



高等教育“十三五”规划教材
中国矿业大学教材建设工程资助教材

储能技术概论

主 编 饶中浩 汪双凤

Chuneng Jishu Gailun

Chuneng jishu Gailun



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等教育“十三五”规划教材
中国矿业大学教材建设工程资助教材

储能技术概论

饶中浩 汪双凤 主编



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书围绕热能和电能的储存,主要介绍了相变储能、热化学储能、电化学储能、机械储能和电磁储能等几种储能技术的主要概念、原理以及一些应用实例。针对电化学储能,介绍了几种不同类型的电池;针对机械储能,介绍了抽水、压缩空气和飞轮几种类型;针对电磁储能,介绍了电感、超导和超级电容器几种类型。

本书可作为能源与动力工程等相关专业本科生的教材或参考书,也可供电力、汽车、建筑、化工等领域从事储能相关工作和研究的人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

储能技术概论 / 饶中浩,汪双凤主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3384 - 4

I. ①储… II. ①饶… III. ①储能—技术—研究
IV. ①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第006353号

书 名 储能技术概论

主 编 饶中浩 汪双凤

责任编辑 仓小金

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 282 千字

版次印次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

能源作为人类社会生存和发展的物质基础,其重要性不言而喻。能源短缺和环境污染等问题的日益突出,极大地提升了新能源和可再生能源在能源领域的地位。太阳能、风能、水能、生物质能、地热能、海洋能等各种能源技术近年来也得到快速发展。为克服能量供应和能量需求在时间和空间上的差别,就需要采用一定的方法,通过一定的介质或装置,将某种形式的能量直接或间接转换成另一种形式的能量储存起来,在需要用能的时候释放出来。研究能量储存的各种方法,即储能技术。

储能技术的发展,是为了保证能量的利用过程能够连续进行,在人类的日常生活和工业生产等各方面,如电力工业、新能源汽车、太阳能热利用等多个领域,都非常重要,并对促进能源的可持续发展具有重要意义。由于储能技术分类方式不一,涉及专业领域多,为满足国内各高校以及企业工程技术人员全面系统地了解储能技术,我们编写了这本《储能技术概论》,并被列入煤炭高等教育“十三五”规划材。

本书共分为六章。第一章为绪论;第二章和第三章围绕热能的储存,分别介绍了相变储能和热化学储能;第四章至第六章围绕电能的储存,分别介绍了电化学储能、机械储能和电磁储能。在电化学储能部分,重点介绍了燃料电池、锂离子电池、液流电池、钠硫电池、锂硫电池、金属空气电池以及其他几种电池储能技术,并简单介绍了电池热管理技术;在机械储能部分,重点介绍了抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能;在电磁储能部分,重点介绍了电感储能、超导储能和超级电容器储能。

本书由中国矿业大学饶中浩教授和华南理工大学汪双凤教授编写。在编写过程中,中国矿业大学博士生刘臣臻、赵佳腾、霍宇涛,硕士生钱振、匡勇在文献整理、插图制作、文字校对等方面提供了很大帮助。同时,本书的出版得到了中国矿业大学教材出版资助基金的资助,在此一并表示感谢!此外,衷心感谢本书参考文献中所列的全体作者。

本书可作为能源与动力工程、能源工程及自动化、能源化学工程、能源与环境系统工程、新能源科学与工程等相关专业本科生的教材或参考书,也可供电力、汽车、建筑、化工等领域从事储能技术相关的研究人员和工程技术人员阅读和参考。

由于作者时间和水平所限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

饶中浩 汪双凤

2016年10月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 能源的基本概念	1
第二节 节能与能源的可持续发展	3
第三节 新能源和可再生能源	4
第四节 储能的概念与分类	13
第五节 储能的发展趋势	16
第二章 相变储能	18
第一节 相变储能的原理和方法	18
第二节 相变储能材料及其热性能	19
第三节 固液相变传热强化	28
第四节 相变储能技术的主要应用	39
第三章 热化学储能	52
第一节 热化学储能简介	52
第二节 常见的热化学储能体系	54
第三节 热化学储能系统	61
第四节 热化学储能的应用	65
第四章 电化学储能	70
第一节 电化学基本概念	70
第二节 燃料电池储能	74
第三节 锂离子电池储能	90
第四节 液流电池储能	97
第五节 钠硫电池储能	101
第六节 锂硫电池储能	105
第七节 金属空气电池储能	109
第八节 其他电池储能技术	115
第九节 电池热管理技术	116

第五章 机械储能	119
第一节 抽水蓄能	119
第二节 压缩空气储能	123
第三节 飞轮储能	127
第四节 不同机械储能方式对比	133
第六章 电磁储能	135
第一节 电感储能	135
第二节 超导储能	141
第三节 超级电容器储能	146
参考文献	153

第一章 绪 论

第一节 能源的基本概念

关于能源的定义,已知的表述有多种,但其内涵都基本相同。一般来说,能源是可以直接或经过转换提供人类所需的光、热、电、动力等任何形式能量的载能体资源。简言之,能源即能量的来源,是提供能量的资源。

能源形式多样,根据不同的划分方式,可将能源分为不同的类型。目前,主要可根据能源的来源、产生、自身性质、使用类型、是否污染环境、是否进入市场等多种方式对能源进行分类。

(1) 根据能源的来源分类

可分为地球本身蕴藏的能源、来自地球外部天体的能源、地球与其他天体相互作用产生的能源。

① 地球本身蕴藏的能源,通常指与地球内部的热能有关的能源和与原子核反应有关的能源,如地热能、核燃料等。

② 来自地球外部天体的能源,主要是太阳能以及由太阳能转换而来的水能、风能、波浪能、生物质能等其他能源。

③ 地球与其他天体相互作用产生的能源,如因地球和月球、太阳之间引力变化而引起的潮汐能。

(2) 根据能源的产生或能源的获得方法、能源的基本形态分类

可分为一次能源和二次能源。

① 一次能源,也称天然能源,即自然界中现成存在、可以直接利用的能源。一次能源又可分为可再生能源和非再生能源。

可再生能源,一般指可以不断得到补充或能在较短周期内再产生的能源,如水能、风能、太阳能、波浪能、潮汐能、生物质能等。

非再生能源,一般指形成周期长、短期内无法恢复、随着不断开发利用而逐渐减少的能源,如原煤、原油、天然气、油页岩、核燃料等。

② 二次能源,也称人工能源,是由一次能源经过加工或转换而来的其他种类和形式的能源。二次能源又可分为含能体能源和过程性能源。

含能体能源,一般指自身含有能量的物质,如汽油、柴油、液化石油气、酒精、沼气、焦炭、氢能等。

过程性能源,应用最广泛的主要是电能。广义的过程性能源,一般指不能直接储存、由可提供能量的物质的运动所产生的能源,除电能外,还包括水能、风能、潮汐能、太阳能等其他一次能源。

(3) 根据能源的自身性质分类

可分为燃料型能源和非燃料型能源。

① 燃料型能源,即可以作为燃料使用的能源,如原煤、石油、天然气等矿物燃料,木材、沼气、有机废弃物等生物燃料,甲醇、酒精等化工燃料,铀、氘、氚等核燃料。

② 非燃料型能源,即不能作为燃料使用的能源,如水能、风能、波浪能、潮汐能、太阳能、地热能等。

(4) 根据能源的使用类型分类

可分为常规能源和新能源。

① 常规能源,又称传统能源,一般指已被广泛开发利用、技术上比较成熟的能源,如煤炭、石油、天然气、水能、核裂变能等。

② 新能源,一般指刚开始开发利用或正处于研究过程、有待推广的可再生能源,如太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能和核聚变能等。

(5) 根据能源消耗后是否污染环境分类

可分为污染型能源和清洁能源。

① 污染型能源,即在利用过程中会对环境造成污染的能源,如煤炭、石油等,它们在使用过程中因燃烧而产生大量的二氧化碳、硫氧化物、氮氧化物等污染物,造成如温室效应、酸雨等,影响生态,破坏环境。

② 清洁能源,即绿色能源,指在利用过程中不排放污染物或排放的污染物较少且符合一定的排放标准的能源,如水能、风能、太阳能等可再生能源以及核能等。

(6) 根据能源的是否进入市场分类

可分为商品能源和非商品能源。

① 商品能源,一般指进入能源市场作为商品买卖的能源,如煤炭、石油、天然气、电能等。

② 非商品能源,即不经商品流通领域、不进入市场进行交易的能源,主要有薪柴、农作物秸秆、人畜粪便等。

(7) 此外,根据能源的形态特征或转换与应用的层次分类

世界能源委员会推荐的能源类型分为:固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、电能、太阳能、生物质能、风能、核能、海洋能和地热能。其中,固体燃料、液体燃料、气体燃料统称化石燃料或化石能源。

随着人们对能源的认识不断加深,往往还会根据不同的需要从其他方面对能源进行分类。但不管哪种分类方式,其主要目的还是为了更好地认识能源、了解能源,进而促进能源更科学的开发利用。

第二节 节能与能源的可持续发展

能源是人类生存和社会发展的物质基础,人类开发利用能源的历史悠久,先后经历了薪柴时期、煤炭时期和石油时期三个不同阶段。在过去的 200 多年里,以煤炭、石油、天然气等化石燃料为主的能源体系极大地推动了人类社会的发展和人类文明的进步。

随着世界经济的不断发展,能源的需求量也日益增大,煤炭、石油、天然气等不可再生能源面临着枯竭的危险。20 世纪的三次石油危机,更是让能源短缺成为全世界需要面对的共性问题。根据《BP 世界能源统计年鉴 2015》统计结果,截至 2014 年年底,世界煤炭、石油和天然气三种化石燃料的已探明储量(表 1-1)分别可满足人类使用约 110 a、52.5 a 和 54.1 a。另外,根据美国节能经济委员会发布的 2014 世界能源效率记分卡显示,世界各国在提高能效方面仍有很大空间。总之,节约能源已成为全社会的共同责任。

表 1-1 煤炭、石油、天然气能源储量

类 型	已探明储量		单 位	预计使用年限/a
煤炭	世界	8 915.31	亿 t	110
	中国	1 145		—
石油	世界	17 001	亿桶	52.5
	中国	185		—
天然气	世界	187.1	万亿 m ³	54.1
	中国	3.5		—

煤炭、石油、天然气等化石燃料的开发利用,极大地促进了电力、石油化工、汽车等许多行业的快速发展,同时,在其开采、输送、加工、转换、利用和消费过程中,也带来了严重的生态环境破坏和环境污染。能源所引起的环境问题主要表现为大气污染、水污染、温室效应、酸雨、臭氧层破坏、放射性污染等。保护生态环境,解决污染问题,势必需要发展清洁、高效、安全的可持续能源体系。

为了推动全社会节约能源,提高能源利用效率,保护和改善环境,促进经济社会全面协调可持续发展,我国早在 1998 年就开始施行《中华人民共和国节约能源法》,并鼓励、支持推广生物质能、太阳能和风能等可再生能源利用技术。为了促进可再生能源的开发利用,自 2006 年起又开始施行《中华人民共和国可再生能源法》,将可再生能源的开发利用列为能源发展的优先领域。2010 年由国务院发布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》中所提出的七大新兴战略产业中有三个分别是节能环保产业、新能源产业、

新能源汽车产业,进一步明确了能源领域可持续发展的必要性。

此外,为加快构建清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系,我国《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》中所部署的主要任务有增强能源自主保障能力、推进能源消费革命、优化能源结构、拓展能源国际合作、推进能源科技创新五个方面。其中,在优化能源结构中,明确提出“积极发展天然气、核电、可再生能源等清洁能源,降低煤炭消费比重,推动能源结构持续优化”,并指出要大力发展可再生能源。

能源,不仅是经济资源,还是政治资源和战略资源。节约一次能源、开发新能源和可再生能源,坚持能源的可持续发展,是国家安全、社会稳定和进步的重要保障。

第三节 新能源和可再生能源

一、基本含义与特点^[2,3,5]

新能源和可再生能源在能源分类中属于不同的类型,1978年联合国第33届大会中将新能源和可再生能源合并使用,1981年联合国在肯尼亚首都内罗毕召开了新能源和可再生能源会议,并对新能源和可再生能源的基本含义进行了正式界定:以新技术和新材料为基础,使传统的可再生能源得到现代化的开发利用,用可再生能源不断取代化石能源,特别强调可以持续发展、对环境无损害、有利于生态良性循环。一般来说,新能源和可再生能源主要有如下几个方面的特点:

- ① 能量密度较低,并且高度分散;
- ② 资源丰富,可以再生;
- ③ 清洁干净,使用中几乎没有损害生态环境的污染物排放;
- ④ 太阳能、风能、潮汐能等资源具有间歇性和随机性;
- ⑤ 开发利用的技术难度大。

在我国,新能源和可再生能源一般指风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能以及小水电、核裂变能、氢能和燃料电池等。

二、相关法规与政策

由于新能源和可再生能源具有丰富、可再生、清洁等优点,在能源短缺和环境污染的双重压力下,国际社会对新能源和可再生能源的重视程度日益增加,许多国家和地区也都先后制定和实施了一些鼓励和支持新能源和可再生能源发展的法规、政策,如:

① 美国的《能源税收法》和《能源政策法》在20世纪70年代和90年代分别公布了一些鼓励新能源和可再生能源发展的政策。

② 日本在1993年和1997年分别开始实施“新阳光计划”和“太阳能光伏屋顶计划”,积极发展太阳能。

③ 澳大利亚在1999年宣布了支持新能源和可再生能源发展的国家目标,大力支持新能源和可再生能源发电。

④ 欧盟部长理事会在 2001 年提出了关于使用新能源和可再生能源发电的共同指令,随后各国根据该指令指定了本国的具体目标。

⑤ 德国于 2001 年通过了《生物质能条例》,2004 年底实施《可再生能源法》,并指定了促进可再生能源开发的《未来投资计划》。

⑥ 英国于 2002 年开始实施《可再生能源义务法》,于 2009 年和 2011 年又先后颁布了《可再生能源指令》和《可再生能源路线图》。

⑦ 在我国,除了实施《中华人民共和国可再生能源法》之外,各级政府还出台了相应的诸多政策以促进新能源和可持续能源的发展,如《可再生能源与新能源国际合作计划》、《可再生能源发电有关管理规定》、《促进风电产业发展实施意见》等,大力促进我国新能源和可再生能源的开发以及在不同领域的利用。

三、新能源和可再生能源发展趋势^[4]

随着煤炭、石油、天然气等化石能源短缺和环境污染等问题的日益突出以及世界各国对新能源和可再生能源开发利用的不断重视,新能源和可再生能源的地位日益提升,并已成为世界能源发展战略的重要组成部分,预计到 2070 年新能源和可再生能源将占世界能源总量的 80%,发展前景广阔。

现阶段,由于技术水平等多种条件限制,相比于整个社会的庞大消耗能力,新能源和可再生能源的开发利用还只是冰山一角。《BP 世界能源统计年鉴 2015》给出了 2004~2014 年世界能源总消费量(图 1-1),虽然可再生能源的消费量呈逐年上升趋势,但相比与煤炭、石油和天然气,可再生能源以及核能所占世界能源总消费量的比例仍然不大。

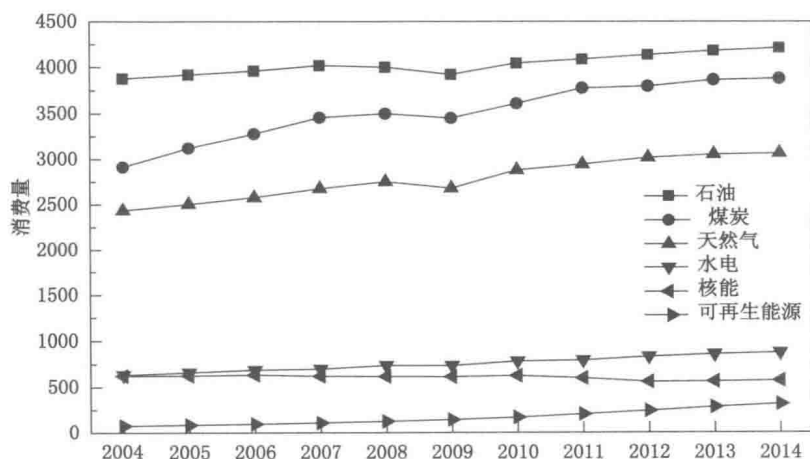


图 1-1 2004~2014 年世界能源总消费量(百万 t 油当量)

针对我国能源重大需求,《中国至 2050 年能源科技发展路线图》给出了我国能源技术应用时序表,表 1-2 摘出了与新能源和可再生能源相关的主要技术,其中大部分都被列

为重点研究与开发的创新技术。此外,在交通节能领域,还明确指出了要重点发展电动汽车和燃料电池汽车。电动汽车和燃料电池汽车等新能源汽车的发展,既可以减少石油等化石燃料的消耗、减轻环境污染,又由于新能源汽车的发展必须要承受节能和减排方面的双重压力,势必反过来促进新能源与可再生能源发电技术的进步。

表 1-2 中国至 2050 年新能源与可再生能源技术应用时序

类 型	现在~2020 年	2021~2035 年	2036~2050 年
太阳能热利用	太阳能主动热利用高技术,太阳能被动热利用技术,太阳能热水器	太阳能热发电技术与系统	太空太阳能发电
太阳能光伏	非晶硅太阳能电池,单晶硅太阳能电池,多晶硅太阳能电池	薄膜光伏电池技术	新概念太阳电池
风能	5 MW 风电技术,陆地风力发电技术	高性价比、高可靠性风电机组技术	
生物质能	农村生物质燃料(沼气、固体成型燃料),第一代生物质能(生物质发电、燃料乙醇与生物柴油)商业化利用,生物质材料生产等	生物质替代石油技术(生物质液体燃料、生物质基材料、生物质基大宗化学品)	能源植物、含油微生物规模化能源开发,藻类生物质利用技术
地热能	中低温地热发电技术,高温地热发电技术,地热(源)热泵技术,地热梯级利用技术	增强型地热利用高技术	
海洋能		海洋能独立发电技术商业示范系统	海洋能大规模独立发电技术
氢能		氢能利用技术	燃料电池技术,氢能规模发电技术

四、新能源和可再生能源发电^[5-8]

新能源和可再生能源的开发利用,其中最主要的方面就是发电,而电能也早已成为人类活动不可或缺的一部分。目前,在新能源和可再生能源发电方面,主要有太阳能、风能、水能、生物质能、地热能、海洋能、核能等发电技术以及燃料电池发电技术等。

(1) 太阳能发电

人类将太阳能作为一种能源和动力加以利用,已经有 300 多年的历史。利用太阳能发电,已成为太阳能利用的主要方式之一。太阳能发电,是将太阳能直接或间接地转换为电能的发电方式。太阳能发电主要有两种途径,即太阳能热发电和太阳能光发电,其工作原理和主要类型如表 1-3 所示。

表 1-3 太阳能发电的原理和类型

发电方式	工作原理	类 型
太阳能热发电	先将太阳能转换成热能,再将热能直接转变为电能	半导体或金属材料的温差发电
		真空器件中的热电子和热电离子发电
		碱金属的热电转换
		磁流体发电
	通过热机带动发电机发电,热能来自于太阳能,而不是传统的化石燃料	槽式太阳能热发电
		塔式太阳能热发电
		碟式太阳能热发电
太阳能光伏发电	采用光电器件,直接将太阳辐射能转换为电能	光伏发电
		光化学发电
		光感应发电
		生物发电

太阳能是地球上最主要的能量来源,太阳每秒钟投射到地球上的能量相当 590 万 t 标准煤。我国的太阳能资源非常丰富,理论储量每年达 1.7 万亿 t 标准煤,太阳能资源开发利用的潜力巨大。根据《可再生能源中长期发展规划》,预计到 2050 年我国太阳能发电装机容量将达到 6 亿 kW,太阳能发电前景广阔。

此外,由于太阳光照受季节、地点、气候等多种因素的影响,尤其是昼夜更替和云雨天气等影响巨大,如何实现太阳能发电的持续性供电是目前的主要技术难题。

(2) 风力发电

风的形成和太阳辐射密切相关,达到地球的太阳能中约有 2% 可以转化为风能。利用风力进行发电,在 19 世纪末就已经开始。风力发电,就是把风的动能转换为机械能、再把机械能转换为电能的一种发电方式,所采用的装置叫风力发电机组,经过一百多年,已发展出多种类型的风力发电机组,一般可根据功率或结构从装机容量、风轮轴方向、功率调节方式、传动形式和转速变化等多方面进行分类(表 1-4)。

表 1-4 风力发电的机组类型^[9]

结 构		功 率		小型	中型	大型	特大型
				0.1~1 kW	1~100 kW	100~1 000 kW	>1 000 kW
风轮轴方向	水平		有,常见				
	垂直		有,不常见				
功率调节方式	定桨距		有,常见				有,不常见
	变桨距	主动失速	无	有	有,不常见		
		普通变距	无	有	有,常见		

续表 1-4

功 率			小型	中型	大型	特大型
			0.1~1 kW	1~100 kW	100~1 000 kW	>1 000 kW
结 构	有齿轮箱	高传动比	无	有	有,常见	
		中传动比	无		有,不常见	
	直接驱动		有	无	有,不常见	有,常见
转速变化	定速		有			有,不常见
	多态定速		无	有		有,不常见
	变速		无	有,不常见	有,常见	

据估计,地球上可用来发电的风能资源达 100 亿 kW。在我国,风能资源丰富,可开发利用的风能资源约 10 亿 kW,其中陆地上风能资源约 2.5 亿 kW(距地面 10 m 处),海上风能资源约 7.5 亿 kW。2015 年,我国电力装机容量已突破 15 亿 kW,而风力发电装机容量累计约 1.4 亿 kW,且海上部分总装机容量占比不到 5%。因此,发展风力尤其是海上风力发电,也是促进能源结构调整的重要措施。

风能具有清洁、可再生等优点,但也具有不稳定、地区差异大等缺点,如何实现风力发电的持续性供电也是其主要技术难题之一。

(3) 水力发电

自 1878 年法国建成世界第一座水电站之后,水力发电因可再生、无污染、运行费用低、便于进行电力调峰等优点在世界范围内得到快速发展。水力发电,简单来说就是利用水位落差,借助水轮发电机,将水的势能转变成机械能,再转变成电能的发电方式。水力发电站也可以按水源的性质、水电站装机容量的大小、水电站利开发方式、水头大小以及径流调节的程度等多方面进行分类(表 1-5)。

表 1-5 水力发电的类型

分 类 方 式	类 型		
水源的性质	常规水电站	抽水蓄能水电站	潮汐电站
装机容量	小型 ($<5\,000\text{ kW}$)	中型 ($5\,000\sim 10\text{ 万 kW}$)	大型 ($>10\text{ 万 kW}$)
开发方式	堤坝式	引水式	混合式
水头大小	低水头 ($<15\text{ m}$)	中水头 ($15\sim 70\text{ m}$)	高水头 ($>70\text{ m}$)
径流调节的程度	径流式 (无调节或调节很小)	蓄水式 (有调节能力)	

目前全球水电装机容量约 10 亿 kW,其中我国水电装机容量约 3 亿 kW。水电是可再生能源,而通常的大中型水电属于传统能源,而小水电属于新能源。当然,小水电并不

是简单的指小型化的大水电,它一般是指小水电站以及与其相配套的电网的统称。小水电一般有小型、小小型和微型三种,但其具体装机规模不同国家有不同规定,在我国,小水电一般指装机容量 2.5 万 kW 及以下的水电站和配套的地方供电电网。我国的小水电资源也非常丰富,共有 15 亿 kW,其中可开发资源为 7 000 万 kW。与传统大中型水电站相比,小水电施工周期短、总投资低、运行维护简单、寿命长、对生态环境负面影响较小,因地制宜、合理地开发小水电,有利于完善新能源和可再生能源整体结构。

(4) 生物质能发电^[3,10]

生物质一般是指通过光合作用而形成的各种有机体,包括所有的动植物和微生物。生物质能即是以生物质为载体,将太阳能以化学能的形式储存起来,是太阳能的一种表现形式。生物质能在整个能源系统中地位重要,是仅次于煤炭、石油和天然气而居于世界能源消费总量第四位的能源。利用生物质为原料,通过直接燃烧或者气化等方式进行发电的技术就是生物质能发电。生物质能发电起源于 20 世纪 70 年代,目前,在欧美等发达国家,生物质能发电已成为重要的供电和供热方式。常见的生物质能发电原理和类型如表 1-6 所示。

表 1-6 生物质能发电的原理和类型

发电技术原理		发电方式	生物质来源
燃烧	固定床燃烧	直燃发电	农业资源,林业资源,固体废物,污水废水,畜禽粪便等
	流化床燃烧		
		与煤混燃发电	
气化	热化学法	气化发电	
	生物化学法		

生物质能分布广泛,由于其直接或者间接来源于光合作用,因此又取之不尽、用之不竭。地球上光合作用每年产生的生物质能,多达近 2 000 亿 t,相当于目前全球能源消费总量的 10~20 倍,但利用率不到 3%。我国生物质能资源相当于 50 亿 t 标准煤,其中可开发的部分约相当于 5 亿~10 亿 t 标准煤,2015 年,我国生物质能发电装机容量仅为 1 300 万 kW。此外,生物质能还是唯一可再生的碳源,可以转化为气态、固态和液态燃料,发展生物质能发电技术,能够有效地替代化石能源的消耗。

(5) 地热能发电

地热能是指以热能的形式储存在地球深处的能源,它一般来源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。由于地球寿命长、地热资源丰富,所以地热资源也被视为可再生能源。地热能发电,与火力发电的原理类似,就是把热能转换为机械能,再将机械能转换为电能,但热能的来源是地下的热能。地热能发电最早于 1904 年出现在意大利,当时只是提供 5 个 100 W 的电灯照明。经过一百多年的发展,地热能发电取得了较大进步,我国在 20 世纪 70 年代也开始发展地热发电。目前,主要的地热资源类型和发电方式如表 1-7 所示。

表 1-7 地热资源类型和发电方式^[2]

资源类型	蕴藏深度/km	温度/℃	发电方式
蒸汽型	3	200~240	蒸汽型地热发电 热水型地热发电
热水型	3	≥50	
低压型	3~10	>150	
干热岩型	3~10	150~650	
岩浆型	≥10	600~1 500	

据估计,全世界的地热资源相当于 4.6×10^{16} t 标准煤,但目前的钻探深度仅在 3 km 以内,加上受地质条件的限制,当前地热能的开发利用程度较低。2015 年,我国地热能发电装机容量不足 4 万 kW,而全球地热能发电总装机容量已超过 1 200 万 kW。可见,我国地热能的开发,仍潜力巨大。

(6) 海洋能发电^[2,11]

海洋能主要是指蕴藏在海洋中的可再生能源的总称,一般包括潮汐能、潮流能、波浪能、海流能、温差能和盐差能。由于海洋占地球表面积的 71%,海洋能储量巨大。据估计,海洋能的理论储量可达 780 亿 kW。人类虽然利用海洋能历史悠久,但由于受海洋自身条件以及技术水平的限制,对海洋能的开发利用还远不够。目前,海洋能最主要的应用方式是发电,主要的发电类型以及基于当前技术水平海洋能资源储量如表 1-8 所示。

表 1-8 海洋能发电类型

发电类型	能源成因	能源分布区域	全球可用储量 /亿 kW	我国可用储量 /亿 kW
潮汐能发电	太阳和月球对地球的 引潮力	45~55 °N大陆沿岸	17	1.1
潮流能发电				
海流能发电	海水密度、压力梯度 或风的作用	北半球两大洋西侧	6	0.3
波浪能发电	海面风的作用	北半球两大洋东侧	20~30	0.7
温差能发电	表层和深层海水温度 不同	低纬度大洋	20	1.5
盐差能发电	淡水向海水渗透形成 的渗透压	大江河入海口附近	26	1.1

我国早在 20 世纪 50 年代就已开始利用潮汐能发电,20 世纪 70 年代开始研究潮流能和波浪能发电技术。目前,针对海洋能的研究已经全面展开,但由于发电成本高以及

技术条件限制,潮流能、海流能以及盐差能等发电技术目前还没有进入大规模应用阶段。但随着新能源和可再生能源地位的不断提升,各种海洋能发电的大规模发展和应用是不可避免的。

(7) 核能发电

核能是通过核反应从原子核释放出来的能量。核反应有三种,分别是核裂变、核聚变和核衰变。核能发电与火力发电类似,其区别是以核反应堆及蒸汽发生器来代替火力发电的锅炉,以核燃料代替化石燃料,目前的核能发电主要是利用核反应堆中的核裂变。1954年,苏联建成世界上第一座核电站,1991年,我国建成第一座自行设计的核电站,即秦山核电站。2015年我国的核电装机容量已达3 000万kW。核电机组经过几十年的发展,目前已经进入了第四代核电技术的研发(表1-9)。

表 1-9 核电技术发展历程

核 电 技 术	起 始 年 代	主 要 特 征
第一代核电技术	20 世纪 50 年代	实验性的原型反应堆
第二代核电技术	20 世纪 60 年代	压水堆、沸水堆和重水堆等
第三代核电技术	20 世纪 90 年代	满足 URD 和 EUR 的压水堆型技术
第四代核电技术	21 世纪初	安全、经济、可持续、防核扩散、防恐怖袭击

注:URD,美国先进轻水堆型用户要求;EUR,欧洲用户对轻水堆型核电站的要求。

核裂变主要靠铀等重元素,陆地上的铀储量并不丰富,并且分布在少数国家,全世界适合开采的铀只有100万t左右,只够开采几十年。而在海水中,蕴藏的铀含量丰富,多达45亿t,足够人类使用几万年。此外,与核裂变相比,氢元素的核聚变释放的能量更大,并且核聚变所需的核燃料如氘、氚等在海水中的蕴藏量更大,足以满足人类上百亿年的能源消耗。如果实现可控核聚变,核燃料就真正成为取之不尽的能源,彻底解决能源问题。因此,核能的开发利用,也是新能源和可再生能源发展的重要方向之一。

(8) 燃料电池发电

燃料电池发电即是利用燃料电池将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转换为电能。燃料电池最早出现在1839年,真正以“燃料电池”命名是在1889年。我国的燃料电池研究始于1958年,因燃料电池具有发电效率高、适应多种燃料、环境友好等诸多优点,且与火力发电相比,不需要锅炉、汽轮机等设备,近年来发展较快。燃料电池一般可根据电解质、工作温度燃料的处理方式以及开发时间顺序进行分类,其中按照电解质是最常用的分类方式(表1-10)。

燃料电池可用的燃料种类较多,以氢气做燃料时,在产生电的同时,产物只有水,实现零排放。并且用纯氢做燃料时,系统启动时间短,动态响应快。此外,氢广泛存在于空气和水中,储量丰富。燃料电池发电,既可应用于军事、空间、发电厂领域,也可应用于机动车、移动设备、居民家庭等领域,前景广阔。