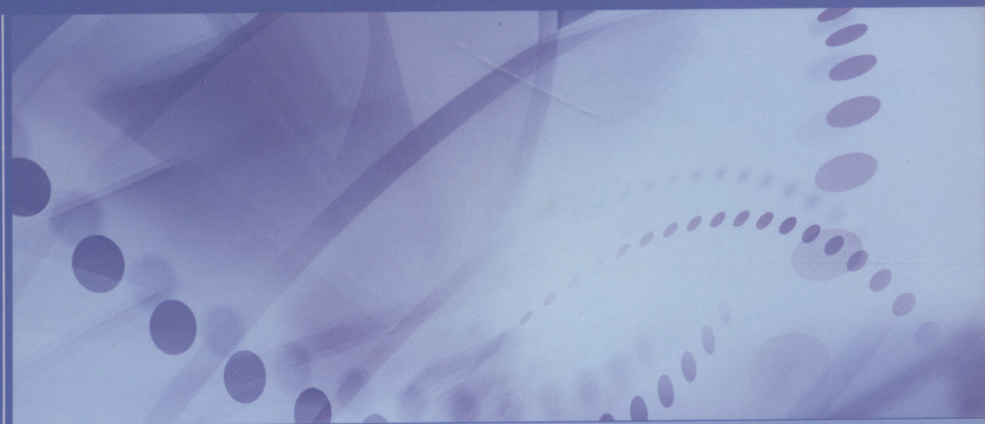




高等院校机电类精品教材

热能与动力机械基础

RENENG YU DONGLI JIXIE JICHU



何伯述 主编

43



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



高等院校机电类精品教材

热能⁻¹²与动力机械基础

何伯述 主编

清华大学出版社
北京交通大学出版社

·北京·

Tk05-43
H/66

内 容 简 介

本书系热能与动力工程专业的专业基础课教材,目的是使该类专业的学生对热能利用原理及基本系统和主要装置,动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构、性能及评价具备基本和整体的认识,为继续深入学习后续专门课程及毕业后工作的需要奠定基础。全书共分6章,内容包括绪论、基本概念及基础知识、锅炉及换热器、叶轮叶片动力机械、热力发电技术,分布式发电技术等。在内容安排上力求与同类教材相比有较大的革新,在第2和第3章加入了大量的环境与污染控制的内容,又利用第6章整章地介绍了应用前景广阔的分布式发电技术。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力机械基础 / 何伯述主编. — 北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2010.4

(高等院校机电类精品教材)

ISBN 978-7-5121-0089-3

I. ①热… II. ①何… III. ①热能-高等学校-教材 ②动力机械-高等学校-教材 IV. ①TK05 ②TK11

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第051342号

责任编辑:解坤

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京交大印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:18 字数:450千字

版 次:2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-0089-3/TK·2

印 数:1~4000册 定价:29.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

本书为适应科技进步和社会发展、适应课程和教学改革的需要而编写。

本书是热能与动力工程专业的专业基础课教材，目的是使该类专业的学生对热能利用原理及基本系统和主要装置，动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构、性能及评价具备基本和整体的认识，为继续深入学习后续专门课程及毕业后工作的需要奠定基础。本书是在编者已使用5届的课程讲义的基础上、结合新的本科生教学计划而组织设置，在拓宽知识面的同时，注意强化基础知识及其系统性、适当联系工程实际和科学技术的新进展和新要求。

本书可作为机械大类热能与动力工程专业本科生的基础课教材，也是从事能源利用、动力、化工及暖通等方面的科技人员的参考书。鉴于本书系编者适应热能与动力工程类专业需要而编写的新教材，内容涉及面广，既要有一定的深度，又要避免过分专业化，还受到总学时的限制，使编写难度加大。作为编者在教学改革过程中的一个初步尝试，加之编者水平有限、经验不足，书中不可避免地会出现缺点和错误，竭诚希望各位专家和读者批评指正。

全书由何伯述主编，参加编写的有何伯述（第1章、第6章）、卢太金（第2章、第3章）、宋泾舸（第4章）、陈琪（第5章）。本书初稿的部分文字录入及图表的整理由研究生们协助完成，在此向他们表示谢意。本书定稿前，评审专家对本书的初稿提出了建设性的宝贵意见，使本书的体系结构更合理、知识系统更适合本科教学，编者也在此向他（她）们表示由衷的感谢。本书的编写工作得到了北京交通大学教材出版基金的支持，在此表示感谢。在本书的编写过程中，参考了大量的已出版的教材和专著，已在各章列出，在此编者也向这些教材和专著的作者（编者）表示谢意。

编 者
2010年3月

目 录

第1章 绪论	1
参考文献	4
第2章 基本概念及基础知识	5
2.1 热工基础知识	5
2.1.1 传热学基本概念及简单计算	5
2.1.2 工程热力学基本原理	9
2.1.3 工程流体力学基础	19
2.1.4 燃烧过程基本理论	25
2.2 动力机械及动力传动	39
2.2.1 动力机械的分类	39
2.2.2 动力机械的应用	42
2.2.3 动力机械的性能	45
2.2.4 动力传动	45
2.3 环境污染及防治措施	46
2.3.1 环境污染	46
2.3.2 防治措施	49
思考题及习题	51
参考文献	53
第3章 锅炉及换热器	54
3.1 锅炉原理	54
3.1.1 锅炉机组工作过程	54
3.1.2 锅炉参数、型号与分类	55
3.1.3 锅炉的安全和经济指标	58
3.2 锅炉受热面及传热	60
3.2.1 炉膛水冷壁	60
3.2.2 过热器与再热器	62
3.2.3 省煤器和空气预热器	64
3.3 燃料燃烧及热平衡	67
3.3.1 煤的成分及分析基准	68
3.3.2 煤的工业分析	69
3.3.3 煤的发热量	71
3.3.4 液体及气体燃料	72

3.3.5	燃烧过程的物质平衡及锅炉热平衡	73
3.3.6	锅炉的热平衡	74
3.3.7	锅炉热效率 η_{gl} 与燃料消耗量 B	76
3.4	锅炉污染物排放及控制	77
3.4.1	SO ₂ 的生成与控制	77
3.4.2	NO _x 的生成与控制	79
3.4.3	CO ₂ 的控制技术	82
3.4.4	可吸入颗粒物和重金属元素的排放控制	87
3.5	换热器	87
3.5.1	表面式换热器	88
3.5.2	换热器的设计与校核计算	101
3.5.3	传热的强化和隔热保温技术	103
	思考题及习题	105
	参考文献	105
第4章	叶轮叶片动力机械	107
4.1	叶轮机械能量转换原理	107
4.1.1	典型结构与级	107
4.1.2	叶轮机械的几何特性	111
4.1.3	叶轮机械基础理论方程式	118
4.1.4	涡轮通流部分和叶栅中的损失与级效率	123
4.2	蒸汽轮机	125
4.2.1	汽轮机主要组件及辅机	125
4.2.2	多级汽轮机工作过程及特点	132
4.2.3	多级汽轮机通流部分计算	133
4.3	燃气轮机装置	137
4.3.1	燃气轮机装置及工作原理	137
4.3.2	燃气轮机类型及结构	138
4.3.3	燃烧室与燃料供应	139
4.3.4	燃气轮机的应用领域	141
4.4	泵与风机	142
4.4.1	泵与风机的分类及主要参数	142
4.4.2	泵与风机的基本理论	143
4.4.3	泵与风机的性能	150
4.5	水轮机	152
4.5.1	水轮机的基本工作原理	152
4.5.2	反击式水轮机	153
4.5.3	反动式水轮机结构简介	154
4.6	涡轮机械的调节与保护	157
4.6.1	涡轮机调速系统工作原理	157

4.6.2	调节系统的静态特性	163
4.6.3	涡轮机保护系统	168
	思考题及习题	170
	参考文献	170
第5章	热力发电技术	172
5.1	概述	172
5.1.1	我国电力工业的发展与现状	172
5.1.2	热力发电技术发展动态	173
5.1.3	发电厂的类型	174
5.1.4	热力发电厂的基本生产流程	175
5.2	燃煤蒸汽发电	176
5.2.1	火电厂的热经济性评价	176
5.2.2	蒸汽参数及其循环	179
5.2.3	给水回热加热系统	185
5.2.4	给水除氧和发电厂的辅助汽水系统	188
5.2.5	火电厂热力系统	193
5.3	核能发电	196
5.3.1	核反应堆原理和类型	197
5.3.2	压水堆核电站	199
5.3.3	其他重要类型核电站	202
5.3.4	我国核电的发展	205
5.4	热电联产技术	210
5.4.1	热负荷及其载热质	210
5.4.2	热电厂总热耗量的分配及热经济性指标	213
5.4.3	热电厂对外供热系统	219
5.5	总能系统及联合循环发电	221
5.5.1	总能系统的概念	221
5.5.2	燃气—蒸汽联合循环	222
5.5.3	IGCC 与 PFBC-CC 的研究与开发	224
	思考题及习题	226
	参考文献	229
第6章	分布式发电技术	230
6.1	概论	230
6.1.1	分布式发电的概念	231
6.1.2	分布式发电的分类	233
6.1.3	分布式发电的效益	234
6.1.4	分布式发电对电力系统的影响	234
6.2	冷热联产发电	235
6.2.1	冷热电联产概论	235

6.2.2	冷热电联产的开发和现状	236
6.2.3	冷热电联供所采用的技术	238
6.2.4	冷热电联产的方案	240
6.2.5	冷热电联产的运行实例	243
6.3	风力发电	245
6.3.1	风力发电基本原理和结构	245
6.3.2	我国风力发电的现状和前景	247
6.3.3	风力发电系统的应用实例	250
6.4	太阳能发电	254
6.4.1	太阳能发电原理	254
6.4.2	太阳能发电系统组成和功能	254
6.4.3	太阳能发电的开发现状	256
6.5	燃料电池发电	263
6.5.1	燃料电池的原理和结构	263
6.5.2	燃料电池发电系统	268
6.5.3	研究与应用现状	268
6.6	分布式冷热电联供系统经济性分析	271
6.6.1	概论	271
6.6.2	CCHP 系统方案	271
6.6.3	系统方案比较	273
6.6.4	系统经济性分析	273
6.6.5	总结	276
	思考题及习题	278
	参考文献	278

第1章

绪 论

能源、材料、信息是当代国民经济发展的三大支柱。能源的开发和合理利用是整个社会可持续发展的源泉，是现代生产和生活的基础。从18世纪蒸汽机的发明产生第一次工业革命，到现代能源动力科学技术的进步促进全球经济迅速发展，都说明了能源动力发展状态标志着当时社会与科学技术的水平。一个国家的能源动力状况决定和表明了其竞争实力和综合国力。

能源与动力工程专业研究能量以热和功等形式在产生、转化、传递过程中的基本规律，以及在能源与动力方面应用的相关装置及其研究开发。

能源中消耗量最大、使用最广泛的是电能和热能。电能是一种便于传输和使用的清洁能源，因其有无可比拟的优越性而占有重要地位。我国电能的生产目前是火力发电占全国总发电量的比例较大，水力发电次之，核电和其他形式发电（如风力发电等）正在发展中。火电、核电、地热发电等一般都是通过热能、机械能（功）而产生电能，水力发电、风力发电等是利用流体的机械功转换得到的。热能除太阳能、地热等一次性热能外，大多是由燃料的化学能、核能转化而来的。热能转换为机械功后不都是用来发电，在许多情况下直接作为动力使用。热能和电能的产生及热与功在转化、传递过程中所利用的机械、设备和由它们组成的装置，是能源动力工程研究的主要内容之一。

火力（热力）发电厂是利用热能动力装置生产电能的工厂，它的热能动力循环常是以蒸汽为工质的蒸汽动力循环。图1-1为火力发电厂的生产过程示意图。锅炉中煤粉与来自空气预热器的热空气在炉膛内混合燃烧，将燃料的化学能转变为高温烟气的热能，热能通过锅炉的省煤器、水冷壁、过热器等受热面使水变为过热蒸汽；过热蒸汽推动汽轮机旋转，将热能转变成机械能，并通过发电机产生电能；汽轮机内膨胀做功后的蒸汽进入凝汽器内凝结成水；凝结水经过水泵送入低压加热器、除氧器、高压加热器，吸收汽轮机抽汽的热量后又回到锅炉。工质又返回初态，完成了一个闭合循环。

锅炉、汽轮机和发电机是火力发电厂的三大主件。锅炉中的燃烧设备是将燃料化学能转换为热能的部件，锅炉受热面从某种意义上讲是一种换热设备。因此，发电厂循环中的换热设备有省煤器、预热器、水冷壁、过热器、再热器、凝汽器、加热器等。汽轮机是一种与流体（蒸汽）作用的运动机械，属于与流体作用的运动机械还有水泵、送风机和引风机。

核电厂的热能动力循环中蒸汽热能的供给不用锅炉，取而代之的是核反应堆和热交换器

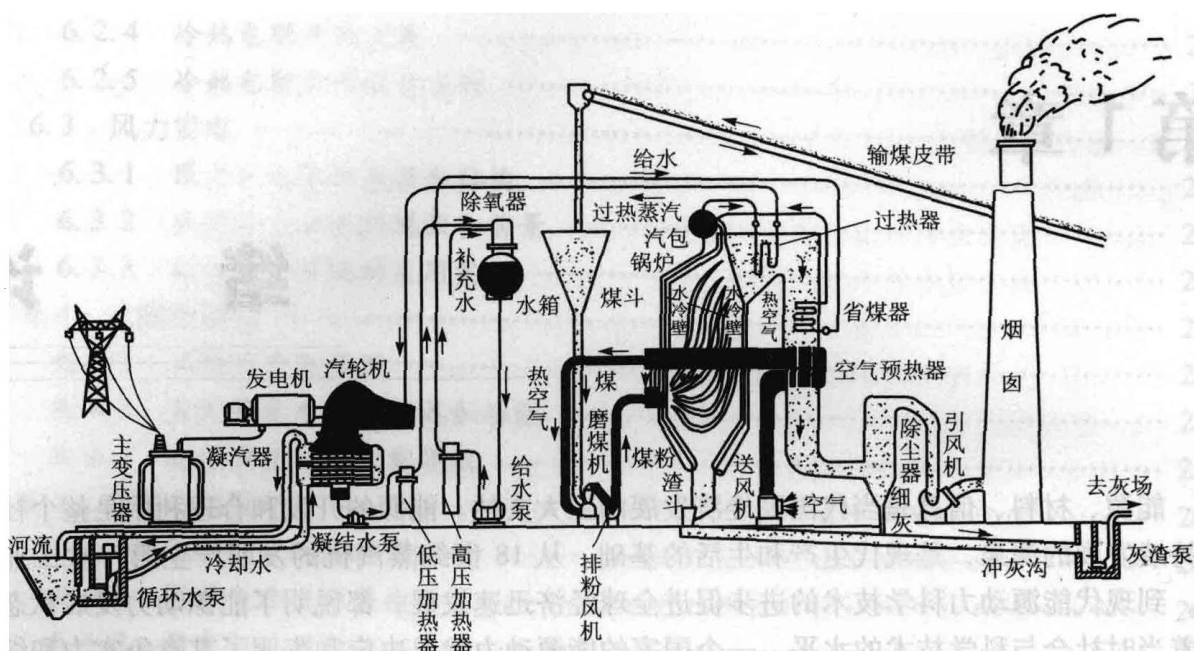


图 1-1 火力发电厂的生产过程示意图

(如图 1-2 所示)。因此,核电装置中也包括类似火力发电厂的主要机械、设备——与流体作用的运动机械和换热设备。

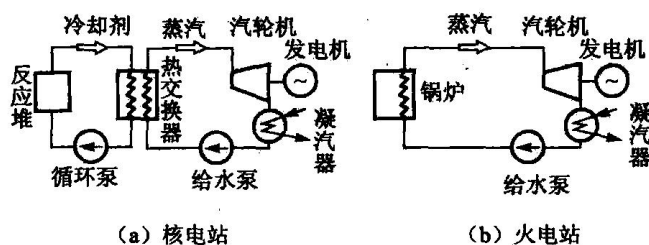


图 1-2 核电站与火电站系统示意图

水能通过水轮机转变成转轴的机械能,并带动发电机产生电能。水轮机是与流体作用的运动机械,水力发电厂的工质是水且一般无相变,温度变化也很小,利用的是水的动能和势能(机械能),最终转化为电能。

上述的汽轮机、水轮机输出机械功,可以带动发电机产生电能,也可以直接作为动力驱动其他机械,所以常常被称为动力机械。动力机械还包括内燃机、风力机、膨胀机等。燃气轮机是内燃机的一种形式,它又与蒸汽轮机同属于热力涡轮机。燃气轮机的工质是燃气而不是水蒸气,因而与蒸汽轮机装置相比,燃气轮机装置省去了锅炉、凝汽器、给水处理等大型设备。图 1-3 是燃气轮机装置简图,其中的部件也可分成两大类,一类是与流体作用的运动机械:涡轮机和压气(缩)机;另一类是静止不动的换热设备:如燃烧室等。其中,压缩机、涡轮机和燃烧室是燃气轮机装置中的三大部件。往复式内燃机是广泛应用的一种动力机械,其热力循环与燃气轮机装置类同。工质在汽缸内进行压缩、点火、燃烧、膨胀做功。压缩、膨胀与活塞和连杆运动相关,因此,内燃机是与流体作用的运动机械,其增压装置还

包括压气机、涡轮机。以上热力循环是通过工质膨胀将热能转变成机械功输出的循环，常称之为正循环。制冷装置的热力循环都是逆循环（如图1-4所示）。逆循环是输入机械功（或热能），对工质进行压缩而获得热量（热泵）或冷量（制冷）。制冷装置是通过消耗机械功（蒸汽压缩式制冷）或热量（吸收式制冷）来获得冷量（如图1-5所示）。蒸汽压缩式制冷装置的热力循环流程如图1-5（a）所示。该制冷装置中有四大部件：压缩（气）机、冷凝器、节流（膨胀）机构、蒸发器。在压缩机内输入的机械功转换成制冷工质的压力能和热能，压缩机出来的高温高压制冷工质蒸汽在冷凝器中对外放热冷却成饱和液体，液体通过节流膨胀成低温、低压湿蒸汽，湿蒸汽在蒸发器内蒸发吸热而使外界获得冷量，蒸发器出来的干蒸汽又回到压缩机。蒸发器、冷凝器是换热设备；压缩机是与流体作用的运动机械；在有的制冷装置中是通过膨胀机实现工质膨胀的〔如图1-5（c）所示〕，膨胀机也是与流体作用的运动机械。

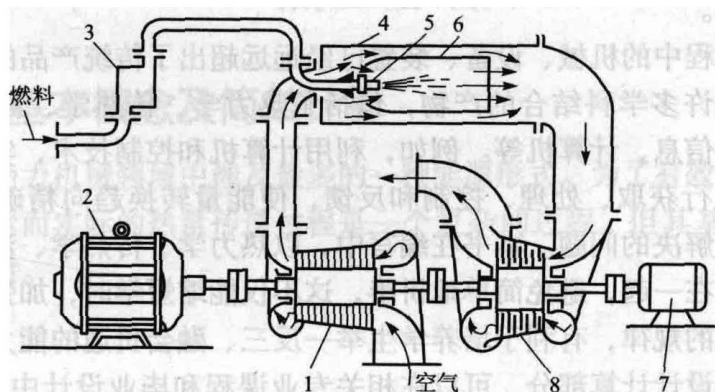


图 1-3 燃气轮机装置简图

1—压气机；2—发电机；3—燃料泵；4—燃烧室；5—喷嘴；6—燃烧区；7—启动电机；8—涡轮（透平）

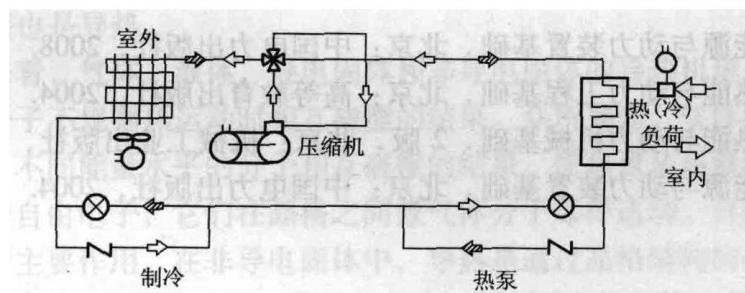


图 1-4 制冷装置和热泵装置的结构流程简图

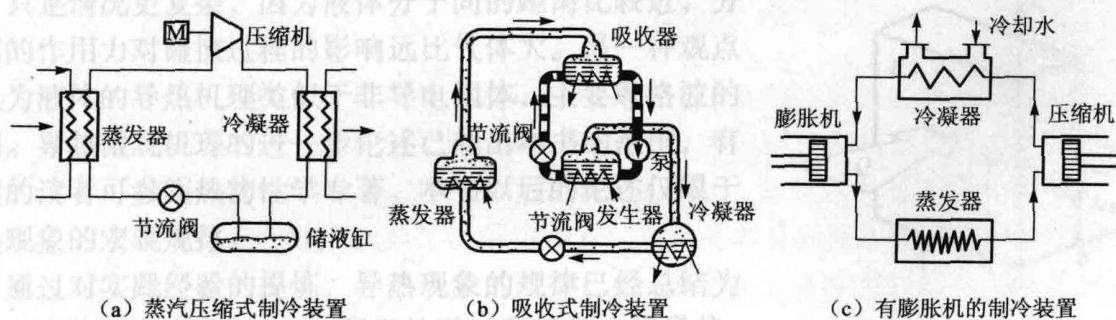


图 1-5 制冷装置简图

热泵装置的工作原理与制冷装置相同，但其目的是获得热量而不是冷量。透平膨胀机的工作原理与涡轮机完全相同，也可以看成是涡轮机在不同领域的应用形式。

由以上讨论可知，能源动力工程中的装置、机械、设备是相互关联的，具有共同的基础和基本原理，也有些相同或类似的内容，如在能量转换过程中，流体一般都要经历一系列的吸热、放热、压缩、膨胀等。因此，我们尝试将动力装置、机械、设备的一些相互关联的内容放在一起讨论，其目的是使学生能基本认识和系统了解能源动力工程中的主要机械、设备、装置的组成、结构、工作原理、性能及它们之间的共性。这样，既拓展了专业知识面，也为进一步深入学习专业课打下基础。

能源动力工程中的机械、换热设备的基础是流体和热力学，先修课程是流体力学、热力学、传热学。流体和热力学在工程中的应用是非常广泛的，能源动力工程中的机械、换热设备仅是其应用的一个重要领域，学习该课程不仅可以掌握专业知识，而且可以加深对流体和热力学的进一步理解。

现代能源动力工程中的机械、设备、装置已经远远超出了传统产品的范畴，已发展成技术密集型产品。它是许多学科结合的产物，包括了热力学、传热学、流体力学、材料、工艺、机械学、控制、信息、计算机等。例如，利用计算机和控制技术，实时地对流动和热力过程中的信息参数进行获取、处理、控制和反馈，使能量转换趋向精确化、最佳化、理想化，解决了过去很难解决的问题。本书在编写中，以热力学、传热学、流体力学为基础，力求将共同的内容融合在一起，避免简单地拼凑，这不仅能缩短学时，加强知识的系统性，而且符合学习掌握知识的规律，有利于培养学生举一反三、融会贯通的能力。对于有些比较具体的专业内容，例如设计计算部分，可以在相关专业课程和毕业设计中进一步学习和训练；而相关的其他学科知识，已安排在有关课程中。

参考文献

- [1] 何国庚. 能源与动力装置基础. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 翁史烈. 热能与动力工程基础. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] 王中铮. 热能与动力机械基础. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 蔡兆麟. 能源与动力装置基础. 北京: 中国电力出版社, 2004.

第2章

基本概念及基础知识

2.1 热工基础知识

2.1.1 传热学基本概念及简单计算

热量是热能与动力机械领域中涉及最多的一种能源形式。为了有效地控制热量传递必须掌握传热的规律，然而实际的热量传递过程是一个复杂的过程，但其基本方式不外乎三种：导热、对流和热辐射。

2.1.1.1 导热

物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动进行的热量传递称为导热。例如，窑炉炉衬温度高于炉墙外壳，炉衬内侧向炉墙外壳的热量传递是以导热方式完成的；铸件凝固冷却时，铸件内部的温度高于外界，铸件内部向其外侧及砂型中的热量传递也是导热。

从微观角度来看，气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。气体中，导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。众所周知，气体的温度越高，其分子的平均动能越大。不同能量水平的分子相互碰撞的结果，使热量从高温向低温处传递。导电固体中有相当多的自由电子，它们在晶格之间像气体分子那样运动。自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。在非导电固体中，导热是通过晶格结构的振动，即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。晶格结构振动的传递在文献中常称为格波（又称声子）。至于液体中的导热机理，还存在着不同的观点。有一种观点认为液体定性上类似于气体，只是情况更复杂，因为液体分子间的距离比较近，分子间的作用力对碰撞过程的影响远比气体大。另一种观点则认为液体的导热机理类似于非导电固体，主要靠格波的作用。导热微观机理的进一步论述已超出本书的范围，有兴趣的读者可参阅热物性学专著。本书以后的论述仅限于导热现象的宏观规律。

通过对实践经验的提炼，导热现象的规律已经总结为傅里叶定律。考察如图 2-1 所示的通过平板的一维导热。

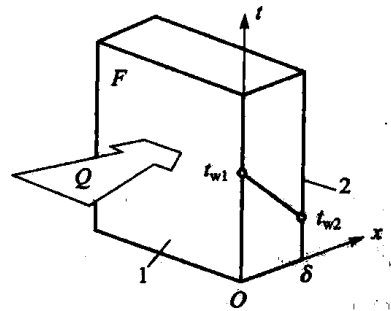


图 2-1 通过平板的一维导热

平板的两个表面均维持各自的均匀温度。这是一个一维导热问题。对于 x 方向上任意一个厚度为 dx 的微元层, 根据傅里叶定律, 单位时间内通过该层的导热热量与当地的温度变化率及平板截面积 F 成正比, 即

$$Q = -\lambda F \frac{dt}{dx} \quad (\text{W}) \quad (2-1)$$

式中, λ 是比例系数, 称为导热系数 (又称热导率); 负号表示热量传递的方向与温度升高的方向相反。

单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量, 记为 Q , 单位为 W 。单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度 (又称比热流), 记为 q , 单位为 W/m^2 。傅里叶定律按热流密度形式表示则为

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (2-2)$$

式 (2-1) 和式 (2-2) 是一维稳态导热时傅里叶定律的数学表达式。

2.1.1.2 对流

对流是指流体各部分之间发生相对位移, 冷热流体相互掺混所引起的热量传递方式。对流仅能发生在流体中, 而且必然伴随着导热。工程上常遇到的不是单纯对流方式, 而是流体流过另一物体表面时对流和导热联合起作用的方式。后者称为对流换热, 以区别于单纯对流。值得指出的是, 虽然对流作为一种基本的热量传递方式是明确的, 但本书不讨论单纯对流, 而只讨论有实用意义的对流换热。

对流换热按引起流体流动的不同原因可区分为自然对流与强制对流两大类。自然对流是由于流体冷、热各部分密度不同而引起的。暖气片表面附近热空气的向上流动就是一个例子。如果流体的流动是由于水泵、风机或其他压差作用所造成的, 则称为强制对流。例如, 油冷却器、空气预热器内流体分别由水泵 (油泵)、风机驱动, 它们都属于强制对流。另外, 沸腾及凝结也属于对流换热, 融化及凝固则除导热机理外也常带有对流换热因素, 它们都有伴随着相变的对流换热现象。

对流换热的基本计算式是牛顿冷却公式:

$$\text{流体被加热时} \quad q = \alpha(t_w - t_f) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (2-3)$$

$$\text{流体被冷却时} \quad q = \alpha(t_f - t_w) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (2-4)$$

式中, t_w 及 t_f 分别为壁面温度及流体温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。如果把温差 (又称温压) 记为 Δt , 并约定永远取正值, 则牛顿冷却公式可表示为

$$q = \alpha \Delta t \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (2-5)$$

$$Q = F \alpha \Delta t \quad (\text{W}) \quad (2-6)$$

式中, 比例系数 α 称为对流换热系数, 简称换热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关。它不仅取决于流体的物性 (λ 、 μ 、 ρ 、 C_p 等) 及换热表面的形状与布置, 而且与流速有密切的关系。牛顿冷却公式并不是揭示影响换热系数的各种复杂因素的具体关系式, 它仅仅给出了换热系数的定义。各种场合下换热系数 α 的确定请参阅传热学有关的专著。

2.1.1.3 热辐射

物体通过电磁波传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能，其中因热的原因而发出辐射的现象称为热辐射。本书以后论述的辐射一律指热辐射。

自然界中各个物体都不停地向空间发出热辐射，同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。发出与吸收过程的综合效果造成了物体间以辐射方式进行的热量传递，即辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时，辐射换热量等于零，但这是动态平衡，发出与吸收辐射的过程仍在不停地进行。

热辐射可以在真空中传播，而导热及对流两种传递热量的方式在有物质存在的前提下才能实现。这是热辐射区别于导热及对流，而是另一种独立的基本热量传递方式的有力说明。当两个物体被真空隔开时，例如地球与太阳之间，导热与对流都不会发生，只能进行辐射换热。辐射换热区别于导热及对流的另一个特点是，它不仅产生能量的转移，还伴随着能量形式的转化，即发射时热能转换为辐射能，而被吸收时又将辐射能转换为热能。

试验表明，物体的辐射能力与温度有关，同一温度下不同物体的发射和吸收能力也大不一样。在探索热辐射规律的过程中，一种称为绝对黑体（简称黑体）的理想物体的概念具有重大意义。黑体的吸收本领和发射本领在同温度物体中是最大的。

黑体单位时间内发射出的辐射热流量由斯蒂芬-玻尔兹曼定律揭示：

$$Q = F\sigma_b T^4 \quad (\text{W}) \quad (2-7)$$

式中， T 为黑体的热力学温度，单位为 K； σ_b 为黑体辐射常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； F 为表面积，单位为 m^2 。斯蒂芬-玻尔兹曼定律是由理论导出，并经试验证实的规律。它又称为辐射四次方定律，是热辐射计算的基础。一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的值。实际物体发射出的热流量总可以采用斯蒂芬-玻尔兹曼定律的经验修正式来计算：

$$Q = \varepsilon F\sigma_b T^4 \quad (\text{W}) \quad (2-8)$$

式中， ε 称为该物体的发射率（俗称黑度），其值总小于 1，它与物体的种类及表面状态有关，传热学有关的专著中有进一步讨论。其余符号的意义同式 (2-7)。

工程计算往往要在计算物体自身发射的辐射热流量的基础上，进一步计算物体与周围物体的辐射换热。换句话说，要算收支总账。传热学有关的专著中有详细论述。

三种基本热量传递方式由于机理不同，各自遵循不同的规律，依次分开论述比较适宜。不过应该注意到，在工程问题中，有时也存在两种及以上热量传递基本方式同时出现的场合。例如，一块高温钢板在厂房中的冷却散热，既有辐射换热方式，也有对流换热（自然对流换热）方式。两种方式以并联的形式出现，两种方式散热热流量的叠加总和等于总的散热热流量。对这种场合，就不能只顾一种方式而遗漏另一种方式。

最后应当指出的是，傅里叶定律、牛顿冷却公式及斯蒂芬-玻尔兹曼定律对稳态或非稳态过程都是适用的。对于非稳态过程，式 (2-1)、式 (2-6) 及式 (2-7) 中的温度当然是瞬时值，而且由于温度不仅是 x 的函数，式 (2-1) 中的 dt/dx 应改为 $\partial t/\partial x$ 。

例 2-1 一块厚 50 mm 的平板，两侧表面分别维持在 $t_{w1} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $t_{w2} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试求下列条件下导热的热流密度：

- (1) 材料为铜， $\lambda = 389 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ；
- (2) 材料为灰铸铁， $\lambda = 35.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ；

(3) 材料为铬砖, $\lambda = 5.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

解 参见图 2-1, 据式 (2-2) 有

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

在稳态过程中, 垂直于 x 轴的任一截面上的热流密度是相等的, 即 q 是常量。将上式分离变量并积分得

$$q \int_0^\delta dx = -\lambda \int_{t_{w1}}^{t_{w2}} dt$$

$$qx \Big|_0^\delta = -\lambda t \Big|_{t_{w1}}^{t_{w2}}$$

于是

$$q = \frac{-\lambda(t_{w2} - t_{w1})}{\delta} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

这是当导热系数为常数时一维稳态导热的热流密度计算式。将已知数值代入得

铜 $q = 389 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 1.56 \times 10^6 \text{ W}/\text{m}^2$

灰铸铁 $q = 35.8 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 1.43 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^2$

铬砖 $q = 5.04 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 2.02 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2$

例 2-2 一块发射率 $\varepsilon = 0.8$ 的钢板, 温度为 127°C 。试计算钢板发射出的热流密度 (即单位面积发射出的辐射热流量)。

解 按式 (2-8), 钢板发射出的热流密度为

$$q = \varepsilon \sigma_b T^4 = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (273 + 127)^4 = 1160 \text{ W}/\text{m}^2$$

例 2-3 例 2-2 中的钢板除本身发射出的辐射能散热外,

(1) 还有什么其他散热方式?

(2) 已知 $\alpha = 7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 钢板周围的空气温度为 27°C , 试求自然对流散热的热流密度。

解 (1) 还有自然对流散热方式。

(2) 自然对流散热按牛顿冷却公式 (2-3) 计算:

$$q = \alpha(t_w - t_f) = 7 \times (127 - 27) = 700 \text{ W}/\text{m}^2$$

另外需要说明的是, 本书采用我国法定计量单位。它是以国际单位制为基础, 适当增加一些其他单位构成的。国际单位制简称 SI。法定计量单位的基本单位与国际单位制相同, 它们是长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量及光强度共 7 个基本物理量的单位。单位名称及符号分别为米 [m]、千克 [kg]、秒 [s]、安培 [A]、开尔文 [K]、摩尔 [mol] 及坎德拉 [cd]。我国的法定计量单位与国际单位制一样, 有很多优点, 如各种不同形式的能量, 诸如力学中的机械能、电学中的电能、热学中的热能等, 均无一例外地采用同一个单位——焦耳 [J], 消除了其他单位制中不同种类能量单位的换算。

鉴于现存工程单位制的资料在相当长的一段时期内仍有参考价值, 因此读者掌握工程单位制与我国法定计量单位间的换算仍有必要。工程单位制以长度、时间、力作为基本量, 针对热科学问题又补充了温度及热量作为基本量。这五个基本量的常用单位分别是 m、s、

kg、℃及 kcal。在物理学等先修课中，读者已熟悉压力、动力黏度等物理量的换算。这里着重补充关于能量及与能量有关的一些单位换算的要点。

我国法定计量单位中，能量的单位为焦耳 [J] ($1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$)，功率的单位为瓦特 [W] ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$)，比它们大 1 000 倍的单位分别是千焦耳 [kJ] 与千瓦特 [kW]。工程单位制中 1 kcal 折合 4.186 8 kJ。据此，传热学中经常遇到的 kcal/h 这一单位组合可作如下换算：

$$1 \text{ kcal/h} = \frac{4.1868 \times 10^3 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 1.163 \text{ J/s} = 1.163 \text{ W}$$

因此，工程单位制中包含 kcal/h 这一单位组合的物理量，如 Q 、 q 、 λ 、 α 、 k 等各乘以 1.163 即可换算为国际单位制单位。

2.1.2 工程热力学基本原理

能的概念与能量转换和守恒定律是热力学的基础。热力学第一定律是能量转换和守恒定律在热力学上的应用，它确定了热能与其他形式能量相互转换时在数量上的关系。热力学第一定律不仅是研究热力学的主要依据之一，也是分析计算能量转换的基本方程。

2.1.2.1 热力学第一定律的实质

能量转换和守恒定律指出：在自然界，一切物质都具有能量。能量有各种不同的形式，且可以从一种形式转化为另一种形式。在转化中，能的总量保持不变。

能量转换和守恒定律不是从任何理论推导出来的，而是人类在长期的生产斗争和科学实验中积累的丰富经验总结，并为无数实践所证实。它是自然现象中最普遍、最基本的规律之一，普遍适用于机械的、热的、电磁的、原子的、化学的、生物的变化过程。物理学中的功能原理，工程力学中的机械能守恒定律等，其实质都是能量转换和守恒定律。热力学第一定律就是能量转换和守恒定律在热现象上的应用。本课程所研究的范围，主要是热能和机械能的相互转换。

热力学第一定律可以表述为：“热可以变为功，功也可以变为热。一定量的热消失时，必产生与之数量相当的功；消耗一定量的功时，也必出现相当数量的热。”

用数学形式表达，即

$$Q = AW$$

$$\text{或} \quad W = JQ \quad (2-9)$$

式中， A 和 J 是因所采用的热和功的能量单位不同而有的转换系数，称为热功量。

在我国的法定计量单位中，热与功采用相同的单位，即焦耳。因此，式 (2-9) 中的转换系数 $A = 1/J = 1$ ，从而式 (2-9) 可写成下列形式：

$$Q = W \quad (2-10)$$

如热的单位为卡，功的单位为千克力·米，由实验测得

$$A = \frac{1}{426.9} \text{ kcal/ (kgf} \cdot \text{m)}$$

$$\text{或} \quad J = 426.9 \text{ kgf} \cdot \text{m/kcal}$$

在一般热功计算中， J 可取 427 kgf·m/kcal。