

波浪能转换技术的研究与发展

平 丽¹, 董国海¹, 游亚戈²

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 辽宁 大连 116024; 2. 中国科学院广州能源研究所 广东 广州 510070)

摘要 : 简要回顾近代波浪能利用的发展历程, 介绍 20 世纪 90 年代以来国际上有关波力发电的理论研究成果和应用技术、主要波浪能转换装置, 以及现有理论在应用中的局限性和波力发电开发中亟待解决的问题。今后波浪能的开发利用将走多元化、综合利用的道路。

关键词 : 波浪能, 能量转换, 波力发电, 波力电站, 新能源

中图分类号 : P743

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2004)07-0124-04

20 世纪 60 年代以前, 波浪能利用的研究主要集中在波浪能转换装置的发明方面, 有关波浪能技术的专利已超过 1000 项。这些技术大都源于 5 种基本思想, 即: 起伏体和纵摇体; 空腔共振器; 压力装置; 浪涌能量转换器和粒子运行转换器。20 世纪 60 年代初, 日本的益田善雄研制成功航标灯用波力发电装置, 开创了波浪能利用商品化的先例。

20 世纪 70 年代, 以英、挪、日、美等国为代表, 对众多的波浪能转换原理进行了较全面的研究, 筛选出几种有前途的波浪能转换方案并提出了几种创造性的新设计和概念。其中较著名的有鸭式和随波筏式装置、水下透镜和天线效应聚波原理以及对称翼涡轮(Wells 透平)等。

20 世纪 80 年代, 波浪能利用的研究进入了以实用化、商品化为目标的应用示范阶段, 并基本建立了波浪能装置的设计理论和建造方法。海洋工程中的锚系、海底电缆以及造船和港工技术等成功地应用了波浪能技术。研究课题也集中于几种较佳方案, 其中以振荡水柱(OWC)式波浪能装置为主, 波浪聚集式居次。

20 世纪 90 年代以来, 随着波浪能转换装置技术的日趋成熟以及在实用化方面取得的进展, 波浪能利用已朝着多元化和综合利用的方向发展。结合防波堤等海工和港工设施建造波力电站, 大大降低了波力发电的成本。电站的吸能作用, 还可减轻作用在海工建筑物上的波浪载荷, 增加可靠性; 同时, 研究者们还将波浪能装置设计成综合利用的空间, 一个包含波浪发电、海上养殖和旅游的综合系统。此外, 波浪能利用与环境和海洋资源利用相结合, 提高

了波浪能的利用率。如建造了波浪能和风能为动力的发电站等。但 20 世纪 90 年代以来, 波浪能装置的发电原理主要还是以振荡水柱式为主。近两年, 在 OWC 基础上研制出一种振荡浮子式波浪能转换装置, 其吸取了 OWC 的优点, 采用岸式装置, 同时又克服了 OWC 成本高、施工困难等缺点, 其发展前景看好。本文拟对 20 世纪 90 年代以来波浪能研究和利用领域所取得的进展及其发展动向作一简要介绍。

1 波浪能转换技术的现状

20 世纪 90 年代以来, 日本、英国、葡萄牙、中国等国家先后建造了多座不同形式的波力电站, 以论证波浪发电的技术可行性和经济性。

1.1 漂浮式波力发电装置

a. “巨鲸”装置。“巨鲸”(mighty whale)是日本海洋科学中心(JAMSTEC)于 20 世纪 90 年代初开始研建、继“海明”之后推陈出新的又一大型波浪能研究计划。它是一种发展的后弯管漂浮式装置。其外形类似一条巨大的鲸鱼(图 1)。装置的气室设计在结构的前部, 长长的身体除了利于吸收波能外, 还可作为综合利用的空间。当入射波浪较小时, 由于稳定性好, 装置具有固定式系统的特性; 当入射波较大时, 则是一个漂浮式吸能系统。JAMSTEC 已完成了装置的实验研究和方案论证并从日本科学技术委员会获得资助。一个包括波浪发电、海上养殖和旅游业在内的综合利用计划已交付石川岛播磨重工业公司进行设计制造。装置于 1998 年完成制造, 投放于三重县外海。装置宽 30 m, 长 50 m, 安装了 1 台 10 kW、2 台 50 kW 和 2 台 30 kW 的发电机组。此装置的研制成功

标志着波浪能利用已从单一的波力发电转向多元化和综合利用。

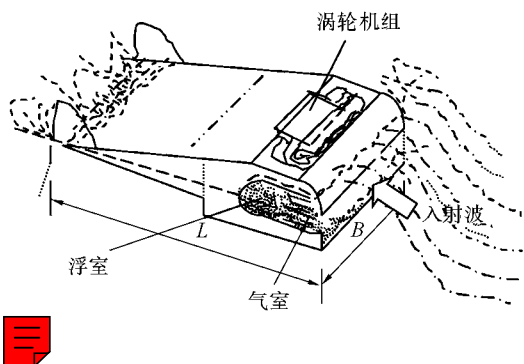


图1 “巨鲸”装置

b. 英国海蛇号 (pelamis) 波力发电装置. 该装置由英国海洋动力传递公司 (Ocean Power Delivery Ltd) 于1998年1月开始研制, 2002年3月完工. 海蛇号是漂浮式的、由若干个圆柱形钢壳结构单元铰接而成、将波浪能转换成液压能进而转换成电能的装置 (见图2). 它具有蓄能环节, 因而可以提供与火力发电相当稳定度的电力. 英国海洋动力传递公司现已承接建造一个750 kW 海蛇号波力发电装置的项目. 装置的投放地点为苏格兰的 Islay 岛附近海域. 该公司还和加拿大的 BC Hydro 公司签订了在加拿大 Vancouver 岛建 2 MW 海蛇号波力发电装置的备忘录.

c. 中国后弯管式波浪发电浮体和“中水道 1 号”灯船. 1990 年, 在中国琼州海峡中水道 1 号灯船上研制成功了带后弯管的波浪发电装置, 随后又在湛江水道、珠江口水道的两个灯船上安装了相同的波力发电装置, 为航标灯 (平均功率 30 W) 和雷达应答器 (平均功率 20 W) 提供电源, 这是世界上首次将波浪发电电源用于灯船. 中水道 1 号灯船锚泊在琼州海峡, 风大浪高, 发电效果很好, 可是锚链曾两次被风浪打断, 当第二次被打断时, 灯船也不知了去向. 安装在湛江和珠江口两个灯船上的波浪发电系统, 由于锚泊处水流太急, 波浪作用效果不是很好, 发电量较小, 后被其他电源取代. 随后, 中国又与日本合作研制后弯管的波浪发电浮体, 安装了一台 5 kW 空气涡轮发电机组, 锚泊在珠江口, 进行实海况发电实验.

1.2 固定式波力发电装置

a. 葡萄牙 500 kW 振荡水柱波力发电站. 葡

萄近年来比较重视波浪能研究. 里斯本大学和葡萄牙工业技术研究院等合作, 在欧共体“焦尔”计划和葡萄牙政府资助下, 正在建造一座 500 kW 的岸式振荡水柱波力电站. 电站位于阿左内斯群岛的比克岛, 1998 年已完成主体结构建设, 1999 年发电. 电站气室宽 12 m, 纵深 12 m, 电站顶部高约 20 m, 前墙吃水 2.5 m. 对称翼涡轮机的直径 2.3 m, 前后均有活动导叶, 涡轮机可在 750 ~ 1500 r/min 范围工作, 发电机额定功率 400 kW. 电站运行时应用了相位控制技术, 以提高在不规则海浪中的电力输出.

b. 中国 100 kW 岸式振荡水柱波力电站. 1998 年 6 月, 由中国科学院广州能源研究所承担的国家“九五”重点科技攻关项目“100 kW 岸式波力电站研建”在广东省汕尾市遮浪镇最东部 (北纬 22°39', 东经 115°34') 正式开工兴建, 工程结束于 2001 年 2 月. 它的建成, 成为中国首座达到工业应用规模的实用型示范波力电站. 该电站采用波浪能利用中最为成熟的振荡水柱式新技术, 通过与海水连通气室, 使波浪能转换为空气动能, 然后利用空气涡轮机带动 100 kW 的异步发电机发电, 输出电压为 400 V, 可并入 10 kV 高压电网, 其工作原理如图 3 所示. 100 kW 岸式波力电站是一座与电网并网运行的岸式振荡水柱型波浪能转换装置, 它由气室主体结构、涡轮发电机组和输配电控制系统等部分组成. 电站主体能抵抗 50 年一遇台风, 工作寿命 15 a. 在入射波高 $H_{1/10} = 1 \sim 3$ m, 平均周期 $T = 5 \sim 7$ s 时, 平均发电功率 $N = 5 \sim 40$ kW, 最大发电功率 $N_{\max} = 100$ kW. 100 kW 岸式波力电站的研建, 使大型波浪能装置的设计、建造、保护等各方面均有较大幅度的提高, 推进了波浪能装置的实用化进程, 使我国的波浪能转换研究基本达到国际同时期的先进水平. 而且设有过压自动卸载保护、过流自动调控、水位限制、断电保护、超速保护等功能. 所有保护功能均在计算机控制下自动执行, 大大减少了人工干预的需要, 使波能装置在实用化道路上迈出了可喜的一步.



图2 英国海蛇号波力发电装置

c. 英国的 500 kW 岸式波浪能装置. 英国 500 kW 岸式波能装置 (land-installed-marine-powered energy transformer, LIMPET) 2000 年 11 月在苏格兰 Islay 岛建

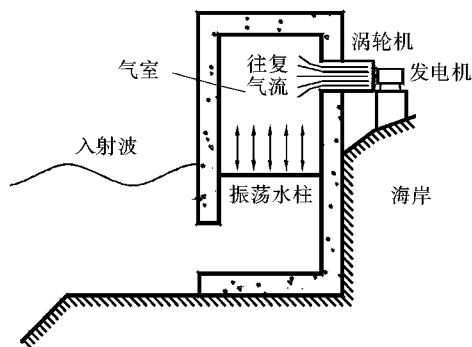


图3 振荡水柱式波浪能转换装置

成(图4)。该装置由英国波浪能发展商 WAVEGEN 公司和英国女王大学合作研建,由欧共体提供经费支持,可以为 400 户当地居民供电。该装置采用模块化结构,站址处波浪能功率密度为 25 kW/m 。该装置目前已经发电并网,并与苏格兰公共电力供应商签订了 15 a 的供电合同。



图4 英国 500 kW 岸式波浪能转换装置

d. 振荡浮子式波浪能转换装置。该装置是在振荡水柱式装置的基础上发展起来的波力发电装置。它用一个放在港中的浮子作为波浪能的吸收载体,然后将浮子吸收的能量通过一个放在岸上的机械或液压装置转换出去,用来驱动电机发电,如图 5 所示。振荡浮子式波浪能转换装置吸取了振荡水柱式装置的优点,采用岸式装置,而且克服了振荡水柱式装置转换效率低、施工困难等缺点,引起了许多研究者的关注,是目前具有发展前景的一种波浪能转换装置研究方案。

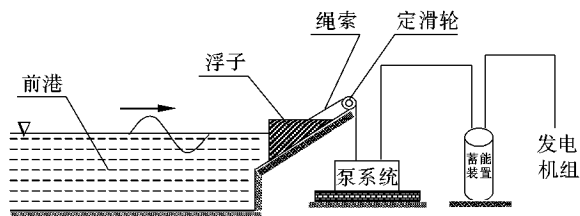


图5 振荡浮子式波浪能转换装置

1.3 珠海大万山防波堤波力电站

我国海军于 1994 年 1 月建成了珠海大万山防波堤兼码头。防波堤总长为 373.2 m。波浪要素为:每年平均波高 4.41 m,周期 7.7 s,波长 7.2 m。同年,将《双喷嘴空气透平波浪发电装置》专利技术用于该防波堤,使防波堤既具备消波功能,又具备发电功能。

防波堤波浪发电原理是:防波堤利用波浪在沉箱内上下相对运动产生的往复式空气流,引入下部喷嘴或上部喷嘴的气流以小角度和相同的方向喷出,推动空气涡轮机叶片向同一方向旋转,空气涡轮机直接带动三相永磁交流发电机旋转发电,发出的交流电通过发电机壳内的二极管整流,输出直流电对蓄电池进行充电,蓄电池向灯器等提供电源。防波堤波浪电站不但能消耗 $1/2$ 的波浪能量,还可每年发电约 588.7 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,每年产生经济效益约 359 万元,5 a 可收回投资。

1.4 摆式波浪能转换装置

摆式波浪能转换装置研究项目是由中国国家海洋局海洋技术研究所研制的、坐落于山东省即墨市大管岛的国家“九五”科技攻关项目。30 kW 摆式波力电站于 1999 年 6 月开始实海况试验,电站所发的电首先对蓄电池充电,然后再供给用户使用。在入射波高为 1 ~ 6 m 时,电力平均输出功率约为 1 ~ 30 kW。该电站按照抵抗 20 年一遇台风的标准建造,目前运行状况良好。

2 波浪能转换的基础研究

波浪能转换研究工作大都基于线性理论且以 OWC 装置为对象,但基本方法也适合于其他类型的装置。采用格林函数法进行的波浪能装置三维水动力分析,对离岸装置的计算结果与实验值较接近,而对沿岸装置的结果明显偏大。这也许是线性理论的小波高假设所致。包含水动力、气动力和电机工程在内的 OWC 装置系统模型已基本建立,优化设计的研究则主要在水动力参数优化(附加质量、阻尼、波浪力等)和耦合匹配设计两方面展开。

对称翼涡轮机的研究,早期的工作主要是涡轮的叶栅性能,近年来提出了双翼式涡轮和叶片迎角可调式涡轮。国内的研究则侧重于涡轮的叶形和翼型。对称翼涡轮机的最大优点是结构简单、可靠性好,但大多数涡轮机的效率仍只有 30% ~ 50%。提高涡轮机的效率和探索能在往复气流中高效做功的新型涡轮机很有必要。

波浪能转换理论研究中的另一课题是相位控制。通过控制波浪能装置的运动相位使装置与来波产生共振,诱导波浪转换在装置周围聚集。这一概念首先由挪威科学家 K. Budal 提出并对浮体的运动相位控制进行了研究。后来,英国与日本的科学家又研究了 OWC 的相位控制问题。虽然,相位控制可提高装置的效率,但鉴于控制机构复杂、费用高以及非线性随机控制方法上的困难,尚未能得到实际应用。

除波力发电外,波浪能转换理论还被应用于其

他海洋工程.例如,利用鸭式波浪能装置开发的吸波式造波机和利用透镜聚波原理的新型防波堤等.

3 波浪能转换技术的发展方向

波浪能转换装置的生命力由以下三要素决定:①能有效利用波浪能的变换技术;②具有可靠性高、寿命长、造价与维护费用低廉的大型设备系留技术;③波浪能传输的距离和输出品质.但提高波浪能利用率,降低波力发电的成本始终是波浪能研究的目标.

基础研究方面,线性理论范围的问题大都得到解决,但非线性问题,特别是非线性随机问题的研究日趋紧迫.主要课题有:非线性水动力学分析;波浪能系统的非线性随机模型;实海况中波浪能装置的性能预报和谱分析;随机波浪作用下的非线性参数优化和运行控制等.这些课题的解决将导致波浪能装置设计的重大更新.此外,波浪能系统的品质准则与设计规范也是一个重要课题.波浪能装置对效率、可靠性、经济性和实用性等方面的要求相互矛盾很大.波浪资源丰富的站址通常远离用户且不便管理和施工.安全的设计可能会导致效率的降低和成本的增加等等.到目前为止,涉及这方面的研究特别是国内的研究仍然很少.

随着波浪能多元化、综合利用的发展,波浪能转换装置的设计要求要与其相应,即多元化和综合利用.波力发电装置的应用前景是:①漂浮式消波堤兼发电用于海水养殖场,为养殖场提供水域和电源;②波力发电为海上灯船、海上孤岛、海岛灯塔、海上气象浮标及海上石油平台等提供能源;③将固定式防波堤建成消波、发电兼码头为一体的大型波力发电站,并入城市电网;④漂浮式发电船群构成大型波力发电站,并入城市电网,水域作为海港.总之,随着波浪能转换装置研制技术的成熟,波浪能将会在更多的领域发挥作用.

4 结 语

对于波力发电,首先要确保发电装置在海上的“生存”能力,包括正确的结构设计和良好的保护措施;其次是选择最好的波浪能转换方式,使能量转换的各个环节都有较高的效率,避免出现某一环节的效率低下导致系统效率低下的现象;再则是发电质量有待提高.尽管在世界范围内波浪能的研究和利用已经取得了很大的成功,但是还没有使其得到充分利用,还有许多问题尚未解决.随着今后的研究和

发展,波浪能将被更深、更广的利用.例如,波浪能与风能、太阳能、海洋热能的综合利用;利用波浪能提取深层海水,为海水供氧以改善海水牧场的养分;利用波浪能清除海洋污染;波浪能船舶推进;波浪能海水淡化、制氢、提取海洋中的贵重元素等等.可以说,波浪能的利用是无止境的.

参考文献:

[1] 陶尧森,沈志东,费乃振.三维振荡水柱波浪能转换装置的流体动力计算[J].海洋工程,1988,3(4):85~95.

[2] 余志.海洋波浪能发展技术进展[J].海洋工程,1993,11(1):86~93.

[3] SU Yong-ling, YOU Ya-ge, ZHENG Yong-hong. Investigation on the oscillating buoy wave power device[J]. China Ocean Engineering, 2002, 16(1):141~149.

[4] YOU Ya-ge, Zheng Yong-hong, Shen Yong-ming, et al. Wave energy study in China advancements and perspectives[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(1):101~109.

[5] 蔡国民.双喷嘴空气涡轮机波浪发电装置[P].中国:01246364.7, 2002-03-27.

[6] 梁贤光,孙培亚,游亚戈.汕尾100kW波力电站气室模型性能试验[J].海洋工程,2003,21(1):113~116.

[7] You Y. Hydrodynamic analysis on wave power devices in near-shore zones[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 1993(3):42~54.

[8] Koola Paul Mario, Ravindran et al. Model studies of oscillating water column wave energy device[J]. J Energy Eng, 1995, 121(1):14~27.

[9] Eidsmoen H. Optimum control of a floating wave energy converter with restricted amplitude[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1996, 118:96~102.

[10] Mynett A, Serman D, Mei C. Characteristics of Salter's cam for extracting energy from ocean waves[J]. Applied Ocean Research, 1979, 1(1):13~20.

[11] Pizer D J. Maximum wavepower absorption of point absorbers under motion constraint[J]. Applied Ocean Research, 1993, 15:227~234.

[12] Korde U A. On the control of wave energy devices in multi-frequency waves[J]. Applied Ocean Research, 1991, 13(3):132~144.

[13] Koola P M, Ravindran M, Aswatha et al. Model studies of oscillating water column wave energy device[J]. Journal of Energy Engineering, 1995, 119(1):14~27.

[14] Salter S H. Wave power[J]. Nature, 1974, 249:720~724.

[15] Berggen L. Hydrodynamic coefficients of a wave energy device consisting of a buoy and a submerged plate[J]. Applied Ocean Research, 1992, 14:51~58.

(收稿日期:2004-06-30 编辑:马敏峰)