



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

Clean Energy
Techniques for Ships

船舶清洁能源技术

(第2版)

严新平 徐立 袁成清 编著

· 厚基础 宽口径 · 授理论 融先进 · 重实践 讲典型



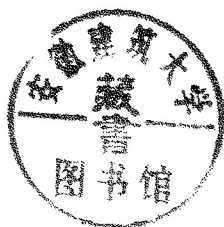
国防工业出版社
National Defense Industry Press

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

船舶清洁能源技术

(第2版)

严新平 徐立 袁成清 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书紧跟当前绿色船舶相关领域的发展前沿,以船舶为清洁能源适用对象,着重介绍了清洁能源技术的内涵、特点及在船舶上的应用系统和利用形式。全书共分为9章。内容包括:清洁能源的基本知识,船舶能量系统的构成及考核指标,风能、太阳能、核能、燃料电池等清洁能源在船舶上的应用系统及具体形式,船舶清洁能源的综合利用,以及船舶能效提升与控制。

本书可作为高等院校能源动力系统及自动化、热能与动力工程、轮机工程、海事管理、航海技术、交通运输、船舶与海洋工程、油气储运工程等学科、专业的教材,也可供从事轮机工程、船舶与海洋工程、环境保护工程、船舶新能源利用和港航管理的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶清洁能源技术/严新平,徐立,袁成清编著. —2版.

—北京:国防工业出版社,2015.5

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-118-10119-5

I. ①船... II. ①严... ②徐... ③袁... III. ①船舶—无污染能源—高等学校—教材 IV. ①X382

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第094891号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 397千字

2015年5月第2版第1次印刷 印数1—3000册 定价39.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

每一次开拓性的思维都印证着时代的发展,每一次创造性的工作都促进着科技的进步。

目前,尽管已有不少涉及新能源和可再生能源领域的著作出版,但这些著作大多介绍风能、太阳能、核能、燃料电池等技术本身的原理和最新进展,其目的是让读者对某项技术有全面、深入的理解,而在船舶动力工程专业教材中尚未见到专门论述清洁能源在船舶上应用及相关问题的教材。严新平教授等撰写的《船舶清洁能源技术(第2版)》正是涉及船舶清洁能源技术应用问题的专门之作,这是一部介绍新能源技术、富有时代特色并反映专业特点的教材。

近年来,低碳经济、绿色发展成为全球各行各业关注的焦点。国际航运业已经超过航空业,成为仅次于道路交通业的第二大主要污染物(NO_x 、 SO_x 以及PM)和 CO_2 排放源。为扭转这种日益恶化的局面,国际海事组织(IMO)也正在加快出台船舶节能减排新标准。随着公众对维护海洋安全、人命安全的重视,各种国际公约、标准、规范不断推陈出新,绿色船舶正成为海事界的重要词汇。自2008年10月召开的MEPC第58次会议上提出将新造船 CO_2 设计指数改为新船能效设计指数(Energy Efficiency Design Index, EEDI), EEDI便迅速成为国际海事界各方关注和争论的焦点。IMO正在以前10年间的数据为依据来设定基线,并将EEDI中的相关系数暂定为1。当基线设定完后,就可以得出IMO规定的EEDI值。随着时间的推移,IMO规定的EEDI值会越来越低,即对 CO_2 排放要求会越来越严格。

为防止气候变化进一步加剧,需要各国政府、各行各业采取一致的行动共同应对,这是大势所趋。由于具备雄厚的技术实力和超前开发的准备,在IMO船舶温室气体(GHG)减排相关会议上,欧盟等发达国家和地区要求新船能效设计指数(EEDI)尽快生效。而能效设计指数一旦生效,由于相关研究起步较晚,对我国船舶工业和航运业都是一个巨大的挑战。其实,EEDI只是IMO新规范中的一个。未来几年,还将强制执行目标型船舶建造标准(GBS)、压载水管理公约、柴油机排放控制、噪声控制等一系列新规范。为应对严峻的挑战,我国产学研单位都应积极行动起来,加快研发绿色船舶应用的新技术。

清洁能源在船舶上的应用无疑具有良好的发展前景。就目前新能源技术的发展现状来看,以风能、太阳能、核能以及燃料电池等为代表的清洁能源已初步具备在船舶上应用的基础,而且,其中单一能源的应用也已经有了可供参考和借鉴的实船案例。值得注意的是,纵观清洁能源在船舶上应用的各种技术方案或概念设计,仅利用风能或太阳能等单一模式并非为最优的应用模式。根据船型结构、航行区域和营运特点的不同,多种能源的综合利用已作为一个发展方向在船舶应用领域掀起了新一轮的研究热潮。

作为高等院校能源动力系统及自动化、热能与动力工程、轮机工程、海事管理、航海技术、

交通运输、船舶与海洋工程、油气储运工程等专业的本科生,毕业后即将进入船舶、航运、能源等企业工作,承担节能减排这项责无旁贷的重要任务,因此,有必要在大学教育期间学习一些绿色船舶应用的新能源知识。这本由严新平教授等编著的《船舶清洁能源技术(第2版)》为这方面的教学需要提供了合适的教材。

《船舶清洁能源技术(第2版)》较详尽地描述了风能、太阳能、核能和燃料电池等清洁能源技术在船舶上的应用系统和利用形式。我相信,该书出版后,能够为教育部联合有关部门和行业协会共同在高校中组织实施“卓越工程师教育培养计划”起到积极作用!

金东寒

前 言

根据当前能源形势分析资料,页岩气、页岩油和海上石油等非常规油气产量的攀升,为全球油气供给端注入了强心剂。在可预见的未来,能源结构仍将以化石能源为主。尽管石油占全球能源消费的比例已连续 14 年出现下降,但仍实现了 1.4% 的增长,依然是世界主导能源。煤炭作为全球最便宜的电力来源,深受新兴经济体青睐,成为增长最快的化石燃料,并出现供过于求的趋势。天然气在能源消费结构中的地位继续上升。

面对严峻的能源和环境问题,世界各国均把开发利用可再生能源作为保障能源安全、应对气候变化、实现可持续发展的共同出路。风能、太阳能、生物质能、水电、地热能等可再生能源发展迅速。2013 年,可再生能源在全球发电中的比例从五年前的 2.7% 增至 5.3%。预计随着可再生能源的快速增长,化石能源占一次能源消费的比例会从当前的 86.7% 缓慢下降至 2035 年的 81%。

国际能源形势变化预示着,一个相对宽松的能源市场环境正在确立,但中国作为世界上最大的能源消费国,且石油、天然气对外依存度已达到 58.1% 和 31.6%,今后仍将面临能源需求压力大、供给制约多、消费结构转型缓慢、能源地缘政治关系复杂等诸多挑战。同时,受技术、资金、能源价格等因素影响,我国能源利用率又低于工业发达国家十几个百分点。另外,我国的能源消费结构不合理,煤炭在能源消费中的比例远远高于其他国家,达到 70% (世界能源消耗结构中煤炭仅占 25%),成为世界上燃煤消耗最多的国家,也是世界污染排放的大国。因此,必须尽快改变不合理的能源消费结构,尽快扭转高耗能、高污染、低产出的经济增长方式。加快发展清洁能源技术,大力开发清洁能源(如太阳能、风能、海洋能、地热能等)的应用领域,是摆在我们面前的现实而又艰巨的任务。

全球经济的持续高速发展离不开远洋运输业的强力支持,作为新兴的发展中大国,经济的蓬勃发展是影响国运民生的关键环节。而航运业正是为本国的对外经贸往来提供了一个强有力的联系纽带。然而伴随着全球石油资源的长期开发利用,温室效应、环境污染、节能减排和能源可持续利用等一系列问题摆在了世人面前。自 2005 年国际海事组织公布的《防止船舶造成大气污染规则》生效之后,海运已被纳入对节能、环保具有积极意义的产业。联合国的一项最新研究报告表明,商业航运的 CO₂ 排放量是以前估计的近 3 倍。据估测,全球航运每年排放约 11.2 亿 tCO₂,约占全球 CO₂ 排放量的 4.5%,而国际海事组织以前估计为 4 亿 t。

进入 21 世纪,高效清洁能源正受到越来越多国家的高度重视。从保护环境、节约燃油消耗、提高企业经济效益的角度,国际上的各大航运企业都在积极寻找船舶节能减排的新方法,对船舶的节能减排技术方面更为关注,并逐步加大投入,清洁能源在船舶中的应用有着广阔的前景和美好的未来。

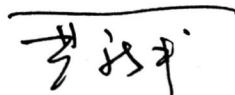
我国航运业所面临的国际温室气体减排要求形势异常严峻,面对建设“综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通”的重大需求,解决船舶节能、提速增效的需要,船舶清洁能源技术的应用就成为破解船舶节能低碳技术难题的关键。近年来,“绿色船舶”的技术趋势在国际范围内引起了学术界和工业界的广泛关注,“绿色船舶”赋予船舶总体、动力及配套设备技术以高新技术内涵,并引领着船舶技术的一场革命。“绿色船舶”的关键之一就是开发清洁能源在船舶上的应用,目前,太阳能、风能、核能等清洁能源的利用已引起了国内外业界的密切关注,可以确定的是,若能将清洁能源在船舶上进行有效利用,无疑为上述问题提供了一个极具发展前景的解决方案。

在此背景下,武汉理工大学船舶新能源项目组自2008年以来,先后承担和参与船舶新能源研发的项目有:《(采用蓄电池储能技术)太阳能在大型滚装船上的应用技术研究》《长江船运主力船型清洁能源推进系统关键技术及示范应用》《高效江海直达散货船关键技术》《大型远洋船风翼—柴油机混合动力低碳控制技术》《核动力船舶关键技术及安全性研究》《风帆太阳能技术在大型远洋船舶上应用的可行性研究》《船舶太阳能光伏逆变及智能控制系统》《海洋环境下船舶太阳能电池板光学性能衰减规律研究》《船用太阳能光伏系统应用基础研究》《中远之星客滚船太阳能光伏系统示范应用》《山区河流水上设施风、光、水流新能源复合供电关键技术研究》《船用太阳能光伏发电系统并网研究》《LNG燃料动力船舶安全性评价及其保障措施研究》等。在开展上述研究的过程中,项目组成员通过收集资料,结合研究成果,开展了本书的撰写和修订。

在推行素质教育的今天,积极并相宜地进行教材建设对高等教育起着关键作用,《船舶清洁能源技术》教材由于其时代意义和使用效果,于2014年被列入“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书在2012年3月第1版的基础上,针对开设课程的特点,开展了进一步的修订,各章节编写人员分别为:第1章(严新平、徐立),第2章(王立明、严新平),第3章(徐立),第4章(徐立、王立明),第5章(孙玉伟、袁成清、严新平),第6章(袁成清、魏乔),第7章(魏乔、袁成清),第8章(严新平、孙玉伟、徐立),第9章(尹奇志、袁裕鹏)。全书由徐立副教授组织,严新平教授统稿。

本书得到中国工程院院士、中国船舶重工集团公司第七一一研究所所长金东寒研究员的大力支持,并由金东寒院士为本书作序,在此表示诚挚的敬意。在本书的撰写和收集资料过程中,先后得到中国远洋运输(集团)总公司技术中心、中国外运长航集团有限公司、中国船舶重工集团公司第七一九研究所、长江三峡通航管理局、武汉南华工业股份有限公司等相关单位及人员的大力支持,同时国防工业出版社为本书的修订出版提供了大量帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请指正。



2015年3月

于武汉理工大学余家头校园

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 清洁能源的基本概念.....	1
1.2 清洁能源的技术现状.....	1
1.2.1 风能利用技术现状.....	1
1.2.2 太阳能利用技术现状.....	4
1.2.3 核能利用技术现状.....	6
1.2.4 燃料电池利用技术现状.....	8
1.3 清洁能源的需求.....	10
1.3.1 世界能源形势分析.....	10
1.3.2 经济发展中的能源环境问题.....	11
1.3.3 航运业所面临的挑战.....	12
第 2 章 清洁能源的基本知识	15
2.1 风能.....	15
2.1.1 概述.....	15
2.1.2 风能的特点.....	20
2.2 太阳能.....	20
2.2.1 概述.....	20
2.2.2 太阳能的特点.....	24
2.3 核能.....	24
2.3.1 概述.....	24
2.3.2 核能的特点.....	31
2.4 燃料电池.....	33
2.4.1 概述.....	33
2.4.2 燃料电池的特点.....	44
第 3 章 船舶能量系统	46
3.1 船舶能量需求.....	46
3.2 船舶能量系统的构成.....	46
3.2.1 船舶动力系统.....	47
3.2.2 船舶电力系统.....	52
3.2.3 船舶蒸汽系统.....	53
3.3 船舶能量系统的考核指标.....	53
3.3.1 气候变化相关法规.....	53

3.3.2	船舶减排标准的研究现状	54
3.3.3	新造船舶 CO ₂ 指数	55
3.3.4	营运船舶 CO ₂ 指数	59
3.3.5	船舶 CO ₂ 排放影响因素	62
3.4	存在的问题及减排措施	63
3.4.1	国际海运温室气体排放的特征	63
3.4.2	存在的问题	63
3.4.3	减少船舶 CO ₂ 排放的措施	64
第4章	风能及船舶应用	66
4.1	概述	66
4.1.1	国外发展现状	66
4.1.2	国内发展现状	67
4.2	风能的分布特点	69
4.2.1	地球表面上风的分布状况	69
4.2.2	大洋上风分布状况	74
4.3	风帆助航系统	76
4.3.1	风帆的类型	76
4.3.2	风帆的选择	81
4.3.3	风帆助航船舶的营运模式	83
4.3.4	风帆助航控制系统	83
4.3.5	安全性与可靠性	86
4.4	典型的风帆及其应用	92
4.4.1	帆翼	92
4.4.2	天帆	100
4.4.3	抽气式涡轮帆	104
第5章	太阳能及船舶应用	110
5.1	概述	110
5.1.1	国外发展现状	110
5.1.2	国内发展现状	113
5.2	太阳能分布规律及特点	115
5.2.1	太阳光谱	115
5.2.2	地球运转轨道	117
5.2.3	大气对太阳光的影响	118
5.2.4	太阳轨迹曲线	120
5.2.5	地球表面太阳辐射能分布	122
5.2.6	典型航线上的太阳能资源	124
5.3	太阳能光伏技术	127
5.3.1	太阳能光伏发电技术	127

5.3.2	光伏发电系统的组成	130
5.3.3	太阳能光伏系统的分类	134
5.4	太阳能应用的关键技术	135
5.4.1	最大功率点跟踪控制	136
5.4.2	蓄电池充放电控制	139
5.4.3	并网逆变技术	139
5.4.4	光伏系统的孤岛问题	144
5.4.5	谐波污染问题	146
5.5	船舶太阳能光伏系统	146
5.5.1	不同船型的适用性	146
5.5.2	设计流程	150
5.5.3	安全性与可靠性	152
第 6 章	核能及船舶应用	157
6.1	概述	157
6.2	核能在船舶上的应用特点	157
6.3	核能应用系统	158
6.3.1	核反应压水堆	158
6.3.2	船舶核动力装置的组成	160
6.3.3	核能应用系统可靠性及安全性	173
6.4	船舶核动力装置的应用形式	179
6.4.1	核动力客货船	179
6.4.2	核动力破冰船	179
第 7 章	燃料电池及船舶应用	182
7.1	概述	182
7.2	燃料电池在船舶上的应用特点	182
7.3	燃料电池应用系统	183
7.3.1	磷酸型燃料电池发电系统	185
7.3.2	熔融碳酸盐燃料电池发电系统	187
7.3.3	固体氧化燃料电池发电系统	193
7.3.4	质子交换膜燃料电池发电系统	196
7.4	燃料电池在船舶上应用的具体形式	199
7.4.1	燃料电池在潜艇上的应用	202
7.4.2	燃料电池在水面舰船上的应用	205
7.4.3	燃料电池在游艇上的应用	207
7.4.4	燃料电池在商船上的应用	209
第 8 章	船舶清洁能源综合利用	211
8.1	风能与太阳能的综合利用	211
8.1.1	Soliloquy Super - Green 游艇	211

8.1.2	Black Magic 油船	211
8.1.3	Hornblower Hybrid 轮渡客船	212
8.1.4	Plastiki 游艇	213
8.1.5	NYK Super Eco - ship 超级环保船	214
8.2	风能与 LNG 的综合利用	215
8.2.1	LNG 概况	215
8.2.2	Eoseas 邮船	215
8.2.3	Flettner 旋筒式 LNG 燃料邮船	216
8.3	风能、太阳能、波浪能和燃料电池的综合利用	216
8.4	其他利用形式	217
8.4.1	新型风帆船	217
8.4.2	LNG 和燃料电池集装箱船	217
第 9 章	船舶能效提升与控制	219
9.1	船舶动力能效提升方法	219
9.1.1	通航环境对船舶航行的影响	219
9.1.2	基于通航环境的船舶动力能效提升方法	220
9.1.3	船舶动力能效数据采集系统设计与实现	221
9.2	能量管理与控制方法	223
9.2.1	能量管理系统的构成	223
9.2.2	能量管理控制策略	228
附录	常用名词术语	235
1.	风能专业术语	235
2.	太阳能专业术语	237
3.	核能专业术语	238
4.	燃料电池专业术语	240
5.	能量管理系统专业术语	242
参考文献	243

第 1 章 概 论

1.1 清洁能源的基本概念

能源是指向自然界提供能量转化的物质(矿物质能源、核物理能源、大气环流能源、地理性能能源等)。能源是人类活动的物质基础。从某种意义上讲,人类社会的发展离不开优质能源的出现和先进能源技术的使用。在当今世界,能源的发展,能源和环境,是全世界、全人类共同关心的问题。

清洁能源的准确定义为:对能源清洁、高效、系统化应用的技术体系。具体含义有 3 点:①清洁能源不是对能源的简单分类,而是指能源利用的技术体系;②清洁能源不但强调清洁性同时也强调经济性;③清洁能源的清洁性指的是符合一定的排放标准。清洁能源具有非连续性、低依赖性和低能源密度的特点。

一般而言,清洁能源是指在生产和使用过程中不产生有害物质排放的能源,包括可再生的、消耗后可得到恢复的能源(如风能、太阳能、水能、燃料电池等),或非再生的、排放污染少的能源(如核能、天然气等)及经洁净技术处理过的化石能源(如洁净煤油等),其中可再生能源不存在能源耗竭的问题,因此日益受到众多国家尤其是能源短缺的国家的重视。

1.2 清洁能源的技术现状

1.2.1 风能利用技术现状

1. 风力发电

风力发电依靠风力机将风能转换为电能。风力发电始于丹麦,丹麦政府在 1890 年就制定了一项风力发电计划,随后建成了世界上首座风力发电站。到 1918 年已具备 72 台单机功率为 5~25kW 的风力发电机组。1931 年,苏联成功制造了一台 30kW 的水平轴风力发电机组,这是当时全球功率最大的一台风力发电机组。1941 年,美国试制了一台功率为 1250kW 的风力发电机组,但限于当时的技术水平,该发电机组运行不稳定,经济性低下,运行近 4 年后因大风折断叶片而停止运转。第二次世界大战后,由于经济复苏,能源不足,一些工业发达国家开始研制中型及大型风力发电机组。德国在 1955 年研制成了 100kW 风力发电机组。法国继 1950 年制成 130kW 风力发电机组后,又在 1958 年研制了 800kW 风力发电机组。但是在廉价石油和矿物燃料发电机组的冲击下,这些试验性风力发电机组均中止了运行。1973 年,由于西方发生了石油危机以及全球环境的不断恶化,风力发电技术又重新受到重视,各国都加紧了对风力发电机组的研究和开发。20 世纪 80 年代,单机容量为 100kW 以上的水平轴风力发电机组的研制在欧美迅速的发展起来。1987 年,美国研制成单机容量为 3.2MW 的水平轴风力发电机组,丹麦、德国、荷兰、西班牙等国也均研制成了 100kW 以上的风力发电机组。同时,为了解决风力发电机输出电能的不稳定性和容量不大的问题,技术人员采用了在同一场地装设

大量的风力发电机并联合向电网供电的系统。这种系统称为风电场。当前各国均在广泛建立大型风电场,包括陆地风电场和海上风电场。海上风电场与陆地风电场年发电量相比可增加20%~50%,且远离居住地,噪声干扰小。但海上风电场的建设需要解决湿度大、腐蚀性高、施工困难大等问题。目前,丹麦、瑞典、荷兰、英国等国家已建立了海上风电场。随着风电技术的进步,近岸、浅海风电场的建设将会加快。

风力发电除采用水平轴风力机,还采用垂直轴风力机。垂直轴风力机的风轮转轴与地面垂直。最具代表性的为法国工程师 Darrieus 发明的垂直轴风力机。这种风力机的风轮由2~4片跳绳曲线型叶片组成,其优点为不受风向影响,可利用任意方向吹来的风力,所以不需要对风装置,结构简单,造价较低,便于维护。其缺点为存在近地面的风轮部分,因近地面风力较小,所以风能转换效率低。此外,还存在启动、停车叶片制造和运输安装不便等问题。因此,目前风力发电机组98%采用水平轴风力机,垂直轴风力机已很少用。1987年,加拿大曾研制了一台这种类型的大型垂直轴风力发电机,容量为4.2MW,直径达100m,但现在也已停止使用。

风力发电不会释放CO₂,不会造成酸雨,不会污染大气、陆地和水源,因而是替代燃用化石燃料的常规火力发电站的首选方案。同时也是大量减少CO₂排放量的经济而有效的措施。研究表明,风力发电能力每增加一倍,其成本就会下降15%。近年来,全球风电增长率一直保持在30%,因而风电成本快速下降,在国外已接近燃煤发电的成本。

风力发电作为清洁能源技术中发展最快、最可能实现商品化、产业化的技术之一,近10年来取得了很大发展,特别是大型并网风力发电技术。世界风电的总装机容量中,中国的装机容量最大,其次是美国、德国、西班牙和印度,海上风力发电已经在丹麦、英国、意大利和瑞典等国得到广泛应用。欧洲风能协会的报告表明,到2020年,欧洲将有20%电力采用风力发电。目前丹麦风电已占其总电力的20%。该协会的另一份国际能源研究报告表明,到2020年,全球风力发电可提供全球电力需求的12%,可减少CO₂排放量 1×10^{10} t。此外,美国也计划到2030年使风电占其全部电力装机容量的30%。随着矿石燃料日渐枯竭和其价格的上升,火力发电成本将逐渐增高,风电成本则会随着风电机组容量的增大和风电场规模的扩展而继续下降。据联合国对新能源和可再生能源的估计,到2020年,风力发电成本可降到3美分/(kW·h)及以下。因而风电是近期及未来最具开发利用前景的可再生能源,其迅速发展是必然的趋势。

我国风力发电事业始于20世纪70年代,主要用于解决远离电网的边远地区的农村、牧区、海岛等地对电能的迫切需求,因而着重研制开发100~1000W的独立运行的离网型小型风力发电机组,取得了明显的经济效益和社会效益。目前,离网型小型风力发电机组的生产能力和年产量均居世界首位,除满足国内用户需求外,还出口国外。20世纪80年代,我国开始研制中大型风力发电机组,一方面将大型风力发电机组的研发列入国家科技攻关项目,组织国内科技力量和企业联合攻关,另一方面引进国外机组进行消化吸收,掌握大型风力发电机组制造技术,并进行组装或合作生产。1985—1995年,我国先后自行研制了120kW、200kW和300kW风力发电机组;1995—2003年,研制了600kW和750kW的固定桨距型风力发电机组,国产化率达到90%以上。为了配合国内大型风力发电机组的产业化,我国还逐步形成了叶片、齿轮箱、发电机、偏航系统、电控系统等零部件专业生产厂家。2005年自行研制的1.0MW变速恒频风力发电机组投运。2006年自行研制成功功率为1.5MW的变桨距变速风力发电机组,标志着我国兆瓦级大型风电机组的自主创新能力已达到世界先进水平。这台机组的国内造价为750万元左右,即1kW机组成本只有5000元左右,这使得风力发电机组的制造成本大为降低,已逐步接近常规火电造价4000元/kW的水平。我国《可再生能源中长期发展规划纲要

(2004—2020)》中规定,到2010年,并网风电装机容量为 5×10^6 kW,到2020年为 3×10^7 kW。因而到2020年,我国风电装机容量将是2005年风电装机总容量 1.26×10^6 kW的24倍,增长十分迅速。我国风电场建设工作始于1983年,当时在山东荣城以3台丹麦55kW风力发电机组作为并网型风力发电技术的示范试验风电场建成后,到2005年底,全国已建成61个风电场,总装机容量 1.26×10^6 kW。根据中国可再生能源学会风能专业委员会(CWEA)统计数据,2013年当年新增安装风电机组9356台,装机容量 1.609×10^7 kW,累计安装风电机组63120台,装机容量 9.141×10^7 kW。尽管风电在我国发展很快,但因起步较晚,即使到2020年,风电占全国发电量的比例仍将只有3%左右。我国风能资源丰富,清洁环保,开发利用潜力很大。随着其规模化发展、风电创新技术的进展、国产化率的进一步提高和矿石能源因日益枯竭而价格增高,风力发电的成本将低于常规火力发电的成本,并因此而得到更大规模的迅猛发展。

2. 风力提水

风力提水可用于农田灌溉、人畜饮水、海水制盐、水产养殖、草场改良或滩涂改造等工程的提水作业,经济效益和社会效益显著。我国早在1700多年前就已应用风帆式风车提水。古代科学著作《物理小识》中就有“用风帆六幅车水灌田”的记载。10世纪,伊斯兰人用风车提水并在中东获得广泛应用。12~14世纪风车在欧洲推广应用后,荷兰将其用于莱茵河三角洲湖地及低湿地的提水并用于碾谷和榨油等作业。我国到20世纪50年代末,这种传统的帆式风车提水机在江南和福建沿海地区仍在大量应用,仅江苏就有20多万台。美国中西部地区应用的多叶式风力提水机在19世纪末曾多达几百万台。目前,美、英、荷兰、丹麦等工业发达国家以及印度、墨西哥等发展中国家都在研发和应用与本国国情相配的风力提水机。

风力提水机总的工作原理为将风力机因风力而旋转的转轴运动应用传动机构使之转换成垂直方向的上下运动或较快转速的旋转运动,以此来传动与之相连的活塞式水泵或旋转式水泵。我国目前研发生产的风力提水机主要有两种,一种为低扬程、大流量风力提水机,用于提取地表水,其扬程一般为0.5~3.0m,流量为 $50 \sim 100 \text{m}^3/\text{h}$,主要在南方各省及东南沿海地区使用。其风力机由风轮、机头回转体、传动系统、尾翼、配重机构和塔架等部件组成。风轮由十几片叶片构成,以保证在低风速下也能转动。机头回转体可保证风轮绕回转中心线自由转动以保持迎风位置。传动系统由上、下两个变速箱和传动轴组成。上面的变速箱将风轮的水平轴旋转变为垂直传动轴的旋转运动。下面的变速箱再将垂直传动轴的旋转运动变为输出的水平轴旋转运动并驱动水泵提水。与之配套的旋转式提水机有龙骨水车、钢管水车和螺旋泵、离心泵等。尾翼及调速机构可保证风轮平时保持迎风位置,在风力过大时使风轮偏离风向某一角度或在8级大风时使风轮与尾翼并拢,达到停车状态。

另一种风力提水机为高扬程、小流量风力提水机,用于提取深井地下水。其扬程一般为10~146m,流量为 $0.5 \sim 5 \text{m}^3/\text{h}$,主要用于北方及草原牧区。这种提水机的风轮与前一种相似,但风轮的叶片数更多,一般为16~24片。其传动箱的功能是将风轮的水平轴旋转运动变为与传动箱连接的垂直拉杆的上、下往复运动。拉杆下端与活塞泵的泵杆相连。这样风轮旋转使拉杆带动泵杆和活塞做上下往复运动进行提水。

3. 风帆助航

人类最早利用风能的方式为风帆助航,埃及是最先利用风能的国家。约在5000年前,埃及的风帆船已在尼罗河上航行。我国在3000年前的商朝出现了风帆船,到唐朝,帆船已广泛航运于江河。此后,随着帆船制造技术的进步,科技的发展和航行经验的积累迎来了风帆助航的辉煌时期15世纪。15世纪是人类历史上的大航海时期,在此期间,我国航海家郑和七下西

洋,哥伦布乘帆船发现了美洲新大陆。此后,随着蒸汽机和内燃机的发明以及煤、石油等矿石能源的大规模开采和利用,帆船因动力小和速度慢而逐渐被淘汰。

1973年西方发生石油危机后,随着矿石燃料储量的日益短缺和价格上升,风帆助航又重新受到了船舶设计制造界的重视。1980年,日本建成了全球第一艘现代风帆船“新爱德丸”号。这艘船载重1600t,排水量2400t,装有两具折叠式矩形翼型风帆和一台低速柴油机作为辅助动力,两者配合使用。风帆以风能作动力使船航行,因而可节省燃油。这艘船与载重量相同的普通机动船相比,可节省50%的燃料,但运输时间要增加20%。现代风帆都由计算机控制,使风帆转动角度尽量保持最佳风力利用状态。2007年,德国制造了一艘风筝助航船“白鲸天帆”号并投入航行。这艘船除装备常规动力系统外,还安装了一个面积达160m²的巨型风筝。一根固定在船头,可自动伸缩的桅杆将风筝送到高空300m处以利用海面上空稳定而强劲的风力拉动船只航行。风筝由超轻合成纤维制成,在风速达到13km/h时,风筝为船提供的动力相当于普通风帆的4倍,船上的发动机可以全部停止工作。正常航行时,计算机根据风力、风向调整风筝在不同方向拉动船只,减轻船舶引擎负荷。该船的风筝助航系统造价为72万美元,3年即可因燃料节省费用而回收。此外由于节省了燃料,船只排出的温室气体也降低不少。全球航运业每年排放的CO₂约为8×10⁸t,5年内将增加到每年1×10⁹t,据估计全球有一半船舶可加装风筝助航系统,全部加装后,根据风力状况的不同,平均可节省燃料18%,每年可减少CO₂排放量近1.5×10⁸t。

1.2.2 太阳能利用技术现状

1. 太阳能光伏发电技术

太阳能光伏发电(PV)是直接太阳光转换为电能的一种发电形式,光伏电池的工作原理基础是半导体PN结的光生伏特效应,即当半导体受到光照射时,其内部电荷分布状态发生变化而产生电势和电流。光伏电池通常被封装在模块里,每个模块提供的电能高达数百瓦,大量模块组合在一起组成光伏电池阵列,提供强大的电力。光伏系统由晶体半导体模块或薄膜组成,总的系统效率为6%~15%,取决于不同类型的光伏电池,而光伏电池在实验室的效率还要高些,例如单晶硅电池的实验室最高效率为24.7%,多晶硅电池的实验室最高效率达到20.3%,非晶硅薄膜电池、碲化镉(CdTe)和铜铟硒(CIS)的实验室效率分别为13%、16.4%和19.5%。

光伏系统的成本变化很大,主要取决于系统大小和安装地方、用户类型、并网连接和技术规定等,一个标准的建筑集成光伏系统,大约2/3的成本在模块上,其余1/3为逆变器和模块支架结构等部件的费用,而光伏电池又占了模块中1/2以上的成本。所以只要能取得相同转换效率的效果,便宜的光伏电池可以降低系统成本。

投资成本是决定未来光伏系统发电电价的最主要因素,运行和维护费用相对较低,一般只有投资费用的1%~3%,光伏系统预计的寿命为20~30年,但逆变器和蓄电池每隔5~10年就要更换,如果在气候炎热的地方,更换还要频繁。据估计,未来光伏系统价格下降的一半潜力将来自于通过研发和示范不断提高材料性能、工艺过程、转换效率和完善设计,扩大生产规模和经济规模也能实实在在降低其成本。

太阳能光伏发电产业是20世纪80年代以来世界上增长最快的高新技术产业之一。2013年全球太阳能光伏发电累计装机容量超过102GW,其中我国太阳能光伏发电装机容量接近9GW。已经商品化、实用化的太阳能光伏电池主要有单晶硅电池、多晶硅电池、非晶硅电池、

聚光电池、带状硅电池及薄膜电池等几类。在国际市场上,目前太阳能光伏电池的价格大约为 3.15 美元/W,并网系统价格为 6 美元/W,发电成本为 0.25 美元/(kW·h)。光伏电池的光电转化效率也不断提高,晶体硅光电转化率 15%,单晶硅光电转化率是 23.3%,砷化镓光电转化率是 25%,在实验室中特制的砷化镓光电转化率已达 35%~36%。太阳能光伏电池/组件使用寿命大大增长,可使用 30 多年。

目前,光伏发电主要集中在日本、欧盟和美国,其光伏发电量约占世界光伏发电量的 80%。今后光伏发电系统主要围绕高效率、低成本、长寿命、美观实用等方向发展。专家们预测到 2050 年,太阳能光伏发电在发电总量中将占 13%~15%,到 2100 年将约占 64%。

20 世纪 90 年代以来是我国光伏发电快速发展的时期。在这一时期我国光伏组件生产能力逐年增强,成本不断降低,市场不断扩大,装机容量逐年增加,2004 年累计装机容量达 35MW,约占世界份额的 3%。十几年来,我国光伏产业长期平均维持了全球市场 1% 左右的份额。

到 2020 年前,我国光伏技术产业将会得到不断的完善和发展,成本将不断下降,光伏市场会发生巨大的变化:2005—2010 年,我国的太阳能电池主要用于独立光伏发电系统,发电成本截至 2010 年已降至 1.00 元/(kW·h);2010—2020 年,光伏发电将会由独立系统转向并网发电系统,发电成本到 2020 年将约为 0.60 元/(kW·h)。到 2020 年,我国光伏产业的技术水平有望达到世界先进行列。

2. 太阳能热发电技术

太阳能热发电技术,即把太阳辐射热能转换成电能的发电技术。它包括两大类:一类是利用太阳热能直接发电,如半导体或金属材料的温差发电、真空器件中的热电子和热离子发电以及碱金属热发电转换和磁流体发电等,这类发电的特点是发电装置本体没有活动部件,但此类发电量小,有的方法尚处于原理性试验阶段;另一类是将太阳热能通过热机带动发电机发电,其基本组成与常规发电设备类似,只不过其热能是从太阳能转换而来。

1878 年,一个小型的太阳动力站在巴黎建立,该装置是一个小型点聚集太阳能热动力系统,盘式抛物面反射镜将阳光聚焦到置于其焦点处的蒸汽锅炉,由此产生的蒸汽驱动一个很小的交互式蒸汽机运行。1901 年,美国工程师研制成功 7350W 的太阳能蒸汽机,采用 70m² 的太阳聚光集热器,该装置安装在美国加利福尼亚州实验运行。1950 年,苏联设计了世界上第一座塔式太阳能热发电站的小型实验装置,对太阳能热发电技术进行了广泛的、基础性的探索和研究。1952 年,法国国家研究中心在比利牛斯山东部建成一座功率为 1MW 的太阳炉。

1973 年,世界性石油危机的爆发刺激了人们对太阳能技术的研究与开发。相对于太阳能电池的价格昂贵、效率较低,太阳能热发电的效率较高、技术比较成熟。许多工业发达国家,都将太阳能热发电技术作为国家研究开发的重点。从 1981—1991 年的 10 年间,全世界建造了装机容量 500kW 以上的各种不同形式的 MW 级太阳能热发电试验电站 20 余座,其中主要形式是塔式电站,最大发电功率为 80MW。

20 世纪 80 年代初期,以色列和美国联合组建了 LUZ 太阳能热发电国际有限公司。从成立开始,该公司集中力量研究开发槽式抛物面聚光反射镜太阳能热发电系统。从 1985—1991 年的 6 年间,在美国加利福尼亚州沙漠相继建成了 9 座槽式太阳能热发电站,总装机容量 353.8MW,并投入电网营运。经过努力,电站的初次投资由 1 号电站的 4490 美元/kW 降到 8 号电站的 2650 美元/kW,发电成本从 24 美分/(kW·h)降到 8 美分/(kW·h)。到 2000 年,在加利福尼亚州建成总装机容量达 800MW 的槽式太阳能热发电站,发电成本降至 5~6 美分/

(kW·h)。这一进展在经济性上已可与常规热力发电相竞争。

盘式(又称碟式)太阳能热发电系统(抛物面反射镜/斯特林系统)是世界上最早出现的太阳能动力系统。盘式太阳能热发电系统是由许多镜子组成的抛物面反射镜组成,接收在抛物面的焦点上,接收器内的传热工质被加热到 750℃左右,驱动发电机进行发电。

近年来,盘式太阳能热发电系统主要开发单位功率质量比更小的空间电源。盘式太阳能热发电系统应用于空间,与光伏发电系统相比,具有气动阻力低、发射质量小和运行费用便宜等优点。例如,1983年,美国加利福尼亚州喷气推进试验室完成的盘式斯特林太阳能热发电系统,其聚光器直径为 11m,最大发电功率为 24.6kW,转换效率为 29%。1992年,德国一农工程公司开发的一种盘式斯特林太阳能热发电系统的发电功率为 9kW,到 1995年3月底,累计运行了 17000h,峰值净效率 20%,月净效率 16%,该公司计划用 100台这样的发电系统组建一座兆瓦级的盘式太阳能热发电示范电站。

由于碟式/斯特林系统光学效率高,启动损失小,效率高达 29%,在 3种系统中位居首位。

以上 3种系统均可单独使用太阳能运行,安装成燃料混合(如与天然气、生物质气等)互补系统,各系统之间的性能比较如表 1-1 所列。

表 1-1 3种太阳能热发电系统性能比较

	槽式系统	塔式系统	碟式系统		槽式系统	塔式系统	碟式系统
规模	30~320MW	10~20MW	5~25MW	互补系统设计	可以	可以	可以
峰值效率	20%	23%	24%	美元/W	4.0~2.7	4.4~2.5	12.6~1.3
年净效率	11%~16%	7%~20%	12%~25%	美元/Wp	4.0~1.3	2.4~0.9	12.6~1.1
可否储能	有限制	可以	蓄电池				

就表 1-1 所列几种形式的太阳能热发电系统而言,塔式热发电系统的成熟度目前不如抛物面槽式热发电系统,而配以斯特林发电机的抛物面盘式热发电系统虽然有比较优良的性能指标,但目前主要还是用于边远地区的小型独立供电,大规模应用成熟度则稍逊一筹。

在中国,随着太阳能利用技术的迅速发展,从 20世纪 70年代中期开始,一些高等院校和中科院电工研究所等单位 and 机构也对太阳能热发电技术做了许多应用性基础实验研究,并在天津建造了一套功率为 1kW 的塔式太阳能热发电模拟实验装置,在上海建造了一套功率为 1kW 的平板式低沸点工质太阳能热发电模拟实验装置。在北京,中科院电工研究所对槽式抛物面反射镜太阳能热发电用的槽式抛物面聚光集热器也作了试验研究。中国科学院理化技术研究所于 2010年研制出了一套 1kW 级碟式太阳能行波热声发电系统。此外,2011年 4月,中国宁夏回族自治区石嘴山市惠农区境内立起了一套 10kW 级碟式聚光太阳能热发电系统样机,并在现场进行了试运行。

1.2.3 核能利用技术现状

1. 核能发电技术

核能发电利用铀燃料进行核分裂连锁反应所产生的热,将水加热成高温高压蒸汽状态。核反应释放的热量较燃烧化石燃料所放出的能量要高很多(相差约百万倍),比较起来所需要的燃料体积比火力电厂少许多。核能发电所使用的铀-235 纯度只占 3%~4%,其余皆为无法产生核分裂的铀-238。

核能发电的历史与动力堆的发展历史密切相关。动力堆的发展最初是出于军事需要。