

# 不受地理位置限制的地热和太阳能联合发电系统

周 刚<sup>1</sup>,倪晓阳<sup>1</sup>,李金锋<sup>2</sup>,H. Wolff<sup>3</sup>

1. 中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

2. 中国建材地质勘查中心内蒙古总队,内蒙古呼和浩特 010010

3. 德国柏林工业大学,柏林 10623

**摘要:** 为解决能源问题,开发可再生能源,利用闭式循环将地热系统和太阳能系统联合起来发电。发电系统可以避免因大规模开发利用地热水资源可能造成的地震、地面沉降、地热水资源衰减、地热水有害成分污染、热污染等环境问题,也可以克服地热发电和太阳能发电受地理位置限制的缺点。地热系统地下部分由两垂深 3~5 km 的井在井底由 5~7 km 的水平井连接而成,水平井中流体温度可达 150 ℃ 左右,适合于 ORC 发电。太阳能系统采用槽式聚光镜集热,集热流体可选水或油,最高温度可达 350 ℃ 以上。ORC 一级循环工质为水,二级循环工质为异丁烷;ORC 发电效率,白天最大为 20%,晚上最大为 12%。系统采用化学储能,储能密度为显热储能和潜热储能的 10 倍以上。钻井和完井、太阳能热能转换、载热流体、ORC 和储能等技术的研究结果证明该系统是可行的。

**关键词:** 太阳能;地热;闭式循环;联合发电。

中图分类号: TM615;TM616

文章编号: 1000-2383(2006)03-0394-05

收稿日期: 2005-08-30

## Geothermal and Solar Energy Combined Power Generation System—An Environment Friendly System Insubject to Geographic Location

ZHOU Gang<sup>1</sup>, NI Xiao-yang<sup>1</sup>, LI Jin-feng<sup>2</sup>, H. Wolff<sup>3</sup>

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Inner Mongolia Group, Geological Prospecting Center of China National Building Material Company, Hohhot 010010, China

3. Technical University of Berlin, Berlin 10623, Germany

**Abstract:** The utilization of closed loop, which generates power by combining the geothermal system with solar energy system, is feasible to solve energetic problem and to exploit renewable energy. The power generation system can avoid such environmental problems as earthquake, heat pollution, ground sedimentation, decrease of geothermal water resources, toxicant pollution, caused by mass use of geothermal water resources. Moreover, the system is expected to be free of the limitation of the geographic location. The technology is to generate power by taking the advantage of the closed loop which combines the geothermal system with solar energy system. The geothermal system is suitable for ORC power generation since the vertical depth of the underground part is 3—5 km, horizontal distance is around 5—7 km, and the fluid temperature in the horizontal well comes to around 150 ℃. Trough paraboloid mirror is used in the solar energy system to collect heat in which either water or oil is feasible as heat collecting fluid, and it is possible for temperature to reach as high as or even higher than 350 ℃. Primary circulation media is water and the secondary one is isobutane. The maximal power generation productivity of ORC is 20% in the daytime and 12% at night. Chemical storage energy is adopted in the system which has a storage-density 10 times higher than the apparent-heat storage energy and the potential-heat one. The system is proved to be feasible after studying the relative technologies of drilling and completion, the transformation from solar energy to heat energy, heat-carrier fluid, ORC and storage energy.

**Key words:** solar energy; geothermal energy; closed loop; combined power generation.

基金项目:柏林工业大学主持的德国投资未来项目(ZIP0327506).

作者简介:周刚(1973—),男,助理研究员,主要从事油气井、地热井钻井和完井技术研究。E-mail: zhougang@cug.edu.cn

地热在开发中由于不产生  $\text{CO}_2$  和其他有害气体,被称为清洁能源.然而由于地热开发必须抽取大量地下水,因此会带来一些环境问题,如:地震、地面沉降、地热水资源衰减、地热水有害成分污染、热污染等.因此有些学者反对地热发电,认为地热发电对环境是灾难性的.我国是地热资源相对丰富的国家,按照温度分布,已发现的高温( $>150\text{ }^\circ\text{C}$ )地热资源主要分布在西藏、云南、四川和台湾等地;而中温( $150\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ )和低温( $90\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,有称低至  $15\text{ }^\circ\text{C}$ )地热资源则分布甚广(耿莉萍,1998).目前地热发电仅限于西藏羊八井等高温地热资源地区.

太阳能是非常清洁的能源,利用太阳能发电既不产生  $\text{CO}_2$  和其他有害气体,也不产生其他环境问题.我国太阳能辐射年总量大约在  $3\ 300\sim 8\ 300\text{ MJ}/\text{m}^2$  之间, $6\ 000\text{ MJ}/\text{m}^2$  等值线从内蒙古自治区东部至青藏高原东侧,将全国分成西北和东南两部分.受气候影响,西北地区太阳能资源丰富,东南部地区太阳能资源较贫乏(赵媛和赵慧,1998).目前,我国太阳能发电采用的是光伏发电技术,由于成本高,且受气候限制,没有大规模应用,仅限于西北部偏远地区供电.

本文提出了一种结合太阳能热发电和热水型地热发电技术的闭式循环联合发电系统,可以避免地热发电造成环境污染和克服地热发电、太阳能发电受地理位置限制等缺点.

## 1 地热、太阳能联合发电系统模型及其特点

### 1.1 系统模型及功能解释

此系统是结合太阳能热发电和热水型地热发电技术的特点而提出来的,系统工作原理如图1所示.系统主要由4部分组成,即地热采集部分、太阳能采集部分、储能部分和中低温 ORC(organic-rankine-cycle)发电部分.本系统地下部分全井下套管,流体在系统中不与外界环境接触,因此是一闭式循环系统.系统工作模式分为白天和晚上2种:白天,低温载热流体注入地下,在水平井段吸收地下岩层的热量,第一次被加热,然后流经集热器,集热器将太阳能转换为热能,对载热流体进行第二次加热,载热流体最后流入 ORC 发电.白天多余的热量被储能器储存;晚上,低温载热流体注入地下,在水平井段吸

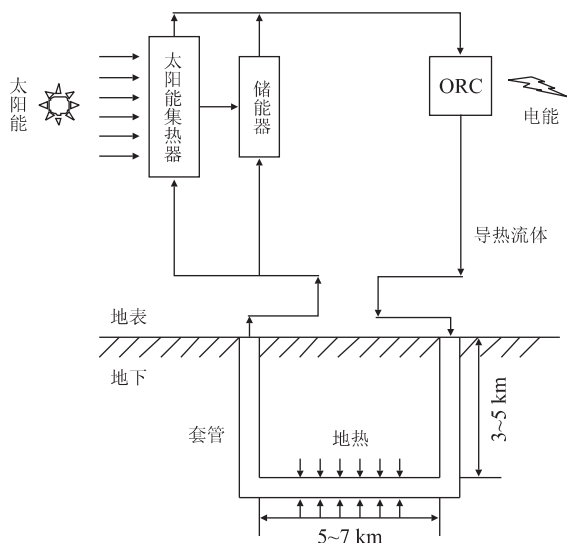


图1 地热和太阳能联合发电系统工作原理简图

Fig. 1 Concise chart of working principle of geothermal and solar energy combined power generation system

收地下岩层的热量,第一次被加热,然后流经储能器,储能器释放热能,对载热流体进行第二次加热,载热流体最后流入 ORC 发电.

### 1.2 系统特点

(1)系统是双源二级循环发电系统.循环流体在2个部分都吸热:一是通过太阳能集热器在白天吸收太阳能;二是通过流经地下岩层时吸收岩层的热量. ORC 是一个二级发电系统,回流流体可再次流入 ORC 进行发电,直到温度低于发电要求.(2)系统白天通过太阳能和地热能联合发电,载热流体温度较高,发电量大,能满足白天用电量大的需求;系统晚上通过地热和储能器释放热能发电,载热流体温度较白天要低,发电量较白天少,但是也可以提供稳定的发电量满足夜间对电能的需求.(3)系统载热流体的温度是可以控制的,它通过利用热能储能器来实现,因此可以实现稳定的电能生产,也能应对突发需要.(4)由于利用地热对系统进行了第一次加热,提高了太阳能集热器入口流体的温度,因而可以减少集热器规模,降低土地占用量.同时,流体可经太阳能集热器二次加热,提高温度,因此可以减少地热水平井的长度,降低地热井的开发风险.(5)本系统是闭式系统,地下部分钻孔完全下入套管,当岩石和载热流体之间存在温度梯度时,载热流体将被加热,因此不受地热水的资源量和温度的限制;在循环的载热流体和岩石之间没有任何物质交换,岩石仅仅释放了热量,从而使系统不受地质构造和水质的

表 1 钻孔直径和所能钻达的最大水平位移的关系

Table 1 Relationship between the diameter of drilling hole and the maximal drilling horizontal distance

钻孔直径	8. 1/2"(215. 9 mm)	12. 1/4"(311. 1 mm)	14. 3/4"(374. 6 mm)
单孔水平位移	7 900 m	4 900 m	4 400 m
系统总的水平位移	大约 13 800 m	大约 7 800 m	大约 6 800 m

影响,降低了系统对设备的要求,提高了设备和系统的使用寿命.本系统是一闭式循环系统,不抽取地下水,不压裂岩层,不排放任何物质到环境中,对环境无任何影响,另外本系统利用的太阳能和地热能都是可再生非化石能源,因此是一个环境友好的系统.

(6)系统通过联合太阳能和地热来加热流体,并采用中低温 ORC 发电,对太阳能辐射强度和地温梯度无过高要求,一般位置都可应用,克服了太阳能和地热能发电受地理位置限制的缺点,是一种全新的不受地理位置限制的太阳能、地热能联合发电系统.

## 2 可行性探讨

本系统涉及的关键技术有:地热采集(主要是钻井和完井技术)、太阳能采集、储能、ORC 发电和载热流等技术.

### 2.1 钻井和完井技术

2.1.1 钻井技术 随着自动控制钻井技术、地下测量技术和大位移井技术的发展,钻进水平位移为 10 000 m 的井是可能的.目前所钻大位移水平井水平延伸距离最大的是英国的 Wytch Farm 油田的 1M-16SPZ 井,水平位移达 10 728 m(卢林松,2004).

钻进过程中的摩擦和扭矩对钻进能力、钻孔的质量有非常大的影响.模拟计算显示,同样的钻孔深度,如果能避免孔壁接触,在垂直的钻孔段,作用在钻头上的摩擦和扭矩大概能够减少 20%.同样的载荷下,应用自动控制的垂直钻井技术可比传统的钻井技术多钻 1 000 m 垂深.

应用悬链线技术对井身剖面结构进行优化后,8. 1/2"(215. 9 mm)的钻孔在同样的载荷下能提高 10%的水平位移,8. 1/2"(215. 9 mm)和 12. 1/4"(311. 1 mm)钻孔优化的稳斜角均为 79°,14. 3/4"(374. 6 mm)钻孔优化的稳斜角为 78°.钻孔直径和所钻水平位移的关系如表 1 所示(Wolff, H., 2004. Untersuchung eines Untertägig Geschlossenen Geothermischen Wärmetauschers zur standortunabhängigen, umweltschonenden Bereitstellung regenerativer Energie,

Berlin).为使本系统水平井有较大的传热面积,本系统的钻孔直径可选 12. 1/4"或 14. 3/4".

2.1.2 地下连接技术 两井的地下连接是钻井和完井技术的难点,可以利用随钻测量技术(MWD)来确定钻孔的位置,利用电磁探测技术或声波探测技术来导向,完井时还要采用分支井技术和膨胀管技术.如使用 RIGSTM 系统定位的方向误差小于 5°;使用矢量磁力公司的“Ranging Technologien”导向可达范围为 20 m;使用 Scientific Drilling International 公司的 MagTrac™ 导向可达范围大约为 8 m;Baker Oil 公司的 Stackable Splitter System 分支井技术可以在一个系统中实现多个分支井;膨胀套管悬挂器 FORMlock™ 可以应用于对接部分的完井,也可用于易漏易塌井段的完井.

2.1.3 固井水泥 为提高系统效率,在水平吸热井段采用导热系数较高的水泥,提高载热流体的温度;在垂直井段(特别是在载热流体上升井段)采用导热系数较低的水泥,减少载热流体的热损失.G 级油井水泥加入了石英粉、石英灰、石墨、改性石墨、玻璃纤维、碳化硅、碳纤维等配置,其导热系数达到 1. 68~2 W/mK(Schmid, 2004);在 H 级油井水泥中加入漂珠,在 G 级油井水泥中加入硅粉等,其导热系数可分别达 0. 4 W/mK(Smith, 1990)和 0. 33 W/mK(Santoyo *et al.*, 2001).通过使用导热水泥和隔热水泥,流体能从地热井中多吸收 10%左右的能量.

### 2.2 太阳能采集

对太阳能进行采集必须使用集热器,集热方式主要有平板型和聚焦型 2 种:(1)平板型集热器吸收太阳辐射的面积与采集太阳辐射的面积相同,能够利用太阳辐射中的直射辐射和散射辐射,集热温度较低,集热温度一般在 80~100 °C 之间,在太阳能热水器上应用很广.平板型集热器所占空间大,集热温度偏低,尤其是需要有一定的流量时,集热温度更低,ORC 发电要求入口温度高于 80 °C,因此平板型集热器不能满足 ORC 发电的要求.(2)聚光集热器能将阳光会聚在面积较小的吸热面上,可获得较高温度,但只能利用直射辐射,且需要跟踪太阳,主要

用于太阳能热能发电. 太阳能热能发电主要有 3 种形式:塔式电站、碟式电站和槽式电站(Kalo, 2004; Sen, 2004).

综上所述,聚焦型集热器所占面积小,集热温度高,其中的槽式聚光集热系统投资较少,经济效益最好(Trieb *et al.*, 1997). 从国内外技术和我国经济情况来看,槽式聚光集热系统比较适合本系统.

### 2.3 载热流体

载热流体将地层热能携带到地表,或通过集热器吸收太阳能,然后在 ORC 进行热交换. 选择载热流体时,除了热传导系数和热容量外,还要考虑其与环境的相容性,无污染,并且无腐蚀性.

最基本的载热流体为水,本系统为闭式循环,流体与外界无接触,使用蒸馏水,可减少水垢产生,导热系数比较高,水的导热系数在 38 °C 时为 0.54 W/mK,加入乙二醇可提高抗冻性.

导热油是一种比较好的载热流体,其导热系数较大,导热油在 200 °C 时的导热系数为 0.44 W/mK,比热高、热效率高;无毒或很少有剧毒性,无刺激性气味,对人体无害;无污染,腐蚀性较小,且可减少水垢产生. 在允许的使用温度范围内,提供良好的热稳定性和抗氧化安定性(夏丽萍和黄萍,1997). 美国 LUZ 国际公司的太阳能发电系统采用的便是合成油作为传热介质(葛新石,1994).

柏林工业大学对丙烷、异丁烷、异戊烷、戊烷、异己烷、己烷、R11 等可直接汽化的工质进行了研究. 以上所考虑的原料,工质完全气化是不可能的,最多可获得 40% 蒸气,大部分工质未汽化,效率非常低. 基于目前的技术异丁烷和 R11 基本上可以使用,但是还是存在一些缺点. 综上所述,依照目前的技术和经济情况,地热载热流体可选择水;ORC 一级循环工质为水,二级循环工质为异丁烷;槽式聚焦系统载热流体可选水或油.

### 2.4 ORC

ORC 是一种中低温发电系统,本系统选用的一级工质为水,二级循环工质为异丁烷. 通过水加热异丁烷,使异丁烷汽化,推动涡轮机发电. ORC 的最低入口流体工作温度为 80 °C. ORC 的工作效率随温度的升高而增加. 通过模拟计算,温度和效率的关系如图 2 所示(图中虚线为平均效率)(Wolff, 2004),流量、温度和功率的关系如图 3 所示(郑秀华等,2004).

因此,要得到较高的电能,必须尽量提高 ORC 的入口流体温度和流量. 本系统白天利用太阳能来

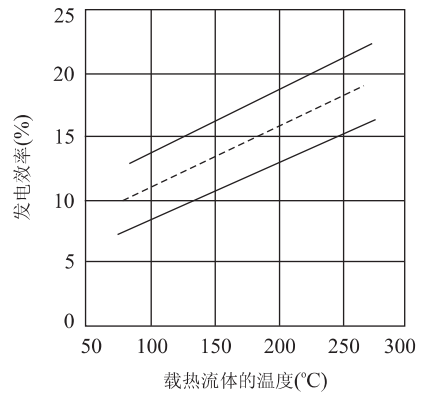


图 2 ORC 设备的效率

Fig. 2 Efficiency of ORC equipment

提高载热流体的温度,进而提系统高效率,产生更多的电能. ORC 白天效率最大能达 20%,晚上效率最大能达 12%.

### 2.5 储能系统

储能是本系统关键的一环. 储能器白天可以把剩余的热能储存起来,晚上可以释放出热量;或是晴天把热能储存起来,阴天再释放出来,这样就可以对系统流体的热量进行补充,满足发电的要求,储能器起到了调节负荷、降低设备容量和投资成本、提高能源利用效率和设备利用率的作用. 目前储能方式主要有 3 种方式:显热贮存、潜热贮存和化学贮存(Farid *et al.*, 2004; Azpiazu *et al.*, 2003).

1988 年 10 月,卢兹公司在加州召开的一次学术研讨会上讨论了适合中温太阳能电站的储能系统,评价认为化学反应储能系统的储能密度比显热储能和潜热储能大一个数量级,而且显示出良好的性价比,因此被卢兹公司确定为首选对象.

显热贮存的温度较低,如应用于本系统,则效率较低. 潜热贮存(相变储能)价格昂贵,不宜用于大规模工程. 因此,对本系统而言,化学贮热较好.

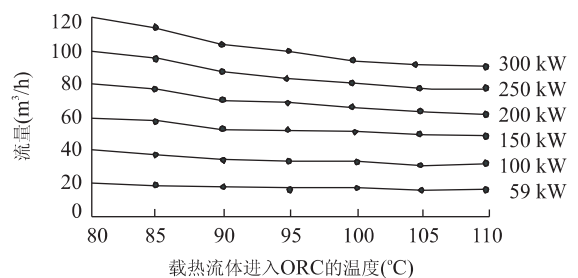


图 3 载热流体温度、流量与 ORC 功率关系

Fig. 3 Relationship among the temperate, the flux of fluid and the power of ORC

通过以上研究,本系统在理论上基本是可行的。今后要进一步进行深入的研究。对于地热系统:进一步优化导热和隔热水泥的配方;确定 2 个钻孔连接的测量和导向钻进程序;完井的连接细节研究;岩石力学研究。对于载热流体:进一步深入研究和优化载热流体;完善载热流体计算模型。对于太阳能热能转换:确定槽式聚焦镜的大小和数量;建立太阳能热能转换模型等。对于 ORC:对循环流体进行优化,提高发电效率。对于储能系统:确定化学配方,对化学储能作进一步的研究。对整个系统:要进行优化,提高工作效率;对整个系统经济可行性进行具体详细的研究。

### 3 结论

本系统是一闭循环系统,对环境无污染,不受地理位置限制,使太阳能发电和地热发电能很好地融为一体,提供稳定的发电量,同时也降低了系统风险,提高了可靠性和发电效率,延长了系统的使用寿命。不受地理位置限制的地热、太阳能联合发电系统可以为我国东南部经济发达地区中小城市的电能供给提供一种可靠来源。

### References

- Azpiazu, M. N., Morquillas, J. M., Vazquez, A., 2003. Heat recovery from a thermal energy storage based on the  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$  cycle. *Applied Thermal Engineering*, 23:733—741.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., et al., 2004. A review on phase change energy storage; Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45:1597—1615.
- Ge, X. S., 1994. Progress of solar energy research and related problems for study. *Science Foundation in China*, (3): 189—192 (in Chinese).
- Geng, L. P., 1998. Geographic distribution and application of geothermal energy in China. *Geology and Prospecting*, 34(1):50—54 (in Chinese with English abstract).
- Kalo, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30:231—295.
- Lu, S. L., 2004. The world report of extended reach drilling.

- Ocean Oil*, (9):94 (in Chinese).
- Santoyo, E., García, A., Morales, J. M., et al., 2001. Effective thermal conductivity of Mexican geothermal cementing systems in the temperature range from 28 °C to 200 °C. *Applied Thermal Engineering*, 21(17):1799—1812.
- Schmid, S. P., 2004. Erhöhung des Energieertrages eines Untertägig Geschlossenen Geothermischen Wärmetauschers durch die Verwendung geeigneter wärmeleitender Zementrezepturen, TU Berlin, Berlin.
- Sen, Z., 2004. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30: 367—416.
- Smith, D. K., 1990. Cementing. In: Henry, L., ed., Doherty memorial fund of AIME. New York.
- Trieb, F., Langnib, O., Klail, H. L., 1997. Solar electricity generation—A comparative view of technologies, costs and environmental impact. *Solar Energy*, 59:89—99.
- Xia, L. P., Huang, P., 1997. Conduct heat oil is one excellent intermediate heat transfer medium. *Petro-Chemical Equipment Technology*, 18(5):23—26 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Zhao, H., 1998. Resource and utilization of solar energy in China. *Economic Geography*, 18(1):56—61 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X. H., Wolff, H., Zheng, W. L., 2004. Closed loop geothermal system—One new system of geothermal power generation. *Exploration Engineering (Drilling & Tunneling)*, (1):63—64 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 葛新石, 1994. 太阳能利用的研究与开发. 中国科学基金, (3): 189—192.
- 耿莉萍, 1998. 中国地热资源的地理分布与勘探. 地质与勘探, 34(1): 50—54.
- 卢林松, 2004. 大位移井的世界纪录. 海洋石油, (9): 94.
- 夏丽萍, 黄萍, 1997. 导热油是一种优良的中间传热介质. 石油化工设备技术, 18(5): 23—26.
- 赵媛, 赵慧, 1998. 我国太阳能资源及其开发利用. 经济地理, 18(1): 56—61.
- 郑秀华, Wolff, H., 郑伟龙, 2004. 地下闭式循环热交换系统——一种新型地热发电系统. 探矿工程(岩土钻掘工程), (1): 63—64.