

## 潮汐发电技术的现状与前景

## Current situation and prospects of tidal energy conversion

李书恒, 郭伟, 朱大奎

(南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210093)

中图分类号: TV744

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2006)12-0082-05

全球海洋中所蕴藏的潮汐能约有 27 亿 kW, 可供开发的约占 2%, 即约 5 400 万 kW<sup>[1]</sup>。全球电力市场到 2000 年已达 8 000 亿美元并继续呈上升趋势。但是, 仍有 2 亿人的用电需求得不到满足, 发展中国家的用电量以每 8 年翻一番的速度在增长。在满足用电需求的同时, 降低石油等非再生资源的消耗, 减少环境污染, 开发新型环保电站迫在眉睫<sup>[2]</sup>。潮汐能是一种不会给地球上未来人类带来污染和灾难的能源<sup>[3]</sup>。前苏联的伯恩斯坦也指出利用这种昼夜间断断续续、一个月内波动起伏的潮汐能发电可以获得能量。在有条件利用潮汐能的沿海国家和地区, 建设潮汐电站不失为缓解能源危机的一种方案<sup>[4]</sup>。

## 1 潮汐发电的基本原理

潮汐能是月球和太阳等天体的引力使海洋水位发生潮汐变化而产生的能量。潮汐能利用的主要方式是发电。潮汐发电的工作原理与常规水力发电的原理类似, 它是利用潮水的涨、落产生的水位差所具有的势能来发电。差别在于海水与河水不同, 蓄积的海水落差不大, 但流量较大, 并且呈间歇性, 从而潮汐发电的水轮机的结构要适合低水头、大流量的特点<sup>[5]</sup>。具体地说, 就是在有条件的海湾或感潮河口建筑堤坝、闸门和厂房, 将海湾(或河口)与外海隔开围成水库, 并在闸坝内或发电站厂房内安装水轮发电机组。海洋潮位周期性的涨落过程曲线类似于正弦波<sup>[6]</sup>。对水闸适当地进行启闭调节, 使水库内水位的变化滞后于海面的变化, 水库水位与外海潮位就会形成一定的高度差(即工作水头), 从而驱动水轮发电机组发电(图 1)。从能量的角度来看, 就是将海水的势能和动能, 通过水轮发电机组转化为电能的过程。

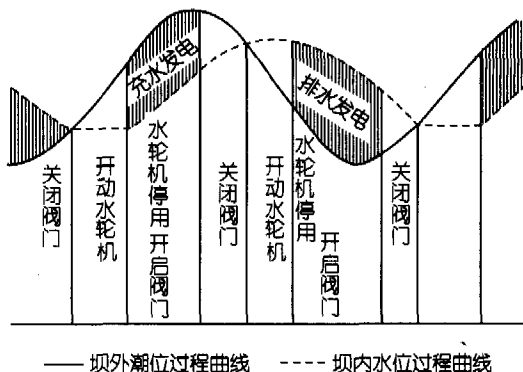


图 1 潮汐发电示意图

由于潮水的流动方向是不断改变的, 因此就使得潮汐发电出现不同的类型, 即单库单向型、单库双向型和双库单向型 3 种(表 1, 图 2)。

## 2 潮汐发电的优缺点及其发展现状

潮汐电站由 7 个基本部分组成: 潮汐水库; 堤坝, 闸门和泄水道建筑; 发电机组和厂房; 输电、交通和控制设施; 航道、鱼道等<sup>[7]</sup>。潮汐发电的关键技术主要包括低水头、大流量、变工况水轮机组设计制造; 电站的运行控制; 电站与海洋环境的相互作用, 包括电站对环境的影响和海洋环境对电站的影响, 特别是泥沙冲淤问题; 电站的系统优化, 协调发电量、间断发电以及设备造价和可靠性等之间的关系; 电站设备在海水中的防腐等<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2005-03-15; 修回日期: 2006-08-28

基金项目: 浙江省玉环县政府“玉环县海山乡总体规划研究”

作者简介: 李书恒(1980-), 女, 山西忻州人, 南京大学地理与海洋科学学院博士研究生, 研究方向为海岸海洋学, 电话: 025-83597393, E-mail: shuhengli@sina.com

表 1 潮汐电站 3 种方案的比较

方案	工作原理	优缺点
单库单向型	在涨潮时将贮水库闸门打开,向水库充水,平潮时关闸;落潮后,待贮水库与外海有一定水位差时开闸,驱动水轮发电机组发电。	优点是设备结构简单,投资少;缺点是潮汐能利用率低,发电不连续。
单库双向型	利用两套阀门控制两条向水轮机引水的管道。在涨潮和落潮时,海水分别从各自的引水管道进入水轮机,使水轮机旋转带动发电机。	适应天然潮汐过程,潮汐能利用率高,投资较大。
双库单向型	采用两个水力相联的水库。涨潮时,向高贮水库充水;落潮时,由低贮水库排水,利用两水库间的水位差,使水轮发电机组连续单向旋转发电。	可实现连续发电。缺点是要建两个水库,投资大且工作水头降低。

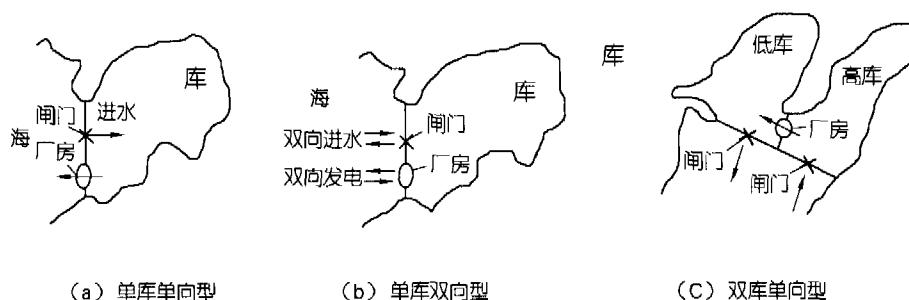


图 2 3 种不同方案的潮汐电站示意图

## 2.1 潮汐发电的优缺点

### 2.1.1 优点

(1) 能源可靠,可以经久不息地利用。不像常规水力发电那样受到气候条件的影响。(2) 虽然有周期性间歇,但有准确规律,可用电子计算机预报,并有计划纳入电网运行。(3) 一般离用电中心近,不必远距离送电。(4) 潮汐电站兴建后的最高库水位总是低于建站前最高潮水位,因此潮汐电站库区不但不淹没土地,还可以促淤围垦,发展水产养殖<sup>[9]</sup>。以浙江江厦潮汐试验电站为例,电站年上网电量大于 500 万 kW·h,按 0.50 元/(kW·h)电价计,年售电收入扣除税收后约 200 万元。水库围垦了 366 hm<sup>2</sup> 农田,年收入超过 1 000 万元;提供 1.37 km<sup>2</sup> 面积的海产品养殖区域,年产值在 1 500 万元以上<sup>[10]</sup>。(5) 潮汐电站的主要部分建在水下,不污染环境,还美化环境,提高旅游效益。如法国朗斯潮汐电站建成后,高水位比天然潮位降低了 0.5~1.0 m,原波涛汹涌的朗斯河三角洲变成了平静的湖泊,成了人们旅游休闲场所。此外,通过 700 m 长的坝顶公路连接城市,使城市之间的距离缩短了 30 km,每年从坝上通过的汽车达 50 万辆<sup>[11]</sup>。

### 2.1.2 缺点

(1) 单库潮汐电站发电有间歇性。这种间歇性周期变化又和日夜周期不一致。(2) 机电设备常和海水、盐雾及海生物接触,在防腐和防污等方面有其特殊要求<sup>[12]</sup>。(3) 单位千瓦的造价较常规水电站高。国外大型潮汐电站的投资约为 3 000~4 500 美元/kW,大型河川水电站的投资只有 400~1 400 美元/kW(1 000 kW 以下的河川水电站的投资为 2 000~3 500 美元/kW),潮汐电站的投资比河川水电站的投资高 2~7 倍<sup>[13]</sup>。

## 2.2 潮汐发电技术的现状

潮汐能的最早利用方式是 11 世纪出现的潮汐磨坊。潮汐发电的实际应用开始于 1912 年德国胡苏姆兴建的一座小型潮汐电站。1966 年法国建成的朗斯潮汐电站,装机容量为 24 万 kW,年均发电量为 5.44 亿 kW·h,是当时最大的潮汐电站<sup>[1]</sup>。目前,潮汐能开发的趋势是偏向大型化,如俄罗斯计划的美晋潮汐电站设计能力为 1 500 万 kW,英国塞汶电站为 720 万 kW,加拿大芬地湾电站为 380 万 kW。预计到 2030 年,世界潮汐电站的年发电总量将达 600 亿 kW·h<sup>[14]</sup>。我国潮汐能发电始于 50 年代后期<sup>[8]</sup>,迄

今建成潮汐电站 8 座,总装 6 120 kW,其中最大的是浙江江厦潮汐试验电站,为 3 900 kW。单机容量 500 kW 和 700 kW 的灯泡贯流式水轮发电机组全由我国

自己研制。表 2 列出世界各国已建和研究中的大型潮汐电站概况。

表 2 世界上已建和研究中的大型潮汐电站

国家	站址	年平均 潮差(m)	装机容量 ( $\times 10^4$ kW)	年发电量 ( $\times 10^8$ kW·h)	建成时间	发电型式
法国	朗斯	8.55	24.0	5.44	1966 年	单库双向
前苏联	基斯洛	2.3	0.04	0.023	1968 年	单库双向
加拿大	安那波利斯	6.4	1.78	0.50	1984 年	单库单向
中国	江厦	5.1	0.39	0.11	1980 年	单库双向
中国	幸福洋	4.2	0.128	0.032	1989 年	单库单向
中国	海山	4.9	0.015	0.0031	1985 年	双库单向
俄罗斯	美晋湾	5.66	1500	500	研究中	单库双向
英国	塞汶河口	8.4	600	144	研究中	单库单向
加拿大	芬地湾	11.8	380	127	研究中	单库单向
澳大利亚	金伯利湾	8.4	90	30	研究中	单库双向
韩国	加露林湾	4.7	48.0	120	研究中	单库单向
阿根廷	圣何塞湾	6.5	495	120	研究中	单库单向

近 50 年来,工程技术人员一直致力于将潮汐发电形成工业规模的研究,其技术关键在于设计出适应海水腐蚀的涡轮机<sup>[2]</sup>。另一项关键措施——浮云法施工技术的推广避免了在很深的水中及在易遭受风暴潮威胁的坝址修建昂贵且复杂的围堰,从而使工程造价降低了 25%~38%<sup>[15]</sup>。

### 3 潮汐能利用的前景

全球有许多地方适于兴建潮汐电站。近海(距海岸 1 km 以内),水深在 20~30 m 的水域为理想海域。欧洲工会已探测出 106 处适于兴建潮汐电站的海域,英国就有 42 处。英国近海用水轮机研究所的专家弗兰克彼得认为,在菲律宾、印度尼西亚、中国、日本海域都适于兴建潮汐电站。而且随着技术的日臻完善,潮汐电站的发电成本在现有的基础上还将降低<sup>[2]</sup>。

#### 3.1 站址选择

##### 3.1.1 潮汐条件

潮汐条件是选择潮汐电站站址的最主要因素。潮汐电站的可利用水头与发电水量主要取决于潮汐情况,也与库区地形和大坝的位置有关。潮汐能的强度与潮差有关。潮差大的地区蕴藏的潮汐能资源也比较丰富<sup>[8]</sup>。一般来说,利用潮汐发电必须具有 5 m

以上的潮差。潜在的输出功率与平均潮差的平方成正比<sup>[16]</sup>。潮汐电站的理论功率可用下式表示<sup>[17]</sup>:

$$P = \rho V g A / T$$

$$= \rho g F A^2 / T$$

式中  $\rho$  为海水密度,  $V$  为水库平均有效库容积,  $g$  为重力加速度,  $F$  为水库平均有效库容面积,  $A$  为平均潮差,  $T$  为单潮周期。而其他如潮汐电站坝高、坝基稳定性及水闸规模等的分析计算都和潮汐变化过程,尤其是潮汐特征值密切相关<sup>[18]</sup>。

##### 3.1.2 地貌条件

总体来说,应选择那些口门小而水库水域面积大<sup>[9]</sup>,可以储备大量海水,修建土建工程的地域。从目前已建或进行过前期工作的潮汐电站位置看,有海湾、河口、湾中湾、泻湖等。其中以湾中湾最为理想。因其不致受外海风浪的作用,海区泥沙运动较弱,电站库区淤积缓慢。浙江江厦电站便是例证,库内水色较清,电站运行十余年来,没有明显的淤积。而泻湖泥沙淤积较为严重。根据潮汐汉道经验公式,  $A = CP^n$ ,  $A$  为口门过水断面面积,  $P$  为纳潮量。据计算,相同面积的过水断面,泻湖型的纳潮量为其他类型的  $1/2^{[19]}$ 。建在泻湖出口处的白沙口潮汐电站,1972 年至 1974 年间,蓄沙量已经增加约 12 000 m<sup>3</sup>。

##### 3.1.3 地质条件

基岩是电站厂房最理想的地基。因此基岩港湾

海岸是最适合建设潮汐电站的海岸类型。大坝通常都建在软粘土地基上,坝址尽可能选择软粘土层较薄而下面为不易压缩层或基岩为好。江夏潮汐电站坝基为软粘土,平均厚度为 20 m,最大厚度为 46 m,其下为含粘土或砂石的砾石层。据建成后 10 a 观测资料统计,堤坝平均沉降量为 79 cm,目前沉降减小,渐趋稳定<sup>[18]</sup>。

### 3.1.4 综合利用条件

潮汐电站工程的综合利用,不仅会增加经济效益,而且还会大幅度降低工程单位投资<sup>[20]</sup>。因此,潮汐电站应以水库、堤坝和岸滩为依托,提高除发电以外的综合效益,包括水产养殖、围垦海涂、改善交通及发展旅游等多方面<sup>[18]</sup>。如浙江的乐清湾与雁荡山风景区相邻。现雁荡山山脚在低潮时大片滩涂裸露,景观单调。若在此修建潮汐电站,建库后便会形成长年山水相映的景观,促进旅游业的发展。潮汐电站的建设若能与海港建设相结合,实现“纳潮发电,冲淤建港”,也可以提高综合效益。海港需要大量电力,须建许多海工建筑物,潮汐发电可以满足海港的电力需求,而海港的海工建筑物也可以为潮汐电站利用,降低建造成本<sup>[20]</sup>。

### 3.1.5 工程、水文条件

进行站址评价时还应该考虑到潮汐挡水建筑物的总长度、厂房的位置及长度、地震情况、航道和鱼道设施的要求等工程条件以及潮汐水库的规模、沿挡水建筑物轴线的平均水深、挡水建筑物对风和波浪的方位、潮流和截流的流速等水文条件<sup>[7]</sup>。此外,影响潮汐电站正常运行的一个重要因素是泥沙淤积问题。在某些海湾河口,泥沙含量较大,电站建成后,该处过水断面缩小,发电又时断时续,会促进泥沙淤积增多,导致电站不能充分发挥作用。但若潮汐电站选址适当,落潮平均流速大于涨潮平均流速,有利于泥沙的冲刷,且建造潮汐电站后,可利用水闸控制进出水量,冲刷现有河道淤沙<sup>[21]</sup>。因此必须根据各地的水流、泥沙具体情况,利用潮汐能量和泥沙冲淤规律加以研究解决<sup>[20]</sup>。

### 3.1.6 社会经济条件

除此之外,潮汐电站站址选择必须综合考虑腹地社会经济状况、电力供需条件以及负荷输送距离等因素。

## 3.2 环境影响

潮汐电站的建成使得自然条件得以改善。电站库区削弱了风暴作用,为休闲旅游创造了良好的环境。由于水库内的水位更为稳定并且深度增加,通航条件也得到了改善。潮汐电站的建立减小了风浪、流

速,加快泥沙和悬浮生物沉淀,增加光合作用的深度,优化了海洋养殖环境<sup>[22]</sup>。

潮汐电站筑坝后,由于谐振条件发生变化,潮差和潮汐电站库水位的变幅可能发生变化。这将减少库内水流的紊动掺混,从而改变潮流及潮波状态,提高层化作用,夏季增加水的表面温度,冬季降低水的表面温度,改变含盐度,同时使结冰条件发生变化,减少光射深度,改变生物洄游路径、地下水动态、农田排水条件和潮汐电站水库小气候及临近地区的气候<sup>[23]</sup>。潮汐电站不但会改变潮差和潮流,还会改变海水的部分物理和化学参数,改变的性质与程度取决于电站规模与地理位置以及工程的规模和运行特性。

潮汐电站通常不会造成现有陆地面积的淹没,但却会减小纳潮面积而造成海底生物栖息区的变化,影响程度的大小主要取决于所变化的纳潮面积,以及海边鸟类和水鸟在其它湖区可能生活的范围。夏季的温度升高,有可能会造成独特的水产养殖条件,促进牡蛎、鲱鱼、大麻哈鱼和淡菜的生产和生长。潮汐电站也会影响鱼类的洄游。此外,对于海洋哺乳动物的活动来说,潮汐挡水建筑物也是一个障碍<sup>[7]</sup>。

潮汐电站会改变海口的水流流态和天然冲砂运动。由于相互交换的水量减少。一般潮汐水库内的水流流动会减弱。但靠近水轮机和蓄水闸门附近,水流流动会加剧。潮汐水库内水流的减弱会造成增加沉积并减少海岸冲刷<sup>[7]</sup>。

## 3.3 中国潮汐能的利用前景

随着我国经济的不断发展,电力不足的问题已越来越严重。特别是东部沿海地区为我国的电力负荷中心所在,每年的电力消费约占全国的 40%。而这些地区煤、石油等常规能源资源比较贫乏,可再生能源蕴藏量大。因此,立足于本地区的可再生能源的开发利用成为解决电力供应不足的重要途径。

我国海岸线曲折漫长,北起中朝交界的鸭绿江口,南达中越相交的北仑河口,大陆岸线长达 18 000 km 多,加上 6 500 多个海岛的岸线,岸线长度超过 32 000 km<sup>[24]</sup>。据对全国可开发装机容量 200 kW 以上的 424 处港湾坝址的调查资料表明,我国的潮汐能蕴藏量为 1.1 亿 kW,可开发总装机容量为 2 179 万 kW,年发电量 624 亿 kW·h,容量在 500 kW 以上的站点共 191 处,可开发总装机容量为 2 158 万 kW。主要集中在福建、浙江两省和上海市沿海,潮汐能资源占全国的 92%<sup>[20]</sup>。这种分布趋势正与我国沿海能源供需形势相吻合。其中浙江省可开发潮汐能资源的装机容量为 879.8 万 kW,占全国总量的 40.8%;可提供年发电量达 264 亿 kW·h,占全国总量的

42.7%<sup>[25]</sup>。该地区属基岩港湾海岸,峡湾相接,岸线曲折,海岸沉积物为粗砂和砾石<sup>[24]</sup>。地形地质条件优越,利于堵港建站。潮差大,东海澈浦、杭州湾钱塘江和乐清湾江厦港最大潮差分别达到 9.86, 8.9 和 8.39 m。特别是乐清湾,潮汐能理论蕴藏量占浙江全省的 17.2%,可开发的装机容量为 55 万 kW<sup>[26]</sup>。海湾呈袋形,口小肚大,含沙量少,平均潮差 5.08 m,拥有建设潮汐电站的良好条件。湾内可供开发潮汐电站的地址有江岩山、清江、狗头门、乌沙门等处<sup>[27]</sup>。

#### 4 结语

电力供应不足是制约我国国民经济发展的重要因素,尤其是在东部沿海地区。另一方面我国海岸线漫长曲折,蕴藏着丰富的潮汐能资源。潮汐能发电具有可再生性、清洁性、可预报性等优点。经过多年来对潮汐电站建设的研究和试点,不仅在技术上日趋成熟,而且在降低成本,提高经济效益方面也取得了很大进展。潮汐能发电技术前景广阔。

#### 参考文献:

- [1] 朱成章. 关于我国潮汐能资源和潮汐电站建设情况[J]. 新能源, 1995, 17(2): 5-8.
- [2] 王丰玉. 浅析潮汐电站的发展前景[J]. 移动电源与车辆, 2002, 4: 43-44.
- [3] Wilson E M. Tidal power reviewed[J]. *Water Power & Dam Consturcture*, 1983, 35(9): 13.
- [4] 伯恩斯坦 O E. 华东勘测设计院译. 潮汐电站[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [5] 戎晓洪. 潮汐能发电的前景[J]. 可再生能源, 2002, 5: 40.
- [6] 冯金泉. 潮汐能的利用及前景[J]. 电世界, 1996, 7: 7.
- [7] 徐锡华, 阮世锐. 潮汐电站设计导则[J]. 国外水电技术, 1991, 6(2): 1-2.
- [8] 余志. 海洋能利用技术进展与展望[J]. 太阳能学报, 1999, 特刊: 214-226.
- [9] 张发华. 综合开发我国潮汐能的探讨[J]. 水力发电学报, 1996, 54(3): 34-42.
- [10] 浙江省电力公司. 江厦潮汐试验电站[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [11] Charlier R H. Re-invention or aggrornamento? Tidal power at 30 years[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1997, 4(1): 271-289.
- [12] 杨敏林, 邹春荣. 潮汐电站建库及运行方案分析[J]. 海洋技术, 1997, 16(1): 52-56.
- [13] 李玉璧. 潮汐电站建设的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, 22(6): 24.
- [14] 刘全根. 世界海洋能开发利用状况及发展趋势[J]. 能源工程, 1999, 2: 5.
- [15] 范波芹, 索丽生. 潮汐电站浮云法施工技术综述[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(6): 17.
- [16] Kiho S, Shieno M, Suzuki K. The power generation from tidal currents by Darrieus Turbine[J]. *Renewable Energy*, 1996, 9(4): 1242-1245.
- [17] 王传. 我国海洋能资源初步分析[J]. 海洋工程, 1984, 2(2): 58-60.
- [18] 赵雪华. 浙江的潮汐发电实践[J]. 水力发电学报, 1996, 52(1): 25-36.
- [19] 张忍顺. 中国潮汐汉道研究的进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 46-49.
- [20] 郭成涛. 潮汐能利用的新概念[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 142-148.
- [21] 郭成涛. 建议研究开发我国东南沿海丰富的潮汐能源[J]. 海洋技术, 2002, 21(3): 21.
- [22] 范波芹, 索丽生, 周杰. 重视潮汐电站的开发与利用[J]. 水电能源科学, 2001, 19(2): 71-73.
- [23] Daborn G R. Biological consequences of the Minas Basin tidal power proposal[A]. Scarratt D J, Dadswell M J. New approaches on tidal power [C]. New Hampshire, NSDartmouth Press, 1982.
- [24] 王颖. 中国海洋地理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [25] 浙江省海岸带和海涂资源综合调查报告编写委员会. 浙江省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1988.
- [26] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第六分册(浙江省南部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [27] 赵雪华. 重提建设浙江乐清湾大型潮汐电站[J]. 能源工程, 1994, 4: 7-10.

(本文编辑: 刘珊珊)