

工程热力学

西北工业大学
北京航空学院 编
南京航空学院



国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十三章,主要叙述了气体的性质及其计算、热力学第一定律、气体的热力过程、热力学第二定律、气体的流动、气体动力循环、实际气体和水蒸气、湿空气、热力学一般关系式、热化学和化学平衡。对于气体分子运动论和统计力学也作了简要介绍。各章都附有例题和习题,计算题目主要是采用国际单位制(SI制),同时也适当地介绍了目前通用的工程单位制。

本书可作为高等航空院校动力类各专业的教科书,也可作为内燃(燃气)动力装置及其它有关专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员参考。

工 程 热 力 学

西北工业大学

北京航空学院 编

南京航空学院

*

国防工业出版社 出版

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 $13\frac{3}{4}$ 346千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷 印数: 0,001—7,200册

统一书号: 15034·2332 定价: 1.70元

前 言

本书是根据高等航空院校动力类专业《工程热力学》教材会议拟订的教学大纲进行编写的。

全书在介绍了气体的性质和热力学的基本概念以后,根据热力学的两个主要定律阐述了一般原理,叙述了气体的主要过程和气体动力循环。此外,还介绍了实际气体的热力学和化学热力学的基础知识,为燃烧反应的分析和计算打下了基础。最后还简单地介绍了气体分子运动论和经典统计力学,以便加深理解工质的有关性质。教材内容既注意到由浅入深,讲清概念,又力求联系实际,密切结合专业,为学习本专业后继课程奠定了坚实的理论基础和必要的基本知识。为了培养分析问题和解决问题的能力,各章都编有一定数量的例题和习题。

本书由西北工业大学欧阳楨、北京航空学院董耀德担任主编,由南京航空学院赵承龙担任主审。书中的绪论、第一、二、三、五、九章由欧阳楨编写,第四章由赵承龙编写,第六章由李立国编写,第七、八、十、十一章由董耀德编写,第十二、十三章由李继坤编写。

本书曾在北京航空学院、南京航空学院和西北工业大学三院校试用,得到不少教师和学生们的宝贵意见。与此同时,并请西北工业大学王宏基教授、北京工业学院谢焕章教授、南京航空学院物理教研室对其中部分章节分头审阅,给予指导,编者谨在此一并表示谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,请读者批评指正。

编 者

一九八一年四月

目 录

主要符号	1
绪论	4
§ 0-1 自然界中的能源及能的利用	4
§ 0-2 热力学及热力发动机的发展简史	5
§ 0-3 涡轮喷气发动机的简单工作原理	7
§ 0-4 工程热力学的研究对象	9
§ 0-5 研究热现象的两种方法	10
第一章 气体的性质及其计算	12
§ 1-1 热力学体系	12
§ 1-2 热力学状态 平衡状态	13
§ 1-3 单位制	14
§ 1-4 气体的基本状态参数	16
§ 1-5 气体状态参数的特性	26
§ 1-6 完全气体与实际气体	28
§ 1-7 完全气体诸定律及状态方程式	29
§ 1-8 完全气体温标	38
§ 1-9 完全气体混合物	39
习题	46
第二章 热力学第一定律	49
§ 2-1 热力学第一定律 当量原理	49
§ 2-2 热力学第一定律解析式	53
§ 2-3 总能量 内能	55
§ 2-4 可逆过程和不可逆过程	57
§ 2-5 容积功 (膨胀功或压缩功)	60
§ 2-6 焓	62
§ 2-7 气体的比热 热量的计算	63

习题	75
第三章 气体的热力过程	78
§ 3-1 分析热力过程的目的、方法及内容	78
§ 3-2 熵 温熵图 焓熵图	79
§ 3-3 定容过程	84
§ 3-4 定压过程	87
§ 3-5 定温过程	90
§ 3-6 可逆绝热过程(定熵过程)	95
§ 3-7 多变过程	100
§ 3-8 活塞式压气机的工作过程	105
§ 3-9 完全气体的热力学性质表	112
习题	117
第四章 热力学第二定律	121
§ 4-1 热力循环	122
§ 4-2 热力学第二定律各种说法	127
§ 4-3 卡诺定理	131
§ 4-4 热力学温标	136
§ 4-5 两个极限温度范围内工作的循环热效率	139
§ 4-6 熵	143
§ 4-7 孤立体系熵增原理	147
习题	152
第五章 气体的流动	154
§ 5-1 连续方程式	154
§ 5-2 能量方程式	156
§ 5-3 伯努利方程式	159
§ 5-4 音速和马赫数	162
§ 5-5 气流的滞止参数和临界参数	164
§ 5-6 管道截面积与流速的关系	171
§ 5-7 喷管与扩压管	174
§ 5-8 绝热节流	180
§ 5-9 叶轮机	182
§ 5-10 燃烧室	192

习题	193
第六章 气体动力循环	196
§ 6-1 活塞式内燃机的理想循环	197
§ 6-2 燃气涡轮装置的理想循环	207
§ 6-3 空气喷气发动机的理想循环	219
§ 6-4 液体燃料火箭发动机的理想循环	228
习题	231
第七章 实际气体和水蒸气	233
§ 7-1 实际气体	233
§ 7-2 水蒸气的形成过程	241
§ 7-3 水和蒸汽表	244
§ 7-4 蒸汽的焓熵图	247
§ 7-5 简单蒸汽动力循环	248
§ 7-6 三相点	252
习题	254
第八章 湿空气	255
§ 8-1 空气的湿度和相对湿度	255
§ 8-2 湿空气的参数	258
§ 8-3 湿空气的湿度图	263
§ 8-4 湿空气的热力过程	266
习题	273
第九章 热力学一般关系式	274
§ 9-1 推导的基本方法	274
§ 9-2 热性系数	275
§ 9-3 麦克斯韦关系式	278
§ 9-4 比热的关系式	281
§ 9-5 焦耳-汤姆逊系数	284
§ 9-6 内能的关系式	288
§ 9-7 焓和熵的关系式	291
习题	294
第十章 热化学	295
§ 10-1 基本概念	295

§ 10-2	热力学第一定律在化学反应中的应用	296
§ 10-3	化学反应热效应	297
§ 10-4	燃料的燃烧和热值	300
§ 10-5	赫斯定律	303
§ 10-6	标准生成焓	305
§ 10-7	化学反应热效应的计算	307
§ 10-8	温度对热效应的影响	309
§ 10-9	理论燃烧温度和爆炸压力	313
习题		317
第十一章 化学平衡		319
§ 11-1	自由能和自由焓	319
§ 11-2	化学平衡和平衡常数	322
§ 11-3	压力和温度对化学平衡的影响	328
§ 11-4	标准生成自由焓	332
§ 11-5	热力学第三定律	333
§ 11-6	离解和离解度	336
§ 11-7	实际燃烧温度	339
习题		342
第十二章 气体分子运动论简介		344
§ 12-1	基本假设	344
§ 12-2	气体的压力	347
§ 12-3	麦克斯韦速度分布率	351
§ 12-4	分子的平均自由程	357
§ 12-5	粘性系数	361
§ 12-6	导热系数	365
§ 12-7	扩散系数	368
习题		371
第十三章 统计力学浅说		372
§ 13-1	相空间	372
§ 13-2	热力学几率	375
§ 13-3	最可几状态	378
§ 13-4	热力学几率与熵	383

VIII

§ 13-5	热力学函数与单原子气体的热力学性质	387
§ 13-6	能量均分定理与气体的比热	391
习题		394
附录	参数“焓”简介	396
附表 1	SI 制与工程制的压力单位换算表	402
附表 2	气体常数 R 的数值表	403
附表 3	SI 制与工程制的能量单位换算表	403
附表 4	完全气体的定压比热方程式中的系数	404
附表 5	空气的热力学性质表	405
附表 6	气体的平均定压比热表(在 0°C 至 $t^{\circ}\text{C}$, 即 273.15K 至 TK 间)	408
附表 7	饱和蒸汽表(按压力排列)	411
附表 8	饱和蒸汽表(按温度排列)	412
附表 9	过热蒸汽表	413
附表 10	某些物质的标准生成焓, 标准生成自由焓, 标准 绝对熵数据表	417
附表 11	某些燃烧产物的焓温表	418
附表 12	某些化学反应的平衡常数 K_p 表	419
附表 13	某些定积分公式表	420
附图	蒸汽的焓熵图	421

主 要 符 号

A	面积, 功热当量	k_0	一个气体分子的气体常数 (即波耳兹曼常数)
a	加速度, 音速		
B	大气压力		
C	比例系数, 积分常数	L	长度
c	比热 (即单位质量物质的热容量)	l	分子的平均自由程, 汽化潜热
c_v	定容比热	M	马赫数, 千摩尔数
c_p	定压比热	m	质量
D	扩散系数	m_0	每一个分子的质量
d	直径, 含湿量	$\dot{m}$	质量流量
E	总能量	N	分子数
E_k	动能	N'	1 公斤气体的分子数
E_p	位能	N_0	1 千摩尔气体中所含的分子数 (通常称阿佛加德罗常数)
e	比能量, 比焓, 工质焓		
F	自由能		
f	比自由能	n	多变指数, 单位体积的分子数或分子浓度
G	重量流量		
g	重力加速度, 质量成分	P	作用力
		p	压力或压强
H	焓	Q	吸热量或放热量
h	比焓 (即单位质量物质的焓)	q	单位质量物质的吸热量或放热量
K	平衡常数	$\dot{Q}$	单位时间的吸热量 (即热流量)
k	比热比		

R	1 公斤气体的气体常数	(μh)	千摩尔焓
		(μz)	千摩尔自由焓
r	容积成分, 半径	希腊字母	
S	熵	α	压力的温度系数或弹性系数, 离解度
s	比熵 (即单位质量物质的熵)	β	体积的温度系数或热膨胀系数
T	热力学温度	γ	重度
t	摄氏温度	ϵ	压缩比, 制冷系数或取暖系数
U	内能	η	效率
u	比内能 (即单位质量物质的内能)	η_r	热效率
V	容积	θ	经验温度
v	速度	λ	定容增压比, 导热系数
v	比容 (即单位质量物质的容积)	μ	分子量, 定温压缩系数或压缩系数, 粘性系数
W	功, 热力学几率	μ_j	焦-汤系数
$\dot{W}$	功率	π	增压比
w	比功 (即单位质量物质的功)	ρ	密度, 预胀比
x	距离, 湿蒸汽的干度	σ	回热度, 分子的直径
Z	自由焓, 压缩性因子, 配分函数	τ	时间
z	高度, 比自由焓 (即单位质量物质的自由焓)	φ	速度系数, 相对湿度
(μR)	通用气体常数	ω	分子的移动速度
(μc_p)	定压千摩尔比热	下角注	
(μc_v)	定容千摩尔比热	abs	绝对的
(μu)	千摩尔内能	av	有用的
		C	压气机的, 冷源的
		c	卡诺机的, 制冷的, 压缩的

<i>cr</i>	临界状态的	<i>R</i>	可逆机的, 对比态的
<i>e</i>	膨胀的	<i>re</i>	可逆的
<i>f</i>	摩擦的	<i>s</i>	定熵过程的, 饱和的
<i>g_a</i>	表的	<i>T</i>	定温过程的, 涡轮的
<i>H</i>	热源的, 任何热机的	<i>tr</i>	三相点的
<i>H.V.</i>	高热值	<i>v</i>	定容过程的
<i>i</i>	第 <i>i</i> 种的	<i>va</i>	真空的
<i>ir</i>	不可逆的	0	标准状态的
<i>in</i>	进口的, 输入的	1	起始状态的
<i>iso</i>	孤立体系的	2	终了状态的
<i>L.V.</i>	低热值	上角注	
<i>l</i>	损失的	'	实际的, 饱和水的
<i>max</i>	最大的	"	干饱和蒸汽的
<i>min</i>	最小的	※	滞止状态的
<i>n</i>	多变过程的, 喷管的	0	标准状态的
<i>o</i>	循环的	上横线	
<i>p</i>	定压过程的	—	平均的, 相对变化率的, 化学反应热效应
<i>op</i>	最佳的		
<i>out</i>	出口的, 输出的		

绪 论

§ 0-1 自然界中的能源及能的利用

自然界中可以被人们利用来产生动力，供生活上和生产上使用的能源主要有风力、水力、太阳能、地热、燃料的化学能及原子核能等。

风力在远古时代就已被人类利用来代替人力。虽然仅限于小规模装置，但是它的设备简单，不需要燃料，所以至今仍适用于农村戽水、磨面和小型发电。它的缺点是不够稳定，因为风的速度和方向变化无常。

水力的特点在于利用天然水位所具有的位能。它不需要燃料，因此利用水力发电，虽然基本建设的投资较大，建设速度较火力发电慢，但建成后的运行费用较低，发电成本低廉。目前世界各国都在广泛开发水力资源。我国水力资源丰富，开发潜力很大，所以水力是我国社会主义建设中一种重要的能源。

当前人们利用最多的还是燃料的化学能。通过燃料的燃烧，使燃料的化学能以热的形式释放出来，再将热能转换为机械能和电能。利用燃料的化学能，由热能转换为机械能的动力装置，叫做**热力发动机**或简称**热机**。例如火力发电厂和交通运输工具中所用的蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机和喷气发动机等都是热力发动机。

近四十年内人们发现原子核内蕴藏着巨大的能量，因此使原子核能转变成热能，再将热能转换成机械能和电能。例如，原子能核电站及原子能舰艇中的核动力装置。此外，原子能飞机及原子能火箭也正在研究中。预计原子核能的动力装置将会有很大的发展，并可能成为动力的重要来源。

由于热能转换为机械能在热效率上有一定的限度，在目前最好的动力装置中，也只能将供给该装置的热能中的40%左右变为机械能，即热效率只有40%左右。所以将燃料的化学能先转换成热能，再转换成机械能的这一办法是很不经济的，但是目前它仍是从这些能源取得大量动力的唯一切实可行的办法。不过最近也正在将燃料的化学能直接变成电能的燃料电池的研究，这在小型小能量的设备上已经获得成功，转换的效率亦很高，但尚不能成为工业上取得大量动力的方法。将来如能成功，热动力生产的面貌将发生根本的变革。

太阳能是地球上一切能源的来源，风力、水力和燃料的化学能都间接地来自太阳。但人类直接加以使用太阳能却是不久以前的事情。目前已有利用太阳能的太阳能加热器和太阳能电池，供日常生活及医疗设备或工业上应用。在人造卫星和宇宙运载工具中，也常采用太阳能电池。

目前世界各国所使用的能源，大多数还都是来自煤和石油等燃料的化学能。根据已探测的煤和石油蕴藏量，人们担心，这些燃料资源将被逐渐用完。因此，一方面加紧进行地质勘探，发现新的煤田和油田；另一方面则设法提高现有燃料的利用率，减少浪费。此外，就是开发新的能源，例如地热和太阳能，目前也都在积极研究试验中，并已小规模地应用。至于原子能热电站的动力装置，不少国家也都相继建立。据初步估计，地球上核燃料铀²³⁵等裂变物质的能量储藏量超过全部燃料的能量储藏量的二十倍，将来氢原子核聚变反应的动力装置成功以后，那么重氢等聚变物质的能量储藏量更是非常巨大，差不多永远是用不完的。

§ 0-2 热力学及热力发动机的发展简史

上一节叙述的大部分能源都是与热现象有关的，所以现在先谈谈有关热现象的热力学及热力发动机的发展简史。

热现象是人类生活中最早接触的现象之一。随着人类社会的

发展，人们在生活上和生产上的需要，到了十八世纪下半期，遂发明了蒸汽机，蒸汽机的广泛使用，促进工业的迅速发展，同时又推动了热能转换成机械能的理论研究，促使热力学的建立与发展，而热力学反过来又促使热力发动机的不断改进以及新型动力机的创造与发明。

在十八世纪上半期以前，很多人错误地把热看成是一种无重量的流质，名叫**热质**，它渗透在一切物体之中，热质的流来流去，使物体变得热些或冷些。这一学说不能解释摩擦和撞击生热现象。后来随着蒸汽机的出现，卡诺对如何提高热机的效率，迈耶、焦耳等人对热与功的转换规律进行了大量的实验，建立了热力学两个基本定律以及热的分子运动论。热的分子运动论认为热是物质分子不规则运动的结果，它能够很好地解释摩擦生热等现象，并牢固地建立了能量守恒与转换定律，即热力学第一定律。克劳修斯从卡诺研究热机效率的工作中，引出了状态参数熵的概念，并用熵来说明热与功转换的方向问题和条件问题，进一步明确了热力学第二定律。

热力学两个基本定律不仅广泛地应用于物理学各部门中去，而且也被广泛应用于化学中去，因而建立了化学热力学。二十世纪初，能斯特根据低温下化学反应的许多实验事实，总结出热力学第三定律，这使宏观热力学的系统更加完善。

在热力学发展的同时，即十九世纪中期，麦克斯韦开展了气体分子运动的理论研究，并且应用统计概念研究气体分子的运动，得到了气体分子运动的速度分布定律；玻尔兹曼利用统计概念给出了热力学第二定律的统计解释，初步把热力学的微观物理基础建立起来。后来吉布斯、浦朗克等人的进一步研究，把热力学的微观理论——即统计物理提高到较完善的地步。到1924~1927年期间，由于量子力学的发展，统计物理就有了一个全新的出发点，形成了量子统计物理。

热力学的形成与发展，推动了热力发动机的不断改进与发展，

因而提高了生产力。由于蒸汽机的笨重、庞大、效率不高等缺点，而且不宜于用在运输工具上，所以在十九世纪后半期，促使人们利用其它工质——气体来代替蒸汽，并在热力发动机的内部实施燃烧过程，这就是所谓**内燃机**，它具有效率高、重量轻的优点。内燃机的发明，不仅可以作为交通运输工具的动力机，而且也促进并发展热力学对内燃机热力过程和循环的研究，这就更加丰富了工程热力学的内容。

随着工业生产的不断发展与高度集中，蒸汽机不能满足巨大动力的需要，在十九世纪后半期遂发明了蒸汽轮机，它具有效率高、功率大的优点，这又推动了工程热力学中高参数蒸汽性质及高速气流等问题的研究。

第二次世界大战期间出现的喷气式飞机和远射程火箭，其中所用的喷气发动机，由于能产生巨大的动力及其它优点，所以能满足高速高空飞行的要求，目前已成为进入宇宙空间的主要动力。对航空涡轮喷气发动机作部分的改造，即可作为地面上所用的燃气轮机，在发电站、机车和轮船中已广泛使用，并在工程热力学中也发展了相应的研究内容。

§ 0-3 涡轮喷气发动机的简单工作原理

为了更好地理解本门课程是研究热能与机械能转换规律的一门学科以及它在工程上的应用，下面先介绍涡轮喷气发动机的简单工作原理。

图 0-1 为一轴流式压气机的涡轮喷气发动机的简图，它由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管五个部件所组成。

进气道设置在发动机的前面，除了用来引导足够数量的空气顺利地进入压气机以外，在飞机飞行时，还可起到提高空气压力的作用。

压气机是压缩空气的重要部件。依靠压气机的高速旋转叶轮，对进气道流来的空气做功，提高空气的压力。目前所使用的涡轮

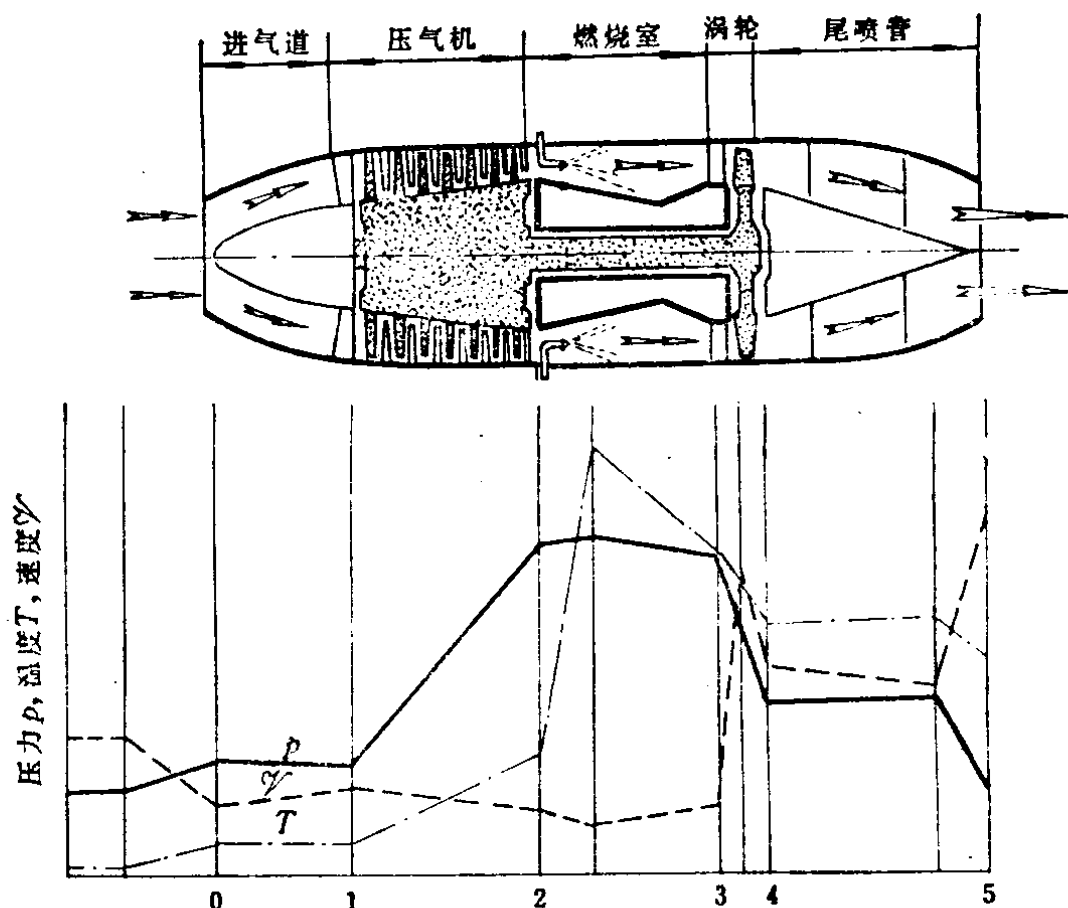


图 0-1

喷气发动机中，压气机能将空气的压力提高 5 ~ 25 倍，此时，空气的温度也有相应的提高。

燃烧室是不断地给高压空气加热的部件。压气机流来的高压空气进入燃烧室，与喷嘴喷出适量的煤油混合，并进行燃烧，大大地提高空气的温度。目前所使用的发动机中，燃烧室流出的燃气温度可高达 900 ~ 1160℃，先进的发动机甚至可达 1350℃。

涡轮是带动压气机叶轮旋转的部件。涡轮安装在燃烧室的后面，涡轮转子受着燃烧室流来的高压、高温燃气的作用而旋转，由于涡轮与压气机安装在同一根轴上，所以涡轮带动压气机转子旋转。

尾喷管在发动机的后部。从涡轮流出来的高压、高温燃气在尾喷管中继续膨胀，燃气的压力和温度均降低，而速度却增加，将燃气的热能转换为动能，使燃气高速度 (500 ~ 700 m/s) 地从尾喷管中喷出，因而产生推力。

涡轮喷气发动机在飞行中，流经发动机内的气体压力 p 、温度 T 和速度 v 等参数沿流程的变化情况如图 0-1 所示。

图中采用下列符号表示发动机的各个截面：0-0 为进气道入口处的截面；1-1 为进气道出口或压气机进口的截面；2-2 为压气机出口或燃烧室进口的截面；3-3 为燃烧室出口或涡轮进口的截面；4-4 为涡轮出口或尾喷管进口的截面；5-5 为尾喷管出口的截面。

通过上述发动机工作过程的介绍，可以看出，它是利用气体作为媒介物质或工作介质（简称工质），将燃料燃烧所释放的热能转换为机械能的热力发动机，此机械能表现为发动机推力所作的功；此外，人们总是期望燃烧较少的燃料得到较大的机械功，也就是说，如何更加有效地利用燃料燃烧所释放出来的热能。

§ 0-4 工程热力学的研究对象

工程热力学是热力学的一个重要分支，除了研究热能与机械能的转换规律外，还研究热力学定律在工程上的应用，目的在于改进和创造更为完善的热力发动机与制定热机理论。具体地说，工程热力学包括的内容如下：

（一）研究工质的性质

热能转换为机械能必须通过工质的作用才能实现，例如，涡轮喷气发动机中的空气和燃气就是工质。只有对工质的热物理性质有深刻的认识，或者说，在测量或计算出代表工质性质的参数，如温度、压力、密度、比热和它们之间的关系以后，才能更好地掌握热能与机械能之间的转换规律。

（二）研究能量之间的转换规律及其应用

研究热机中一切过程中热能与机械能进行转换时所服从的总规律，即热力学第一定律，以及热能和机械能的计算方法，并把它们运用于具体热机的热力过程中去。此外，还研究在什么条件下，用什么方法，才能使热能最大限度地或最经济地、连续不断地转换为机械能，即热力学第二定律，这就为分析循环，提高其经济性，奠定了理论基础。