

工程热力学

高等学校教材

吉林工业大学

热工教研室

华自强 等编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是在第一版的基础上,根据工科热工教材编审委员会审订的《工程热力学教学大纲(草案)》(四年制动力类)的基本要求修订而成的。

本书内容包括:热力学的基本概念、基本定律,气体和水蒸气的热力性质,热力过程和热力循环的分析和计算,以及化学热力学基础知识。

本版着重充实和加强了基本内容的论述,对能源开发和节能的基本原则加强了理论分析,部分章节作了适当的调整并增编了思考题和部分习题。

本书可作为高等工业学校内燃及燃气动力装置各专业及其它相近专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

工 程 热 力 学

(第 二 版)

吉林工业大学热工教研室 华自强等编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.25 插页 2 字数 296 000

1979年5月第1版 1986年9月第2版 1997年7月第8次印刷

印数 36 574—42 583

ISBN 7-04-001544-7/TH·110

定价 11.30 元

前 言

自高等学校工科《工程热力学教学大纲（草案）》于1980年颁发以来，工程热力学课程的教学质量有了很大提高，也积累了一定的教学经验。为了更好地体现该教学大纲的基本要求，我们在广泛地汲取各兄弟院校在本课程教学中取得的先进经验的基础上，对本书作了全面的修订。

本版对全书都进行了改写，充实和加强了对基本内容的论述，如对基本概念和定义、热力学第一定律、热力学第二定律、熵和焓、气体的流动、气体动力循环、水蒸气及蒸汽动力循环、化学热力学基础等各章都作了必要的充实，内容编排及阐述方法进行了较大的改进。鉴于能源供应已成为现代生产发展中的突出问题，为了从理论上阐明能源开发和节能的基本原则，本版还加强了对热能的可用性和能的品位、不可逆过程中熵的产生和作功能力的降低、不可逆过程的焓分析、气体反应的化学平衡分析等内容的阐述。

本版保持了第一版的编写方针。在选材上，除重点论述基本理论和基本概念外，还注意联系工程实际问题阐明热力学分析的基本方法，此外并编入一部分加深加宽的内容以适应不同情况的教学需要。在编排上，除注意学科体系的完整性外，十分重视教学法原则的贯彻，尽量做到由浅入深引导学生思考，难点分散、繁简结合，以使各章分量适中，均衡学生的学习负担。在文字上则力求简明易读并注意缩小全书篇幅以适应学时数较少专业的教学需要。

本版增编了复习思考题，例题和习题的数量也有所增加并提

高了质量，以培养学生分析问题和解决问题的能力。书后还附有习题答案。

本书由吉林工业大学热工教研室华自强同志主编，参加编写工作的还有庄爱娣、陈贵堂、周贵锦、郝玉福、金文桂等同志。在编写过程中得到了方传流同志和李谦六同志的指导和帮助。

本书承高等学校工科热工教材编审委员会委托何志迈同志主审，热工编委严家骅同志复审，最后经热工编委会审查通过。

对于编审委员会及参加审稿同志的帮助，以及在编写过程中提供改进意见的各兄弟院校的 help，我们表示衷心的感谢。由于编者水平有限，漏误之处请读者不吝指正。

编 者

1985 年 10 月

主 要 符 号

A	面积	T	热力学温度
c	声速	t	摄氏温度
c_p	定压比热容	U, u, α	内能、比内能及摩尔内能
c_v	定容比热容	V, v	容积及比容
C_p	定压摩尔热容	$\bar{V}$	流速
C_v	定容摩尔热容	W, w	容积变化功及单位质量物质作的容积变化功
d	含湿量	W_s, w_s	轴功及单位质量物质作的轴功
D	过热度	W_0, w_0	循环净功及单位质量物质作的循环净功
E, e	总能及比总能	$\dot{W}_s$	单位时间的轴功
F	力, 自由能	x	质量成分, 距离
G, g, g	自由焓、比自由焓及摩尔自由焓	y	摩尔成分
$H, h, h,$	焓、比焓及摩尔焓	Z	离地高度
K	平衡常数	z	压缩因子
m	质量	希腊字母	
$\dot{m}$	质量流量	α	离解度
M	分子量及千摩质量	τ	增温比
n	千摩数, 多变指数	ϵ	压缩比, 致冷系数
p	压力	η	效率
Q, q	吸热量及单位质量物质的吸热量	η_t	热效率
$\dot{Q}$	单位时间的吸热量	κ	比热比或绝热指数
R, R_m	气体常数及通用气体常数	λ	压力升高比
r	容积成分, 汽化潜热		
S, s	熵及比熵		

μ	回热度
ξ	致冷循环的热量利用 系数
π	增压比
ρ	密度
ρ	预胀比
Φ, ϕ	闭口系统焓参数 (或 可用度参数)
φ	相对湿度
Ψ, ψ	稳态稳流系统焓参数
下角标	
c	临界状态的
C	压气机的
m	平均数值的, 每摩尔

	物质的
n	多变过程的
p	定压过程的
P	生成物的
r	对比状态的
R	反应物的
s	定熵过程的, 饱和状态 的
T	涡轮机 (透平) 的, 定 温过程的
v	定容过程的
0	周围物质的或周围物 质状态的, 理想气体 状态的, 滞止状态的

目 录

主要符号	VI
绪论	1
0-1 热能动力工程的重要地位	1
0-2 能量转换设备工作过程简单介绍	3
0-3 工程热力学的研究对象及研究方法	8
0-4 工程热力学所用的单位制	9
第一章 基本概念及定义	12
1-1 热力学系统	12
1-2 热力学系统的状态及基本状态参数	15
1-3 平衡状态	21
1-4 状态方程式	22
1-5 热力过程和准静态过程	25
1-6 准静态过程的功	27
1-7 热量	31
1-8 热量和功的类比	33
1-9 热力循环	36
思考题	37
习 题	38
第二章 热力学第一定律	42
2-1 热力学第一定律	42
2-2 内能	44
2-3 闭口系统能量方程式	46
2-4 开口系统能量方程式	48
2-5 稳定状态稳定流动能量方程式	50
2-6 焓	53

2-7 轴功	54
2-8 稳定流动能量方程式应用举例	57
思考题	61
习 题	61
第三章 理想气体的内能、焓、熵和比热的计算	65
3-1 理想气体的内能和焓	65
3-2 理想气体的比热	68
3-3 理想气体的熵	77
3-4 理想气体混合物	80
思考题	87
习 题	87
第四章 理想气体的热力过程	90
4-1 热力过程分析概述	90
4-2 定容过程	91
4-3 定压过程	93
4-4 定温过程	95
4-5 绝热过程 (定熵过程)	96
4-6 多变过程	103
思考题	109
习 题	110
第五章 热力学第二定律	114
5-1 热机循环和致冷循环	114
5-2 热力学第二定律	117
5-3 可逆过程和不可逆过程	120
5-4 卡诺循环	122
5-5 卡诺定理	124
5-6 热能的可用性	126
5-7 热力学温标	129
思考题	132
习 题	132
第六章 熵和焓	135

6-1	循环中热量和热源温度的关系	135
6-2	状态参数熵	138
6-3	不可逆过程中熵的产生	140
6-4	熵和热力学第二定律	143
6-5	系统的作功能力及其不可逆损失	147
6-6	焓参数	151
6-7	稳定流动过程的焓分析	156
	思考题	159
	习 题	160
第七章	气体的流动	164
7-1	稳定流动时气流的基本方程式	164
7-2	管内定熵流动的基本特性	166
7-3	气体的流速及临界流速	168
7-4	气体的流量和喷管计算	173
7-5	喷管效率	178
7-6	绝热滞止	180
7-7	绝热节流	183
7-8	合流	185
	思考题	186
	习 题	187
第八章	压气机的压气过程	189
8-1	压气机的压气过程	189
8-2	活塞式压气机的压气过程	193
8-3	多级压缩	197
8-4	压气机效率	200
	思考题	202
	习 题	202
第九章	气体动力循环	204
9-1	活塞式内燃机的理想循环	204
9-2	燃气轮机装置循环	216
9-3	增压内燃机及其循环	225
9-4	自由活塞燃气轮机装置及其循环	226

9-5 喷气式发动机及其循环	228
9-6 活塞式热气发动机及其循环	230
思考题	233
习 题	233
第十章 实际气体	236
10-1 实际气体状态变化的特点	236
10-2 范德瓦尔方程式	239
10-3 对比状态方程式	242
10-4 实际气体状态的近似计算	244
10-5 热力学普遍关系式	247
10-6 绝热节流的温度效应	256
思考题	259
习 题	259
第十一章 水蒸气及蒸汽动力循环	262
11-1 水蒸气的发生过程	262
11-2 水蒸气的饱和状态	266
11-3 水蒸气热力性质表和图	269
11-4 水蒸气的热力过程	273
11-5 朗肯循环	278
11-6 再热循环	282
11-7 回热循环	283
思考题	286
习 题	286
第十二章 致冷循环	289
12-1 逆向卡诺循环	289
12-2 空气压缩致冷循环	292
12-3 蒸气压缩致冷循环	297
12-4 蒸汽喷射致冷循环及吸收式致冷装置	300
12-5 致冷剂及其热力学性质	303
思考题	306
习 题	307

第十三章 湿空气	308
13-1 湿空气的一般概念	308
13-2 绝对湿度、相对湿度和含湿量	309
13-3 湿空气的千摩质量、密度及气体常数	312
13-4 湿空气的焓-含湿量图	314
思考题	317
习 题	317
第十四章 化学热力学基础	319
14-1 化学反应的质量守恒分析	319
14-2 热力学第一定律在化学反应中的应用	323
14-3 理论燃烧温度	329
14-4 热力学第二定律在化学反应中的应用	331
14-5 化学平衡和平衡常数	334
14-6 化学平衡和温度、压力及成分的关系	340
14-7 离解和离解度	342
14-8 绝对熵和热力学第三定律	345
思考题	347
习 题	347
主要参考书	349
习题答案摘录	351
附 录	360
附表 1 常用气体的热力性质	360
附表 2 理想气体状态下的定压摩尔热容与温度的关系式	360
附表 3 空气的热力性质表	362
附表 4 氧的热力性质表	367
附表 5 氮的热力性质表	369
附表 6 氢的热力性质表	370
附表 7 二氧化碳的热力性质表	372
附表 8 一氧化碳的热力性质表	374
附表 9 水蒸气的热力性质表(理想气体状态)	375
附表 10 各种单位的换算关系	378
附图一 氨(NH ₃)的压焓图	381
附图二 湿空气 $h-d$ 图(空气压力 0.1MPa)	383

绪 论

0-1 热能动力工程的重要地位

人类社会的发展是和社会生产力的发展密切相关的，而社会生产力的一个重要组成部分就是为生产过程提供原动力的动力工程。动力工程不仅应该提供数量上足够的原动力，而且所提供的原动力装置应该是功率大、重量轻、体积小的。只有当动力工程能充分满足生产需要时，社会生产才能得到迅速的发展，从而推动人类社会不断前进。

热能动力工程是利用热能转化成为机械能而获得生产所需原动力的。它最初出现于十八世纪，当时生产规模已日趋扩大，所用机械也日益增多，而所用的原动力还停留在人力、畜力等原始水平，严重地阻碍了生产的发展。在生产发展的强烈推动下，1784年瓦特制成了一种通用的蒸汽机，为生产提供了一种强有力的动力装置，开始了热能动力工程的新纪元。蒸汽机的广泛应用推动了生产飞速发展，从而掀起了历史上著名的“工业革命”，彻底改变了原来自然经济的小生产方式，奠定了工业化生产的牢固的物质基础。

在现代社会生产中，热能动力工程的地位是极为重要的。今天工农业各部门及人民生活所需电力消耗的绝大部分是由热能动力的发电厂所生产的电能提供的；各生产部门中直接用于驱动机械设备的原动机几乎全部是汽轮机、蒸汽机、内燃机、燃气轮机等热能动力装置；在人类征服宇宙空间的伟大斗争中，也正是热能动力家族中的一员——强大的火箭发动机建立了功勋。总之，

对于现代的社会生产的发展，热能动力工程起着十分重要的保证作用和积极的推动作用。

随着社会生产的发展，热能动力工程本身也在不断地发展和进步，特别是面对未来生产发展对原动力需要量迅速增加的趋势，热能动力工程正在积极地向采用原子核能和太阳能等新能源的方向努力前进。从五十年代起人们就开始研究利用原子核反应产生的巨大热能作为热能动力装置的能源，并且已经取得了很大的成就。现在，利用浓缩的铀 235 发生核反应所产生的能量为能源的热能动力发电厂已经在许多地方建立起来和正式发电。由于热核反应可产生更巨大的能量，特别是热核反应物质氘的储量极大，可在相当长的时期内为热能动力工程提供稳定的能源，因此人们特别重视利用热核反应能量的研究。近年来在这方面已经取得了很大的进展，有人预计在二十世纪末热核动力可付诸实用。另外，利用太阳能作为热能动力的新能源也具有非常大的价值。在地球表面上，按太阳光垂直照射的面积计，在每平方米面积上太阳能提供的功率可达数百瓦至一千瓦左右。太阳能几乎是一个永远不会枯竭的能源，而且太阳能到处可取又无任何污染。因而长期以来，人们对于利用太阳能进行了许多研究工作，现在已经建立了几个以太阳能为能源的试验性热能动力装置。可以预见，随着社会生产的发展，热能动力工程必将不断趋于完善并不断在新的领域取得成功。

新中国成立以来，我国生产建设一日千里，在热能动力工业方面也发生了根本的变化。建国前我国基本上没有热能动力设备制造业。现在我国已经能生产三十万千瓦全套蒸汽动力装置、上万千瓦的船用柴油机、大功率机车内燃机、全套燃气轮机发电设备、航空用喷气发动机等各种重要动力设备。这标志着我国基本上有了比较完整的热能动力设备制造业。我国电力生产的年发电量已达到三千多亿度，居世界第七位。近年来在原子核能工业方面也取得了不少成就。但是按照生产发展的需要，差距还很

大。我们还需要经过较长时期坚持不懈的努力，提高我国热能动力工程的水平。为实现我国工业、农业、国防和科学技术的现代化，为在本世纪末实现我国国民经济年总产值翻两番，提供充分的原动力。

0-2 能量转换设备工作过程简单介绍

本节将简单介绍蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置及蒸汽压缩致冷装置的工作过程，以便以后各章讨论这些设备中能量转换的基本规律。

(一) 蒸汽动力装置

蒸汽动力装置是最早得到应用的一种热能动力装置。由于它可以燃用固体燃料，甚至燃用廉价的劣质燃料，又可以制成很大功率的机组（例如：其锅炉每小时可生产数百吨甚至千吨以上的高温高压水蒸气，其汽轮机的单机功率可达数十万千瓦甚至上百万千瓦）；因此，蒸汽动力装置现在仍然是一种极重要的动力设备，特别是在大型固定式动力设备方面，它仍是最主要的型式。它主要用作热力发电厂的动力设备，也常用作大型运输工具如船舶及机车的动力设备。

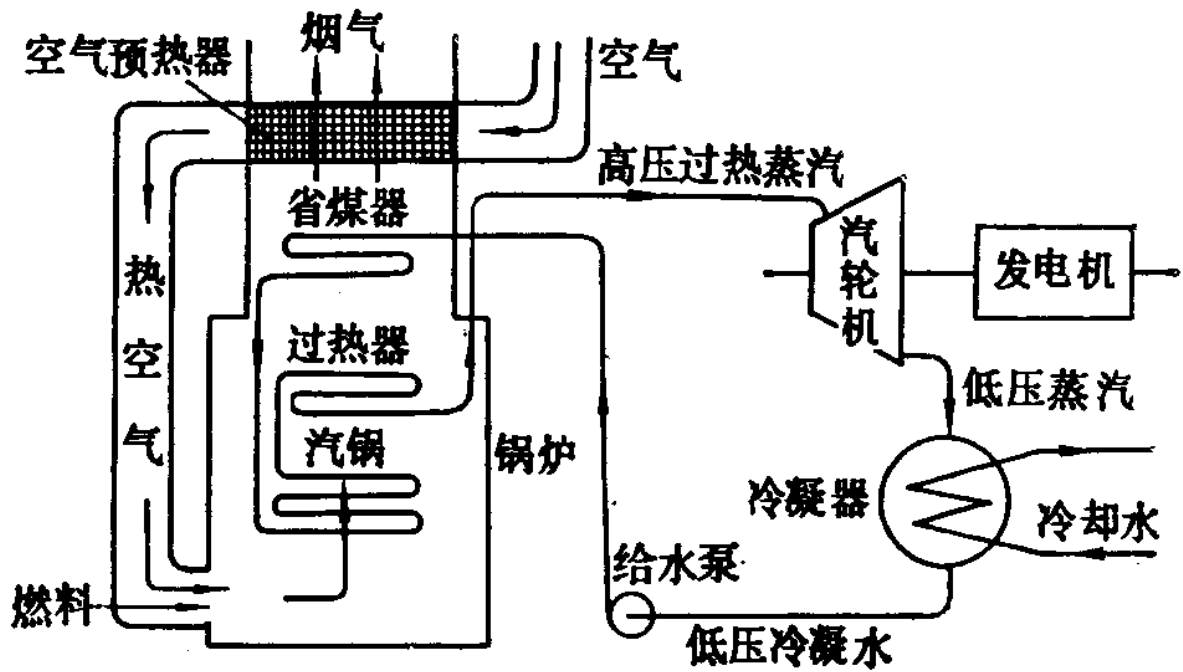


图 0-1

图 0-1 所示为简单蒸汽动力装置的示意图。它由锅炉、汽轮

机、冷凝器及给水泵四部分组成。水蒸气是蒸汽动力装置的工作物质，称为工质。锅炉是水蒸气的发生器。从锅炉产生的高温高压的过热蒸汽先送进蒸汽轮机做功。在汽轮机中，如图 0-2 所示，蒸汽通过喷管提高流速后，以高速流过涡轮的叶片推动涡轮转动，使汽轮机输出机械功，驱动发电机发电。从汽轮机排出的乏汽被引入冷凝器，并在其中被冷却水吸走热量而凝结成水。乏汽凝结时，其体积骤降为原体积的万分之一左右，因而在冷凝器中及汽轮机出口处造成很高的真空度，使蒸汽在汽轮机中得到更加充分的膨胀，从而能推动涡轮作出更多的机械功。从冷凝器出来的冷凝水经给水泵加压后，被重新送回锅炉加热产生蒸汽。在锅炉中，供燃料燃烧用的空气从大气吸入后，先在锅炉的空气预热器中受热提高温度，然后送入炉膛和燃料混合并进行燃烧，把燃料的化学能转变成热能，产生高温的烟气。锅炉中的水先在省煤器中利用高温的烟气加热提高温度，然后进入汽锅中受热汽化而生成水蒸气，再进一步在过热器中继续受热升高温度成为过热水蒸气。于是，过热水蒸气又可送往汽轮机膨胀做功，重复上述循环过程。

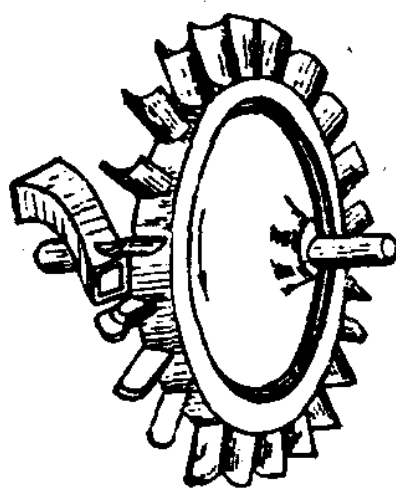


图 0-2

(二) 内燃机

内燃机是十九世纪末期开始出现的一种热能动力装置。它重量轻、体积小、使用方便及热效率高，因而得到广泛的应用，特别是在交通运输工具和移动式的小型机械上都采用内燃机作为动力设备。现代用于船舶、机车及发电的大型内燃机的单机功率已达数兆瓦至数十兆瓦。

图 0-3 为柴油机的示意图。其工作过程分为吸气、压缩、燃烧、膨胀及排气几个阶段。吸气开始时进气阀打开，活塞向下运动把空气吸入气缸。活塞到达下死点，即活塞位移的最低点时，进

气阀关闭，吸气过程结束。然后让进气阀和排气阀都关闭着，活塞向上运动压缩气缸内的空气，而使空气的压力和温度不断增高。当活塞运动到接近上死点，

即活塞位移的最高点时，喷油咀适时地把适量柴油喷入气缸。由于这时气缸中空气的温度已超过柴油的自燃温度，因而当活塞到达上死点时，柴油正好开始猛烈燃烧。燃烧过程进行得很快，当活塞稍为离开上死点时，燃烧过程已结束。接着高温燃气发生膨胀，推动活塞向下运动并输出机械功。活塞到达下死点时，排气阀打开。因气缸内气体的温度和压力还比较高，故当排气阀打开

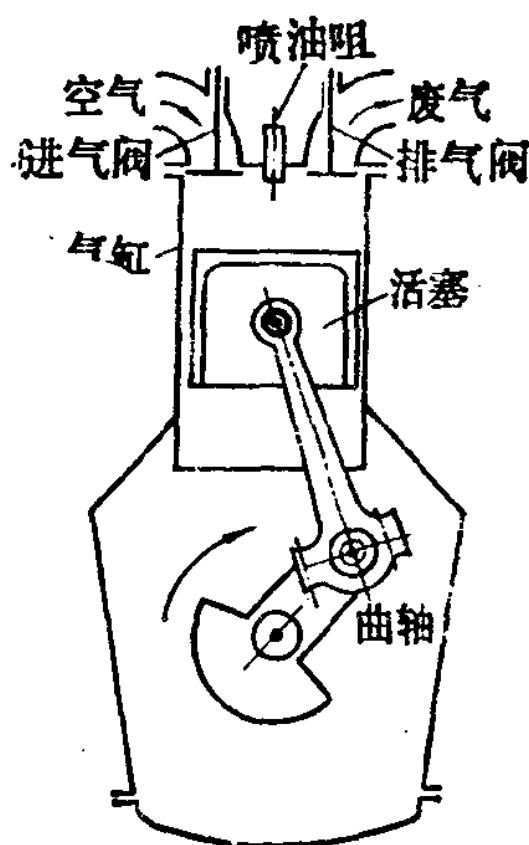


图 0-3

时立即有一部分气体冲出气缸排入大气，使气缸内压力降至大气压。接着在活塞向上运动时气缸内剩余的气体被活塞排出气缸至大气中，直到活塞到达上死点时排气完毕。当活塞再一次自上死点向下运动时，又重新吸气重复上述工作循环。

汽油机的工作过程基本上和柴油机差不多。只是汽油预先在化油器内雾化并和空气混合成可燃混合气体，在吸气过程中一起被吸入气缸。在压缩过程终了活塞接近上死点时，混合气体的温度仍低于其自燃温度，必须用电火花点燃后才开始燃烧过程。其它过程则和上述柴油机的工作过程完全一样。

(三) 燃气轮机装置

燃气轮机装置是四十年代后才得到迅速发展的热能动力装置。由于它是轮机式机械，具有转速高及工质流量大的优点，因此燃气轮机装置每单位功率的机体重量及体积都比内燃机要小很多。相应地其单机功率也可达十万千瓦以上，远大于内燃机。正是

这些因素使得它首先在航空上得到应用，它和喷气技术相结合而成的航空用涡轮喷气发动机，成为航空发动机最主要的型式。此外，燃气轮机装置也常用作舰船动力设备。目前由于其热效率尚不如内燃机，因此在发电方面它的应用还不够普遍。

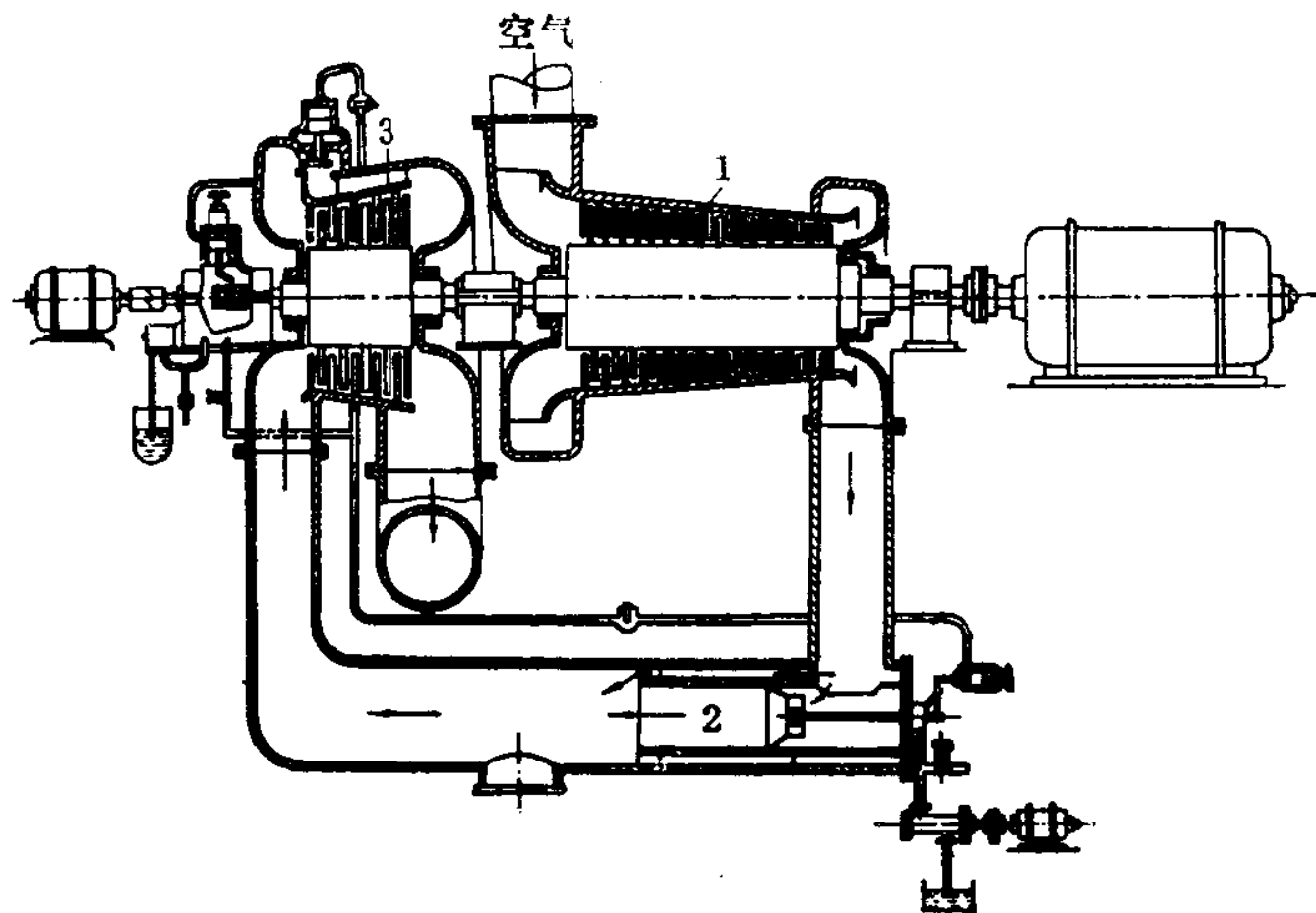


图 0-4

图 0-4 为燃气轮机装置的示意图。它由压气机 1、燃烧室 2 及涡轮机 3 三部分组成。它由大气中吸入空气后，在轴流式或离心式压气机中对空气进行增压，提高空气的压力及温度。经增压后的空气送至燃烧室，一部分空气供喷入燃烧室的燃料进行燃烧用，另一部分空气则用于和燃烧生成的高温燃气混合，以降低燃气的温度，使进入涡轮机的燃气温度和涡轮叶片允许的最高工作温度相适合。当燃气进入涡轮机后，先在喷管中提高流速，然后以高速流过涡轮的叶片，推动涡轮转动并输出机械功，其过程与汽轮机中的过程相同。作功后的高温废气则直接排入大气中。

(四) 蒸气压缩致冷装置

致冷就是以消耗机械功或其它能量为代价，使物体获得低于