



应用技术型高校汽车类专业规划教材

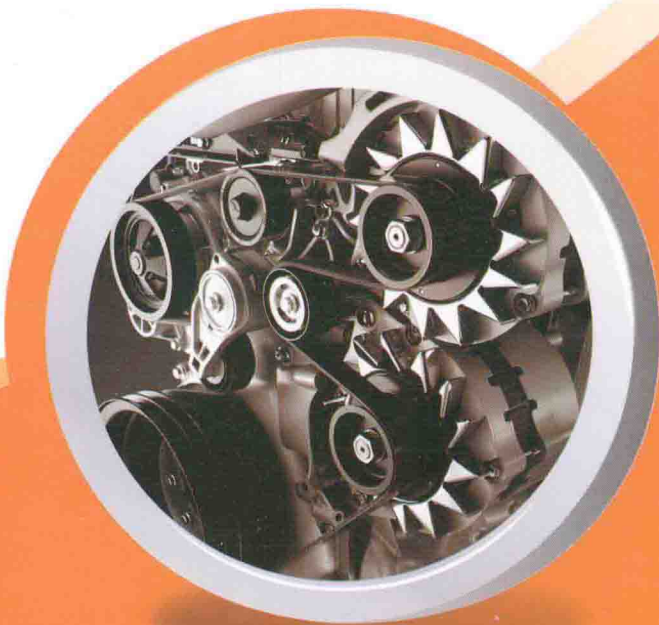
配  
课  
件

下载地址

[www.ccpres.com.cn](http://www.ccpres.com.cn)

# 发动机原理

警 琨 邓宝清◎主 编  
关 怀 杨志勇◎副主编



人民交通出版社  
China Communications Press

应用技术型高校汽车类专业规划教材

Fadongji Yuanli  
**发动机原理**

訾 琨 邓宝清 主 编  
关 怀 杨志勇 副主编



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

本书内容包括:热力学知识及能量转换、换气与压缩过程、燃烧与膨胀做功过程、发动机工况及特性、发动机热力循环分析。全书介绍了汽车发动机在实现能量转换过程中所发生的热力学现象并论述了它们对发动机性能的影响以及为了描述这些现象和影响所采用的科学方法和理论。

本书可作为交通运输、汽车服务工程、车辆工程等应用型本科专业的教材,也可作为在上述领域从事科研、技术管理工作的科技人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

发动机原理 / 訾琨, 邓宝清主编. —北京:  
人民交通出版社, 2014. 6

应用技术型高校汽车类专业规划教材

ISBN 978-7-114-11280-5

I. ①发… II. ①訾…②邓… III. ①汽车-发动机  
-理论-高等学校-教材 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 050595 号

应用技术型高校汽车类专业规划教材

书 名: 发动机原理

著 者: 訾 琨 邓宝清

责任编辑: 夏 韡

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 18.5

字 数: 440 千

版 次: 2014 年 7 月 第 1 版

印 次: 2014 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11280-5

定 价: 40.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 应用技术型高校汽车类专业规划教材编委会

---

## 主 任

于明进(山东交通学院)

## 副主任(按姓名拼音顺序)

陈黎卿(安徽农业大学)

关志伟(天津职业技术师范大学)

唐 岚(西华大学)

陈庆樟(常熟理工学院)

何 仁(江苏大学)

于春鹏(黑龙江工程学院)

## 委 员(按姓名拼音顺序)

曹金梅(河南科技大学)

邓宝清(吉林大学珠海学院)

付百学(黑龙江工程学院)

李 斌(人民交通出版社股份有限公司)

李耀平(昆明理工大学)

柳 波(中南大学)

石美玉(黑龙江工程学院)

宋年秀(青岛理工大学)

尤明福(天津职业技术师范大学)

王良模(南京理工大学)

吴 刚(江西科技学院)

谢金法(河南科技大学)

徐立友(河南科技大学)

杨 敏(南京理工大学紫金学院)

赵长利(山东交通学院)

周 靖(北京理工大学珠海学院)

慈勤蓬(山东交通学院)

邓 涛(重庆交通大学)

姜顺明(江苏大学)

李学智(常熟理工学院)

廖抒华(广西科技大学)

石传龙(天津职业技术师范大学)

宋长森(北京理工大学珠海学院)

谭金会(西华大学)

王慧君(山东交通学院)

王林超(山东交通学院)

吴小平(南京理工大学紫金学院)

徐 斌(河南科技大学)

徐胜云(北京化工大学北方学院)

衣 红(中南大学)

赵 伟(河南科技大学)

訾 琨(宁波工程学院)

## 秘 书

夏 韡(人民交通出版社股份有限公司)

# 前言

## FOREWORD

当前随着汽车行业的快速发展,汽车人才需求激增,无论是汽车制造企业对于汽车研发、汽车制造人才的大量需求还是汽车后市场对于汽车服务型人才的大量需求,这些都需要高校不断地输送相关人才。而目前,我国高等教育所培养的大部分人才还是以理论知识学习为主,缺乏实践动手能力,在进入企业一线工作时,往往高不成低不就,一方面企业会抱怨招不到合适的人才,另一方面毕业生们又抱怨没有合适的工作可找,主要问题就在于人才培养模式没有跟上社会发展实际需求。

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》中明确指出,要提高人才培养质量,重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模。培养理论和实操兼具的人才,使之去企业到岗直接上手或稍加培养即可适应岗位。2014年2月26日,李克强总理在谈到教育问题时指出要建立学分积累和转换制度,打通从中职、专科、本科到研究生的上升通道,引导一批普通本科高校向应用技术型高校转型。可见国家对于应用型技术人才的培养力度将持续加大。

教材建设是高校教学和人才培养的重要组成部分,作为知识载体的教材则体现了教学内容和教学要求,不仅是教学的基本工具,更是提高教学质量的重要保证。但目前国内多家高校在应用型人才培养过程中普遍缺乏适用的教材,现有的本科教材远不能满足要求。因此,如何编写应用型本科教材是培养紧缺人才急需解决的问题。正是基于上述原因,人民交通出版社经过充分调研,结合自身汽车类专业教材、图书的出版优势,于2012年12月在北京组织召开了“高等教育汽车类专业应用型本科规划教材编写会”,并成立教材编写委员会。会议审议并通过了教材编写方案。

本系列教材定位如下:

(1)使用对象确定为拥有车辆工程、汽车服务工程或交通运输等专业的二三本院校;

(2)设计合理的理论与实践内容的比例,主要解决“怎么做”的问题,涉及最基本的、较简单的“为什么”的问题,既满足本科教学设计的需要,又满足应用型教育的需要;

(3)与现行汽车类普通本科规划教材是互为补充的关系,与高职高专教材有明显区别,深度上介于两者之间,满足教学大纲的需求,有比较详细的理论体系,具备系统性和理论性。

《发动机原理》系根据“高等教育汽车类专业应用型本科规划教材编写会”会议精神而编写,它是汽车类专业的专业基础课。本书编写具有以下特色:

(1)以能量转换这一主线编排本书的结构体系和内容。

(2)章节编排更符合人们对发动机原理的认知规律——分析、归纳、综合。

(3)适应面宽。第一章、第五章的主要内容和理论方法对所有的热力发动机都是适用的。

(4)针对性强。第二、三、四章内容是针对汽车发动机展开论述的,特别是关于工作过程、燃烧新技术的论述更是结合当前汽车发动机的实际,有很强的针对性。

本书由宁波工程学院訾琨教授、吉林大学珠海学院邓宝清教授担任主编,黑龙江工程学院关怀教授、广东白云学院杨志勇高级工程师担任副主编。其中:第一章、第五章由訾琨教授、杨志勇高级工程师共同完成;第二章、第四章由邓宝清教授完成;第三章由关怀教授完成;最后由訾琨教授对全书进行了修改、补充和定稿。

本书适用于应用型本科院校交通运输、汽车服务工程、车辆工程等应用型本科专业的学生(48学时)教学。加\*号的内容建议不讲或少讲。

本书在编写过程中,参考了大量国内、外著作和文献资料,在此一并向有关作者表示真诚的感谢。由于编者水平有限,难免有错误和遗漏,欢迎广大读者批评指正。

应用技术型高校汽车类专业规划教材编委会

2014年3月

# 目 录

## CONTENTS

第一章 热力学知识及能量转换 .....	1
第一节 热力学知识 .....	2
一、变质量系统热力学简介及分析方法 .....	3
二、变质量系统热力学基本方程 .....	5
三、变质量系统热力学定律 .....	14
四、理想气体热力过程中热量和功的计算 .....	19
五、多变过程的 $p$ - $V$ 图及 $T$ - $S$ 图 .....	25
*六、理想混合气体 .....	30
第二节 发动机能量转换 .....	34
一、概述 .....	34
二、发动机燃料与工质 .....	36
三、发动机能量转换的实现 .....	41
四、发动机能量转换的评价 .....	59
第二章 换气与压缩过程 .....	74
第一节 换气过程 .....	74
一、换气过程的评价指标 .....	75
二、换气过程各阶段分析 .....	75
*三、换气过程的热力计算及气体参数的确定 .....	77
四、提高换气过程完善程度的方法 .....	78
第二节 压缩过程 .....	90
一、概论 .....	90
二、压缩过程中工质的变化 .....	91
*三、压缩过程终了工质参数的计算 .....	92
第三章 燃烧与膨胀做功过程 .....	94
第一节 燃料与燃烧基础 .....	95

一、发动机燃料及其物理化学性质 .....	95
二、可燃混合气的着火理论 .....	101
三、可燃混合气的形成机理 .....	104
第二节 发动机燃烧过程 .....	109
一、汽油机燃烧 .....	109
二、柴油机燃烧 .....	117
三、发动机燃烧放热特性 .....	126
四、可燃混合气的形成对燃烧过程的影响 .....	128
第三节 膨胀做功行程 .....	138
一、膨胀做功行程中的能量利用 .....	138
* 二、燃烧膨胀做功过程计算 .....	142
第四节 有害排放物的生成与控制 .....	146
一、概述 .....	146
二、发动机有害排放物的生成机理 .....	147
三、有害排放物生成的影响因素 .....	149
四、发动机有害排放物的控制 .....	151
* 第五节 发动机代用燃料与燃烧新技术 .....	163
一、代用燃料及应用 .....	163
二、燃烧新技术 .....	176
<b>第四章 发动机工况及特性 .....</b>	<b>192</b>
第一节 发动机运行工况 .....	192
一、发动机典型工况 .....	192
二、发动机不稳定工况 .....	193
第二节 发动机特性 .....	195
一、发动机运行特性 .....	195
二、发动机调整特性 .....	204
* 三、发动机调速特性 .....	207
* 四、发动机动态特性 .....	208
* 五、发动机排放特性 .....	208
<b>第五章 发动机热力循环分析 .....</b>	<b>212</b>
第一节 发动机理想循环 .....	212
一、发动机实际工作过程热力循环的简化 .....	213
二、发动机理想循环 .....	215
三、循环参数对循环功与循环热效率的影响 .....	227



四、发动机理想循环的研究意义及最佳化 .....	237
* 五、发动机理想循环有限时间热力学分析简介 .....	239
第二节 发动机实际循环 .....	244
一、发动机实际循环中的能量损失 .....	244
二、发动机热平衡 .....	247
* 第三节 发动机实际循环的计算方法及数学模拟 .....	250
一、概述 .....	250
二、发动机实际循环的数学模拟 .....	251
附录 1 第五章有关公式推导 .....	257
附录 2 发动机不可逆热力循环模型 .....	261
附录 3 发动机实际循环的热力学计算 .....	267
附录 4 发动机速度特性试验方法 .....	280
附录 5 发动机负荷特性试验方法 .....	281
附录 6 汽油机点火调整特性试验方法 .....	282
附录 7 汽油机燃料调整特性试验方法 .....	283
附录 8 柴油机供油提前角调整特性试验方法 .....	284
参考文献 .....	285

# 第一章 热力学知识及能量转换



## 教学目标

1. 了解变质量系统热力学过程分析方法。
2. 了解发动机燃烧热化学;理想混合气体。
3. 理解多变过程  $p$ - $V$  图及  $T$ - $S$  图分析。
4. 理解机械损失的测量。
5. 掌握变质量系统热力学过程定律。
6. 掌握发动机能量转换的评价。
7. 掌握发动机燃料与工质;多变过程中热力参数的计算。



## 教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
变质量系统热力学简介	学会	变质量系统热力学的基本特点; 变质量系统热力学的分析方法
变质量系统热力学过程分析方法	知道	变质量系统基本方程及过程方程; 输运方程;均态、不稳定流动过程能量方程; 变质量系统热力学第二定律表达式
变质量系统热力学过程定律	掌握	热力学参数;状态方程;变质量系统质量守恒方程;变质量系统热力学第一定律表达式(开口系统能量方程);稳定流动过程能量方程
多变过程中热力参数的计算	掌握	理想气体热力过程中热量和功的计算;多变过程曲线的斜率;多变过程的 $p$ - $V$ 图及 $T$ - $S$ 图
多变过程 $p$ - $V$ 图及 $T$ - $S$ 图分析	理解	多变过程曲线在 $p$ - $V$ 图和 $T$ - $S$ 图上的变化规律
理想混合气体	理解	理想混合气体的成分;道尔顿分压定律;分容积定律;各成分间的关系;混合气体的折合气体常数
发动机燃料与工质	掌握	工质的主要热力参数;比热容的计算;工质作为混合物时的热力特性
发动机燃烧热化学	知道	燃料燃烧与燃烧生成物;可燃混合气的燃烧热
发动机能量转换的评价	掌握	发动机指示性能指标;发动机有效性能指标;指示指标的测量及换算;燃料能量转换的总效率;发动机动力性及经济性影响因素分析
机械损失的测量	学会	影响机械损失的因素;机械损失的测量方法



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热力发动机。本章介绍与热力发动机有关的热力学知识。

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,其主要形式有往复式内燃机和燃气轮机,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,导致了热能变成机械能的效率不同,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结论。由于工程问题的复杂性,为突出本质及主要矛盾,一般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。

考虑到大学物理中有关热力学的内容已做了一定的介绍,为避免重复,对大学物理中已涉及的热力学基本概念、基本分析方法、基本关系式不再论述。本书结合热力发动机的实际工作过程是一个变质量热力系统,从变质量热力系统的角度对热力学的基础知识作了拓展和介绍,并在此基础上论述了过程方程式、热力学第一定律、热力学第二定律等热力学内容。

## 第一节 热力学知识

我们一般所称的热力学,主要研究平衡态或准静态,所以又称平衡热力学。它们都是热运动的特殊形态,它们的各种变化过程都是一系列平衡态或准静态的连续变化。这种变化从理论上讲需要无限长的时间,因而热力学中没有时间变量,它不涉及过程的速率。近几十年来发展起来的有限时间热力学就是考虑了时间变量,考虑了热力过程的速率问题。它属于不可逆过程热力学,但又与传统的不可逆热力学不同。

工程热力学是研究热和功之间的转换规律,是研究热力学及其在涉及能量利用的各种过程、装置和系统的工程设计中的用途,以造福于人类的学科,它是宏观热力学的一个重要分支。随着科学技术的飞跃发展,工程中遇到各种各样的热力学问题,从而使工程热力学的内容不断的丰富和向前发展,变质量系统热力学就是工程热力学的拓展。

发动机作为将燃料燃烧产生的热能转换为对外输出机械能的热机,较其他形式的热机有着效率高的特点。作为一个热力系统,发动机工作过程是一个典型的变质量工作过程。在发动机的热力过程中,工质首先经过发动机进气系统进入汽缸,形成可燃混合气并在汽缸中燃烧,发生化学反应产生新的工质,放出热量,高温高压下的工质膨胀做功,转换为活塞运动的机械能,膨胀做功后的废气最后经排气系统排入周围环境。在整个工作过程中,工质与汽缸壁及相关外界存在着热量传递,发动机通过进、排气系统与外界发生着质量的交换。可

以看出发动机各系统之间不但存在着能量的传递。还存在着质量的交换,下面我们将介绍与变质量系统有关的热力学基本知识。

## 一、变质量系统热力学简介及分析方法

变质量系统热力学是研究变质量系统热功转换的规律和方法。变质量热力系统是指热力系统在进行热力过程时,系统中工质的数量也同时发生变化。例如工程中经常遇到的内燃机工作过程、压缩机热力过程、火箭发动机工作过程等都是变质量热力系统的实例。对于这样的变质量热力系统,表征系统状态的参数除了压力、温度、容积以外,工质的数量也是表征系统状态的参数,有时它是一个关键的参数。

### 1. 变质量系统热力学的基本特点

变质量系统热力学主要研究以下内容:适用于变质量系统热力学的基本定律表达形式;变质量系统热力过程的参数变化规律;系统与外界进行热量、功量以及质量交换的规律等。

变质量热力系统与常质量热力系统有着本质的差别。常质量热力系统,也就是说进行热力过程和热力循环时,系统内工质的数量保持不变,而且每个工质微团所经历的热力过程和热力循环均相同。对于开口系统,常质量热力学只研究稳定流动。对于一个常质量热力系统,每个工质微团经历的状态变化相同,因此在研究过程中,我们可以取单位工质作为分析对象。而对于变质量系统热力过程,每个工质微团经历的热力过程不完全相同,况且系统中工质的数量也在变化,因而不能取单位工质作为分析对象,而只能取微元工质作为研究对象,并且假定:

(1) 微元工质进入系统之前和离开系统之后,工质发生的一切变化与所考察的变质量热力系统无关;

(2) 微元工质从进入系统的瞬时起,即属于系统的一部分,与其他工质一样参与系统的状态变化。

对于只有工质流入的系统(例如:对刚性容器的充气)和只有工质流出的系统(例如:自刚性容器的放气)。微元工质进入系统后,即与系统中原来的工质处于同一状态,流出工质的状态是该时刻系统的状态。

由热力学知,对于简单可压缩常质量系统其状态方程是三个变量的函数,独立变量只有两个,而对于变质量系统,其状态方程是四个变量的函数,独立变量有三个。

对于常质量系统,状态方程一般形式为

$$f(p, V, T) = 0$$

对于变质量系统,状态方程一般形式为

$$f(p, V, T, m) = 0$$

例如:对于一个简单可压缩系统来说,只有容积变化的边界功,其表达式为

$$\delta w = p dv \quad (1-1)$$

或

$$\delta W = p dV$$

对于常质量系统,则有

$$\delta W = p d(mv) = mp dv \quad (1-2)$$

对于变质量系统,则有

$$\delta W = p d(mv) = mp dv + v p dm \quad (1-3)$$



很显然,对于常质量系统,当  $dv=0$  时,则有  $\delta W=0$ ,对于变质量系统,虽然比体积不变,即  $dv=0$ ,但质量是可变的,即  $dm \neq 0$ ,所以这时的功  $\delta W \neq 0$ 。

在热力学中,我们用工质比体积  $v$  的增大还是减小来定义工质的膨胀和压缩。由以上分析可以看出,对于常质量系统, $v$  和  $V$  有同样的作用, $v$  增大, $V$  也增大,系统膨胀对外做功,反之亦然。可是对于变质量系统则不然,所谓的膨胀和压缩是以系统容积  $V$  的增大还是减小来定义的。由  $dV = mdv + vdm$ ,可以看出,当工质膨胀做功时,即  $dV$  大于零时,但  $dv$  不一定大于零,当  $dV$  小于零时, $dv$  也不一定小于零。很显然,这是因为  $dm$  引起的。即  $V$  的增大或减小(即  $dV > 0$  或  $dV < 0$ )要由  $mdv + vdm$  的综合效果来决定,而不仅仅决定于比体积的变化,还要取决于工质质量  $m$  的变化。

必须要指出的是,系统与外界传递的热量  $\delta Q$ 、系统做的功  $\delta W$  两者都不能储存,它们是传递过程中的能量,不是系统的状态参数,是与过程有关的物理量。在本书中,我们用“ $\delta$ ”表示过程中某物理量的微元量,用“ $d$ ”表示过程中某物理量的微元变化量(微小增加量或减少量)。“ $\delta$ ”(某物理量的微元量)的积分是表示热力过程中某物理量的总量,“ $d$ ”的积分则表示热力过程中某物理量初、终态变化的增量。例如:

$$Q = \int \delta Q; \Delta U = U_2 - U_1 = \int_1^2 dU$$

式中:1、2——热力系统中某物理量在热力过程中的初、终态。

## 2. 变质量系统热力学的分析方法

变质量系统热力过程其基本特点是每个工质微团所经历的热力过程并不完全相同,这时若任取单位工质作为研究对象,已不能代表整个工质的热力过程。同时,整个工质的循环也不可能在热力学坐标图上用一条简单的封闭曲线表示出来。因此,在分析方法上与常质量热力系统不同,这就是以控制容积为分析对象,采用控制容积分析方法。而且广泛采用的是  $P$ - $V$  图,而不是一般的  $P$ - $v$  图或  $T$ - $s$  图。

控制容积分析方法,是变质量系统热力学的的基本分析方法。

在下面的分析中,我们将热力系统按其与外界是否有质量交换而分为开口系和闭口系(或称封闭系)。在进行热力分析时,若取一定容积的空间为热力系统,则称此空间区域为控制容积,对所取定的控制容积进行热力分析的方法就是控制容积法。其基本特点如下。

控制容积是一个可以流过流体的、虚构的、固定的体积,在一般情况下,控制容积可以改变其形状和空间位置。控制容积的表面,我们称为控制面,它是一个虚构的、可渗透的、包围全部控制容积的表面。

与控制容积对应的是体系分析方法(又称为控制质量法)。体系是物质的集合,对于一个体系,既没有物质的进入,也没有物质离开,体系之外的一切都称为外界或环境。

变质量系统热力学主要研究的是变质量的开口系。正如前面指出,工质流经一个开口系统,这时工质微团所经历的过程不完全相同。在控制容积中,工质不断地进出,控制容积中的工质不断更新,这时以跟踪某一微元工质来考察它与周围工质的相互作用是不可能的。我们的研究集中在所选取的控制容积上,要确定出工质占据此控制容积的瞬时特性。控制容积中工质的参数可以是不稳定的(随时间变化),也可以是不均匀的(随地点变化)。若不稳定,但是均匀的,可用瞬时参数来描绘;若不均匀,则需划分为若干局部均匀的小系统来描

绘。因此研究变质量热力过程,采用控制容积法是很方便的,也是行之有效的。

当对控制容积列出质量平衡、能量平衡、熵平衡方程时,不仅需要分析热和功的相互作用,还要计算由于工质质量的进出而引起的各种相应热力学参数的变化。由于微元工质在穿过控制面时,参数可能急剧的变化,这时难以确定工质在控制面上的参数。为此需假定在开口系统的界面上取一微元容积,其中的微元工质处于局部平衡,处于局部平衡的微元工质的参数就可用来表示工质在开口界面上的参数。

我们采用控制容积法分析热力系统的目的是导出基本方程式,即以控制容积为研究对象的质量平衡方程式,能量平衡方程式和熵平衡方程式。但是,这些平衡方程式都是依据基本定律导出的,而基本定律都与一个固定的、可以识别的物质集合有关,即基本定律都是针对某一个体系而言(即控制质量)。因此,在导出各平衡方程式时,要由体系分析方法(控制质量方法)入手,取包括控制容积中的质量和即将流入或流出的微元工质质量之和为控制质量,然后根据控制质量在所考察的时间内的变化列出各种相应的平衡方程式。最后要转化为用控制容积的参数和控制面上的参数所表示的各种平衡方程式。

在用控制容积方法分析热力系统时,我们认为热和功的作用发生在没有质量交换的那部分控制面上,质量的交换和伴随着质量交换发生的能量的变化和熵的变化等则仅仅发生在开口系统进、出口的控制面上。

## 二、变质量系统热力学基本方程

### 1. 热力学参数

#### 1) 广延量与强度量

热力学参数可以是与所含质量多少无关的物理量,也可以是取决于所含质量多少的物理量。我们一般定义:与所考察对象的质量有关的量称为广延量。例如:体系的体积、质量、动量等。另一类是与所考察对象的质量无关的量,称为强度量。例如:压力  $p$ 、温度  $T$ ,它们是明显不依赖所含物质的质量。上述两类物理量是体系的状态参量,我们又称为第一类强度量。第二类强度量则称为比广延量,即单位质量的广延量。

例如:我们已经在大学物理中学习过的对于一个热力系统,其热力学参数比内能  $u$ (单位质量的内能),比焓  $h$ (单位质量的焓),比熵  $s$ (单位质量的熵),比体积  $v$ (单位质量的体积),等等。若令系统的质量为  $m$ 、内能为  $U$ 、焓为  $H$ 、熵为  $S$ 、体积为  $V$ ,则

$$u = \frac{U}{m}; \quad h = \frac{H}{m}; \quad s = \frac{S}{m}; \quad v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

显然,广延量具有可加性,总量为各部分的相应量之和。而对单位物质质量而言,比广延量就是强度量。强度量反映系统的内含性质,与分子的运动有关,没有可加性。无论是广延量还是强度量,对于一个热力系统,当系统处于平衡时,状态一定,上述两类物理量也随之确定。

在本章的内容中,一般的广延量我们用  $N$  表示,一般的比广延量用  $\eta$  表示。 $\eta$  的定义为

$$\eta = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta m} = \frac{dN}{dm}$$

因此,体系的一般广延量  $N$  为

$$N = \int \eta dm$$

若体系占据的体积为  $\tau$ , 由于  $\rho = \frac{dm}{d\tau}$ , 因此一般广延量  $N$  为可以表达为

$$N = \int_{\tau} \eta \rho d\tau$$

式中:  $\rho$ ——广延量密度。

## 2) 储能

对于一个质量为  $m$  的封闭体系, 它经历了包括对外界传热和做功的过程, 假定该热力过程构成一个循环, 则根据热力学第一定律有

$$\oint (\delta Q - \delta W) = 0 \quad (1-5)$$

式中:  $\delta Q$ ——体系与外界在  $\Delta t$  时间内的热交换量;

$\delta W$ ——体系在该循环中  $\Delta t$  时间内完成的功。

由于式(1-5)表示一个沿任意封闭曲线的线积分为零, 所以积分号内的量  $(\delta Q - \delta W)$  表示了一个与过程无关的状态参数。我们定义该状态参数为储能, 并用  $E_n$  表示, 即

$$dE_n = \delta Q - \delta W \quad (1-6)$$

储能包括了能够储存在体系中的所有能量形式。一般包括以下几种能量: 热能(内能  $U$ )、动能( $\frac{mc^2}{2}$ )、重力势能( $mgh$ )、化学能, 核能以及其他形式的能。一般情况下, 在热力过程分析中, 只考虑内能、动能、重力势能三种能量形式。因此可以得到以下形式的能量方程:

$$dE_n = d\left(U + \frac{mc^2}{2} + mgh\right) = \delta Q - \delta W \quad (1-7)$$

对于质量为  $m$  的常质量系统, 以单位质量为分析对象, 若令:  $\delta q = \frac{\delta Q}{m}$ ,  $\delta w = \frac{\delta W}{m}$ ,  $de_n = \frac{dE_n}{m}$  则有

$$de_n = d\left(u + \frac{c^2}{2} + gh\right) = \delta q - \delta w \quad (1-8)$$

式中:  $c$ ——速度。

## 3) 内能

物质由分子所组成, 在分子运动论中, 我们称物质由于分子热运动和分子相互空间位置所具有的能量为内能, 用符号  $U$  表示。

对于一个质量为  $m$  而不考虑宏观动能和势能的封闭体系, 则有以下能量方程:

$$dU = d(mu) = \delta Q - \delta W = \delta Q + \delta U_f - pdV$$

若为常质量系统则有

$$du = \delta q + \delta u_f - pdv \quad (1-9)$$

式中:  $\delta U_f$ ——系统内考虑摩擦耗散效应引起的内能的变化。

## 4) 焓

热力学中根据定义: 对于单位质量工质,  $(u + pv)$  所表示的状态参数称为焓, 用符号  $h$  表示。即

$$h = u + pv$$

将式(1-9)代入上式的微分式,则有

$$dh = \delta q + \delta u_f + v dp \quad (1-10)$$

若考察的热力过程为可逆过程,则有  $\delta u_f = 0$ , 这时式(1-10)为

$$dh = \delta q + v dp \quad (1-11)$$

若过程为等熵过程,则有

$$dh = v dp$$

### 5) 熵

克劳修斯(1850年)将关系式  $dS = \frac{\delta Q}{T}$  表达的参数  $S$  称之为熵。根据比广延量的定义,

将  $s = \frac{S}{m}$  称之为比熵。

对于理想气体的可逆过程,根据定义及大学物理中我们已经学习过的关系式:

$$\delta q = du + p dv = dh - v dp$$

可得

$$ds = \frac{du + p dv}{T} = \frac{du}{T} + \frac{p}{T} dv$$

或

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T} dp$$

将理想气体的关系式及状态方程

$$du = c_v dT, dh = c_p dT, pv = RT$$

代入上式得

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \quad (\text{以 } T, v \text{ 为变量})$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (\text{以 } T, p \text{ 为变量})$$

$$ds = c_v \frac{dp}{p} + c_p \frac{dv}{v} \quad (\text{以 } p, v \text{ 为变量})$$

以上诸式为理想气体熵的微分关系式。

对于定比热容的理想气体熵的变化,将以上三式两边积分,有如下的积分关系式:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$$

由上述诸式可以看出,热力过程中理想气体熵的变化完全取决于它的初、终态,而与过程无关,这也就证明了理想气体的熵是一个状态参数。虽然上述诸式是在可逆过程前提下推导出来的,但由于熵是一个状态参数,其变化与过程无关,因而上述诸式可用于任何热力过程中熵的变化的计算。





### 6) 比热容

比热容是物质重要的热力性质之一。按定义,比热容  $c$  是系统温度升高  $1\text{K}$  (或  $1^\circ\text{C}$ ) 所需要的热量。热容的单位取决于热量和物质量的单位,如果物质量的单位用  $\text{kg}$ ,则相应的比热容称为质量比热容。一般用  $c$  表示,单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,或  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。它表示的是系统单位质量的物质在热力过程中温度升高  $1\text{K}$  (或  $1^\circ\text{C}$ ) 所吸收或放出的热量,即

$$c = \frac{\delta q}{dT}$$

因热量是过程量,故比热容也是一个与过程有关的量。如果热力过程为定容过程,则称比热容为比定容热容,即

$$c_v = \frac{dq_v}{dT}$$

如果热力过程为定压过程,则称比热容为比定压热容,即

$$c_p = \frac{dq_p}{dT} \quad (1-12)$$

下标  $v$ 、 $p$  分别表示定容过程和定压过程的参数。故

$$c_v = \left( \frac{du}{dT} \right)_v; \quad c_p = \left( \frac{dh}{dT} \right)_p \quad (1-13)$$

对于理想气体,由于不考虑分子间的作用力,即不考虑分子间的位能,那么理想气体的内能仅取决于分子间的动能。由于动能仅取决于温度,所以理想气体的内能也仅是温度的函数,即  $u = u(T)$ 。由  $h = u + pv = u(T) + RT$  得知,焓也是温度的单值函数,所以

$$c_{v0} = \frac{du}{dT} \quad \text{或} \quad du = c_{v0} dT \quad (1-14)$$

$$c_{p0} = \frac{dh}{dT} \quad \text{或} \quad dh = c_{p0} dT \quad (1-15)$$

下标 0 表示理想气体。

由式(1-14)和式(1-15)可看出比定容热容和比定压热容也是温度的单值函数。这一函数通常可表示为温度的三次多项式:

$$C_{v0} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3$$

$$C_{p0} = a'_0 + a'_1 T + a'_2 T^2 + a'_3 T^3$$

不同的气体有不同的系数。

当比热容为温度的函数时,热力过程 1-2 中内能和焓的变化则可通过积分求得,即

$$\Delta u = \int_1^2 c_{v0} dT; \quad \Delta h = \int_1^2 c_{p0} dT$$

为了计算的方便,在精度允许的情况下,可以取比定容热容和比定压热容为定值,即不考虑它随温度的变化,相应的比热容称为定值比定容热容和定值比定压热容。某些常用气体定值比定容热容和定值比定压热容的具体数据可查阅有关热力学表。

当比热容取定值时,有

$$\Delta u = c_{v0} \Delta T \quad (1-16)$$

$$\Delta h = c_{p0} \Delta T \quad (1-17)$$

比定容热容和比定压热容之间存在一定的关系,可由式(1-14)及式(1-15)推得,即