

# 温差热发电技术及其应用

李应林 黄 虎

(南京师范大学 能源与机械工程学院 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 温差热发电作为一种利用工业余热、废热、太阳能、地热能、海洋能等能源,通过循环工质驱动透平发电的技术,兼有不消耗煤炭、燃油等紧缺能源,低排放、节能环保等一系列优点。在阐述了温差热发电技术原理的同时探讨了温差热发电循环系统以及循环工质的研究进展,从太阳能、地热能、海洋能以及工业余热废热等角度出发,介绍了温差热发电技术的应用。

**[关键词]** 热发电 太阳能 余热回收 可再生能源

**[中图分类号]** P743.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2011)03-0023-08

## Thermal Power Generation Technology and its Application

Li Yinglin ,Huang Hu

(School of Energy and Mechanical Engineering , Nanjing Normal University , Nanjing 210042 , China)

**Abstract:** Thermal power generation , as a technology to utilize industrial waste heat , solar energy , geothermal energy and ocean energy , drives the turbine to generate electricity by the working fluid. And the thermal power generation has a series of advantages , such as non-consumption of coal and fuel , low emission , energy saving and environmental protection. Furthermore , the principle of thermal power generation is expounded , and at the same time , the research progress of circulatory system and the prospect of working fluids are explored. Finally , from the view of solar energy , geothermal energy , ocean energy , industrial waste heat and other heat source , the application of thermal power generation is described.

**Key words:** thermal power generation , solar energy , waste heat recovery , renewable energy

气候变化是当今全球面临的重大挑战,遏制气候变暖,拯救地球家园,是全人类共同的使命。我国在发展的进程中高度重视气候变化问题,在保护生态环境的基础上,有序发展水电,积极发展核电,鼓励支持农村、边远地区和条件适宜地区大力发展生物质能、太阳能、地热、风能等新型可再生能源。中国正全面实施十大重点节能工程和千家企业节能计划,在工业、交通、建筑等重点领域开展节能行动;深入推进循环经济试点,大力推广节能环保汽车,实施节能产品惠民工程;推动淘汰高耗能、高污染的落后产能,截至 2009 年上半年,单位国内生产总值能耗比 2005 年降低 13%,相当于少排放 8 亿 T CO<sub>2</sub>。

温差热发电作为一种利用工业余热、废热、太阳能、地热能、海洋能等能源,通过循环工质驱动透平发电的技术,兼有不消耗煤炭、燃油等紧缺能源,低排放、节能环保等一系列优点,有广阔的开发和应用前景。发达国家十分重视温差热发电技术,太阳能热发电技术在欧美等国家已经成熟,且已经实现并网发电;日本在海洋温差热发电技术方面居世界领先地位。中国在温差热发电技术目前仍处于试验研究与工程示范阶段。

### 1 温差热发电技术原理

温差热发电技术是一种利用高、低温热源之间的温差,采用低沸点工作流体作为循环工质,在朗肯循环(Rankine Cycle, RC)基础上,用高温热源加热并蒸发循环工质产生的蒸汽推动透平发电的技术,其主要

收稿日期: 2011-04-22.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(09KJB480001)、南京师范大学高层次人才资助项目(2008112XGQ0106)。

通讯联系人: 李应林, 博士, 讲师, 研究方向: 空调制冷新技术及可再生能源利用. E-mail: liyinglin@njnu.edu.cn

组件包括蒸发器、冷凝器、涡轮机以及工作流体泵。如图 1 所示,通过高温热源加热蒸发器内的工作流体并使其蒸发,蒸发后的工作流体在涡轮机内绝热膨胀,推动涡轮机的叶片而达到发电的目的,发电后的工作流体被导入冷凝器,并将其热量传给低温热源,因而冷却并再恢复成液体,然后经循环泵送入蒸发器,形成一个循环。

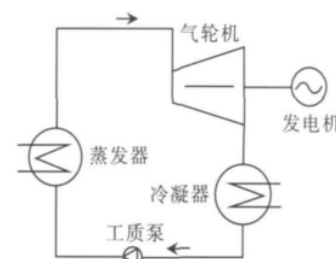


图 1 温差发电技术原理

Fig.1 Schematic diagram of thermal power generation

## 2 温差热发电循环系统及工质研究进展

温差热发电循环目前主要有闭式循环、开式循环、回热循环、联合循环和 Kalina 循环,其中,在相同的运行条件下,回热循环的循环转换效率最高<sup>[1]</sup>。Dipippo<sup>[2]</sup>对理想的卡诺循环地热发电系统和实际三角循环地热发电系统进行了理论分析与比较,结论表明:实际三角循环地热发电系统的最高热效率可以达到理想的卡诺循环的效率的 85%。文献[3-5]提出双工质联合循环,其中高温级的循环工质采用水、加热热源采用生物质燃料锅炉,低温级的循环工质则采用有机流体、加热热源采用地热源。

Bruhn<sup>[6]</sup>提出一种单工质混合循环,其中初级加热热源采用地热源,次级加热热源采用生物质燃料锅炉,循环工质采用有机流体环己胺。循环工质可以反覆循环使用,其种类主要有氨、丁烷、氟氯烷等密度大、蒸气压力高的气体工质<sup>[7-9]</sup>。文献[10]对某二元闪蒸地热源发电装置,分别将氟利昂、氨以及异丁烷作为第二循环工质,研究了不同工质对循环装置的性能影响。Kim 等<sup>[1]</sup>将 R22、R32、R125、R134a、R143a、R290、R410a、R1270 以及 R717 等作为温差发电装置的循环工质,分析结果表明:R717 和 R125 具有较好的循环转换效率,但考虑到系统初投资和环境问题,R32、R125、R143a 和 R410a 是较合适的循环工质。文献认为 R717 和 R22 是最有可能的循环工质<sup>[11]</sup>。王辉涛等<sup>[12]</sup>认为使用正丁烷(R600)能获得较高的热效率,而且凝结压力与蒸发压力都比较合适,比较适合用作海洋温差发电有机朗肯循环的工质。表 1 中列出了几种采用不同循环工质的低温热源型的小型双工质发电装置<sup>[13]</sup>。

太空温差热发电装置采用 Brayton、Ericsson 和 Rankine 3 种不同的循环装置,由于特殊的宇宙环境,与地面上的温差热发电装置相比,太空温差热发电装置采用不同的循环工质:Brayton 和 Ericsson 循环中可采用的循环工质有 Ar、N<sub>2</sub>、Ar-Xe、He、He-Xe 以及 H<sub>2</sub> 等,Rankine 循环可采用的循环工质有 Ar 和 N<sub>2</sub><sup>[14]</sup>。

表 1 采用低温热源的小型双工质发电装置

Table 1 Small binary power plants using low-temperature resources

电厂(位置)	热源温度/℃	循环工质	总装机容量/kW <sub>e</sub>
Nigorikawa(日本)	140	R114(四氟二氯乙烷)	1000
Otake(日本)	130	Isobutane(异丁烷)	1000
Husavik(冰岛)	124	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O(氨水)	1700
Nagqu(中国)	110	Isopentane(异戊烷)	1000
Altheim(奥地利)	106	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub> (氟戊烷)	1000
Wabuska, CA(美国)	104	Isopentane(异戊烷)	1750
Chena Hot Spring, AK(美国)	74	R134a(四氟乙烷)	400
Kutahya-Simav(土耳其)	145	R124(四氟一氯乙烷)	2900

## 3 温差热发电换热器研究进展

热交换器是温差发电系统的关键设备,它对装置的效率、结构和经济性有直接的重要影响,热交换器性能的关键是它的型式和材料。Nakaoka 等人在温差发电装置中,采用壳管板式蒸发器和壳管板式冷凝器,并进行了系统性能测试<sup>[15,16]</sup>。钛的传热及防腐性能良好,但是价格过于昂贵。美国阿贡国家实验室的研究人员发现,在腐蚀性暖海水环境下,改进后的钎焊铝换热器寿命可以达到 30 年以上<sup>[17]</sup>。板式热交换器体积小、传热效果好、造价低,适合应用于闭式循环<sup>[18]</sup>。

Vaivudh 等人<sup>[19]</sup>建立一高温换热器试验装置,该换热器外形由两同轴圆筒构成,其中小圆筒  $\phi$  为 0.22 m,高 0.88 m,大圆筒  $\phi$  为 0.63 m,高 1.286 m,两圆筒之间填充绝热材料,小圆筒内安装有一个垂直管和一个螺旋盘管,垂直管内走储热介质,螺旋盘管走循环工质,试验结果表明,该换热器试验装置的最高储热效率为 0.631。Gupta 等人<sup>[20]</sup>对直膨式发电装置进行了有用能分析,分析结果表明,冷凝器模块能量

损失最大, 太阳能集热器次之, 且太阳能集热器模块的有用能损失最大; 分析还认为, 采用给水加热器个数较多时, 可获得更高的循环热效率。

## 4 温差热发电技术的应用

化石能源日益锐减和化石燃料燃烧所引起的环境恶化等问题使人们意识到利用可再生能源和工业余热废热的重要性。太阳能、地热能、海洋温差能、工业余热废热等属于低品位热源, 均可作为温差热发电装置的高温端的热源。

### 4.1 太阳能利用

太阳能发电装置主要分为槽式、塔式和碟式。槽式太阳能发电装置技术风靡欧洲<sup>[21-24]</sup>, 技术发展也最成熟<sup>[25]</sup>, 且机组容量一般在 50 MWe 左右<sup>[26]</sup>, 当太阳聚焦比为 75, 运行温度约 400℃ 时, 年热电效率约为 10%<sup>[27]</sup>; 塔式太阳能发电装置在阳光聚焦比约为 800, 运行温度约 560℃ 时, 年热电效率可达 15%; 对于碟式太阳能发电装置, 可分为朗肯循环和斯特林循环, 其中采用斯特林循环的碟式太阳能发电装置主要用在欧洲和欧洲<sup>[28, 29]</sup>, 其热电转换效率可达到 31.25%<sup>[30]</sup>。

文献[31-33]将天然形成或人工采矿后遗留下的露天深坑设计为热空气烟囱, 通过太阳能集热加热空气, 利用热空气的抽吸作用来驱动风机发电。Hu 等<sup>[34]</sup>提出了一种太阳能辅助热发电系统, 其中太阳能集热板用来预热从冷凝器出来的循环工质, 试验结果表明, 该系统发电量比常规的热发电系统提高 5% 以上, 而温室气体排放量却减少了 5%。

Wu 等人<sup>[35]</sup>提出一种基于碱性金属热电转换器 (AMTEC) 的碟式太阳能发电装置, 如该系统由碟式太阳能集热模块和碱性金属热电转换模块组成, 两个模块之间由热交换器耦合在一起, 研究结果表明, 该装置最大热电效率可达到 20.6%, 对应的运行温度为 1280 K。

文献[36-38]提出一种基于太阳能集热的水蒸气-燃气联合发电装置, 该装置可以回收系统中产生的 CO<sub>2</sub>。Kosugi<sup>[39]</sup>对两种基于太阳能集热的燃气轮机热发电装置进行了经济性比较, 燃气轮机热发电装置 A 不回收系统中产生的 CO<sub>2</sub>, 另一种燃气轮机热发电装置 B 回收系统中产生的 CO<sub>2</sub>, 结论表明, 当针对 CO<sub>2</sub> 的税费不低于 368~475 \$/t 这个范围时, 发电装置 B 的经济性高于发电装置 A。

Gou 等人<sup>[40]</sup>研制了一种基于太阳能集热的燃气轮机发电装置, 其中太阳能模块用来产生饱和水蒸气, 用纯氧助燃的天然气燃烧器用来产生 1300℃ 的高温高压烟气, 该烟气在透平中膨胀做功后, 被送入热回收器用来再热从太阳能模块产生的饱和水蒸气。

太阳能热发电装置的储热装置是关键设备之一, 储热装置主要分为显热储热、潜热储热以及化学储热 3 类<sup>[41, 42]</sup>, Hoshi 等人<sup>[43]</sup>设计了一种采用相变材料的太阳能热发电装置。清华大学的张寅平等<sup>[44]</sup>提出了一种基于氨化学储热的太阳能热发电装置。

Hong<sup>[45]</sup>搭建了一种结合甲醇分解的太阳能热发电装置, 该装置通过槽式太阳能集热器来加热并分解甲醇, 试验结果表明, 该装置净发电效率达到了 35%, 集热器集热温度为 220℃, 透平工质入口温度为 1300℃。

### 4.2 海洋温差利用

海洋蕴藏有丰富的无污染的可再生能源, 它吸收的太阳能达 37 万亿 kW, 可开发利用部分远远超出全球能源的总消耗量。目前以潮汐能、波浪能和海水温差能发电为海洋能开发利用的主要形式, 在各种海洋能的应用之中, 温差能发电潜力巨大, 全世界海水温差能的理论储量估计为 600 亿 kW, 居于海洋各种能源之首。我国海域辽阔, 大陆海岸线长达 18 000 km, 海洋面积为 470 万 km<sup>2</sup>, 海水温差能蕴含量约 1.2 亿 kW<sup>[46]</sup>。

利用海水温度差发电的设想最早在 1870 年由 Jules 提出<sup>[47]</sup>, 其后 1881 年法国人 J. A. d'Arsonval 第一个提出海洋温差发电的具体设想: 在朗肯循环上用表层海水加热蒸发压缩氨气产生的蒸汽推动涡轮发电, 然后用 800~1 000 m 深处的冷海水对蒸汽冷凝; 此后 Claude 于 1926 年首次进行了海洋温差能发电的试验, 1929 年 Claude 在古巴建成了一座输出功率 22 kW 的温差能开式循环发电装置<sup>[48, 49]</sup>。1979 年在夏威夷建成的 mini-OTEC 发电装置安装在一艘海军驳船上, 额定功率 50 kW, 净功率 15 kW, 利用一根  $\phi 0.6$  m、长 670 m 的聚乙烯冷水管垂直伸向海底吸取冷水, 这是世界上首次从海洋温差能获得有实用意义的电

力<sup>[50]</sup>. 1981年在瑙鲁修建的一座功率为100 kW的岸基发电站即采有一条外径0.7 m,长950 m的聚乙烯管深入到580 m的海底抽取冷海水<sup>[17]</sup>. 太平洋高技术国际研究中心(PICHTR)于1991年11月开始在夏威夷进行开式循环发电试验,并1993年建成发电功率210 kW,净输出40~50 kW,并产生淡水的装置; PICHTR开发了利用冷海水进行空调、制冷及海水养殖等附属产业<sup>[51]</sup>. 日本在对海洋能的开发利用方面十分活跃,专门成立了海洋温差发电研究所,曾建立多座海洋温差发电装置,并在海洋热发电系统和热交换器技术领域占世界领先地位<sup>[52~53]</sup>.

Abraham对一台海上漂浮式、容量为1 MW的海洋温差发电装置进行了性能分析<sup>[54]</sup>. Paul等人<sup>[55]</sup>在传统的海洋温差发电装置的基础上,增加一个能漂浮在海面上的太阳池,通过太阳池蓄热功能来提高循环工质的温度梯度,研究表明,该复合循环系统的能量转换效率可以从3%提高到12%. Kim等人<sup>[1]</sup>针对海洋能温差发电装置,将核电厂的冷却水取代海面的温海水作为高温热源,系统的循环转换效率提高了约2%. 王迅等<sup>[56]</sup>在温、冷海水一定的条件下,对混合式海水温差能发电系统的两种基本循环形式进行对比分析,建立此两种系统的数学模型,并根据数值模拟的结果,分析两种系统的运行特点.

海洋能温差发电设备一般安装在边远海滨或海面上,常常远离实际用电区域, Kazim<sup>[57]</sup>提出了一种氢电解与海洋能温差发电耦合装置,将海洋能温差发电模块产生的电能用来电解水,从而收集氢气,该装置可以收集氢气量范围为2.5~60 Nm<sup>3</sup>. Yamada等人建立了太阳能辅助海洋温差发电系统,低温平板太阳能集热器的有效集热面积为5 000 m<sup>2</sup>,可以将引入的温海水温度提高20℃,仿真结果表明,该系统的循环转换效率比常规的海洋温差发电系统提高约50%<sup>[58]</sup>.

#### 4.3 地热能利用

地热能是指蕴藏在地球内部距地表5 km以内的能量,是一种由于复杂的地质构造活动而形成的巨大的自然能源. 根据可利用地热资源的特点以及采用技术方案的不同,地热发电主要划分为地热蒸汽、地下热水、联合循环和地下热岩石4种发电方式.

1913年,第一座装机容量0.25 MW的地热电站在意大利建成并运行,目前世界最大的地热电站是美国的盖瑟尔斯地热电站<sup>[59]</sup>. 全球装机容量从1975年的1 300 MW迅速发展到2007年的10 000 MW. 2005年初统计显示,全世界地热发电装机总量合计为9169.2 MW,美国占30.5%,居第一位,菲律宾占21%,居第二位,以下依次为墨西哥、印尼和意大利,日本居第六位,占5.8%,中国地热发电装机容量为28 MW<sup>[60]</sup>. 1970年在广东丰顺建成第一座地热电站,机组功率为0.1 MW. 到目前为止,西藏羊八井地热电站是我国最大、运行最久的地热电站. 羊八井地热电站装机容量已达到9台共25.18 MW,机组最大单机容量为3 MW等级. 目前国内可以独立建造30 MW以上规模的地热电站,单机可以达到10 MW,截止到2007年我国地热发电装机容量为32 MW<sup>[61]</sup>.

文献[62]提出一种地热太阳能联合发电系统,主要分为4个子系统:地热流系统、有机工质循环系统、太阳能集热系统及冷却水系统. ImrozSohel等人<sup>[63]</sup>通过利用地热源发电装置来调节夏季和冬季用电高峰,该发电装置采用双工质循环,其中冷凝器采用风冷方式,其原因是新西兰当地白天和晚上的温度和湿度变化较大.

Sener等<sup>[64]</sup>从系统投资和运行角度研究了地热发电装置的经济性,结果表明,在土耳其的地热发电成本约为0.057 \$/kWh,资金回收周期约为7~8年. Adelina等<sup>[65]</sup>在3 km深的直径为0.3 m的底部温度达到140℃的废弃的矿井中,设置双管换热器,通过利用管底部的地热能,采用异丁烷为循环工质发电.

Borsukiewicz<sup>[66]</sup>提出一种可提高温差地热源发电装置发电量的方法,该方法通过增设一个预热器,一方面预热从工质泵送出的低温有机工质,一方面进一步回收从蒸发器流出的放热后的高温加热流体,从而提高循环系统的有机工质流量. 文献[67~69]从热力学角度分析了地热发电装置的热效率和热经济性.

#### 4.4 余热回收利用

大多数工业过程都会产生大量的工业废热,如果直接排放到环境中,不仅严重污染环境,而且是一种极大的能源浪费;以传统的方式加以回收,其经济效益又非常有限. 将朗肯循环整合到能源系统,即以工业余热废热驱动朗肯循环,不但可在相同输出的条件下,减少CO<sub>2</sub>等污染物的排放,有利于环境保护;而且还可将低品位能源升级成高品位的电能,减轻电网峰值负荷,在一定程度上能够缓解我国,特别是在热浪逼人的酷暑和气候恶劣的严冬时能源供应的紧张局面. 工业生产过程中的余热数量相当可观,例如,

印刷厂排出的  $70^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$  的废水, 热电厂、核电厂等排出的  $50^{\circ}\text{C}$  以上的冷凝水, 发动机排出的温度在  $450^{\circ}\text{C}$  以上的废气, 轻型汽车排放的温度达  $700^{\circ}\text{C}$  的废气, 中型汽车排出的温度达  $500^{\circ}\text{C}$  以上的废气等<sup>[70]</sup>, 利用以上工业余热可作为小温差热发电系统的高温热源。

#### 4.5 其它方面

温差热发电技术在生物质能源方面也有所应用。Kinoshita 等将森林加工后的生物质废料用来替代煤炭发电, 可以减少发电过程中  $\text{CO}_2$  的排放量。为了评价该方法的经济性, Kinoshita 等建立了林业区域经济性评价模型<sup>[71]</sup>, 并将此经济性评价模块应用某面积为  $234 \text{ km}^2$  的行政城镇<sup>[72]</sup>。

在太空深冷环境中, 由于环境温差可接近于  $0 \text{ K}$ , Carnot 循环的热效率逼近  $100\%$ <sup>[73]</sup>, 此独特自然条件对温差热发电技术的开发与应用十分有利。太空深冷环境中的温差热发电装置主要采用 Brayton, Ericsson 和 Rankine 3 种不同的循环装置, 此 3 种循环装置的最大热效率分别可达到  $63\%$ 、 $74\%$  和  $85\%$ , 比在地面上应用 3 种循环装置的最大热效率分别提高了约  $45\%$ 、 $17\%$  和  $44\%$ <sup>[14]</sup>。

## 5 结论

从长远来看, 为提高电网的质量和可靠性, 构造一个集中式供能与分布式供能相结合的合理能源系统, 将是我国能源产业发展的必经之路。温差热发电技术通过循环工质驱动透平发电, 兼有不消耗煤炭、燃油等紧缺能源, 低排放, 节能环保等一系列优点, 在分布式供能系统中占有重要地位。温差热发电技术可以灵活利用各种不同品位和形式的热能, 适用于工业余热废热、太阳能、地热能、海洋能等能源利用领域, 具有广阔的应用前景。

### [参考文献] (References)

- [1] Kim N J, Kim C N, Chun W. Using the condenser effluent from a nuclear power plant for ocean thermal energy conversion [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(10): 1 008-1 013.
- [2] Dippio R. Ideal thermal efficiency for geothermal binary plants [J]. Geothermics, 2007, 36(3): 276-285.
- [3] Borsukiewicz G A, Nowak W, Stachel A A. Improvement of ecological efficiency of power plant operation by substitution of a single component plant with a binary one [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2007, 16(3B): 43-48.
- [4] Ozgener L, Hepbasli A, Ibrahim D. Thermo-mechanical energy analysis of balcova geothermal district heating system in izmir, turkey [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2004, 126(4): 293-301.
- [5] Borsukiewicz G A. Dual-fluid-hybrid power plant co-powered by low-temperature geothermal water [J]. Geothermics, 2010, 39(2): 170-176.
- [6] Bruhn M. Hybrid geothermal-fossil electricity generation from low enthalpy geothermal resources: geothermal feed water preheating in conventional power plants [J]. Energy, 2002, 27(4): 329-346.
- [7] Borsukiewicz G A, Nowak W. Comparative analysis of natural and synthetic refrigerants in application to low temperature clausius-rankine cycle [J]. Energy, 2007, 32(4): 344-352.
- [8] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al. Working fluids for lowtemperature organic Rankine cycles [J]. Energy, 2007, 32(7): 1 210-1 221.
- [9] Hettiarachchi H D M, Golubovic M, Worek W M, et al. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources [J]. Energy, 2007, 32(9): 1 698-1 706.
- [10] Michaelides E E, Scott G J. Binary-flashing geothermal power plant [J]. Energy, 1984, 9(4): 323-331.
- [11] Nowak W, Stachel A A, Borsukiewicz G A. Influence of evaporation temperature and organic fluid properties in the lower cycle of binary power plant on its efficiency and power [J]. Archives of Thermodynamics, 2006, 27(4): 1-10.
- [12] 王辉涛, 王华. 海洋温差发电有机朗肯循环工质选择 [J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 119-124.  
Wang Huitao, Wang Hua. Selection of working fluids for ocean thermal energy conversion power generation organic Rankine cycle [J]. Ocean Engineering, 2009, 27(2): 119-124. (in Chinese)
- [13] Alessandro F, Marco V. Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields [J]. Geothermics, 2009, 38(4): 379-391.
- [14] Tarlecki J, Lior N, Zhang N. Analysis of thermal cycles and working fluids for power generation in space [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(11): 2 864-2 878.
- [15] Nakaoka T, Uehara H. Performance test of a shell-and-tube plate type evaporator for OTEC [J]. Experimental Thermal and

- Fluid Science ,1988 ,1(3) : 283-291.
- [16] Nakaoka T ,Uehara H. Performance test of a shell-and-tube plate type condenser for OTEC [J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,1988 ,1(3) : 275-281.
- [17] 李伟 ,赵镇南 ,王迅 等. 海洋温差能发电技术的现状与前景 [J]. 海洋工程 ,2004 ,22(2) : 105-108.  
Li Wei ,Zhao Zhennan ,Wang Xun ,et al. Current situation and prospects of oceanic thermal energy conversion [J]. Ocean Engineering ,2004 ,22(2) : 105-108. ( in Chinese)
- [18] Tanner D. Ocean thermal energy conversion: current overview and future outlook [J]. Renewable Energy ,1995 ,6(3) : 367-373.
- [19] Vaivudh S ,Rakwichian W ,Chindaruksa S. Heat transfer of high thermal energy storage with heat exchanger for solar trough power plant [J]. Energy Conversion and Management ,2008 ,49(11) : 3311-3317.
- [20] Gupta M K ,Kaushik S C. Exergy analysis and investigation for various feed water heaters of direct steam generation solar-thermal power plant [J]. Renewable Energy ,2010 ,35(6) : 1228-1235.
- [21] Montes M J. Thermofluidynamic model and comparative analysis of parabolic trough collectors using oil ,water/steam or molten salt as heat transfer fluids [C]// Proceedings of 14th International SolarPACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies ,Las Vegas: 2008.
- [22] Benz N. Advances in receiver technology for parabolic troughs [C]// Proceedings of 14th International SolarPACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies ,Las Vegas: 2008.
- [23] Eck M. Direct steam generation in parabolic troughs at 500℃—A German—Spanish project targeted on component development and system design [C]// Proceedings of 14th International Solar PACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies ,Las Vegas: 2008.
- [24] Zarza E. Almería GDV: the first solar power plant with direct stem generation [C]// Proceedings of 14th International Solar PACES Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies ,Las Vegas: 2008.
- [25] Poullikkas A. Economic analysis of power generation from parabolic trough solar thermal plants for the Mediterranean region—a case study for the island of Cyprus [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,2009 ,13(9) : 2474-2484.
- [26] Montes M J ,Abanades A ,Martinez-Val J M ,et al. Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant ,using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors [J]. Solar Energy ,2009 ,83(12) : 2165-2176.
- [27] Ravi K K ,Reddy K S. Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver [J]. Applied Energy ,2009 ,86(9) : 1804-1812.
- [28] Mancini T ,Heller P ,Butler B ,et al. Dish-stirling systems: an overview of development and status [J]. Journal of Solar Energy Engineering ,2003 ,125(2) : 135-151.
- [29] Karabulut H ,Yucesu H S ,Cinar C ,et al. An experimental study on the development of a b-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources [J]. Applied Energy ,2009 ,86(1) : 68-73.
- [30] Sandia. Stirling energy systems set new world record for solar-to-grid conversion efficiency [EB/OL]. <http://www.newswise.com/articles/view/537732/?sc=swhn>.
- [31] Di B F ,Gwiazda J. A novel thermally induced draft air power generation system for very tall , man-made and natural geo-physical phenomenon [C]// AMSE Joint Power Conference ,Scarsdale: Arizona. 2002.
- [32] Di B F ,Gwiazda J. A new concept for a thermal air power tube used with concentrated solar energy power generation in open-pit mines and large natural geo-physical phenomenon [C]// ASME Joint Power Conference ,Atlanta: 2003.
- [33] Francis A ,Di B F ,Gwiazda J. A new concept for integrating a thermal air power tube with solar energy and alternative ,waste heat energy sources and large natural or man-made , geo-physical phenomenon [J]. Renewable Energy ,2005 ,30(2) : 131-143.
- [34] Hu E ,Yang Y P ,Nishimura A ,et al. Solar thermal aided power generation [J]. Applied Energy ,2010 ,87(9) : 2881-2885.
- [35] Wu S Y ,Xiao L ,Cao Y D. A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation [J]. Applied Energy ,2010 ,87(2) : 452-462.
- [36] Pak P S ,Suzuki Y A. CO<sub>2</sub>-recovering non-polluting high-efficiency gas-turbine power generation system utilizing saturated steam as its working gas [J]. Electrical Engineering in Japan ,1994 ,114(3) : 86-97.
- [37] Pak P S ,Hatikawa T ,Suzuki Y. A hybrid power generation system utilizing solar thermal energy with CO<sub>2</sub> recovery based on oxygen combustion method [J]. Energy Conversion Management ,1995 ,36(6/9) : 823-826.
- [38] Pak P S ,Kosugi T ,Suzuki Y. Characteristics and economics evaluation of a CO<sub>2</sub>-capturing solar thermal hybrid power generation system with heat storage [J]. Electrical Engineering in Japan ,1999 ,126(4) : 21-29.
- [39] Kosugi T ,Pak P S. Economic evaluation of solar thermal hybrid H<sub>2</sub>O turbine power generation systems [J]. Energy ,2003 ,

- 28(3): 185-198.
- [40] Gou C H, Cai R X, Hong H. A novel hybrid oxy-fuel power cycle utilizing solar thermal energy[J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1 707-1 714.
- [41] Gil A, Medrano M, Martorell I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation: Part 1-Concepts, materials and modellization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 31-55.
- [42] Medrano M, Gil A, Martorell I, et al. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation: part 2-Case studies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 56-72.
- [43] Hoshi A, Mills D R, Bittar A, et al. Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(3): 332-339.
- [44] Zhang Y P, Jiang Y. A simple method, the T-history method, of determining the heat fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials[J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(3): 201-205.
- [45] Hong H, Jin H G, Ji J, et al. Solar thermal power cycle with integration of methanol decomposition and middle-temperature solar thermal energy[J]. *Solar Energy*, 2005, 78(1): 49-58.
- [46] 王迅, 李赫, 谷琳. 海水温差能发电的经济和环保效益[J]. *海洋科学*, 2008, 32(11): 84-87.  
Wang Xun, Li He, Gu Lin. Economic and environmental benefits of ocean thermal energy conversion[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(11): 84-87. (in Chinese)
- [47] Heydt G T. An assessment of ocean thermal energy conversion as an advanced electric generation methodology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(3): 409-418.
- [48] Claude G. Power from the tropical seas[J]. *Mechanical Engineering*, 1930, 52(12): 1 039-1 044.
- [49] Moore F P, Martin L L. A nonlinear nonconvex minimum total heat transfer area formulation for ocean thermal energy conversion (OTEC) systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(8/9): 1 015-1 021.
- [50] Lennard D E. The viability and best locations for ocean thermal energy conversion systems around the world[J]. *Oceanographic Literature Review*, 1996, 43(1): 88-88.
- [51] Robert F, Cicchetti G J, Jonathan C D, et al. Ocean thermal energy conversion (OTEC) system[J]. *Renewable Energy*, 1997, 11(2): 276-290.
- [52] Uehara H. The present status and future of ocean thermal energy conversion[J]. *Energy and Resources*, 2002, 23(2): 129-132.
- [53] Uehara H. The present status and future of development of OTEC[J]. *Cogeneration in Japan*, 2004, 19(2): 43-51.
- [54] Abraham R, Jayashankar V, Ikegami Y, et al. Analysis of power cycle for 1 MW floating OTEC plant[C]// *Proceedings of International OTEC/DOWA, Imari Japan: 1999*.
- [55] Paul J T S, Wilfried G J. A new hybrid ocean thermal energy conversion—offshore solar pond (OTEC—OSP) design: A cost optimization approach[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(6): 520-527.
- [56] 王迅, 谷琳, 李赫. 海水温差能发电系统两种循环方式的比较研究[J]. *海洋技术*, 2006, 25(2): 34-38.  
Wang Xun, Gu Lin, Li He. Comparative research of two cycle modes in ocean thermal conversion systems[J]. *Ocean Technology*, 2006, 25(2): 34-38. (in Chinese)
- [57] Kazim A. Hydrogen production through an ocean thermal energy conversion system operating at an optimum temperature drop[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(14/15): 2 236-2 246.
- [58] Yamada N, Hoshi A, Ikegami A. Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(7): 1 752-1 758.
- [59] 吕太, 高学伟, 李楠. 地热发电技术及存在的技术难题[J]. *沈阳工程学院学报: 自然科学版*, 2009, 5(1): 5-9.  
Lü Tai, Gao Xuewei, Li Nan. The geothermal power technology and technical problems[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science Edition*, 2009, 5(1): 5-9. (in Chinese)
- [60] 李志茂, 朱彤. 世界地热发电现状[J]. *太阳能*, 2007(8): 10-14.  
Li Zhimao, Zhu Tong. Status of world geothermal power generation[J]. *Solar Energy*, 2007(8): 10-14. (in Chinese)
- [61] 高学伟, 李楠, 康慧. 地热发电技术的发展现状[J]. *电力勘测设计*, 2008(3): 59-62.  
Gao Xuewei, Li Nan, Kang Hui. The development status of geothermal power technology[J]. *Electric Power Survey and Design*, 2008(3): 59-62. (in Chinese)
- [62] 张丽英, 翟辉, 代彦军, 等. 一种地热与太阳能联合发电系统研究[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(9): 1 086-1 091.  
Zhang Liying, Zhai Hui, Dai Yanjun, et al. Study on a geothermal-solar power generation system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2008, 29(9): 1 086-1 091. (in Chinese)
- [63] Imrozsohel M, Sellier M, Brackney L J, et al. Efficiency improvement for geothermal power generation to meet summer peak demand[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(9): 3 370-3 376.

- [64] Sener A C , Aksoy N. A general view on geothermal power economy [C]// Proceedings of the Geothermal Energy Seminar on Electricity Production from Geothermal Energy Teskon , Izmir , Turkey: 2007.
- [65] Adelina P D , Efstathios E M. Geothermal power production from abandoned oil wells [J]. Energy , 2009 , 34( 7) : 866-872.
- [66] Borsukiewicz G A , Nowak W. Maximising the working fluid flow as a way of increasing power output of geothermal power plant [J]. Applied Thermal Engineering , 2007 , 27( 11/12) : 2 074-2 078.
- [67] Ozgener L , Hepbasli A , Ibrahim D. Thermo-mechanical exergy analysis of balcova geothermal district heating system in izmir , Turkey [J]. Journal of Energy Resources Technology , 2004 , 126( 4) : 293-301.
- [68] Kanoglu M , Bolatturk A. Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy [J]. Renewable Energy , 2008 , 33( 11) : 2 366-2 374.
- [69] Ozcan N Y , Gokcen G. Thermodynamic assessment of gas removal systems for single-flash geothermal power plants [J]. Applied Thermal Engineering , 2009 , 29( 14/15) : 3 246-3 253.
- [70] Yodovard P , Khedari J , Hirunlabh J. The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants [J]. Energy Sources , 2001 , 23( 3) : 213-224.
- [71] Kinoshita T , Inoue T , Iwao K , et al. A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS [J]. Applied Energy , 2008 , 86( 1) : 1-8.
- [72] Kinoshita T , Ohki T , Yamagata Y. Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan [J]. Applied Energy , 2010 , 87( 9) : 2 923-2 927.
- [73] Lior N. Power from space [J]. Energy Conversion Management , 2001 , 42( 15/17) : 1 769-1 805.

[责任编辑: 刘 健]

(上接第12页)

- [4] 付润江, 金波, 杜勇. 电快速脉冲群干扰的频谱分析及消除方法 [J]. 长江大学学报 2005( 7) : 245-247  
Fu Runjiang , Jin Bo , Du Yong. Electrical fast burst interference and elimination of spectrum analysis [J]. Journal of Yangtze University 2005( 7) : 245-247( in Chinese)
- [5] 陈世钢. 电快速瞬变脉冲群的抑制 [J]. 电磁干扰抑制技术 , 1997( 4) : 7-13.  
Chen Shigang. Suppression of electrical fast transient [J]. Electromagnetic Interference Suppression , 1997( 4) : 7-13. ( in Chinese)
- [6] 瞿昱, 刘文彦, 邓新中. 接地干扰的形成及抑制 [J]. 煤矿机电 2003( 1) : 31-33.  
Zhai Zhao , Liu Wenyan , Deng Xinzong. The formation and suppression of ground disturbance [J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology , 2003( 1) : 31-33. ( in Chinese)
- [7] 朱文立. 快速瞬变脉冲群测试的失败原因及对策 [J]. 安全与电磁兼容 2007( 2) : 5-10.  
Zhu Wenli. Cause analysis of EFT/B test failure and countermeasures [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing , 2007( 2) : 5-10. ( in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]