



中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

工程热力学

卢 玫 主编
贾志海 李 凌 单彦广 参编

教育部高等学校机械类专业教学指导委员会
中国机械工程学会

中国机械工程学科教程研究组 编

China Mechanical Engineering Curricula
中国机械工程学科教程

(2017年)

CMEC

清华大学出版社

非外借

清华大学出版社



中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

工程热力学

卢 玫 主编

贾志海 李 凌 单彦广 参编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是根据《中国机械工程学科教程(2017年)》要求编写而成的配套教材。全书共分10章,内容包括热力学基本概念和定律(第1章、第2章、第5章)、工质的热力性质(第3章)、热力过程及热力循环分析及应用(第4章,第6章至第10章)三大部分。在内容编排上充分考虑我国高等教育由精英化朝大众化和普及化发展的趋势,在涵盖热力学基本定律的基础上强调工程应用,每章后提供与本章主要知识点对应的应用举例,并附有思考题,帮助学生掌握课程内容。在课后习题的编排上,强调题目对相应章节知识点的运用,注重培养学生基于基础理论分析问题和解决问题的能力。

本书可作为能源动力类、机械类、航空航天类、材料类及环境类专业本科生的教材或教学参考书,也可供相关专业研究生或工程技术人员作为参考书选用。

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

工程热力学/卢玫主编. —北京:清华大学出版社,2019

(中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材)

ISBN 978-7-302-51404-6

I. ①工… II. ①卢… III. ①工程热力学—高等学校—教材 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 237479 号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

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

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:13.5

字 数:326 千字

版 次:2019 年 5 月第 1 版

印 次:2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

产品编号:072211-01

中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校
机械类专业教学指导委员会规划教材

编 委 会

顾 问
李培根院士

主任委员
陈关龙 吴昌林

副主任委员
许明恒 于晓红 李郝林 李 旦 郭钟宁

编 委(按姓氏首字母排列)
韩建海 李理光 李尚平 潘柏松 芮执元
许映秋 袁军堂 张 慧 张有忱 左健民

秘 书
庄红权

丛书序言

PREFACE

我曾提出过高等工程教育边界再设计的想法,这个想法源于社会的反应。常听到工业界人士提出这样的话题:大学能否为他们进行人才的订单式培养。这种要求看似简单、直白,却反映了当前学校人才培养工作的一种尴尬:大学培养的人才还不是很适应企业的需求,或者说毕业生的知识结构还难以很快适应企业的工作。

当今世界,科技发展日新月异,业界需求千变万化。为了适应工业界和人才市场的这种需求,也即是适应科技发展的需求,工程教学应该适时地进行某些调整或变化。一个专业的知识体系、一门课程的教学内容都需要不断变化,此乃客观规律。我所主张的边界再设计即是这种调整或变化的体现。边界再设计的内涵之一即是课程体系及课程内容边界的再设计。

技术的快速进步,使得企业的工作内容有了很大变化。如从 20 世纪 90 年代以来,信息技术相继成为很多企业进一步发展的瓶颈,因此不少企业纷纷把信息化作为一项具有战略意义的工作。但是业界人士很快发现,在毕业生中很难找到这样的专门人才。计算机专业的学生并不熟悉企业信息化的内容、流程等,管理专业的学生不熟悉信息技术,工程专业的学生可能既不熟悉管理,也不熟悉信息技术。我们不难发现,制造业信息化其实就处在某些专业的边缘地带。那么对那些专业而言,其课程体系的边界是否要变?某些课程内容的边界是否有可能变?目前不少课程的内容不仅未跟上科学研究的发展,也未跟上技术的实际应用。极端情况甚至存在有些地方个别课程还在讲授已多年弃之不用的技术。若课程内容滞后于新技术的实际应用好多年,则是高等工程教育的落后甚至是悲哀。

课程体系的边界在哪里?某一门课程内容的边界又在哪里?这些实际上是业界或人才市场对高等工程教育提出的我们必须面对的问题。因此可以说,真正驱动工程教育边界再设计的是业界或人才市场,当然更重要的是大学如何主动响应业界的驱动。

当然,教育理想和社会需求是有矛盾的,对通才和专才的需求是有矛盾的。高等学校既不能丧失教育理想、丧失自己应有的价值观,又不能无视社会需求。明智的学校或教师都应该而且能够通过合适的边界再设计找到适合自己的平衡点。

我认为,长期以来,我们的高等教育其实是“以教师为中心”的。几乎所有的教育活动都是由教师设计或制定的。然而,更好的教育应该是“以学生

为中心”的,即充分挖掘、启发学生的潜能。尽管教材的编写完全是由教师完成的,但是真正好的教材需要教师在编写时常怀“以学生为中心”的教育理念。如此,方得以产生真正的“精品教材”。

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会、中国机械工程学会与清华大学出版社合作编写、出版了《中国机械工程学科教程》,规划机械专业乃至相关课程的内容。但是“教程”绝不应该成为教师们编写教材的束缚。从适应科技和教育发展的需求而言,这项工作应该不是一时的,而是长期的,不是静止的,而是动态的。《中国机械工程学科教程》只是提供一个平台。我很高兴地看到,已经有多位教授努力地进行了探索,推出了新的、有创新思维的教材。希望有志于此的人们更多地利用这个平台,持续、有效地展开专业的、课程的边界再设计,使得我们的教学内容总能跟上技术的发展,使得我们培养的人才更能为社会所认可,为业界所欢迎。

是以为序。



2009年7月

前 言

FOREWORD

本书是根据《中国机械工程学科教程(2017年)》要求,结合作者多年的授课经验编写而成。本书的编写和出版得到了“上海理工大学精品本科”系列教材项目支持。

热力学是研究物质能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的基础科学,工程热力学则是在此基础上着重研究热能与其他形式的能量(主要是机械能)之间的转换。这种热作用和力作用同时存在并相互耦合的现象不同于单纯的热现象和力学现象,增添了工程热力学的特殊性和复杂性,也增加了本课程学习的难度。结合目前我国高等教育由精英化朝大众化和普及化发展的趋势,本书编写的理念是简洁、易懂,不让学生望而生畏。因此,本书在内容编排上充分考虑在涵盖热力学基本定律的基础上强调最基本的工程应用。多年教学过程中我们经常看到这样一些情况,很多学生学习后总会感到自己对所学知识的概念都清楚了,但做题时却发现不会做;还有相当多的学生对热力学第二定律中熵的概念感到困惑,等等。这些情况说明,一是热力学概念性非常强,无法靠死记硬背套公式来解决问题;二是虽然热力学第二定律是大量自然过程方向性规律的总结,但其用于数量描述的熵却是一个比较抽象的概念,不同于热力学第一定律中的能量、热量、功、热力学能都是比较具体的概念。针对第一个问题,本书编排时将习惯于放在每一个知识点后的例题统一放在每章的最后一节,让学生通过分析将例题和相应知识点联系起来;另外,通过思考题让学生加深对基本概念的理解,通过课后习题增强对相应章节知识点的灵活运用。而第二个问题则通过热力过程熵变化分析来说明熵变化中熵产的由来,帮助学生掌握熵产的概念,加深对热力学第二定律的理解。

本书共分10章,内容包括热力学基本概念和定律(第1章、第2章、第5章)、工质热力性质(第3章)、热力过程及热力循环分析及应用(第4章,第6章至第10章)。本书编写获得了上海交通大学童钧耕教授的帮助,部分内容也和他进行了讨论和沟通,得到了他的细心指导,在此表示感谢。

编者诚恳欢迎读者批评指正。

编 者

2018年6月

主要符号

A	面积, m^2
c	比热容(质量比热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_f	流速, m/s
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_m	摩尔比热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
d	含湿量, $\text{g}(\text{水蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$; 耗汽率, kg/J
e	比总储存能, J/kg
E	总储存能, J
e_x	比焔, J/kg
E_x	焔, J
$E_{x,Q}$	热量焔, J
E_k	宏观动能, J
E_p	宏观位能, J
h	比焔, J/kg
H	焔, J
H_m	摩尔焔, J/mol
I	做功能力损失(焔损失), J
k	绝热指数
M	摩尔质量, g/mol
Ma	马赫数
M_{eq}	平均摩尔质量(折合摩尔质量), kg/mol
n	多变指数; 物质的量, mol
p	绝对压力, Pa
p_0	大气环境压力, Pa
p_a	湿空气中干空气分压力, Pa
p_b	大气环境压力, 背压力, Pa
p_e	表压力, Pa
p_i	分压力, Pa
p_s	饱和压力, Pa
p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压力, Pa
q_m	质量流量, kg/s

q_v	体积流量, m^3/s
Q	热量, J
Q_p	定压换热量, J
Q_v	定容换热量, J
R	通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$R_{g,eq}$	折合(或平均)气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
s	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S	熵, J/K
S_g	熵产, J/K
S_f	(热)熵流, J/K
S_m	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
S_m^0	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
T	热力学温度, K
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
u	比热力学能, J/kg
U	热力学能, J
U_m	摩尔热力学能, J/mol
v	比体积, m^3/kg
V	体积, m^3
V_m	摩尔体积, m^3/mol
w	比功, J/kg
W	膨胀功, J
W_{net}	循环净功, J
W_i	内部功, J
W_s	轴功, J
W_t	技术功, J
W_u	有用功, J
w_i	质量分数
x	干度
x_i	摩尔分数
Z	压缩因子
α	抽汽量
γ	比热容比; 汽化潜热, J/kg
ε	制冷系数; 压缩比
ε'	供暖系数
η_c	卡诺循环热效率
$\eta_{c,s}$	压气机绝热效率

η_{ex}	炯效率
η_{T}	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率
η_{t}	循环热效率
λ	等容升压比
μ_{j}	焦耳-汤姆逊系数(节流微分效应)
ν_{cr}	临界压力比
π	循环增压比
ρ	密度, kg/m^3 ; 定压预胀比
σ	回热度
τ	循环增温比
φ	相对湿度; 喷管速度系数
φ_{i}	体积分数

下标

a	湿空气中干空气的参数
c	卡诺循环; 冷库参数
C	压气机
CM	控制质量
cr	临界点参数
CV	控制体积
in	进口参数
iso	孤立系统
m	每摩尔物质的物理量
out	出口参数
s	饱和参数
v	湿空气中水蒸气的物理量
0	环境参数; 滞止参数

目 录

CONTENTS

绪论	1
第1章 基本概念	4
1.1 热动力装置能量转换过程	4
1.2 热力系统	5
1.3 工质的热力学状态和状态参数	6
1.4 平衡状态	9
1.5 热力过程和循环	11
1.6 过程参数	12
1.7 应用举例	16
思考题	16
习题	17
第2章 热力学第一定律	19
2.1 热力学第一定律的实质	19
2.2 工质的储存能	19
2.3 流动过程中的推动功和焓	20
2.4 热力学第一定律表达式	21
2.5 应用举例	25
思考题	27
习题	28
第3章 工质的热力性质	30
3.1 理想气体及状态方程	30
3.2 理想气体的比热容	31
3.3 理想气体的热力参数计算	34
3.4 理想气体混合物	36
3.5 水蒸气的热力性质	39

3.6 湿空气的热力性质	47
3.7 实际气体状态方程	52
3.8 应用举例	56
思考题	59
习题	60
第4章 工质的热力过程	62
4.1 研究热力过程的目的和方法	62
4.2 理想气体四种典型的基本热力过程	63
4.3 理想气体的多变过程	68
4.4 水蒸气的热力过程	71
4.5 湿空气的热力过程	73
4.6 应用举例	75
思考题	80
习题	80
第5章 热力学第二定律	83
5.1 基本概念	83
5.2 热力学第二定律的表述	84
5.3 卡诺定理	87
5.4 热力学第二定律的数学表达式	92
5.5 孤立系统熵增原理和能量品质降低原理	97
5.6 应用举例	101
思考题	104
习题	105
第6章 气体与蒸汽的流动	108
6.1 稳定流动基本方程	108
6.2 喷管截面的变化规律	110
6.3 喷管计算	112
6.4 有摩阻的绝热流动	116
6.5 绝热节流	117
6.6 应用举例	118
思考题	121
习题	121
第7章 气体的压缩	123
7.1 活塞式压气机的工作过程及耗功	123

7.2 分级压缩和中间冷却	126
7.3 叶轮式压气机的工作原理	128
7.4 应用举例	129
思考题	132
习题	133
第8章 气体动力循环	135
8.1 动力循环概述	135
8.2 活塞式内燃机混合加热理想循环	136
8.3 活塞式内燃机定压加热理想循环和定容加热理想循环	138
8.4 燃气轮机装置循环	140
8.5 应用举例	143
思考题	147
习题	148
第9章 蒸气动力循环	150
9.1 基本蒸气动力循环——朗肯循环	150
9.2 再热循环	154
9.3 回热循环	156
9.4 热电联供循环	157
9.5 应用举例	158
思考题	163
习题	164
第10章 制冷和热泵循环	166
10.1 逆向循环	166
10.2 压缩空气制冷循环	166
10.3 压缩蒸气制冷循环	168
10.4 热泵循环	170
10.5 应用举例	170
思考题	172
习题	173
部分习题参考答案	175
附录	180
参考文献	198

绪 论

1. 能源及其利用

能源是指提供各种有效能量的物质资源。人类社会的发展促使人们不断地开发自然界中的各种能源。风能、水力能、太阳能和煤、石油等矿物燃料的化学能,以及潮汐能、地热能、核能等都是先后被人类利用来发展生产的自然界的能源。人类日常生活和生产所需要的能量形式基本上为两类:一类为加热物体所用的热能,如蒸煮食物、生活采暖、烘干物料、生产工艺所需加热和金属冶炼等;另一类是为人类提供动力的机械能或电能。自然界目前可供利用的各类能源中,仅有少数的能源(如风能、潮汐能和水力能)是直接以机械能的形式提供能量,其他的能源或是直接以热能的形式供人类使用,或是通过燃烧反应、裂变反应或聚变反应等使化学能、原子能转换为热能的形式供人类使用;或再通过能量转换,将热能转变为机械能或电能供人类使用。可见自然界能源的利用过程实质上是能量的传递与转换过程。据统计,在当今世界使用的能量总量中,经过热能形式而被利用的能量超过 85%,因此,对热能的开发利用,尤其是对热能和机械能之间的转换规律进行研究是十分必要的。

2. 工程热力学的研究内容

热力学是研究物质的能量、能量的传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。人类的生存和发展离不开物质和能量,因此热力学的研究内容涵盖人类生产和生活的各个方面。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,研究这些原理的工程应用。主要研究热能和机械能之间相互转换的客观规律、方法以及影响转换效率的各种因素,从工程角度出发探讨能量有效转换的基本途径,以提高能源的利用率。其主要研究内容包括:

(1) 热能和机械能之间相互转换的基本概念和基本定律,包括热力学第一定律和热力学第二定律。这些概念和定律构成了工程热力学的理论基础。

(2) 工质的热力性质,主要包括理想气体、水蒸气、湿空气及实际气体的热力性质。

(3) 工质热力过程和热力循环的分析、计算及应用。主要包括四种典型的基本热力过程(定容、定压、定温和定熵)以及多变过程,动力循环和制冷(热泵)循环两类热力循环的分析、计算及应用。

3. 工程热力学的研究方法

对热力学的研究有两种不同方法:一种是宏观的研究方法,另一种是微观的研究方法。

宏观研究方法就是将物体作为连续体,不考虑物质内部粒子的构造和相互作用,只以由大量宏观热力现象所归纳总结出来的热力学第一定律、第二定律等基本定律作为理论基础,

针对具体问题采用抽象、概括、简化和理想化的方法,抽出共性,突出本质,建立分析模型,推导出一系列有用的公式,得到若干重要结论。由于热力学第一定律、第二定律是大量实践的经验总结,具有高度的可靠性及普适性,因此应用热力学宏观研究方法可以得到可靠的结果。但是,由于不考虑物质分子与原子的微观结构,也不考虑微观粒子的运动规律,所以由之建立的宏观理论并不能说明热现象的本质及其内在原因。

应用微观方法研究热力学称为统计热力学。统计热力学是从物质是由大量分子和原子等粒子所组成的事实出发,将宏观性质作为在一定宏观条件下大量分子和原子的相应微观量,利用量子力学和统计方法,将一切可能的微观运动状态予以统计平均,来阐明物质的宏观特性,导出热力学基本定律,因而能阐明热现象的本质,并能解释物质的比热理论、涨落现象等宏观热力学不能解释的问题。在对分子结构做出模型假设后,利用统计热力学方法还可以对物质的具体热力学性质做出预测。但统计热力学也有其局限性,因为对分子微观结构的假设只能是近似的,所以求得理论结果不能与实际完全相符,而只能接近于实际。

应用宏观方法研究热力学叫做宏观热力学,也叫经典热力学。工程热力学主要应用宏观研究方法。

4. 热力学发展简史

热力学的建立和发展是与人类的生产实践和热力过程的发展分不开的。热现象是人类最早广泛接触到的自然现象之一,远古时代的钻木取火就是机械能转换为热能的应用实例。人类对热的利用和认识经历了漫长的岁月,直到18世纪初,欧洲由于煤矿开采、航海、钢铁冶炼、纺织等产业部门的发展,产生了对热机(将热能转变为机械能的动力机)的需求;同时生产的发展也为热机的制造和改进提供了条件,促使了热力学的发展。最早使用的热机是蒸汽机,用以带动往复式水泵从煤井中抽水。1763—1784年间,英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对这种原始蒸汽机作了重大改进,并且研制成功了蒸汽压力高于大气压、配有独立凝汽器的单缸蒸汽机,提高了蒸汽机的热效率,蒸汽机的应用逐渐推广到纺织、冶金、交通等部门。此后蒸汽机经过不断改造,热效率不断得到提高,应用也越来越广泛。

蒸汽机的发明与应用,推动了热学理论的研究,促成了热力学的建立与发展。在热功转换规律的研究中,最早的成就是法国人卡诺(Sadi Carnot, 1796—1832)在1824年提出的卡诺循环和卡诺定理,他指出热机必须工作于两个不同温度的热源之间,并提出了热机最高效率的概念,这在本质上揭示了热力学第二定律最基本的内容。在卡诺所做工作的基础上,1850—1851年期间克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)和汤姆逊(William Thomson, 即开尔文勋爵, 1824—1907)先后独立地从热量传递和热转换功的角度提出了热力学第二定律,指明了热过程的方向性。

1842年,迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)在论文《论无机性质的力》中表述了物理、化学过程中各种力(能)的转化和守恒的思想,并计算出热功当量。1850年,焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)在他的关于热功相当实验的总结论文中,以各种精确的实验结果使能量守恒与转换定律,即热力学第一定律得到了充分的证实。能量守恒与转换定律是19世纪物理学的最重要发现。1851年,汤姆逊把能量这一概念引入热力学。

热力学第一定律的建立宣告第一类永动机(即不消耗能量的永动机)是不可能实现的。热力学第二定律则使制造第二类永动机(只从一个热源吸热的永动机)的梦想破灭。这两个

定律奠定了热力学的理论基础。

在将热力学原理应用于低温现象的研究中,能斯特(Walter Nernst, 1869—1941)在1906年根据大量低温下的化学反应的实验事实归纳出了新的规律,并于1912年将之表述为绝对零度不可达到原理,即热力学第三定律。热力学第三定律的建立使经典热力学理论更趋完善。在上述三个热力学基本定律的基础上,经典热力学的理论体系建立了起来,并在不同领域中得到了广泛应用。1942年,凯南(Joseph Henry Keenan, 1900—1977)在热力学基础上提出了有效能概念,使人们对能源有效利用的认识又前进了一步。显然,人类社会的发展推动了热力学的建立和发展,而热力学理论的建立和发展反过来又进一步推动人类生产的发展。现代科学技术的快速发展向热力学提出了新的课题和挑战,热力学理论也必将在不断解决新课题中发展到新的高度。

第 1 章

基 本 概 念

1.1 热能动力装置能量转换过程

将热能转换为机械能的装置称为热能动力装置(简称热机)。目前,工程中所利用的热能大多来源于化石燃料,即石油、天然气和煤。在能量利用过程中,热能动力装置首先以燃烧的方式将燃料的化学能转化为热能,然后再借助工作介质(简称工质)的状态变化将热能转换为机械能。热能动力装置根据工质可分为蒸汽动力装置及燃气动力装置两大类。下面以蒸汽动力装置和内燃机为例分析热能动力装置中的能量转换过程。

蒸汽动力装置的系统简图如图 1-1 所示。系统中主要设备为锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵等。燃料在锅炉中燃烧,使化学能转变为热能,锅炉水冷壁管内的水吸热后变为饱和蒸汽,并且在锅炉过热器内进一步吸热成为过热蒸汽。高温、高压的蒸汽具有做功能力,过热蒸汽进入汽轮机膨胀,降压增速,蒸汽的热力学能转变为动能,然后,具有一定动能的蒸汽推动汽轮机叶片做功。做功后的低压蒸汽从汽轮机排出后进入凝汽器,通过冷却水冷凝成低压水,再由给水泵加压成高压水送回锅炉加热。如此周而复始,通过锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵等设备和工质对应的吸热、膨胀做功、放热、加压等过程不断地把由燃料中化学能转变而来的热能中的一部分转换成机械能,另一部分热量则通过冷却水排向环境。

图 1-2 所示为内燃机示意图,其主要部分是气缸、活塞和曲柄连杆机构。内燃机工作时,吸入燃料和空气在气缸内混合,经压缩后在气缸中燃烧,释放出的热能使燃气的温度和压力远高于周围大气的温度与压力,燃气在气缸中膨胀,推动活塞做功,通过曲柄连杆机构传递给内燃机曲轴上的飞轮,转动的飞轮向工作机械输出机械能,同时推动活塞逆向运动,排出温度高于环境温度的废气。每经过一定的时间间隔,完成吸气、压缩、燃烧、膨胀并推动活塞做功和排气,把从燃料中化学能转变而来的热能中的一部分转换成机械能并传递给工作机械,其余部分则被废气携带排向环境。

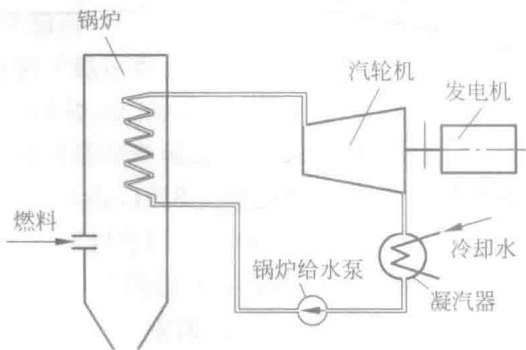


图 1-1 蒸汽动力装置示意图

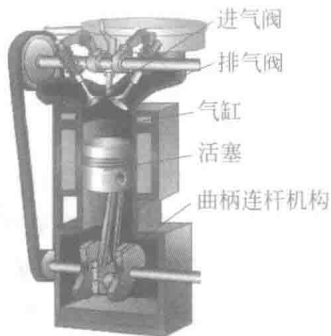


图 1-2 内燃机示意图