

可再生能源概论

董福品 主编
王丽萍 副主编
田德
李继红
李美成
古丽米娜



KEZAISHENG NENGYUAN GAILUN

中国环境出版社

013065065

TK01-43
20

高等学校战略性新专业规划教材

可再生能源概论

主编 董福品

副主编 王丽萍 田 德 李继红 李美成 古丽米娜



TK01-43
20

中国环境出版社·北京



北航

C1672923

013082382

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源概论/董福品主编. —北京: 中国环境出版社, 2013.7
高等学校战略性新专业规划教材
ISBN 978-7-5111-1413-6

I. ①可… II. ①董… III. ①再生能源—高等学校—教材 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 066880 号

出版人 王新程
责任编辑 葛莉 刘杨
责任校对 尹芳
封面设计 彭杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (教育图书事业部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 18.25
字 数 300 千字
定 价 38.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

编者的话（代序）

近年来，国家大力发展绿色经济，以清洁生产、环保技术、生物医药等为先导的，关系到未来环境和人类生活的一些重要战略性新兴产业正在兴起。为满足上述产业发展对高素质人才的迫切需求，2010年教育部面向全国高校开展了战略性新兴产业相关专业申报和审批工作，并于同年7月公布了《同意设置的高等学校战略性新兴产业相关本科新专业名单》，并从2011年秋季开始招生。新专业的课程体系建设与教学内容成为相关院校面临的重大课题。

中国环境出版社致力于高等院校教材的开发与建设，在战略性新兴产业相关本科新专业的教材开发上正做出积极的努力，为新专业教材建设搭建平台并提供必要的行业支持；为此，我们开发了这套《高等学校战略性新兴产业规划教材》（以下简称《教材》）。教材围绕环保、资源能源开发利用等相关课程，邀请工作在教学一线的、具有教学实践经验的资深教师作为主编，同时聘请相关产业的专家和工程技术人员参与编写。

该套《教材》拟从教学源头引入企业的参与，让学校教师、企业专家共同讨论，吸取企业一线最直接的建议和意见，引入企业生产实践中的典型案例，摒弃以往教材中理论与实践脱节的现象，使教材内容更加突出应用性、创新性和时代感。同时，《教材》采取多校联合编写的方式开发，既可实现校际间的教学讨论与交流，又能有效提升教材水平和教育教学质量。

《教材》在体例和设计方面力求统一，同时根据不同课程的教学要求和实际情况，合理分配了理论与实践内容的比例，并适当增加基础内容之外的前沿信息，以期达到抛砖引玉的目的。

《教材》可供教育部新专业名单上的高校选用，也同样适用于其他相关院校与专业。我们衷心希望《教材》能够为培养战略性新兴产业人才提供有力支持与帮助。

中国环境出版社

2013年

前 言

化石能源的日益枯竭、气候变化、环境污染等问题是 21 世纪全人类面临的共同挑战。中国的人均化石能源资源量远低于世界平均水平，而且中国正处于工业化、城镇化加速发展的高经济增长时期，能源和环境问题日益突出。加快发展可再生能源是中国政府已经确立的未来能源战略的重点之一。2006 年正式实施的《中华人民共和国可再生能源法》为促进可再生能源发展提供了法律保障。2007 年 6 月，国务院常务会议审议并原则通过了《可再生能源中长期发展规划》，会议指出，开发利用可再生能源，对于保障能源安全、保护生态环境、实现可持续发展具有重要意义，要把发展可再生能源作为一项重大战略举措，切实抓紧抓好。

为适应我国能源电力快速发展的需求，为满足我国可再生能源发展对专业人才的需要，国内许多大学设立了可再生能源领域的相关本科专业。由于这些专业开办的时间很短，其教材非常缺乏。本教材编写的目的就是为了让对可再生能源感兴趣的学生和可再生能源领域各专业刚入学的学生学习和了解可再生能源相关知识，对主要的可再生能源有一个宏观的认识，可使学生拓宽视野，未来能够更好地在可再生能源建设中发挥更大的作用。

本书介绍了风能、太阳能、生物质能、水能、地热能、海洋能、氢能和燃料电池等主要可再生能源的基本知识，包括它们的发展概况、主要特点、基本原理和基本理论、系统和主要结构、工程建设和工程实例等。本书在内

容上以发电为主, 兼顾其他, 注重科普性和工程性。本书适合作为理工科一年级入门学习的教材, 也可作为可再生能源的科普读物。

由于可再生能源涉及很多方面, 而每个人的知识有限, 为了把各部分都写好、保证质量, 对于每一种可再生能源, 都请华北电力大学可再生能源学院熟悉并从事该方面研究和教学的老师编写。本书第一章由王丽萍、董福品、孙万泉编写, 第二章由田德、刘永前、邓英编写, 第三章由古丽米娜、李美成编写, 第四章、第六章由孙亚松编写, 第五章由李继红编写, 第七章由张华编写, 第八章由林俊编写。全书由董福品统稿。

由于编者水平有限, 书中难免存在缺点和错误, 恳请读者批评指正, 并提出宝贵意见。

作者

2013年1月

目 录

第一章 水能资源及水力发电.....	1
第一节 水能资源概述.....	1
第二节 水力发电原理及水电站的运行特点.....	3
第三节 我国水能资源的开发利用.....	6
第四节 我国水电发展前景.....	10
第五节 流域开发工程实例.....	11
第六节 水利水电工程及水工建筑物.....	15
第七节 水电站建筑物及水轮机.....	32
第八节 水利水电工程建设和管理.....	41
思考题.....	44
参考文献.....	45
第二章 风力发电.....	46
第一节 风能概述.....	46
第二节 世界风力发电发展趋势.....	59
第三节 我国风力发电发展趋势.....	64
第四节 我国风电工业的发展现状.....	68
第五节 风电机组.....	72
第六节 风电场.....	76
思考题.....	90
参考文献.....	90

第三章 太阳能光伏发电	91
第一节 太阳辐射及太阳能概述.....	91
第二节 太阳能电池基础.....	101
第三节 太阳能电池组件.....	114
第四节 太阳能光伏系统.....	123
第五节 太阳能光伏发电的应用.....	131
第六节 光伏前景展望.....	136
思考题.....	140
参考文献.....	141
第四章 太阳能热发电	142
第一节 太阳能热发电技术概述.....	142
第二节 太阳能热发电原理.....	145
第三节 太阳能热发电系统的构成.....	147
第四节 太阳能热发电系统的基本类型.....	151
思考题.....	159
参考文献.....	160
第五章 生物质能发电	162
第一节 生物质能概述.....	162
第二节 生物质直燃发电.....	169
第三节 生物质混燃发电.....	183
第四节 生活垃圾焚烧发电.....	187
第五节 气体生物燃料发电.....	195
思考题.....	205
参考文献.....	205
第六章 地热能发电	207
第一节 地热能概述.....	207

第二节 地热资源的形成与分布	208
第三节 地热发电	214
第四节 地热直接利用	225
思考题	230
参考文献	231
第七章 海洋能发电	232
第一节 波浪能	232
第二节 潮汐能	236
第三节 海流能	239
第四节 海洋温差能	243
第五节 盐差能	247
思考题	251
参考文献	252
第八章 氢能和燃料电池	253
第一节 氢能	253
第二节 燃料电池	261
思考题	279
参考文献	279

第一章 水能资源及水力发电

第一节 水能资源概述

一、河流水能资源的估算

水能资源指水体的动能、势能和压力能等能量资源；是自由流动的天然河流的出力和能量，称为河流潜在的水能资源。

工程上使用的能量单位是“千瓦时 (kWh)”，单位时间 t 内做功的能力用平均出力（功率）表示，工程上出力的单位是“千瓦 (kW)”。河流水能资源是分段计算的，通常按落差发生变化的地方、支流汇入的地方进行分段。河段 i 的水流能量可由水力学公式进行估算：

$$E_i = 0.00272 W_i \cdot H_{i,i+1} \quad (1-1)$$

$$N_i = 9.81 Q_i \cdot H_{i,i+1} \quad (1-2)$$

式中： E_i ——流经河段 i 的水流所具有的能量，kWh；

W_i ——每小时流过河段 i 的水量， m^3 ；

$H_{i,i+1}$ ——河段 i 上下游两断面处水面高程差，即落差，m；

N_i ——流经河段 i 水流的平均出力，kW；

Q_i ——流经河段 i 的流量， m^3/s 。

计算出河流每段的水能资源蕴藏量，将各段相加即得全河水能资源蕴藏量，即整个河段（从河源到河口）的出力为 $\sum N_i$ ，电量为 $\sum E_i$ 。

二、我国的水能资源量

我国国土面积与巴西、俄罗斯、加拿大和美国相当，年径流总量均小于这些国家，但水能蕴藏量却超过这些国家而位居世界之首，这主要得益于我国东西部之间高落差的阶梯状地理特征。“世界第三极”青藏高原与海拔仅 50 m 的沿海平原之间存在着 4 000 m 以上的大面积落差，这是世界绝无仅有的。

我国河流众多，径流丰沛，落差巨大，蕴藏着丰富的水能资源。水能资源蕴藏量 6.994 亿 kW，年发电量 6.082 9 万亿 kWh。

我国水能资源的特点：

(1) 西南地区的水能资源蕴藏量占我国总蕴藏量的 67.8%，云南、贵州、四川 3 省的水能资源蕴藏量占我国总蕴藏量的 50.7%。

(2) 地势西高东低（四级阶梯），河流落差巨大，是世界上陆地高差最大的国家，落差达 4 000 多米。河道陡峻，落差巨大，是我国河流的突出特点。

(3) 水能资源总量虽然十分丰富，空间和时间上的分布却不均衡。

① 空间分布特征。水能资源主要集中在长江、黄河中上游，雅鲁藏布江中下游，珠江、澜沧江、怒江和黑龙江上游，这些河段占全国大中型水电资源量的 90%。从区域看，云、川、藏水能资源占全国的 57%，而经济较发达、人口集中的东部 11 省市，水能资源仅占 6%。

② 时间分布特征。受季风的影响，降雨主要集中在夏季，且年内变化和年际变化明显，丰枯交替。年内各个季节分配不均，夏秋多冬春少。夏秋季节河流水位暴涨，流域内水利工程少，难以有效储存水资源，而且容易形成洪涝灾害；冬春枯水季节水位低落，水资源量少，造成严重的干旱缺水。降雨量年际变化大。容易产生干旱年份和洪涝年份交替出现的现象，丰水年或枯水年可能连续出现，形成丰水年组与枯水年组，丰枯年组循环的周期不等、丰枯的量值也不相同。

三、我国水能资源的地位

我国常规能源资源以煤炭和水能为主，水能资源仅次于煤炭，居十分重要的地位（表 1-1）。水能资源是我国重要的可再生资源，且是绿色能源；优先发展水电，能够有效减少对煤炭、石油、天然气等资源的燃烧，不仅节约了宝贵的化石能源资源，还减

少了环境污染。为了解决能源短缺、缓解矿物燃料产生的巨大环境问题，水电能源系统开发是目前建立可持续能源支持系统中最具开发规模的能源利用方式之一。

表 1-1 我国能源结构

能源	探明储量	居世界位置	占世界人均的比例
煤炭	1.5 万亿 t	2	55%
石油	70 亿 t	11	10%
天然气	33.3 万亿 m ³	14	4%
水能	60 829 亿 kWh	1	80%

第二节 水力发电原理及水电站的运行特点

一、水力发电原理

水力发电的基本原理是利用水力推动水轮机转动，将水能转变为机械能，再由水轮机带动发电机，便可发出电来，这时机械能又转变为电能。

二、水电站的发电参数

水电站发电量为水电站出力与相应时间的乘积，一般以千瓦时 (kWh) 作为计算单位。水电站的出力是指发电机组的出线端送出的功率，一般以千瓦 (kW) 作为计算单位。水电站的出力可用公式 (1-3) 计算

$$N = 9.81\eta \cdot Q \cdot H_{\text{净}} \quad (1-3)$$

式中： Q ——通过水电站水轮机的流量，m³/s；

$H_{\text{净}}$ ——水电站的净水头，为水电站上下游水位差减去各种水头损失，m；

η ——水电站的效率，它小于 1，为水轮机效率、传动设备效率和发电机效率三者的乘积。

水电站机组的效率因水轮机和发电机的类型和参数而不同，且随工况而变化。在水电站规划阶段或初步设计阶段，因为引水道尺寸以及机电设备型号尺寸均未确定，常把

9.81 η ，即 K 称为出力系数。因此，水电站出力的简化计算式为

$$N = K \cdot Q \cdot H_{\text{净}} \quad (1-4)$$

通常，凭经验或参照同类已建电站的资料选取 K 值。根据水电站规模的大小，一般对大型水电站， $K=8.5$ ；中型水电站， $K=8.0\sim 8.5$ ；小型水电站， $K=6.0\sim 7.5$ 。待进行机组选择时，根据水轮机模型试验，再考虑不同的影响，给予修正。

三、水能开发方式及水电站类型

按照集中落差的方式，水能的开发方式可分为坝式、引水式和混合式 3 种。坝式又有坝后式和河床式等。

水电站的主要类型有如下几种。

1) 坝后式水电站

在河流上拦河建坝，形成水库，抬高水位、集中落差。水电站厂房布置在坝后河床、坝内、坝头地下或下游近坝岸边。坝后式水电站的坝一般较高，库容可以很大。三峡水电站、刘家峡水电站、岩滩水电站等都属此类。

2) 河床式水电站

河床式水电站的厂房位于河床，兼作拦河挡水建筑物。其特点是坝一般不高，水头较低，库容不大，引水流量可以较大。西津水电站、葛洲坝水电站、大化水电站等都属此类。

3) 引水式水电站

引水式水电站枢纽往往修建在河道坡降较大的河段，在首部建低坝或拦河闸挡水，用较长的引水道引水，在引水道末端和河道间形成集中落差，在该处建水电站厂房。其引水流量及库容通常都不大，中小型水电站经常采用这种形式。鱼子溪一级水电站属此类。在水利水电工程中，一般不采用无坝引水方式。

4) 混合式水电站

混合式水电站是坝式和引水式两种方式的结合。在上游河道修建较高的拦河大坝，形成水库。厂房建在下游有合适地形处，厂房位置比较灵活。大中型水电站常采用这种形式。古洞口水电站、天生桥二级水电站都属此类。

5) 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站一般有上、下两个水库（图 1-1），水电站内装设有抽水和发电两种功

能的机组。利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库，在电力负荷高峰期再放水至下水库发电。抽水蓄能电站利用水电站启闭转换迅速的特点，在电力系统中起到补峰填谷的作用。

抽水蓄能式水电站一般可以分为纯抽水蓄能水电站和混合式抽水蓄能电站两类。纯抽水蓄能水电站是指利用一定的水量在上下库之间循环进行抽水和发电，其上库水源主要来自于下库抽上来的水。混合式抽水蓄能电站内通常既有常规的水力发电机组又有一定容量的抽水蓄能机组，上库水源除了由下库抽上来的水外，还有汇入的天然径流。

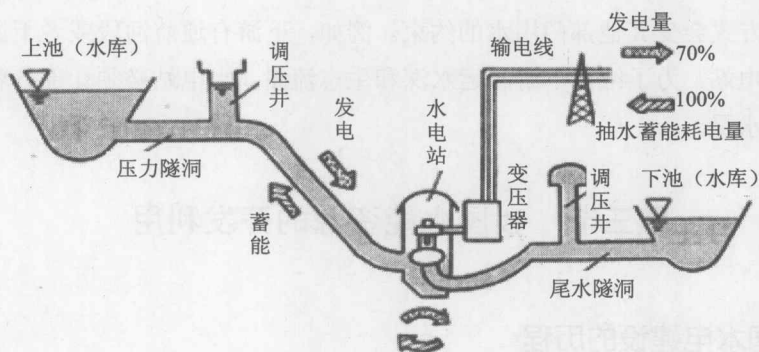


图 1-1 抽水蓄能电站示意图

四、水电站的运行特点

(1) 水电站的水轮发电机组开停迅速，调控灵活方便，开停机费用可以忽略不计，且不受机组启停次数、最小停运时间以及最小持续运行时间等限制，机组出力可变幅度较大。机组从停机状态到满负荷运行一般仅需 1~2 min，升降出力速度快，能有效地跟踪负荷变化。因此水电站适宜承担系统的调峰、调频及事故备用任务；还可以作为调相机运行，为系统提供无功功率，改善系统的功率因数，从而保障电力系统的运行稳定，提高供电质量。

(2) 水能资源是可再生资源，它为水电站生产出廉价的电量提供天然资源条件，不像火电站那样需要消耗煤、石油、天然气等燃料。因此，从经济角度看，充分利用水能资源发电有利于电力系统节省燃料消耗，降低电量成本。

(3) 水电站的电力生产情况受河川径流随机性的影响和制约。在丰水时期，发电量

较多；遇到枯水时期，则发电量减小。无调节水电站只能利用天然流量进行发电，而不能将大量的丰水时期多余水量蓄起来供枯水期使用，将季节性电能转换为保证电能。具有调节能力水库的水电站，可借助于水库的调节，减少水能资源的损失。

(4) 由于天然入库水量随机变化，水电厂（尤其是水库调节性能差的水电厂）运行管理人员难以准确预计水电厂未来的发电能力。

(5) 除了发电以外，水电站的运行还需要考虑水的调度，如大坝防汛、城镇供水、农业灌溉、北方江河河道防凌、水质改善、水库冲沙、下游航运和生态需水等综合利用要求，其运行方式会受其他部门用水的约束。例如，下游有通航河段或者下游有生态需水量要求的水电站，为了维持下游航运水深和生态流量，水电站必须让部分容量承担基荷，均衡泄放水量。

第三节 我国水能资源的开发利用

一、我国水电建设的历程

我国早在 4 000 年前就开始兴修水利，至春秋战国，水利工程已有相当规模，水利建设也非常先进；但现代化的水电建设起步很晚。

1910 年，我国大陆的第一座水电站——石龙坝水电站（云南昆明附近螳螂川）建成，最初装机为 480 kW。这座电站由云南商会筹建，聘请德国人设计和建造。新中国成立后，对其进行了改造，总装机容量达到 6 000 kW（图 1-2）。



图 1-2 石龙坝水电站组图

1960年,浙江新安江水电站建成,是我国第一座自己勘测、设计、施工和自制设备的大型水电站(图1-3)。电站设计水头73m,最大利用水头84.3m,安装机组9台,总容量66.25万kW,多年平均年发电量18.6亿kWh。



图 1-3 新安江水电站

到1949年年底,全国水电装机仅16.3万kW,居世界第20位。新中国成立后,尤其是改革开放以来,水电事业有了突飞猛进的发展,到2005年年底,我国水电装机达到1.17亿kW,居世界第1位;到2011年年底,水电装机容量突破2.2亿kW,稳居世界第1位。图1-4为我国水电装机容量发展历程图。

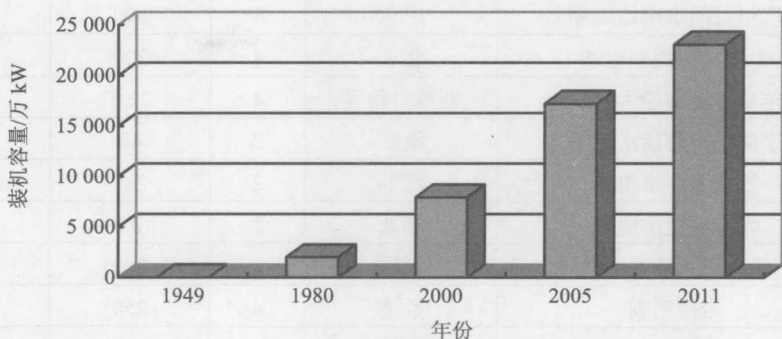


图 1-4 我国水电装机容量发展历程