



普通高校“十一五”规划教材

王 云 编

# 航空发动机原理



北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

# 航空发动机原理

王 云 编

北京航空航天大学出版社

## 内容简介

航空发动机是飞机的“心脏”，航空发动机原理又是航空发动机技术的基础。本书全面、系统地介绍了以燃气涡轮发动机为主的各型航空发动机的基础知识、主要部件的工作原理与功用、发动机性能分析与参数设计等内容，重点突出航空发动机的基本工作原理、基本设计分析方法和设计分析基本技能等内容。本教材的计划学时为40学时，使用时亦可根据专业做适当删减。

本教材为高等学校本科飞行器类专业的教科书，也可供相关专业学生或工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空发动机原理/王云编. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.3

ISBN 978-7-81124-557-8

I. 航… II. 王… III. 航空发动机—高等学校—教材  
IV. V23

## 航空发动机原理

王 云 编

责任编辑 董 瑞

\*

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(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net)

北京市媛明印刷厂印装 各地书店

\*

开本:787×960 1/16 印张:19 字数:426千字

2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-81124-557-8 定价:39.00元

# 前 言

航空发动机是飞机的“心脏”，在很大程度上决定了航空技术的发展水平。纵观航空航天技术的发展，其每一次重大进展都离不开航空发动机技术的发展。由于航空发动机应用的特殊性，它无疑是集中体现了现代动力机械的最先进水平，并代表着新一代动力机械的发展方向。当前，航空发动机的主体仍然是燃气涡轮发动机。燃气涡轮发动机以其功率大、体积小的突出优点在航空动力和其他地面动力工程中得到了广泛的应用。燃气涡轮发动机自问世以来，走过了 60 多年的辉煌历程，使航空动力实现了从活塞发动机到燃气涡轮发动机的飞跃，开创了航空史上的“超声速时代”，并衍生出涡轴、涡扇和桨扇等众多类型的涡轮发动机，极大地促进了现代航空技术的发展。

航空发动机原理是航空发动机及飞行器类专业的一门重要的专业课程，但由于该方面的教材有限，因此一直不能很好地满足教学要求。

本书根据高等院校飞行器动力、飞行器设计等专业人才的培养要求，认真分析了航空发动机原理课程的教学要求，重点突出了航空发动机的基本工作原理、基本设计分析方法和设计分析基本技能等内容，力求通俗易懂，简明扼要，尽量用大量简单图表说明问题；同时适当加入了一些能反映现代航空发动机先进技术和发展方向的内容。

全书共分 11 章，第 1 章主要是与航空发动机原理有关的基础理论知识，可根据专业教学情况选讲；第 2~9 章是本书的主体，主要介绍各型燃气涡轮发动机；第 10 章简要介绍了航空活塞发动机、冲压喷气发动机及火箭发动机；第 11 章介绍了航空发动机的技术现状和技术发展方向；最后在附录中介绍了有关航空发动机的命名方法和世界民用航

空发动机制造商及部分产品的相关知识。

本书继承了原有同类教材的一些优点和精髓,并在此基础上根据长期教学经验对教学内容进行了必要的精简和扩充,同时补充了航空发动机的最新发展和成果,内容更为全面,更具可读性和实用性。

本书在编写过程中,参考了大量的图文及网络资料,在此,谨对提供相关文献的作者深表谢意。由于编者的水平有限,书中的不妥之处,希望广大读者批评指正。

编 者

2008年8月

# 目 录

第 1 章 热力学和气体动力学基础	1
1.1 气体的成分与状态参数	1
1.1.1 气体的成分	1
1.1.2 气体的基本状态参数	2
1.1.3 理想气体的状态方程	2
思考题	3
1.2 气体能量方程	3
1.2.1 概 述	3
1.2.2 气体能量存在的几种形式	3
1.2.3 气体与外界传递的能量形式	4
1.2.4 气体的能量守恒	4
1.2.5 摩擦损失	5
思考题	6
1.3 气体的绝热(压缩或膨胀)过程	6
1.3.1 概 述	6
1.3.2 理想绝热(压缩或膨胀)过程	6
1.3.3 理想绝热功	8
1.3.4 实际绝热(压缩或膨胀)过程	9
1.3.5 实际绝热功	11
思考题	13
1.4 理想绝能流动	14
1.4.1 概 述	14
1.4.2 气体的总参数与静参数	14
1.4.3 声速和速度系数	15
1.4.4 超声速喷管	16
1.4.5 超声速气流绕外钝角的流动	17
1.4.6 应用气体动力学函数进行气流流动计算	21
习 题	23
思考题	23

1.5	附面层概念	24
1.5.1	什么是附面层	24
1.5.2	层流附面层和紊流附面层	25
1.5.3	附面层分离	26
1.6	实际有摩擦的绝能流动	26
1.6.1	摩擦对绝能流动的影响	26
1.6.2	计算用的系数	27
	习 题	28
1.7	动量守恒定律在气体力学中的运用	28
1.7.1	概 述	28
1.7.2	动量方程	28
1.7.3	运用气体动力学函数计算动量	29
	习 题	31
1.8	激 波	31
1.8.1	概 述	31
1.8.2	正激波	32
1.8.3	斜激波	33
1.8.4	圆锥激波	37
	习 题	38
1.9	热力学定律	38
1.9.1	概 述	38
1.9.2	热力学第一定律	38
1.9.3	热力学第二定律	38
1.9.4	理想卡诺循环	39
1.9.5	熵	39
1.10	相似理论	42
1.10.1	概 述	42
1.10.2	燃气轮机中气体定常流动的相似	42
1.10.3	燃气轮机各部件的相似工作	44
1.10.4	燃气轮机的相似工作	50
	思考题	50
<b>第 2 章</b>	<b>航空燃气轮机的工作原理</b>	<b>52</b>
2.1	航空燃气轮机概述	52
	思考题	53

2.2 航空燃气轮机的分类	53
2.2.1 概 述	53
2.2.2 各类航空燃气轮机简图	54
2.2.3 各类发动机截面划分	56
思考题	57
2.3 航空燃气轮机的热机部分——燃气发生器	58
2.3.1 概 述	58
2.3.2 燃气轮机的理想循环分析	58
2.3.3 燃气轮机的实际循环分析	63
2.3.4 压气机最佳增压比和最经济增压比	68
2.3.5 双轴式结构的燃气发生器	68
2.3.6 核心机	69
2.3.7 发展高性能的核心机和燃气发生器的重要意义	69
习 题	69
思考题	70
2.4 涡轮喷气发动机的推力计算	71
2.4.1 概 述	71
2.4.2 发动机推力公式的推导	72
2.4.3 用气动函数表示的推力公式的推导	73
2.4.4 有效推力 $F_{ef}$	73
习 题	76
思考题	76
2.5 航空燃气轮机的推进器部分——尾喷管、螺旋桨、风扇和喷管	77
2.5.1 概 述	77
2.5.2 发动机的推进效率	78
2.5.3 螺旋桨的发展	79
习 题	80
思考题	80
2.6 航空燃气轮机的性能指标	80
2.6.1 推力 $F$ (或功率 $P$ )	80
2.6.2 单位推力 $F_s$	81
2.6.3 单位燃油消耗率 $sfc$ 和总效率	81
2.6.4 推重比	82
2.6.5 单位迎面推力	82



思考题 .....	82
2.7 航空燃气轮机的能量转变和效率 .....	82
2.7.1 航空燃气轮机热效率 .....	83
2.7.2 发动机推进效率 .....	83
2.7.3 发动机总效率 .....	84
<b>第3章 进气道、压气机和涡轮</b> .....	<b>85</b>
3.1 压气机 .....	85
3.1.1 离心式压气机 .....	85
3.1.2 轴流式压气机 .....	86
3.1.3 轴流式压气机基元级加功增压原理以及提高压气机基元级增压比的重要性及其途径 .....	88
3.1.4 流动损失和基元级效率 .....	91
3.1.5 超声级和跨声级压气机 .....	92
3.1.6 压气机基元级沿叶高的变化 .....	94
3.1.7 轴流式压气机基元级叶片的攻角和落后角 .....	94
3.1.8 轴流式压气机旋转失速和喘振以及防止喘振发生的方法 .....	95
3.1.9 压气机特性 .....	97
习 题 .....	100
思考题 .....	100
3.2 涡轮 .....	101
3.2.1 涡轮结构简介 .....	101
3.2.2 气流通过涡轮基元级膨胀做功原理 .....	102
3.2.3 增大基元级涡轮功的途径 .....	105
3.2.4 流动损失和基元级效率 .....	106
3.2.5 涡轮特性 .....	106
3.2.6 对转涡轮 .....	107
思考题 .....	108
3.3 进气道 .....	109
3.3.1 概 述 .....	109
3.3.2 亚声速进气道 .....	109
3.3.3 超声速进气道 .....	111
3.3.4 超声速进气道特性 .....	113
思考题 .....	115

<b>第 4 章 燃烧室、加力燃烧室和尾喷管</b> .....	116
4.1 燃烧的基本知识 .....	116
4.1.1 油气比在一定的范围内才能进行燃烧 .....	116
4.1.2 火焰周围气流速度必须低于火焰传播速度 .....	116
4.2 主燃烧室 .....	116
4.2.1 主燃烧室为组织火焰、稳定燃烧所采取的结构措施 .....	117
4.2.2 主燃烧室的点火装置 .....	119
4.2.3 主燃烧室的结构形式 .....	119
4.2.4 主燃烧室的基本性能要求 .....	122
4.2.5 主燃烧室特性 .....	124
思考题 .....	127
4.3 加力燃烧室 .....	128
4.3.1 概 述 .....	128
4.3.2 加力燃烧室工作过程和主要零组件 .....	129
4.3.3 振荡燃烧及其消除方法 .....	130
4.3.4 加力燃烧室基本性能要求 .....	131
思考题 .....	131
4.4 尾喷管 .....	131
4.4.1 概 述 .....	131
4.4.2 亚声速喷管与超声速喷管 .....	132
4.4.3 喷管流动损失的计算 .....	133
4.4.4 尾喷管的结构形式 .....	135
4.4.5 尾喷管特性 .....	136
思考题 .....	137
<b>第 5 章 单轴涡轮喷气发动机</b> .....	138
5.1 稳态工作时各部件的相互制约关系 .....	138
5.1.1 概 述 .....	138
5.1.2 压气机与涡轮流量相等的条件 .....	139
5.1.3 压气机功与涡轮功相等的条件 .....	141
5.1.4 通过涡轮与尾喷管流量相等的条件 .....	142
思考题 .....	145
5.2 设计状态下各部件的相互匹配关系 .....	145
5.2.1 什么是部件匹配 .....	145
5.2.2 压气机与涡轮的匹配工作 .....	146

5.2.3	其他部件的匹配工作	147
	思考题	148
5.3	单轴涡喷发动机的调节规律	148
5.3.1	概 述	148
5.3.2	最大工作状态调节规律	149
5.3.3	被调参数和调节中介	154
5.3.4	巡航状态调节规律	155
	思考题	157
5.4	发动机特性	157
5.4.1	概 述	157
5.4.2	单轴涡轮喷气发动机的飞行特性	158
5.4.3	单轴涡轮喷气发动机的节流特性	165
	思考题	172
5.5	发动机特性的获取方法	174
5.5.1	用试验的方法确定发动机的特性	174
5.5.2	用相似理论换算发动机的特性	177
	思考题	187
5.6	过渡工作状态	187
5.6.1	涡轮喷气发动机的起动过程	187
5.6.2	涡轮喷气发动机的加速过程	189
5.6.3	涡轮喷气发动机的减速过程	191
	思考题	191
5.7	发动机加力	192
5.7.1	概 述	192
5.7.2	喷射液体加力	192
5.7.3	复燃加力	194
5.7.4	复燃喷水加力	203
	思考题	203
<b>第 6 章</b>	<b>双轴涡轮喷气发动机</b>	<b>205</b>
6.1	双轴涡轮喷气发动机防喘原理和性能优点	205
	思考题	209
6.2	稳态下各部件的相互制约	210
6.2.1	低压压气机特性图上共同工作线的位置	210
6.2.2	尾喷管临界截面积的大小对双轴发动机工作的影响	210

思考题.....	211
6.3 设计状态下的部件匹配 .....	211
6.3.1 高压转子 .....	211
6.3.2 低压转子 .....	212
6.4 双轴发动机的调节规律 .....	212
6.5 双轴发动机的特性 .....	214
6.5.1 转速特性 .....	214
6.5.2 速度特性 .....	215
6.5.3 高度特性 .....	217
思考题.....	217
6.6 双轴发动机的台架调试 .....	217
6.6.1 台架调试的依据——标准发动机 .....	218
6.6.2 台架调试的要求 .....	218
6.6.3 台架调试的具体步骤 .....	218
思考题.....	219
<b>第7章 涡轮风扇发动机</b> .....	<b>220</b>
7.1 涡轮风扇发动机概述 .....	220
思考题.....	221
7.2 各类涡轮风扇发动机 .....	221
7.2.1 后风扇涡轮风扇发动机 .....	221
7.2.2 前风扇涡轮风扇发动机 .....	221
7.3 涡轮风扇发动机的性能指标 .....	223
7.4 涡轮风扇发动机的设计参数选择 .....	224
7.4.1 内涵燃气发生器设计参数选择 .....	224
7.4.2 分排涡扇发动机功分配系数 $x$ 和涵道比 $B$ 的选择 .....	225
7.4.3 混排涡扇发动机功分配系数 $x$ 和涵道比 $B$ 的选择 .....	228
思考题.....	228
7.5 涡轮风扇发动机部件相互制约和部件匹配 .....	229
7.5.1 分开排气双轴涡轮风扇发动机 .....	229
7.5.2 混合排气双轴涡轮风扇发动机 .....	230
思考题.....	231
7.6 涡轮风扇发动机特性 .....	232
7.6.1 涡轮风扇发动机的飞行特性 .....	232
7.6.2 涡轮风扇发动机的油门特性 .....	233

思考题	233
<b>第8章 涡轮螺桨发动机</b>	<b>235</b>
8.1 涡轮螺桨发动机概述	235
思考题	236
8.2 涡轮螺桨发动机的分类	236
8.2.1 单轴式涡轮螺桨发动机	237
8.2.2 分轴式涡轮螺桨发动机	237
思考题	238
8.3 涡轮螺桨发动机的性能指标	238
思考题	239
8.4 涡轮螺桨发动机的可用功分配	239
8.4.1 涡轮螺桨发动机设计参数的选择	239
8.4.2 涡轮螺桨发动机的可用功优化分配	240
思考题	241
8.5 涡轮螺桨发动机的调节规律	241
8.5.1 变矩螺桨	241
8.5.2 最大工作状态调节规律	242
8.5.3 巡航状态调节规律	242
8.6 涡轮螺桨发动机特性	243
8.6.1 涡轮螺桨发动机的飞行特性	243
8.6.2 涡轮螺桨发动机的油门特性	245
思考题	245
<b>第9章 涡轮轴发动机</b>	<b>246</b>
9.1 涡轮轴发动机概述	246
思考题	248
9.2 涡轮轴发动机的结构	248
9.2.1 涡轮轴发动机与涡轮螺桨发动机的比较	248
9.2.2 涡轮轴发动机的结构形式	248
思考题	248
9.3 涡轮轴发动机的性能参数	249
9.4 涡轮轴发动机的部件特点	250
9.4.1 进气道	250
9.4.2 压气机	250
9.4.3 燃烧室	251

9.4.4	涡轮	252
9.4.5	尾喷管	252
9.4.6	减速器	252
	思考题	253
9.5	涡轮轴发动机的调节规律和特性	253
9.5.1	涡轮轴发动机燃气发生器设计参数的选择	253
9.5.2	可用功分配	253
9.5.3	涡轮轴发动机的调节规律	253
9.5.4	涡轮轴发动机的节流特性	254
9.5.5	涡轮轴发动机的高度特性	254
	思考题	254
<b>第 10 章</b>	<b>其他航空发动机简介</b>	<b>256</b>
10.1	航空活塞式发动机	256
10.1.1	活塞式发动机的主要组成	256
10.1.2	活塞式发动机的工作原理	257
10.1.3	活塞式航空发动机的辅助工作系统	258
10.2	冲压喷气发动机	259
10.2.1	亚声速冲压发动机	259
10.2.2	超声速冲压发动机	259
10.2.3	高超声速冲压发动机	260
10.3	火箭发动机	260
10.3.1	固体火箭发动机	260
10.3.2	液体火箭发动机	261
<b>第 11 章</b>	<b>航空发动机发展回顾与展望</b>	<b>262</b>
11.1	引 言	262
11.2	发展回顾	262
11.2.1	活塞式发动机——开创动力飞行新纪元	262
11.2.2	燃气涡轮喷气发动机——开创了航空发展的“喷气时代”	265
11.2.3	涡轮风扇发动机——再次改变了航空业的面貌	266
11.2.4	涡桨/涡轴发动机——满足航空动力多样化需求	267
11.2.5	新一代发动机——发展性能更好的发动机	269
11.2.6	航空动力未来展望	270
11.3	航空发动机新技术的发展方向	276
11.3.1	核心机——先进涡轮燃气发生器计划	276

---

11.3.2	完整性——结构完整性大纲	277
11.3.3	综合化——飞机推进分系统综合计划	277
11.3.4	节能——E3 计划	277
11.3.5	超燃——超声速燃烧发动机技术计划	278
11.4	航空发动机新技术发展的支柱	278
附录一	美、英、中三国航空涡轮发动机型号命名方法	279
F1.1	美国命名法	279
F1.2	英国命名法	281
F1.3	我国航空发动机命名法	281
附录二	世界民用航空发动机制造商及部分产品简介	282
F2.1	三大航空发动机制造商	282
F2.2	新兴发动机制造商	286
参考文献		288

# 第 1 章 热力学和气体动力学基础

## 1.1 气体的成分与状态参数

### 1.1.1 气体的成分

所研究的气体是航空燃气轮机中作为工作介质的空气和燃气。

空气是由多种气体成分组成的,空气中含有的各种气体成分在不同地点以及离地面不同的高度上是不完全相同的,而且空气是在随时流动变化着。但是空气成分的微小差别并不影响燃气轮机的工程计算。

空气中主要成分为氮( $N_2$ )、氧( $O_2$ )和氩(Ar),其所占容积百分比如表 1-1 所列。

在一般的计算过程中,可以认为空气是由  $N_2$  和  $O_2$  所组成的,其各占容积百分比如表 1-2 所列。

表 1-1  $N_2$ 、 $O_2$  与 Ar 所占容积百分比

成分	$N_2$	$O_2$	Ar
容积百分比/%	78.03	20.99	0.98

表 1-2  $N_2$  与  $O_2$  所占容积百分比

成分	$N_2$	$O_2$
容积百分比/%	79	21

燃气是空气与燃料进行燃烧后的气体产物。燃气的成分随着燃料化学成分的不同以及燃料与空气混合比例的不同有很大的差异。

在燃气轮机中,由于燃气温度受到涡轮部分材料耐热性的限制,燃烧时空气量往往大于理论所需的空气量。实际空气量与理论所需空气量之比称为空气系数或称为余气系数,用  $\alpha$  表示,即

$$\alpha = \text{燃烧时实际空气量} / \text{理论所需空气量}$$

或者说燃烧时实际供油量往往小于将空气中的氧气完全烧完的理论所需供油量。实际供油量与理论所需供油量之比称为燃料系数,以  $\beta$  表示,即

$$\beta = \text{实际供油量} / \text{将空气中氧气完全烧完理论所需供油量}$$

在燃气轮机中, $\beta$  在 0 到 1 之间变化, $\beta=0$  就是未经燃烧的空气。

燃气的成分不同,其折合分子量亦不相同。



### 1.1.2 气体的基本状态参数

气体是由大量运动着的气体分子组成。在研究气体的性质时,把气体作为宏观物体来研究。

在燃气轮机的工作过程中,气体与外界不断有热量和机械能的交换,气体的状态不断地变化。表示气体状态的参数有压力、温度和比容,这三个参数是气体的基本状态参数。

飞机和航空燃气轮机的设计计算都需要知道离地面不同高度上的空气状态参数。但是空气的状态参数随着地点和时间的不同在不断变化。为了便于计算,根据测量和统计,编制标准大气表,供计算时查用。

### 1.1.3 理想气体的状态方程

只有当气体压力不太大和温度不太低的时候,才可以近似地把气体看作理想气体,这时候可以忽略气体分子本身的体积和分子间的引力。如果气体的压力很大且温度很低时,气体比容大大减小,分子间距离缩小,分子本身的体积以及分子间的引力作用就不能忽视。当压力增高或温度降低到一定程度时,气体就将液化。

空气和燃气在航空燃气轮机中的工作压力不超过  $5 \times 10^6$  Pa,温度不低于  $-60$  °C,可以看做是理想气体。

根据实验结果,可以推导得到理想气体的状态方程,即理想气体状态参数间的一般关系式如下:

$$pV = RT$$

式中, $R$  称为气体常数。气体常数  $R$  与气体容积有直接关系。

在物理学的标准大气条件下( $p=101\ 325$  Pa 和  $t=0$  °C),1 kg 分子量理想气体的容积为  $22.4$  m<sup>3</sup>。在工程的标准情况下( $p=98\ 066.5$  Pa 和  $t=15$  °C),1 kg 分子量理想气体的容积为  $24.4$  m<sup>3</sup>。由此,可以求得 1 kg 分子量的气体常数  $R$ ,即

$$R = \frac{pV}{T} = \frac{101\ 325 \times 22.4}{273} = 8\ 313.8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

这个气体常数  $R$  称为通用气体常数,因为它对于任何分子量的气体都是通用的。

在工程计算中常常讨论质量为 1 kg 的气体,此时理想气体状态方程应为

$$pV = \frac{1}{\mu}RT$$

式中, $\mu$  为该理想气体的千克分子量,例如空气的千克分子量为 28.97,空气作为理想气体的状态方程为

$$pV = \frac{8\ 313.8}{28.97}T$$