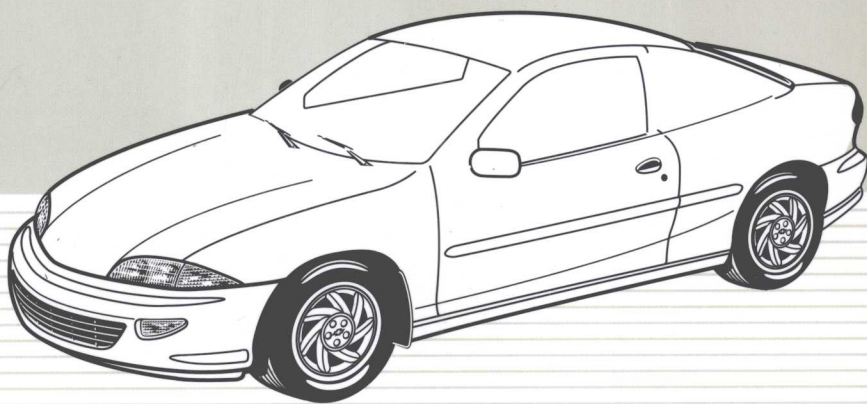


上海汽车工业教育基金会资助出版

普通高等院校汽车工程类规划教材

# 汽车发动机原理

徐兆坤 主编



清华大学出版社

上海汽车工业教育基金会资助出版

普通高等院校汽车工程类规划教材



# 汽车发动机原理

徐兆坤 主编

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了汽车发动机原理,共分8章。全书以热机理论(第1章)为基础,讲述发动机理论循环和性能参数评价体系(第2章),深入研究实际循环的换气过程和燃烧过程(第3、4章);然后与第2章相呼应,研究性能参数的变化规律和调控原理(即发动机特性,第5章);最后介绍了体现当前发动机技术热点与发展趋势的专题技术(排放控制、气体燃料发动机和混合动力技术等,第6、7、8章)。

本书增加了很多新技术内容,既强调先进性和实用性,又具备理论体系完整和简练的特点,热机理论和专题技术自成体系,独立成章,可任意选择。本书既可作为车辆工程、汽车运用工程、汽车服务工程及相关专业的本科生教材,也可供从事发动机技术的人员参考,或者汽车发动机爱好者阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理/徐兆坤主编. —北京:清华大学出版社,2010.1  
(普通高等院校汽车工程类规划教材)

ISBN 978-7-302-21240-9

I. 汽… II. 徐… III. 汽车—发动机—理论—高等学校:技术学校—教材 IV. U464

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第179963号

责任编辑:庄红权

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:15.5

字 数:370千字

版 次:2010年1月第1版

印 次:2010年1月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:28.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。  
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:034148-01

# 前 言

汽车产业已经成为我国经济的支柱产业之一。今天的汽车比以往任何时候都更紧密地依赖计算机信息科学、系统论、控制论、微电子、现代应用数学、材料科学、热动力学、计算流体力学和燃烧科学等多门学科及其最新成就,因此人才的培养方向必须依据科学技术迅猛发展、学科交叉和专业淡化的大背景,注重拓宽理论基础和专业方向,突出创造能力和创新意识。作者力图以科学性、先进性、系统性和实用性为宗旨编写本书。

基于拓宽理论基础和专业方向,本书既包含了发动机原理内容,又有关于发动机的浓缩的预备基础(工程热力学、传热学等)和专题技术(排放控制技术、气体燃料发动机技术、混合动力装置技术)。

基于先进性,本书删除了部分陈旧内容,如化油器和调速器等;增加了新技术的内容,如汽油机电控技术、柴油机时间控制式喷射系统、可变参数技术、新燃烧方式以及燃料电池等;修正了部分概念,如发动机特性;更新了部分传统内容。

基于突出创造能力和创新意识,本书不是平铺直叙地传授知识,而是注重学生能力的培养,注重分析解决问题的思路。例如本书并不介绍众多的柴油机时间控制式电控喷射系统,而是与传统喷射系统相比,分析其所具有的共同的显著特点,即先进的喷射系统就是将产生高压燃油的功能和控制喷油规律的功能分开,分别由不同部件完成,体现了一种将复杂问题通过分解简化后再加以解决思路。

本书努力简化抽象的繁复的理论推导,强化具体的概念,如讲述电控技术时不强调具体结构,不罗列大量的传感器,而是针对发动机面临“节能减排”的严峻挑战,依据基本理论重点分析运用电控技术所采取的对策。

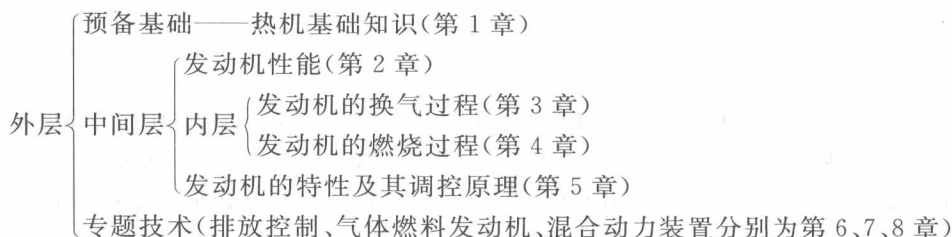
在发动机理论循环模型的建立中,需要抽象简化。本书不是采用“武断”的假定,或者难以使人信服的假定(如认为进、排气过程工质的状态参数相差不大,所以可以假定发动机循环是封闭的);而是采取类似数学上的分解方法,将高温废气的排出过程分解为工质的排出以及相应热量的排出。前者与进气工质相抵,因此可以认为没有工质的交换,据此可假定循环为封闭的。

基于科学性,作者发现,学生普遍缺乏运用已学过的高等数学、物理、化学等基础理论和专业基础理论解决发动机具体工程问题的能力,因此本书把重点放在引导读者如何将基础理论应用于分析汽车发动机原理上,而不是简单地堆砌专业知识。比如,利用物理学中的功的基本概念,推演出发动机工作循环的示功图,即压力-容积图。

基于实用性,本书注重理论联系实际,比如通过强化机械效率的测试方法,提高解决工程实际问题的能力。分析机械效率时,不忽略润滑油的选用和冷却液温度的控制,以及发动机使用过程中的技术状态。本书注重实用,分析压缩过程和压缩比时,结合了发动机的实际

运行和维护(气缸的密封性),以及故障诊断(气缸压缩压力的检测)。

在教学实践中,学生反映教学内容“太散、太多”,因此本书调整了编写逻辑结构,将汽油机和柴油机燃烧归并一章,将其中燃烧的共性内容合并单列成节,个性内容分别成节。全书分3个层次,最外层是预备基础和专题技术,中间层是发动机性能指标(对发动机的要求)及其变化规律、测取和调控,最里层是换气和燃烧过程,具体结构如下:



本书以国标、部标以及专业委员会所规定的技术术语和符号为准,并采用国际单位制,避免单位换算(除特别注明外)。

徐兆坤教授撰写了本书的第2、5、6、7、8章,张珏成撰写了第1章,第3章由张珏成、徐兆坤和任洪娟共同完成,第4章由张珏成和徐兆坤共同完成。张驰云参与了第3、4章的部分前期工作,郭辉、黄鹏参与了第4章的部分工作,黄臻参与了第4、5章的部分工作,李聪博士为第8章的编写提供了大量资料,张海波、曾帅和张娜参与了制作部分插图、校对和其他大量辅助工作。编写过程中,张珏成对各章提出了宝贵的意见,最后由徐兆坤教授对全书进行了修改、补充和定稿。张珏成和李博对书稿进行了认真校核。

感谢上海交通大学邬静川教授(博士生导师,上海内燃机工程学会秘书长)和同济大学钱人一教授(上海内燃机工程学会理事)对本书的精心审阅,同时也感谢清华大学出版社和汽车工程学院的大力支持。

作者自知才疏学浅,错误与遗漏在所难免,因此,敬祈读者不吝赐教。在本书编写过程中,参考了大量有关著作和文献资料,在此一并向有关作者和编者表示真诚的感谢!

作者

2009年10月

于上海

E-mail: xuzhaokun1@sina.com

# 主要符号表

## 英文符号

符号	意义	单位	符号	意义	单位
$A_a$	空气消耗率	kg/s	$i$	气缸数	
$a$	音速	m/s	$K$	传热系数, 换热系数	W/(m <sup>2</sup> · K)
$B$	燃油消耗率	kg/s	$k$	绝热指数, 等熵指数	
	或油束最大宽度	m		或热导率, 导热系数	W/(m <sup>2</sup> · K)
BSU	波许滤纸烟度		$L$	长度	m
$b_e$	有效燃油消耗率	kg/(W · s)		或油束射程, 贯穿距离	m
$b_i$	指示燃油消耗率	kg/(W · s)	$l_0$	理论空气量, 化学计	kg 空气/
$C$	速度	m/s		量空燃比	kg 燃料
$C_a$	平均进气流速	m/s	$Ma$	马赫数	
$C_g$	平均排气流速	m/s	$M_r$	元素的相对分子质量	
$C_F$	火焰速度	m/s	$m$	质量	kg
$C_0$	黑体辐射系数	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )	$m_c$	比质量	kg/W
$c$	光速	m/s	$Nu$	努谢尔特准则	
	或质量比热容	J/(kg · K)	$n$	发动机转速	r/min
	或比例常数			或多变指数	
$c_p$	质量定压热容	J/(kg · K)	$n_1$	压缩多变指数	
$c_v$	质量定容热容	J/(kg · K)	$n_2$	膨胀多变指数	
$D$	气缸直径, 活塞直径	m	$P_e$	有效功率	W
$d$	直径	m	$P_{eb}$	增压后有效功率	W
$d_e$	当量直径	m	$P_i$	指示功率	W
$E$	辐射力	W/m <sup>2</sup>	$P_L$	升功率	W/L
$E_b$	黑体辐射力	W/m <sup>2</sup>	$P_m$	机械损失功率	W
$E_\lambda$	单色辐射力	W/m <sup>2</sup>	$P_r$	普朗特准则	
$F$	力	N	$p$	绝对压力	Pa
	或面积	m <sup>2</sup>		或气缸压力	Pa
$F_F$	火焰前锋面积	m <sup>2</sup>	$p^*$	滞止压力	Pa
$F_r$	气门时面值	m <sup>2</sup> · s	$p_a$	环境压力, 当地大气压	Pa
$F_\varphi$	气门角面值	m <sup>2</sup> · °CA	$p_b$	增压压力	Pa
$f$	面积	m <sup>2</sup>	$p_{co}$	压缩终点气缸压力	Pa
	或频率	1/s 或 Hz	$p_{cr}$	临界压力	Pa
$Gr$	格拉晓夫准则		$p_d$	进气压力	Pa
$g$	重力加速度	m/s <sup>2</sup>	$p_{de}$	进气终点气缸压力	Pa
$g_b$	循环供油量	kg	$p_{ex}$	膨胀终点气缸压力	Pa
$H$	焓	J	$p_{fo}$	喷油器针阀开启压力	Pa
$H_u$	燃料低热值	J/kg	$p_{fr}$	高压油管剩余压力	Pa
$h$	比焓	J/kg	$p_{is}$	喷油器针阀落座压力	Pa

符号	意义	单位	符号	意义	单位
$p_g$	排气管压力	Pa	$T_{dc}$	进气终点气缸温度	K
$p_m$	表压力	Pa	$T_{tq}$	有效转矩	N·m
$p_{max}$	最高爆发压力,最高 燃烧压力	Pa	$T_{ex}$	膨胀终点气缸温度	K
$p_{me}$	平均有效压力	Pa	$T_{max}$	最高燃烧温度	K
$p_{mi}$	平均指示压力	Pa	$T_{mh}$	循环平均吸热温度	K
$p_{mm}$	平均机械损失压力	Pa	$T_{ml}$	循环平均放热温度	K
$p_r$	排气终点气缸压力	Pa	$T_r$	排气温度	K
$p_t$	理论循环平均压力	Pa	$T_z$	理论循环最高温度	K
$p_v$	真空度	Pa	$t$	摄氏温度	°C
$p_z$	理论循环最高压力	Pa	$t_a$	环境温度	°C
$Q$	热量 或累计放热量	J	$t_b$	增压器出口温度	°C
$Q_{ht}$	热流量	W	$t_{co}$	压缩终点气缸温度	°C
$Q_r$	总辐射能	W	$t_d$	进气温度	°C
$Q_v$	标准状态下水的汽化 潜热	J/kg	$t_{ex}$	膨胀终点气缸温度	°C
$Q_a$	吸收辐射能	W	$t_{max}$	最高燃烧温度	°C
$Q_p$	反射辐射能	W	$t_r$	排气温度	°C
$Q_r$	穿透辐射能	W	$U$	内能	J
$dQ/d\varphi$	瞬时放热速率	J/°CA	$u$	比内能	J/kg
$q$	单位质量热量	J/kg	$\Delta U$	电压降	V
$q_{ht}$	热流密度	W/m <sup>2</sup>	$V$	容积	m <sup>3</sup>
$q_m$	质量流量	kg/s	$V_a$	气缸工作容积	m <sup>3</sup>
$q_v$	体积流量	m <sup>3</sup> /s	$V_c$	气缸压缩终点容积	m <sup>3</sup>
$R$	通用气体常数	J/(kg·K)	$V_s$	气缸总容积	m <sup>3</sup>
$Re$	雷诺准则		$V_z$	加热终点气缸容积	m <sup>3</sup>
$R_f$	面积热阻	(m <sup>2</sup> ·K)/W	$v$	比容积	m <sup>3</sup> /kg
$R_g$	气体常数	J/(kg·K)	$v_m$	活塞平均速度	m/s
$S$	活塞行程 或熵 或湿周	m J/K m	$W$	功或膨胀功	J
$s$	比熵	J/(kg·K)	$W_b$	传热损失	J
$T$	热力学温度	K	$W_c$	有效功	J
$T_a$	环境温度 或循环最低温度	K K	$W_i$	指示功	J
$T_b$	增压器出口温度	K	$W_k$	工质损失	J
$T_{co}$	压缩终点气缸温度	K	$W_{net}$	净功	J
$T_d$	进气温度	K	$W_s$	轴功	J
			$W_z$	燃烧损失	J
			$\tau_w$	比膨胀功	J/kg
			$\tau_{w_{net}}$	比净功	J/kg
			$\tau_{w_s}$	比轴功	J/kg
			$X$	质量百分率	%

## 希腊文符号

符号	意义	单位	符号	意义	单位
$\alpha$	空燃比 或热辐射吸收率	kg 空气/kg 燃料	$\lambda_p$	压力升高比	
$\beta$	喷雾锥角 或流体容积膨胀系数	(°) 1/K	$\mu$	流体动力黏度系数	kg/(m·s)
$\delta$	后膨胀比 或厚度	m	$\nu$	临界压力比 或流体运动黏度系数	m <sup>2</sup> /s
$\epsilon$	黑度		$\pi_b$	增压比	
$\epsilon_c$	几何压缩比		$\theta_{ig}$	点火提前角	°CA
$\phi_a$	过量空气系数		$\theta_{ij}$	喷油提前角	°CA
$\phi_c$	充量系数, 充气效率		$\theta_{ip}$	供油提前角	°CA
$\phi_f$	燃料利用率		$\rho$	密度 或热辐射反射率	kg/m <sup>3</sup>
$\phi_n$	转速储备系数		$\rho_a$	进气充量密度	kg/m <sup>3</sup>
$\phi_r$	残余废气系数			或空气密度	kg/m <sup>3</sup>
$\phi_{tq}$	转矩储备系数		$\rho_R$	废气密度	kg/m <sup>3</sup>
$\eta_{et}$	有效热效率		$\rho_m$	混合气密度	kg/m <sup>3</sup>
$\eta_{it}$	指示热效率		$\rho_0$	初始膨胀比	
$\eta_m$	机械效率		$\sigma$	斯蒂芬-玻耳兹曼常数	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>-4</sup> )
$\eta_t$	理论热效率		$\tau$	冲程数 或热辐射透射率 或时间	s
$\eta_{tc}$	卡诺循环热效率				
$\varphi$	曲轴转角 或增压度	°CA	$\tau_i$	着火延迟期	s
$\varphi_i$	着火延迟期	°CA	$\psi_a$	进气流动阻力系数	
$\varphi_{fi}$	喷油延迟角	°CA	$\psi_R$	排气流动阻力系数	
$\lambda$	波长 或曲柄连杆比	m	$\psi_{min}$	进气门平均流量系数	



# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 热机基础知识</b> .....	<b>3</b>
1.1 热力学基本概念 .....	3
1.2 热力学第一定律 .....	5
1.3 理想气体 .....	7
1.4 理想气体的基本热力过程 .....	8
1.5 热力学第二定律 .....	11
1.6 气体的稳定流动 .....	13
1.7 发动机的理论循环 .....	15
1.8 热量传递过程 .....	20
1.8.1 热量传递现象 .....	20
1.8.2 导热 .....	20
1.8.3 对流换热 .....	22
1.8.4 辐射换热 .....	24
<b>第 2 章 发动机性能</b> .....	<b>28</b>
2.1 发动机的实际循环 .....	28
2.2 实际循环的评价指标(指示指标) .....	31
2.2.1 实际循环的动力性指标 .....	31
2.2.2 实际循环的经济性指标 .....	33
2.3 发动机的性能指标(有效指标) .....	33
2.3.1 发动机的动力性指标 .....	34
2.3.2 发动机的经济性指标 .....	35
2.3.3 发动机的强化指标和负荷指标 .....	36
2.3.4 发动机的环境指标 .....	37
2.4 机械损失与机械效率 .....	37
2.4.1 机械损失的组成 .....	37
2.4.2 机械效率的主要影响因素 .....	38
2.5 热平衡 .....	40

<b>第 3 章 发动机的换气过程</b> .....	43
3.1 四冲程发动机换气过程 .....	43
3.1.1 排气过程 .....	44
3.1.2 进气过程 .....	45
3.1.3 气门重叠和燃烧室扫气过程 .....	45
3.2 换气损失和泵气损失 .....	46
3.3 四冲程发动机的充量系数 .....	48
3.3.1 充量系数的解析式 .....	48
3.3.2 充量系数的影响因素 .....	49
3.3.3 充量系数与运行工况的关系 .....	51
3.4 改善换气过程的基本措施 .....	52
3.4.1 减小进气系统的阻力 .....	53
3.4.2 减小排气系统的阻力 .....	56
3.4.3 合理确定配气定时 .....	57
3.5 配气系统动态可变技术 .....	58
3.5.1 管内气流动态效应的概念及其利用 .....	58
3.5.2 可变进气管与进气道 .....	61
3.5.3 可变配气定时机构 .....	61
3.5.4 可变排气管 .....	64
3.6 二冲程发动机的换气过程 .....	65
3.6.1 二冲程发动机的工作过程 .....	65
3.6.2 二冲程发动机的扫气泵与扫气形式 .....	67
3.6.3 二冲程发动机换气过程特点和评价参数 .....	68
3.7 废气涡轮增压 .....	70
3.7.1 废气涡轮增压的基本概念 .....	70
3.7.2 废气涡轮增压器的工作过程 .....	71
3.7.3 废气能量的利用 .....	73
3.8 废气再循环系统 .....	75
3.8.1 废气再循环的作用 .....	75
3.8.2 汽油机废气再循环系统 .....	76
3.8.3 柴油机的废气再循环系统 .....	77
<b>第 4 章 发动机的燃烧过程</b> .....	81
4.1 发动机的燃料 .....	81
4.2 燃烧过程与燃烧热化学 .....	83
4.2.1 燃烧过程 .....	83
4.2.2 燃烧热化学 .....	87
4.2.3 柴油与汽油在混合气形成与燃烧方式上的主要差异 .....	89

4.3	发动机气缸内的气体运动 .....	91
4.3.1	缸内气体运动的作用 .....	91
4.3.2	缸内气体运动形式 .....	92
4.4	汽油机的燃烧过程 .....	95
4.4.1	汽油机的混合气形成过程 .....	95
4.4.2	汽油机的正常燃烧过程 .....	100
4.4.3	汽油机的不正常燃烧过程 .....	104
4.4.4	典型汽油机燃烧室 .....	107
4.4.5	使用因素对汽油机燃烧过程的影响 .....	112
4.5	柴油机的燃烧过程 .....	114
4.5.1	柴油机燃油喷射系统的特点和发展 .....	115
4.5.2	柴油机的燃烧过程 .....	116
4.5.3	燃油喷射系统 .....	119
4.5.4	柴油机的混合气形成过程 .....	131
4.5.5	柴油机的燃烧室 .....	132
4.5.6	柴油机燃烧过程的影响因素 .....	137
4.6	发动机新型燃烧方式 .....	140
<b>第5章</b>	<b>发动机的特性及其调控原理 .....</b>	<b>144</b>
5.1	运行工况 .....	144
5.2	发动机台架试验 .....	147
5.3	发动机运行特性 .....	149
5.4	运行特性的断面特征之一——发动机负荷特性 .....	150
5.5	运行特性的断面特征之二——发动机速度特性 .....	153
5.6	调控原理 .....	155
5.6.1	基本形式及其分析 .....	156
5.6.2	基本原理 .....	158
5.6.3	控制内容及功能 .....	159
5.6.4	控制策略 .....	160
5.6.5	控制流程 .....	162
5.7	试验 .....	163
5.7.1	发动机试验的分类 .....	163
5.7.2	试验标准 .....	164
5.7.3	机械效率测试 .....	165
<b>第6章</b>	<b>发动机排放控制技术 .....</b>	<b>168</b>
6.1	概述 .....	168
6.1.1	汽车污染物的来源、分类和危害 .....	168
6.1.2	影响排放的因素和评价指标 .....	170

6.2	汽油机排放污染物 .....	170
6.2.1	一氧化碳生成机理和影响因素 .....	171
6.2.2	氮氧化物生成机理和影响因素 .....	172
6.2.3	碳氢生成机理和影响因素 .....	173
6.2.4	汽油机排放特性 .....	175
6.3	柴油机排放污染物 .....	177
6.3.1	微粒生成机理和影响因素 .....	177
6.3.2	碳氢生成机理 .....	178
6.3.3	气态有害排放物的影响因素 .....	178
6.3.4	柴油机排放特性 .....	179
6.4	降低汽油机排放污染的对策 .....	181
6.4.1	废气再循环装置 .....	181
6.4.2	曲轴箱强制通风装置 .....	182
6.4.3	燃油蒸发控制装置 .....	183
6.4.4	三效催化转化器 .....	184
6.5	降低柴油机排放污染的对策 .....	186
6.5.1	机内处理方法 .....	186
6.5.2	机外处理方法 .....	189
6.6	排放法规 .....	191
6.6.1	排放法规简介 .....	191
6.6.2	排放法规的测试规范与有害物排放限值 .....	192
<b>第7章</b>	<b>气体燃料发动机技术 .....</b>	<b>197</b>
7.1	概述 .....	197
7.2	缸外进气管混合器式供气系统 .....	200
7.2.1	基本工作原理 .....	200
7.2.2	核心部件 .....	201
7.3	缸外进气阀处喷射供气系统 .....	204
7.3.1	基本工作原理 .....	205
7.3.2	气体燃料喷射器 .....	205
7.4	燃料理化特性对发动机性能的影响 .....	206
7.5	CNG/柴油双燃料发动机 .....	209
7.6	LPG/汽油两用燃料发动机特性 .....	211
7.7	发展趋势 .....	212
<b>第8章</b>	<b>混合动力装置 .....</b>	<b>214</b>
8.1	电动驱动和混合驱动的发展背景 .....	214
8.2	蓄电池纯电动汽车动力装置 .....	215
8.3	蓄电池+燃油发动机混合动力装置 .....	218

8.4 燃料电池汽车动力装置 .....	221
8.4.1 燃料电池的基本原理 .....	221
8.4.2 燃料电池的分类 .....	222
8.4.3 质子交换膜燃料电池的特点 .....	224
8.4.4 燃料电池动力系统的管理 .....	226
8.4.5 燃料电池混合动力装置 .....	227
8.4.6 燃料电池的应用及前景 .....	228
参考文献 .....	230

# 绪 论

## 1. 内燃式发动机的发展和地位

1705年,英国托马斯·纽科门等人发明了蒸汽机,这是一个划时代的里程碑,推动人类历史进入工业社会。1794年,英国人斯垂特首次提出把燃料和空气混合为可燃混合气以供燃烧的设想。1859年,法国技师雷诺尔制成以煤气为燃料的二冲程发动机。1866年,德国工程师尼古拉斯·奥托成功地试制出四冲程煤气机。1883年,戴姆勒与迈巴赫发明了四冲程汽油机。1897年,狄塞尔发明了柴油机。现在,几乎所有的燃料都可以成为内燃机燃料。

从二冲程煤气机诞生至今,内燃机已经发展了约150年。在这过程中,内燃机经过了不断地改进和发展,成为目前热效率高、功率密度大、工作可靠的技术密集型机电一体化产品,在水、陆交通运输、农业机械和工程机械等领域的动力装置中,始终保持着主导地位。内燃机是多学科交叉的成果,也是新技术的强大载体。

汽车发动机是汽车的动力源,其工作状况直接影响汽车的动力性、燃料经济性和有害物排放特性。在降低能源消耗和保护环境的巨大推动下,人们又进一步改进柴油机和汽油机,广泛采用计算机控制技术,使发动机的整体技术水平达到历史最高峰,各方面性能更加卓越。另一方面,代用燃料如天然气、石油气和乙醇等在内燃机领域得到更广泛的使用。代用燃料发动机在改善能源结构、减少有害物排放方面作出了一定的贡献,但是人类还没有从根本上消除汽车对环境的污染和能源的过度消耗。

虽然人类在利用新能源作为汽车动力方面投入巨大的努力,但是在未来较长的一段时间内,内燃机的主体地位仍不可替代。人们对燃料电池进行了大量的研究,取得了可喜的进展,经过初步的应用尝试,技术已比较成熟,有可能成为今后汽车动力装置之一。燃料电池的效率不受卡诺循环的限制,可以达到很高的数值,运行时可以达到有害物零排放,是理想的动力能源。但与内燃式发动机相比,燃料电池在功率密度、比质量、可靠性、寿命及价格等方面还有很大差距。

随着汽车日益普及,大量使用汽车产生了严重的环境和能源问题。因此,人们对发动机的要求更为苛刻,进一步减少发动机的有害物排放和降低其燃料消耗成为发动机技术的主要发展趋势。当前,内燃机领域的研究热点主要是改进发动机的工作过程(可称为机内对策,代表性技术有电控技术、稀薄燃烧等新燃烧方式)、改善燃料品质(可称为机前对策,典型研究有增压中冷,油品添加剂开发,代用燃料的应用、开发和生产)和汽车尾气的处理(可称为机后对策,以排气后处理器开发为代表)。

## 2. 本书的性质和内容

汽车发动机原理以发动机的工作循环为研究对象,以提高整机性能为目的。通过研究

发动机实际循环的各个工作过程,分析其性能指标的各种影响因素及其相互间的作用,找到提高发动机性能的技术措施。

本书的任务是为读者从事汽车的生产、使用和维修等工作提供理论基础。

汽车发动机原理的全部内容以热机理论为基础,建立内燃机理论循环模型和性能参数体系,研究性能参数的变化规律(即发动机特性),获得评价发动机性能的手段。通过分析发动机实际循环与理论循环的差异,以及深入研究实际循环的各个工作过程(主要是换气过程和燃烧过程),寻找影响性能参数的各种因素及其相互间的作用,提出改进发动机工作过程的各种技术措施。汽车发动机原理的主要研究方法之一是试验,因此,应该掌握性能试验基本设施的使用方法和试验过程。为体现汽车动力装置技术的发展,本书还介绍了内燃机排放控制技术、气体燃料发动机和混合动力技术等。

# 第 1 章 热机基础知识

汽车发动机大多为内燃机,内燃机是一种将燃料化学能转化成机械能的热机,燃料在发动机内部燃烧并转化为气体的热能,经过气体膨胀,再将热能转化为机械能。学习现代汽车发动机的工作原理,研究其工作过程及性能,离不开工程热力学和传热学知识。

## 1.1 热力学基本概念

工程热力学是研究能量及其转化规律的一门科学。热力学第一定律即是能量守恒原理。能量转化所要满足的条件、进行的方向和受到的限制等内容归结为热力学第二定律。工程热力学以基本概念和基本定律为基础,对热力现象和能量转换过程进行分析,因此结论可靠,具有广泛适用性。

### 1. 热力学系统与基本状态参数

为方便研究,把所要研究的那部分物质或空间称为热力学系统,简称系统,是工程热力学的研究对象;系统之外的物质或空间叫做外界;系统和外界之间由界面区分,界面也称作边界,见图 1-1。

与外界只有能量交换而无质量交换的系统称为闭口系,内燃机在气门全部关闭后,其气缸中的气体可看作是闭口系;与外界既有能量交换又有质量交换的系统称为开口系,如管道、鼓风机和水泵等。与外界没有热量交换的系统称为绝热系,反之称为换热系。与外界既无能量交换又无质量交换的系统,称为孤立系统;若系统与外界进行热量交换,而本身温度不发生变化,这种系统称为热源。

表征系统某一特性的物理量,称为状态参数,基本的状态参数为温度、压力和比容积。

能量蕴藏于物质内部。热机中,常见能量形式为机械能、化学能和内热能。化学能和内热能统称为系统的内能  $U$ ,它表示系统的所有微观能量之和。如果系统中没有化学反应,内能就是内热能。

内能是系统的状态参数,其绝对值没有意义,而内能的变化量则十分重要,也较容易确定。

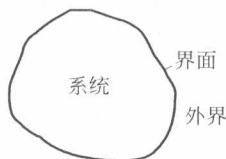


图 1-1 热力学系统



## 2. 热力过程和循环

状态参数的数值与系统状态变化过程无关。只要系统状态确定,状态参数的数值也就确定(见图 1-2)。热力学系统只有两个独立的状态参数,根据两个已知的状态参数,可求得其他参数。

在外界保持恒定不变的情况下,系统不随时间发生变化,系统内部不存在任何宏观过程,自发地保持或趋于平衡状态。工程上,把系统变化不大、比较稳定的情况看作是平衡状态。如系统内部的温度处处相等,并等于外界温度,就没有热量的传递,系统处于热平衡;系统内部的力处处相等,并等于外界力,就不存在机械运动的加速度,系统处于力平衡。一个系统同时处于力和热的平衡,则称其处于热力平衡状态。

当系统与外界之间失去平衡,原来平衡的热力学系统状态发生变化,直到建立新的平衡。系统从一个平衡状态到另一个平衡状态之间的变化称为热力过程,简称过程。若系统从一个初始状态开始变化,经过一系列的过程,最后回到这个初始状态,形成封闭的热力过程,这种过程称为热力循环,简称循环(见图 1-3)。

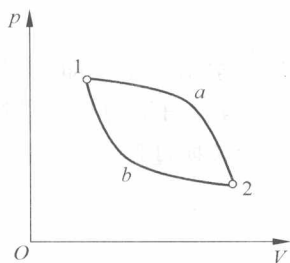


图 1-2 状态参数和过程无关

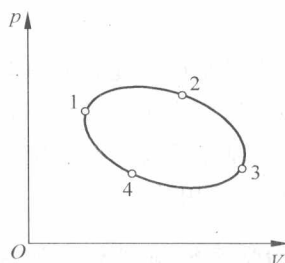


图 1-3 热力循环

如果使系统失去平衡的势差无限小,则系统的状态离平衡状态的差距也无限小,当时间足够长时,系统就会达到另一个平衡状态。每一局部都非常接近平衡状态的过程,称为平衡过程。

系统完成一个平衡过程后,如让系统再按相反方向进行逆过程,其结果不仅使系统回到原始状态,而且使环境也回到原始状态,即两者都没有任何改变,这种平衡过程称为可逆过程。反之,如果系统或环境不能回到原始状态,则该过程就是不可逆过程。

实际过程既不是可逆过程,也不是平衡过程。平衡过程和可逆过程都是理想过程,但可逆过程的条件更严格。可逆过程一定是平衡过程,平衡过程不一定是可逆过程。

## 3. 状态方程式

热力学系统的状态参数除温度、压力、比容积和内能外,还有焓和熵等。温度、压力和比容积这三个参数容易直接测量,因此常把它们作为独立变量。

用状态参数构成的坐标体系称为状态平面。状态平面上的一个点,代表系统的一个状态,见图 1-4。平衡过程可以用状态平面上的曲线表示,见图 1-5。特别地,用  $p$ - $V$  状态平面时,其过程曲线下面的面积代表了过程中的功,称为示功图;用  $T$ - $S$  状态平面时,其过程曲线下的面积代表了过程中的热量,称为示热图。