

喷气发动机原理

[苏] A.П. 克萊什金 著

國防工業出版社

喷 气 发 动 机 原 理

〔苏〕 A.П. 克莱什金 著

秦 鹏 译

内 容 简 介

本书讲述了各种民用型喷气发动机（包括涡轮喷气、涡轮螺旋桨和涡轮风扇）的设计点工作过程、调节原理和工作特性。分析了飞机发动机的节流特性和高度速度特性，并研究了各种工作条件对它们的影响。

本书可作为航空院校的教学参考书，也可作为发动机设计方面的工程技术人员参考书。

全书编入了12张表格，376幅图和34本参考书。

Теория Воздушно-Реактивных Двигателей

А. Л. Клиацкин

Издательство «Машиностроение» Москва. 1969

*

喷气发动机原理

〔苏〕 А. Л. 克莱什金 著

秦 鹏 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业专业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张14⁷/₈ 383 千字

1977年10月第一版 1977年10月第一次印刷 印数：0,001—4,000册

统一书号：15034·1547 定价：1.85元

出版者的话

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，我们将俄文版《喷气发动机原理》一书的英译本翻译成中文，供有关方面的同志参考。

书中主要讲述了各种民用型喷气发动机（包括涡轮喷气、涡轮螺桨和涡轮风扇）的设计点工作过程、调节原理和工作特性。

目前，函道风扇涡轮喷气发动机有了很快的发展，本书特别注意地介绍了这方面的原理和特性，但讲的不够深入。

由于书中某些图片不清及实用意义不大，故作了删略，其中个别章节也做了删节。

书中错误和不妥之处不少，欢迎读者批评指正。

字头和缩写语表

英 文	俄 文	含 义
VRD	БРД	空气喷气发动机
TRD	ТРД	涡轮喷气发动机
RTD	РТД	涡轮喷气发动机
TVD	ТВД	涡轮螺旋桨发动机
GTD	ГТД	燃气涡轮发动机
MKGSS	МКГСС	米-千克重-秒制
SI	СИ	国际单位制
PVRD	ПВРД	冲压发动机
PuVRD	ПуВРД	脉冲喷气发动机
RPD	РПД	火箭-冲压喷气发动机
MRD	МРД	带活塞驱动机的喷气发动机
TRDF	ТРДф	加力式涡轮喷气发动机
TPD	ТПД	涡轮冲压喷气发动机
DTRDF	ДТРДф	带补燃的涵道风扇发动机
RDTT	РДТТ	固体推进剂火箭发动机
ZhRD	ЖРД	液体推进剂火箭发动机
UPS	УПС	附面层控制
VTOL	СВВП	垂直起落飞机
DTRD	ДТРД	涵道风扇涡轮喷气发动机
TVID	ТВлД	涡轮风扇发动机
PTV	ПТВ	涡轮冲压喷气发动机●
ZOT	ЗОТ	回流区
s. a	c. a	涡轮导向器
RUD	РУД	发动机操纵杆
TK	ТК	涡轮压气机

● 见图 1.3 下面的英译者注

英 文	俄 文	含 义
LRR	ЛРР	工作状态线
VD	ВД	高压
ND	НД	低压
KND	КНД	低压压气机
KVD	КВД	高压压气机
TND	ТНД	低压涡轮
TVD	ТВД	高压涡轮
RDST	РДСТ	混合燃料火箭发动机
RD	РД	喷气发动机
SG	СГ	超音速燃烧
DGTD	ДГТД	函道风扇燃气涡轮发动机
KTA	КТА	燃料控制部件
ISA	MCA	国际标准大气条件
VPP	ВПП	跑道
GSV	ГСВ	压缩空气发生器
RSA	РСА	涡轮导向器的调节
RRS	РРС	喷口的调节
R.S	P.C	喷气流
T	Т	涡轮
V	В	第二路
p. v	п. в	前风扇
z. v	з. в	后风扇
n. a	н. а	导向叶片
SMS	СМС	主航线飞机
SMVL	СМВЛ	短航线飞机
m. d	м. д	主发动机
p. d	п. д	升力发动机

前 言

本书公诸于读者，想使它作为民航学院有关专业学生的教科书。本书是根据民航学院航空发动机原理课程大纲编写的。

本书编写过程中，作者总结了 20 年来讲授航空发动机原理课程的教学经验。

本书分七部分（共 26 章）。

第一部分（共 3 章）介绍了用于民航的喷气发动机的一般知识（设计、工作原理、空气喷气发动机的分类、空气喷气发动机发展简史）。

第二部分（共 5 章）介绍了推力公式，考察了空气喷气发动机的热力学循环以及函道风扇空气喷气发动机基本部件中的工作过程，但压气机和涡轮中的工作过程除外，众所周知，这部分内容在叶轮机课程中作详细研究。

第三部分（共 5 章）中专门研究涡轮喷气发动机原理。首先考察工作过程参数对涡轮喷气发动机单位参数和效率的影响，然后说明调节的热力学基础并考察涡轮喷气发动机的各种工作特性（节流特性、高度特性和速度特性）。

第四部分（共 3 章）叙述加力涡轮喷气发动机和冲压喷气发动机原理。

第五部分（共 3 章）详细探讨双路涡轮喷气发动机原理。其中包括外函参数对函道风扇喷气发动机单位参数的影响以及各种不同类型和设计方案的函道风扇涡轮喷气发动机的工作特性。

第六部分（共 3 章）讨论涡轮螺桨发动机（包括带回热装置的涡轮螺桨发动机）的热力学特点和工作特性。

最后，第七部分（共 4 章）讨论几种航空燃气轮发动机的特

殊的特性包括起动过程和过渡过程, 噪音级的特性以及燃气轮发动机的技术经济特性。

空气喷气发动机的一般原理是按照 B. C. 斯捷金 及其学生们所提出的循环有效功的方法来叙述的。

根据课程要求, 本书的内容在详细分析航空燃气轮发动机工作特性以及说明发动机中进行的过程的物理规律性时具有业务上的参考作用。

本书中度量单位采用 MKGSS (米·千克重·秒) 制。因为目前的热力学和叶轮机课程尚未进行合理的改革, 而国际单位系统中也缺少必要的参考资料。

本书编入了 12 张表格, 376 幅图和 34 本参考书。

符 号

p ; T ; γ ; ρ —— 分别代表压力, 温度, 比重, 密度

V —— 速度

M_0 —— 飞行马赫数

H —— 飞行高度

R —— 反作用推力; 气体常数

$R_{y\pi}$ —— 单位推力

$C_{y\pi}$ —— 单位燃油消耗量

C_e —— 有效燃油消耗量

$R_{\text{лоб}}$ —— 迎面推力

$\gamma_{\text{дб}}$ —— 发动机比重

$\pi = e^{\frac{k}{k-1}}$ —— 压缩 (膨胀) 比

δ ; Δ —— 循环中气体的加热比

G_B —— 空气质量流量

G_r —— 燃气质量流量

G_T —— 燃油质量流量

α —— 能量分配系数

γ —— 函道比 (内外函空气分配系数); 引射系数

α ; γ —— 外函参数

N_K ; N_T —— 分别为压气机和涡轮功率

N_e —— 有效功率

$N_{y\pi}$ —— 单位功率

n —— 转速; 多变指数

u —— 圆周速度

α —— 余气系数

m_T —— 相对燃油消耗量

$\xi_{K.C}$ —— 燃烧完全系数

L_{ad} —— 绝热功

$L_{\text{пoл}}$ —— 多变功

L_r —— 摩擦功

L_1, L_K, L_P, L_c —— 分别代表涡轮功, 压气机功, 膨胀功, 压缩功

L_e —— 循环有效功

q_{BH} —— 1 公斤空气的燃油热化学能

q_I —— 对 1 公斤空气的加热量 (供热)

q_{II} —— 每 1 公斤空气的散热量 (排热)

η —— 效率

$\eta_K, \eta_T, \eta_P, \eta_c$ —— 分别代表压气机效率, 涡轮效率, 膨胀效率, 压缩效率

η_B —— 螺旋桨效率

η_e —— 有效效率

η_R —— 推进效率

η_0 —— 总效率

c —— 燃气速度

a —— 音速

M —— 马赫数

D —— 直径

l, x —— 长度

f —— 横截面积

c_p, c_v —— 分别代表定压比热和定容比热

$k = c_p / c_v$ —— 比热比

$\bar{d}$ —— 轮毂比

ϕ —— 速度系数

i —— 焓

β —— 放气 (空气或燃气) 系数

σ^* —— 总压恢复系数

$\Pi(\lambda); q(\lambda); \mu(\lambda); z(\lambda); y(\lambda)$ —— 气动函数

注 角

* —— 气流滞止参数

I, II —— 分别代表第一路和第二路参数

ϕ —— 加力

к: т —— 压气机, 涡轮

пр —— 换算

0 —— 地面状态 ($V=0$)

p, c —— 膨胀, 压缩

B —— 螺旋

R —— 推力

e —— 有效的

p. c —— 反作用 (排气) 喷管

к. с —— 燃烧室

ϕ . к —— 加力燃烧室

н. а —— 导向叶片

с. а —— 涡轮导向器

св. э —— 自由能

см —— 混合

к. см —— 混合室

p. o —— 计算的

ид —— 理想

лоб —— 迎面

кр —— 临界

- ø — 有效的, 引射器
- л — 扩压器
- 0 — 可用的, 初始的
- н — 外部的
- в — 内部的
- ад — 绝热的
- пол — 多变的
- уд — 单位的
- дв — 发动机
- вх — 进口
- В. С — 出口
- Т. В — 螺旋的涡轮
- Т. К — 压气机的涡轮

主要的流通截面

- Н, О — 扰动气流表面
- 1 — 压气机进口
- 2 — 压气机出口 (燃烧室进口)
- 3 — 燃烧室出口
- 4 — 涡轮出口
- 4_φ — 加力燃烧室出口
- 5, 5_φ — 喷管出口
- СМ, 3 — 混合室出口 (引射器的)

目 录

字头和缩写语表	11
前言	13
符号	15

第一部分 喷气发动机概论

第一章 喷气发动机的工作原理、结构和分类	19
----------------------------	----

1.1 反作用力和喷气发动机的概念	19
1.2 反作用发动机的分类	20
1.3 喷气发动机的方案、结构和工作原理	25

第二章 喷气发动机发展简史 (略)	
-------------------	--

第三章 喷气发动机的推力和基本参数	31
-------------------------	----

3.1 喷气发动机推力定理	31
3.2 涡轮喷气发动机推力的反向和转向	36
3.3 涡轮喷气发动机(空气喷气发动机)的基本参数	39

第二部分 喷气发动机的热力循环和工作过程

第四章 空气喷气发动机的热力循环	42
------------------------	----

4.1 喷气发动机的理想循环 ($p = \text{常数}$)	42
4.2 喷气发动机的实际循环	44
4.3 压缩过程的效率	48
4.4 膨胀过程的效率	50
4.5 空气喷气发动机的其他理想循环	51

第五章 喷气发动机的进气系统	55
----------------------	----

5.1 进气装置的功用和要求	55
5.2 进气道(扩压器)的热力过程	59
5.3 标准亚音速扩压器在超音速飞行时的工作	61

5.4	超音速扩压器 (设计状态)	63
5.5	超音速扩压器部分载荷状态下的工作	67
5.6	超音速扩压器的特性	72
5.7	超音速扩压器和压气机的共同工作	77
5.8	涡轮喷气发动机 (TPД) 超音速扩压器的调节	78
第六章 喷气发动机燃烧室		81
6.1	燃烧室的任务	81
6.2	燃烧室的基本要求和基本参数	82
6.3	燃烧室的设计和工作原理。燃烧室的类型	85
6.4	燃烧室中的压力变化	90
6.5	影响燃油燃烧完全程度和燃烧稳定性的因素	96
6.6	燃烧室中的相对燃油消耗量的确定	100
第七章 喷气发动机的排气系统		101
7.1	喷气发动机排气系统的功用和基本要求	101
7.2	喷管的排气过程	102
7.3	估算喷管内损失的各种方法	104
7.4	发动机工作过程的调节	106
7.5	超音速飞行时喷管的调节	108
7.6	尾喷管的气动和设计简图	114
7.7	发动机排气系统的底部 (尾部) 阻力的概念	120
第八章 喷气发动机的混合室		122
8.1	喷气发动机中气流混合的基本原理	122
8.2	圆筒形混合室中的混合过程	128
 第三部分 涡轮喷气发动机		
第九章 涡轮喷气发动机工作过程参数对单位参数		
和效率的影响		133
9.1	涡轮喷气发动机的实际循环功 (内功)	133
9.2	涡轮喷气发动机的单位推力	141
9.3	工作过程参数对涡轮喷气发动机效率的影响	144
9.4	工作过程参数对单位燃料消耗量的影响	152

第十章 涡轮喷气发动机调节的热力原理 157

10.1 航空发动机工作特性的概念 157

10.2 发动机的调节规律 161

10.3 涡轮喷气发动机中涡轮和压气机的共同工作 165

第十一章 涡轮喷气发动机的节流特性 173

11.1 涡轮喷气发动机的节流特性的概念 173

11.2 几何尺寸不变的涡轮喷气发动机的节流特性 175

11.3 特殊调节的涡轮喷气发动机的节流特性 186

11.4 涡轮喷气发动机可能的工作状态范围 192

11.5 压气机的不稳定工作(喘振) 193

11.6 涡轮喷气发动机基本工作过程的命名 198

11.7 外界大气条件对涡轮喷气发动机工作的影响 200

11.8 气动相似理论在涡轮喷气发动机上的应用 202

第十二章 涡轮喷气发动机的速度特性 210

12.1 没有加力燃烧室的单轴涡轮喷气发动机的速度特性 210

12.2 双轴涡轮喷气发动机速度特性的特点 225

第十三章 涡轮喷气发动机的高度特性 227

13.1 没有加力燃烧室的单轴涡轮喷气发动机的高度特性 227

第四部分 加力涡轮喷气发动机、

冲压式喷气发动机

第十四章 加力的方法 233

14.1 加力的概念 233

14.2 燃气轮发动机的加力方法 233

14.3 各种加力方法的比较 238

第十五章 带加力燃烧室的涡轮喷气发动机 239

15.1 带加力燃烧室的涡轮喷气发动机工作过程的特点 240

15.2 带加力燃烧室的涡轮喷气发动机工作过程参数对
单位参数的影响 244

15.3 带加力燃烧室的涡轮喷气发动机的高度-速度特性的特点 253

第十六章 冲压式喷气发动机 256

16.1 冲压式喷气发动机的简图和分类 256

16.2 冲压式喷气发动机的实际循环 258

16.3 工作过程参数和飞行参数 (T_3^* , σ_2^* 或 η_p , η_c , M_0)
对冲压式喷气发动机单位参数的影响 260

16.4 冲压式喷气发动机的特性 267

第五部分 函道风扇发动机

第十七章 航空函道风扇燃气轮发动机的

基本工作原理和分类 273

17.1 航空函道风扇燃气轮发动机的概念 273

17.2 函道风扇喷气发动机质量附加 (质量传递) 原理 275

17.3 函道风扇喷气发动机的能量转换原理 279

17.4 函道风扇发动机工作原理及其分类 281

17.5 函道风扇发动机的热力循环 288

17.6 函道风扇发动机的基本参数 296

第十八章 不加力式和加力式函道风扇发动机

的热力性质 299

18.1 不加力式函道风扇发动机的函道参数对单位参数的影响 ... 299

18.2 函道风扇发动机的工作过程参数对单位参数和无因次
参数的影响 308

18.3 不加力式函道风扇发动机的热平衡 311

18.4 加力式函道风扇发动机的热力性质 312

18.5 气流混合式函道风扇发动机 324

第十九章 函道风扇发动机的工作特性 325

19.1 函道风扇发动机调节的热力基础 325

19.2 函道风扇喷气发动机的节流特性 340

19.3 函道风扇喷气发动机的速度特性 352

19.4 函道风扇发动机的高度特性 361

19.5 高函道比的函道风扇发动机的工作特性的特点 364

19.6 函道风扇发动机起飞时的加力 369

第六部分 涡轮螺桨发动机

第二十章 涡轮螺桨发动机的设计简图及其分类、

涡轮螺桨发动机的基本参数	371
--------------------	-----

20.1 涡轮螺桨发动机的设计简图和工作原理	371
------------------------------	-----

20.2 涡轮螺桨发动机的基本参数	375
-------------------------	-----

20.3 涡轮螺桨发动机中燃气膨胀过程的特点	380
------------------------------	-----

第二十一章 工作过程参数对涡轮螺桨发动机

基本参数的影响	382
---------------	-----

21.1 涡轮螺桨发动机循环功在螺桨和反作用 气流间的最佳分配	382
--	-----

21.2 涡轮螺桨发动机工作过程参数对单位参数、 效率和有效燃料消耗量的影响	388
---	-----

21.3 涡轮螺桨发动机中回热的应用	391
--------------------------	-----

第二十二章 涡轮螺桨发动机的工作特性

22.1 涡轮螺桨发动机的节流特性	397
-------------------------	-----

22.2 涡轮螺桨发动机的速度特性	408
-------------------------	-----

22.3 涡轮螺桨发动机的高度特性	417
-------------------------	-----

第七部分 航空燃气轮机的特殊工作特性

第二十三章 燃气轮机的起动和过渡状态

23.1 燃气轮机的起动	421
--------------------	-----

23.2 燃气轮机的过渡状态	425
----------------------	-----

23.3 燃气轮机的加速性	427
---------------------	-----

第二十四章 工作条件对航空燃气轮机特性的影响

24.1 各种工作因素对涡轮喷气（涡轮冲压）发动机 的工作状态和参数的影响	429
--	-----

24.2 外界大气温度低时，发动机推力的限制	433
------------------------------	-----

24.3 大气湿度对航空燃气轮机参数的影响	435
-----------------------------	-----

24.4 推力反向对涡轮喷气发动机工作的影响	436
------------------------------	-----

24.5 航空燃气轮机的使用寿命和可靠性	438
----------------------------	-----

24.6 从航空燃气轮机中引出压缩空气	441
---------------------------	-----