

发电系统,新设计,捕能
潮汐能,波浪能,风能

英国塞文坝新能源综合发电系统 T/Miel

刘世玉

1 塞文坝综合方案

英国塞文河口的潮差高达 17m, 堪称世界之最。近 150 年来, 为了开发利用这种丰富的潮汐能, 在河口建坝的方案已提出多种, 图 1 便是其中的一种方案。本文将考察这种捕能坝的能源可行性和经济可行性。所谓捕能, 不单是捕集潮汐能, 还捕集波浪能和风能, 因此这是一个综合利用方案。

综合方案把潮汐能视为主要捕能对象, 而把风能和波浪能视为次要捕能对象。在塞文河口建潮汐发电站, 早在 19 世纪初就有人提出过方案。本世纪 80 年代对各种方案的预期性能做过详细的分析, 但近年的进展似乎放慢了。

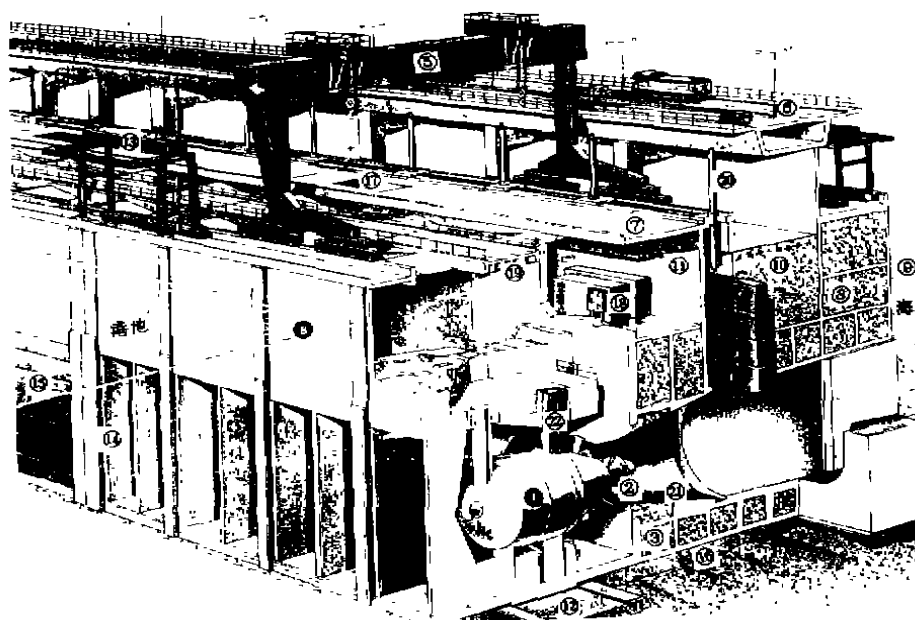


图 1 塞文潮汐发电集团提出的塞文坝示意图

1: 涡轮发电机; 2: 水轮机叶轮; 3: 压载船; 4: 控制闸门; 5: 移动式门式起重机; 6: 公路; 7: 便道; 8: 港池水位; 9: 海平面; 10: 400kV 电缆; 11: 控制电缆; 12: 石基础; 13: 进梁闸门装卸设备; 14: 进梁闸门槽; 15: 进梁闸门; 16: 地基下混凝土; 17: 变压器通道; 18: 电气设备; 19: 可拆卸顶部; 20: 水筒; 21: 钢质吸入管; 22: 发电机通道。

图 2 是目前提出的一种方案, 坝长约 17km, 涡轮发电机装在钢筋混凝土沉箱内; 筑坝后形成的港池, 水的进出由闸门控制; 坝顶有两车道公路, 把南格拉摩根郡和萨默塞特郡连接起来。坝里还装有输电设备和船闸, 船闸用于航运。

本文涉及的坝址与塞文潮汐发电集团 (STPG) 提出的坝址稍有不同。坝将靠近弗拉特霍姆岛, 这是一个标高比较小的岛屿, 由坚硬的含碳石灰石组成, 坝可以牢固地锚定在上面。建坝时, 弗拉特霍姆岛可以做仓库, 减少河口靠陆地两侧的破坏。它还可以作为

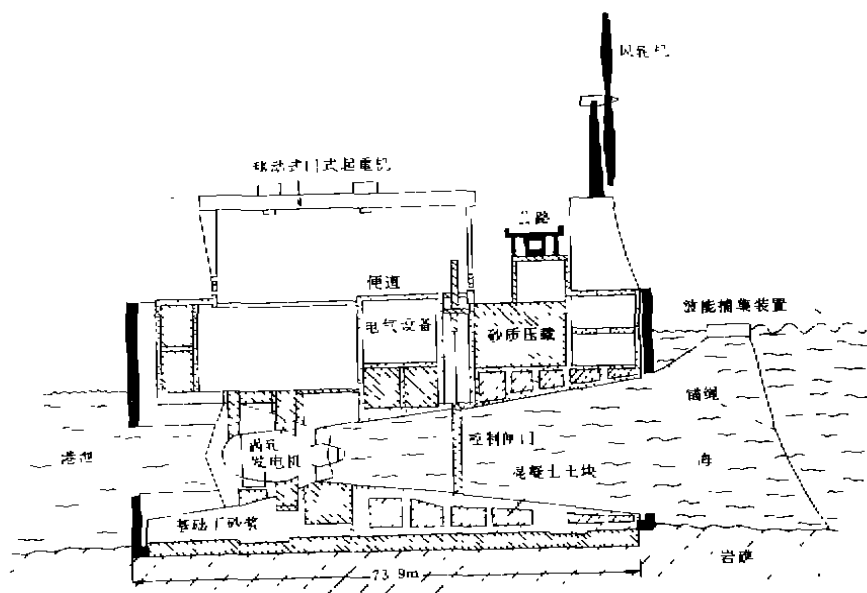


图2 塞文坝综合发电系统示意图

各种材料的卸料平台,减少南格拉摩根郡和萨默塞特郡的破坏;主变电站和送电站都可以设在这个岛屿上。从长远看,弗拉特霍姆岛可以作为核聚变反应堆加上制氢站的基地。但遗憾的是,近年这个岛成了野生动物的保护区。不过,斯蒂普霍姆岛的生态条件与弗拉特霍姆岛非常相近,只要适当投资,也可以成为野生动物保护区。再说,送出“清洁”的电力给公众带来的好处,也不亚于对野生动物的关心。

图3给出了塞文坝的准确位置。它还需要进行更仔细的规划,例如要保证足够深的水道,供涡轮发电机使用,这个坝址提供的潮汐能总的说要稍稍大于STPG提出的坝址。利用弗拉特霍姆岛以后,可以减少建费用和运输费用。

设计坝时,要对向海一侧进行优化,以便让盛行风(西风)吹过每一台风轮机,办法可以是把坝向海的一侧设计成合适的形状,使吹向风轮机的风速大大加强。

在坝向海的一侧锚系许多波浪能捕集装置,既利用了波浪能,还对坝起了保护作用

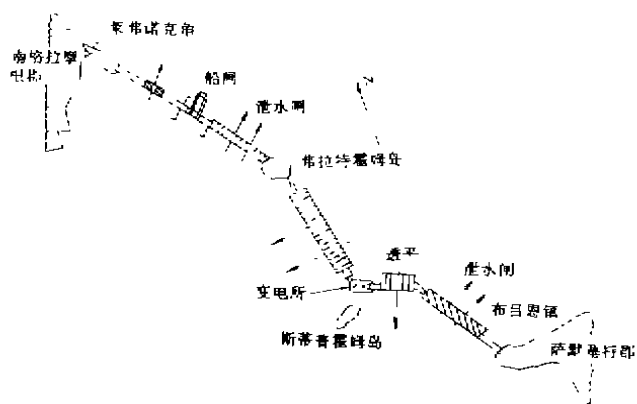


图3 新坝址示意图(未按比例)

(防波堤)。

2 潮汐能

塞文坝捕集潮汐能的最可行办法是退潮发电、涨潮提水。水流过泄水闸和水轮机的通道。高潮时,泄水闸和水轮机通道均关闭,当坝向海一侧的水退得足以形成一个大水头时,让水驱动水轮机。当坝后港池中的水位达到使水头差小于水轮机工作所要求的最小水头差时,让水流停止。海平面等于港池的水位时,打开泄水闸,如此反复进行。涨潮时泵水,

可以在取能之前升高水位。典型的潮汐周期示于图 4。

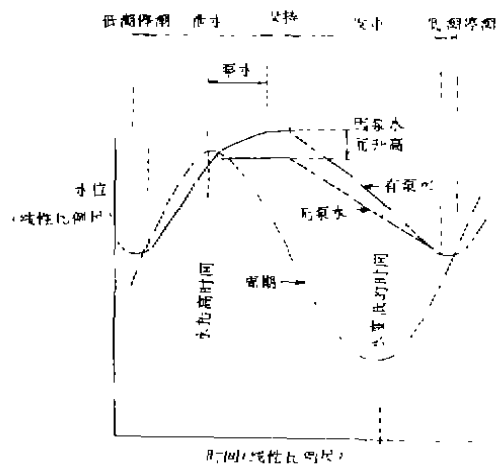


图 4 典型的潮汐周期

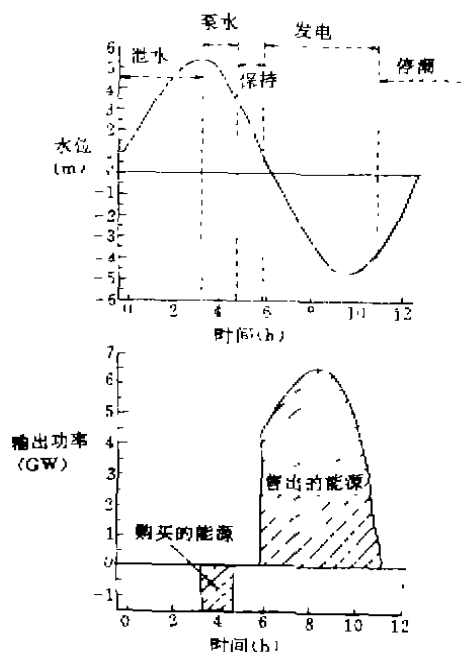


图 5 塞文坝输出的潮汐能

潮汐能同其他很多种可再生能源不同，它可以精确地定时，其大小也可以预报。但开发利用潮汐能的水轮机，由于潮汐是在 6 个小时左右的时间内持续升高，每天两次，具有明显的周期性，所以在正常运行情况下不发

电。水轮机可利用的潮汐能示于图 5。

2.1 塞文坝的潮汐能资源

塞文河口的平均潮差 $R_{\text{潮}} \approx 8.5 \pm 0.4\text{m}$ ，每个潮汐周期可从潮流获得的能量增量为：

$$\delta E = g R_{\text{潮}} (\rho A R_{\text{潮}})$$

表 1 塞文坝水电站的技术参数

发电机台数	236
每台水轮机叶片扫掠的区域的直径	9.4m
水轮机设计转速	56r/min
发电机单机容量	40MW
总装机容量	8640MW
泄水闸数(大小不同)	166
泄水闸通道的总净空面积	35000m ²
港池封闭后的气-水界面面积	180km ²

假定港池面积与潮差无关，上式积分后可得每个潮汐周期的能量为：

$$E_{\text{潮}} = \frac{1}{2} g \rho A (R_{\text{潮}})^2$$

式中， g 是当地的重力加速度， m/s^2 ； ρ 是海水密度， kg/m^3 ； A 是闭合港池的气-水界面面积， m^2 。

在海平面处， $A = 480 \times 10^6 \text{m}^2$ 。正常情况下，一年有 704 次潮汐，因此一年可生产能源 $34.7 \pm 2.7 \text{TWh} (T = 10^{12})$ 。考虑其他不利因素后，一年实际可生产能源 17TWh 左右。

2.2 经济性评估

塞文坝的基本投资是 82.38 亿英镑(按 1988 年价格，以下同)，坝外送电费用(包括铺设水下电缆的费用 10%)是 12.30 亿英镑。

由于建设周期将近有 10 年，必须考虑在这期间资本投资的利息，所以实际费用(建设期间的实际报酬率为 5%)将是 123.08 亿英镑。由于建设后期可以发电，按保守价格 3 便士/kWh 卖给国家电网，所以修建塞文坝所需的投资将是 119.35 亿英镑。

估计维护运行费一年大约要 7000 万英镑，即输出 1kWh 电需要 0.4 便士。

附录里将给出发电成本的具体计算方

法。如果在 120 年的技术寿命期内实际报酬率为 8%，则

$$\begin{aligned} & \text{发电成本(便士/kWh)} \\ &= \frac{\text{投资(英镑)} \times \text{贴现率}(\%)}{\text{输出能量(kWh)}} \\ & \quad + \text{运行维护费(便士/kWh)} \\ &= \frac{(11935 \times 10^6) \times 8}{17 \times 10^9} + 0.4 = 6.0 \end{aligned}$$

投资回收期大约是 14 年。

如果资本回收期比方说缩短到 40 年,按实际报酬率为 11%,则发电成本升高到 8.3 便士/kWh 左右。

3 风能

为捕集风力,需要在刮风的路径上装轴流式涡轮机,这种涡轮机有两只或更多的叶片,叶片绕一根近乎水平的轴旋转,且能有效地与风向垂直。

在塞文坝上装风轮机的好处是近海风速比较大,并且容易接近,对邻近社区的噪声干扰也小。这种风轮机的价钱与陆地上输出同样功率的风轮机一样。而且,由于有潮汐发电做后盾,送电费用也大大降低。

3.1 风力

风能可以表示为:

$$P_w = 0.623 \bar{V}^3 A_w \quad (W)$$

式中, $\bar{V}$ 是平均风速, A_w 是风轮扫掠面积。大部分风力机都可以在 $\bar{V} < 3m/s$ 的情况下运行。

3.2 塞文河口的风速资源

据离塞文坝 10km 的加的夫-威尔士机场观测,塞文坝址处的盛行风是西风,所以风轮机安装在坝向海一侧。研究表明,沿塞文坝全长装设风力机,利用盛行西风发电,是完全值得投资的。

3.3 风速资料

在加的夫-威尔士机场,离地 10m 高度处,1960~1981 年盛行风向是 220°~320°(取 0°为北,90°为东),平均风速是 6.85m/s,而 1978~1981 年是 7.03m/s,最近的资料也支持这个结论。

坝顶高度(即公路的高度)预计在平均海平面之上约 21m,风轮机风轮的直径约 35.4m。风力机塔架在允许范围内时,风轮机轮毂将在平均海平面之上约 55m。如果用 Hellman 公式计算风速随高度的增加,则风轮机轮毂高度处的平均风速预计是 8.97m/s。

3.4 发电机大小的优化

按优化计算,每台发电机的额定功率是 450kW。风能集团公司已研制出 WEG 400 型风轮机,容量是 450kW,两只叶片,叶片材料是木质-环氧树脂,用于塞文坝时还应加固。鉴于塞文坝是一项国家计划,认为采用本国风轮机产品是适宜的。当然也不排除采用性能更好的其他风轮机。

3.5 风能资源量

从风获得的能量与可利用率(约 95%)、设备利用率(约 40%)、场址和尾流损失(共 5%左右)等因素有关,即

$$\begin{aligned} E_w &= \text{额定功率} \times \text{小时数} \times \text{设备利} \\ & \quad \text{用率} \times \text{可利用率} \times (1 - \text{场址损失}) \\ & \quad \times (1 - \text{尾流损失}) \end{aligned}$$

一台风力机的扫掠直径是 35.4m,则一公里可以安装 10 台风力机(每台风力机之间相隔两个扫掠直径)。适宜安装风轮机的坝长约有 15km,船闸、弗拉特霍姆岛、变电所附近都不安装风轮机。这样,风轮机的装机容量为 67.5MW,一年的发电量为:

$$\begin{aligned} E_w &= 67.5 \times 365 \times 24 \times 0.4 \\ & \quad \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 = 177438 \text{MWh} \end{aligned}$$

3.6 经济性评估

塞文坝上安装风轮机,容易维护,不用花钱买地皮。市售风轮机的基本价格是每千瓦装机 800~1200 英镑,加上利息和运行维护费,将是 877~1315 英镑/kW 装机。风力机的设计寿命约 25 年,假定在这段时间的实际报酬率是 11%,那末风力发电成本是 4.4~6.6 便士/kWh。如果操作人员与电力公司的合同期由最长的 25 年缩短为 6 年,则发电成本为 4.4~12.4 便士/kWh,相应的风轮机偿还期是 6.6~9.9 年。

4 波浪能

英国近海波浪能资源丰富,但获取这种能源的投资很大。塞文河口地区不是最好的波浪能开发利用区,但如果把波浪能装置作为塞文坝的一部分,那末运行维护费、锚定费、向国家电网的送电费、装置建造费(共需要150套装置)全部可以减少。对于将来从海洋获取能源,同时减少对坝的伤害,这样做可以起一种样板作用。

波力可以表示为:

$$P_{\text{波}} = 549.5 H_{\text{e}}^2 T_{\text{e}}$$

式中, H_{e}^2 是有效波高, T_{e} 是零交叉周期。

4.1 波浪能装置

任何一种波浪能装置都是把水的运动转换为可以利用的能源形式。波浪能装置所处环境恶劣,设计时必须考虑可靠性和维护问题,其投资由材料费、装置复杂程度、制造的难易、可否批量生产等决定。波浪的频率和振幅范围大,波浪能装置对波浪的适应能力将影响波能捕集量,它应当能够把机械运动有效地转换为电能,一般要能捕集各个方向的来波。塞文河口海平面变化大,波浪能装置将取浮置式。最适宜的波浪能装置是考文垂圆形海蚌式,它是过去的直蚌式装置的改进型。外表面有12个相同的软气袋,其上连接一根空的圆形脊柱。气袋中的空气在波浪作用下产生运动,就捕集了波浪能(见图6)。受迫的空气通过自整流威尔斯透平,使气袋之间的空气发生交换。这种装置能够捕集各个方向的波浪,而取圆形后的效率比直形提高了4倍。脊柱的直径大于60m,每一个蚌的重量将近1000t。装置定位方法可以用传统的悬链线,也可以用弹性锚泊法,坝向海一面作为锚泊点,另外的锚泊点是海床上。

4.2 塞文河口波浪能展望

据评估,塞文河口一米波锋的平均功率是0.43~1.30kW。但建坝以后,当地波力有可能减少。波浪能装置沿坝向海一侧布设,可

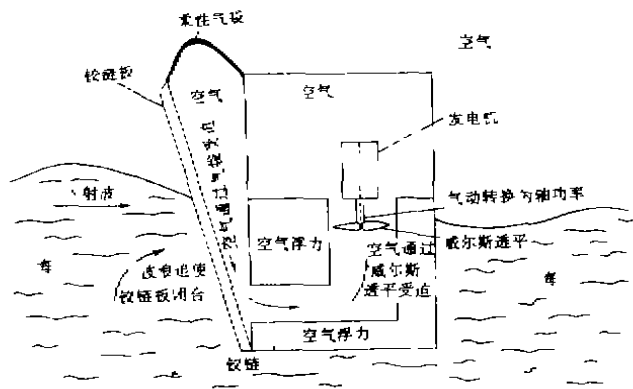


图6 海蚌式波浪能装置示意图和工作原理

用的坝长超过15km;用海蚌形装置;采用张绳弹性锚泊法;装置效率为50%;电转换效率为40%;装置全年工作,每天工作24h。在这些假定下,波浪能年资源量为11195~34164MWh。

4.3 经济性评估

圆形海蚌式波浪能装置一千瓦装机的成本是840~1008英镑。坝附近波锋平均波力是0.87kW/m,装机容量近13MW,总费用是1100~1320万英镑,运行维护费估计是投资的30%左右,即1.5~1.7便士/kWh输出。

取资金回收期为25年,在这期间的实际报酬率为11%,则发电成本 $G=7.1\sim 8.6$ 便士/kWh。如果考虑到波浪能装置带来的其他好处,实际发电成本还要低一些。资金回收期为9.7~11.6年。

波锋平均波力还要继续进行估算,上述数字非常保守,与布里斯托尔运河相比是估算低了。因此,塞文坝波力发电成本会比上述数字小。

4.4 波浪能装置的其他好处

波浪能装置可以使坝向海一侧少受盐水的侵蚀,减少磨损,节省维护费用。由于波浪能装置浮置在坝的附近,很容易接近,保证其可靠性和使用寿命。波浪能装置很容易锚定。波浪能装置作为坝的一部分,可以降低涡轮

和泄水闸的保护要求。

5 塞文坝的非能源效益

从南格拉摩根郡到萨默塞特郡横跨塞文河口筑一个坝,意义很大。除获取能源外,还可以增加就业,促进旅游业,开展娱乐活动;改善南威尔士和英格兰西南部的基础设施;防洪,从而繁荣该地区的交通运输业,这是下个世纪该地区的发展所必须的。

5.1 公路、铁路和人行道

目前,英格兰南部如南威尔士的主要联系靠的是M4公路,包括塞文大桥。这条公路1966年9月开通,其后交通量猛增。图7示

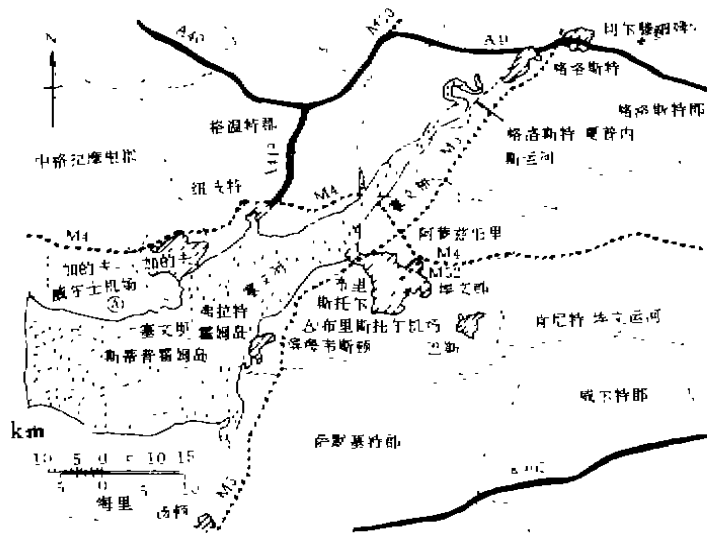


图7 新的公路干线

出了该地区的公路网。1996年春,第二座塞文大桥竣工,政府耗资5.31亿英镑,应付南威尔士日益增加的交通流量。但从长远看,这样做还是不够的,特别是塞文坝建成以后,旅游业的发展会进一步增大交通流量,看来到2010年还要建一座塞文大桥,塞文坝公路桥可以起这样的作用。塞文坝公路桥使滨海韦斯顿与加的夫之间的交通距离大约缩短了2/3,加强了南威尔士与英格兰西南部的联系,有利于旅游业,同时减轻了现有公路系统

的压力,降低了它们的维护要求,延长其使用寿命。沿塞文坝的人行道可供休闲散步用。

塞文坝上还可以建轻轨铁路,使用电力机车,电力则取自塞文坝电站。

5.2 公路的经济性

在塞文坝上修公路,除改善了英国的基础设施外,还可以通过收取车辆的通行费产生经济效益。假定每辆轿车收通行费3英镑,载重汽车收6英镑,客车与货车之比为6:1(目前塞文大桥上的情况),那末到2000年,塞文坝公路的这项年收入将达到2500万英镑(一年通过730万辆车),而公路的成本只有1.5~2.2亿英镑。此外,步行过坝的人,每位可以收取1英镑费用,这也是一笔收入。

5.3 旅游和游乐

建坝以后,潮差改变了,潮流减小了,使塞文河口更适合水上运动。形成的新景观会吸引观光者。公路网改善后,也会吸引观光者。从1969年开始投入使用的法国朗斯潮汐电站大坝就掀起过这种交通热和旅游热。

5.4 就业

修建塞文坝,将使就业机会增加一倍,其中既有修建和管理大坝的直接就业,也有水上运动、旅游业之类的间接就业机会。

据推断,大坝修建阶段,年就业量将达到40万人,直接的永久

性工作约1770人,间接的有570人。

5.5 防洪

布列斯托尔运河和塞文河口附近有8万公顷左右低洼地,很容易被海水淹没。塞文坝建成以后,加上波浪能装置,可以减轻这些低洼地被海水淹没的压力。

5.6 土地增值

塞文坝的修建改善了当地环境,提高了土地价值和增加了土地面积(潮差减小所致),促进私人、商业和工业开发,估计将会建

成 2.4~2.9 万套新住宅。

5.7 生态环境

修建塞文坝,既不会排放使臭氧耗损的气体,也不会使全球变暖。但它对生态环境的贡献还未作出定量的评价。

5.8 能源效益

塞文坝提供的是潮汐能、风能和波浪能等清洁能源,而且用之不竭,减少了对矿物燃料的依赖,在下个世纪的能源效益会更加明显。

5.9 港口/航运

塞文坝可以促进当地航运业的发展,布列斯托尔运河将再次成为人们关注的焦点。

5.10 能源流通

目前,英格兰南部要从北部和苏格兰进口电力。塞文坝发电将减少送电量和送电损失。

5.11 经济效益

制造业向来在英国的国民生产总值中占的比例最大。由于全球近年经济衰退,影响了英国的出口。修建塞文坝,刺激了英国的制造业和建筑业,还可以减少能源进口和国际收支逆差。英国财政负担很重,外债已经高达 2000 亿英镑。从长远看,如建成塞文坝,可以大大减轻这个负担。

5.12 不利因素

修建塞文坝以后,要强化低洼沼泽地的保护,要防止萨默塞特郡泥煤浸出和当地某些野生动物迁移。但总的讲,塞文坝对英国的环境是很有利的。

6 塞文坝值得继续修建吗?

塞文坝综合工程可以把可再生能源推向科学应用的前沿,可以促进技术进步。它的投资大约是 100 亿英镑,由于工期较长,需要公私金融部门的合作才能建成。这座大坝的环境效益和能源的长期保证都是非常明显的。英国长期以来推行短期能源战略,这就不可避免地损害了可再生能源的作用。英国政府最近推出的“非矿物燃料拍卖”(NFFO)政

策,要求电力公司购买一定份额的非矿物燃料发的电,可在一定程度上消除上述误区。

从短期看,塞文坝综合发电系统的发电成本是 4.4~8.6 便士/kWh,大大高于目前的常规能源发电成本。但通过 NFFO 政策的实施,可以缩小这两种发电成本的差异,对可再生能源和核能的投资更有吸引力。NFFO 政策规定向矿物燃料能源征税,所得税款用于补贴成本较高、对环境却有利的可再生能源(和核能)。这样,可再生能源目前的售价便可以高达 11 便士/kWh。

欧共体未来的立法对矿物燃料经济可能会更加严厉。如果征收“碳税”,燃煤和烧天然气的发电成本至少分别提高 1 便士/kWh 和 0.6 便士/kWh。可再生能源则不会出现这样的问题,因此自然增强了竞争力。

核聚变技术一旦成熟,英国就可能在弗拉特霍姆岛建一座核聚变站。这座核电站不仅可以为国家电网提供稳定的电力,而且会扩大塞文坝综合发电系统的输出,以匹配国家的需求。

修建塞文坝碰到的一个问题可能是材料运输问题(即巨石、混凝土、沉箱等的运输),当地没有足够的这类材料,而公路状况也不符合要求。苏格兰沿海有超级采石场可供利用,可以通过航运把石料运到塞文坝址。

研究表明,塞文坝综合发电系统的输出不会要求国家电网做很大的变化。它春季的输出达到高峰,但容易加以调节。抽水蓄能不经济,至少一开始如此。

塞文坝综合发电系统不可能由私营投资兴建,因为风险太大。政府将最终决定这个发电系统的前途。英吉利海峡隧道耗资近 90 亿英镑,由于有政府的全力支持,终于建成,而它只是一项消耗能源的工程。塞文坝工程却是一项生产能源的工程,投资风险也与英吉利海峡隧道相当,它可以使英国长期受益。此外,马来西亚的 Pergau 大坝,英国政府提供了 2.34 亿英镑建水电站,这在英国引起了争议,有人认为这笔钱应当用于塞文坝;英国要

太阳热能光伏转换

刘玉琨

TK511

太阳热能光伏(STPV)这个概念是 R. M. Swanson 在 1979 年首先提出的,它用太阳能间接加热的辐射体(见图 1b)取代了太阳光直接照射的太阳能电池。辐射体发射的能量低于禁带宽度的光子没有浪费,都在辐射体内反复循环,这就克服了单禁带太阳能电池转换黑体(与单色辐射不同)辐射时碰到的主要难题。硅电池在阳光照射下,最终效率

约为 0.44。就是说,与直接转换相比,任何 STPV 方案的效率最高可提高 2.3 倍(实际上要小一些)。太阳热能光伏是由矿物燃料或核燃料驱动的热光伏概念的引伸。

已有不少人提出了各种几何学概念,作为讨论预期性能的基础。例如, A. Fortini 1962 年提出在一个椭圆镜的相对两侧安装辐射体和光伏接收器,它们的中间是一个带通滤波器,其距离等于椭圆镜短轴。又如, B. D. Wedlock 1963 年提出了呈圆柱状排列的内聚焦锗电池,与圆柱形辐射体同轴, Swanson 提出的 STPV 系统可以看作是这种系统的发展。后者使用的是半球形辐射体,辐射体有一个内腔,可以有效地吸收孔径处聚焦的阳光。光能通过空腔壁传导后,辐射到半球形电池阵列内。

早就知道 STPV 在理论上可以具有很高的效率,但实际损失的重要性似乎还不清楚。Bell 曾对类似于 STPV 的系统做过计算,该系统的电池上有一个带通过滤器,还有

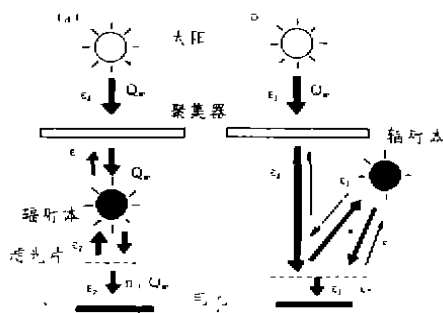


图 1 (a)标准热光伏系统示意图;
(b)通过滤片的反射引入分流的系统,
光子能量略高于禁带宽度

保证生活水平,必须实施从矿物燃料过渡到可再生能源的长期能源战略。

英国在 80 年代没有能源政策,完全靠自由市场运作。为了满足英国未来的能源需求,这样干是不行的,必须有一条能源战略,必须综合考虑能源供求关系。塞文坝应当归入这样一项考虑之中。

塞文坝新能源综合发电系统技术上是可行的,从长远看经济上也是有利的,而在环境上又是必要的,主要就是资金问题。英国政府开始对民用燃料征收增值税(VAT),有人认为这笔税款应当用来鼓励开发绿色技术,包括修建塞文坝。

塞文坝综合发电系统一年至少可以发电

17.3TWh,能满足英格兰和威尔士目前电力需求量的 8%以上。坝建成后,风能年发电量可达 0.4TWh 以上,波浪发电量则远远超过 0.3TWh。

附录 可再生能源发电成本

可再生能源的发电成本可用下式表示:

$$G = \frac{BC}{E} (1 + I + J + F) + OC/E$$

式中, I, J 和 O 均表示初期投资,平均能量输出 E 取决于电站设备利用率,负载因子和送电损耗。

假定残值可以忽略,则资金回收率

$$B = r/[1 - (1 + r)^{-n}]$$

这里, r 是实际回收率, n 是资金回收期(年)。

(刘世玉供稿)