



21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

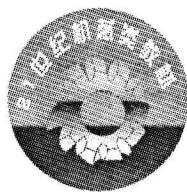
工程热力学

黄晓明 刘志春 范爱武 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

工程热力学

主 编 黄晓明 刘志春 范爱武
主 审 许国良



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是根据教育部制定的普通高等教育多学时《工程热力学课程教学基本要求》,同时考虑适当反映科学技术新进展以适应新世纪教学需求,并结合编者多年教学实践经验编写而成的。

本书以能量传递、转换过程中数量守恒和质量蜕变为主要线索,阐述了工程热力学的基本概念、基本定律,气体及蒸汽的热力性质,各种热力过程和循环分析方法等内容。书中附有例题、思考题、习题及必要的热工图表。

本书可作为普通高等学校能源动力类、机械类、航空航天类、交通运输类及化工、冶金类各专业本科教学用书,亦可供其他专业选用和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/黄晓明 刘志春 范爱武 主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2011.9

ISBN 978-7-5609-7247-3

I. 工… II. ①黄… ②刘… ③范… III. 工程热力学-高等学校-教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 149861 号

工程热力学

黄晓明 刘志春 范爱武 主编

策划编辑:刘 勤

责任编辑:刘 勤

封面设计:潘 群

责任校对:周 娟

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:湖北通山金地印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:18.5

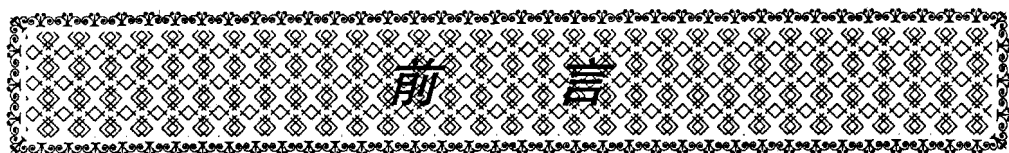
字 数:380 千字

版 次:2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:34.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



工程热力学是从工程的观点出发,研究物质的热力性质、能量转换规律及热能利用等问题的基础学科。它是能源动力工程、机械工程、航空航天工程、材料工程、化学工程、生物工程等领域相关专业的重要技术基础课,是培养在涉及能源特别是与热能相关的各领域中具有创新能力人才的基础课,也是培养 21 世纪工科学生科学素质的一门公共技术基础课。

本书以大机械类培养模式的改革为背景。书中内容既符合国家教育委员会制定的多学时《工程热力学课程教学基本要求》,也参照了教育部机械学科教学指导委员会关于工科教材编写的有关精神,并融合了编者多年来的教学实践经验。在阐述基本理论的同时,参考最新国内外技术动态资讯,力求反映工程热力学的基本知识、广泛应用领域及最新应用成果。在内容编排上,注意先进性与实用性的统一,同时注重知识面的广阔性;在文字叙述上,注意简练通俗、层次分明,并遵循由点到面、由浅入深的认识规律。

全书共分 12 章,主要包括热力学基本概念、基本定律、工质的热力性质与计算、混合气体及湿空气、气体流动、各种热力循环分析等内容。第 1~7 章是热力学基本概念和基本理论知识部分,着重介绍了热力学基本概念和基本定律的实质,以及如何灵活运用热力学基本理论对各种热力过程进行分析,为能源科学研究及应用打下理论基础。第 8~12 章为热力学理论在工程实际中应用部分,既是前面基本理论的具体应用,又是进一步联系工程实际的桥梁,着重培养学生应用热力学知识解决实际问题的能力。

本书在章节的编排上不仅考虑了多学时教学规律的需求,还同时考虑了大机械类少学时平台课程的教学安排。少学时教学可以第 1~5 章为主,并根据专业的不同需要,对后面热力循环部分,重点讲授其中一种或两种循环。书中打 * 号的各节及第 6 章,内容相对独立,可根据教学的具体情况部分或全部予以删减而不影响全书的系统性。

参加本书编写工作的有华中科技大学黄晓明(绪论,第2、7、8、10、11章)、刘志春(第4、6、9、12章)、范爱武(第1、3、5章),全书最后由黄晓明统稿,由许国良主审。华中科技大学黄文迪教授、明廷臻副教授和王英双博士为本书的编写工作提供了大力支持。本书在编写过程中,还得到了华中科技大学精品教材立项基金的资助,在此一并表示真挚的感谢!

由于编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请广大同行专家与读者批评、指正。

编 者

2011年6月

主要符号表

A	面积, m^2	p_b	大气环境压力, 背压, Pa
c_t	流速, m/s	p_e	表压力, Pa
c	比热容(质量比热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 浓度, mol/m^3	p_i	分压力, Pa
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p_s	饱和压力, Pa
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p_v	真空度, 湿空气中水蒸气的 分压力, Pa
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	p_N	最大转变压力, Pa
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	Q	热量, J
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	q_m	质量流量, kg/s
d	含湿量, $\text{kg}(\text{水蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$; 耗气率, kg/J	q_v	体积流量, m^3/s
E	总能(储存能), J	R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
E_x	焔, J	R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$E_{x,Q}$	热量焔, J	$R_{g,eq}$	平均气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$E_{x,U}$	热力学能焔, J	S	熵, J/K
$E_{x,H}$	焓焔, J	S_g	熵产, J/K
E_k	宏观动能, J	S_i	(热)熵流, J/K
E_p	宏观位能, J	S_m	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
F	力, N; 亥姆霍兹函数, J	S_m^0	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
G	吉布斯函数, J	T	热力学温度, K
H	焓, J	T_i	转变温度, K
H_m	摩尔焓, J/mol	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
I	做功能力损失(焔损失), J	t_s	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
k	等熵指数, 比热容比	t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
M	摩尔质量, kg/mol	U	热力学能, J
Ma	马赫数	U_m	摩尔热力学能, J/mol
M_{eq}	平均摩尔质量(折合摩尔质量), kg/mol	V_m	摩尔体积, m^3/mol
n	多变指数, 物质的量, mol	V	体积, m^3
p	绝对压力, Pa	w_i	质量分数
p_0	大气环境压力, Pa	α	抽气量, kg
x_i	摩尔分数	α_v	体膨胀系数, K^{-1}
z	压缩因子		

γ	汽化潜热	ρ	密度, kg/m^3 ; 预胀比
ε	制冷系数; 压缩比	σ	回热度
ε'	供暖系数	φ	相对湿度; 喷管速度系数
η_c	卡诺循环热效率	ϕ_i	体积分数
$\eta_{c,s}$	压气机绝热效率	下标	
η_{c_x}	炯效率	a	湿空气中干空气的参数
η_T	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率	c	卡诺循环
η_i	循环热效率	C	压气机
κ_s	等熵压缩率, Pa^{-1}	CM	控制质量
κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}	cr	临界点参数; 临界流动状况
θ	顶锥角度	参数	
W	膨胀功, J	CV	控制体积
W_{net}	循环净功, J	in	进口参数
W_i	内部功, J	iso	孤立系统
W_s	轴功, J	m	每摩尔物质的物理量
W_t	技术功, J	s	饱和参数; 相平衡参数
W_u	有用功, J	out	出口参数
π	压力比(增压比)	v	湿空气中水蒸气的物理量
x	干度	0	环境参数; 滞止参数
v_{cr}	临界压力比		

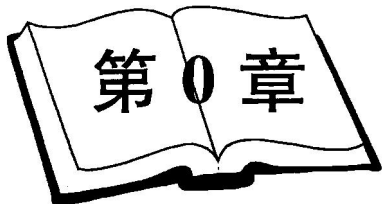


主要符号表	(I)
第 0 章 绪论.....	(1)
0.1 热能及其利用	(1)
0.2 热力学及其发展简史	(3)
0.3 能量转换装置的工作过程	(4)
0.4 工程热力学的研究内容和研究方法	(6)
0.5 工程热力学常用的计量单位	(7)
第 1 章 基本概念.....	(9)
1.1 热力学系统和外界	(9)
1.2 热力学平衡.....	(11)
1.3 热力学状态参数.....	(13)
1.4 比体积(比容)、压力、温度和热力学第零定律.....	(15)
1.5 热力过程与循环.....	(18)
1.6 独立变量与状态公理.....	(20)
1.7 热力学状态的描述.....	(22)
思考题	(23)
习题	(23)
第 2 章 热力学第一定律	(25)
2.1 热力学第一定律的实质.....	(25)
2.2 热力系统的储能.....	(26)
2.3 功量和热量——迁移能.....	(27)
2.4 焓.....	(30)
2.5 热力学第一定律表达式.....	(31)
2.6 能量方程的工程应用举例.....	(36)
思考题	(42)
习题	(43)
第 3 章 纯物质的性质	(47)

3.1	理想气体及其状态方程	(47)
3.2	气体的比热容	(48)
3.3	理想气体的热力学能、焓和熵	(54)
3.4	纯物质的 $p-v-T$ 关系	(57)
3.5	水蒸气的热力性质	(60)
	思考题	(64)
	习题	(64)
第4章	气体的热力学过程	(67)
4.1	研究热力过程的方法	(67)
4.2	理想气体的四种基本热力过程	(68)
4.3	理想气体的多变过程	(75)
4.4	水蒸气的基本热力过程	(80)
*4.5	非稳态流动过程	(82)
4.6	热力过程的工程应用——气体的压缩	(84)
	思考题	(89)
	习题	(90)
第5章	热力学第二定律和熵	(94)
5.1	引言	(94)
5.2	热力学第二定律的表述	(96)
5.3	卡诺循环	(96)
5.4	卡诺定理	(100)
5.5	熵的导出	(102)
5.6	热力学过程方向的判据	(104)
5.7	可用能及可用能损失	(111)
*5.8	热力学温标	(117)
	思考题	(118)
	习题	(119)
第6章	焓及焓分析	(122)
6.1	能量转换的限度	(123)
6.2	几种形式能量的焓	(124)
6.3	工质焓及系统焓平衡方程	(130)
6.4	焓平衡与焓损失	(134)
	思考题	(137)
	习题	(137)
第7章	实际气体的性质和热力学一般关系式	(139)
7.1	理想气体状态方程用于实际气体的偏差	(139)

7.2	实际气体状态方程	(140)
7.3	实际气体性质的近似计算	(146)
7.4	热力学一般关系式	(148)
7.5	热力学能、焓和熵的一般关系式	(153)
7.6	比热容的一般关系式	(156)
* 7.7	克拉贝龙方程	(157)
	思考题	(159)
	习题	(159)
第 8 章	理想气体混合物与湿空气	(161)
8.1	混合气体的成分	(161)
8.2	分压定律与分容定律	(164)
8.3	理想气体混合物的热力学性质计算及混合熵增	(166)
8.4	湿空气的基本概念和状态参数	(171)
8.5	相对湿度的测定	(176)
8.6	湿空气的焓湿图	(177)
8.7	湿空气的基本热力过程及应用	(179)
	思考题	(187)
	习题	(187)
第 9 章	气体和蒸汽的流动	(189)
9.1	一维稳态流动的基本方程	(189)
9.2	定熵流动的基本特性	(191)
9.3	气体和蒸汽在喷管中的流速和质量流量	(193)
9.4	具有摩擦的绝热流动	(197)
9.5	绝热节流	(198)
	思考题	(202)
	习题	(203)
第 10 章	气体动力循环	(205)
10.1	分析动力循环的一般方法和步骤	(205)
10.2	往复活塞式内燃机理想循环	(208)
10.3	燃气轮机装置循环	(216)
10.4	具有回热的燃气轮机装置循环	(223)
	思考题	(225)
	习题	(226)
第 11 章	蒸汽动力循环	(228)
11.1	蒸汽动力循环简述	(228)
11.2	朗肯循环	(229)

11.3	再热循环·····	(236)
11.4	回热循环·····	(238)
11.5	提高蒸汽循环热效率的其他方式·····	(243)
	思考题·····	(247)
	习题·····	(247)
第 12 章	制冷循环 ·····	(250)
12.1	概述·····	(250)
12.2	压缩空气制冷循环·····	(252)
12.3	蒸气压缩制冷循环·····	(255)
12.4	制冷剂·····	(256)
12.5	热泵供热循环·····	(259)
	思考题·····	(259)
	习题·····	(260)
	附录·····	(262)
	参考文献·····	(283)



绪 论

0.1 热能及其利用

能源是人类社会不可缺少的物质基础之一,人类社会的发展史与人类开发利用能源的广度和深度密切相连。

所谓能源,是指提供各种有效能量的物质资源。迄今为止,自然界中已为人们发现的可被利用的能源主要有:风能、水能、太阳能、地热能、海洋能、核能和燃料的化学能等。在这些能源中,除风能、水能和海洋潮汐能是以机械能的形式提供给人们的之外,其余各种能源往往以热能的形式提供给人们。例如:太阳能是直接的热能;燃料(如煤、石油、天然气等)的化学能,常通过燃烧将其化学能释放并转换为热能;核能通过裂变反应或聚变反应释放出高温热能。据统计,经过热能形式而被利用的能量,在我国占90%以上,在世界其他各国的平均占比超过85%。因此从某种意义上讲,能源的开发和利用大部分就是热能的利用。各种能源与热能的转换及热能的利用情况如图0-1所示。

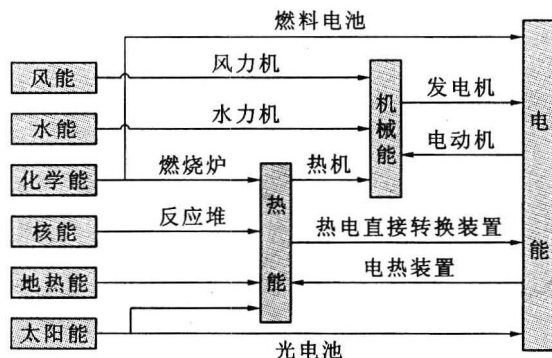


图 0-1 能量利用过程示意图

热能的利用,有以下两种基本方式:一种是直接利用,即将热能直接用于加热物体,如烘干、采暖、熔炼等;另一种是间接利用,通常是指将热能转变为其他形式的能量,如机械能或电能而加以利用,如汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等均可将

热能转变为其他形式的能量。

直接用热能加热物体,为生产或生活服务固然重要,然而间接使用热能,使之变为机械能或电能向人类提供动力或电能,其意义更为重要。因为电能具有传输和使用方便等优点,所以一般将热能最终转变为电能的形式。人均用电水平是衡量一个国家工业化发展程度的重要指标。据 2000 年统计,我国电能占人均总能消耗的比例为 30%,一般发达国家为 45% 以上。

在热能的间接利用中,能量转换是最核心的部分。各种热能动力装置工作的实质都是将热能转换成机械能,或者再通过动力机将热能最终转化成电能的形式使用,即采用热能→机械能,或热能→机械能→电能的间接利用方式。目前正在研究的热能直接转化成电能的装置,如磁流体发电机、燃料电池等,可望进一步提高热能转换的效率。但是,各种热能动力装置仍然是目前为人类提供动力和生产、生活用能的主要装置。

图 0-2 给出了几种典型的能量转换装置及它们的能量转换热效率。可以看出,热能通过热能动力装置转换为机械能的效率是较低的。在动力需求日益增长的今天,如何开发新的能源,如何更有效地实现能量转换,是摆在能量转换学科及动力工作者面前的一个十分迫切而又重要的课题。

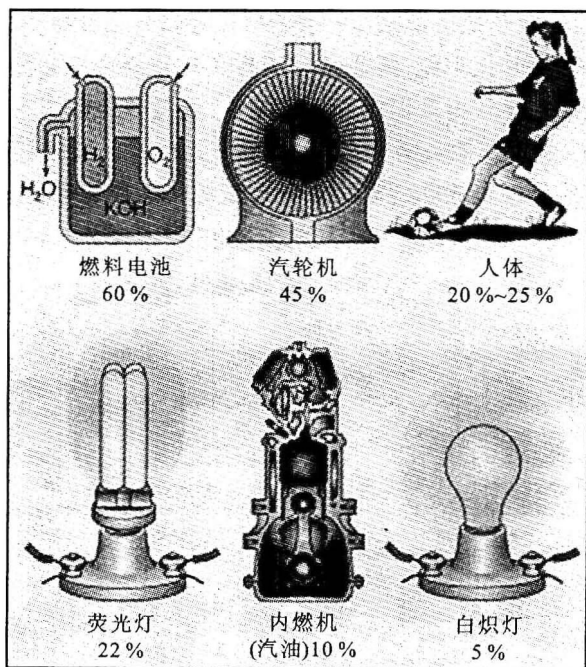


图 0-2 各种能量转换装置及其能量转换效率

因此,工程热力学是研究热能与机械能及其相互转换规律的一门科学,其目的就是提高机械能和热能之间相互转换的效率,以消耗最少的热能获得最多的机械能,或

者以花费最少的机械能获得最多的热能。

0.2 热力学及其发展简史

热现象是人类最早、最广泛接触到的自然现象之一。18世纪以前,人们对于热只有一些粗略的概念,不可能建立正确的、科学的理论。1714年法伦海脱建立华氏温标,此后热力学才走上实验科学的道路。随着实验的进展,一种解释简单实验结果的热质说产生了。热质说认为:热是一种无质量的流体,称为热质,可以进入一切物体中,不生不灭;物体的热和冷取决于物体所含热质的多少。热质说是一种错误的学说,不能解释大家熟知的摩擦生热等热现象,最终被科学界抛弃。

与热质说相对立的运动说认为:热是运动的一种表现。最先用实验事实驳斥热质说的是伦福德。他在1798年的一篇论文中指出:制造枪炮所切下的铁屑温度很高,而且不断切削,高温铁屑就不断产生。既然可以不断产生热,热就非是一种运动不可。之后,戴维在1799年用两块冰互相摩擦使之融化来支持热的运动说。当时,他们的工作并未引起物理界的重视,原因在于还没有找到热功转换的数量关系。

1824年,德国医生迈耶提出能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能互相转换,并从空气的比定压热容和比定容热容之差算出了热功当量。同一时期,焦耳用各种不同的机械生热法也测出了结果一致的热功当量。这就说明,热是一种能量,可以和机械能互相转换,从而用实验证明了能量守恒定律。至此,热质说被最后否定,能量守恒定律得到科学界的公认,导致热力学第一定律的诞生。

紧接着,开尔文和克劳修斯分别于1848年和1850年提出了有关热现象的第二个重要定律——热力学第二定律。尽管他们对此定律有不同的表述,但却揭示了热过程共有的、区别于其他物理过程的一个重要特性——实际热过程不可逆,从而使热力学成为独立于其他物理学科的一门学科。

热力学第一定律(实质就是能量守恒定律)的建立,给制造不消耗能量而可源源不断产生功的第一类永动机的企图以粉碎性打击。热力学第二定律(能量贬值原理)的建立指出了热变功的最高效率,点明了单热源机(第二类永动机)是造不成的。热力学第一、第二定律奠定了热力学的理论基础。1906年,奈斯特根据低温下化学反应的许多实验事实,归纳出热力学第三定律。这一定律确认绝对零度不能达到。热力学第三定律的建立使热力学理论更臻完善。

如上所述,热机的发明、应用和发展不断促进了热力学理论的研究,使热力学理论逐步完善,而热力学理论又有力地指导了热机的改进和发展。由于热力学理论所揭示的是能量转换过程的普遍规律,因此它不仅指导热机的发展,而且在化工、冶金、制冷、空调及低温、超导、反应堆以致气象、医学、生物等多个科技领域中,获得了越来越广泛的应用。因而它的研究范围已扩大到了化学、物理化学、电、磁、辐射等领域。

0.3 能量转换装置的工作过程

工程热力学是研究能量(特别是热能)性质及其转换规律的科学。在学习本课程的过程中,会涉及各种能量转换装置,如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置、喷气发动机及制冷装置等。为了从这些装置中总结出能量转换的基本规律,更好地了解工程热力学所研究的内容,在本节中将简要地介绍一些主要热力设备的实际工作过程。

图 0-3 是燃烧汽油的内燃机示意图,其主要部分为气缸和活塞。内部的能量转换过程简述如下:当活塞下行时,进气阀打开,排气阀关闭。雾化的汽油与空气混合物通过进气阀吸入气缸内。然后活塞上行,进气阀关闭,缸内气体受到压缩。电火花将燃料点燃后,燃烧过程产生的热量使缸内气体的压力和温度迅速升高。高温高压的气体推动活塞向下运动,通过连杆机构将机械能传出去。活塞再次上行,排气阀打开,进气阀关闭,将做功后的废气排出气缸,活塞回到初始状态,整个装置完成一个循环。之后,新循环又重新开始。气缸内这种周而复始的循环过程,不断地将热能转换成机械能。

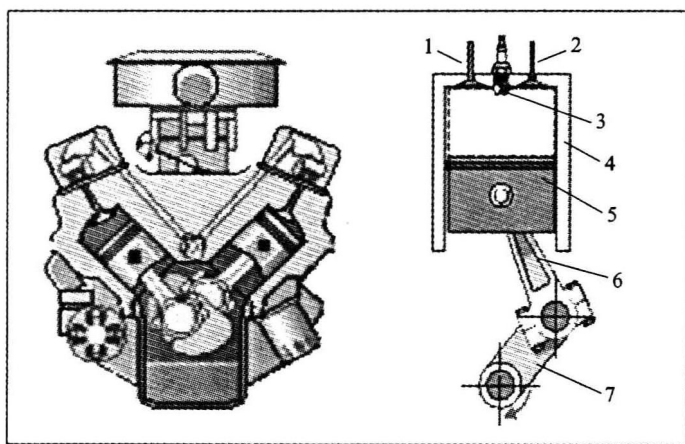


图 0-3 内燃机示意图

1—进气阀;2—排气阀;3—火花塞;4—气缸;5—活塞;6—连杆;7—曲轴

图 0-4 是近代热力发电厂中采用的蒸汽动力循环装置。煤在锅炉中燃烧,产生大量的热能,使锅炉管中的水变成水蒸气。高温高压的水蒸气进入汽轮机中推动叶轮转动并利用转轴输出机械功。所产生的机械功带动同一转轴上的发电机转子,使之产生旋转运动,从而使发电机发出电能。汽轮机排出的乏汽经冷凝器冷却成液体后再送回锅炉内重新加热汽化,完成一个循环。这样就可以连续地将燃料燃烧产生的热能部分地转变为电能供给用户使用。

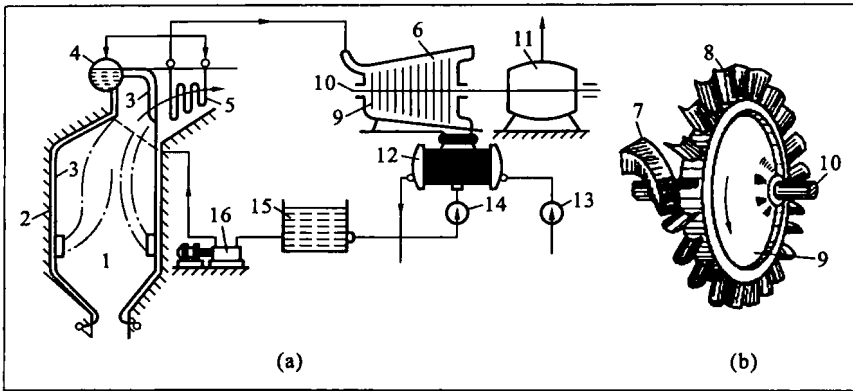


图 0-4 蒸汽发电装置

1—锅炉；2—炉墙；3—沸水管；4—汽水筒；5—过热器；6—汽轮机；7—喷管；8—叶片；
9—转轮；10—轴；11—发电机；12—冷凝器；13、14、16—泵；15—水箱

核电站蒸汽动力装置的构成和工作过程与上述普通的热力发电厂动力装置比较,主要区别在于用反应堆代替了蒸汽锅炉,如图 0-5 所示。目前的反应堆多用浓缩铀作燃料,而用载热质(如水、重水或某些碱金属蒸气等)将反应堆中的大量热能携出,并在热交换器中将热能传递给水和水蒸气。水蒸气的循环则与蒸汽动力循环完全相同。

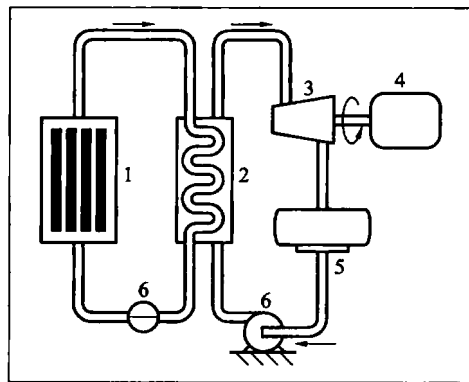


图 0-5 核电站蒸汽动力装置

1—反应堆；2—热交换器；3—汽轮机；4—发电机；5—冷凝器；6—泵

以上介绍的都是热能动力装置,它们的目的是将热能转换为机械能。在工程上还有另一类作用与之相反的能量转换装置,它们消耗外部机械功(或热能)来实现热能由低温物体到高温物体的转移,这类装置通常称为制冷装置,在以供热为目的时称为热泵。现以压缩蒸汽制冷装置为例介绍如下。

图 0-6 是以室内空调、电冰箱为代表的压缩蒸汽制冷装置工作原理示意图。由电动机带动的压缩机把在冷库(室内)吸热汽化的制冷剂压缩,使其温度、压力升高,

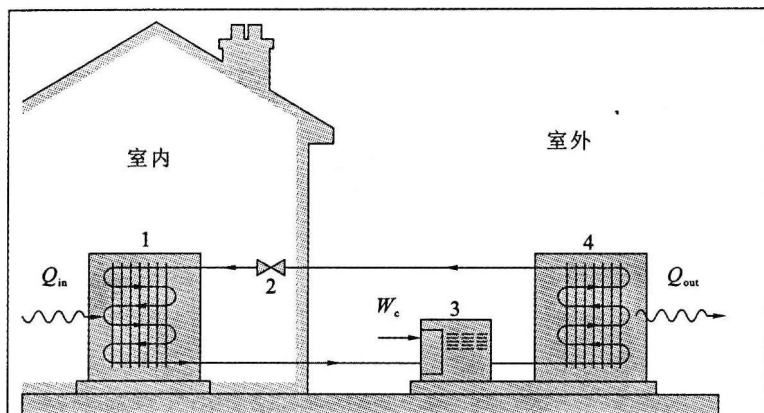


图 0-6 压缩蒸汽制冷装置工作示意图

1—蒸发器;2—膨胀阀;3—压缩机;4—冷凝器

然后进入冷凝器向环境介质放热,并冷凝成液体,再在节流阀内降压、降温到冷库温度,进入冷库蒸发器,汽化吸热完成循环。所以制冷机消耗外功,通过制冷剂吸热、压缩、放热、膨胀,实现把热能由低温物体(室内环境)向高温物体(室外环境)输送。

0.4 工程热力学的研究内容和研究方法

工程热力学的形成和发展是与热力工程的发展紧密联系着的。从理论上阐明提高热机效率的途径是工程热力学的一项主要任务。前面所介绍的各种热动力装置和制冷装置,尽管其工作目的、设备结构与装置系统各不相同,但它们实现能量转换的过程有许多共同的特性。

(1) 能量转换装置在工作中都需要有承受和传递能量的媒介或载体,通常称为工质,如内燃机中的燃气、汽轮机中的水蒸气、制冷机中的制冷剂等。

(2) 能量转换是在工质状态不断地变化中实现的。各种能量转换装置中的工质都必须经历压缩、吸热、膨胀、放热等状态变化过程,对外发生热和功的交换。因此,各种装置工作效率的高低及其结构与组成都与所采用工质的性质密切相关。

(3) 能量的连续转换是在周而复始的循环中实现的。动力循环中将吸热量中的一部分转换为机械能,剩余的部分排向冷却水或环境;制冷循环则消耗机械能,将热量由低温物体排向高温物体。

因此,为了了解能量的转换过程,研究提高转换效率的途径,工程热力学的主要内容包括下列三部分。

(1) 热力学基本定律 它是分析问题的依据和基础,主要研究热能和其他形式的能量(主要是机械能)之间相互转换的客观规律。

(2) 工质的热力性质 工质是能量的载体,必须对其相关性质有充分的了解,才