



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

汽车发动机原理 与汽车理论 第③版

Automotive Engine Fundamentals &
Automotive Theory

侯树梅 冯健璋 © 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

汽车发动机原理 与汽车理论

第3版

主 编 侯树梅 冯健璋
副主编 盖玉先
参 编 李 才 凌永成 杨雪梅
主 审 房绍平



机械工业出版社

本书讲述了发动机的工作过程和汽车的基本理论,内容包括工程热力学基础,发动机的性能指标、换气过程、废气涡轮增压,燃料与燃烧热化学,柴油机混合气的形成与燃烧,汽油机混合气的形成与燃烧,发动机的特性,发动机的排放与噪声,汽车发动机新型燃烧方式,发动机试验,汽车的动力性、燃油经济性,汽车动力装置参数的确定,汽车的制动性,汽车的操纵稳定性,汽车的平顺性及通过性等。

本书为汽车、内燃机制造与维修专业高等教育教材,也可供从事汽车、发动机设计、制造和运用的工程技术人员、技术工人参考。

本书配有课件(PPT)和习题参考答案,免费提供给采用本书作为教材的教师,可登录 www.cmpedu.com 下载,或联系编辑(tian.lee9913@163.com)索取。

图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理与汽车理论/侯树梅,冯健璋主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2016.6

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-53914-8

I. ①汽… II. ①侯…②冯… III. ①汽车-发动机-理论②汽车工程
IV. ①U46

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第117187号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:宋学敏 责任编辑:宋学敏 李 然

责任校对:刘秀芝 封面设计:张 静

责任印制:李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016年9月第3版第1次印刷

184mm×260mm·25.5印张·608千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53914-8

定价:55.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第3版前言

随着国民经济支柱产业之一的汽车产业的迅速发展,现阶段,我国急需汽车、内燃机制造与维修方面的专业高级技术人才。作为培养这方面人才的高等院校,其相关专业发展迅速。为满足教学的需要,1997年由承德石油高等专科学校、哈尔滨工业大学(威海)、沈阳大学、南京工程学院的有关教师共同编写了《汽车发动机原理与汽车理论》(第1版)这本教材。在广大读者的支持下,本书第1版5年时间连续印刷了7次,2005年完成修订工作,第2版10年来连续印刷了16次。

在过去的十年里,汽车工业得到飞速发展,特别是发动机技术,为了满足日趋严格的排放法规和降低油耗,汽车发动机新技术层出不穷,并得到了快速推广与应用,不仅如此,各种新型燃烧理论也不断被提出并得到了实践。同时,为了全方位适应社会对人才的需求,近年来有多所普通本科院校明确将办学定位为“应用型”,提出“基础理论必需够用,突出应用和实践”。这也正是本书在编写和修订过程中一直贯穿的原则,同时融入汽车、发动机新技术等相关内容。

本书第1版在教学内容方面就做了尝试,增加了诸如电控汽油喷射、柴油机电控和可变技术等方面的内容。为培养学生运用发动机的基本原理解决工程实际问题的能力,书中安排了多篇文摘供读者借鉴。而第2版则是在保持基本编写原则及原书结构和内容基本不变的前提下,增加了一些学习发动机原理必须掌握的基础知识以及汽车发动机的新技术、试验方法、汽车驾驶性能、汽车安全性能、操纵稳定性的主动控制等内容。

本次修订更新和增加了发动机性能指标参数;将第2版第十章中的进气系统可变技术、汽油机稀薄燃烧系统和电子控制、柴油机电子控制等成熟技术的内容分别编入本版相应的章节中;增加了新内容“汽车发动机新型燃烧方式”;完善了发动机排放后处理技术的内容,并更新排放法规、测试方法等内容;工程应用实例选用了最新的文章供读者借鉴,并对第2版中的错误加以修正。

第3版按授课时数约80学时编写,其中发动机原理部分45学时,汽车理论部分35学时。教学时可根据专业的需要适当增、减学时。

第3版的主要内容有工程热力学基础、发动机的性能指标、发动机的换气过程、发动机废气涡轮增压、燃料与燃烧热化学、柴油机混合气的形成与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、发动机的特性、发动机的排放与噪声、汽车发动机新型燃烧方式、发动机试验、汽车的动力性、汽车的燃油经济性、汽车动力装置参数的确定、汽车的制动性、汽车的操纵稳定性、汽车的平顺性及通过性等。

本书由承德石油高等专科学校的冯健璋和侯树梅主编。冯健璋编写第三、四、八章,侯树梅编写第五、七、十、十一章,承德石油高等专科学校的李才编写第一章,哈尔滨工业大学(威海)的盖玉先编写第十五、十六、十七章,沈阳大学的凌永成编写第二、六、九章,南



京工程学院的杨雪梅编写第十二、十三、十四章。本书由原山西省机械厅的教授级高级工程师房邵平担任主审。

本书在修订过程中得到了同济大学兼职教授、原中国内燃机学会理事王景祜高级工程师的大力支持并提出了宝贵意见。本书引用了国内有关内燃机刊物中的一些论文，在此也向论文作者一并表示感谢。

由于编者水平所限，疏漏、错误之处在所难免，敬请读者和专家批评指正。

编者

第2版前言

随着国民经济支柱产业的汽车和内燃机工业的迅速发展,急需汽车、内燃机制造与维修方面的专业高级技术人才。作为培养这方面人才的高等院校的汽车、内燃机制造与维修专业发展迅速,而该专业的教材又十分缺乏。为满足教学的需要,1997年由承德石油高等专科学校、哈尔滨工业大学汽车学院等院校的有关教师共同编写了《汽车发动机原理与汽车理论》(第1版)这本教材。

教材内容本着必需、够用为度,加强针对性和应用性的原则,紧跟汽车技术不断发展的形势,在教学内容现代化方面做了尝试,增添了诸如电控汽油喷射、柴油机电控和可变技术等方面的内容。为培养学生运用发动机的基本原理解决工程实际问题的能力,书中安排了多篇文摘供读者借鉴。

在广大读者的支持下,本书第1版5年来连续印刷7次。

由于汽车工业日新月异的发展和教育事业的需要,我们在保持第1版“基础理论够用,突出应用,跟踪汽车、发动机新技术”的基本编写原则及原书结构和内容基本不变的前提下,在第2版增添了一些学习发动机原理前必须掌握的基础知识以及汽车发动机的新技术、试验方法、汽车的驾驶性能、汽车安全性能、操纵稳定性的主动控制等内容,并对第1版中的错误加以修正。

第2版的主要内容有工程热力学基础、发动机的性能指标、发动机的换气过程、发动机废气涡轮增压、燃料与燃烧热化学、柴油机燃烧过程、汽油机燃烧过程、发动机特性、发动机排放与噪声、汽车发动机新技术、发动机试验、汽车的动力性、汽车的燃油经济性、汽车发动机装置参数的确定、汽车的制动性、汽车的操纵稳定性、汽车的平顺性和通过性等。

第2版按授课时数约80学时编写,其中发动机原理部分45学时,汽车理论部分35学时。教学时可根据专业的需要适当增、减学时。

本书由承德石油高等专科学校的冯健璋主编,并编写第三、四、八章,哈尔滨工业大学汽车学院的盖玉先编写第十五、十六、十七章,承德石油高等专科学校的李才编写第一章,承德石油高等专科学校的侯树梅编写第五、七、十、十一章,沈阳大学的凌永成编写第二、六、九章,南京工程学院的杨雪梅编写第十二、十三、十四章。本书由山西省机械厅的教授级高级工程师房绍平担任主审。

第2版在修订过程中还得到了同济大学兼职教授、中国内燃机学会理事王景祜高级工程师的大力支持并提出了宝贵意见。本书引用了国内有关内燃机刊物中的一些论文,在此也向论文作者一并表示感谢。

由于编者水平所限,疏漏、错误之处在所难免,敬请读者和专家批评指正。

第1版前言

随着国民经济支柱产业的汽车和内燃机工业的迅速发展,急需汽车、内燃机制造与维修方面的生产第一线的应用型高级技术人才。作为培养这方面人才的高等工程专科学校的汽车、内燃机制造与维修专业发展迅速,而该专业的教材又十分缺乏。为满足教学的需要,根据1997年8月在威海和10月在郑州召开的全国高工专机械工程专业协会汽车技术分会教材工作会议制定的《汽车发动机原理与汽车理论》教材编写大纲,由承德石油高等专科学校、沈阳大学、南京机械高等专科学校、哈尔滨工业大学汽车学院等院校的有关教师共同编写了本书。

作为工业企业第一线的应用型高级技术人才,需要宽但不很深的专业知识和很强的专业技术应用能力。因此,教材内容本着必需、够用为度、加强针对性和应用性的原则,为紧跟汽车技术不断发展的形势,在教学内容现代化方面做了尝试,增添了诸如电控汽油喷射、柴油机电控和可变技术等方面的内容。为培养学生运用发动机的基本原理解决工程实际问题的能力,本书中安排了7篇文摘供读者借鉴。

本书的主要内容包括发动机性能指标、工作过程、废气涡轮增压、内燃机特性、内燃机的电子控制、排放和噪声,汽车的动力性、经济性、制动性、操作稳定性、平顺性和通过性以及汽车动力装置参数的确定等。本书按70学时(发动机原理40学时、汽车理论30学时)编写。

本书由承德石油高等专科学校冯健璋主编,并编写了第二、三、七章,侯树梅编写了第四、六、九章,沈阳大学机械工程学院的孟晓红编写了第一、五、八章,南京机械专科学校的丁家镛编写了第十、十一、十二章,哈尔滨工业大学汽车学院盖玉先编写了第十三、十四、十五章。本教材由房绍平教授级高级工程师主审。

本书为汽车、内燃机制造与维修专业大专教材,可作为相近专业的参考书,也可供这方面的工程技术人员、技术工人参考。

本书引用了有关教科书、内燃机专业期刊的许多资料;在本书编写过程中,承德石油高等专科学校杨占军、郑长松二位同志做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,错误在所难免,欢迎使用本书的同志指正批评。

编者
1998.11

本书常用符号表

拉丁字母

- A/F ——空燃比
 a ——加速度
 B ——小时耗油量
 b_e ——有效燃油消耗率
 b_i ——指示燃油消耗率
 Δb ——喷油泵循环供油量
 c ——声速、比热容、土壤黏度系数、阻力系数
 C_D ——空气阻力系数
 C_m ——活塞平均速度
 c_p ——比定压热容
 c_v ——比定容热容
 CA ——曲轴转角
 D ——气缸直径、动力因数
 E ——调速器起作用时作用在推力盘上的推力
 A ——活塞面积
 F_i ——汽车驱动力
 F_i ——坡度阻力
 F_j ——加速阻力
 F_w ——空气阻力
 F_{xb} ——地面制动力
 F_z ——地面法向反作用力
 F_μ ——制动器制动力
 F_φ ——附着力
 f ——频率、滚动阻力系数
 H ——焓
 h ——比焓
 h_u ——燃料低热值
 I_z ——整车绕过质心铅垂轴的转动惯量
 i ——气缸数
 i_g ——变速器传动比
 i_0 ——主减速器传动比
 i_s ——转向系统传动比
 K ——适应性系数、稳定性因数、液力变矩器变矩比、悬架刚度、功率系数
 k ——侧偏刚度
 k_f ——前轮侧偏刚度
 k_r ——外倾刚度后轮侧偏刚度
 L ——轴距
 L_0 ——理论空气量
 Ma ——马赫数
 m ——质量
 \dot{m} ——质量流量
 M_1 ——新鲜充气量
 M_2 ——燃烧产物量
 M_r ——残余废气量
 M_z ——回正力矩
 m_1 ——非悬架质量
 m_2 ——悬架质量
 n ——发动机转速
 $N_c、N_r$ ——土壤承载力系数
 n_1 ——压缩多变系数
 n_2 ——膨胀多变系数
 n_b ——发动机标定转速
 n_k ——增压器压气机转速
 n_T ——增压器涡轮转速
 p ——压力
 p_a ——进气终了压力
 p_b ——膨胀终了压力
 p_e ——表压力
 p_k ——增压压力
 p_{me} ——平均有效压力
 p_{mi} ——平均指示压力
 p_0 ——环境压力
 p_r ——残余废气压力
 p_T ——涡轮前废气压力
 p_w ——饱和蒸汽压力
 p_z ——最高燃烧压力
 p_v ——真空度
 P_i ——升功率



Q ——热量
 q ——单位质量热量
 q_m ——空气质量流量
 Q_{mix} ——混合气热值
 Q_s ——汽车百公里燃油消耗量
 R ——气体常数、调速器推力盘运动时所受的摩擦力、汽车转向半径
 R_m ——通用气体常数
 r ——车轮半径
 S ——活塞行程、熵
 s ——比熵、滑动率、拉普拉斯微分算子
 T ——热力学温度
 T_a ——进气终了温度
 T_b ——膨胀终了温度
 T_c ——压缩终点温度
 T_k ——增压空气温度
 t_n ——调速器稳定时间
 T_0 ——环境温度
 T_r ——残余废气温度
 T_T ——涡轮前废气温度
 T_1 ——废气涡轮增压器的涡轮转矩
 T_{iq} ——有效转矩
 T_p ——废气涡轮增压器的泵轮转矩
 T_z ——最高燃烧温度
 T_μ ——制动器摩擦力矩
 U ——热力学能
 u ——汽车速度
 u_{ch} ——特征车速
 V ——容积, 体积
 v ——流速、质量体积、质心侧向速度、比体积
 V_c ——压缩容积
 V_s ——气缸工作容积
 V_k ——燃烧室容积

W ——单位质量功

希腊字母

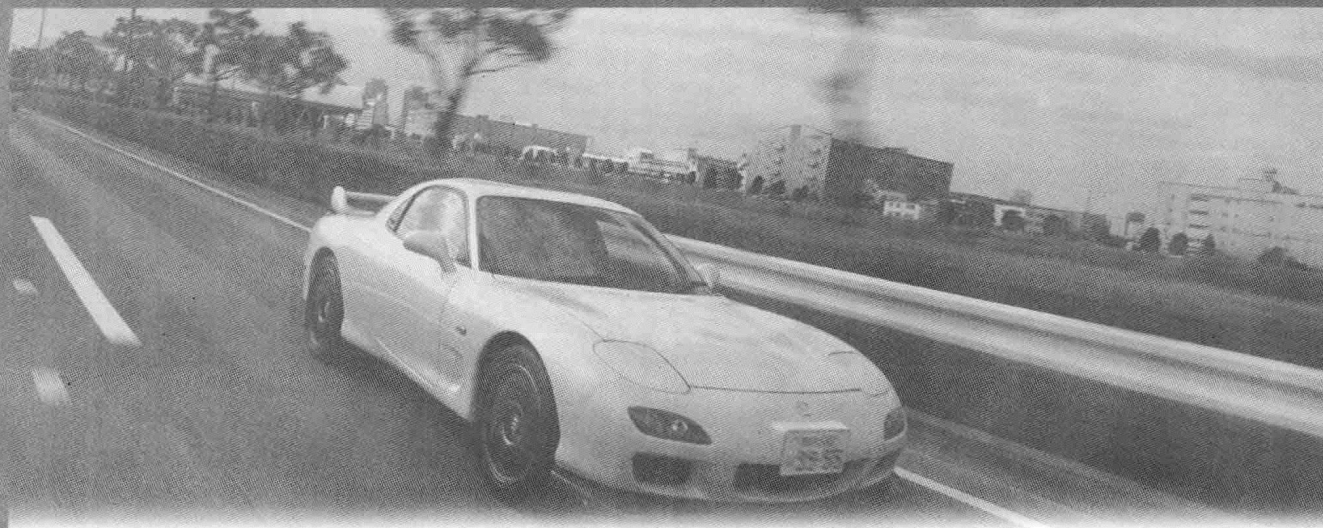
α ——过量空气系数、转角
 γ ——残余废气系数、刚度比
 κ ——等熵指数
 δ ——后期膨胀比、旋转质量换算系数
 δ_2 ——稳定调速率
 ε ——压缩比、调速器灵敏度、悬架质量分配系数
 $\eta_{\text{ad-k}}$ ——压气机绝热效率
 $\eta_{\text{ad-T}}$ ——废气涡轮绝热效率
 η_e ——有效热效率
 η_i ——指示热效率
 η_m ——机械效率
 η_T ——废气涡轮有效效率
 η_{TK} ——增压器效率
 η_v ——充气效率
 θ ——点火或供油提前角
 λ ——压力升高比、频率比
 μ ——转矩储备系数、质量比
 μ_n ——转速储备系数
 μ_0 ——分子变更系数
 ρ ——密度、预膨胀比
 τ ——行程数、土壤切应力
 τ_i ——着火延迟角
 φ ——曲轴转角、附着系数
 φ_b ——制动力系数
 φ_i ——着火延迟角、侧向力系数
 φ_0 ——同步附着系数
 φ_s ——滑动附着系数
 β ——制动器制动力分配系数、汽车质心侧偏角
 ω_0 ——无阻尼圆频率
 ξ ——阻尼比

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
本书常用符号表	
第一篇 汽车发动机原理	
第一章 工程热力学基础	2
第一节 热功转换的基础知识	2
第二节 热力学第一定律	7
第三节 热力过程分析	12
第四节 热力学第二定律	18
思考题	22
第二章 发动机的性能指标	24
第一节 发动机的理论循环	24
第二节 四冲程发动机的实际循环	27
第三节 发动机的指示指标、有效指标和 强化指标	31
第四节 发动机的热平衡	35
第五节 汽车发动机新技术及国内技术 应用现状	36
思考题	39
第三章 发动机的换气过程	40
第一节 四冲程发动机的换气过程	40
第二节 四冲程发动机的充气效率	43
第三节 提高发动机充气效率的措施	46
第四节 可变配气机构与可变进气管	50
第五节 二冲程发动机的换气过程	53
第六节 工程应用实例(文摘)	57
思考题	63
第四章 发动机废气涡轮增压	64
第一节 概述	64
第二节 废气涡轮增压器的基本结构及 原理	66
第三节 废气能量的利用	72
第四节 发动机增压新技术概述	75
第五节 涡轮增压器与柴油机的匹配	75
第六节 工程应用实例(文摘)	81
思考题	90
第五章 燃料与燃烧热化学	91
第一节 发动机的燃料及使用特性	91
第二节 燃烧热化学	98
第三节 燃烧的基础知识	100
思考题	102
第六章 柴油机混合气的形成与 燃烧	104
第一节 燃料喷射与雾化	104
第二节 柴油机的燃烧过程	112
第三节 可燃混合气的形成与燃烧室	114
第四节 影响燃烧过程的运转因素分析	124
第五节 影响燃烧过程的结构因素	125
第六节 柴油机的电子控制	130
第七节 工程应用实例(文摘)	138
思考题	146
第七章 汽油机混合气的形成与燃烧	147
第一节 汽油机混合气的形成	147
第二节 汽油机的燃烧过程	148
第三节 汽油机的燃烧室	154
第四节 汽油机的稀薄燃烧系统	157
第五节 汽油机的电子控制	165
第六节 工程应用实例一(文摘)	172
第七节 工程应用实例二(文摘)	176
思考题	180
第八章 发动机的特性	181
第一节 发动机工况、性能指标与工作过程 参数的关系	181
第二节 发动机的负荷特性	183



第三节	发动机的速度特性	185	第十一节	汽车动力性试验	315
第四节	柴油机的调速特性	191	思考题		319
第五节	发动机的万有特性	194	第十三章	汽车的燃油经济性	320
第六节	发动机有效功率和燃油消耗率 的大气修正	198	第一节	汽车燃油经济性的评价指标	320
第七节	发动机与动力装置的匹配	199	第二节	汽车在各工况下的燃油消耗	321
思考题		202	第三节	影响汽车燃油经济性的因素	325
第九章	发动机的排放与噪声	203	思考题		329
第一节	排放物及危害	203	第十四章	汽车动力装置参数的 确定	330
第二节	排放污染物的机内、机外 净化技术	206	第一节	发动机功率的选择	330
第三节	排放法规及测试方法	219	第二节	传动比的选择	330
第四节	柴油机的噪声	232	第三节	利用燃油经济性—加速时间曲线 确定动力装置参数	333
第五节	工程应用实例(文摘)	238	思考题		335
思考题		243	第十五章	汽车的制动性	336
第十章	汽车发动机新型燃烧方式	244	第一节	制动性的评价指标	336
第一节	均质混合气压缩着火 (HCCI)	244	第二节	制动时车轮的受力分析	337
第二节	汽油机的 HCCI 燃烧	246	第三节	汽车的制动效能及其恒定性	340
第三节	柴油机的 HCCI 燃烧	251	第四节	制动时汽车的方向稳定性	347
第四节	均质混合气引燃	255	第五节	前后制动器制动力的比例关系	350
思考题		258	第六节	自动防抱死系统	357
第十一章	发动机试验	259	第七节	制动能量的回收	358
第一节	发动机试验的种类及有关标准	259	第八节	汽车行驶安全性发展动向	360
第二节	功率与燃油消耗率的测量	260	思考题		361
第三节	发动机其他参数的测量	271	第十六章	汽车的操纵稳定性	363
第四节	发动机台架试验	275	第一节	概述	363
思考题		278	第二节	轮胎侧偏特性	366
			第三节	线性二自由度汽车模型对前轮角 输入的响应特性	370
			第四节	汽车操纵稳定性与悬架、转向系统 的关系	375
			第五节	汽车操纵稳定性的道路试验	379
			第六节	操纵稳定性的主动控制	382
			思考题		385
			第十七章	汽车的平顺性及通过性	386
			第一节	汽车的平顺性	386
			第二节	汽车的通过性	390
			思考题		395
			参考文献		396
第二篇 汽车理论					
第十二章	汽车的动力性	280			
第一节	汽车的动力性指标	280			
第二节	汽车的驱动力	281			
第三节	汽车的行驶阻力	285			
第四节	汽车的动力方程	292			
第五节	汽车行驶的驱动力—附着条件	295			
第六节	汽车的驱动力—行驶阻力平衡图 与动力特性图	300			
第七节	汽车的功率平衡	303			
第八节	装有液力变矩器的动力特性	305			
第九节	影响汽车动力性的主要因素	308			
第十节	汽车的驾驶性能	312			



第一篇

汽车发动机原理

发动机（本书中的发动机均指汽车发动机）是汽车的动力来源，其质量的优劣，直接影响着汽车的性能、可靠程度和寿命。汽油机是汽车发动机的传统机型，由于其工作柔和、噪声低、运转平稳、升功率高、比质量小，所以在轿车和轻型车上占优势。由于新技术的采用，汽油机在燃油经济性方面也有较大的改善。车用柴油机是货车的主要动力，其最大优点是经济性好，它的运行耗油率比汽油机低 30% ~ 40%。

内燃机的循环热效率高。现代高性能车用柴油机的循环热效率高达 40% 以上，车用汽油机的循环热效率也可达到 33% 左右。功率覆盖面大，转速范围宽，应用广泛是车用发动机的主要优点，而发动机排气对大气的污染、能源消耗日趋增高，又是内燃机工作者首先要解决的问题。

20 世纪 80 年代以来，发动机电子控制技术已有很大发展，其目标是使发动机运行参数始终保持最佳值，以求得发动机动力、经济、排放等性能指标的最佳化，并监视运行工况。

为了使汽车发动机最佳化运行，制造厂要设计、制造出高质量的产品，汽车的使用者还必须正确使用、经常维护。因此，从事发动机设计、制造、运用、维护和修理的技术人员要掌握发动机的基本理论，并能创造性地运用它。

汽车发动机原理是以提高发动机性能作为主要研究目标，深入到工作过程的各个阶段，分析影响性能指标的因素，研究提高性能指标的具体措施及努力方向。

汽车发动机原理的主要内容包括发动机的性能指标、特性、工作过程、增压技术、燃料与燃烧、排放、噪声及其防治和发动机电子控制等。

第一章

工程热力学基础

热力学是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是热力学的工程分支，是在阐述热力学普遍原理的基础上，研究这些原理的技术应用的学科，它着重研究的是热能与其他形式能量（主要是机械能）之间的转换规律及其工程应用。工程热力学的研究内容主要包含三部分：

- 介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。
- 介绍常用工质的热力性质。
- 根据热力学基本定律，结合工质的热力性质，分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力工程和热力循环，阐明提高转换效率的正确途径。

本章仅就工程热力学基础知识做一简要阐述，为学习汽车发动机原理提供必要的理论基础和分析计算方法。

第一节 热功转换的基础知识

一、能量与能源

世界由物质构成，一切物质都处于运动状态，能量是物质运动的度量。一切物质都具有能量，如果没有能量，世界就会永远处于静止状态，也就不会有生命。能量也是人类社会进步的动力。人类在日常生活和生产过程中需要各种形式的能量。随着人类社会的发展，人们对能量的认识和利用水平不断提高。到目前为止，人类所认识的能量主要有机械能、热能、电能、化学能、核能和辐射能等形式。能源是指能够直接或间接提供能量的物质资源。地球上存在各种形式的能源，通常人们按照开发的步骤将能源分为：

- 1) 一次能源，即在自然界以自然形态存在可以直接开发利用的能源，如煤、石油、天然气、风能、水能、太阳能、地热能和海洋能等。
- 2) 二次能源，即由一次能源直接或间接转化而来的能源，如电力、煤气、汽油、沼气、氢气、甲醇和酒精等。

热能利用有两种基本方式：一种是热利用，即将热能直接用于加热物体，以满足烧饭、采暖、烘干、熔炼等需要，这种利用方式已有几千年的历史；另一种是动力利用，通常是指通过各种热力发动机（热机）将热能转换成机械能或者再通过发电机转换成电能，为人类的日常生活、工农业生产及交通运输提供动力。自从18世纪中叶发明蒸汽机以来，至今虽然只有200多年的历史，但却开创了热能动力利用的新纪元，使人类社会的生产力和科学技术的发展突飞猛进。然而，热能通过各种热机转换为机械能的有效利用程度



(热效率) 较低, 早期蒸汽机的热效率只有 1% ~ 2%, 现代燃气轮机装置的热效率为 37% ~ 42%, 蒸汽电站的热效率也只有 40% 左右。如何更有效地实现热能和机械能之间的转换, 提高热机的热效率, 是十分重要的课题。

二、工质的热力状态及其基本状态参数

工程热力学中, 把实现热能与机械能相互转换的工作物质称为“工质”。热机的运转是依靠气态工质在特定的条件下不断地改变它的热力状态 (简称状态), 执行某一具体的热工转换过程来实现的。汽车发动机的工质是气体 (包括空气、燃气和烟气)。因为气体具有最好的流动性和膨胀性, 便于快速引进热机, 做功后又能迅速排出热机, 在相同压差或温差下, 其膨胀比最大, 因而能够更有效地做功。同时, 由于气体的热力性质最简单, 可以简化为理想气体, 所以我们仅讨论气体的性质。

1. 热力系统

在热力学中, 把某一宏观尺寸范围内的工质作为研究的具体对象, 称为热力系统, 简称系统。与该系统有相互作用的其他系统称为外界。包围系统的封闭表面就是系统与外界的分界面, 称为边界 (或界面)。边界可以是真实的, 也可以是假想的。根据边界上物质和能量的交换情况, 热力系统分为以下几类: ①开口系统, 指与外界有物质交换的系统; ②封闭系统, 指与外界无物质交换的系统; ③绝热系统, 指与外界无热交换的系统; ④孤立系统, 指与外界既无物质交换, 也无能量交换的系统。

2. 基本状态参数

标志气体热力状态的各个物理量称为气体的状态参数。常用的状态参数主要有六个, 即压力 p 、温度 T 、比体积 v 、热力学能 U 、焓 H 、熵 S 。其中 p 、 T 、 v 可以直接用仪表测量, 且其物理意义易被理解, 所以成为描述工质状态最常用的基本状态参数。

3. 压力 p

气体对单位面积容器壁所施加的垂直作用力称为压力 p 。按分子运动论, 气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的统计量。压力单位为 Pa (N/m^2), 工程上也常用 kPa 和 MPa。容器内压力的大小有两种不同的表示方法。一种是指明气体施于器壁上压力的实际数值, 称为绝对压力, 记作 p ; 另一种是测量时压力计的读数压力, 称为表压力, 记作 p_e 。表压力是绝对压力高出当时当地的大气压力 p_0 的数值, 其关系式为

$$p = p_0 + p_e \quad (1-1)$$

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, 记作 p_v , 即

$$p = p_0 - p_v \quad (1-2)$$

真空度的数值越大, 说明越接近绝对真空。

表压力、真空度都只是相对于当时当地的大气压力而言的。显然, 只有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。

4. 温度 T

温度表示气体的冷热程度。按照分子运动论, 气体的温度是气体内部分子不规则运动激烈程度的量度, 是与气体分子平均速度有关的一个统计量。气体的温度越高, 表明气体分子的平均动能越大。



热力学温度 T 是国际单位制 SI 制中的基本温度, 单位为 K。选取水的三相点温度为基本定点温度, 规定其温度为 273.16K。1K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。SI 允许使用摄氏温度 t , 并定义

$$t = T - T_0 \quad (1-3)$$

式中, $T_0 = 273.15\text{K}$, 在一般工程计算中, T_0 取 273K 即足够精确。摄氏温度每一度间隔与热力学温度每一度间隔相等, 但摄氏温度的零点比热力学温度的零点高 273.15K。热力学温度不可能有负值。

必须指出, 只有热力学温度才是状态参数。

5. 比体积 v

比体积是单位质量的物质所占的体积, 单位为 m^3/kg , 即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

式中, v 为比体积; V 为体积; m 为质量。

比体积的倒数为密度 ρ , 密度是指单位体积的物质具有的质量, 单位为 kg/m^3 , 即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-5)$$

6. 工质的平衡态

为了对系统中能量转换情况进行分析计算, 系统中气体各部分的温度和压力必须均匀一致 (即处于热平衡和机械平衡), 且不随时间而变化, 这样的状态称为热力学平衡状态 (简称平衡态)。处于平衡态时, 气体的所有状态参数都有确定的数值。只要知道两个独立的状态参数 (如压力 p 和温度 T), 就可以确定气体所处的状态及参数。

三、理想气体状态方程式

所谓理想气体就是假设的气体内部分子不占有体积, 分子间没有吸引力的气体。在热力计算和分析中, 常常把空气、燃气、烟气等气体近似地看作理想气体, 因为气体分子间的平均距离要比固体和液体大得多, 所以, 气体分子本身的体积比气体所占的容积小得多, 气体分子间的相互吸引力也很小。通常把实际气体近似地看作理想气体来进行各种热力计算, 其结果极其相似。所以, 对理想气体性质的研究在理论上和实际应用中都很重要。

根据分子运动论和理想气体的假定, 结合试验所得的一些气体定律, 并综合表示成理想气体状态方程式 (或称为克拉贝隆方程式)。对于 1kg 理想气体, 其状态方程为

$$p v = RT \quad (1-6)$$

对于 $m\text{kg}$ 理想气体, 其体积 $V = mv$, 其状态方程为

$$pV = mRT \quad (1-7)$$

式中, R 为气体常数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$], 它的数值决定于气体的种类。

对于 1 千摩尔 (kmol) 理想气体, 其质量为 μkg (μ 为其相对分子质量), 其体积为 $\mu v = V_m$ (m^3/kmol), 按式 (1-7) 可以得出 1kmol 理想气体的状态方程为

$$p\mu v = \mu RT \quad (1-8)$$

设 $\mu R = R_m$, 即



$$pV_m = R_m T \quad (1-9)$$

根据上式可得

$$R_m = \mu R = \frac{pV_m}{T} \quad (1-10)$$

根据阿伏伽德罗定律可得同温同压下, 相同体积的任何气体都具有相同数目的分子。因此, 在同温同压下任何气体的千摩尔体积相等。在物理标准状况($p_0 = 101325\text{Pa}$, $T_0 = 273.15\text{K}$)条件下, 千摩尔体积气体的 V_m 的数值等于 $22.4\text{m}^3/\text{kmol}$, 故对于任何理想气体 R_m 的数值都相同, 因此将 R_m 称为通用气体常数, 将 p_0 、 T_0 及 V_m 值代入式(1-9)可得 $R_m = 8314.3\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$

或
$$R = \frac{8314.3}{\mu} \quad (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})) \quad (1-11)$$

理想气体状态方程式反映了理想气体三个基本状态参数间的内在联系: $f(p, v, T) = 0$, 只有知道其中两个参数就可以通过该方程求出第三个参数。

四、工质的比热容

在热力工程中, 热量计算常用到比热容。工质的比热容就是单位量的物质当单位温度变化时所吸收或放出的热量。用符号 c 表示比热容, 根据定义有

$$c = \frac{\delta q}{dT} \quad (1-12)$$

式中 δq ——某工质在某一状态下温度变化 dT 所吸收或放出的热量, 单位为 kJ 或 J 。

1. 比热容与物质单位的关系

因为工质的计量单位可以是 kg 、 kmol 、 m^3 , 所以工质的比热容有以下三种:

比质量热容: c $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

比摩尔热容: c_m $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$

比容积热容: c' $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

2. 比定压热容和比定容热容

气体在压力不变或体积不变的情况下被加热时的比热容, 分别称为比定压热容和比定容热容, 通常用脚标 p 和 V 来标注。如比定压热容记作 c_p ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), 比定容热容为 c_V ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), 而比定压千摩尔热容记作 $c_{p,m}$ ($\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$), 比定容千摩尔热容为 $c_{V,m}$ ($\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$) 等。可以定义比热容比如下

$$\kappa = \frac{c_{p,m}}{c_{V,m}} = \frac{\mu c_p}{\mu c_V} \quad (1-13)$$

比热容比 κ 又称等熵指数, 它在工程热力学中有很重要的应用, 将在以后经常用到。

气体在定压下受热时, 由于在温度升高的同时, 还要克服外界抵抗力而膨胀做功, 所以同样升高 1°C , 比在定容下受热时需要更多的热量。试验表明, 理想气体的比定压热容值和比定容热容值的差是一个常数, 即梅耶公式

$$c_{p,m} - c_{V,m} = R_m \quad (1-14)$$

$$R_m = 8.3143\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \quad (1-15)$$

如果用 κ 和 R_m 来表示 $c_{p,m}$ 、 $c_{V,m}$, 由梅耶公式可得



$$c_{v,m} = \frac{1}{\kappa - 1} R_m \quad (1-16)$$

$$c_{p,m} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_m \quad (1-17)$$

3. 真实比热容和平均比热容

根据大量精确的试验数据和量子力学理论, 理想气体的比热容与压力无关, 而应是温度的函数, 可以表示成下式

$$c = a + bt + ct^2 + \dots \quad (\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})) \quad (1-18)$$

式中, a, b, c 是常数, 它们的数值随气体的种类及加热过程的不同而异。

这种相应于某一温度下的气体比热容称为真实比热容。

已知气体的真实比热容随温度变化的关系是 $c = f(t)$ 时, 气体由 t_1 升到 t_2 所需的热量可按下式计算

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt = \int_{t_1}^{t_2} (a + bt + ct^2 + \dots) dt \quad (1-19)$$

而

$$c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1} \quad (1-20)$$

$c_m \Big|_{t_1}^{t_2}$ 称为该气体在 t_1 到 t_2 温度范围内的“平均比热容”。根据真实比热容编制由 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 的平均比热容 $c_m \Big|_{t_1}^{t_2}$ 的数据表, 将给比热容变化 (因温度改变所引起) 所导致的热量变化的计算带来方便。

4. 定比热容

在实际应用中, 当温度变化不大或不要求很精确的计算时, 常忽略温度的影响而把理想气体的比热容当成常量, 只按理想气体的原子数确定比热容, 称为定比热容, 见表 1-1。

表 1-1 理想气体的定值比摩尔热容和比热容比

	单原子气体	双原子气体	多原子气体
$c_{v,m}$	$3/2R_m$	$5/2R_m$	$7/2R_m$
$c_{p,m}$	$5/2R_m$	$7/2R_m$	$9/2R_m$
κ	1.66	1.40	1.29

五、热力过程

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总和。

热力系统从一个平衡 (均匀) 状态连续经历一系列 (无数个) 平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态, 这样的过程称为内平衡过程; 否则便是内不平衡过程。

在热力学中, 常用两个彼此独立的状态参数构成坐标图来进行热力学分析。例如, 以 p 为纵坐标, V 为横坐标组成的坐标图, 即为压容图, 如图 1-1 所示。图中点 1、点 2 分别代表 p 和 V 两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态, 曲线代表一个内平衡过程; 如果