

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

汽车发动机原理

主 编 韩同群

副主编 姚胜华

参 编 苑金梁 袁 焕 黄晓鹏



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一,是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门,包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务,在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20世纪80年代以来,以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生,极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度,改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式,产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面:

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用,使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件,而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品,其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动,而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化, CAD/CAM/CAE/PDM集成技术和软件系统得到广泛使用,促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低,而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术,并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化,制造过程的网络化、全球化得到很大的发展,涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式,制造装备和制造系统的柔性可与重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学,制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程学科特征和发展趋势表明,现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此,加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育,培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才,不断推动

* 殷国富教授:现为教育部机械学科教学指导委员会委员,现任四川大学制造科学与工程学院院长

我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998 年对本科专业目录进行了第 3 次大的修订。调整后的机械类专业变成 4 类 8 个专业,它们是:机械类 4 个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类 1 个专业(测控技术与仪器);能源动力类 2 个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类 1 个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于 21 世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业基础知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

前 言

近年来,随着汽车工业的发展,社会对汽车类人才的需求不断增加,设置车辆工程、交通运输、汽车运用等专业的院校越来越多。传统上,上述专业在学习发动机原理课程之前,都开设工程热力学、传热学等课程,但这两门课内容多、课时长。由于教学改革的需要,上述课程被压缩了学时,也有的高校取消或不开设这两门课。严格地说,学习发动机原理课程,没有热工学方面的知识作基础是有缺陷的,也会给学生将来的工作实践带来不便。

因此,与国内同类教材相比,本书增加了“热力工程基础”部分,主要讲述热功转换的基本规律、燃烧与传热的基本知识,这部分内容紧密结合汽车发动机基础原理知识,且够用即可。

有关内燃机的工作原理方面,在教学实践中,学生反映本课程知识与内容“太散”,抓不住主线。本书理出的知识主线条是:“热功转换的基本规律—动力的输出与能量利用—燃烧与排放—发动机性能的测试、调控与应用”。全书分篇、章编写,使知识结构脉络清晰、层次分明,达到“形散而神不散”的效果。

在介绍车用发动机新技术方面,本书以加强针对性和应用性为原则,紧跟发动机新技术发展趋势。例如,淘汰或缩减化油器内容,介绍汽油机电控、柴油机电控、新的内燃机燃烧系统和燃烧模式、燃料电池、混合动力驱动技术等。

在介绍发动机新技术时,根据其特点适当安排章节。例如燃料电池安排在“热工基础”部分“燃烧学基础”一章,以便与热机循环比较;新的内燃机燃烧系统和燃烧模式安排在“燃烧与排放”部分的汽、柴油机章节;混合动力驱动技术安排在“发动机运行特性与匹配技术”一章。

汽、柴油机电子控制技术内容多而复杂,涉及混合气形成、点火、可变技术、排放控制等内容,在编写时安排章节不易把握,对此,本教材对汽柴油机电子控制技术内容的编写原则是:

(1) 淡化“汽车构造”中学过的结构内容。

(2) 除了在相关章节中介绍用到的内容外(例如在“汽油机混合气的形成和燃烧”章节中介绍电控燃油喷射;在“发动机的排放与噪声控制”章节中介绍“三元式催化”等内容),主要利用第12章“发动机性能与参数的调控技术”来介绍汽、柴油机电子控制功能和控制策略。以便从“原理”而不是从“结构”的角度来理解汽、柴油机电控技术。

本教材根据北京大学出版社2006年出版的《21世纪全国应用型本科机械实用规划系列教材》的要求编写,学时在60~80学时左右(包括实验)。本书由湖北汽车工业学院韩同群副教授担任主编,姚胜华副教授担任副主编,参加编写的有姚胜华(第1、2、3、4章),甘肃农业大学黄晓鹏(第5、6、7章),鲁东大学苑金梁(第8、9章),黄石理工学院袁焕(第10章),韩同群(第11、12章)。

本书的读者对象中,除车辆工程、交通运输、汽车运用等专业的本科生外,专科生、3+2等层次汽车类专业学生也可选用。因此,本书可以适应不同层次、不同学时的需要。由于编者水平有限,疏漏在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2007.4

目 录

符号说明	1	2.1.1 热力过程的条件和限度 问题	42
第一篇 热力工程基础	3	2.1.2 热机循环	42
第1章 热力学第一定律	4	2.1.3 热力学第二定律	44
1.1 工程热力学基本概念	4	2.1.4 卡诺循环及热效率	45
1.1.1 工质及热力系统	4	2.2 四冲程发动机的理论循环	49
1.1.2 状态及状态参数	5	2.2.1 对发动机实际工作过程的 简化	49
1.1.3 状态参数的坐标图	8	2.2.2 理论循环的热效率和平均 指示压力的计算	51
1.1.4 热力过程和循环	8	2.2.3 理想循环热效率和平均 指示压力的影响因素	52
1.1.5 功和热量	9	2.2.4 各理想循环热效率的 比较	54
1.2 热力学第一定律	11	思考题	55
1.2.1 热力学第一定律的 表达式	11	习题	55
1.2.2 闭口系统的能量方程	12	第3章 燃烧学基础	57
1.2.3 开口系统稳定流动能 量方程	13	3.1 发动机的燃料	57
1.3 理想气体的热力性质	16	3.1.1 汽油	57
1.3.1 实际气体和理想气体	16	3.1.2 柴油	61
1.3.2 理想气体状态方程式	17	3.1.3 代用燃料	62
1.3.3 理想气体的比热容、 热力学能和焓	18	3.1.4 燃料理化特性引起的发动机 工作模式上的差异	71
1.3.4 理想气体的熵	19	3.2 燃烧热化学	72
1.3.5 理想混合气体	19	3.2.1 1kg 燃料完全燃烧所需的 理论空气量	72
1.3.6 湿空气	24	3.2.2 化学反应速度	73
1.4 理想气体的热力过程	28	3.2.3 质量作用定律	74
1.4.1 多变过程与基本热力 过程	28	3.2.4 化学平衡常数及其计算	74
1.4.2 多变过程	29	3.2.5 反应速率的碰撞原理	76
1.4.3 四种基本热力过程	31	3.2.6 链锁反应	76
1.4.4 多变过程的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图	34	3.3 化学反应的热效应	79
思考题	39	3.3.1 热力学第一定律应用于 化学反应	79
习题	40	3.3.2 热效应	80
第2章 热力学第二定律	42		
2.1 热机循环	42		

3.3.3 生成焓	81	5.1 四冲程发动机的实际循环	122
3.3.4 热效应与绝热理论燃烧 温度的计算	81	5.1.1 发动机的实际循环	123
3.3.5 绝热理论燃烧温度	83	5.1.2 发动机实际循环与理论 循环的比较	126
3.4 燃料电池	84	5.2 发动机的指示指标	128
3.4.1 燃料电池结构	84	5.2.1 发动机的示功图	129
3.4.2 燃料电池的工作原理	86	5.2.2 发动机的指示性能 指标	130
思考题	88	5.3 发动机的有效指标	132
习题	88	5.3.1 动力性指标	132
第4章 传热过程	89	5.3.2 经济性指标	134
4.1 热量传递过程概述	89	5.3.3 强化指标	135
4.1.1 热传递的概念	89	5.4 机械损失与机械效率	136
4.1.2 热传递的三种基本方式	90	5.4.1 机械效率	136
4.2 导热过程	90	5.4.2 机械损失的测定	137
4.2.1 导热现象分析	90	5.4.3 影响机械效率的主要 因素	139
4.2.2 导热机理	92	5.4.4 发动机的热平衡	140
4.2.3 导热问题分析过程	92	思考题	143
4.2.4 一维稳态导热问题	93	第6章 换气过程与循环充量	144
4.3 对流换热	99	6.1 四冲程发动机的换气过程	144
4.3.1 对流换热的计算	99	6.1.1 换气过程	144
4.3.2 对流换热系数的各种关联 式及应用举例	101	6.1.2 换气损失	146
4.4 辐射换热	104	6.2 四冲程发动机的充量系数	147
4.4.1 辐射换热的基本知识	104	6.2.1 充量系数	147
4.4.2 两物体间的辐射换热量 的计算	108	6.2.2 充量系数与发动机功率、 转矩的关系	148
4.4.3 气体辐射	112	6.2.3 影响充量系数的因素	150
4.4.4 火焰辐射	114	6.2.4 提高发动机充量系数 措施	151
4.5 发动机换热分析	115	6.3 二冲程发动机的换气过程	156
4.5.1 发动机中导热问题的求解 方法	115	6.3.1 二冲程发动机的换气 过程	156
4.5.2 燃气与壁面间的辐射 换热	116	6.3.2 二冲程发动机换气过程的 特点	157
4.5.3 燃气与壁面间的瞬时综合 换热系数	117	6.3.3 二冲程发动机的扫气 方案	158
习题	118	6.3.4 换气效果的评价	159
第二篇 动力输出与能量利用	121	6.3.5 影响扫气效率的因素	160
第5章 发动机实际循环与 评价指标	122	思考题	161

第 7 章 发动机废气涡轮增压	162	8.1.1 正常燃烧过程	188
7.1 发动机增压的基本方法		8.1.2 不规则燃烧	191
与原理	162	8.1.3 不正常燃烧	192
7.1.1 增压的概念	162	8.1.4 运转因素对燃烧的影响	194
7.1.2 增压发动机的特点	163	8.2 汽油机混合气制备原理	197
7.1.3 增压的衡量指标	163	8.2.1 汽油机理想混合气特性	197
7.1.4 增压的结构形式及分类	164	8.2.2 化油器式供油系统混合气的形成原理	199
7.2 废气涡轮增压器的基本结构和工作原理	167	8.2.3 电控燃油喷射式供油系统混合气的形成	202
7.2.1 径流式涡轮的工作原理	167	8.3 汽油机的燃烧室	206
7.2.2 离心式压气机的工作原理与特性	169	8.3.1 汽油机对燃烧室的要求	206
7.3 废气涡轮增压的类型与废气能量的利用	172	8.3.2 传统汽油机燃烧室	207
7.3.1 废气涡轮增压的类型	172	8.3.3 汽油机稀薄燃烧系统	209
7.3.2 废气能量的利用	173	思考题	214
7.3.3 定压系统与脉冲系统的比较和选择	176	第 9 章 柴油机混合气的形成和燃烧	216
7.4 废气涡轮增压对发动机性能的影响	177	9.1 柴油机燃烧与放热	216
7.4.1 废气涡轮增压对发动机动力性和经济性的影响	177	9.1.1 柴油机燃烧过程	216
7.4.2 改善废气涡轮增压发动机转矩特性的途径	179	9.1.2 柴油机燃烧放热规律	218
7.4.3 废气涡轮增压对发动机其他性能的影响	180	9.2 柴油机混合气的形成原理	221
7.5 汽油机增压	181	9.2.1 燃油的喷射与雾化	221
7.5.1 汽油机增压的特点	182	9.2.2 燃烧室与混合气形成	228
7.5.2 汽油机涡轮增压的主要技术措施	182	9.2.3 柴油机的预混合燃烧	237
7.5.3 汽油机废气涡轮增压器的布置	183	9.3 燃烧过程的优化	239
思考题	185	9.3.1 燃烧过程优化的基本原则	239
第三篇 燃烧与排放	186	9.3.2 燃油喷射过程的优化	241
第 8 章 汽油机混合气的形成和燃烧	188	9.3.3 燃烧室的对比及选型	244
8.1 汽油机燃烧过程	188	思考题	246
		第 10 章 发动机的排放与噪声控制	247
		10.1 发动机有害排放物的生成及危害	247
		10.1.1 发动机排放污染的现状	247
		10.1.2 发动机排放污染物的危害	248

10.1.3 发动机排放污染物的 生成机理	251	11.2.3 试验方法及数据 处理	291
10.2 影响汽油机有害排放物生成的主要 因素及控制	256	11.3 发动机运行特性与汽车匹配 ...	293
10.2.1 影响因素	256	11.3.1 发动机的速度特性与 汽车动力性匹配	293
10.2.2 机内净化技术	258	11.3.2 车用柴油机的调速 特性	299
10.2.3 机外净化技术	262	11.3.3 发动机的负荷特性、万有特性 与汽车经济性匹配	304
10.3 影响柴油机有害排放物生成的主要 因素及控制	264	11.3.4 混合动力驱动技术	311
10.3.1 柴油机有害排放物生成的 特点	264	思考题	315
10.3.2 影响因素	265	第12章 发动机性能与参数调控 技术	316
10.3.3 机内净化技术	266	12.1 发动机调控技术的发展	316
10.3.4 机外净化技术	270	12.1.1 传统的机-液调控 装置	316
10.4 发动机排放标准与测试	272	12.1.2 电子控制系统在发动机中 的应用	317
10.4.1 排放标准	272	12.1.3 发动机(汽车)管理 中心	319
10.4.2 排放物测定	274	12.2 汽油机的计算机管理系统	320
10.5 发动机噪声来源与控制	277	12.2.1 控制功能	320
10.5.1 发动机噪声的来源	277	12.2.2 燃油喷射的控制	321
10.5.2 噪声控制措施	280	12.2.3 综合控制策略	326
思考题	281	12.3 电子控制技术在柴油机上的 应用	331
第四篇 运行特性与性能调控	283	12.3.1 电子控制燃油喷射系统 的种类	331
第11章 发动机运行特性与匹配 技术	284	12.3.2 控制参数及控制 策略	336
11.1 发动机的特性	284	思考题	337
11.1.1 工况、工况平面与功率 标定	284	参考文献	338
11.1.2 发动机运行特性及其 分析方法	286		
11.2 发动机性能测试	287		
11.2.1 台架试验设备	287		
11.2.2 功率和油耗的测量	288		

符号说明

p ——压力	c ——工质宏观速度
v ——比体积(质量体积), 流体速度	$\bar{V}$ ——气体流速
V ——容积	m ——质量
ρ ——密度, 预胀比	$\dot{m}$ ——质量流量
T ——热力学温度	η_t ——热效率
U ——热力学能	F ——重值作用力
u ——比热力学能	Δh_f^0 ——生成焓
H ——焓	T_{ad} ——绝热燃烧温度
h ——比焓	B ——每小时发动机的耗油量
S ——熵活塞行程	b_e ——有效燃油消耗率
s ——比熵	b_i ——指示燃油消耗率
W ——功	C_m ——活塞平均速度
w ——单位质量工质所做功	D ——汽缸直径, 外径
Q ——热量	d_k ——燃烧室凹坑直径
q ——单位质量工质所交换的热量, 热流密度	F_i ——示功图面积
E ——总能量	K_T ——转矩适应性系数
E_k ——功能	K_n ——转速适应性系数
E_p ——位能	K_a ——混合气的空气量比例系数
e ——单位质量工质的总能量	H_u ——燃料低热值
t ——时间, 温度	i ——汽缸数
R ——气体常数, 导热热阻	L ——燃烧 1kg 燃油实际供给空气量
R_m ——通用摩尔气体常数	L_0 ——燃烧 1kg 燃油理论供给空气量
μ ——分子量或千摩尔质量	m_e ——比质量
n ——物质的量, 发动机转速	n_1 ——压缩多变指数
c_p ——定压比热容	n_2 ——膨胀多变指数
c_v ——定容比热容	P_e ——有效功率
x_i ——质量成分	P_m ——机械损失功率
γ_i ——容积成分	P_i ——指示功率
y_i ——摩尔成分	P_L ——升功率
φ ——相对湿度	P_p ——泵气损失功率
d ——含湿量	p_a ——环境压力
π ——比热比, 绝热指数	$p_{c.o.}$ ——压缩终了压力
λ ——压力升高比, 导热系数	p_{ex} ——膨胀终了压力
A ——面积	p_{dc} ——进气终了压力
a ——声速	p_r ——排气终点压力
	p_{max} ——最高燃烧压力

p_{me} ——平均有效压力
 p_{mi} ——平均指示压力
 p_{nm} ——平均机械损失压力
 p_t ——循环平均压力
 Q_1 ——循环单缸燃烧发热量, 物体 1 的净辐射热量
 Q_2 ——循环单缸燃烧散热量
 T_a, t_a ——环境温度
 T_{co}, t_{co} ——压缩终了温度
 T_{de} ——进气终了温度
 T_{ex}, t_{ex} ——膨胀终了温度
 T_{max}, t_{max} ——最高燃烧温度
 T_r, t_r ——排气温度
 T_{tq} ——转矩
 C_m ——活塞平均速度
 V_a ——汽缸总容积
 V_c ——汽缸压缩容积
 V_s ——汽缸工作容积
 v_T ——湍流火焰传播速度
 v_L ——层流火焰传播速度
 W_i ——循环指示功
 W_m ——实际机械损失功
 W_e ——循环有效功
 ϵ_c ——压缩比
 η_{et} ——有效热效率
 η_t ——指示热效率
 η_m ——机械效率
 η_f ——燃烧效率
 θ_{ij} ——喷油提前角
 θ_{ig} ——点火提前角
 θ_H ——供油提前角

ρ_0 ——初始膨胀比
 λ_p ——压力升高比
 π_k ——增压比
 φ_k ——增压度
 τ ——冲程数, 透过率
 τ_1 ——着火落后期
 ϕ_a ——过量空气系数
 ϕ_c ——充量系数
 φ ——曲轴转角
 Ω ——涡流比
 μ ——转矩储备系数
 γ ——残余废气系数
 α ——换热系数, 吸收率, 空燃比
 t_f ——流体温度
 t_w ——壁面温度
 l ——定性尺度
 d ——内径
 Re ——雷诺数
 Pr ——普朗特数
 Nu ——努谢尔特数
 Gr ——格拉晓夫数
 μ ——动力黏度
 ν ——运动黏度
 ρ ——密度, 反射率
 ϵ ——黑度
 E_b ——黑体辐射率
 $E_{b\lambda}$ ——黑体单色辐射率
 $X_{1,2}$ ——物体 1 对物体 2 的角系数
 $X_{2,1}$ ——物体 2 对物体 1 的角系数
 $Q_{1,2}$ ——物体 1、2 之间的辐射换热量
 Q_1 ——物体 1 的净辐射热量

第一篇 热力工程基础

众所周知，工程上可以通过很多种方法获得机械能，例如，可以直接利用风与水的机械能，还可以将太阳的热能、原子核反应产生的热能、燃料燃烧产生的热能变成机械能。所有这些获得机械能的机器被称之为发动机，本篇介绍与热力发动机有关的热工基础知识。

热力工程基础包括工程热力学和传热学的基础知识。

工程热力学的研究对象是热机，即一种将燃料燃烧的热能变成机械能的机器。热机的发展已有上百年的历史。按照工作方式的不同它可以分成蒸汽动力装置和燃气动力装置。燃气动力装置是指燃料的燃烧过程和工作过程都在一种设备中的机器，其主要形式有往复活塞式内燃机和燃气轮机装置，而蒸汽动力装置则是指燃料的燃烧过程和工作过程分别在两种不同设备中的机器，其主要形式有蒸汽机、蒸汽轮机等。这些热机结构及工作方式的不同导致了它们中热能变成机械能的效率的不同，工程热力学就是研究热能变成机械能的规律以及如何提高这种转换效率。

在工程热力学中，主要以热力学第一定律、热力学第二定律、气体状态方程式、工质的热力性质、热化学平衡等基本定律和理论作为总的依据，并根据各种问题的具体条件，推导出一些工程上实用的公式，得出一些有工程实际应用价值的重要的结论。由于工程问题的复杂性，为突出本质及主要矛盾，本课程在研究方法上普遍采用了抽象、概括、理想化及简化的手段，例如，理想气体及可逆过程等理想化的假定，活塞往复式内燃机中循环简化的处理，都是成功应用这些手段的例子。

热能的应用除了转变成机械能应用之外，生产及生活中还有很多场合需直接应用热能，例如加热、烘干、供暖等。在这些应用中需计算热能的转移量，这就是传热学要研究的问题，即传热学是研究热能转移过程中规律的科学。传热学在生产技术领域的许多部门应用十分广泛，在能源、化工、冶金、动力机械等部门中的换热器和专用换热设备都以传递热能为其主要功能，它们的设计、制造、运行和提高经济效益都要大量地运用传热学的知识，

热力发动机零部件热负荷的计算及温度场的测算也需要运用传热学的知识加以解决。传热学主要是以导热、对流和热辐射三种基本传热方式为基础，应用一些普遍公式和定律研究各种特殊传热过程的传热量的计算公式。由于一些传热问题的复杂性，传热学也需要用到简化的处理方法，对少数无法进行理论计算的传热问题还要引进经验公式。

第1章 热力学第一定律

教学提示：热力学第一定律是能量守恒定律在热力学中的应用。本章介绍了工程热力学的基本概念、理想气体的热力性质以及常见的基本热力过程分析与计算方法。

教学要求：本章要求学生熟练掌握工程热力学基本概念和热力学第一定律，掌握理想气体的基本性质，能够计算基本的热力过程的各项参数。

1.1 工程热力学基本概念

1.1.1 工质及热力系统

热能变成机械能必须借助一套设备和某种做功物质，这种设备就是通常所说的热机，而实现热能转换的物质便是工质。工质做功时必须有良好的膨胀性，所以热机中的工质一般都是气态物质。

热机的形式有多种，如蒸汽机、内燃机以及燃气轮机等。其中陆地运输工具及小型移动式机械中的发动机大多数是活塞往复式内燃机，内燃机又分为汽油机和柴油机两种。现以汽油机为例说明在车辆发动机中热能变成机械能的过程。

图 1.1 所示为内燃机工作过程示意图。内燃机的工质为燃料燃烧后所生成的高温燃气，其工作过程分为进气、压缩、燃烧膨胀及排气几个阶段。

进气过程——活塞从上止点运动到下止点，进气门打开，将可燃混合气(汽油与空气的混合物)吸入汽缸。

压缩过程——活塞从下止点运动到上止点，由于进气门已关闭，汽缸内工质的温度和压力由于压缩而增加。

燃烧、膨胀过程——活塞从上止点运动到下止点，在压缩终了(活塞接近上止点)时火花塞点火将工质引燃，故在这一过程中工质的温度和压力由于燃烧而大大增加，即燃烧的化学能变成了热能，工质体积膨胀，从而推动活塞向下止点运动对外做功。

排气过程——做功完毕的工质(废气)必须排出汽缸，以利于做功的连续性，故活塞从下止点运动到上止点，这时排气门打开，使汽缸内的废气得以排出。

经过以上四个过程，汽油机做功一次。如要汽油机连续做功，则需重复进行以上四个过程，以实现循环工作。

柴油机的工作方式与汽油机相似，也经历了进气、压缩、燃烧膨胀及排气四个阶段，工质仍是可燃气，所不同的是由进气过程中吸入汽缸的是新鲜空气，可燃混合气是通过

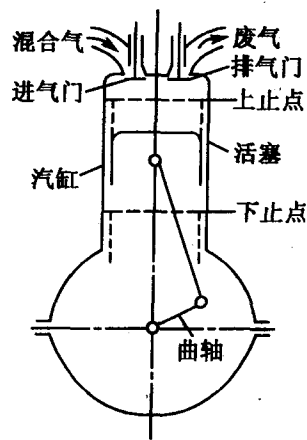


图 1.1 内燃机工作过程示意图

在压缩终了时由喷油器喷入一定量的高压柴油而形成，然后依靠自燃进行燃烧反应。

在热力学中分析问题要指明所研究的对象，即所谓的热力系统。与热力系统有关的周围物体统称为外界。热力系统可以是一个物体、一群物体或物体中的某一部分。如果热力系统与外界无物质交换，则称之为闭口系统；反之为开口系统。例如在内燃机中仅取压缩和做功过程中汽缸内的工质作为热力系统时，这时由于热力系统和外界只有热量和机械能的交换，而无物质交换，故为闭口系统。而当考虑进排气过程时，这时由汽缸内混合气组成的热力系统由于和外界既有能量交换同时又有物质交换，则为开口系统。

为了方便分析问题，热力系统一般可以用假想的边界(用虚线表示)与外界分隔，如图 1.2 所示。边界可以是真实的，也可以是虚构的，可以是固定的，也可以是移动的。

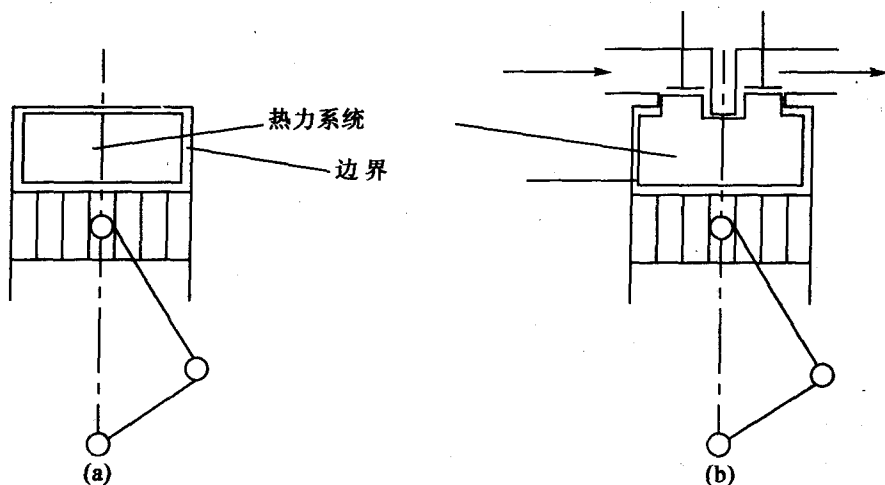


图 1.2 热力系统示意图

1.1.2 状态及状态参数

热力系统在某一瞬间呈现的全部宏观性质称为状态，从各个不同方面描写这种宏观状态的物理量便是状态参数。

在工程热力学中常用的状态参数有六个，即压力、比体积、温度、热力学能、焓和熵。其中压力、比体积、温度是三个可以直接测量的状态参数，又称为基本状态参数。

热力学中工质的状态确定时，它的状态参数数值也确定；反之，确定的状态参数的值也对应着确定的工质状态，它们是一一对应的关系，当状态参数的数值改变时，表明工质的状态也发生了变化。

应该指出的是上面讲的状态均指平衡状态，是热力系统在没有外界作用下宏观性质不随时间变化的状态。只有在平衡状态下热力系统的状态参数才是确定的。例如，处于大气环境中的汽缸中的某种气体，当无外界作用时(包括外界对之加热或在活塞上施加力使活塞运动)，且内部不存在化学反应或已处于化学平衡，则所研究的热力系统的状态就不会改变，这时热力系统处于平衡状态。

下面先介绍比体积、压力、温度、热力学能和焓这五个基本状态参数，为了便于理解，状态参数熵将在介绍热量时引出，如图 1.3 所示。

1. 比体积(质量体积)

单位质量的物质所占有的容积称为比体积, 用 v 表示, 单位为 m^3/kg ;

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{或} \quad V = v \cdot m \quad (1-1)$$

式中, V 为容积(m^3); m 为质量(kg)。

单位容积的物质质量称为密度, 用 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$$

即密度和比体积互为倒数。

2. 压力

气体的压力就是气体在单位面积上的垂直作用力为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-2)$$

式中, p 为压力; F 为垂直作用力; A 为面积。

气体压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容器壁碰撞的结果。根据式(1-2)计算的压力是气体的真正压力, 也称为绝对压力 p 。气体的压力一般用压力计测得。

由于压力计在测压力时处于大气环境中, 故只测得绝对压力和当地大气压力 p_b 的差值, 即相对压力。当气体的绝对压力高于大气压力时, 压力表测的相对压力又称表压力 p_g 。当大气的绝对压力低于大气压力时, 压力计所测的相对压力又称真空度 p_v 。绝对压力、表压力、真空度和大气压力之间的关系如图 1.4 所示。其中,

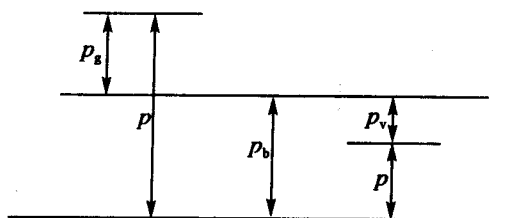


图 1.4 几种压力间的关系

$p = p_b + p_g$: 气体的绝对压力大于大气压力;

$p = p_b - p_v$: 气体的绝对压力小于大气压力。

因为大气压力是经常变化的, 所以即使绝对压力不变时, 如果大气压力变化, 表压力或真空度也要发生变化, 因而作为气体状态参数的压力, 只能是气体的绝对压力。

国际单位制中压力单位为 Pa , 中文名称为帕。工程上常用较大单位 MPa 或 bar 。换算关系如下。

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}; \quad 1\text{bar} = 10^5\text{Pa};$$

3. 温度

温度表示物体的冷热程度, 当一个物体处于较热的状态时, 表明物体温度较高; 而当该物体变化到较冷的状态时, 表明物体温度较低。

国际单位制中采用热力学温度, 也称为开尔文温度或绝对温度, 用符号 T 表示, 单位符号用开[尔文](K)表示; 温度常用的另一温度为摄氏温度, 用符号 t 表示, 单位符号用摄氏度($^{\circ}\text{C}$)表示。绝对温度(T)和通常用的摄氏温度(t)的换算关系如下:

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-3)$$

4. 热力学能和总能量

能量是物质运动的量度, 运动有各种不同的形态, 相应地就有各种不同的能量。宏观静止的物体, 其内部的分子、原子等微粒仍在不停地运动着, 这种运动称做热运动。物体因物体热运动而具有的能量称做内热能, 它是工质的内部储存能。在热力学中把物体内热能也称做热力学能, 用符号 U 表示。

一般情况下, 热力学能仅考虑内动能和内位能, 只有在涉及化学反应和核反应时, 才把化学能和原子能也包括在热力学能之中。

国际单位制中, 热力学能的单位为焦耳(J)。1kg 工质所具有的热力学能称为比热力学能, 用符号 $u(\text{J/kg})$ 表示。即

$$u = U/m$$

式中, m 为工质的质量。

热力系统工质的总能量除应考虑物质分子的热运动而具有热力学能外, 还应考虑工质因有宏观运动速度而具有的宏观动能及因处在一定高度而具有的位能, 它们均是物质的外部储存能。热力学能是内热能, 而宏观动能和位能则是机械能, 这表明热力系统可以储存不同形式的能量。把内部储存能和外部储存能的总和, 即热力学能、宏观动能和位能的总和, 称做热力系统的总储存能, 简称总能。若总能用 E 表示, 动能和位能分别用 E_K 和 E_P 表示, 则

$$E = U + E_K + E_P \quad (1-4)$$

对于闭口系统, 由于质量保证恒定, 当把热力系统作为一个整体来计算它的动能和位能时, 可按力学上一个具有恒定质量的质点来处理。若热力系统的质量为 m , 速度为 c , 在重力场中的高度为 z , 则

$$\text{宏观动能:} \quad E_K = \frac{1}{2} mc^2$$

$$\text{重力位能:} \quad E_P = mgz$$

式中, c 、 z 为力学变量, 只决定于系统在参考坐标系中的速度和高度, 是点函数。不是热力学状态参数。故 c 和 z 相同的系统可以有不同的热力学状态。

这样, 对闭口系统的总能 $E(\text{J})$ 可写成:

$$E = U + \frac{1}{2} mc^2 + mgz \quad (1-5)$$

单位质量工质的总能量, 即比总能 $e(\text{J/kg})$, 可写成

$$e = u + \frac{1}{2} c^2 + gz \quad (1-6)$$

5. 焓

有关热工计算的公式中时常有 $U + pV$ 出现, 为了简化公式和简化计算, 通常把它定义为焓, 用符号 $H(\text{J})$ 表示。规定:

$$H = U + pV \quad (1-7)$$

对于 1kg 工质的焓称比焓, 用 $h(\text{J/kg})$ 表示, 即

$$h = u + pv \quad (1-7')$$

当热力系统状态一定时, 由于 u 、 p 和 v 都有一定的值, 因而比焓 h 也有一定的值,

且与达到这一状态的路径无关。故比焓也是一个状态参数

$U + pV$ 的合并出现并不是偶然的。 u 是 1kg 工质的热力学能，即是储存于 1kg 工质内部的能量。下面对焓的物理意义进行说明。如图 1.5 所示，当 m kg 工质由外界进入热力系统时，设外界对工质的压力 p ，在此压力作用下，工质移动 x 距离后进入了热力系统，设工质截面积为 A ，则外界对工质做功 $W = pA \cdot x = pV = mpu$ 。由此可见，后面的工质对前面 m kg 工质所做的功为 pV ，这份功也称为推动功，它是工质在移动时所获得的功。同理，当工质流出热力系统时，它将对外界做出推动功 pV ，此时 p 为出口截面处的压力。所以， pV 表示 m kg 工质移动时所具有的能量。显然，1kg 工质移动时所具有的能量为 pu 。

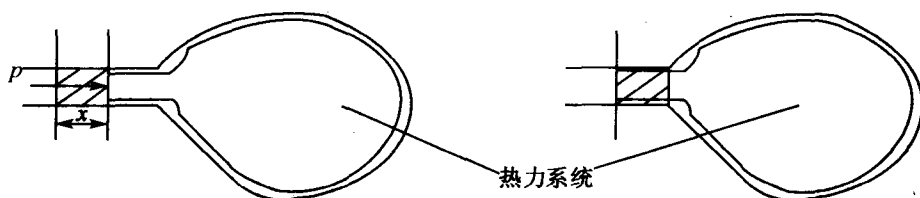


图 1.5 焓的物理意义示意图

当 1kg 工质通过一定的界面流入热力系统时，储存于它的内部的比热力学能 u 毫无疑问被它带进了热力系统，同时它还把后面获得的推动功 pu 带进了热力系统，因此热力系统中因引进 1kg 工质而获得的总能量是热力学能与推动功之和 $(u + pu)$ ，这正是由式(1-7')表示的比焓(或焓)。在热力系统设备中，工质总是不断地从一处流到另一处，随着工质的移动而转移的能量不等于热力学能而等于焓，故在热力工程的计算中焓比热力学能有更广泛的应用。

6. 强度量和广延量

前面已对描写热力系统的几个常用的状态参数作了介绍。不难看出，温度、压力等物理量和热力系统所含的物质数量无关，而且当热力系统处于非平衡状态时，热力系统内各点将具有不同的数值，这种物理量称做强度量。而容积、热力学能、焓等物理量和热力系统所含的物质数量有关，这些物理量称做广延量。广延量具有可加性，热力系统所含的物质数量越多，其值就越大。强度量则不具备可加性，而且只有在平衡状态下，热力系统内各点才具有相等的数值。

1.1.3 状态参数的坐标图

为了分析问题的方便，工程上通常采用两个独立状态参数组成坐标图来表示工质所处的状态。例如用压力和比体积组成压力-比体积坐标图，简称压容图或 $p-v$ 图。此外，常用的状态参数坐标图还有 $T-s$ 图(温-熵图)。因为当热力系统处于某一平衡状态时，状态参数就确定了，故任一平衡状态在所有状态参数坐标图上均有对应的一点，如图 1.6 所示。

1.1.4 热力过程和循环

热力过程是指热力系统从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和。如果热力系统从一个平衡状态无摩擦地连续经历一系列平衡的中间状态过渡到另一个平衡状