

高等学校教学参考书

工程热力学

沈维道 郑佩芝 蒋淡安 合编

人民教育出版社

TK12
3

高等学校教学参考书

工 程 热 力 学

沈维道 郑佩芝 蒋淡安 合编

本书是在上海交通大学热工教研组编“工程热力学”讲义基础上，参考1962年高等工业学校教学工作会议审订的“工程热力学教学大纲（试行草案）”编写的。

书中对基本概念、基本定律、过程计算、循环分析等最主要内容有较详细的讨论，力图帮助读者较好地掌握这些内容的基本原理及其相互关系。对联系工程实际的题材也讨论得比较详细。还较多地注意了介绍分析研究问题的方法。各章末并附有思考题、讨论题和习题。

本书由热工学课程教材编审委员会委托西安交通大学苏长荪同志审阅，并经该委员会复审通过，可作为机械制造类动力机械各专业、动力类工业热工等专业的教学参考书，也可供有关工程技术人员参考。

简装本说明

目前850×1168毫米规格纸张较少，本书暂以787×1092毫米规格纸张印刷，定价相应减少20%。希鉴谅。

工 程 热 力 学

沈维道等合编

人民教育出版社出版（北京沙滩后街）

上海新华印刷厂印装
新华书店上海发行所发行
各地新华书店经售

书号 15012·075 开本 787×1092 1/32 印张 12 4/16 插页 2
字数 320,000 印数 3,001—67,000 定价 ¥ 1.36

1965年12月第1版 1979年2月第2次印刷

序

这本教材原是为編者自己学校的教学需要而編写的，于 1962 年在学校内部鉛印，曾供应某些兄弟院校試用过。后来参考 1962 年高等工业学校教学工作會議审定的“工程热力学教学大綱(試行草案)”进行了改編。随后又根据高等工业学校热工教材編审委员会、本书审查人及兄弟院校同志的意見进行修改最后写成的。

本书对基本概念、基本定律、过程計算、循环分析等主要內容有較詳細的論述，力图帮助讀者較好地掌握这些主要內容的基本原理及其相互关系。本书对学习方法和思想方法上的問題，如对一些抽象概念的观点、分析問題的方法和步驟等，也給予較多的注意，掌握分析研究問題的方法是学习的主要目的之一。本书对联系工程实际的題材討論得較詳細，对純理論性的題材討論得較少。

为了帮助同学复习以及培养独立思考和解决問題的能力，每章末附有习题、思考題和討論題。拟編这些思考題和习题时較注意使其具有启发性和灵活性。这些題目，一部分可以作为同学的課外作业題，一部分則可以用作課堂討論的題材。本书主要的概念、結論和公式在文下加了着重点或以黑体字排印，便于讀者更好地分清主次，抓住重点。

本书承热工教材編审委员会和苏长蓀同志大力帮助和提供很多改进意見，謹致感謝。对兄弟院校同志提供的很多宝貴意見也謹致感謝。书中还会有不妥之处，希望讀者給予帮助和指正。

本书編写中蔣淡安同志所担任的編写工作最多。另外，楊强生同志和蔣智敏同志也参加过某些章节的編写工作。

編 者

目 录

序	viii
緒論	1
§ 0-1 热能动力利用在社会主义建设中的重要性	1
§ 0-2 热力工程及热力学发展简史	1
§ 0-3 工程热力学的研究对象及其主要内容, 工程热力学在专业培养 中的地位	4
§ 0-4 热力学的研究方法	5
§ 0-5 本课程学习方法, 本课程的特点	7
§ 0-6 解放后我国热动力事业的巨大成就	8
思考题	10
第一章 基本概念	11
§ 1-1 热能在热机中转变为机械能的过程	11
§ 1-2 工质, 热源, 热力系统	13
§ 1-3 工质的热力学状态及其基本状态参数	15
§ 1-4 平衡状态, 状态方程式, 坐标图	20
§ 1-5 工质的状态变化过程	21
§ 1-6 热力循环	27
思考题和讨论题	28
例题	28
习题	28
第二章 热力学第一定律	30
§ 2-1 热力学第一定律的实质	30
§ 2-2 内能	32
§ 2-3 能量的传递和转化	34
§ 2-4 其他常用状态参数	37
§ 2-5 热力学第一定律的能量方程式	40
§ 2-6 能量方程式的应用	46
思考题和讨论题	48
例题	48
习题	49
第三章 理想气体的性质	52
§ 3-1 理想气体与实际气体	52

§ 3-2 理想气体状态方程式	53
§ 3-3 理想气体的比热	57
§ 3-4 理想气体的混合气体	65
思考题和讨论题	71
例题	72
习题	74
第四章 理想气体的热力过程	76
§ 4-1 研究的目的及一般方法	76
§ 4-2 定容过程,理想气体的内能	77
§ 4-3 定压过程,理想气体的焓	80
§ 4-4 定温过程	83
§ 4-5 绝热过程	85
§ 4-6 多变过程	91
§ 4-7 理想气体的熵	95
§ 4-8 变比热绝热过程图表算法	103
思考题和讨论题	107
例题	107
习题	110
第五章 热力学第二定律	112
§ 5-1 循环	112
§ 5-2 热力学第二定律的几种说法	118
§ 5-3 卡诺循环,卡诺定理	121
§ 5-4 在相同温限间工作的其他循环	129
§ 5-5 熵的导出	134
§ 5-6 孤立系统熵增原理,过程进行的方向	136
§ 5-7 热力学第二定律的统计解释	145
思考题和讨论题	148
习题	148
第六章 实际气体的性质	151
§ 6-1 热力学微分方程式	152
§ 6-2 实际气体的状态方程式	158
§ 6-3 热力学微分方程式在求得实际气体 i, s 等函数时的应用	166
思考题和讨论题	169
习题	169
第七章 水蒸汽	170
§ 7-1 饱和温度和饱和压力	170
§ 7-2 水的定压加热、汽化和过热	171
§ 7-3 水和水蒸汽的状态参数	178

§ 7-4 水蒸汽表和图	179
§ 7-5 水蒸汽的基本过程	182
思考题和讨论题	185
例题	185
习题	187
第八章 气体和蒸汽的流动	189
§ 8-1 稳定流动的基本方程式	189
§ 8-2 促使流速改变的条件	192
§ 8-3 喷管的设计计算	196
§ 8-4 有摩擦的绝热流动	204
§ 8-5 绝热滞止	207
§ 8-6 绝热节流	209
思考题和讨论题	213
例题	214
习题	216
第九章 压气机中的热力过程	218
§ 9-1 单级活塞式压气机的工作原理	218
§ 9-2 单级活塞式压气机所需的功	219
§ 9-3 余隙容积的影响	222
§ 9-4 改进压缩过程的方法	224
§ 9-5 叶轮式压气机的工作原理	228
§ 9-6 引射式压缩机简述	231
思考题和讨论题	232
习题	232
第十章 活塞式内燃机循环	234
§ 10-1 概说	234
§ 10-2 汽油机和煤气机工作循环	235
§ 10-3 定容加热理想循环	236
§ 10-4 柴油机工作循环	239
§ 10-5 定压加热理想循环	241
§ 10-6 混合加热理想循环	243
§ 10-7 活塞式内燃机各种循环的比较	245
§ 10-8 二冲程内燃机循环	248
§ 10-9 增压式内燃机及其循环	249
思考题和讨论题	250
例题	251
习题	253

第十一章 燃气轮机装置循环	255
§ 11-1 定压加热理想循环	256
§ 11-2 定压加热实际循环	259
§ 11-3 提高热效率的措施	263
§ 11-4 定容加热循环	267
§ 11-5 喷气式发动机工作简介	269
思考题和讨论题	271
习题	271
第十二章 蒸汽动力装置循环	273
§ 12-1 水蒸汽作为工质的卡诺循环	273
§ 12-2 简单蒸汽动力装置循环——朗肯循环	275
§ 12-3 再热循环	283
§ 12-4 回热循环	285
§ 12-5 热电循环(供热供电循环)	292
§ 12-6 应用高参数蒸汽的意义	294
§ 12-7 两汽循环	295
思考题和讨论题	300
习题	301
第十三章 制冷装置循环	304
§ 13-1 制冷装置的理想循环——逆向卡诺循环	304
§ 13-2 压缩空气制冷循环	305
§ 13-3 压缩蒸汽制冷循环	309
§ 13-4 汽流引射压汽式制冷装置	314
§ 13-5 吸收式制冷装置	315
思考题和讨论题	316
习题	317
第十四章 湿空气	318
§ 14-1 概述	318
§ 14-2 绝对湿度和相对湿度	320
§ 14-3 湿空气的参数	322
§ 14-4 湿空气的焓-湿图 ($I-d$ 图)	324
§ 14-5 烘干过程	325
例题	326
习题	327
第十五章 化学热力学基础	328
§ 15-1 热力学第一定律应用于化学过程, 可逆与不可逆化学反应	330
§ 15-2 盖斯定律	336

§ 15-3 反应热效应和温度的关系——基尔希浩夫定律	338
§ 15-4 理论燃烧温度的计算	340
§ 15-5 化学平衡与平衡常数	340
§ 15-6 热力学第二定律在化学过程上的应用,反应方向的判据与平衡的 条件,最大有用功,自由能,自由焓	346
§ 15-7 平衡常数与最大有用功的关系	351
§ 15-8 离解与离解度,平衡移动原理	356
§ 15-9 奈斯特热定理,熵的绝对值	359
思考题和讨论题	363
习题	363

附录

附表一 气体的平均定压摩尔比热表	365
附表二 气体的平均定压重量比热表	366
附表三 气体的平均定压容积比热表	367
附表四 气体的平均比热(直线关系式)	368
附表五 空气的热力性质表	369
附表六 饱和水和饱和蒸汽表(依温度排列)	374
附表七 饱和水和饱和蒸汽表(依压力排列)	376
附表八 过冷水和过热蒸汽表	380

参考书刊	384
------------	-----

緒 論

§ 0-1 热能动力利用在社会主义建設中的重要性

自然界中可被人利用的能源主要有风力、水力、太阳能、地下热、燃料的化学能、原子核能等。現今利用得最多的是燃料的化学能,通过燃烧轉变成成为热能,再利用热能使在热动力設備中轉化成为机械能或电能,以供生产上和生活上的应用。

我国正以高速度进行着社会主义建設。不断高涨的工农业生产 and 国防建設均需要大量的动力供应和設計制造各种优良的热动力設備。热力发电是我国动力供应的重要来源。至于交通运输工具如車輛、船舶、飞机上所利用的动力更是絕大部分由燃料热能所产生的。所以不断改进热动力設備的設計和制造,提高它們的产量,改进它們的經濟性,以及不断开展工程热力学的研究就具有重要的意义。

§ 0-2 热力工程及热力学发展簡史

毛主席在《实践論》中指出“理論的基础是实践,又轉过来为实践服务。”热力工程与热力学也是在生产实践的基础上发展起来的。

社会的生产力发展到一定水平的时候,生产上出現了应用动力机的可能与需要,这是促成热动力机发明的根本因素和动力。热动力机的发明与应用又推动了热能轉变成成为机械能的理論方面的研究,促成了热力学的建立与发展。热力学的建立与理論研究上的成就反过来又促进了热动力机的不断改进。

在十八世紀初期,由于煤矿开采工业上对动力抽水机的需要,

最初在英国出现了带动往复水泵的原始蒸汽机。

在十八世纪下半期,由于城市中工场手工业的继续发展,生产实现了分工与资本主义制度下的集体生产,自动紡紗机、織布机等工作机不断发明,就迫切地需要有一种合用的动力机来带动这些工作机,所以只有到了工场手工业的晚期阶段,热动力机的发明与应用才有了可能与需要。这样,蒸汽机的发明与应用是社会生产力发展的必然结果,而且其发明和改进也是经过当时好些国家中很多人的共同努力所完成(以后热力学的建立与发展也是如此),当然,其中某些人的贡献特别大些,其功绩也是肯定的。

1763~1784年间英国瓦特对当时的原始蒸汽机作了巨大改进和发明,造成了应用高于大气压力的蒸汽、有回轉运动、有独立凝汽器的单缸蒸汽机,现今估计其热效率约为2%,这在当时已是很大的进步。此后蒸汽机被紡織、冶金等工业所普遍采用,使生产力得到了很大的提高。以后蒸汽机被不断改进。到了十九世纪初,发明了以蒸汽机作为动力的铁路机车和船舶。

蒸汽机的发明与应用,刺激、推动了热学方面的理论研究,促成了热力学的建立与发展。

1824年卡諾提出了卡諾定理与卡諾循环,发现了热轉变成机械能的根本条件,即必须有温度不同的热源与冷体,这在本质上是说出了热力学第二定律;揭露了决定热动力设备热效率的根本因素,即工质吸热时的温度与放热时的温度,温差愈大,热效率愈高,这以后成为各种实际热动力设备不断提高热效率的总指导原则。卡諾循环与卡諾定理是根据蒸汽机的实践經驗以及根据当时气体定律等物理知識,经过抽象、总结而得出的客观规律,以后成为建立热力学第二定律的重要根据和出发点,在热力学以及热力学的发展史上具有极为重大的意义。

1840~1851年间,迈耶、焦尔等人建立了热力学第一定律,即

能量守恒及其轉換定律在热力学上的表現。这定律以后成为热力学以及热工計算上最根本的依据。

恩格斯认为能量守恒及其轉換定律最主要的是发现了各种运动形态可以互相轉換这一客觀規律，认为这一定律是辯証唯物主义在自然科学方面的重要基础之一。以后恩格斯建立了辯証唯物主义关于物质及其运动的根本观点：物质与运动是不可分割的，沒有不运动的物质，也沒有非物质的运动，各种形态的运动可以互相轉化。

在卡諾所作研究的基础上，1850~1851 年間克劳修斯和湯姆遜先后提出了热力学第二定律。由于热能（物质分子等粒子的乱运动的能量）与机械能等其他能量本质上的不同，任何热过程都具有一定的方向性。热力学第二定律本质上是指明热过程方向性的定律。

热力学第一定律和第二定律的发现标志着热力学的建立。这两个定律以及一些其他基本概念构成了热力学的基础。

十九世紀末期发明了內燃机，因具有重量輕、热效率較高等优点，以后成为汽車、飞机、船舶、機車等交通運輸工具的主要动力机，也广泛用作拖拉机、采矿机械、国防战車等的动力。与內燃机的发明相先后，在热力学中发展了对內燃机中热力过程和循环，以及对提高热效率的研究。

到了十九世紀后半期，蒸汽机已經不能滿足工业生产上对动力的巨大需要。十九世紀末发明了汽輪机，它具有适宜于应用高参数的蒸汽、热效率高、功率可以很大等主要优点，現今成为热力发电厂最主要的动力設備。汽輪机的发明与应用，在工程热力学上提出并发展了高参数蒸汽的性质、气体与蒸汽經過噴管的流动等問題的研究。

最近二、三十年中，燃气輪机已經改进发展成为适合实际应用

的一种重要的热动力設備,在热力学中也发展了相应的研究內容。

汽輪机和柴油机是現今船舶和国防舰艇最主要的动力机。蒸汽机因热效率較低,在船舶上的应用逐渐减少,但因有制造技术要求較低、可以用煤、經久耐用等优点,在中小型船舶上的应用仍有其一定的地位。燃气輪机因有总重量輕的优点,在国防舰艇上的应用日漸增多。

§0-3 工程热力学的研究对象及其主要内容,

工程热力学在专业培养中的地位

工程热力学的研究对象为:热能轉化成机械能的規律和方法,提高轉化效率的途径。

工程热力学的主要內容包括:

(1) 基本概念与基本定律——热力学第一定律,第二定律,卡諾循环,卡諾定理等。这些基本概念和基本定律是全部工程热力学的基础。

(2) 因为热能轉化成为机械能通常是經過工质在热动力設備中的吸热和膨脹作功等状态变化过程,以及由这些过程所組成的循环而實現的,所以这些过程和循环的分析研究及其計算是工程热力学的主要內容之一。

(3) 常用工质(如气体和水蒸汽)的性质。因为在分析計理工质的状态变化过程和循环时必须应用到工质的性质。

(4) 因为热动力設備中也包括燃料的燃烧、溶液的性质等化学与物理化学变化,所以現代工程热力学的研究范围也有所扩大,也研究与热动力設備直接有关的一些化学与物理化学問題。但对这些內容本书只作些簡略的論述,并作为附录性质。

工程热力学在专业培养中的地位很重要,是动力专业的一門重要技术基础課程,前接物理課等基础課,后接各种专业課,如鍋

炉、汽輪机和內燃机等課程。本課程是这些专业課的主要理論基础。学好工程热力学是以后学好这些专业課以及进一步研究热力工程上各种問題的必要条件。各种热动力設備的設計計算以及改进創造方面的研究都要用到工程热力学的理論和計算方法。

§ 0-4 热力学研究方法

工程热力学中主要应用热力学的宏观研究方法。宏观研究方法的特点为,以热力学第一定律、第二定律等少数基本定律作为总的依据(这些定律最初也是根据实际經驗得到的),并根据各項問題的具体条件,推导出很多有用的公式和結論。例如,根据工质的压力、溫度、容积等宏观量的变化以計算工质在各种状态变化过程中所吸收的热量,所作出的膨胀功,以及求得各种循环热效率的公式。

由于热力学基本定律的可靠性以及它們对各种情况的普遍适用性,应用热力学宏观研究方法可以得到很可靠的结果。

在热力学和工程热力学中,还普遍采用抽象、概括、理想化和簡化的方法,例如:

将鍋炉的燃烧室以及各种可能的热源概括化,簡化成为具有一定溫度的抽象热源。

将空气、鍋炉中的烟气、內燃机和燃气輪机的燃气等气体理想化作为理想气体,以便于計算,而仍可得到工程計算上必要的准确度。

将实际上都是不可逆的过程理想化成为可逆过程,以便于分析計算,計算結果有需要时可按实际上的不可逆程度予以校正。而可逆过程可作为实际过程的理想目标,因在可逆过程中不发生机械能的損失。

簡化、抽象化的思維发展过程通常也就是抽出共性,略去細

节,突出本质,突出主要矛盾的过程。一切科学的正确的抽象都能够更深刻、更正确、更完全地反映客观事物。例如,任意閉合循环这一概念,能够突出地表明經過循环使热能轉化成为机械能的最根本原理,而同时略去了各种具体循环的各別特点和細节,在分析热动力循环的最根本原理时是有用的。

什么时候可以应用怎样程度的理想化和簡化方法,則要看分析研究的具体目的和所要求的准确度而定。例如,目的在分析研究什么是决定各种实际循环热效率最主要的热力学因素时,可以把实际循环理想化成为可逆的閉合的理想循环。但如果目的在于詳細計算实际循环,如进行燃气輪机裝置的設計热計算,則必須按照实际循环中的各实际过程作詳細的計算,这时工质(燃气)也必須按混合气体計算,但这混合气体仍可近似作为理想气体。

热力学宏观研究方法也有它的局限性和缺点。缺点在于:它不考虑物质分子和原子的微觀結構,也不考虑微粒的运动規律。所以根据热力学宏观研究方法所建立的热力学宏观理論,并不能說明热現象的本质及其內在原因。热力学宏观研究方法的这一缺点,由气体分子运动学說和統計物理学的研究方法及其研究成果予以弥补。

气体分子运动学說和統計物理学,认为大量气体分子的杂乱运动服从統計法則和数学的或然率法則,所以应用統計法則和或然率法則作为研究的方法,即所謂微觀的研究方法。气体分子运动学說和統計物理学能够解释热現象的本质及其內在原因。例如,气体分子运动学說和統計物理学认为,热能是物体(如气体)大量分子等微粒杂乱运动的动能,与机械能同为物质运动动能这一点上是相同的,这样解释了热力学第一定律的本质。但热能和机械能同时又有本质上的差別。物体的宏观运动轉化为微粒杂乱运动的可能性大,而相反方向轉化的可能性小。这样解释了热能与机

机械能相互转化的方向性,即解释了热力学第二定律的本质。

工程热力学主要研究工质的吸热、做功等宏观效果,所以主要应用热力学的宏观研究方法。但有时也引用了气体分子运动学说和统计物理学的基本观点及其研究成果,例如,气体比热较准确的数据就是根据统计物理学和量子统计学的研究成果而得到的。另一重要方面,则是为了解释热现象和经验定律的本质。

§ 0-5 本課程学习方法,本課程的特点

对于本课程的学习方法,提出下列一些注意要点供参考:

(1) 明确课程的主要线索。本课程的主要线索是研究热能转化成机械能的规律、方法和经济性。循着这个主要线索认清课程的思想体系以及前后各章节之间的连贯性和相互关系。

在学习各章节时要明确各章节的作用和目的,各研究些什么问题,得到些什么结果和结论。可以把学过的主要内容归纳成几个主要的问题,然后带着问题思考,带着问题学习。在明确所研究的问题时,要认清这些问题与实际的关系,认清所研究的问题基本上都是从实际问题而来,也是为了解决实际问题的。

(2) 掌握工程热力学的宏观研究方法,根据本课程的特点定出学习方法。在绪论和最初几章的学习过程中,要能够逐渐掌握热力学的宏观研究方法,如怎样对实际问题进行抽象、概括、理想化和简化,怎样应用一些基本定律和公式以分析研究各种具体问题,解决具体问题。从最根本的意义上讲,掌握学科研究方法与掌握学习方法是一致的。

在学习各章节所研究的具体问题时,要掌握分析研究这些问题的具体方法。例如在学习理想气体的热力过程这一章时首先要明确:分析各种过程要解决些什么问题,要应用到哪些方法和公式。可以说,学习的最主要目的还在于掌握分析研究问题的方法,

培养解决实际问题的能力。

(3) 学习中除基本理論、基本知識外，应特別重視基本技能(实验和計算技能)的訓練。重視計算方法和計算結果的合理准确性。工程热力学中各种計算方法是以后各專業課中設計計算的重要基础，将来用处很大，必須予以重視。

§ 0-6 解放后我国热动力事业的巨大成就

我国在动力的利用与发明上具有很悠久的历史。历史上很早就知道利用水力和风力以灌溉农田。在西汉时就发明了火药，这在世界上是最早的。唐宋时发明以火药推动的简单火箭以用于作战，当时已知道用煤作为燃料。

由于中国历代专制王朝和地主阶级对农民和全国劳动人民的极端残酷的剥削，使中国社会的发展一度趋于缓慢，但即使如此，自明、清以来，我国景德镇的瓷业，杭州的絲綢业，四川自流井的天然煤气制盐业等行业中已出现了頗大规模的资本主义工場手工业，如果以后沒有外来的帝国主义侵略的話，生产力的进一步提高与热动力机的发明必将逐步出现。1678~1679 年在北京曾有人試制过用简单的汽輪机推动的車輛与船只，可知我国当时的工业和交通运输上已有应用动力机的可能与需要。

以后，帝国主义对我国的侵略掠夺和国内的反动統治，严重阻碍了我国的经济发展，特别是国民党反动集团的黑暗統治，一方面搜括和劫掠全国的財富，另一方面向美帝国主义大量出卖国家民族的利益，弄到民不聊生、民族工业山穷水尽的地步。

解放以前，我国根本沒有制造汽輪机、大功率的发电設備和大功率內燃机的工业。大城市中的发电厂絕大部分为帝国主义所非法經營，作为剥削中国人民的重要手段之一，其設備都从国外进口。