金芳 羌晓青 马 威

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海万卷印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:554 千字

版 次:2015年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-14280-1/V

定 价:98.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:28

印 次:2015年12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:021-56928211

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、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司董事长）

马德秀（上海交通大学原党委书记、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、中国工程院院士）

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副院长、教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

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（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学原副校长、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（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

金兴明（上海市政府副秘书长、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（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

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 1000 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。

颜 涌 芳

2009 年 12 月 15 日

前 言

《推进原理与设计》是根据上海交通大学航空航天学院 2009 年制订的航空航天工程本科专业培养计划规定编写的教材,可以供航空航天工程专业高年级本科生和航空宇航科学与技术专业研究生作教材使用。本教材讲解航空燃气涡轮发动机与火箭发动机的基本工作原理、结构和设计方面的基础知识,力求让学生在理论和实践上都有所收获,为学生毕业后从事航空航天推进装置的设计、生产、研究、实验和使用维护等工作奠定基础。

本教材的编写特色主要有 3 项。一是针对非航空航天院校的重点大学航空航天工程本科专业而编写。《推进原理与设计》课程内容多,涉及内容至少是航空航天院校的五门课程,包括《叶轮机机械原理》《燃烧与燃烧室》《航空发动机原理》《航空燃气轮机结构设计》和《火箭发动机教程》。为了保证学生在有限的学时里学到更重要、更深入的知识,就必须精炼教学内容,找出推进通用的原理和方法,有所侧重,以点带面组织好;本书推进原理部分的重点内容为航空发动机压气机部件原理(着眼于航空发动机是靠旋转叶片做功的特点),航空发动机部件共同工作、控制规律以及特性(这是航空发动机原理的重点和难点)。二是注重航空发动机设计方法的讲解和实例演练,在原理理论教科书与工程实用设计手册之间搭建了一座桥梁。在掌握推进原理基本知识的基础上,增加了发动机总体性能方案,总体和部件结构设计分析,以及压气机、涡轮、燃烧室三大部件的设计内容,既有设计要求和设计流程方面的介绍,又有原理和设计相结合的实例演练,不仅加深了对发动机原理的理解,而且了解了航空发动机的设计工作,更增强了分析解决科研问题的实际能力。三是民机特色;在国家大飞机立项之际,我国的航空行业迎来了前所未有的发展机遇和挑战,为此书中侧重于大涵道比涡轮风扇发动机(主要应用于大型客机),并着重讲解了其

总体性能、结构和部件设计等多方面的内容。另外本书还简介近期已采用和今后即将采用的航空燃气轮机以及火箭发动机的设计新技术和发展趋势。

本教材共 10 章和 1 个附录。前 9 章讲解航空燃气轮机发动机的原理与设计,第 10 章讲解火箭发动机原理。除第 9 章航空燃气轮机发动机部件设计中 9.2 节涡轮设计由羌晓青和 9.3 节燃烧室由马威执笔外,本书其余内容由滕金芳执笔。

本教材在编写过程中,继承了国内外编写和使用过的多种教材和讲义中的经典内容,并重点参考了北京航空航天大学、西北工业大学和南京航空航天大学航空发动机专业以及哈尔滨工业大学航天专业的相关教材和授课内容,在此表示感谢!

本教材内容虽然已经经过了五年的授课积累,但由于编者水平所限,书中存在的错误、遗漏之处,敬请读者批评指正!

作者

2015 年 10 月

符 号 表

符号	释 义
A	面积
AR	展弦比
a	声速,叶型最大挠度与前缘的距离
B	涵道比
b	弦长
c	比热容,叶型厚度,有效排气速度
C/const	泛指常数
c_p, c_v	比定压热容,比定容热容
C_p	压力系数
C_F	推力系数
C^*	特征速度
C_v	尾喷管速度损失系数
C_{xi}	进气道外阻系数
c_{T0}	相对功率提取系数
d	含湿量
$\bar{d}$	轮毂比
EPR	发动机压比
e	单位质量能量,叶型最大厚度与前缘的距离,压比参数,多变效率,厚度
F	力,推力
F_e	有效推力(安装推力)
F_s	单位推力
D	直径,特征尺寸,扩散因子
e_c	多变效率
f	挠度,油气比

f_v	质量力
f_0	最恰当油气比
$f(\lambda)$	气动函数
H	飞行高度, 高度
H_u	燃油低热值
h	单位质量气体焓, 拉梅系数
h'	转焓
i	攻角
I	容热强度, 冲量
$\mathbf{I}$	单位矩阵
J	转动惯量
k	完全气体比热比
K	常数
K_l	模化系数
K_w	速度比例系数
K_T	经验参数
l	单位质量机械能, 叶片高度, 长度
l^*	特征长度
l_{CH}, l_{CL}	高压压气机功, 低压压气机功
l_{TH}, l_{TL}	高压涡轮功, 低压涡轮功
l_f	流阻损失功
l_u	轮缘功
l_s	比轴功
l_0	1 kg 航空煤油完全燃烧所需理论空气量
L	动量矩
M	扭矩
m	平均子午流线, 质量
Ma	马赫数
MR	质量比
N	叶片数
n	多变指数, 转速, 数目
$n_1(n_L)$	低压转子的转速
$n_2(n_H)$	高压转子的转速
n_s	比转速
$\mathbf{n}$	流线的单位法向矢量, 控制体表面外法向矢量
$OTDF$	燃烧室出口总温的总不均匀度

P	功率
P	平面应力
P_{st}	起动机功率
PLA	油门角度
p	压强
p^*	总压(滞止压力)
q	单位质量气体热量,物理量
Q	加热量
q_v	体积流量
q_m	质量流量(kg/s/m ²)
$q(\lambda)$	流量函数
R	气体常数
r	半径,径向坐标,燃速
Re	雷诺数
$RTDF$	燃烧室出口总温的径向不均匀度
S	转差率,熵,流面
S	变形速度张量
s	比熵,叶片基元栅距
sfc	单位燃油消耗率(耗油率)
SOT	涡轮导向器出口温度
SM	喘振裕度
T	静温
TR	节流比
t	热,时间
u	单位质量气体内能,叶片切线速度
V	体积,试取值
v	比容/比体积,绝对速度
w	相对速度
w_f	肉厚系数
$\dot{W}$	重量流量
W	重量
x	轴向坐标
y	切向坐标
z	径向坐标
X	阻力
Y	载荷参数

Z 级数,残差量

希腊字母

释 义

α	绝对气流角,余气系数,锥角
β	相对气流角
β_y	叶型安装角
β_{1k}	几何进口角
β_{2k}	几何出口角
δ	落后角,叶尖径向间隙,冷却空气量,角度
ξ	损失系数,推进剂质量分数
ε	应变参数,周向倾角,面积比,幅角系数
Δ	增温比,叶排间轴向间隙
γ	径向流面角,叶片安装角,射流角,混合比
η	效率, η 参数,系数
η_{mH}, η_{mL}	高压轴、低压轴机械效率
φ	流量系数,叶型弯角,圆柱坐标系周向方向
λ	速度系数,轴向流面角,导热系数
μ	动力黏度系数,燃气分子量
π	压比,膨胀比
π	应力张量
π_{eco}	最经济增压比
π_{opt}	最佳增压比
θ	叶型弯角,燃烧效率相似准则参数,扩张角,加热比
ρ	密度
σ	总压恢复系数,压应力
τ	稠度,总温比,切应力
τ	黏性应力张量
ω	角速度
$\overline{\omega}$	总压损失系数
χ_1/χ_2	叶型前缘/尾缘角
Ω	反力度
ψ	载荷系数,相对湿度

下标

释 义

a	空气,绝对坐标系下
ad	绝热过程

av	平均值
b	燃烧室, 壁面
C	压气机
c	压缩
CH	高压压气机
CL	低压压气机
ch	堵点
co	工作点(线)
cone	锥形
col	冷却
cor	折合(成标准大气状态下的)量
cr	临界
cs	失速/喘振点(线)
d	设计点, 畸变
D	扩散器
e	有效
eco	经济
eq	当量
f	摩擦, 燃油, 燃料, 最终
F	风扇, 涡扇, 推力
g	燃气, 总的
h	叶根/轮毂
H	高压转子
HPC	高压压气机
HPT	高压涡轮
i	进气道, 轴向, 各个截面, 各个级
id	理想状态
idl	慢车
in	内部
IN	进口
is	等熵过程
j	加力燃烧室, 径向
jet	射流
J	涡喷
k	几何的
L	低压转子

LE	前缘
LPC	低压压气机
LPT	低压涡轮
M	扭矩
m	质量机械,混合,子午分量,中径
mb	主燃烧室
max	最大值
min	最小值
MPC	中压压气机,增压级
N	喷管
n	法向
nb	涡轮导向器喉部
o	工作点(线)
opt	最佳
out	外部
OUT	出口
p	推进,膨胀螺桨,叶片压力面,氧化剂
pol	多变过程,拉伸
R	转叶,辐射
res	停留
r	径向分量
r	转叶
S	风扇,涡扇,静止
s	单位质量的,叶片吸力面,失速/喘振点(线),静叶
st	起动,标准状态,级
T	涡轮
TH	高压涡轮
TL	低压涡轮
t	总的,滞止的,叶尖,热
u	轮缘的,切向分量,切向速度的
w	相对速度的
x	轴向分量,任意点
y	任意点
zh	折合
0	总的,涡轮导向器前,发动机远前方未扰动截面
1	激波前,转叶进口,进气道进口截面,火箭发动机进口

2	激波后,转叶出口,低压压气机或风扇进口,火箭发动机出口
2.5	高压压气机进口
3	静叶出口,高压压气机出口、燃烧室进口
4	燃烧室出口、高压涡轮进口
4.5	低压涡轮进口
5	低压涡轮出口
5 II	外涵气流混合室进口
6	混合室出口,加力燃烧室进口
7	加力燃烧室出口,尾喷管进口截面
8	尾喷管喉部截面
9	尾喷管出口截面
I	涡扇发动机内涵
II	涡扇发动机外涵
Σ	和

上标

释 义

—	无量纲的,进出口平均的
*	总的,滞止的,参考工况的

目 录

第1章 航空燃气涡轮发动机综述 1

1.1 航空发动机的分类与工作特点 1

1.1.1 航空发动机的分类 1

1.1.2 航空燃气涡轮发动机的工作特点 4

1.2 民用客机发动机简介 7

1.3 航空燃气涡轮发动机研制特点与设计概况 11

1.3.1 航空燃气涡轮发动机的研制特点 11

1.3.2 航空燃气涡轮发动机的设计概况 12

参考文献 15

思考和练习题 15

第2章 气动热力学基础 16

2.1 热力学第一定律 16

2.2 热力学第二定律 20

2.3 气体动力学基本方程 21

参考文献 26

思考和练习题 26

第3章 航空燃气涡轮发动机的基本工作原理 27

3.1 航空发动机的主要性能指标 27

3.1.1 推力 27

3.1.2 单位推力 31

3.1.3 推重比和功重比 31

3.1.4 耗油率 32

3.1.5 热效率、推进效率和总效率 33

3.1.6 发动机总效率对飞机燃油利用率的影响 35