

空天科学与工程系列教材·空天推进

工程热力学

Engineering Thermodynamics

黄敏超 胡小平 李大鹏 李小康 编著



科学出版社

空天科学与工程系列教材·空天推进

工程热力学

黄敏超 胡小平 李大鹏 李小康 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

书主要叙述与空天工程中能量转换过程相关的热力学基础知识,目的是使读者理解热力学抽象概念和基本定律,掌握工质的热力性质,了解空天动力装置中热力循环的概念;培养正确的思维模式,并使他们学会运用热力学的基础理论和分析方法处理空天工程中的有关问题,为后续课程提供必要的热力学应用方面的基础知识。全书共九章,主要内容为绪论、基本概念和定义、热力学第一定律、热力学第二定律、工质的热力性质、相转变与相平衡、喷管和扩压管的热力学分析、化学热力学基础、空天动力循环过程的热力学分析。本书注重基本概念和基本理论的阐述,注重理论与实践的联系,注重结合课程内容对学生开展热力学分析方法和思维能力的训练。书中附有例题、思考题和习题以及必要的热工图表。全书采用国际单位制,但考虑到当前工程实际,对某些工程单位也作了必要的说明。

本书适合作为航空宇航科学与技术、热能与动力工程、轮机工程、电力工程、核技术与工程、建筑环境(通暖)工程、化学工程、机械工程、材料工程等相关专业的本科生教材,亦可供相关领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/黄敏超等编著. —北京:科学出版社, 2019.6

(空天科学与工程系列教材·空天推进)

ISBN 978-7-03-061500-8

I. ①工… II. ①黄… III. ①工程热力学 IV. ①TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第110074号

责任编辑:潘斯斯 朱晓颖 王晓丽 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:16 1/8

字数:450 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

自古以来，人类就一直梦想能够像鸟儿一样自由飞行。无论是嫦娥奔月还是敦煌飞天，都代表了人们对于天空的这种向往。人类也从来没有停止过对飞行的追求和探索。莱特兄弟在1903年实现了人类大气层内的第一次有动力飞行，开启了航空时代新纪元。也就在这一年，齐奥尔科夫斯基建立了火箭和航天飞行理论。1911年他说出了这样一段名言：“地球是人类的摇篮，但是人类决不会永远停留在摇篮里。为了追求光明和探索空间，开始会小心翼翼地飞出大气层，然后再征服太阳周围的整个空间……”。1926年戈达德成功进行了第一枚液体火箭发射试验。他有一句名言：“过去的梦想，今日的希望，明天的现实。”人类从此进入航天时代。第一架螺旋桨飞机，第一个民用航班，第一架超声速飞机，第一颗人造卫星，第一艘载人飞船，第一次踏上月球表面……短短一百年来，人类飞行史超越了一个又一个里程碑。时至今日，航空航天技术对人类社会的影响已经拓展到交通、通信、气象、军事乃至日常生活等各个方面，其作用无疑是巨大而且广泛的。

空天发展，动力先行。作为空天飞行器的“心脏”，航空航天发动机技术的突破一直是推动空天活动不断超越发展的重要驱动力。活塞式发动机直接催生了飞机，喷气式发动机推进飞机突破声障，火箭发动机技术的成熟使得人类的宇宙航行和空间探索成为现实，目前已经成为国际热点的超燃冲压发动机，可以实现两小时全球到达，有望把人类带入高超声速时代……社会不断进步，文明不断发展，人类的飞行梦想不断延伸，为空天推进技术的发展提供了源源不断的牵引力，也寄托了更热切的期盼。

我国的航空航天事业，伴随着共和国的成长，从无到有，从弱到强，见证了中华民族伟大复兴的历史进程。航空航天事业的发展过程，也正是空天推进技术不断取得突破的过程。一代又一代空天推进领域的专家和技术人员，殚精竭虑，栉风沐雨，付出了辛勤的劳动，做出了巨大的贡献，也收获了沉淀淀的希望。从WP系列涡喷发动机、WS系列涡扇发动机，到YF系列液体火箭发动机、FG系列固体火箭发动机等各类航空航天发动机，累累硕果无不凝结着空天推进人的执著追求和艰苦奋斗。

国防科技大学空天科学学院源自哈尔滨军事工程学院的导弹工程系，成立以来一直专注航空航天领域的人才培养和科学研究工作，六十余年来为我国航空航天领域管理部门、科研院所、工厂企业等单位培养了大批优秀的科技、管理等各类人才，发挥了重要作用，形成了被传为美谈的“人才森林”现象。空天科学学院的校友们也一直是我国空天推进事业的骨干力量。

2017年9月，教育部公布了“双一流”建设高校及建设学科名单，国防科技大学进入了“一流大学”名单，空天科学学院主建的航空宇航科学与技术学科进入“一流学科”名单。

习近平总书记在党的十九大报告明确提出“加快一流大学和一流学科建设，实现高等教育内涵式发展”，指明了高等学校的办学方向。建设世界一流学科，涉及多个方面的内容，最重要的是两个方面：高质量的人才培养和高水平的科学研究。人才培养可以说是高等学校的立身之本，是最重要的使命。高水平的教学活动是培养高质量人才的基础性工作，包括课堂教学、实践教学、创新活动指导等多个方面，因此应是建设一流学科重点关注的工作之一。

高质量的人才培养，不但对学科声誉具有长期的支撑作用，而且为科学研究提供宝贵的创新人才支持。同时，高水平的科学研究对于人才培养也有着非常重要的支撑作用。十九大报告指出，建设创新型国家，“要瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破。”可见，新时代高等学校的科学研究要更注重提升品质，提高层次，不但要为我国原始创新、引领性成果做出更大贡献，而且要为建设世界一流学科奠定坚实基础。

国防科技大学有一个很好的办学传统，就是依照“中国航天之父”钱学森同志提出的“按学科设系”“理工结合，落实到工”的传统。这实际上就是以学科建设为主线，将人才培养与科学研究紧密结合，教研相长，相得益彰，形成良性循环。实践证明，这是一条成功之路。

空天科学学院按照这个思路开展学科建设，其中，编著出版高水平教材和专著是他们采用的行之有效的好方法之一。这样，既能及时总结升华科学研究的成果，又能形成高水平的知识载体，为高质量人才培养提供坚实支撑。早在 20 世纪 90 年代，学院老师们便出版了《液体火箭发动机控制与动态特性理论》《变推力液体火箭发动机及其控制技术》《液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用》《高超声速空气动力学》等十几部教材，至今仍被本领域高等学校和研究院所作为常用参考书。

现在，在总结凝炼长期人才培养心得和前沿科研成果基础上，他们又规划组织编著“空天推进”系列教材。这不但延续了学院的优良传统，也是建设世界一流学科的前瞻性举措，恰逢其时，承前启后，非常必要。这套新规划的“空天推进”系列教材，有几个鲜明的特点。一是层次衔接紧密，二是学科优势突出，三是内容系统丰富。整个系列按照热工基础理论、推进技术基础、发动机应用技术和学科前沿等几个层次规划，既突出火箭推进方向的传统优势，又拓展到冲压推进新优势方向，既注重理论基础，又强调分析设计应用，覆盖面宽，匹配合理，并统筹考虑了本科生和研究生的培养需要。总体来说，涵盖了空天推进领域较为系统的知识，体现了优势学科专业特色，反映了空天推进领域的发展趋势。这不但对于有志于在空天推进领域深造的青年学子大有帮助，而且对于从事空天推进领域研究与应用的科技人员，也大有裨益。这个系列教材的出版，对我国空天推进人才的培养和先进空天推进技术的发展，必将起到积极的促进作用。

习近平主席在我国首个“中国航天日”之际指出：“探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦”，强调要坚持创新驱动发展，勇攀科技高峰，谱写中国航天事业新篇章。前辈们的不懈努力已经推动我国航空航天事业取得了世人瞩目的巨大进步，空天事业的持续发展还需要后来人继续加油。空天推进是推动航空航天事业飞跃的核心技术所在，需要大批掌握坚实基础理论和富于创新精神的优秀人才持续拼搏、长期奋斗。我坚信，只要空天推进工作者矢志争先图强，坚持追求卓越，我们就一定能够不断实现新的跨越，不辜负新时代对空天推进人的殷切期待！

中国科学院院士

沈建辰

2017年10月

前 言

本书是根据国防科技大学 2018 版本科课程标准，吸取了国内外同类教材的优点，结合作者多年的教学经验，在校内试用多年的《工程热力学》内部教材的基础上编写而成的。

本书主要讲述空天领域所涉及的物质热物性和能量转换规律，它是空天领域从事科学研究和工程技术人员必备的基础知识。本书的主要任务是：进一步提高本科生的热力学理论水平，培养本科生正确的思维模式，并使他们学会运用热力学基础理论和分析方法处理热能转换和热能利用中的有关问题。

本书各章内容安排如下。

第 1 章是绪论，介绍热力学的发展简史、研究对象、研究方法和分支。

第 2 章是基本概念和定义，讲述系统、状态及状态参数、状态方程、功、热量、内能、焓、熵、温度和温标、热力循环等基本概念。

第 3 章是热力学第一定律，讲述热力学第一定律的实质、表达式、能量守恒方程的应用。

第 4 章是热力学第二定律，讲述热力学第二定律的实质与陈述、可逆过程和不可逆过程、关于热力学循环的第二定律推论、热力学温标、卡诺循环、熵和焓的基本概念。

第 5 章是工质的热力性质，讲述纯物质的热力性质、热力学关系式、理想气体混合物、湿空气。

第 6 章是相转变与相平衡，讲述单元复相系统、相转变与相平衡条件、汽化与凝结过程等。

第 7 章是喷管和扩压管的热力学分析，讲述工质流动过程的基本方程、声速和马赫数、滞止参数与临界参数、喷管和扩压管中一维稳态流动等。

第 8 章是化学热力学基础，讲述燃烧过程、反应系统的能量守恒、化学平衡等。

第 9 章是空天动力循环过程的热力学分析，讲述空天发动机分类、喷气发动机理想循环、液体火箭发动机循环、组合发动机循环等。

本书第 1~4 章由李小康编写，第 5、9 章由李大鹏编写，第 6 章由胡小平编写，第 7、8 章由黄敏超编写，全书由黄敏超、胡小平统稿。在本书编写过程中，作者得到李清廉教授、程谋森教授等许多专家有意义的指导和建议，在此表示衷心的感谢。此外，感谢为本书提供各种资料和帮助的其他专家教授以及参与校对工作的余彦声、贾智年等硕士研究生。在编写过程中，参考了国内外一些教材和文献的内容，在此一并致谢！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正！

作 者

2019 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 热力学的发展简史	1
1.2 热力学的研究对象	3
1.3 热力学的研究方法	4
1.4 热力学的分支	4
思考题	5
第 2 章 基本概念和定义	6
2.1 热力学系统	6
2.2 状态及状态参数	8
2.3 平衡状态和状态参数坐标图	10
2.4 状态方程	11
2.5 热力过程和准静态过程	13
2.6 功	14
2.7 热量	17
2.8 内能	19
2.9 焓	19
2.10 熵	19
2.11 温度和温标	20
2.12 热力循环	21
思考题	22
习题	22
第 3 章 热力学第一定律	23
3.1 热力学第一定律的实质	23
3.2 热力学第一定律表达式	23
3.3 能量守恒方程的应用	26
思考题	30
习题	30
第 4 章 热力学第二定律	32
4.1 热力学第二定律的实质与陈述	32
4.2 可逆过程和不可逆过程	33
4.3 热力学第二定律的推论	34
4.4 热力学温标	36

4.5	卡诺循环	36
4.6	熵	37
4.6.1	克劳修斯不等式	37
4.6.2	熵变的定义	39
4.6.3	闭口系统的熵方程	40
4.6.4	开口系统的熵方程	42
4.6.5	热力学过程的方向性	44
4.7	焓	45
4.7.1	焓的概念	45
4.7.2	闭口系统的焓方程	46
4.7.3	流动焓	48
4.7.4	开口系统的焓方程	49
	思考题	50
	习题	51
第 5 章	工质的热力性质	52
5.1	纯物质的热力性质	52
5.1.1	状态公理	52
5.1.2	p - v - T 关系	53
5.1.3	状态参数数据	56
5.1.4	气体 p - v - T 关系	60
5.1.5	理想气体模型	62
5.2	热力学关系式	66
5.2.1	状态方程	66
5.2.2	由全微分导出的热力学关系	68
5.2.3	熵、内能和焓的一般热力关系	70
5.2.4	其他热力学关系式	73
5.3	理想气体混合物	76
5.3.1	混合物成分的描述	76
5.3.2	混合气体模型	77
5.3.3	混合物的内能 U 、焓 H 和熵 S	79
5.3.4	不变成分混合物的过程	80
5.4	湿空气	81
5.4.1	干空气和大气	81
5.4.2	湿空气的比湿度和相对湿度	82
5.4.3	露点温度	83
5.4.4	绝热饱和温度和湿球温度	84
5.4.5	温湿图	85
5.4.6	湿空气过程	86
	思考题	89

习题	89
第6章 相转变与相平衡	92
6.1 单元复相系统	92
6.2 相转变与相平衡条件	93
6.2.1 过程方向和系统平衡判据	93
6.2.2 单元复相系统的平衡条件	94
6.2.3 相转变的条件	96
6.3 单元复相系统的相平衡图	98
6.4 克劳修斯-克拉珀龙方程	99
6.4.1 克劳修斯-克拉珀龙方程的建立	99
6.4.2 克劳修斯-克拉珀龙方程的应用举例	101
6.5 汽化与凝结过程	106
6.5.1 等温汽化与凝结过程	106
6.5.2 定压汽化与凝结过程	108
6.5.3 气液共存时的性质计算	108
6.6 曲界面复相系统的相转变与相平衡	110
6.6.1 曲界面相平衡条件	110
6.6.2 液滴与气泡生成和增长的条件	112
6.6.3 液体的过热度	115
思考题	117
习题	117
第7章 喷管和扩压管的热力学分析	120
7.1 预备知识	120
7.1.1 一维稳态流动的动量方程	120
7.1.2 声速和马赫数	121
7.1.3 滞止状态	122
7.2 喷管和扩压管中的一维稳态流动	122
7.2.1 面积改变的影响	122
7.2.2 背压的影响	124
7.2.3 正激波的方程组	125
7.3 喷管和扩压管中定比热容理想气体的流动	125
7.3.1 滞止参数	125
7.3.2 临界参数	127
7.3.3 正激波参数	128
思考题	131
习题	131

第 8 章 化学热力学基础	134
8.1 燃烧过程	134
8.2 反应系统的能量守恒	136
8.3 绝热火焰温度	138
8.4 绝对熵和热力学第三定律	140
8.5 化学平衡	141
思考题	147
习题	147
第 9 章 空天动力循环过程的热力学分析	149
9.1 空天发动机分类	149
9.1.1 吸气式发动机	149
9.1.2 火箭发动机	152
9.1.3 组合循环发动机	153
9.2 喷气发动机理想循环	156
9.2.1 喷气发动机的性能参数	157
9.2.2 循环分析基本假设	158
9.2.3 涡轮喷气发动机循环	158
9.2.4 加力式涡喷发动机的理想循环	162
9.2.5 涡轮风扇发动机的理想循环	165
9.2.6 脉冲爆震发动机(PDE)理想热力循环	168
9.2.7 超燃冲压发动机的理想循环	171
9.3 液体火箭发动机循环	178
9.4 组合发动机循环	179
9.4.1 涡轮基组合发动机热力性能计算	179
9.4.2 空气涡轮火箭发动机热力循环	181
9.4.3 火箭基组合发动机热力循环	183
思考题	187
习题	187
参考文献	188
附录	189

第1章 绪论

教材目标 本书主要讲述空天领域所涉及的物质热物性和能量转换规律，它是空天领域工程技术人员必备的基础知识。本书的主要目标是提高学生的热力学理论水平，培养学生正确的思维模式，并使他们学会运用热力学分析方法处理空天领域中热能转换和热能利用中的有关问题。

设计思路 本书以教育改革的基本理念为指导，加强与其他高校的相互联系，加速教学研究的进程。将教材的框架设计、内容安排、教学实施等有机结合起来，充分体现教材的先进性和创新点。本书在介绍热力学基本概念的基础上，重点讲述热力学第一定律、第二定律及其工程应用。通过本书的学习，学生可以理解热力学基本定律和工程应用方法，初步掌握空天工程系统热力特性分析与工程计算方法。

本章是绪论，主要内容包括：热力学的发展简史、研究对象、研究方法和分支。本章的主要目的是提高学生对热力学基础的兴趣。

1.1 热力学的发展简史

热现象是人类最早接触的自然现象之一。传说中远古时代燧人氏的钻木取火，就是将机械能转换为热能、使木头温度升高而发生着火的热现象。但是人类对热现象的科学认识，却经历了漫长的岁月，从远古时代的神话，到18世纪前后机械唯物主义的“燃素说”和“热素说”，直到近300年来，人类对热的认识才逐步形成了一门真正的科学。

18世纪初期，由于煤矿开采工业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。到了18世纪下半叶，资本主义工厂手工业发展，自动纺纱机、织布机等工作机不断发明，迫切需要一种实用的动力机来带动这些工作机，所以到了工厂手工业的晚期，热力动力机的发明与应用才有了需要和可能。

1763~1784年，英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对当时的纽科门原始蒸汽机进行了重大改进，发明了采用高于大气压的蒸汽作为工质，有回转运动、有独立冷凝器的单缸蒸汽机，现在估计其热效率约为2%，这在当时却已是很大的进步。因此可以说，蒸汽机的发明与应用是社会生产力发展的必然结果。

此后蒸汽机被纺织、冶金等工业所普遍采用，生产力得到很大的提高。到了19世纪初，以蒸汽机作为动力的铁路机车和船舶被发明了。

随着蒸汽机的广泛应用，如何进一步提高蒸汽机的效率变得日益重要。这样就促使人们对提高蒸汽机热效率、热功转换的规律以及水蒸气的热力性质等问题进行了深入研究，从而推动了热力学的发展。

在热功转换规律的研究上，1824年，卓越的年轻工程师卡诺(Sadi Carnot, 1796—1832)

发表了卡诺定理。他首先在理论上指出热机必须工作于温度各不相同的热源之间，才能将从高温热源吸入的热量转变为有用的机械功，并提出了热机最高效率的概念。这些实质上已揭示了热力学第二定律最基本的内容，但是卡诺受到了当时流行的“热素说”的束缚，因此未能从中发现热力学第二定律。尽管如此，卡诺对热力学的贡献是功不可没的，他指出冷热源之间温差越大，工作于其间的热机的热效率就越高，这成为以后各种实际热机和热动力设备提高热效率的总指导原则。

关于热力学第一定律即能量守恒及转换定律的建立，世界上目前公认应归功于德国人迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)、英国人焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)和德国人亥姆霍兹(Hermann von Helmholtz, 1821—1894)。迈耶于1842年首先发表论文阐述了这一定律，但当时缺乏实验支持，没有得到公认。焦耳在与迈耶的理论研究没有联系的情况下，在这方面进行了全面的实验研究。1843年，焦耳发表了第一篇关于热功相当实验的总结论文，并在后续几年中以各种精确的实验结果使热力学第一定律得到了充分的证实，从而获得了物理学界的公认。1847年，亥姆霍兹发表了著名的《论力的守恒》的演讲，并以论文的形式发表。虽然这篇论文内容就其实质来说并没有超出早他几年的迈耶和焦耳所发表的论文，但它除了兼有迈耶论文的深刻思想和焦耳论文的坚实实验数据外，还充分运用了数学知识，使用的是物理学家的语言，容易令人信服，它十分接近今天各类教科书中关于能量守恒与转换定律的一般叙述。在促使人们最终接受能量守恒与转换定律的过程中，这篇论文所起的作用比迈耶和焦耳的论文所起的作用都要大。

能量守恒与转换定律是19世纪物理学最重要的发现，它用定量的规律将各种物理现象联系起来，寻求一个可以度量各种现象的物理量，即能量。能量这一概念是由汤姆孙(William Thomson, 又称开尔文勋爵 Lord Kelvin, 1824—1907)于1851年引入热力学的。热力学第一定律的确立宣告了不消耗能量的永动机(第一类永动机)是不可能实现的。

随着热力学第一定律的建立，克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)在迈耶和焦耳工作的基础上，重新分析了卡诺的工作，根据热量总是从高温物体传向低温物体这一客观事实，于1850年提出了热力学第二定律的一种表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。

1851年，开尔文也独立地从卡诺的工作中发现了热力学第二定律，提出了热力学第二定律的另一种表述：不可能从单一热源吸取热量使之完全转变为功而不产生其他影响。

从单一热源(如大气)吸热完全转变为功而不产生其他影响的机器是不违背热力学第一定律的。但这种机器可从大气或海洋吸取热量使热量完全转变为功，因而可以说不需要任何代价，是完全免费的，所以实质上这也是一种永动机，称为第二类永动机。第二类永动机是非常吸引人的，曾使许多人浪费了大量的精力。热力学第二定律的建立，宣告了第二类永动机与第一类永动机一样，也是不可能实现的。

在卡诺研究的基础上，克劳修斯和开尔文从不同角度提出了热力学第二定律。热力学第二定律本质上是指明过程方向性的定律。在热力学的两个定律建立以后，将它们应用于分析各类具体问题的过程中，热力学理论得到了进一步的发展。例如，应用这两个基本定律，导出了反映物质各种性质的热力学函数以及各热力学函数之间的普遍关系，获得了各种物质在相变过程中、化学反应中的各种规律等。

在将热力学原理应用于低温现象的研究中，能斯特(Walther Hermann Nernst, 1864—1949)

在 1906 年得到了一个称为能氏定律的新规律，并于 1913 年将这一规律表述为“绝对零度不能达到原理”，这就是热力学第三定律。经典热力学的基础理论就是由上述三个热力学基本定律构成的。

纵观热力学的发展简史，可以说是热力学理论与热机技术及热力工程相互促进共同发展的。19 世纪末人们发明了内燃机，它具有体积小、重量轻、热效率较高等优点，很快成为汽车、飞机、船舶、机车等交通运输工具的主要动力机，也广泛用作拖拉机、采矿设备、国防战车的动力。与内燃机的发明相适应，人们在热力学中发展了对内燃机中热力过程和热力循环方面的研究。

19 世纪后半叶，蒸汽机已不能满足工业生产对动力的巨大需求。19 世纪末，人们发明了蒸汽轮机，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，现已成为火力发电厂最主要的动力设备。蒸汽轮机的发明与应用，促进了工程热力学中高参数蒸汽的性质、气体与蒸汽经过喷管的流动等问题的研究。

20 世纪 40 年代，燃气轮机已经改进发展成为实际应用的一种重要热动力设备，在热力学中也发展了相应的研究内容。

1942 年美国凯南 (Joseph Henry Keenan, 1900—1977) 在热力学基础上提出了有效能的概念，使人们对能源利用和节能的认识又上了一个台阶。

近代科学技术的发展给热力学提出了新的课题，如等离子体发电、燃料电池等能源转换新技术，环保型制冷工质研究，以及物质在超高温、超高压和超低温、超低真空等极端条件下的性质和规律等。古老的热力学不仅在传统领域中继续保持着青春与活力，也必将在解决高新技术领域的新课题中扮演十分重要的角色。

1.2 热力学的研究对象

热力学第一定律从数量上描述了热能与机械能相互转换时的关系，热力学第二定律从品质上说明热能与机械能之间的差别，指出能量转换时的条件和方向性。

热力学研究工质的基本热力性质，包括空气、燃气、水蒸气、湿空气的热力性质。工质是指实现热能与机械能相互转换的媒介物质，依靠它在热机中的状态变化（如膨胀）才能获得功，而做功通过工质才能传递热。

热力学研究各种热工设备的工作过程。应用热力学基本定律，分析计算工质在各种热工设备中所经历的状态变化过程和热力循环，探讨分析影响能量转换效果的因素以及提高能量转换效率的途径。

热力学研究与热工设备工作过程直接有关的一些化学和物理过程。目前，热能的主要来源是依靠燃料的燃烧，而燃烧是剧烈的化学反应过程，因此需要讨论化学热力学的基本知识。

随着科技进步和生产发展，工程热力学的研究和应用范围已不限于只是作为建立热机（或制冷装置）理论的基础，现已扩展到许多工程技术领域，如航空航天、高能激光、热泵、空气分离、空气调节、海水淡化、化学精炼、生物工程、低温超导、物理化学等，都需要应用工程热力学的基本理论和基本知识。因此，工程热力学已成为许多工科专业所必修的一门技术基础课。

1.3 热力学的研究方法

热力学有两种不同的研究方法：一种是宏观研究方法，另一种是微观研究方法。

宏观研究方法不考虑物质的微观结构，也不考虑微观粒子(分子和原子)的运动行为，而是把物质看成连续的整体，并且用宏观物理量来描述它的状态。通过大量的直接观察和实验，总结出基本规律，再以基本规律为依据，经过严格逻辑推理，导出描述物质性质的宏观物理量之间的普遍关系以及其他一些重要推论。热力学基本定律是无数经验的总结，因而具有高度的可靠性和普遍性。

应用宏观研究方法的热力学称为宏观热力学、经典热力学或唯象热力学。工程热力学主要采用宏观研究方法。

在宏观热力学中，还普遍采用抽象、概括、理想化和简化处理方法。为了突出主要矛盾，往往将较为复杂的实际现象和问题略去细节，抽出共性，建立起合适的物理模型，以便能更本质地反映客观事物。例如，将空气、燃气、湿空气等气体理想化为理想气体处理，将高温热源以及各种可能的热源概括成为具有一定温度的抽象热源，将实际不可逆过程理想化为可逆过程，以便分析计算，然后根据实验给予必要的校正，等等。当然，运用理想化和简化方法的程度要视分析研究的具体目的和所要求的精度而定。

宏观研究方法也有它的局限性，它不涉及物质的微观结构，因而往往不能解释热现象的本质及其内在原因。

微观研究方法正好弥补了这个不足。应用微观研究方法的热力学称为微观热力学或统计热力学。它从物质的微观结构出发，即从分子、原子的运动和它们的相互作用出发，研究热现象的规律。在对物质的微观结构及微粒运动规律做某些假设的基础上，应用统计方法，将宏观物理量解释为微观量的统计平均值，从而解释热现象的本质及其发生的内部原因。由于做了某些假设，其结果与实际并不一定完全符合，这是它的局限性。

作为应用科学的工程热力学，是以宏观研究方法为主，以微观理论的某些假设来帮助解释一些微观现象。

1.4 热力学的分支

热力学是研究与热现象有关的能量转换规律的科学。

能量是物质运动的量度。能量和物质不可分割，能量转换必须以物质为媒介。如何看待物质是研究的出发点，系统状态的描述方法和研究系统性质的理论依据都与如何看待物质有关。

宏观观点和微观观点从不同角度看待物质。宏观观点把物质看成连续介质，微观观点认为物质是由大量分子、原子等微观粒子组成的，因而有宏观热力学和微观热力学之分。

众所周知，在无外界作用时，处于平衡态的体系的状态不随时间变化，但常见的物系都是非平衡态的。无论是处于平衡态或非平衡态的物系都可用宏观或微观两种不同的观点进行研究，因此又有平衡态热力学和非平衡态热力学的区别。

以宏观方法研究平衡态物系的热力学称为平衡态热力学，又称为经典热力学；用宏观方

法研究偏离平衡态不远的非平衡态物系的热力学称为非平衡态热力学或不可逆过程热力学。用微观方法研究热现象的科学统称为统计物理学。统计物理学用于平衡态物系时称为统计热力学，又称统计力学。

以宏观方法研究热现象时，以总结经验而来的基本定律为依据，而统计热力学则以粒子运动遵守的经典力学或量子力学原理为依据。可见，二者的理论依据是不同的。

宏观方法的优点是简单、可靠，只要少数几个宏观物理量就可描述系统的状态。同时，所依据的基本定律已为大量实践所证实，具有极大的普遍性和可靠性。用以进行各种推演时，只要不作其他任意的假定，所得的结论同样是极为可靠的。然而，宏观方法未涉及物质的内部结构，不能解释现象的微观本质，同时也不能用以得出具体物质的性质。经典热力学的不足之处可用统计热力学弥补。统计热力学基于物质的内部结构，不但可以解释宏观现象的本质，而且当对物质的结构作出一些合理的假设后，甚至还可得出具体的物性。但微观粒子为数众多，要用统计的方法才能进行研究，因此计算烦琐，不如宏观方法简单。此外，统计热力学有赖于对物质结构所做的假设，因而所得结论的可靠性也较差。总之，两种方法相互补充，相辅相成，不能说一种绝对优于另一种。

就工程应用而言，简单可靠是首先需要考虑的问题，因此本书的内容以宏观平衡的经典热力学为主。为了解释某些宏观现象的实质和扩大眼界，以及加深对主要内容的理解，本书也安排了一些统计热力学和不可逆过程热力学方面的内容。

思 考 题

- 1-1 简述热力学的发展史。
- 1-2 热力学的研究对象和研究方法是什么？
- 1-3 什么是第一类永动机？什么是第二类永动机？

第2章 基本概念和定义

内容提要 本章主要讲述热力学基础知识，包括热力学基本概念及定义。这些基本概念和基本定律在本课程中几乎随时都会用到，对它们必须有一个正确的理解和掌握。

基本要求 要求学生深入理解热力学系统及其状态参数、过程参数的基本概念，深入理解准静态过程和可逆过程的基本概念，掌握功、热量、内能、焓、熵的基本概念及计算式。

2.1 热力学系统

工程热力学主要研究热能和机械能之间的转换规律。无论热能还是机械能，作为一种能量，它们都不能脱离物质而单独存在以及相互转换。例如，在蒸汽动力装置中，水在锅炉中吸热变成蒸汽，然后在汽轮机中水蒸气膨胀推动叶轮旋转对外做功，做功后的乏气在冷凝器中向冷却水放出热量而又凝结成水。在这个过程中，实现热能和机械能转换的工质是水蒸气，向工质提供热量的高温热源是炉膛中燃烧生成的高温燃气，而吸收工质所释放的热量的低温热源是冷凝器中的冷却水。正是通过工质的状态变化以及它与高温热源、低温热源的相互作用实现了热能与机械能之间的转换。

热力学是通过对有关物质的状态变化的宏观分析来研究能量转换过程的。为了便于研究，**选取某些确定的物质或某个确定空间中的物质作为主要的研究对象，并称为热力学系统，简称系统。热力学系统之外的一切其他物质则统称为外界。**在进行热力学分析时，对于热力学系统在能量转换过程中的行为及变化规律，要作详细分析，而对于外界一般只笼统地考察它们与热力学系统间相互作用时所传递的各种能量与质量。**热力学系统与外界之间的分界面称为边界。**根据具体问题，边界可以是实际的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是移动的，主要取决于能否简明地分析该热力设备。当热力学系统与外界间发生相互作用时，必须有能量和质量穿越边界，因而可在边界上判定热力学系统与外界间传递能量和质量的形式及数量。实际上，也只有在边界上才能判定系统与外界间是否有能量和质量的交换。由于热力设备是通过工质状态变化而实现能量转换的，且其变化规律决定了过程的特点，故在分析热力设备的工作时通常取工质作热力学系统，而把高温热源、低温热源等其他物体取作外界。

热力学系统的选取应注意两个限制条件：①较小的热力学系统必须包括大量的微观粒子；②较大的热力学系统必须是有限的。这是因为工程热力学是建立在统计基础之上的，通过人们在长期实践中研究有限系统总结出来的。

根据内部情况的不同，热力学系统可以分为：

- (1) 单元系统，由单一的化学成分组成；
- (2) 多元系统，由多种化学成分组成；
- (3) 单相系统，由单一的相(如气体或液体)组成；
- (4) 复相系统，由多种相(如气-液两相或气-液-固三相)组成；
- (5) 均匀系统，系统的各部分性质均匀一致；

(6) 非均匀系统，系统的各部分性质不均匀一致。

根据热力学系统与外界相互作用情况的不同，热力学系统又可分为闭口系统、开口系统和孤立系统。

1. 闭口系统

若一个热力学系统与外界没有质量交换，就称为闭口系统。如图 2-1-1 所示，气体在气缸中受热膨胀而推动活塞及重物做功。这时若取气体为一个热力学系统，而取活塞、重物及热源为外界，则当系统膨胀对外界做功时，系统的边界随活塞一起移动，没有任何物质穿越边界进入或离开系统，因而这个热力学系统为闭口系统。闭口系统中包含的物质是固定的，故也称闭口系统为控制质量系统(control mass system)。

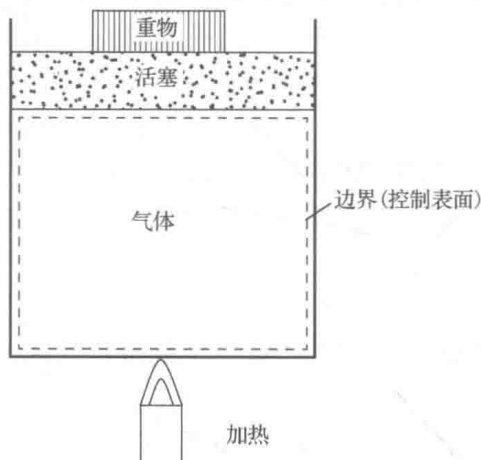


图 2-1-1 活塞-气缸组件中的气体

2. 开口系统

若一个热力学系统与外界之间有质量交换，就称为开口系统。如图 2-1-2 所示，有一台汽车发动机，燃料和空气不断从进口流入，在其中燃烧后膨胀对外界做功，然后废气从出口流出。这时若取发动机外壳及进、出口截面(假想边界)所包围空间中的物质为一个热力学系统，则系统和外界间不断通过进口和出口处的边界交换物质，故这个系统为开口系统。开口系统中物质的量是可以改变的。由于开口系统所占据的空间是固定的，故也称开口系统为控制体积系统(control volume system)。

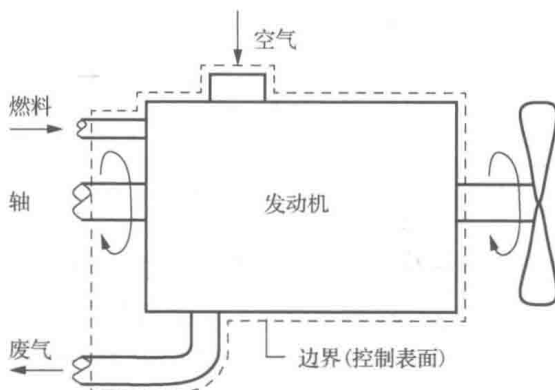


图 2-1-2 汽车发动机