

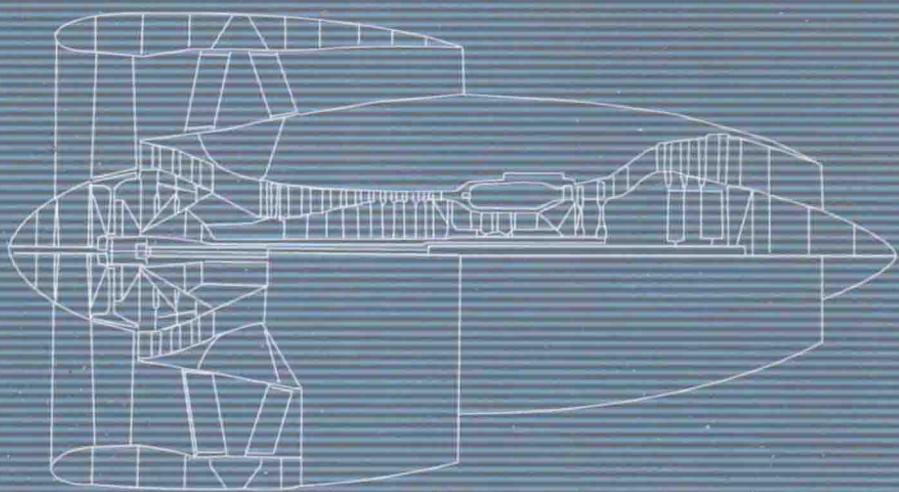
动力机械及工程热物理



国防科工委「十五」规划
教材

现代航空发动机 技术与发展

●张津 洪杰 陈光 主编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

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

现代航空发动机技术与发展

张 津 洪 杰 陈 光 主编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书以现代典型航空涡扇发动机总体性能设计和结构特征分析为重点,分别对先进发动机各主要部件特性、总体性能、先进结构设计、新结构、新工艺、新材料在发动机上的应用和典型结构故障分析进行了系统阐述,同时也探索了现代航空燃气涡轮发动机设计技术的发展方向。

本书内容新颖,反映了近20年来世界先进航空发动机的发展水平,可供大专院校航空发动机、燃气轮机专业高年级本科生、研究生作为教材使用,同时也可供从事有关研究的科技人员、教师、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代航空发动机技术与发展/张津,洪杰,陈光主编.
北京:北京航空航天大学出版社,2006.12
ISBN 7-81077-939-7

I. 现… II. ①张…②洪…③陈… III. 航空发动机 IV. V23

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第164849号

现代航空发动机技术与发展

张津 洪杰 陈光 主编

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:15 字数:336千字

2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

印数:3 000册

ISBN 7-81077-939-7 定价:28.00元

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 蔚 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。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,为发展国民经济作出了重要贡献。

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,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晌。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、仪器科学与技术、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

未来飞机要求更长的航程、更强的任务灵活性、更高的巡航速度、更低的全寿命成本和更大的承载能力；军用战斗机还特别突出机动性和敏捷性的要求。为满足飞机性能的发展要求，现代发动机的发展目标是：更高的推重比、更低的耗油率、更高的可靠性和更低的全寿命期成本。发展先进航空发动机必须采用非常先进的技术，综合考虑气动热力学、结构力学、传热学、燃烧学、声学、控制和材料等学科对推进系统总体性能、结构完整性与可靠性、工作稳定性、可维护性以及成本的影响，解决多学科交叉影响和部件相互干扰引起的问题。本书的主要目的是在掌握现代航空发动机基本工作原理的基础上，阐述现代航空发动机的发展，当代典型高性能发动机的性能、构造的技术特点，发动机设计中多学科的应用，以及研制高性能发动机的难点和关键技术，为读者今后在设计、科研、试验、管理等工作中的创新奠定一定的基础。现代航空发动机广泛采用燃气涡轮发动机。它有多种类型，主要是涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺桨发动机和涡轮轴发动机。由于这些不同类型的发动机具有许多共性，技术发展途径相同，而且本书篇幅有限，所以本书内容只包括军用和民用的涡轮喷气和涡轮风扇发动机。

编写本书的初衷是使其作为研究生专业基础课的教材，适用于航空宇航推进理论与工程和流体机械专业，同时也可作为航空科研院所高级技术人员和技术管理人员提高专业素质进修学习的教材。对于技术主管或总师一级的进修人员，他们对各自从事的专业已具有较深造诣，但还需要对其他相关专业知识也有相当的了解，本书也考虑了他们的需要。根据所面向的读者，本书介绍和分析了现代航空发动机各专业的发展状况和现代航空发动机中的先进设计理念、新技术、新结构和



新工艺,能够为读者在工作中全面地了解航空发动机的技术水平和技术难点,为进一步的专业研究建立一定全局观和技术基础,并提供具体的参考。

本书在编写上突出基本概念,突出典型结构、典型系统方案,突出工程量级及使用要点,突出现代性,兼顾前沿性,并指出了进一步研究的途径和参考资料。

本书的主要内容为:航空发动机基本工作原理;发动机部件工作特点及其关键技术和发展趋势;航空发动机总体性能及其发展趋势;飞机/发动机性能匹配与优化;典型发动机结构分析,新技术、新结构、新材料在发动机上的应用;航空发动机典型结构故障分析。

本书第1章的1.1,1.2节和第2,3,4章由张津教授编写,第1章的1.3,1.4节和第5,6,7章由洪杰教授编写。本书还引用了陈光等多名教授合作编写的高研班教材《现代航空发动机技术与发展》的部分内容,在此向该教材的编写者致谢。

由于作者水平有限,时间也比较仓促,书中如有错误,敬请读者指正。

作者

2006年10月

主要符号表

A	面积, m^2	sfc	耗油率, $kg/(N \cdot h)$
A_C	进气道捕获面积, m^2	sfc _A	安装耗油率, $kg/(N \cdot h)$
A_{01}	进入进气道流量的流管面积, m^2	SM	喘振裕度
A_{0BL}	附面层泄除流量的流管面积, m^2	T	静温, K
A_{0BP}	放气流量的流管面积, m^2	T^*	总温, K
A_{0E}	进入发动机流量的流管面积, m^2	V	速度, m/s
BPR	涵道比	W_K	压缩每千克空气所消耗的功, J/kg
C_{FG}	推力系数	W_T	每千克燃气所作的膨胀功, J/kg
c_p	质量定压热容	D_{in}	进气道阻力, N
C_{DSP}	溢流阻力系数	D_{SP}	溢流阻力, N
C_{DBL}	附面层泄除阻力系数	D_{BP}	放气阻力, N
C_{DBP}	放气阻力系数	D_{BL}	附面层泄除阻力, N
C_{DN}	后体阻力系数	D_N	后体阻力, N
f	油气比	α	余气系数
F	非安装推力, N	α_1	风扇进口导流叶片角度, ($^\circ$)
F_A	安装推力, 推进系统推力, N	α_2	高压压气机静子叶片角度, ($^\circ$)
F_D	冲压阻力, N	γ	空气比热[容]比
F_G	总推力, N	γ'	燃气比热[容]比
F_S	单位推力, $N \cdot s/kg$	δ_1	发动机进口总压和标准大气压力之比
H	飞行高度, m	η	效率
H_u	燃油低热值, kJ/kg	η_t	热效率
Ma	飞行马赫数	η_p	推进效率
n_L	低压转子转速, r/min	η_0	总效率
n_F	风扇转子转速, r/min	θ_1	发动机进口总温和标准大气温度之比
n_H	高压转子转速, r/min	λ	速度系数
P	功率, J	π_F^*	风扇增压比
p	静压, Pa	π_K^*	压气机增压比
p^*	总压, Pa	π_T^*	涡轮膨胀比
PLA	油门角度, ($^\circ$)	π_N	喷管压比

q_m 空气质量流量, kg/s
 q_{mg} 燃气质量流量, kg/s
 q_{mf} 燃油质量流量, kg/s
 q_{mfA} 安装燃油质量流量, kg/s

σ 总压恢复系数
 Φ 流量系数
 C_v 喷管速度损失系数
 R 气体常数, J/(kg · K)

截面符号	意义	下标	意义
0	远前方	in	进气道
01	进气道进口	F	风扇
1	风扇进口	K	压气机
1.1	高压压气机进口	b	燃烧室
2	高压压气机出口	T	涡轮
3	高压涡轮进口	dx	涡轮导向器
3.1	低压涡轮进口	D	外涵管道
4	低压涡轮出口	mix	混合器
5I	内涵混合器进口	AB	加力燃烧室
5II	外涵混合器进口	N	喷管
6	混合器出口	g	燃气的
7	加力燃烧室出口	f	燃油的
8	喷管喉道	j	加力的
9	喷管出口	L	低压的
		H	高压的
		zh	折合的
		cor	换算的
		I	内涵的
		II	外涵的

目 录

第 1 章 航空发动机发展概述

1.1 航空发动机的组成和工作过程	1
1.2 航空发动机的主要性能指标	1
1.2.1 推 力	1
1.2.2 单位推力	3
1.2.3 耗油率	3
1.2.4 推重比和功重比	4
1.2.5 热效率、推进效率和总效率	4
1.2.6 发动机总效率对飞机燃油利用率的影响	5
1.3 航空发动机发展的回顾	6
1.3.1 涡轮喷气发动机使飞机性能大幅度提高	6
1.3.2 涡轮风扇发动机再次改变航空业的面貌	7
1.3.3 大型远程飞机要求发展高涵道比涡轮风扇发动机	9
1.3.4 新型客机要求更可靠的高性能发动机	10
1.3.5 新型战斗机要求发展高推重比发动机	10
1.4 现代军用航空发动机发展	11
1.4.1 军用航空发动机发展	11
1.4.2 第三代战斗机及其发动机	12
1.4.3 第四代战斗机及其发动机	13
1.4.4 第五代发动机的发展	15
思考和练习题	16

第 2 章 发动机部件工作特点及其特性

2.1 压气机和风扇	17
2.1.1 压气机的功能和主要性能指标	17
2.1.2 压气机的工作原理及主要类型	18
2.1.3 压气机出口气流参数计算	20
2.1.4 压气机特性	20
2.1.5 轴流式压气机和风扇的发展趋势	22
2.2 涡 轮	22
2.2.1 涡轮的功能和主要性能指标	22
2.2.2 涡轮的工作原理及主要类型	23
2.2.3 涡轮出口气流参数计算	23



2.2.4	涡轮特性	23
2.2.5	涡轮的关键技术和发展趋势	24
2.3	燃烧室	25
2.3.1	燃烧室的功能和主要性能指标	25
2.3.2	燃烧室出口气流参数计算	26
2.3.3	燃烧室特性	27
2.4	喷管	28
2.4.1	喷管的功能和主要性能指标	28
2.4.2	喷管的不同工作状态	29
2.4.3	喷管出口气流参数计算	31
	思考和练习题	31

第3章 航空发动机总体性能及其发展趋势

3.1	发动机主要设计参数及其对设计点性能参数的影响	32
3.1.1	发动机的热力循环参数	32
3.1.2	空气流量	33
3.1.3	发动机主要设计参数对发动机设计点性能参数的影响	33
3.2	双轴涡喷和涡扇发动机部件的共同工作	36
3.2.1	发动机稳定工作状态的共同工作条件	36
3.2.2	双轴涡喷发动机共同工作方程和共同工作线	36
3.2.3	双轴分排涡扇发动机部件共同工作特点	41
3.2.4	双轴混排涡扇发动机部件共同工作特点	43
3.3	发动机的主要工作状态	44
3.4	双轴涡喷和涡扇发动机的控制规律	46
3.4.1	双轴加力涡喷发动机的控制规律	47
3.4.2	双轴加力涡扇发动机的典型控制规律	50
3.5	双轴涡喷和涡扇发动机的稳态性能	54
3.5.1	共同工作点和发动机性能参数的确定	55
3.5.2	发动机的基本特性	57
3.5.3	影响发动机特性的各种因素	62
3.6	发动机过渡工作状态	71
3.6.1	发动机的加速和减速过程	71
3.6.2	加力接通和切断过程	74
3.6.3	发动机地面启动和空中启动	75
3.7	发动机工作适应性	76
	思考和练习题	77

第4章 推进系统性能及其新技术和新进展

4.1	推进系统的组成	78
-----	---------	----



4.2 进气道和喷管/后体特性	78
4.2.1 进气道特性	78
4.2.2 喷管/后体特性	81
4.3 进气道与发动机的相容性	82
4.3.1 进气道与发动机的流量匹配	82
4.3.2 进气道与发动机的流场匹配	84
4.4 进气道-发动机-喷管的性能匹配与推进系统性能分析	86
4.4.1 飞行条件和发动机工作状态对推进系统性能的影响	87
4.4.2 捕获面积 A_c 的选择对安装推力的影响	88
4.4.3 不同进气道对安装推力的影响	88
4.5 提高推进系统性能的新技术和新进展	89
4.5.1 飞机对发动机性能的要求	89
4.5.2 发动机总体性能的发展趋势	90
4.5.3 循环参数及任务分析	92
4.5.4 变循环发动机	95
4.5.5 推力矢量应用及其对发动机的影响	98
4.5.6 快速推力调节 RTM	103
4.5.7 发动机数字仿真和虚拟技术	103
4.5.8 发动机状态监视与故障诊断	104
4.5.9 经济可承受的通用先进涡轮发动机	106
思考和练习题	108

第 5 章 典型发动机结构分析

5.1 F100 系列涡扇发动机	109
5.1.1 F100 系列发动机的发展	109
5.1.2 结构分析	110
5.2 F110—GE—129 EFE 的发展与设计特点	112
5.2.1 F110 系列发动机的发展	112
5.2.2 结构设计分析	113
5.3 F404 系列涡扇发动机	119
5.3.1 F404 系列发动机	119
5.3.2 F414 发动机设计与研制特点	120
5.4 M88 发动机系列	124
5.4.1 研制概况	124
5.4.2 结构设计分析	126
5.4.3 部件试验和整机试验	130
5.4.4 M88 系列的发展	131
5.5 苏联第三代军用涡扇发动机	133



5.5.1	AJ1-31Φ 涡扇发动机	133
5.5.2	PD-33 涡扇发动机	137
5.6	推重比 10 一级军用涡扇发动机	139
5.6.1	F119—PW—100 涡扇发动机	139
5.6.2	联合攻击机(JSF)计划	146
5.7	PW4000 大涵道比涡扇发动机	147
5.7.1	发展概述	147
5.7.2	结构分析	149
5.8	RB211—535E4 大涵道比涡扇发动机	152
5.8.1	发展概述	152
5.8.2	结构分析	153
5.9	GE90 大涵道比涡扇发动机	158
5.9.1	研制背景	158
5.9.2	总体性能	159
5.9.3	发动机设计特点	160
5.9.4	GE90 的可靠性与维修性	165
	思考和练习题	166
第 6 章 新技术、新结构、新材料在发动机上的应用		
6.1	风 扇	167
6.1.1	空心风扇叶片	167
6.1.2	复合材料的风扇叶片	168
6.1.3	圆弧形榫槽	169
6.1.4	盘-鼓组合式大轮毂	169
6.1.5	风扇包容环	170
6.1.6	复合材料的外涵机匣	170
6.2	高压压气机	171
6.2.1	端弯叶片	171
6.2.2	整体叶盘	171
6.2.3	环形燕尾槽	172
6.2.4	钛合金机匣	172
6.2.5	全钛转子	172
6.2.6	正交叶片	173
6.2.7	机匣开斜槽	174
6.3	燃烧室	175
6.4	涡 轮	176
6.5	转子支承系统	177
6.5.1	挤压油膜	177



6.5.2	弹性支座	178
6.5.3	滚珠、滚棒轴承并列使用	179
6.5.4	防止轴承打滑	180
6.5.5	封严环	181
6.5.6	调整转子轴向力的液压系统	184
6.6	先进发动机润滑系统设计特点	184
6.6.1	传统的润滑系统	185
6.6.2	先进发动机的润滑系统	186
6.7	发动机指示与机组报警系统	188
6.7.1	概 述	188
6.7.2	系统简介	188
6.7.3	告警功能	190
6.7.4	发动机参数显示	190
6.7.5	发动机备用指示器	191
6.7.6	其 他	191
6.8	人素工程在航空发动机维修性设计中的应用	192
6.8.1	HFE/维修性对发动机设计的影响	192
6.8.2	人口统计学在 HFE 中的应用	193
6.8.3	计算机辅助 HFE 分析技术	194
6.8.4	动态模拟模型和实验研究	196
	思考和练习题	197
第 7 章 航空发动机典型结构故障分析		
7.1	故障分析的基本原则和方法	198
7.1.1	基本概念	199
7.1.2	故障分析的原则	199
7.1.3	故障分析工作的内容与方法	200
7.2	航空发动机的几个典型故障分析	203
7.2.1	图—154 发动机非包容低压涡轮转子破裂故障	203
7.2.2	RB211—22B 风扇盘非包容破裂故障	205
7.2.3	WP7 乙涡轮二导叶片变形、烧蚀故障	208
7.2.4	B—1B 的卡环故障	210
7.2.5	F—16 飞机发动机篦齿环断裂	212
7.2.6	F—16 飞机近年发生的故障	213
	思考和练习题	217
参考文献		

第 1 章 航空发动机发展概述

1.1 航空发动机的组成和工作过程

航空燃气涡轮发动机由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管组成(见图 1-1)。气流由进气道进入发动机,压气机使气流增压,在燃烧室喷入燃料燃烧,所产生的热能使气流温度提高。燃烧室出口的高温高压燃气具有很大的作功能力,在涡轮和喷管中膨胀作功。对于涡轮喷气发动机,涡轮膨胀功只用于驱动压气机工作,燃气在喷管中的膨胀功使气流的动能增大,以高速喷出。当发动机的排气速度 V_e 大于飞行速度 V_0 时,说明发动机给气体在加速方向(反飞行方向)以作用力,而气体则给发动机在飞行方向以反作用力,即推力。推力的大小取决于流经发动机的工质质量流量和速度增量($V_e - V_0$)。对于涡轮轴或涡轮螺桨发动机,燃气主要在涡轮中膨胀作功,所产生的涡轮膨胀功一部分用于驱动压气机,另一部分通过输出轴对外输出轴功率。

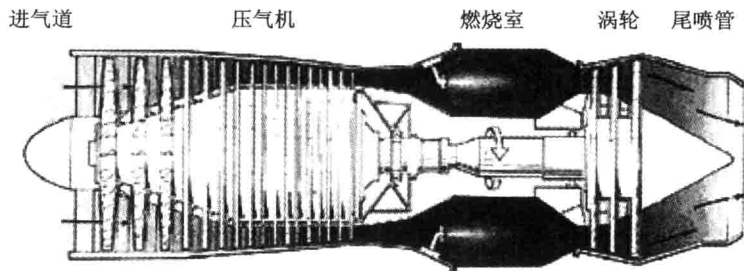


图 1-1 航空涡轮喷气发动机组成图

1.2 航空发动机的主要性能指标

1.2.1 推 力

发动机推力是气流作用在发动机内、外表面上作用力的合力,即发动机所产生的推动飞行器运动的力。在海平面标准大气条件下,发动机在静止状态的推力称为海平面静推力。小型涡轮喷气发动机起飞状态的海平面静推力可以小到 0.5 kN,而大型涡扇发动机的起飞推力可