



普通高等教育“十五”国家级规划教材
(高等职业教育技能型人才培养试用)

汽车运用与维修系列

发动机原理 与汽车性能

杨万福 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
高等职业教育技能型人才培养试用

发动机原理与汽车性能

杨万福 主 编
吴 灏 副主编

高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),是根据高职高专教育人才培养目标的要求编写的。

本书在结构上分为发动机原理和汽车性能两大部分。内容包括工程热力学基础、发动机的性能指标、换气过程、燃料与燃烧、燃烧过程、发动机特性、汽车动力性、燃料经济性、发动机功率的选择及汽车传动系传动比的确定、制动性、通过性、操纵稳定性、行驶平顺性等。本书注重理论与实践的结合,加强针对性与实用性,旨在培养学生的技术应用能力。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校汽车检测与维修、汽车运用等相关专业的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

发动机原理与汽车性能/杨万福主编. —北京:高等教育出版社, 2004.7 (2005 重印)

ISBN 7-04-014683-5

I. 发... II. 杨... III. ①汽车-发动机-高等学校:技术学校-教材②汽车-性能-高等学校:技术学校-教材 IV. U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 053833 号

策划编辑 赵 亮 责任编辑 赵 亮 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 史新薇 责任校对 金 辉 责任印制 孔 源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 14.75
字 数 350 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

版 次 2004 年 7 月第 1 版
印 次 2005 年 7 月第 2 次印刷
定 价 18.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 14683-00

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作，2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号)，提出了“力争经过5年的努力，编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标，并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施：先用2至3年时间，在继承原有教材建设成果的基础上，充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验，解决好高职高专教育教材的有无问题；然后，再用2至3年的时间，在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神，有关院校和出版社从2000年秋季开始，积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的，随着这些教材的陆续出版，基本上解决了高职高专教材的有无问题，完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题，将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略，抓好重点规划”为指导方针，重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设，特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材；同时还要扩大教材品种，实现教材系列配套，并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系，在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

随着汽车工业的迅速发展,急需汽车运用与维修领域第一线的应用型高级技术人才。为满足人才培养的需要,根据高职高专教育人才培养目标,由武汉理工大学汽车学院、武汉公交职业学院等院校的有关教师共同编写了本教材。

本书在结构上分为发动机原理和汽车性能两大部分。第1章至第7章主要讲解发动机原理;第8章至第14章主要讲解汽车性能。全书通过汽车性能分析将发动机原理和汽车性能等相关知识有机地结合起来,并注重理论与实践相结合,各项性能讲解均配有相应的试验项目。在现代汽车运用与维修的实际工作中,对汽车的性能进行分析是对从事现代汽车维修专业技术人员的基本要求,因此突出汽车性能分析以及影响因素的分析是本书的特点。

本书由武汉理工大学杨万福教授任主编,武汉公交职业学院吴灏高级讲师任副主编。参加编写的有:余明星(第1章)、吴灏(第2章)、曹俭波(第3章)、李明泽(第4、7章)、侯献辉(第5、6章)、余晨光(第8、9、10、11、12章)、杨万福(第13、14章),由杨万福统稿。

本书由山东交通学院戴汝泉教授审阅,他提出了许多宝贵意见,在此深表谢意。

由于编者水平有限,错误不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

编 者

2004年3月

目 录

第 1 篇 发动机原理

第 1 章 工程热力学基础	3	习题与思考题	49
学习目标	3	第 5 章 汽油机混合气的形成和燃烧	50
1.1 气体的热力性质	3	学习目标	50
1.2 热力学基本定律	7	5.1 汽油机混合气的形成	50
1.3 工质的热力过程	11	5.2 汽油喷射及控制	58
小结	15	5.3 汽油机燃烧过程	66
习题与思考题	16	5.4 汽油机的燃烧室	74
第 2 章 发动机工作循环和性能指标	17	小结	78
学习目标	17	习题与思考题	78
2.1 发动机理想循环	17	第 6 章 柴油机混合气的形成和燃烧	80
2.2 发动机实际工作循环	20	学习目标	80
2.3 指示指标	23	6.1 柴油机混合气的 形成和燃烧室	80
2.4 有效指标	24	6.2 燃油喷射和雾化	88
2.5 机械损失与机械效率	27	6.3 柴油机的燃烧过程	95
小结	30	6.4 柴油机燃烧过程的影响因素	100
习题与思考题	31	6.5 柴油机电控	103
第 3 章 发动机的换气过程	32	小结	111
学习目标	32	习题与思考题	112
3.1 四行程发动机的换气过程	32	第 7 章 发动机特性	114
3.2 四行程发动机的充气效率	35	学习目标	114
3.3 影响充气效率的因素	36	7.1 发动机的工况及基本特性	114
3.4 提高充气效率的措施	38	7.2 发动机的负荷特性	115
小结	42	7.3 发动机的速度特性	117
习题与思考题	42	7.4 柴油机的调速特性	118
第 4 章 燃料与燃烧	43	7.5 发动机的万有特性	121
学习目标	43	7.6 发动机试验	123
4.1 常用燃料	43	小结	129
4.2 燃料的燃烧	47	习题与思考题	130
小结	48		

第2篇 汽车性能

第8章 汽车的动力性	133	11.2 制动时车轮的受力	177
学习目标	133	11.3 汽车的制动效能及其恒定性	179
8.1 汽车的动力性指标	133	11.4 制动时汽车的方向稳定性	181
8.2 汽车的驱动力与行驶阻力	134	11.5 制动力分配	182
8.3 汽车的行驶方程式与 汽车行驶条件	141	11.6 制动力的调节和车轮防抱死	189
8.4 汽车驱动力—行驶阻力平衡图与 动力特性图	146	11.7 汽车制动性试验	191
8.5 汽车的功率平衡	149	小结	192
8.6 影响汽车动力性的主要因素	151	习题与思考题	192
8.7 汽车动力性试验	153	第12章 汽车的通过性	194
小结	158	学习目标	194
习题与思考题	158	12.1 汽车通过性评价指标及 几何参数	194
第9章 汽车的燃油经济性	159	12.2 汽车越过台阶、壕沟的能力	197
学习目标	159	小结	200
9.1 汽车燃油经济性的评价指标	159	习题与思考题	200
9.2 汽车燃油经济性的计算	160	第13章 汽车的操纵稳定性	201
9.3 汽车燃油经济性的影响因素	162	学习目标	201
9.4 汽车燃油经济性试验	167	13.1 汽车行驶的纵向和横向稳定性	201
小结	168	13.2 轮胎的侧偏特性	204
习题与思考题	169	13.3 汽车的转向特性	208
第10章 发动机功率的选择和传动系 传动比的确定	170	13.4 汽车转向轮的振动	213
学习目标	170	13.5 汽车操纵稳定性道路试验	213
10.1 发动机功率的选择	170	小结	217
10.2 传动系最小传动比的选择	171	习题与思考题	218
10.3 传动系最大传动比的选择	172	第14章 汽车的平顺性	219
10.4 传动系挡位数与各挡 传动比的选择	173	学习目标	219
小结	174	14.1 人体对振动的反应和 平顺性的评价	219
习题与思考题	174	14.2 汽车振动系统的简化, 单质量系统的振动	221
第11章 汽车的制动性	176	14.3 影响汽车行驶平顺性的因素	223
学习目标	176	小结	225
11.1 制动性的评价指标	176	习题与思考题	225
		参考文献	226

第1篇

发动机原理

发动机原理是研究发动机主要使用性能的，是在分析发动机工作原理的基础上研究发动机主要使用性能与其结构之间的内在联系，分析发动机主要使用性能的各种影响因素，从而指出正确使用发动机的基本途径。发动机原理研究的内容包括工程热力学基础、发动机的性能指标、换气过程、燃料与燃烧、燃烧过程、发动机特性。

第 1 章

工程热力学基础

学习目标

通过本章的学习，重点掌握工质在各种热力过程中其初态参数与终态参数间的关系以及能量转换的特点；掌握用理想气体状态方程分析热力过程的方法；了解工质的热力状态及其基本参数；了解热力学基本定律在分析热机工作性能方面的作用。

工程热力学是研究热能和机械功互相转换的规律。其主要内容有：

1. 介绍常用工质（如空气、可燃混合气等）的热力性质；
2. 介绍热力学基本定律：热力学第一定律、热力学第二定律；
3. 根据热力学基本定律和工质的热力性质，分析实现热能和机械功相互转换的基本热力过程，阐明使热能以更大的百分率转变为机械功的途径。

在工程热力学中，把实现热能与机械功相互转换的工作物质称为工质。汽车发动机是通过燃料的燃烧变热能为机械功的，在整个转变过程中，总是以气体作为媒介物质，这些气体便是工质。燃料燃烧前，工质为空气（柴油机）或空气和汽油的混合气（汽油机）。燃烧后，工质主要是二氧化碳和水蒸气等。

本章从工程热力学的内容出发，把与汽车发动机有关的主要部分作为工程热力学基础进行介绍。

1.1 气体的热力性质

1.1.1 热与质量热容

1. 热的本质

实验表明，热现象是物体内部分子和原子不规则运动的总体表现，这种运动的剧烈程度决定了物体的冷热程度，其外在表现为温度的高低。这就是说，物体内部分子运动的平均速度越高，则物体的受热程度越大，表现出来的温度就越高。热能可由工质通过传导、对流或辐射等方式来进行传递。例如，高温的发动机缸体与水道中低温的冷却水接触时，缸体材料里运动比

较剧烈的分子之间的不断碰撞,影响了邻近的水分子,这时,温度较高的缸体传热至受热较低的水,前者温度降低,后者温度升高。若两物体达到同一温度时,传热就会停止,这种现象称为传热。

综上所述,“热”实质上是物质运动的一种表现形式,也是能量传播的一种形式。

热量的单位是焦耳(J)。焦耳这个单位较小,使用不方便,在计算中往往采用千焦耳(kJ)单位。

2. 工质的质量热容

在热力工程中,热量的计算常需要质量热容这个物理量。使质量为1 kg的物体温度升高或降低1 K(热力学温度单位,见下面介绍)所吸收或放出的热量称为工质的质量热容,用符号 c 表示,单位为千焦耳/千克开[kJ/(kg·K)]。

气体的质量热容与加热过程有关。在不同的过程中,使1 kg质量的气体温度升高1 K,所需提供的热量是不同的,故质量热容的大小随气体变化过程的特征而定。在工程热力学中,常遇到定容加热过程和定压加热过程。

定容加热过程是工质在加热过程中容积保持不变的过程。其质量热容称为质量定容热容,用符号 c_v 表示。

定压加热过程是工质在加热过程中压力保持不变的过程。其质量热容称为质量定压热容,用符号 c_p 表示。

从定容加热过程和定压加热过程的特点可知,在定容加热过程中,气体没有膨胀做功,所吸收的热量完全用来增加气体分子运动的动能,外在表现为气体的温度升高。在定压加热过程中,气体可以膨胀做功。因此,气体所加入的热量除了一部分用来增加气体分子运动的动能外,另一部分用来克服外力做功。对同样质量的气体而言,要将气体加热到某一温度,则在定压加热过程中所加入的热量比定容加热过程所加入的热量要多,即质量定压热容大于质量定容热容。

在工程热力学的计算中,质量定压热容与质量定容热容之比,称为质量热容比,用符号 k 表示。即:

$$\frac{c_p}{c_v} = k$$

对于空气来说,其质量定压热容 c_p 为1.004 6 kJ/kg·K,质量定容热容 c_v 为0.715 8 kJ/kg·K, k 为1.4。

1.1.2 工质的热力状态及其基本参数

热机的运转是靠气态工质及在特定的条件下不断地改变它的热力状态,执行某一具体的热功转换过程来实现的。如发动机工作时,就是将燃料燃烧的热能,通过工质的膨胀转化为机械功的。常用的气态工质基本上可分为两类:气体和蒸汽。气体是指远离液态、不容易液化的气态物质,蒸汽是指刚由液态转变过来或较容易液化的气态物质。内燃机的工质是气体。

表明工质状态特征的各个物理量,称为工质的状态参数。汽车发动机在变热为功的整个过程中,工质的状态总是不断地变化着,可以用压力 p 、温度 T 、比容 v 、内能 U 、焓 H 、熵 S 六个状态参数来描述。其中 p 、 T 、 v 可以直接用仪表测量,且其物理意义易于理解,故成为描述

工质状态的基本状态参数。

1. 压力 p

工质在单位面积容器壁上所施加的垂直作用力称为压力。对于气体工质来说,气体的压力是大量的分子在紊乱的运动中对容壁碰撞的统计量。假定气体分子在容器壁的垂直方向上产生总的作用力为 F , 容器壁的总面积为 A , 则有

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

压力的单位为帕, 记作 Pa, 或记作 N/m^2 。工程上, Pa 的单位太小, 为了计算方便, 常用 kPa 与 MPa。

在工程上, 容器内气体压力的大小有两种表示方法。一种是指明气体施于容器壁上的实际压力, 称为绝对压力, 记做 p 。另一种是测量时压力表上的读数压力, 叫表压力, 记做 p_e 。由于压力表未使用时, 其指针总是指在 0 附近(此时已有一个左右的大气压), 故绝对压力 p 、表压力 p_e 、大气压力 p_0 三者的关系式为

$$p = p_0 + p_e \quad (1.2)$$

如果容器内气体的绝对压力低于外界大气压力时, 表压力为负数, 仅取其数值, 称之为真空度, 记做 p_v 。则有

$$p = p_0 - p_v \quad (1.3)$$

真空度的数值愈大, 说明愈接近绝对真空。

绝对压力、表压力、真空度三者之间的关系可以用图 1.1 来表示。从图中可以看出, 表压力和真空度都是相对于大气压力的相对值。当绝对压力高于大气压力时, 它们的差值称为表压力; 当绝对压力低于大气压力时, 它们的差值称为真空度。而大气压力是随地区和气候的不同而变化的, 所以, 从压力表和真空表得出的读数加上当时当地的大气压力或被当时当地的大气压力减去, 才是绝对压力。只有绝对压力才能作为工质的状态参数, 它表示工质的真正状态。

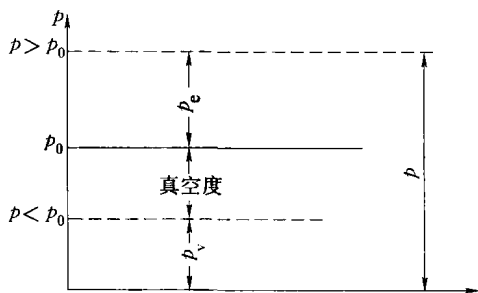


图 1.1 绝对压力、表压力及真空度的相互关系

2. 温度 T

温度表示工质的冷热程度。从分子运动学的观点看, 气体工质的温度是气体分子运动强弱的一种量度。气体分子运动的平均速度越高, 其温度也越高, 此时气体分子的平均动能也越大。

在热力学中, 温度用热力学温标来量度, 用符号 T 和单位 K 表示。热力学温标, 也叫开尔文温标, 是国际单位制(SI)的基本单位。由热力学温标所确定的温度称为热力学温度。国际单位制规定, 水的三相点温度(冰、水、水蒸气平衡共存的温度)为 273.16 K, 而热力学温度单位“K”为三相点温度的 $1/273.16$ 。热力学温度的零度, 称为绝对零度。

在工程上, 温度也可以用摄氏温标来量度, 用符号 t 和单位 $^{\circ}\text{C}$ 表示。摄氏温度与热力学温度的关系为:

$$t = T - 273.16 \quad (1.4)$$

由上式可知,热力学温度 273.16 K 为摄氏温标的零点。须注意的是只有热力学温度才是状态参数。

工程上,常把式(1.4)近似写为

$$t = T - 273 \quad (1.5)$$

3. 比容 v

单位质量的工质所占有的容积称为比容,用符号 v 表示,单位为 m^3/kg 。设气体的质量为 m ,容积为 V ,则气体的比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1.6)$$

密度与比容呈倒数关系,密度是指单位容积中气体的质量,用 ρ 表示:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1.7)$$

1.1.3 理想气体状态方程

1. 理想气体

真实气体的分子是具有体积的,并且分子之间存在着吸引力。但实验证明,当压力较低或温度较高时,一般气体的比容较大,分子间的距离比分子的直径大得多,因此,气体分子间的吸引力和分子本身的体积就可忽略不计,它的性质就比较接近理想气体。所谓理想气体,就是指分子本身不占有体积,分子间又无吸引力的气体。在发动机热力分析中,常把空气、燃气等都近似地看作理想气体。

2. 理想气体的状态方程

对于一定质量的气体的状态,一般可用气体所占的体积 V 、压力 p 、温度 T 三个量来表示。在气体平衡状态下,理想气体的压力、温度和比容三者之间的关系式称为理想气体状态方程式,它是根据分子运动学原理推导出的。

对于 1 kg 理想气体,状态方程式为

$$pv = RT \quad (1.8)$$

对于质量为 m 的理想气体,状态方程式为

$$pV = mRT \quad (1.9)$$

式中, $V = mv$, 它是质量为 m 的气体所占的总容积。

R 为气体常数,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对于同一种气体,常数 R 值是一定的,但对于不同种类的气体,常数 R 值是不同的。各种气体的 R 值可在表 1.1 或有关的手册中查得。

理想气体状态方程式表明,如果任意两个状态参数已知,则第三个参数也就确定,气体的状态也就确定。

表 1.1 常用气体的热力性质

气 体	气体常数 R $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	密度 ρ kg/m^3 (0 °C, 101 325 Pa)	质量定压热容 c_p $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	质量定容热容 c_v $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
He	2.077	0.179	5.234	3.153
Ar	0.208 1	1.784	0.524	0.316
H ₂	4.124 4	0.090	14.36	10.22

续表

气 体	气体常数 R kJ/(kg · K)	密度 ρ kg/m ³ (0 °C, 101 325 Pa)	质量定压热容 c_p kJ/(kg · K)	质量定容热容 c_v kJ/(kg · K)
O ₂	0.259 8	1.429	0.917	0.657
N ₂	0.296 8	1.250	1.038	0.741
空气	0.287 1	1.293	1.004	0.716
CO	0.296 8	1.25	1.042	0.745
CO ₂	0.188 9	1.977	0.850	0.661
H ₂ O	0.461 5	0.804	1.863	1.402
CH ₄	0.518 3	0.717	2.227	1.687
C ₂ H ₄	0.296 4	1.260	1.721	1.427

1.2 热力学基本定律

1.2.1 气体的功、热量、内能

1. 气体的膨胀功 W

设在图 1.2 所示的气缸中装有 1 kg 气体, 气体的体积为 V , 压力为 p , 活塞截面积为 A 。若气体的压力比外界压力大, 气体就会推动活塞右移, 气体的体积便增大, 这时气体对活塞做了功, 称为膨胀功。如果是推动活塞向左移, 气缸内的气体体积便缩小, 这时外界通过活塞对气体做了功。

若 1 kg 气体在气缸内进行膨胀, 如图 1.2 中由 1 膨胀到 2, 气体压力将逐渐下降。假设气体作用在活塞上的力 pA 推动活塞右移了一个微小距离 ds , 在这期间, 膨胀极小, 气体的压力近乎不变, 则气体完成的微量膨胀功为

$$dw = pA \cdot ds$$

由于 $A ds = dv$, 所以:

$$dw = p dv$$

对可逆过程 1—2, 气体由状态 1 到状态 2 所做的微量膨胀功为:

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

若气缸中气体的质量为 m , 其总容积为 $V = mv$, 膨胀功为

$$W = mw = \int_{v_1}^{v_2} p m dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV$$

对 1 kg 气体而言, 当气体不是膨胀, 而是受外界压缩时, 则是外界对气体做功。这时 dv 成为负值, w 也是负值, 负的膨胀功实际上表明气体接受了外界的压缩功。

如果已知工质的初态、终态参数, 以及气体膨胀做功过程中压力 p 发生变化的规律, 则可求得气体的膨胀功 w 。

上述气体从某一初状态 1 到另一终状态 2 所进行的一个状态变化过程, 在工程热力学中称为一个热力过程。图 1.2b) 是以比容 v 为横坐标, 以压力 p 为纵坐标的一个直角坐标图, 称为压容图。气体的状态可以用图上的一点代表, 因此, 压容图上的一条曲线代表气体所进行的一个热力过程。图 1.2b) 中曲线 1—2 代表的就是图 1.2a) 中所示气体的膨胀过程, 它也反映了 p 是 v 的某一函数。根据微积分原理可知, 曲线下面所包围的面积, 就代表气体在这过程中所做的功。因此压容图也叫示功图。

2. 热量 Q

热量是指两物体间通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。所以无论对于系统或外界都不能说它们含有多少热量。

热量和功一样不是热力状态的参数, 而是工质状态改变时对外的效应。它们的区别在于前者是通过微观分子运动作用而传递的能量, 后者则是通过宏观运动作用而传递的能量。

在热力学中规定, 外界传给系统的热量为正, 而系统释放给外界的热量为负, 国际单位制规定功 W 和热量 Q 的单位都用焦耳(J)。

3. 工质的内能 U

由于工程热力学主要讨论热能和机械能之间的相互转换, 不考虑化学变化和原子核反应的热力过程, 故工质的内能就是气体分子和原子运动的动能和分子间的位能的总和。

对于理想气体, 由于假设其分子间没有吸引力, 所以理想气体的内能仅指气体内部动能。它是温度的单值函数。

单位质量工质的内能也是一个状态参数。1 kg 工质的内能用符号 u 表示, 单位为 kJ/kg。质量为 m 的工质的总内能为 $U = mu$ 。

工质内能变化值 $\Delta U = U_2 - U_1$ 只与工质的初状态和终状态有关, 而与工质由状态 1 到状态 2 所经历的过程无关。在热工计算中, 通常只需计算内能变化值, 这就不需讨论内能在某一状态下的值。

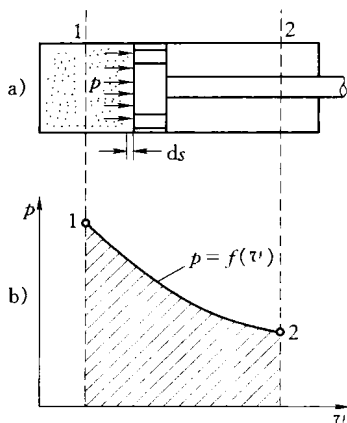


图 1.2 气体在气缸中所做的功

1.2.2 热力学第一定律

在工程热力学中, 热力学第一定律可叙述为: 热和功可以相互转换, 转换前、后的能量保持不变。

若用 Q 表示转变为功的热量, W 表示转换过来的功, 两者的单位都为 kJ, 则热力学第一定律的数学形式表示为

$$Q = W \quad (1.10)$$

热力学第一定律指出: 输入系统的能量等于系统贮存能量的变化与系统输出的能量之和。如汽车发动机是将混合气体燃烧产生的一定量的化学能转变为气体的热量和膨胀功的, 若发动机混合气燃烧后产生的废气温度越高, 表明气体残留的热量越大, 则膨胀功越少。

1.2.3 能量方程

在热力过程中，因气体状态变化而产生的能量平衡关系由能量平衡方程表示。

设在图 1.3 所示气缸里装 1 kg 气体，从外界吸入热量 dq 后，气体膨胀推动活塞移动了一个距离 ds 并做了 dw 的功。同时，气体的温度也升高了 dT ，其内能也有变化，变化量为 du 。此时工质与外界没有物质交换，仅有能量交换，系统内没有整体运动。根据热力学第一定律，系统的内能、热量和功三者的转换必然遵守下列方程

$$dq = du + dw \quad (1.11)$$

式(1-11)称为热力过程的能量平衡方程式，它指出：加给气体一定热量是用于增加气体的内能和使气体做一定量的膨胀功的。

上式是对无穷小的状态变化而言的，对质量为 m 的气体在状态 1 至状态 2 的过程中有

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + W_{1-2} \quad (1.12)$$

在式(1-12)中，每一项都可以是正值、零或负值，视实际情况而定。一般规定，气体向外界放出热量，则 Q 为负值，吸收热量， Q 为正值；外界对气体压缩做功，则 W 为负值，气体膨胀做功， W 为正值；气体的内能减小， $U_2 - U_1$ 为负值，反之为正值。

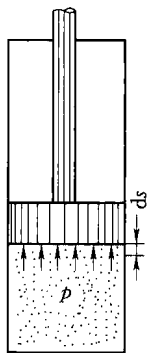


图 1.3 热力过程示意解析图

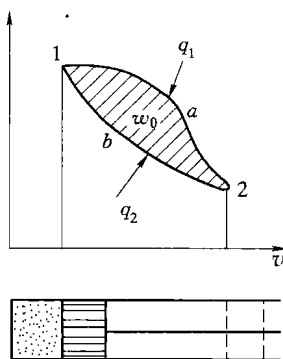


图 1.4 热力循环

1.2.4 热力学第二定律

热力学第二定律说明实现热功转换的条件以及自发过程进行的方向性和不可逆性。它与热力学第一定律并称为热力学的两条基本定律。

加热气体工质，使工质膨胀对外做功，是热变功的根本途径。为了实现热功转换而不断地对外做功，汽车上是通过内燃机来实现的。工质在内燃机气缸中仅仅完成一个膨胀过程不可能连续做功。为了重复地进行做功过程，工质在每次膨胀做功之后，必须进行一次压缩过程，使它回复到初态，以便重新膨胀做功，这种使工质由初始状态出发，经过一系列的中间状态重新回到初始状态所完成的一个封闭过程，称为热力循环。就 1 kg 工质而言，若循环中工质状态变化经过的过程都是准静态过程，则热力循环可用 $p-v$ 图上的封闭曲线来表示，如图 1.4 所示。

在图 1.4 的 $p-v$ 图上，1— a —2 曲线是工质膨胀过程曲线。2— b —1 曲线是工质压缩过程

曲线。 q_1 表示循环中工质从高温热源中接受热量的绝对值, q_2 表示工质向低温热源放出热量的绝对值, 则循环中工质接受的净热量为 $q_1 - q_2$ 。根据热力学第一定律, 循环中工质的循环净功等于循环净热, 即 $q_1 - q_2 = w$ 。

可见, 在热力循环中工质从高温热源所接受的热量 q_1 , 只有一部分变成循环净功 w , 而另一部分热量 q_2 传给低温热源。

炽热高温的物体放在温度较低的大气中, 高温物体便把热量传给周围的空气, 而自己的温度逐渐下降, 但冷却后该物体则不可能从周围的空气中吸取热量使自己的温度升高至原来的温度。这说明热功转换过程的进行是有方向性和不可逆性的, 同时也说明热和功转换, 有些是有条件的, 有些是没有条件的。热力学第二定律有多种表述方式, 下面为两种主要的表述方式。

1. 热力学第二定律的开尔文 - 普朗克表述: 不可能建造一种循环工作的机器, 其作用只是从单一热源取热并全部转变为功, 而不引起其他变化。

这一表述说明, 要连续地获得机械功, 至少应有一个高温热源和一个低温热源, 热机工作时, 将从高温热源取得热量, 一部分转变为机械功, 其余部分排至低温热源。任何热机循环的效率都小于 1。

2. 热力学第二定律的克劳修斯表述: 不可能将热量由低温物体传向高温物体而不引起其他变化。

这一表述说明, 要实现把热量由低温物体转移到高温物体, 是必须付出代价的。

以上说法虽然不同, 但实质都是一样的。如果仅从热机理论的需要来理解热力学第二定律, 则可表述为: 只有热源而不传热给冷源的热机是不可能实现的。

热机的热效率反映了热力学第二定律的基本内容, 也是衡量热机性能的重要指标之一。通常采用热力循环的净功 w_0 与工质从高温热源接受的热量 q_1 的比值作为指标, 称为循环热效率, 用 η_t 表示, 即:

$$\eta_t = \frac{w_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (1.13)$$

热效率说明工质从高温热源吸收的热量有多少转换为功, 从(1-13)式可知, q_2 越小, 则 η_t 越大, 但 q_2 不可能为 0, 所以 η_t 总小于 1。

所谓热源和冷源都是抽象概念。不论是哪种热机循环, 工质都要吸热和放热。在循环中, 把热传给工质的物体称为热源; 接受工质传出热量的物体称为冷源。例如, 汽油发动机在压缩行程终了时, 电火花出现, 使被压缩的可燃混合气在气缸容积近似不变的情况下燃烧, 这实质上是对工质加热的过程, 这一过程就是高温热源对工质加热。但工质从高温热源吸收的热量 Q_1 并非全部转换为机械功, 而有一部分热量 Q_2 通过排出的废气传给了大气, 则大气就称为冷源。汽油发动机的热效率为

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1.14)$$

1.2.5 卡诺循环、卡诺定理

1824 年法国青年工程师卡诺提出了最理想的热机工作方案, 即卡诺循环, 并确定了在给定条件下热机效率可能达到的最大限度。