

普通高等教育“十二五”规划教材

# 热能与动力 工程概论

主编 吕太 副主编 何伯述 郑建祥



2670256

TK11  
14

普通高等教育“十二五”规划

# 热能与动力工程概论

主 编 吕 太  
副主编 何伯述 郑建祥  
参 编 樊保国 沈祥智 武卫东  
主 审 陆慧林



机械工业出版社

8850788

本书系统地阐述了热能与动力工程领域的基本理论与发展趋势。本书内容包括绪论、锅炉及换热器、叶片式流体机械、容积式流体机械、水力发电、制冷与冷冻冷藏工程、新能源利用技术、热能动力装置通用设备、热力发电原理与系统热能动力装置与环境保护。

本书为高等学校热能与动力工程专业的必修课教材，也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

机械工业出版社  
林慧斌 审

### 图书在版编目(CIP)数据

热能与动力工程概论/吕太主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 8  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 39618 - 5

I. ①热… II. ①吕… III. ①热能—高等学校—教材②动力工程—高等学校—教材  
IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 205958 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:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 程足芬  
版式设计:姜 婷 责任校对:樊钟英  
封面设计:张 静 责任印制:杨 曦  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷  
2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 19.75 印张 · 487 千字  
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 39618 - 5  
定价: 39.00 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

社服务中心 : (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部 : (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部 : (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面防伪标均为盗版

# 普通高等教育规划教材

## 编审委员会

(按姓氏笔画排列)

- |         |          |     |            |
|---------|----------|-----|------------|
| 主任: 郭烈锦 | 西安交通大学   |     |            |
| 副主任: 王立 | 北京科技大学   | 张华  | 上海理工大学     |
|         | 上海交通大学   | 沈胜强 | 大连理工大学     |
|         | 机械工业出版社  | 高翔  | 浙江大学       |
|         | 重庆大学     |     |            |
| 委员: 王军  | 华中科技大学   | 杨莱  | 上海理工大学     |
|         | 北京石油化工学院 | 杨昭  | 天津大学       |
|         | 山西大学     | 汪建文 | 内蒙古工业大学    |
|         | 重庆大学     | 陆靓燕 | 武汉工程大学     |
|         | 北京建筑工程学院 | 周玉明 | 重庆科技学院     |
|         | 北京工业大学   | 周静伟 | 中国计量学院     |
|         | 东北电力大学   | 金苏敏 | 南京工业大学     |
|         | 山东大学     | 姜水生 | 南昌大学       |
|         | 河海大学     | 闻建龙 | 江苏大学       |
|         | 兰州理工大学   | 徐斌  | 河南科技大学     |
|         | 北京交通大学   | 袁文华 | 邵阳学院       |
|         | 集美大学     | 袁镇福 | 浙江大学宁波理工学院 |
|         | 浙江大学     | 郭培红 | 河南理工大学     |
|         | 上海交通大学   | 高青  | 吉林大学       |
|         | 北京理工大学   | 崔海亭 | 河北科技大学     |
|         | 大连海洋大学   | 章学来 | 上海海事大学     |
|         | 西南交通大学   | 程有凯 | 大连海洋大学     |
|         | 兰州理工大学   | 舒水明 | 华中科技大学     |
|         | 大连交通大学   | 谢晶  | 上海海洋大学     |
|         | 天津大学     | 谢诞梅 | 武汉大学       |
|         | 华北电力大学   | 颜伏伍 | 武汉理工大学     |
|         | 河北工业大学   | 黎苏  | 河北工业大学     |
| 秘书: 蔡开颖 | 机械工业出版社  |     |            |

# 前 言

热能与动力工程是能源利用的一个重要领域，掌握其基本规律，就有可能把各种形式的一次能源高效、清洁地转化为人类需要的热能、机械能、电能，维持社会的可持续发展。在长期的实践中，热能与动力工程的各个分支，包括动力机械、制冷设备、新能源等都得到了迅猛发展，各种技术性能指标日新月异。但是，国民经济的快速发展、生活质量的不断提高、国防力量的进一步增强都期待着热能与动力工程的更大变革与创新。

“热能与动力工程概论”是高等学校热能动力工程专业的必修课程。本书全面系统地阐述了热能动力工程学科所涉及的锅炉设备、叶片式流体机械、容积式流体机械、水力发电、制冷与冷冻冷藏装置、新能源利用、热能动力装置等方面内容，分析了它们的基本工作原理、基本性能、基本系统、控制与安全性能，内容覆盖面较宽且具有相当的深度。本书注重介绍热能动力设备中基础理论的应用以及新技术的发展状况和发展方向，启迪学生对各类热能机械装置的知识联系，拓展学生的视野。本书取材尽量反映我国热能动力工程的设计、制造、运行和科学研究方面的新成果，同时又注意反映国外该领域科学技术的新进展。

本书由东北电力大学吕太教授任主编，由北京交通大学何伯述教授、东北电力大学郑建祥副教授任副主编，参加编写的有太原理工大学樊保国副教授、浙江大学宁波理工学院沈祥智副教授和上海理工大学武卫东副教授。哈尔滨工业大学陆慧林教授担任主审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表谢意。

本书作为热能与动力工程专业的必修课教材，也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

由于编者水平有限，时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言		
<b>第一章 绪论</b> .....	1	
第一节  热能与动力工程概述 .....	1	
第二节  能源的有效利用与评价 .....	2	
第三节  生产过程中的能量转化过程 .....	11	
第四节  热能与动力工程的发展趋势 .....	17	
习题与思考题 .....	18	
<b>第二章 锅炉及换热器</b> .....	19	
第一节  锅炉设备基本概念 .....	19	
第二节  锅炉燃料 .....	25	
第三节  锅炉燃烧设备 .....	36	
第四节  锅炉受热面及传热过程 .....	47	
第五节  换热器形式与工作原理 .....	57	
习题与思考题 .....	63	
<b>第三章 叶片式流体机械</b> .....	64	
第一节  叶片式流体机械的结构和应用范围 .....	64	
第二节  叶片式流体机械的主要性能参数 .....	70	
第三节  燃气轮机的结构和工作原理 .....	74	
第四节  蒸汽轮机的结构和工作原理 .....	83	
习题与思考题 .....	99	
<b>第四章 容积式流体机械</b> .....	100	
第一节  容积式流体机械的结构和应用范围 .....	100	
第二节  容积式流体机械的主要性能参数 .....	118	
第三节  汽油机的结构和工作原理 .....	122	
第四节  柴油机的结构和工作原理 .....	136	
习题与思考题 .....	140	
<b>第五章 水力发电</b> .....	141	
第一节  水能利用和水电站基本类型 .....	141	
第二节  水电站水轮机设备 .....	149	
第三节  水轮机工作原理及调节 .....	159	
第四节  水电站主要经济指标 .....	166	
习题与思考题 .....	167	
<b>第六章 制冷与冷冻冷藏工程</b> .....	169	
第一节  制冷基本知识 .....	169	
第二节  制冷方法与制冷系统 .....	171	
第三节  食品知识及冷藏原理 .....	184	
第四节  制冷剂、载冷剂和润滑油 .....	188	
第五节  热泵基本原理 .....	192	
习题与思考题 .....	194	
<b>第七章 新能源利用技术</b> .....	196	
第一节  太阳能利用技术 .....	196	
第二节  风能利用技术 .....	205	
第三节  地热能利用技术 .....	209	
第四节  生物质能利用技术 .....	212	
第五节  海洋能利用技术 .....	217	
第六节  其他能源利用 .....	223	
习题与思考题 .....	226	
<b>第八章 热动力装置通用设备</b> .....	228	
第一节  辅助机械概述 .....	228	
第二节  离心式风机与轴流式风机 .....	231	
第三节  水泵 .....	240	
第四节  燃料制备设备与系统 .....	251	
习题与思考题 .....	261	
<b>第九章 热力发电原理与系统</b> .....	262	
第一节  热力发电基本循环 .....	262	
第二节  化石燃料发电技术 .....	264	
第三节  核燃料发电技术 .....	268	
第四节  热电联产技术 .....	272	
第五节  新型联合循环发电技术 .....	273	
习题与思考题 .....	280	
<b>第十章 热动力装置与环境保护</b> .....	281	
第一节  环境保护与低碳经济 .....	281	
第二节  除尘技术基础与设备 .....	284	
第三节  气态污染物的净化方法 .....	295	
第四节  固体废物的无害化处理 .....	303	
习题与思考题 .....	307	
<b>参考文献</b> .....	308	

# 第一章 绪 论

## 第一节 热能与动力工程概述

热能和动力的使用不但使人类摆脱了远古社会的低级生活方式，进入了现代文明社会，而且已经成为现代人类社会生产生活中的必要组成部分。

现代人的日常生活总要烧水、做饭、洗衣、洗浴。这需要使用热能。许多产品的生产过程需要使用蒸汽才能完成生产。例如，食品加工和医药生产需要利用具有一定压力和温度的蒸汽来完成蒸、煮和消毒工艺；衣料的染色和整理加工需要利用蒸汽来完成蒸、煮和热定形工艺。

通过燃烧煤气或液化石油气产生热能已经很普遍，比燃烧煤炭更方便卫生。很多城市建设了庞大的管道输送网，从煤气供应站点通过管道网络直接向居民供应煤气。另外，家庭中应用较多的热能装备，如电热炊具和热水器消耗电能产生热能，使用起来比燃烧煤气或液化石油气更方便，而且没有污染，只是使用电能的成本比使用煤气或液化石油气要高。另外，采暖也是使用热能的一个主要方面。采暖在寒冷地区是必需的，往往建设有采暖供热管道网络。在中国目前还主要靠燃烧煤炭得到采暖的热能。

关于使用动力的过程，首先是制造能够产生动力的设备，然后将设备安装在需要动力的地方使用。例如，电动机就是一种动力设备，可以将电能转换为具有一定旋转速度和转动转矩的机械旋转运动，从而可以带动其他工作机转动。许多生产机械以电动机为动力设备，用电动机驱动工作机进行产品生产，例如车床、铣床、刨床、纺织机、织布机。除电动机以外，现代常用的动力设备还有：以汽油为燃料的内燃机（称为汽油机）、以柴油为燃料的内燃机（称为柴油机）、以汽油或天然气为燃料的燃气轮机、以煤炭或石油为燃料的锅炉-汽轮机动力装置、靠水力转动的水轮机等。这些动力设备已经广泛应用在社会生产的各行各业。在铁路运输方面，为重达数千吨的列车提供牵引力的动力机车主要是内燃机车和电气机车，内燃机车上安装的是柴油机，电气机车上安装的是电动机。在公路交通方面，客车一般采用汽油机作发动机，因为汽油机的噪声比较小；货车一般采用柴油机作发动机，因为在相同的耗油量时柴油机的功率大。在航空运输方面，各国超声速飞机采用的动力设备是以汽油为燃料的燃气轮机，又称为涡轮喷气发动机；在航海运输方面，航海轮船的动力设备主要是柴油机和汽油机；在能源生产方面，有燃烧煤炭、石油、天然气的火力发电装置，还有水力发电装置；在工业生产方面，如上所述，绝大多数工业生产机械是由电动机驱动的，因为电动机价格低廉，操作简便；在农业生产方面，播种机、耕作机和收割机的动力设备主要是汽油机或柴油机，拖拉机的动力设备是柴油机；在生活方面，家庭常用设备，如洗衣机、冰箱和空调等均由电动机驱动。

可见，热能和动力的使用已经深入到人类社会的方方面面。如果人类停止使用热能和动力，或者某种原因不能提供足够的热能和动力，人类社会将无法正常运转。

随着社会生产的专业化，每种动力设备都由专门的工厂制造，并且在工程技术研究领域也已经形成了如下几个相对独立的专业研究领域：

- (1) 热力发动机 研究将燃料燃烧的热能转换为机械能的方法。
- (2) 水利水电动力工程 研究将水的机械能（动能和势能）转变为电能的工程方法。
- (3) 流体机械工程 是上述各研究领域的基础工程技术。
- (4) 低温技术与冷冻冷藏工程 研究各种低温制冷和食品冷冻冷藏方面的技术。
- (5) 热能动力工程 研究热能转化和利用的方法。
- (6) 工程热物理 研究涉及热工性能和热力过程方面的物理知识。

## 第二节 能源的有效利用与评价

### 一、火力发电

在火力发电厂（火电厂）中，以煤、石油、天然气等矿物燃料作为能源，以水蒸气作为工质完成蒸汽动力循环。火电厂生产的电能需要经过多次能量转换过程：首先由锅炉将燃料燃烧释放出的化学能通过受热面使给水加热、蒸发、过热，转变为蒸汽的热能；再由汽轮机将蒸汽的热能转变为高速旋转的机械能；然后由汽轮机带动发电机将机械能转变为源源不断地向外界输送的电能。

图 1-1 所示为凝汽式燃煤火电厂基本生产流程示意图。从图可以看到，燃煤由安装在斜煤棚内的带式输煤机送到原煤斗，再送入磨煤机制成煤粉，经排粉风机送入锅炉燃烧。煤粉燃烧时所需要的空气由送风机送至布置在锅炉尾部的空气预热器加热。热空气的一部分（一次风）通过排粉风机进入磨煤机，用以加热、干燥煤粉，连同煤粉一同经燃烧器进入炉膛；另一部分（二次风）经燃烧器直接进入炉膛参与燃烧。煤粉在炉膛燃烧时将化学能转

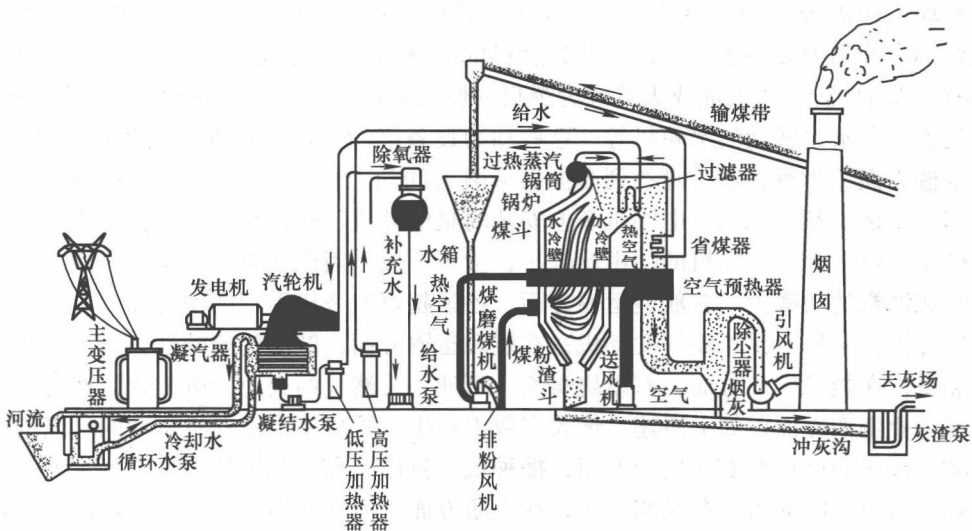


图 1-1 火电厂的生产过程图



化为热能，放出大量热量。燃烧所产生的高温烟气从炉膛依次通过布置在炉顶水平烟道和尾部烟道的过热器、再热器、省煤器和空气预热器，最后经除尘设备、引风机、烟囱排放到高空大气中。燃烧中的灰分及未完全燃烧的炭粒将落到炉膛底部的渣斗内，同从除尘器中除下的细灰一起落入地沟被高压水冲走，经灰渣泵最后送到灰场。

作为工质的给水由给水泵升压后经汽轮机高压加热器（大机组有3~4级）送至锅炉省煤器，给水在省煤器中吸收尾部烟道中烟气的热量后进入锅筒，然后从布置在炉墙外的下降管经下集箱进入布置在炉膛四壁的水冷壁，吸收煤粉燃烧时的辐射热。给水流经水冷壁时，有一部分水蒸发成蒸汽，并以汽水混合物的形式流入锅筒。汽水混合物在锅筒中经分离后，蒸汽（饱和蒸汽）进入过热器进行过热后形成过热蒸汽。过热蒸汽由主蒸汽管送入汽轮机做功，对于中间再热汽轮机来说，过热蒸汽首先进入高压缸做功，然后从高压缸排出的蒸汽又送回锅炉再热器进行再过热，在温度提高到和新蒸汽相同温度后再送入汽轮机中，低压缸继续膨胀做功，带动发电机发电。在汽轮机中做过功的乏汽最后排入凝汽器凝结成水，并流入凝汽器底部的热井，经凝结水泵、低压加热器（大机组有3~4级）送入除氧器除氧后流入水箱，重新由给水泵升压后送入锅炉吸热，以循环使用。

## 二、核能发电

利用常规能源发电，需要煤、石油、天然气等矿物燃料。但这些天然矿物燃料的储藏量是有限的。在开发利用水力资源发电的同时，利用核能发电将是发展能源的战略重点。和火力发电相比，核电具有以下优点。

1) 核能发电不像化石燃料发电那样排放巨量的污染物质到大气中，因此核能发电不会造成空气污染。

2) 核能发电不会产生加重地球温室效应的二氧化碳。

3) 核能发电所使用的铀燃料，除了发电外，没有其他的用途。

4) 核燃料能量密度比起化石燃料高上几百万倍，故核能电厂所使用的燃料体积小，运输与储存都很方便，一座1000MW的核能电厂一年只需30t的铀燃料，一航次的飞机就可以完成运送。

5) 核能发电的成本中，燃料费用所占的比例较低，核能发电的成本较不易受到国际经济情势影响，故发电成本比其他发电方法稳定。

另外，在核电厂中除锅炉被核反应堆及蒸汽发生器所取代外，其他设备和系统与普通火电厂基本相同。

核电厂是将核燃料在可控自持裂变反应中产生的能量转变为电能的电站。核电厂利用的热能是核反应堆中释放出来的。当前应用最广的是U235。核电厂用的核燃料主要是二氧化铀。

在全世界范围内，核电由于资源消耗少、环境影响小和供应能力强等优点，日益被公众了解和接受，成为与火电、水电并称的世界三大电力供应支柱。核能的和平利用在世界上已有50多年的历史。截至2006年1月4日，全世界共有31个国家的443台核电机组在运行，装机容量达3.7亿kW。法国是世界上核发电比例最高的国家，2004年的核发电量占当年总发电量的78%，而美国和俄罗斯也分别达到了20%和16%。目前亚洲正在运行的109台核电机组中，日本有56台，韩国有20台。

1991年12月15日,我国自行设计、建造的秦山核电站成功并网发电,结束了我国大陆无核电的历史,我国核工业的发展也迈上了一个新台阶,成为世界上第七个能够自行设计、建造核电站的国家。1994年2月和5月,全部引进法国设备和技术的大亚湾核电站,两台装机容量百万千瓦的压水堆核电机组投入商业运行。2002年5月和2003年1月,岭澳一期两台装机容量百万千瓦的压水堆核电机组投入商业运行。正在建设之中的核电站有岭澳二期、田湾核电站和大连红沿河核电站。截至2006年底,我国大陆有装机容量788万kW的10台核电机组在运行,多年平均发电量达530.82亿kW·h,已占全国总发电量的2.2%,但远低于世界平均水平。

我国正式颁布的2005~2020年核电发展中长期规划提出,到2020年我国要建成核电4000万kW,占届时总装机容量的4%;此外还有1800万kW的在建工程。

### 三、水力发电

水能资源是人类最早开发的自然能源,我国是世界上最早开发水能资源的国家之一。目前水能利用的形式基本上就是水力发电,直接用水能驱动工作机的情况是非常少的。尽管水能资源的开发已有几千年的历史,但在现代社会,水能资源的开发仍然具有极其重要的价值,水能资源在整个能源构成中具有不可替代的地位。

#### 1. 我国水能资源蕴藏量及特点

水能资源是指以位能、压能和动能等形式存在于水体中的能量资源,也称水力资源。广义的水能资源包括河流水能、潮汐水能、波浪能和海洋热能资源等;狭义的水能资源指河流水能资源。在自然状态下,水能资源的能量消耗于克服水流阻力,冲刷河床、海岸,搬运泥沙和漂浮物等,采取一定的工程技术措施后,可将水能转变为机械能或电能,为人类的生产发展和生活需求提供动力。

我国幅员辽阔,江河纵横,湖泊众多,蕴藏着巨大的水能资源,是世界上水能资源最丰富的国家,且水电开发建设的自然条件优越。根据1980年我国水能资源普查(除台湾省外),全国水能资源理论蕴藏量按多年平均流量计算为6.76047亿kW,相当于年发电量5.9222万亿kW·h,居世界首位。

经过最新的经济、技术、环境综合评估、筛选等调查统计,2005年底,我国大陆水力资源的理论蕴藏量为6.944亿kW,年发电量为6.0829万亿kW·h,其中技术可开发容量为5.416亿kW,年发电量为2.474万亿kW·h。经济可开发装机容量为4.02亿kW,经济可开发年发电量为1.75万亿kW·h,已开发和正在开发的装机容量为1.3亿kW,年发电量为5259亿kW·h。

从水能资源蕴藏量分布及开发利用的现状看,我国水能资源具有以下特点。

(1) 总量丰富,分布不均 按最新调查统计,我国水能资源可开发容量及年发电量均列世界之冠。但在时间分布上,夏秋季4~5个月的径流量占全年的60%~70%,冬春季径流量很少;在地区分布上,经济比较发达的华东、东北和华北3个地区,水能资源相对较少,其总和只占全国可开发水能资源的6.8%,但经济发展水平相对落后、交通不便以及人口相对稀少的西南地区却集中了全国可开发水能资源的67.8%。

(2) 开发率低,发展迅速 我国水能资源开发利用程度与世界其他国家相比较低。按1996年常规水电站发电量统计开发利用程度,法国74%,瑞士72%,日本66%,巴拉圭

61%，挪威60%，英国58%，瑞典56%，芬兰、美国55%。截至2004年9月底，我国水电总容量突破了1亿kW，扣除抽水蓄能后，仅占可开发容量的17%。虽然我国水能资源开发利用程度较低，但其发展是非常迅速的。我国第一座水电站——石龙坝水电站建成于1912年，装机容量1440kW。1949年，全国水电站装机容量仅360MW，年发电量12亿kW·h。新中国成立后，我国政府十分重视水电开发利用，水电事业得到了蓬勃发展，特别是我国改革开放以来，水电事业发展的速度更快。到2010年，我国水电装机规模已突破2亿kW，为保障能源供应、调整能源结构、应对气候变化以及促进可持续发展作出了重要贡献。

(3) 前景宏伟，任重道远 如前所述，我国水能资源丰富，开发利用程度较低，所以水能资源开发利用有着宏伟的前景。据1977~1980年第三次水能资源普查，把水量丰富、水能集中的河流作为水电开发的重点基地。

## 2. 水力发电的基本原理

图1-2所示为河段上潜在的水能资源及其利用方式。图1-2a中，上、下游断面单位质量水流所具有的能量分别为

$$H_1 g = Z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{C_1^2}{2} \quad H_2 g = Z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{C_2^2}{2}$$

有

$$H_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} \quad H_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{C_2^2}{2g}$$

式中， $p_1$ 、 $p_2$ 分别为点1和点2的水面的大气压力； $\rho$ 为水的密度。

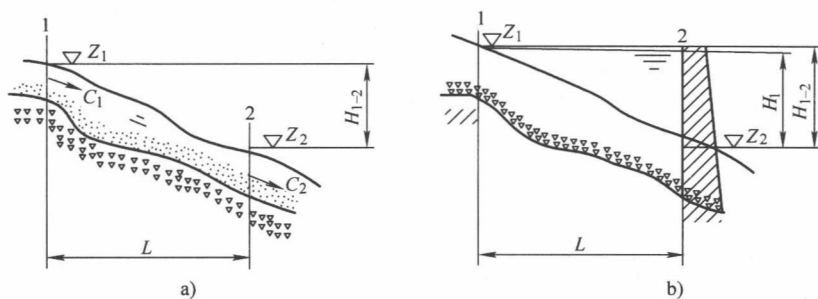


图 1-2 河段的潜在水能资源及其开发

由于上、下游水面的压力均为大气压力，其差别可以忽略不计，动能差通常也可以忽略不计，所以水流在两个断面的能量的差值，主要表现为高程的差

$$H_{1-2} = Z_1 - Z_2$$

此差值称为落差或水头。

如果通过该河段的水流的流量为  $q_{v1}$ ，则单位时间内，流过此河段的水流的能量减少了  $P_{1-2} = \rho g q_{v1} H_{1-2}$ 。

在没有修建水电站时，这些能量消耗于流动过程中对河床的冲刷、挟带泥沙以及水流的旋涡、冲击等水力损失上，对河流河床及周边自然环境带来巨大危害。为了利用这些潜在的能量资源，可以在河床上修建一水坝，将水位抬高形成一个水库，如图1-2b所示。由于水位抬高，流速减慢，所以河段上的水力损失减少。断面2的坝前水流能量增加，表现为坝前

坝后产生了落差  $H_s$ ，此落差即为电站水头。由于水库中仍有水力损失存在，因此  $H_s < H_{1-2}$ 。

在水坝后安装水轮机，就可以利用坝前坝后的能量差值驱动水轮机旋转工作，从而带动发电机发电。引水管道中的水力损失为  $\Delta H$ ，水轮机的水头  $H$  为

$$H = H_s - \Delta H$$

由于水库的渗漏和蒸发等因素，水轮机的流量  $q_v$  比流入水库的流量少  $\Delta q$ ，为

$$q_v = q_{v1} - \Delta q$$

这样，令  $k = \rho g$ ，考虑水轮机和发电机的效率  $\eta_r$ 、 $\eta_g$  后，可将所得的电功率  $P$  表示为

$$P = \rho g q_v H \eta_r \eta_g = \rho g (q_{v1} - \Delta q) (H_s - \Delta H) \approx k q_v H_{1-2}$$

可见，某一河段上可以利用的水能资源正比于流量和落差。为了利用这些水能资源，首先需要采取一定的措施（例如筑坝）集中河段的落差，形成可利用的水头。同时，还需要调节流量和将水流引入水轮机。对于很长的河段或者河流坡降比较大的情况，水头会很高。筑坝集中这样高的水头在技术上有相当困难，而且过高的水坝会造成过大的淹没损失。这时可以用几个水坝分别集中整个河段的落差，这就是河流的梯级开发（图 1-3）。

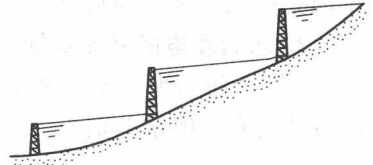


图 1-3 梯级开发

#### 四、太阳能的利用

太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量（约为  $3.75 \times 10^{26} \text{ W}$ ）的 22 亿分之一，但已高达 173000TW，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万 t 煤所产生的能量。地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳；即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等）从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能，所以广义的太阳能所包括的范围非常大，狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。太阳能既是一次能源，又是可再生能源。它资源丰富，既可免费使用，又无需运输，对环境无任何污染。太阳发射的宽频电磁波谱给地球带来的能量可以转化成热、电或者用作生产燃料。转换的太阳热能的用途包括家庭热水和工业过程供热。太阳辐射还可以通过热电厂产生电能，或者直接转换成直流电。因此，在目前全世界性的能源短缺和对环境保护要求日益严格的情况下，太阳能的利用具有很重要的意义。

开发利用太阳能大规模发电，这是人们最热切期望的。使太阳能转换为电能已有两种基本途径：一种是把太阳辐射能转换为热能，即太阳能热发电，太阳能烟囱发电也属于这一种；另一种是通过光电器件将太阳光直接转换为电能，即太阳光发电。

入射到地球表面的太阳光的能量尽管是非常巨大的，但它是广泛而分散的。要充分收集其热能，就必须首先有一种能把太阳光反射、集中并能变成热能的系统，并有一套能把收集起来的热能加以储存和变成高温水蒸气的蓄热和热交换设备。因此，必须首先要解决聚光装置。目前，聚光装置有平板型集热器和抛物面型反射聚光器。

##### 1. 太阳能集热器

太阳能集热器的功用就是要有效地吸收太阳能而又不往外扩散。常见的一种太阳能集热器是聚光式太阳能集热器。它是利用抛物面聚光原理，把太阳光聚集到一点上，以提高太阳辐射能流密度，使局部获得高温。由于太阳的照射角随时变化，因此需经常调节聚焦。第二

种是管板式太阳能集热器，它是将金属管材和板材焊接在一起，其表面涂以吸热材料制成的。一般放置在特制的保温箱内，表面覆盖玻璃。当阳光透过玻璃照到吸热层上时，金属管板变热，从而使水温升高。但它受环境影响大，且不能随日光移动，因此效率低。第三种是真空玻璃管式太阳能集热器，它是通过真空玻璃管进行聚热的。这种真空管类似热水瓶胆，它采用的是透光率好、耐热耐冲击的高强度玻璃。其集热效率高，能把水温加热到  $100^{\circ}\text{C}$ ，把空气温度升高到  $200^{\circ}\text{C}$  以上。它不受环境温度影响，可常年使用。这种真空玻璃管式太阳能集热器在国内广大城市和乡镇居民家中已被广泛使用。

## 2. 塔式聚光系统

塔式聚光系统就是把反射镜集聚的阳光都集中在中心塔顶端的集热器系统上。这种抛物面型聚光系统的特点是所获得的水蒸气温度较高（可达  $259^{\circ}\text{C}$ ），发电能力较大。这种塔式太阳能发电站的简单原理是：在地面上布置大量的定日镜群，在这一群定日镜的适当位置建立一座高塔，高塔顶上放置锅炉。用定日镜把太阳光聚集成光束，射到锅炉上，使锅炉里的传热介质（水等）达到高温，通过管道传到地面上的蒸汽发生器，产生  $540^{\circ}\text{C}$  的高温蒸汽，用以驱动汽轮发电机组发电，其热能转换效率可达 20% 左右。在美国阿尔布凯克城附近的沙漠区，已建成一座这类的太阳能发电实验站。其定日镜群把太阳光束聚集到 60m 高塔上的锅炉，焦平面中心区的最高温度可达  $1900^{\circ}\text{C}$ 。这座电站定日镜群的功率是 5MW，发电容量约为 750kW，其热转换效率为 80%。

太阳能电站有了聚光系统、储能装置，以及蓄热和换热系统，生产高温蒸汽，经过蒸汽涡轮机，就可以把热能转换成机械能，再驱动发电机，形成了太阳能发电系统。

## 3. 太阳能发电在蓬勃发展

在 20 世纪 70 年代末，日本、美国等国家兴建了数百千瓦至数兆瓦容量的实验型太阳能发电机组。到 20 世纪 80 年代初，已开始进入 10MW 级电站的试验。1980 年 12 月，欧洲一些国家合作在意大利建成了一座发电功率为 1000kW 的太阳能发电站。1986 年，前苏联克里米亚太阳能发电站用反射镜聚焦产生  $250^{\circ}\text{C}$  高温、40 个大气压的蒸汽来发电。美国在 1989 年建成总功率近 200MW 的太阳能发电站。俄罗斯也建造了 300MW 的太阳能发电站。其后，南加利福尼亚的 275MW 太阳能发电站投产，1990 年再建成另一座 300MW 的太阳能发电站。此后，美国麦迪森公司宣布将在莫哈韦沙漠地区建造一座世界上设备最先进的 1000MW 的太阳能发电站。澳大利亚建造了 200MW 的太阳能烟囱发电站。太阳能大型、集中的利用形式，则是太空发电。在距地面超过 30000km 高空的同步卫星上，太阳电池每天 24h 均可发电，而且效率高达地面的 10 倍。太空电能可以通过对人体无害的微波向地面输送。

# 五、风能的利用

## 1. 发展风力发电的意义

风是由于空气流动而产生的。地球表面被厚厚的大气层所包围，由于太阳辐射与地球的自转、公转，以及河流、海洋、山岳及沙漠等地表的差异，地面各处受热不均匀，造成大气温差发生变化，加之地面的气压不同，于是高压区空气就向低压区流动，在水平方向的空气流动就构成风。大气移动的最终结果是要使全球各地的热能分布均匀，因此大气压差是风产生的根本原因。

风力发电是目前利用风能的重要形式，也是目前最有开发利用前景的一种可再生能源。

风力发电有其自身独特的优越性，主要体现在以下四个方面：

1) 风能储量丰富。据世界气象组织估计，整个地球上可以利用的风能为  $2 \times 10^7$  MW，为地球上可资利用的水能总量的 10 倍。

2) 风能是一种洁净无污染的可再生自然能源。它不会随着其本身的转化和利用而减少，因此也可以说是一种“取之不尽、用之不竭”的能源；而煤、石油、天然气等矿物燃料能源，其储量将随着利用时间的增长而日趋减少。矿物燃料在利用过程中会带来严重的环境污染问题。

3) 风力发电的经济性日益提高。和火电相比，不存在建厂房、运输、除灰等问题；和水电相比，不存在筑坝、淹地、移民等问题。发电后除折旧费和维护费外，不消耗燃料，无三废处理问题。风电成本接近火电，略高于水电、远低于核电，从综合经济效益看，具有较强的竞争力。

4) 风力发电场装机规模灵活，建设周期短。既可单台安装，又可多台安装，互不干扰；建设一般规模的风力发电场，从基础建设、安装到投产，只需半年至一年时间，而火电、水电、核电需 3~10 年的建设时间。

## 2. 国内外风力发电发展现状

到 2006 年年底，风电发展已涵盖世界各大洲，并呈快速增长态势。风电装机容量超过 100 万 kW 的国家已由 2005 年的 11 个增加到 13 个，其中 8 个欧洲国家（德国、西班牙、意大利、丹麦、英国、荷兰、葡萄牙、法国）、3 个亚洲国家（印度、中国、日本）和 2 个美洲国家（美国、加拿大）。欧洲继续保持领先地位，亚洲正成为全球风电产业发展的新生力量，将来还有更大的增长。截至 2010 年底，全球风电的总装机容量已达 2.37 万 kW，每年新增风电设施 20%。世界风能协会预计，到 2020 年，全球风电总装机容量将超过 10 亿 kW。

目前我国并网风电建设规模较大的省份为新疆、内蒙古、广东、辽宁、浙江、江苏、宁夏、甘肃、福建等。和其他国家相比较，我国的并网型风力发电的发展比较迅速。截止到 2006 年年底，风力发电装机容量前 5 位的国家依次为德国（2062.1 万 kW）、西班牙（1161.5 万 kW）、美国（1160.3 万 kW）、印度（627.0 万 kW）和丹麦（313.6 万 kW）。2006 年，我国的风电装机容量由 2005 年的 125.7 万 kW 增加到 260.4 万 kW，增长了 106.7%；2006 年新增装机容量 134.7 万 kW，世界排名由 2005 年的第 8 位上升至第 6 位。国家计划风电装机容量为，2015 年达到 1000 万 kW，2020 年达到 3000 万 kW。中国将可再生能源作为国家重点支持发展的领域，出台了一系列支持风电发展的优惠政策，《可再生能源法》已于 2005 年出台。国内风电市场已经进入高速发展阶段，风电发展的市场空间非常巨大。

## 3. 风力发电基础

(1) 风力机的形式 风的动能通过风轮转换成机械能，再带动发电机发电，转换成电能。

风力机的种类和式样虽然很多，但按风轮的结构和其在气流中的位置，大体可分为两大类：水平轴风力机和垂直轴风力机。

1) 水平轴风力机。水平轴风力机的风轮围绕一根水平轴旋转，工作时，风轮的旋转平面与风向垂直。如图 1-4 所示，该风力机主要由风轮 1、机头 2、尾舵 3 及塔架 4 等部件

组成。

风轮上的叶片是径向安装的，垂直于旋转轴，与风轮的旋转平面成一角度。风轮叶片数目的多少视风力机的用途而定，用于风力发电的大型风力机叶片数一般取1~4片（大多为2片或3片），而用于风力提水的小型、微型风力机叶片数一般取12~24片。

水平轴风力机随风轮与塔架相对位置的不同而有逆风向式与顺风向式两种。风轮在塔架的前面迎风旋转，叫做逆风向风力机；风轮安装在塔架的下风位置则称顺风向风力机。逆风向风力机必须有某种调向装置来保持风轮总是迎风向，而顺风向风力机则能自动对准风向，不需要调向装置。顺风向风力机的缺点是部分空气先通过塔架，后吹向叶轮，塔架会干扰流向叶片的空气流，造成塔影效应，使风力机性能降低。

水平轴风力机因具有风能利用效率高和理论研究成熟的优点而成为目前商业化风力发电的主要形式。

2) 垂直轴风力机。垂直轴风力机的风轮围绕一个垂直轴旋转，如图1-5所示。其主要优点是可以接受来自任何方向的风，因而当风向改变时，无需对风。由于不需要调向装置，其结构设计得以简化。垂直轴风力机的另一个突出优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上，运行维修简便。

垂直轴风力机有两个主要类别：一类是利用空气动力的阻力做功，典型的结构是S形风轮；另一类是利用翼形的升力做功，最典型的是达里厄型风力机。

垂直轴风力机可分为利用空气阻力做功和利用翼形的升力做功两类。垂直轴风力机的应用早于水平轴风力机，中国最早利用风能的形式就是阻力型垂直轴风车。由于其风能利用效率较低和相关理论研究的不足，垂直轴风力机一直无法取代水平轴风力机的主导地位。

随着科技的发展，人们重新开始关注优点和缺点都很突出的垂直轴风力机，特别是小型风力机。近年来，垂直轴风力机的研究取得了极大的进展，很多外形各异的商用小型垂直轴风力机已成功投入市场。

(2) 风能发电 风能发电有两种方式。

1) 小型家用分散型风力发电装置。其特点是工作风速适应范围大，从几米/秒到十几米/秒，可工作于各种恶劣的气候环境，能防沙、防水，维修简便，寿命长，技术已成熟。美国 Jacobs 公司生产的2.5~3.0kW的家用风力发电机组已在世界各地运行，德国、瑞典、法国也生产这种小型风力发电装置。

2) 并网的大型风力发电装置。其功率在100~1000kW。德国、丹麦、法国的风力机技术先进，2012年，法国的阿尔斯通公司建成了目前世界上最大的风力发电机，功率

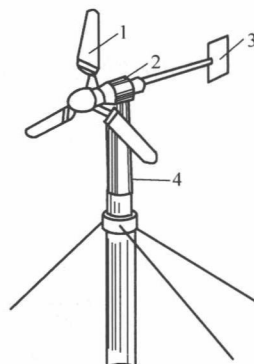


图 1-4 水平轴风力机

1—风轮 2—机头 3—尾舵 4—塔架

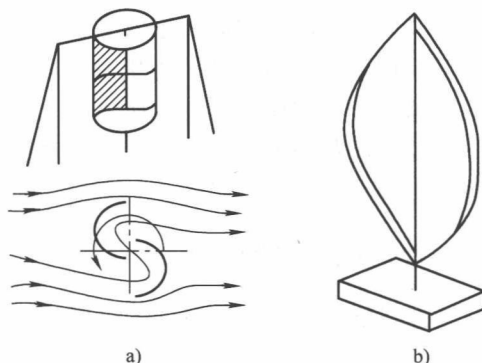


图 1-5 垂直轴风力机

a) S形风轮 b) 达里厄型风力机

达 6MW。

风力发电装置主要包括风轮、传动变速装置、发电机，如图 1-6 所示。

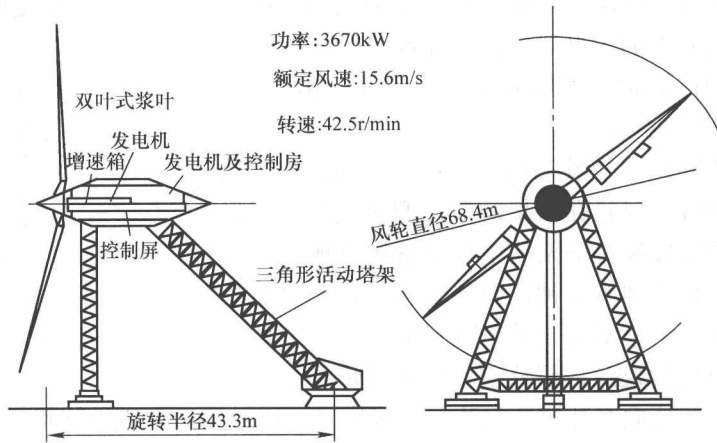


图 1-6 某大容量水平轴风力机发电装置

风力机发电成本取决于效率、容量和年平均风速。年平均风速 5m/s 的风力机发电成本为年平均风速 11m/s 的风力机发电成本的 3 倍。风速越高，发电成本越低；容量越大，发电成本越低，但都比火力发电成本高。

发电设备的投资也与风轮大小密切相关，风轮直径越大，投资就越低，越经济；风速越高，投资也越低，越经济。

## 六、地热的利用

地热能是来自地球深处的可再生能源，是一种极有发展前途的清洁能源。地球内部放射性元素的衰变，不断进行热核反应，以及地球内部的高温熔融体等形成地热的主要来源。地下水在深处循环和来自极深处的岩浆侵入到地壳后，把热量从地下深处带至地表层，但是到达地表的能量多数是很劣质的热，很难直接利用。地球是一个巨大的实心椭圆形球体，地核温度高达 5500℃，地热资源十分丰富。据估计，仅在地下 10km 以内的地壳表层中就蕴藏着  $1.26 \times 10^{27}$  J 的巨大热量，高温地热以 25 ~ 30℃/km 的降温梯度向地球外层传递。对于地壳深处的高温地热，人类目前缺乏有效的开发技术，因而并不是全部地热都能够开发，或者开发出来的都是可供实际利用的。人们能够利用的地热能仅仅是指人类现有技术可达深度范围内的，其温度足够用于发电或热利用的那部分地热资源。地热相对富集区称为地热田。与其他可再生能源相比，地热能具有分布广、总储量大、稳定可靠等显著优势和特点。

按照地热资源储藏形式，地热可分为蒸汽型、热水型、地压型、干热岩型、岩浆型和土壤型。目前，地热利用仅限于地热蒸汽、地热水和土壤热三类。

利用地热发电是地热能的利用方式之一。世界上第一个地热发电站是在 1904 年意大利的拉德瑞罗小型地热电站，但功率非常小。目前的地热发电形式有两种，即蒸汽型地热发电和热水型地热发电。地热发电的原理与普通火电厂发电原理相似，即利用地热能产生蒸汽，推动汽轮发电机组发电。所不同的是：地热发电所需的蒸汽能量直接来源于地热能，省去了锅炉，不用煤、石油、天然气等燃料。所以利用地热发电，具有建造电站投资少、系统简



单、运行成本低的优点。

1) 蒸汽型地热发电是指将蒸汽通过地热井直接引入汽轮发电机组发电(图 1-7a)。在引入汽轮机之前,首先要将蒸汽里的水滴和岩渣分离出去。但这种蒸汽在地下的蕴藏量很小,所以目前这种蒸汽型地热发电很少,多数属于热水型地热发电。

2) 热水型地热发电是指从蒸汽井里抽出的汽水混合物中分离出蒸汽,将其引入汽轮发电机组发电(图 1-7b),剩下的热水还原于井里,人工向地下热源补充给水,或者把剩下的热水用于工业、生活用热。这种地下热水井的深度一般在 300~1500m,温度可达 150~300℃。

世界上第一座实用型的地热发电站是美国的盖瑟尔斯地热发电站,装机容量为 1.1 万 kW。目前,世界上有很多国家都在开发地热资源,用于发电。

我国的地热资源十分丰富,主要分布于东南沿海一带和西藏、云南一带。在地热发电应用方面,从 1970 年开始,在全国很多地方先后建成了多个小型实验地热电站。全国最大的地热电站是西藏羊八井地热电站。据测试,该电站的地热田最高温度为 172℃。

除了地热发电之外,地热能还可以直接用于生产过程用热和生活用热水、采暖、空调等方面。当然,这些方面的利用要受到热源距离的限制。

### 第三节 生产过程中的能量转化过程

在生产过程中流体机械内流体的能量与外界机械功发生转换,如不可压缩流体的机械功与外界机械功的转换,对于可压缩流体,流体的热能与外界的机械功转换是通过实际的压缩过程和膨胀过程来完成的。热能除地热等一次能源外,通常是由燃料燃烧得到的,燃烧过程发生化学反应,是化学能与热能的转换。而热量交换——吸热和放热过程是热力循环中的重要组成部分,是一种常见的实际过程;在这些能量转换的实际过程中,工质的参数发生了相应的变化;或者说通过工质参数的变化来表示能量转换的值。

#### 一、流体机械内的能量转换

##### 1. 等容过程——机械功的转换(不可压缩流体)

流体机械中,对于不可压缩流体,其机械功与外界机械功的转换是在密度不变的情况下进行的。由于密度  $\rho$  是常数,流体与外界交换的能量  $w$  仅仅与流体机械进出口机械能的差值(压能差  $\Delta p/\rho$ 、动能差、势能差)有关,有伯努利方程

$$\pm w_{th} = \frac{\Delta p}{\rho} + 0.5(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + \delta w_{hyd}$$

式中,  $w_{th}$  为流体与外界交换的机械能;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为进口、出口的流体速度;  $z_1$ 、 $z_2$  分别是

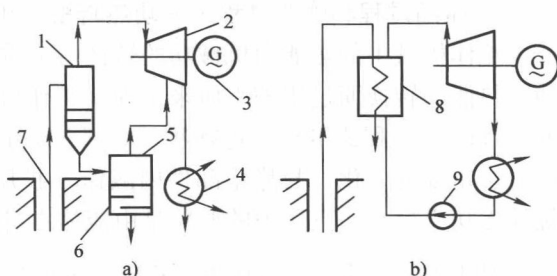


图 1-7 地热发电系统

a) 蒸汽型地热发电 b) 热水型地热发电

1—汽水分离器 2—汽轮机 3—发电机 4—凝汽器  
5—闪蒸器 6—回灌井 7—生产井 8—换热器 9—泵