面向21世纪
普通高等教育规划教材

汽车发动机原理与汽车理论

第 2 版

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

机械工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

摇摇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、汽车的动力性与燃油经济性、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、汽车的平顺性和通过性等。
摇摇本书为汽车、内燃机制造与维修专业高等教育教材，也可供从事汽车、发动机的设计、制造和运用的工程技术人员、技术工人参考。

摇图书在版编目（悄摇罗 数据

摇汽车发动机原理与汽车理论 辖马健璋主编援—圆版援
—北京：机械工业出版社，圆罐罐员
摇面向 圆员世纪普通高等教育规划教材
摇陨泽晕苑酝则责贼藻贼贼藻则贼

摇Ⅰ郧汽 圆罐罐摇Ⅱ郧马 圆罐罐摇Ⅲ郧①汽车 原发动机 原理论 原高等学校 原教材②汽车 原理论 原高等学校 原教材摇Ⅳ圆苑源援

摇中国版本图书馆 悄摇罗数据核字（圆罐罐源 第 员缘缘苑员号

摇机械工业出版社（北京市百万庄大街 圆圆号摇邮政编码 员罐罐缘远）

策划编辑：邓海平
责任编辑：冷摇彬摇版式设计：霍永明摇责任校对：陈延翔
封面设计：王伟光摇责任印制：施摇红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

圆罐罐缘年 圆月第 圆版第 员次印刷
苑愿员辕员远 伊员源圆缘员员辕员远 员辕缘·圆罐罐缘印张·员源缘千字
定价：猿罐援缘元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（圆员园 员源愿愿缘愿员员，愿缘愿苑源员员
员源愿圆园源 员源愿缘愿员员）
封面无防伪标均为盗版

前摇摇言

摇摇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，员怨怨苑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》(第员版)这本教材。

摇摇教材内容本着必需、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。为培养利用发动机的基本原理解决工程实际问题的能力，教材中安排了多篇文摘供读者借鉴。

摇摇在广大读者的支持下，本书第员版缘年来连续印刷苑次。

摇摇由于汽车工业日新月异的发展和教育事业的需要，我们在保持第员版的“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，在第圆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、先进安全汽车、操纵稳定性的主动控制等内容，并对第员版中的错误加以修正。

摇摇第圆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。

摇摇第圆版按授课时数约愿园学时编写，其中发动机原理部分源缘学时，汽车理论部分猿缘学时。教学时可根据专业的需要适当增、减学时。

摇摇本教材由承德石油高等专科学校的马健璋主编，并编写第猿源愿章，哈尔滨工业大学汽车学院的盖玉先编写第员缘员远员苑章，承德石油高等专科学校的李才编写第员章，承德石油高等专科学校的侯树梅编写第缘苑员园员章，沈阳大学的凌永成编写第圆远怨章，南京工程学院的杨雪梅编写第员圆员猿员源章。本教材由山西省机械厅的教授级高级工程师房绍平担任主审。

摇摇第圆版在修订过程中还得到了上海铁道大学兼职教授、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的刊物中的一些论文，在此也向论文作者一并表示感谢。

摇摇由于编者水平所限，疏漏、错误之处在所难免，敬请读者和专家批评指正。

编摇者

目摇摇录

前言

本书常用符号表

第一篇摇汽车发动机原理

第一章摇工程热力学基础…… 圆

摇第一节摇热功转换的基础知识 …… 圆

摇第二节摇热力学第一定律 …… 苑

摇第三节摇热力过程分析 …… 员圆

摇第四节摇热力学第二定律…… 员愿

摇思考题 …… 圆圆

第二章摇发动机的性能指标 …… 圆源

摇第一节摇发动机的理论循环 …… 圆源

摇第二节摇四冲程发动机的实际循环 …… 圆愿

摇第三节摇发动机的指示指标、有效指标和强化指标 …… 猿员

摇第四节摇发动机的热平衡…… 猿源

摇第五节摇发动机技术的现状与发展 …… 猿缘

摇思考题 …… 猿苑

第三章摇发动机的换气过程 …… 猿愿

摇第一节摇四冲程发动机的换气过程 …… 猿愿

摇第二节摇四冲程发动机的充气效率 …… 源圆

摇第三节摇提高发动机充气效率的措施 …… 源源

摇第四节摇二冲程发动机的换气过程 …… 源怨

摇第五节摇工程应用实例（文摘）…… 缘猿

摇思考题 …… 缘愿

第四章摇发动机废气涡轮增压 …… 缘怨

摇第一节摇概述 …… 缘怨

摇第二节摇废气涡轮增压器的基本结构及原理 …… 远员

摇第三节摇废气能量的利用…… 远远

摇第四节摇涡轮增压器与柴油机的匹配 …… 远怨

摇第五节摇工程应用实例（文摘）…… 苑源

摇思考题 …… 苑远

第五章摇燃料与燃烧热化学 …… 苑苑

摇第一节摇发动机的燃料及使用特性 …… 苑苑

摇第二节摇燃烧热化学 …… 愿员

摇第三节摇燃烧的基础知识…… 愿源

摇思考题 …… 愿远

第六章摇柴油机混合气的形成与燃烧 … 愿苑

摇第一节摇燃料喷射与雾化…… 愿苑

摇第二节摇柴油机的燃烧过程 …… 怨缘

摇第三节摇可燃混合气的形成与燃烧室 …… 怨愿

摇第四节摇影响燃烧过程的运转因素分析…… 员员远

摇第五节摇影响燃烧过程的结构因素…… 员员苑

摇第六节摇工程应用实例（文摘） …… 员圆园

摇思考题 …… 员圆缘

第七章摇汽油机混合气的形成与燃烧 … 员圆远

摇第一节摇化油器的工作原理 …… 员圆远

摇第二节摇汽油机的燃烧过程 …… 员员园

摇第三节摇汽油机的燃烧室 …… 员员愿

摇第四节摇工程应用实例（文摘） …… 员猿员

摇思考题 …… 员猿缘

第八章摇发动机的特性…… 员猿远

摇第一节摇发动机工况、性能指标与工作过程参数的关系 …… 员猿远

摇第二节摇发动机的负荷特性 …… 员源愿

摇第三节摇发动机的速度特性 …… 员缘园

摇第四节摇柴油机的调速特性 …… 员缘缘

摇第五节摇发动机的万有特性 …… 员缘愿

摇第六节摇发动机有效功率和燃油消耗率的大气修正 …… 员远园

摇第七节摇发动机与动力装置的匹配…… 员苑缘

摇思考题 …… 员苑缘

第九章摇发动机的排放与噪声…… 员苑远

摇第一节摇排放物及危害 …… 员苑远

摇第二节摇排放污染物的机内、机外净化技术 …… 员愿园

摇第三节摇排放法规及测试方法 …… 员怨员

第四节 柴油机的噪声 …… 253
第五节 工程应用实例(文摘) …… 256
思考题 …… 258
第十章 汽车发动机新技术 …… 258
第一节 汽油机的新型燃烧室 …… 258
第二节 电控汽油喷射系统 …… 260
第三节 电控电子点火系统 …… 263
第四节 柴油机的电子控制 …… 265
第五节 可变配气机构与可变进气管 …… 268
第六节 工程应用实例一(文摘) …… 270
第七节 电控气体燃料喷射系统 …… 271
第八节 工程应用实例二(文摘) …… 273
思考题 …… 276
第十一章 发动机试验 …… 276
第一节 发动机试验的种类及有关标准 …… 276
第二节 功率与燃油消耗率的测量 …… 277
第三节 发动机其他参数的测量 …… 279
第四节 发动机台架试验 …… 280
思考题 …… 282

第二篇 汽车理论

第十二章 汽车的动力性 …… 283
第一节 汽车的动力性指标 …… 283
第二节 汽车的驱动力 …… 284
第三节 汽车的行驶阻力 …… 286
第四节 汽车的动力方程 …… 288
第五节 汽车行驶的驱动——附着条件 …… 289
第六节 汽车的驱动力——行驶阻力平衡图与动力特性图 …… 291
第七节 汽车的功率平衡 …… 294
第八节 装有液力变矩器的动力特性 …… 296
第九节 影响汽车动力性的主要因素 …… 298
第十节 汽车的驾驶性能 …… 299
第十一节 汽车动力性试验 …… 301
思考题 …… 303
第十三章 汽车的燃油经济性 …… 303
第一节 汽车燃油经济性的评价指标 …… 303
第二节 汽车在各工况下的燃油消耗 …… 304
第三节 影响汽车燃油经济性的因素 …… 305
思考题 …… 308
第十四章 汽车动力装置参数的确定 …… 308
第一节 发动机功率的选择 …… 308
第二节 传动比的选择 …… 309
第三节 利用燃油经济性——加速时间曲线确定动力装置参数 …… 311
思考题 …… 313
第十五章 汽车的制动性 …… 313
第一节 制动性的评价指标 …… 313
第二节 制动时车轮的受力分析 …… 314
第三节 汽车的制动效能及其恒定性 …… 316
第四节 制动时汽车的方向稳定性 …… 317
第五节 前后制动器制动力的比例关系 …… 319
第六节 自动防抱死系统 …… 321
第七节 制动能量的回收 …… 322
第八节 汽车行驶安全性发展动向 …… 323
思考题 …… 324
第十六章 汽车的操纵稳定性 …… 324
第一节 概述 …… 324
第二节 轮胎侧偏特性 …… 325
第三节 线性二自由度汽车模型对前轮角输入的响应特性 …… 327
第四节 汽车操纵稳定性与悬架、转向系的关系 …… 329
第五节 汽车操纵稳定性的道路试验 …… 330
第六节 操纵稳定性的主动控制 …… 331
思考题 …… 332
第十七章 汽车的平顺性及通过性 …… 332
第一节 汽车的平顺性 …… 332
第二节 汽车的通过性 …… 334
思考题 …… 336
参考文献 …… 336

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本书常用符号表

拉丁字母

粤——空燃比

葬——加速度

月——小时耗油量

遭——有效燃油消耗率

遭——指示燃油消耗率

Δ遭——喷油泵循环供油量

糟——声速、比热容、土壤黏度系数、阻力系数

悦——空气阻力系数

悦——活塞平均速度

糟——比定压热容

糟——比定容热容

忱——曲轴转角

阅——气缸直径、动力因数

耘——调速器起作用时作用在推力盘上的推力

粤——活塞面积

云——汽车驱动力

云——坡度阻力

云——加速阻力

云——空气阻力

云——地面制动力

云——地面法向反作用力

云——制动器制动力

云——附着力

枣——频率、滚动阻力系数

匀——焓

澡——比焓

澡——燃料低热值

隔——整车绕过质心铅垂轴的转动惯量

蚤——气缸数

蚤——变速箱传动比

蚤——主减速器传动比

蚤——转向系统传动比

运——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

噪——侧偏刚度

噪——前轮侧偏刚度

噪——外倾刚度后轮侧偏刚度

蕴——轴距

蕴——理论空气量

酝葬——马赫数

皂——质量

皂——质量流量

酝——新鲜充气量

酝——燃烧产物量

酝——残余废气量

酝——回正力矩

皂——非悬架质量

皂——悬架质量

灶——发动机转速

晕 晕——土壤承载能力系数

灶——压缩多变系数

灶——膨胀多变系数

灶——发动机标定转速

灶——增压器压气机转速

灶——增压器涡轮转速

责——压力

责——进气终了压力

责——膨胀终了压力

责——表压力

责——增压压力

责——平均有效压力

责——平均指示压力

责——环境压力

责——残余废气压力

责——涡轮前废气压力

责——饱和蒸汽压力

责——最高燃烧压力

责——真空度

孕——升功率

匝——热量

择——单位质量热量

择——空气质量流量

匝——混合气热值

匝——汽车百公里油耗

砸——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

砸$_{皂}$——通用气体常数

则——车轮半径

杂——活塞行程、熵

泽——比熵、滑动率、拉普拉斯微分算子

栽——热力学温度

栽$_{奔}$——进气终了温度

栽$_{遭}$——膨胀终了温度

栽$_{缩}$——压缩终点温度

栽$_{增}$——增压空气温度

贼$_{灶}$——调速器稳定时间

栽$_{园}$——环境温度

栽$_{则}$——残余废气温度

栽$_{砸}$——涡轮前废气温度

栽$_{砸}$——废气涡轮增压器的涡轮转矩

栽$_{糟}$——有效转矩

栽$_{责}$——废气涡轮增压器的泵轮转矩

栽$_{扎}$——最高燃烧温度

栽$_{p}$——制动器摩擦力矩

哉——内能

怎——汽车速度

怎$_{标}$——特征车速

灾——容积，体积

增——流速、质量体积、质心侧向速度、比体积

灾$_{缩}$——压缩容积

灾$_{行}$——气缸工作容积

灾$_{燃}$——燃烧室容积

宰——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

$\delta_{圆}$——稳定调速率

ε——压缩比、调速器灵敏度、悬架质量分配系数

$\eta_{压缩绝热}$——压缩机绝热效率

$\eta_{废气绝热}$——废气涡轮绝热效率

$\eta_{藻}$——有效热效率

$\eta_{蚕}$——指示热效率

$\eta_{皂}$——机械效率

$\eta_{栽}$——废气涡轮有效效率

$\eta_{栽运}$——增压器效率

$\eta_{增}$——充气效率

θ——点火或供油提前角

λ——压升比、频率比

μ——转矩储备系数、质量比

$\mu_{灶}$——转速储备系数

$\mu_{园}$——分子变更系数

ρ——密度、预膨胀比

τ——行程数、土壤切应力

$\tau_{蚤}$——着火延迟角

φ——曲轴转角、附着系数

$\varphi_{遭}$——制动力系数

$\varphi_{蚤}$——着火延迟角、侧向力系数

$\varphi_{园}$——同步附着系数

$\varphi_{泽}$——滑动附着系数

β——制动器制动力分配系数、汽车质心侧偏角

$\omega_{园}$——无阻尼圆频率

ξ——阻尼比

第一篇

汽车发动机原理

摇摇发动机（本书中的发动机都是指汽车发动机）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、比质量轻，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亦有较大的改善。车用柴油机是载货车的主要动力，其最大优点是经济性好，它的运行耗油率比汽油机低 豫园豫 ~ 源园豫。所以，近年来的趋势是发展柴油汽车，甚至在轿车领域柴油机的渗透量也在逐年增加。

摇摇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 源园豫以上，车用汽油机的循环热效率也可达到 猿缘豫左右。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。

摇摇圆园世纪 愿园年代以来，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。

摇摇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、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。

摇摇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。

摇摇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、发动机电子控制等。

第一章

工程热力学基础

摇摇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：

摇摇• 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；

摇摇• 介绍常用工质的热力性质；

摇摇• 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。

摇摇本章仅就工程热力学基础知识作一简要阐述，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。

第一节摇热功转换的基础知识

摇摇一、能量与能源

摇摇世界由物质构成。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、辐射能等几种形式。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：

摇摇一次能源，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、海洋能等。

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、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，这种利用方式已具有几千年的历史；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 世纪中叶发明蒸汽机以来，至今虽然只有 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 ～，现代燃气轮机装置的热效率约为 ～，蒸汽电站的热效率也只有 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”。热机的运转依靠气态工质在特定的条件下不断的改变它的热力状态（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，作功以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交换情况，热力系统分为下述几类：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叫做气体的状态参数。常用的状态参数主要有六个，即压力 、温度 、比体积 、内能 、焓 、熵 ，其中 、 、 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

气体对单位面积容器壁所施加的垂直作用力称为压力 。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 ，被记做 ，工程上亦常用 和 。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，叫绝对压力，记做 ；另一种是测量时压力计的读数压力，叫表压力，记做 。表压力是绝对压力高出于当时当地的大气压力 的数值，其关系式为

（ ）

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 。即

（ ）

摇摇真空度的数值越大，说明越接近绝对真空。

摇摇表压力、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。

摇摇源阅温度 栽

摇摇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。

摇摇热力学温度(旧称绝对温度)栽是国际单位制 杂贼制中的基本温度，单位为 运。选取水的三相点温度为基本定点温度，规定其温度为 圆园园援园员运，员运等于水的三相点热力学温度的 员辕圆园园援园员。杂贼允许使用摄氏温度 贼，并定义

$$贼=栽-栽_{园} \tag{员援猿}$$

式中，$栽_{园}=圆园园援园员运$。在一般工程计算中，把 $栽_{园}$ 取做 圆园园运已足够精确。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 圆园园援园员运，热力学温度不可能有负值。

摇摇必须指出，只有热力学温度才是状态参数。

摇摇源阅比体积 增

摇摇比体积是单位质量的物质所占的体积，单位为 皂糟皂辕噪糟，即

$$增=\frac{灾}{皂}\quad 摇摇灾越皂时增越大 \tag{员援源}$$

式中摇增——比体积；

灾——体积；

皂——质量。

摇摇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 噪糟辕皂糟，即

$$\rho=\frac{皂}{灾}\quad 越大\frac{员}{增}越大 \tag{员援缘}$$

摇摇遇阅工质的平衡态

摇摇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 责和温度 栽，就可以确定气体所处的状态及参数。

摇摇三、理想气体状态方程式

摇摇所谓理想气体就是假设气体内部分子不占有体积，分子间没有吸引力，这样的气体称为理想气体，在热力计算和分析中，常常把空气、燃气、烟气等气体近似的看作理想气体，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。

摇摇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(或称克拉贝隆方程式)。对于 员噪辕皂糟理想气体，其状态方程为

需要全本请访问 www.ertongbook.com

$$pv=RT \tag{1-8}$$

对于 1 kg 理想气体，其体积 v 随温度增加而增大。

其状态方程为

$$pV=mRT \tag{1-9}$$

式中，R——气体常数 [J/(kg·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 μ (kg)，μ 为其相对分子质量)，其体积为 μv (m³)。

(标准状态下，按式 (1-8) 可以得出 1 kmol 理想气体的状态方程为

$$pv=\mu RT \tag{1-10}$$

设 $\mu R=R_0$，

即

$$pv=R_0T \tag{1-11}$$

根据上式可得

$$R_0=\mu R=\mu\frac{pv}{T} \tag{1-12}$$

根据阿佛加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 ($p_0=101\,325$ Pa，$T_0=273.15$ K) 条件下，千摩尔体积气体的 v_0 的数值等于 22.4 m³/kmol。故对于任何理想气体 R_0 的数值都相同，因此将 R_0 称为通用气体常数，将 p_0、T_0 及 v_0 值代入式 (1-12) 可得 R_0 为

$$R_0=\frac{101\,325\times 22.4}{273.15}=8\,314\ \text{J/(kmol·K)}$$

或

$$R=\frac{R_0}{\mu}\quad\text{(J/(kg·K))} \tag{1-13}$$

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：p、v、T 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

$$c=\frac{\delta q}{\mathrm{d}T} \tag{1-14}$$

式中 δq——某工质在某一状态下温度变化 $\mathrm{d}T$ 时所吸收或放出的热量，J 或 kJ。

(一) 比热容与物质单位的关系

因为工质的计量单位可用 kg、kmol、m³，所以工质的比热容有如下三种：

比质量热容：c，J/(kg·K)；

比摩尔热容：c_m，J/(kmol·K)；

比容积热容：c'，J/(m³·K)。

(二) 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，分别叫比定压热容和比定容热容，通常用脚标 p 和 v 来标注。如比定压热容记做 c_p [J/(kg·K)]，比定容热容为 c_v [J/(kg·K)]，而比定压千摩尔热容记做 c_{mp} [J/(kmol·K)]，比定容千摩尔热容为 c_{mv} [J/(kmol·K)] 等等。可以定义比热容比如下

$$\kappa = \frac{c_{p}}{c_{V}} = \frac{\mu c_{p}}{\mu c_{V}} \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

摇摇比热容比 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。

摇摇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 员益，比在定容下受热时需要更多的热量。实验表明，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

$$c_{p} - c_{V} = R \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

$$R = 8.314\ \mathrm{J/(mol \cdot K)} \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

摇摇如果用 κ 和 R 来表示 c_{p}、c_{V}，由梅耶公式可得

$$c_{V} = \frac{1}{\kappa - 1} R \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

$$c_{p} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

摇摇（三） 真实比热容和平均比热容

摇摇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

$$c_{p} = a + bT + dT^{2} + \cdots \quad （或\ c_{V} = a + bT + dT^{2} + \cdots）\qquad (式\ 摇\ 摇)$$

式中，葬、遭、糟是常数，它们的数值随气体的种类及加热过程的不同而异。

摇摇这种相应于某一温度下的气体比热容叫做真实比热容。

摇摇已知气体的真实比热容随温度变化的关系是 糟 越 择（葬 垣 遭 贼 垣 凿 贼^{2} 垣 ……），当气体由 贼$_{1}$ 升到 贼$_{2}$ 所需的热量可按下式计算

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_{p}\,\mathrm{d}T = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + dT^{2} + \cdots)\,\mathrm{d}T \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

而

$$c_{p}\Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_{p}\,\mathrm{d}T}{T_2 - T_1} \qquad (式\ 摇\ 摇)$$

摇摇$c_{p}\Big|_{T_1}^{T_2}$ 称为该气体在 贼$_{1}$ 到 贼$_{2}$ 温度范围内的“平均比热容”。根据真实比热容编制由园~ 贼$_{2}$ 的平均比热容 $c_{p}\Big|_{0}^{T_2}$ 的数据表，将给比热容变化（因温度改变所引起）而导致的热量变化的计算带来方便。

摇摇（四） 定比热容

摇摇在实际应用中，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做常量，只按理想气体的原子数确定比热容，称为定比热容，如表 员摇员所示。

表 员摇员 摇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_{p}	猿员	缘员	苑员
c_{V}	缘员	苑员	怨员
κ	员援远	员援源	员援猿

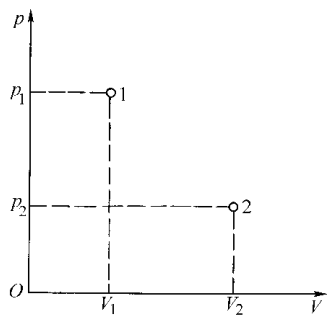
摇摇五、热力过程

摇摇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合。

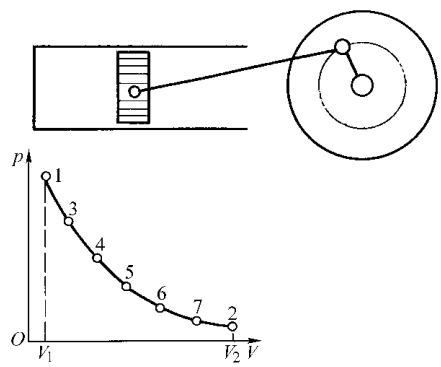
摇摇热力系统从一个平衡(均匀)状态连续经历一系列(无数个)平衡的中间状态过度到另一个平衡状态，这样的过程称为内平衡过程；否则便是内不平衡过程。

摇摇在热力学中，常用两个彼此独立的状态参数构成坐标图。例如，以 责为纵座标，灾为横座标组成的坐标图(简称压容图)来进行热力学分析，如图 员猿摇所示。图中 员点，圆点分别代表 责和 灾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。如果工质由状态 员变化到状态 圆所经历的不是一个内平衡过程，则该过程无法在 责-灾图上表示，仅可标出 员、圆两个平衡态，其过程用虚线表示。

摇摇可逆过程：假设系统经历平衡过程 员-圆 由状态 员变化到状态 圆 并对外做膨胀功 宰，如图 员猿摇所示。如果外界给以同样大小的压缩功 宰使系统从状态 圆返回，循着原来的过程曲线经历完全相同的中间状态恢复到原来状态 员 而且外界也恢复到原来的状态，既没有得到功，也没有消耗功，这样的平衡过程称为可逆过程。



图摇员猿摇摇



图摇员猿摇摇

摇摇只有无摩擦、无温差传热的平衡过程才有可逆性，即可逆过程就是无摩擦、无温差的内平衡过程。

摇摇可逆过程是没有任何损失的理想过程，实际的热力过程既不可能是绝对的平衡过程，又不可避免的会有摩擦。因此，可逆过程是实际过程的理想极限。后面章节讨论的主要是针对可逆过程的。

第二节摇热力学第一定律

摇摇热力学第一定律的实质就是热力过程中的能量守恒和转换定律，它建立了热力过程中的能量平衡关系，是热力学宏观分析方法的主要依据之一。热力学第一定律可表述为：在热能与其他形式能的互相转换过程中，能的总量始终不变。

摇摇根据热力学第一定律，要想得到机械能就必须花费热能或其他能量，那种不花费任何能量就可以产生动力的机器只能是一种幻想而已。因此，热力学第一定律也可以表述为：不花费任何能量就可以产生功的第一类永动机是不可能被成功制造的。

摇摇热力学第一定律适用于一切热力系统和热力过程，不论是开口系统还是闭口系统，热力

学第一定律均可表达为

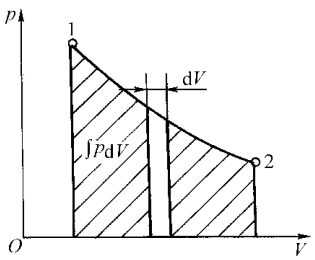
摇摇进入系统的能量 原离开系统的能量 越系统储存能量的变化

摇摇一、功、热量和内能

摇摇员、工质的膨胀功 宰

摇摇功是与系统的状态变化过程相联系的物理量。在力学中，功（或功量）定义为力和沿力作用方向的位移的乘积。例如，物体在力 云的作用下沿力 云的方向 曾产生了微小的位移 凿曾则该力所做的功为 δ宰越云凿曾

摇摇下面讨论工质在可逆过程中所做的功。图 员噪表示质量为 皂的气态工质封闭在气缸内，进行一个可逆膨胀过程做功的情况。设活塞截面积为 粤 工质作用在活塞上的力为 责粤 活塞被推进一微小距离 凿曾 在这期间，工质的膨胀极小，工质的压力几乎不变，因而工质对活塞做的功为



δ宰越责粤凿曾越责凿宗 （员噪噪）

对可逆过程 员–圆 工质由状态 员膨胀到状态 圆的膨胀功为

$$宰 越 \int_{员}^{圆} 责 凿 宗 \tag{员噪圆}$$

摇摇如果已知工质的初、终态参数，以及过程 员–圆的函数关系，则可求得工质的膨胀功 宰，其数值等于 责–宗图上过程曲线 责越责（宗）下面所包围的面积，因此压容图也叫示功图。由图可见，膨胀功不仅同状态的改变有关，而且与状态变化所经历的过程有关。若气缸中的工质为 员噪宰，其体积为 宗，则膨胀功憎为

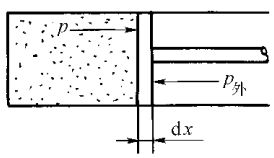


图 员噪噪摇可逆过程的体积变化功

δ憎越责凿宗 （员噪源）

$$憎 越 \int_{员}^{圆} 责 凿 宗 \tag{员噪原}$$

摇摇当工质受到外界压缩时，则是外界对工质做功。这时 凿宗为负值，由式（员噪原）算出的功也是负值，负的膨胀功实际上表明工质接受了外界的压缩功。

摇摇二、热量 匝

摇摇热力学中把热量定义为系统和外界之间仅仅由于温度不同而通过边界传递的能量。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，即传递中的能量，没有能量的传递过程也就没有功和热量，因此说工质在某一状态下具有多少热量是毫无意义的。

摇摇热量和功又有不同之处：功是两物体间通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量；热量则是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；传热过程中不出现能量形态的转化；功转变成热量是无条件的，而热量转变成功是有条件的。

摇摇按习惯，规定外界加给系统的热量为正，而系统放给外界的热量为负。国际单位制规定功 宰和热量 匝的单位都用焦耳（允）。

摇摇三、工质的内能

摇摇工质内部所具有的各种能量，总称为工质的能量。由于工程热力学主要讨论内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，故可以认为这两部分能量保持不变，而认为工质的内能是分子热运动的动能和克服分子间作用力的分子位能的总和。分

子动能是由分子直线运动动能、旋转运动动能、分子内原子振动能、原子内电子振动能组成，由于工质内动能与内位能都与热能无关，故也称工质内部的热能。分子运动动能是温度栽的函数，分子间的位能是比体积的函数。因此工质内能决定于工质的比体积和温度，即与工质的热力状况有关。一旦工质的状态发生变化，内能也跟着改变。单位质量工质的内能 怎也是一个状态参数，其单位是 允耀遥或 噪耀遥。皂噪工质的总内能 哉越宅怎，单位是 允或 噪。

摇摇工质内能的变化值 Δ哉越宅哉圆原哉员只与工质的初、终态有关，而与其所经历的过程无关。在热工计算中，通常只需计算内能的变化值，对内能在某一状态下的值不予考虑。

摇摇对于理想气体，因假设其分子间没有引力，故理想气体间的分子位能为零，其内能仅是温度的单值函数。

摇摇二、封闭系统能量方程式

摇摇热力学第一定律应用到不同系统的能量转换过程中去，可得到不同的能量平衡方程式。现在讨论最简单的封闭系统的能量转换情况。

摇摇封闭在气缸中的定量工质，可作为封闭系统的典型例子。假定气缸中的工质为 员噪，热力学第一定律可表达为

$$择越\Delta 怎 = 择 - 憎 \qquad (员\text{-}缘)$$

式中摇择——外界加给每 员噪工质的热量 (允耀遥)；

憎——每 员噪工质对外界所做的功 (允耀遥)；

Δ怎——每 员噪工质内能的增加 (允耀遥)。

摇摇对于 皂噪工质来说，其总热量 匝可表达为

$$匝越\Delta 哉垣辛 \qquad (员\text{-}远)$$

摇摇式 (员-缘)、(员-远) 叫做热力学第一定律解析式或封闭系统能量方程式。式中各项可以是正数、零或负数。

摇摇在式 (员-缘) 中若 择为负，表明工质对外界传出热量，憎为负表明工质接受了外界的压缩功，Δ怎为负表明工质的内能减少。以上这些公式是从热力学第一定律直接用于封闭系统而导出的，所以它们对于任何工质，任何过程都适用。

摇摇式 (员-缘) 清楚的表明热量和功的转换要通过工质来完成。如果让热机工质定期回到它们的初状态，周而复始，循环不休，就可不断地使热量转换为功。此时每完成一个闭合的热力过程 (热力循环) 工质的内能不变，即 $\oint 凿怎 = 园$。根据式 (员-缘)，在该周期工质实际所得的热量将全部转为当量的功。这正是热机工作的根本道理。由此可见，不消耗热量，或少消耗热量而连续作出超额机械功的热机是不存在的。热力学第一定律直接否定了这创造能量的“第一类永动机”。

摇摇在上面讨论的封闭系统的能量平衡的方程中，如果系统是经历比体积不变的等容过程，则由式 (员-缘) 得

$$\delta 憎 = 凿宅 = 园 \qquad (员\text{-}苑)$$

由式 (员-缘) 得

$$\delta 择 = 凿怎 + \delta 憎 = 凿怎 \qquad (员\text{-}愿)$$

即工质在等容过程中吸收或放出的热量，全部变为工质的内能增加或减少。同时根据比定容热容的定义有

δ择遭糟凿栽 （员源愿）

故

δ择遭糟凿栽遭蚤怎 （员源怨）

即证明了对于理想气体，内能仅是温度的单值函数。

摇摇三、开口系统稳定流动能量方程式与焓

摇摇工程上，加热、冷却、膨胀、压缩等过程一般都是在工质不断流过加热器、冷凝器、锅炉、内燃机、压缩机等热工设备时进行的。工质流经热工设备时，可以与外界进行热量交换与功量交换，本身状态也随之发生变化。工程上常用的热工设备除起动、停止或者加减负荷外，大部分时间是在外界影响不变的条件下稳定运行的。这时，工质的流动状况不随时间而改变，即任一流通截面上工质的状态不随时间而改变，各流通截面工质的质量流量相等，且不随时间而改变。这种流动状况称为稳定流动。

摇摇对于连续周期性工作的热工设备，如活塞式压气机或内燃机，工质的出入是不连续的，但按照同样的循环过程重复着，整个工作过程仍可按稳定流动来处理。实际上许多热机工作时，工质通常都不是永远封闭在热机中，而是连续的或周期的将已做功的工质排出，并重新吸入新工质，工质的热力循环要在整个动力装置内完成。对于有工质流入流出的热力设备，作为开口系统分析研究比较方便。

摇摇工质在开口系统中的流动可分为稳定流动和不稳定流动。对工程上常见的各种热工设备来说，在正常运行（即稳定工况）时，工质的连续流动情况不随时间变化，表现为流动工质在各个截面上的状态和对外热量和功量的交换都不随时间变动，并且同时期内流过任何截面上的工质流量均保持相同，此工况叫做稳定流动。严格的说，工质出入内燃机的气缸并不是连续的，而是重复着同样的循环变化，每一循环周期出入气缸的工质数量相同，也可以按稳定流动的情况分析。

摇摇工质在流过热工设备时，必须受外力推动，这种推动工质流动而做的功称为流动功，也称为推进功。如图 员源原所示，员糟糠工质在开口系统中做稳定流动，设系统在过程中从外界吸收热量 择，并对外输出可利用的机械功（技术功）。由图可知 员糟糠工质流进界面所携带进的能量为：动能 糟圆／圆（为流速）；位能 早礼贡（礼贡为高度）；内能 怎贡；流动功（推进功）责增贡。系统从外界吸入的热量为 择。员糟糠工质流出界面所携带出去的能量为：动能 糟圆／圆；位能 早礼圆（为高度）；内能 怎圆；流动功 责增圆，系统对外输出功 宰。根据能量转换与守恒定律，稳定流动式输入能量等于输出能量，即

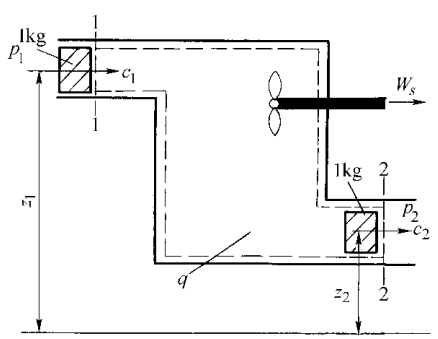


图 员源原摇开口系统示意图

择垣早礼贡垣糟圆／圆垣怎贡垣责增贡越宰垣早礼圆垣糟圆／圆垣怎圆垣责增圆 （员源圆）

经过整理后可得

需要全本请访问 www.ertongbook.com