

# 地热发电技术及其关键影响因素综述

李健<sup>1,2</sup>, 武江元<sup>1</sup>, 杨震<sup>1</sup>, 段远源<sup>1</sup>, 俞自涛<sup>2,3</sup>

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

2.浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

3.浙江大学热工与动力系统研究所, 浙江 杭州 310027)

**[摘要]** 为促进中国地热发电的大规模发展, 收集、整理了我国的地热资源数据, 总结了我国地热资源的特点和地热发电的相关政策及发展现状, 综述了水蒸气朗肯循环、闪蒸循环、有机朗肯循环、卡林那循环和全流发电系统五种典型的地热发电技术, 探究并总结了影响地热发电利用的关键因素。我国的地热资源是以150℃以下的中低温地热为主, 有机朗肯循环和卡林那循环在地热发电领域有更大的发展空间; 地热的温度越高、流量越大、干度越高、水质条件越好, 当地的环境气温越低、成井率越高, 地热发电的开发潜力越大; 丰沛的水资源及高的上网电价和投资补贴也有利于地热发电行业的发展壮大。

**[关键词]** 地热发电; 中低温地热; 发电技术; 有机朗肯循环

**[中图分类号]** TK123 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfed.202112235

**[引用本文格式]** 李健, 武江元, 杨震, 等. 地热发电技术及其关键影响因素综述[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 1-8. LI Jian, WU Jiangyuan, YANG Zhen, et al. Review of geothermal power generation technologies and key influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 1-8.

## Review of geothermal power generation technologies and key influencing factors

LI Jian<sup>1,2</sup>, WU Jiangyuan<sup>1</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>, DUAN Yuanyuan<sup>1</sup>, YU Zitao<sup>2,3</sup>

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Institute of Thermal Engineering and Power System, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** To promote the large-scale development of geothermal power generation in China, the data of geothermal resources in China is collected and arranged in this paper. The characteristics of geothermal resources, relevant policies and development status of geothermal power generation in China are summarized. Five typical geothermal power generation technologies are reviewed, which are steam Rankine cycle, flash cycle, organic Rankine cycle, Kalina cycle and full-flow power system. Key factors affecting the development of geothermal power generation are discussed and summarized. The geothermal resources in China are mainly medium-to-low temperature geothermal energy (below 150 °C), and the organic Rankine cycle and Kalina cycle have greater development space in the field of geothermal power generation. Higher geothermal temperature, larger flow rate, higher geothermal fluid dryness and better water quality conditions will result in lower local ambient temperature, higher well completion rate and greater development potential of geothermal power generation. Abundant water resources and high on-grid price and investment subsidies are also conducive to the growth of geothermal power generation industry.

**Key words:** geothermal power generation; medium-to-low temperature geothermal energy; power generation technology; organic Rankine cycle

随着碳中和目标的提出, 化石能源的消费占比注定会大幅下降, 而可再生能源的消费占比将显著提升。地热是一种清洁、低碳的可再生能源, 具有连续稳定、受天气季节影响小、利用系数高、存储

量大及利用成本低等优点, 应用前景广阔, 会在未来能源体系中占据重要地位<sup>[1-2]</sup>。我国的地热资源十分丰富, 占全球总储量的7.9%<sup>[3]</sup>, 且分布广泛。高效利用地热资源对于降低我国的化石能源消耗、落

**收稿日期:** 2021-12-13

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52106017, 51736005); 能源清洁利用国家重点实验室开放基金(ZJUCEU2020013); 中国博士后创新人才支持计划(BX20200178); 中国博士后科学基金面上资助(2020M680548); 清华大学“水木学者”计划(2020SM013)

**Supported by:** National Natural Science Foundation of China (52106017, 51736005); Open Fund Project of State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (ZJUCEU2020013); National Postdoctoral Program for Innovative Talents (BX20200178); China Postdoctoral Science Foundation (2020M680548); Shuimu Tsinghua Scholar Program (2020SM013)

**第一作者简介:** 李健(1993), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为中低温热能的高效利用, lijian20@mail.tsinghua.edu.cn。

**通信作者简介:** 俞自涛(1972), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为强化传热与余热利用, yuzitao@zju.edu.cn。

实碳中和目标具有重要意义。

地热的利用方式可主要分为直接热利用（供热、制冷和干燥等）和发电。直接热利用的研究、应用较为完善，但存在能量远距离传输困难、需求有限（地域、季节约束）等问题；而地热发电，不仅可提升能量品位，而且电能便于传输、用途广、需求大，应用前景更好，是当前国际能源领域的关注热点。

为促进我国地热发电的大规模发展，本文收集、整理了我国的地热资源数据，总结了我国地热资源的特点和地热发电的相关政策及发展现状，综述了5种典型的地热发电技术，探究并总结了影响地热发电利用的关键因素，可为我国的地热发电利用提供参考。

## 1 中国地热资源概述

根据热储温度，地热资源可分为低温地热（低于90℃）、中温地热（90~150℃）和高温地热（高于150℃）。我国的地热资源是以150℃以下的中低温地热为主，高温地热主要位于西藏、台湾、云南等地区<sup>[4]</sup>。根据存储形式，地热资源又可分为蒸汽型、水热型、地压型、干热岩型和岩浆型。其中，蒸汽型、水热型和干热岩型地热是目前利用的主要对象<sup>[5]</sup>。

蒸汽型地热的主要特点是直接排放蒸汽，一般可搭配水蒸气朗肯循环或闪蒸循环进行发电，利用较为容易，但在我国的储量较为稀少。水热型地热主要排放单相的热水，储量丰富，我国已探明的水热型地热资源量达1.25万亿t标准煤<sup>[6]</sup>，主要分布在四川盆地、华北平原等15个沉积盆地（平原）及藏南-川西-滇西、东南沿海等隆起山地区域<sup>[6]</sup>。一般来说，沉积盆地（平原）的地热资源储量更大、开采条件更好，但热储温度相对较低。中国主要沉积盆地（平原）的水热型地热资源见表1，中国隆起山地区域的水热型地热资源见表2。

干热岩型地热泛指没有水或蒸汽的热岩体，在3种地热资源中储量最大，我国陆地3~10 km深度的干热岩型地热资源量约860万亿t标准煤，其中可开采量为17.2万亿t标准煤<sup>[6]</sup>。但干热岩型地热一般需要通过灌注水等流体从干热岩中取热，使其变成高温热水或蒸汽，再抽回地面利用，开采成本高，利用难度大。

我国的浅层地热资源分布更为广泛，每年的可开采量超过7亿t标准煤<sup>[7]</sup>。适合大规模开采的地区主要位于中东部的平原、盆地等水资源相对丰富的区域，包括河北、河南、北京、天津等13个省

（市）；考虑到施工难度和成本，在西部缺水的省份及部分气候寒冷的省份不适宜大规模开采浅层地热<sup>[6]</sup>。此外，地热田还会与油气田伴生存在，一些油气资源丰富的地区也存在着丰富的地热资源。中国油区的地热资源量超过849亿t标准煤<sup>[8]</sup>。油田地区废弃的采油井可作为地热井使用，大幅降低了地热的开采成本，具有非常好的开发前景<sup>[9]</sup>。

表1 中国主要沉积盆地（平原）的水热型地热资源  
Tab.1 Hydrothermal geothermal resources in main sedimentary basins (plains) in China

沉积盆地/平原	资源储量/ ( $\times 10^8$ t 标准煤)	可开采量/ ( $\times 10^8$ t 标准煤)	地热流体可开采量/ ( $\times 10^4$ t 标准煤·a <sup>-1</sup> )
四川盆地	3 280.0	493.0	2 370.0
华北平原	2 470.0	498.0	2 030.0
河淮平原	1 820.0	314.0	520.0
汾渭盆地	749.0	149.0	1 170.0
鄂尔多斯盆地	503.0	72.0	308.0
松辽盆地	422.0	42.2	166.0
银川平原	320.0	79.1	717.0
苏北平原	230.0	51.9	620.0
河套盆地	225.0	56.4	527.0
塔里木盆地	165.0	8.3	5.5
准噶尔盆地	163.0	8.2	23.3
柴达木盆地	104.0	10.4	437.0
江汉盆地	85.1	17.0	127.0
西宁盆地	45.7	4.6	18.5
下辽河平原	13.5	1.4	7.9
合计	10 595.3	1 805.5	9 047.2

表2 中国隆起山地区域的水热型地热资源  
Tab.2 Hydrothermal geothermal resources in the upland region of China

水热活动密集带	中低温地热		高温地热
	资源储量/ ( $\times 10^8$ t 标准煤)	地热流体可开采量/ ( $\times 10^4$ t 标准煤·a <sup>-1</sup> )	储热量/ ( $\times 10^{16}$ kJ)
藏南-川西-滇西	108.000	123.00	33.70
东南沿海地区	58.500	110.00	3.56
胶辽半岛	0.092	4.34	—
台湾	—	32.10	—
合计	166.592	269.44	37.26

## 2 地热发电相关政策及发展现状

我国对于地热利用一直非常重视，颁布了一系列的相关政策和法规给予大力支持。2006年，《国家中长期科学和技术发展规划纲要》明确提出了地热能开发利用技术。2013年，国家能源局下发了《促进地热能开发利用的指导意见》，要求对地热发电项目给予电价补贴。2017年，《地热能开发利用“十三五”规划》提出了“到2020年，地热发电装机容量约530 MW”的发展目标，并倡导“在西藏、川西等高温地热资源区建设高温地热发电工程；在华北、江苏、福建、广东等地区建设若干中低温地热发电

工程”。2021年,国家能源局出台了《关于促进地热能开发利用的若干意见(征求意见稿)》,提出到2025年各地基本建立地热能开发利用管理体系。

在地方政府层面,各省、市也都陆续出台了相关的政策、法规,以支持、鼓励地热资源的开发利用。以西藏自治区为例:2008年的《“十一五”时期国民经济和社会发展规划纲要》提出了要大力发展地热等可再生能源;2018年印发了《“十三五”控制温室气体排放工作方案》,明确提出了要有序推进地热能利用;同年,又先后发布了《“十三五”节能减排规划暨实施方案》和《“十三五”时期应对气候变化规划》。前者提出了要加强地热能等清洁能源普查(复查),推进地热能开发利用;后者提出了“到2020年,力争地热能发电装机规模达

到5万kW以上”的发展目标。此外,大型国有企业也不断出台相关的协议和指导意义以促进地热利用的快速发展。中石化于2013年发布了《关于中国石油化工集团公司地热产业发展的指导意见》,提出“到2030年,实现新增地热发电装机容量1700MW以上”的发展目标。中石油也于2021年提出了要加大地热能综合利用。

得益于“节能减排”基本国策的驱动和相关政策、法规的大力支持,我国地热利用发展非常迅猛,近些年在供暖、制冷、干燥、养殖、旅游等地热能直接利用领域应用较多<sup>[10]</sup>。截止到2019年底,我国地热能直接利用的装机容量为40.6GW,位居世界第一,开发对象主要是水热型地热<sup>[11]</sup>。但我国在地热能发电领域的发展相对缓慢,主要的地热电站见表3。

表3 中国的地热电站  
Tab.3 Geothermal power stations in China

地点	名称	投产年份	地热温度/℃	装机容量/MW	发电技术	运行状态
广东省梅州市	丰顺地热电站	1970	92	0.086	单级闪蒸	停运
		1978		0.20	ORC	停运
		1984		0.30	单级闪蒸	运行
		2014		0.35	ORC	运行
江西省宜春市	温汤地热电站	1971	60~92	0.05	ORC	拆除
河北省张家口市	怀来地热电站	1971	79	0.20	ORC	拆除
山东省烟台市	招远地热电站	1973	84	0.20	单级闪蒸	拆除
湖南省长沙市	灰汤地热电站	1975	98	0.30	单级闪蒸	拆除
西藏自治区拉萨市	羊八井地热电站	1977	140~160	1.00	单级闪蒸	停运
		1981		3.00	双级闪蒸	运行
		1982		3.00	双级闪蒸	运行
		1985		3.00	双级闪蒸	运行
		1986		3.18	双级闪蒸	运行
		1988		3.00	双级闪蒸	运行
		1989		3.00	双级闪蒸	运行
		1990		3.00	双级闪蒸	运行
		1991		3.00	双级闪蒸	运行
		2008		1.00	全流	运行
2010	1.00	全流	运行			
辽宁省营口市	熊岳地热电站	1977	90	0.10	ORC	拆除
广西壮族自治区来宾市	象州地热电站	1979	73	0.20	单级闪蒸	拆除
台湾省台中市	清水地热电站	1981	79	3.00	单级闪蒸	停运
台湾省宜兰县	土场地热电站	1985	226	0.30	ORC	停运
西藏自治区阿里地区	朗久地热电站	1983—1985	103~105	1.00	单级闪蒸	间歇运行
西藏自治区那曲地区	那曲地热电站	1993	95~114	1.00	ORC	停运
河北省	华北油田地热电站	2011	85	0.40	ORC	停运
西藏自治区拉萨市	羊易地热电站	2011	134	0.40	全流	停运
		2012		0.50	全流	停运
		2016		2.00	全流	停运
		2018		16.00	ORC	运行
云南省瑞丽市	瑞丽地热电站	2017	130~150	1.20	全流	运行
河北省沧州市	献县地热电站	2018	95	0.28	ORC	运行
山西省大同市	山西高温地热示范电站	2021	173	0.58	ORC	运行

我国在上世纪就建设了广东丰顺、江西温汤、西藏羊八井等一批地热电站;但目前,除西藏羊八井地热电站的部分机组仍在运行外,其余地热电站

均已停运。21世纪初,我国又新建了西藏羊易、华北油田等地热电站,但装机容量普遍相对较小。虽然《地热能开发利用“十三五”规划》中提出了“到

2020 年新增地热发电装机容量 500 MW，累计达到 530 MW”的发展目标；但到 2019 年底，我国实际投产的地热发电装机容量只有 49 MW，与规划提出的发展目标存在巨大差距<sup>[7]</sup>。目前，全球地热发电的装机总量达 16.0 GW，中国所占的份额比例极小<sup>[11]</sup>。我国地热发电的发展明显落后于国外。

### 3 典型地热发电技术

典型的地热发电技术包括水蒸气朗肯循环、闪蒸循环、有机朗肯循环、卡林那循环和全流发电系统。其中，有机朗肯循环和卡林那循环并非直接利用地热流体进行发电，而是采用中间介质进行发电，又被称为双循环发电系统。

#### 3.1 水蒸气朗肯循环

水蒸气朗肯循环 (steam Rankine cycle) 也称干蒸气发电系统，其流程如图 1 所示。

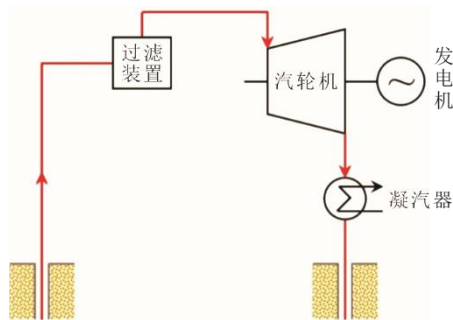


图 1 简单水蒸气朗肯循环示意

Fig.1 Schematic diagram of simple steam Rankine cycle

地热井中的高温蒸汽先经过滤装置祛除固体颗粒，再通入汽轮机进行膨胀，驱动发电机发电；膨胀后的乏汽一般先经凝汽器冷凝为液体，再注回地下，完成循环。水蒸气朗肯循环技术成熟、系统简单、投资成本低；但对地热田的要求高，仅适用于高干度的蒸汽型地热，不适合小容量场景，适用场景窄。

世界上第一座地热电站—意大利 Larderello 地热电站，采用的就是水蒸气朗肯循环技术，地热的蒸汽温度高达 140~220 °C。美国 Geysers 地热电站采用的也是水蒸气朗肯循环技术，该地热田的储层蒸汽温度超过 280 °C。中国的高温蒸汽型地热田极少，西藏羊八井—羊易盆地和云南腾冲具有高温蒸汽资源，但受制于地质环境，钻井难度大，成井率低，开发落后于国外。

#### 3.2 闪蒸循环

闪蒸循环 (flash cycle) 又称扩容式发电循环，

主要是采用闪蒸器或扩容器将两相地热流体的压力快速降低到其温度对应的饱和蒸气压以下，使其在极短时间内转化为蒸汽，此过程一般称为闪蒸过程或扩容过程；之后，再将蒸汽通入汽轮机进行膨胀，驱动发电机发电；膨胀后的乏汽和闪蒸器分离出来的液体经凝汽器和冷却器冷却后再重新注回地下。典型的单级闪蒸循环如图 2 所示。闪蒸循环的优点在于简单可靠、投资成本低、便于维护；缺点在于汽轮机尺寸大，易结垢、易腐蚀，闪蒸过程的能量损失多，循环的发电效率低，仅适用于蒸汽型地热和温度较高的干热岩型地热，对水热型地热并不适用。我国的第一座地热电站—广东丰顺地热电站和湖南灰汤、山东招远、西藏羊八井等地热电站以及新西兰 Wairakei 地热电站、美国 Hudson Ranch 地热电站均采用了闪蒸循环技术。为进一步提高闪蒸循环的发电效率，学者们还提出了双级闪蒸甚至是多级闪蒸循环，但多级闪蒸循环所需的地热温度更高<sup>[12-13]</sup>。

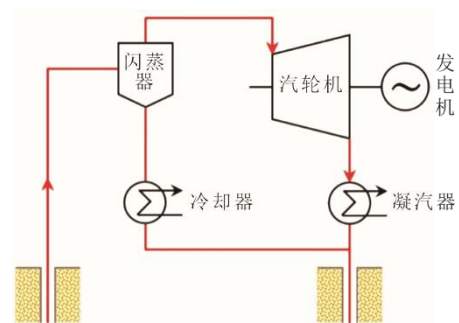


图 2 单级闪蒸循环示意

Fig.2 Schematic diagram of single-stage flash cycle

#### 3.3 有机朗肯循环

有机朗肯循环 (organic Rankine cycle, ORC) 是以低沸点有机流体为工质的地热发电技术，具有简单灵活、稳定可靠、运行寿命长、对热源温度要求低、适用装机容量范围宽 (1 kW~10 MW) 等优点，在地热能开发特别是中低温水热型地热能开发中具有非常好的应用前景。简单 ORC 系统如图 3 所示。地热流体通过蒸发器将热量传递给有机流体，然后回注到地下；有机流体吸收热量后转变为高压蒸汽，进入膨胀机膨胀，驱动发电机发电；膨胀后的乏汽进入冷凝器被冷却为液体，再经工质泵加压进入蒸发器继续吸热，完成循环。ORC 系统基于朗肯循环原理，利用有机流体沸点低的特点，在较低温度下产生较高的蒸气压力 (甚至超过临界压力)，推动膨胀机对外做功，实现中低温地热发电。

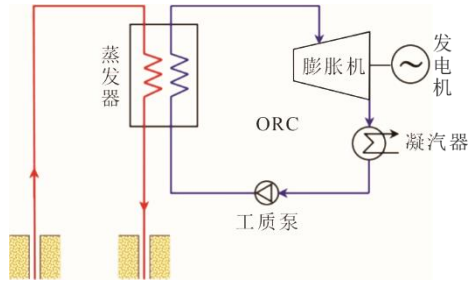


图3 简单 ORC 系统示意

Fig.3 Schematic diagram of simple ORC system

ORC 技术已在地热能开发中得到了广泛应用, 成功的应用案例包括国内的西藏那曲、江西温汤、华北油田、河北献县等地热电站, 以及美国 Amedee、Heber 地热电站、奥地利 Altheim 地热电站、日本 Otake 地热电站和德国 Neustadt-Glewe 热电联供电站。为提高 ORC 系统的发电效率, 可改进循环形式, 包括采用跨临界循环、双压蒸发循环、添加回热器、再热器、喷射器等<sup>[14-15]</sup>; 也可以优选工质或采用变温相变的非共沸混合物<sup>[16-17]</sup>。

### 3.4 卡林那循环

卡林那循环 (Kalina cycle) 是以氨水为工质的地热发电技术。典型卡林那循环示意如图 4 所示。

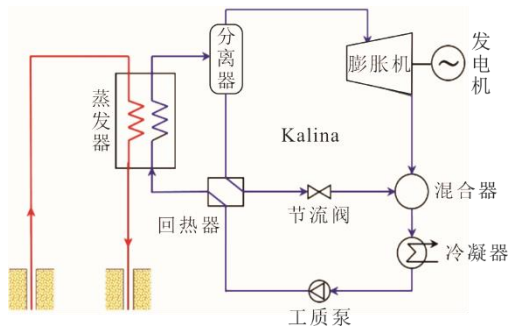


图4 典型卡林那循环示意

Fig.4 Schematic diagram of typical Kalina cycle

地热流体通过蒸发器将热量传递给氨水溶液, 高温溶液进入分离器分离为富氨蒸气和贫氨溶液, 富氨蒸气进入膨胀机膨胀, 驱动发电机发电, 而贫氨溶液预热工质泵出口的氨水溶液; 膨胀后的富氨蒸气与贫氨溶液先混合, 再依次通过冷凝器冷凝、工质泵加压, 完成循环。卡林那循环具有变温的吸热和放热过程, 可与冷热源流体实现较好的温度匹配效果, 理论发电效率较高; 但系统结构相对复杂, 调控难度大, 而且由于氨水溶液的特殊性, 对部件材料和系统的密封性有较高要求。与 ORC 技术类似, 卡林那循环也主要应用于中低温水热型的地热发电, 但商业化应用相对较少, 目前主要应用于冰岛 Husavik 地热电站、印度尼西亚 Wayang Windu 地

热电站和德国 Underhaching 地热电站。

### 3.5 全流发电系统

全流发电系统是一种直接将地热井中的全部流体 (蒸汽、水、不凝性气体等) 直接通入全流膨胀器进行膨胀的地热发电技术, 其流程与水蒸气朗肯循环相似, 但省去了过滤装置, 同时采用全流膨胀器代替了汽轮机。理论上, 全流发电系统可以将地热流体直接膨胀到废弃状态, 发电效率更高, 且系统简单; 但全流膨胀器需要选用耐腐蚀、耐磨蚀的材料, 且要具有可实现两相膨胀的能力, 加工设计难度大。全流发电系统主要适用于蒸汽型地热和温度较高的干热岩型地热, 对水热型地热并不适用。相对水蒸气朗肯循环, 全流发电系统可应用于干度更低的蒸汽型地热; 而相对闪蒸循环, 全流发电系统避免了闪蒸过程的能量损失。全流发电系统的概念提出相对较早, 但研究应用一直相对落后, 近些年才有实际应用的地热电站, 包括西藏羊八井、羊易地热电站和云南瑞丽地热电站。

此外, 不同的地热发电技术既可单独应用, 又可联合应用。例如, ORC 系统常与闪蒸循环联合使用, 闪蒸后的液相地热流体可作为 ORC 系统的热源流体, 从而获得更高的发电效率<sup>[18]</sup>。

## 4 关键影响因素

影响地热发电的关键因素包括地热的温度、流量、载体类型和水质条件, 以及当地的气候环境、地质条件和政策因素等。因素不同, 适用的地热发电技术以及地热电站的最佳设计、发电效率和经济收益等均会改变。

### 4.1 地热温度

地热温度越高, 越容易实现发电, 且单位流量地热流体的发电量更多, 发电效率更高, 发电收益也一般更好。以采用 R1234ze(E) 的简单 ORC 系统为例, 地热温度对系统净发电量和净发电效率的影响如图 5 所示。

分别以单位流量地热水的净发电量最多和系统净发电效率最高为优化目标, 对 ORC 系统的蒸发压力和透平入口温度进行优化。系统的计算模型、边界条件、优化参数的选取范围、优化方法和模型验证等可参考文献<sup>[19]</sup>。由图 5 可见: 地热水的温度由 80 °C 升高到 150 °C, 单位流量地热水的净发电量将由 5.2 kW 增加到 50.9 kW, 且增加量逐渐增大; 而系统的净发电效率也会由 7.8% 提高到 11.5%, 但增速放缓。采用不同的工质和循环形式, 单位流量地热水的

净发电量与系统净发电效率的定量数值会存在一定差别,但定性的增长趋势基本相同。

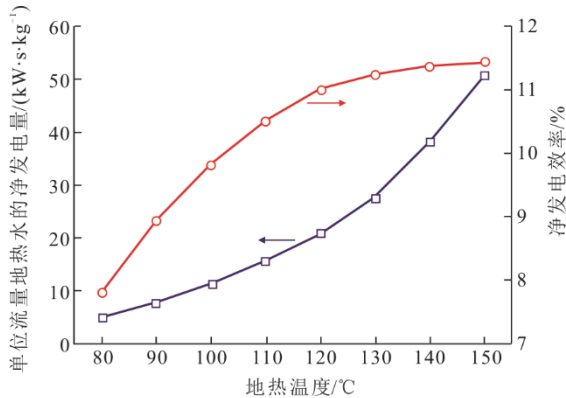


图5 地热温度对净发电量和净发电效率的影响

Fig.5 Influences of geothermal temperature on the net power and net generating efficiency

地热温度对 ORC 系统热经济性的影响如图 6 所示,其 ORC 系统与图 5 相同,但图 6 是以系统的动态投资回收期 (DPP) 最小为优化目标。ORC 系统采用逆流管壳式换热器、向心式透平和离心式工质泵作为核心部件,换热管的直径为 10/12 mm,材料是碳钢。换热器的布置方式、参数设置、流动换热模型及部件的购买成本模型可参考文献[20]。DPP 的定义式为:

$$DPP = -\frac{\ln(1 - i \cdot C_{sys} / F_{n0})}{\ln(1 + i)} \quad (10)$$

$$F_{n0} = (W_{el} \cdot \tau \cdot P_{el} - f_k \cdot C_{sys}) \cdot (1 - rate)$$

式中:  $i$  表示折现率, 5%;  $C_{sys}$  表示系统的总投资成本, 取为换热器、透平和工质泵总购买成本的 1.18 倍 (考虑了附属设备成本和施工安装成本);  $W_{el}$  表示净发电功率;  $\tau$  表示年运行时间, 8 000 h;  $P_{el}$  表示上网电价, 0.15 美元/kWh;  $f_k$  表示系统的运行维护成本系数, 1.5%;  $rate$  表示税率, 25%。

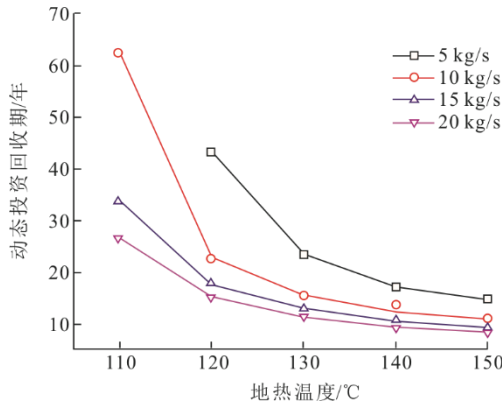


图6 地热温度和流量对 ORC 系统动态投资回收期 (DPP) 的影响

Fig.6 Influences of geothermal temperature and flow rate on the dynamic payback period (DPP) of ORC system

由图 6 可见, 随地热温度升高, ORC 系统的 DPP 将显著减小。对于流量为 10 kg/s 的地热水, 当地热温度由 110 °C 升高到 150 °C 时, ORC 系统的 DPP 由 62.3 年降低至 10.8 年; 而当热源温度低于 110 °C 时, ORC 系统的售电收入低于每年的运行维护成本, 项目将一直处于亏损状态, 不具有经济可行性。地热电站的运行寿命较长, 一般为 20~30 年, 若地热电站的 DPP 低于 20 年, 意味着具有较好的经济可行性和投资价值。

#### 4.2 地热流量

地热流体的流量越多, 地热电站的规模越大, 越有利于降低系统的单位投资成本, 提升经济收益。以图 6 为例, 随地热水的流量增多, ORC 系统的 DPP 将明显降低; 对于温度为 150 °C 的地热, 随地热水流量由 5 kg/s 增加到 20 kg/s, ORC 系统的 DPP 将由 14.6 年缩短到 8.2 年。系统热经济性能的大幅提升增大了地热发电的开发潜力。因此, 从发电利用角度, 流量大的地热资源具有更大的开发价值。

#### 4.3 载体类型

地热流体的载体类型即干蒸汽、汽液混合物和热水, 对发电技术选取有显著影响。干蒸汽和干度较高的汽液混合物可直接采用水蒸气朗肯循环进行发电, 干度较低的汽液混合物一般需要选取闪蒸循环或全流发电系统进行发电, 而当地热流体为热水时, 一般只能采用双循环发电系统。地热流体的载体类型不同, 其释热特性、换热性能和单位流量的发电量等均会因此迥异, 导致地热电站的最佳设计与热经济性能产生明显差别。另外, 当热源流体的温度、压力与质量流量相同时, 地热流体的干度越高, 则其携带的热量越多, 这是因为蒸汽冷凝会释放大量的热; 且高干度蒸汽可与更低成本的水蒸气朗肯循环或闪蒸循环联用, 有利于降低发电成本, 从而获得更好的经济收益。

#### 4.4 水质条件

地热流体一般富含硅酸盐钙、硫酸钙、碳酸钙和溶解氧等物质, 存在结垢和腐蚀的可能性<sup>[21]</sup>。若地热流体的矿化度较高, 某些固体物质超过其饱和度和时就会发生结垢, 导致换热器和汽轮机的性能急剧恶化, 甚至是威胁地热电站的安全运行。为避免结垢, 地热流体的回注温度一般要不低于 70 °C<sup>[22]</sup>, 这意味着单位流量地热水的发电量会显著减少, 发电效率降低而发电成本升高。刘强<sup>[22]</sup>的研究结果表明, 若地热水的最低回注温度由 70 °C 提高到

80 °C, ORC 系统的发电量将分别减少 10% 以上(入口温度 120 °C 情景)和 20% 以上(入口温度 100 °C 情景), 系统的热力性能严重恶化。Walraven<sup>[23]</sup>、Sun<sup>[24]</sup>等人指出地热水的最低回注温度不同, ORC 系统的最佳工质和最佳设计参数不同, 系统的最佳设计方案随之改变。

另一方面, 若  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_2$ 、溶解氧等物质浓度较高, 地热流体会加速腐蚀金属, 因此换热器、汽轮机、管道及阀门等设备需要选取不锈钢等抗腐蚀性较强的金属作为材料。但不锈钢等抗腐蚀性强的金属不仅成本高而且换热性能一般较差, 意味着部件成本会大幅增加, 从而影响地热发电的经济收益。Li 等人<sup>[20]</sup>的研究表明, 相对无腐蚀性的地热流体, 腐蚀性强的地热流体需要采用不锈钢作为 ORC 系统的蒸发器材料, 导致系统的单位投资成本(SIC)相对提高了 8.1%~11.7%, 经济性能明显恶化。因此, 对于矿化度较高或腐蚀性较强的地热流体, 地热发电的经济收益会变差, 开发价值减弱。

#### 4.5 气候环境

当地的气候环境包括环境气温、水资源丰沛程度等, 也是影响地热开发的重要因素。环境气温影响发电系统的冷源温度, 环境气温越低, 冷热源的温差越大, 发电效率会越高。水资源丰沛程度不仅直接决定了是否适合进行地热开采, 还决定了地热电站的冷却方式选取。水资源丰沛地区可选用水冷方式, 而水资源缺乏地区一般只能选用空冷方式。水冷方式可以实现更低的冷凝温度, 有利于增大发电效率和经济收益; 而空冷方式更加节水且适用于冬季极低气温的情景, 适用性强, 但其冷凝温度更高, 会降低发电效率和经济收益。Usman 等人<sup>[25]</sup>探究了环境气温与冷却方式对 ORC 系统热经济性能的影响, 对于采用 R245fa 的简单 ORC 系统: 当热源温度为 130 °C 时, 相对采用空冷方式, 采用水冷方式可使系统的年均发电量增加 19.2%, 平准化度电成本(LCOE)相对降低 12.1%; 而地理位置不同带来的环境气温差异会导致 ORC 系统的年均发电量相差 45.9%, 平准化度电成本相差 31.6%。

#### 4.6 地质条件

地质条件涵盖地热田的地形、地貌、埋藏深度、地质结构复杂程度、孔隙率和储水量等要素, 对地热井的勘测、施工、运行维护和地热水回注有显著影响。埋藏浅、水量大、地质稳定、成井率高、回注容易的地热田更受关注。我国的高温地热主要位

于西南等山脉地区, 开采难度大, 是我国地热发电开发的关键阻碍之一。我国的中低温地热主要位于沉积盆地和隆起山地(断裂带)。隆起山地的地热温度高但流量小, 开发难度大; 而盆地的地热资源埋藏较浅、储量大、分布广, 开发潜力一般更大<sup>[6]</sup>。

#### 4.7 政策因素

当地的政策因素包括地热发电的上网电价、投资补贴、政策支持等, 也会对地热发电的发展产生显著影响。地热发电稳定可靠, 有利于大规模并网和获得政策支持。提高地热发电的上网电价, 加大投资补贴力度, 是政府层面促进地热发电发展的重要手段。但目前国内在地热发电方面还主要处于政策层面的鼓励、支持, 缺少量化的上网电价标准和投资补贴标准, 未能给地热发电发展提供强有力支持。

## 5 结 论

中国的地热资源储量丰富、分布广泛, 地热发电稳定可靠、清洁低碳, 其大规模发展有利于促进碳中和目标的实现。本文总结了我国地热资源的特点和地热发电的相关政策及发展现状, 综述了 5 种典型的地热发电技术, 分析、归纳了影响地热发电发展的关键因素。

1) 从发电技术角度, 水蒸气朗肯循环、闪蒸循环和全流发电系统主要适用于温度较高的蒸汽型地热, 而有机朗肯循环和卡林那循环更适用于中低温水热型地热; 鉴于我国的地热资源是以中低温地热为主, 有机朗肯循环和卡林那循环在地热发电领域会有更大的发展空间。地热的温度越高、流量越大、干度越高、水质条件越好, 当地的环境气温越低、成井率越高, 地热发电的开发潜力越大; 丰沛的水资源及高的上网电价和投资补贴也有利于地热发电行业的发展壮大。

2) 地热发电的未来发展, 不仅需要在政策层面制定上网电价和投资补贴的量化支持标准, 还需要在技术层面探索适用更低地热温度且更加高效、低成本发电技术, 以助力中低温地热的大规模发电利用。此外, 厘清地热发电在未来能源体系中的定位, 优化设计地热驱动的冷热电多联供系统和地热、太阳能等多能源联合驱动的综合能源系统, 对于地热发电的未来发展也十分重要。

#### [参 考 文 献]

- [1] 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1210-1221.  
ZHOU Zongying, LIU Shiliang, LIU Jinxia. Study on the

- characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7): 1210-1221.
- [2] HOU J C, CAOM C, LIUP K. Development and utilization of geothermal energy in China: Current practices and future strategies[J]. *Renewable Energy*, 2018, 125: 401-412.
- [3] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 42-45.  
XU Tianfu, ZHANG Yanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock)[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 42-45.
- [4] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 312-321.  
LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312-321.
- [5] 王淑娟. 可再生能源及其利用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 1.  
WANG Shujuan. *Renewable energy sources and utilization technology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 1.
- [6] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 2017, 38(4): 449-450.  
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 449-450.
- [7] 罗佐县, 刘芮, 宫昊, 等. 中国地热产业发展空间分析[J]. *国际石油经济*, 2021, 29(4): 40-47.  
LUO Zuoxian, LIU Rui, GONG Hao, et al. The development space of geothermal industry in China[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(4): 40-47.
- [8] 陈宇, 刘亮德, 陈情来. 油区中低温地热发电技术经济分析[J]. *石油工程建设*, 2020, 46(4): 11-14.  
CHEN Yu, LIU Liangde, CHEN Qinglai. Technical economy analysis of power generation from mid-low temperature geothermal resources in oilfields[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2020, 46(4): 11-14.
- [9] 白雪峰, 房爱兵, 梁金国. 油区地热开发新工艺的研究[J]. *能源工程*, 2005(5): 26-31.  
BAI Xuefeng, FANG Aibing, LIANG Jinguo. Investigation on novel exploitation technology of oilfield geothermal resources[J]. *Energy Engineering*, 2005(5): 26-31.
- [10] 黄璜, 刘然, 李茜, 等. 地热能多级利用技术综述[J]. *热力发电*, 2021, 50(9): 1-10.  
HUANG Huang, LIU Ran, LI Qian, et al. Overview on multi-level utilization techniques of geothermal energy[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 1-10.
- [11] 黄嘉超, 李天舒, 谷雪曦. 国际地热利用发展形势对中国的启发[J]. *石化技术*, 2020, 27(9): 252-253.  
HUANG Jiachao, LI Tianshu, GU Xuexi. Inspiration of international geothermal utilization development situation to China[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(9): 252-253.
- [12] LEE I, TESTER J W, YOU F Q. Systems analysis, design, and optimization of geothermal energy systems for power production and polygeneration: State-of-the-art and future challenges[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2019, 109: 551-577.
- [13] ABDOLALIPOURADL M, MOHAMMADKHANIF, KHALILARYA S. A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: thermodynamic and exergoeconomic viewpoints[J]. *Energy*, 2020, 209: 118235.
- [14] LECOMPTE S, HUISSEUNE H, VAN DEN BROEK M, et al. Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 448-461.
- [15] LI J, GE Z, DUAN Y Y, et al. Design and performance analyses for a novel organic Rankine cycle with supercritical-subcritical heat absorption process coupling[J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 1400-1414.
- [16] 彭斌, 刘帅, 刘慧鑫, 等. 不同工质对有机朗肯循环低温余热发电系统性能的影响研究[J/OL]. *热力发电*: 1-7 (2021-08-02)[2022-12-13]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfd.202106119>.  
PENG Bin, LIU Shuai, LIU Huixin, et al. The influence of different working fluids on the performance of organic Rankine cycle low temperature waste heat power generation system[J/OL]. *Thermal Power Generation*: 1-7 (2021-08-02) [2022-12-13]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfd.202106119>.
- [17] 解志勇, 段远源, 葛众, 等. 烟气余热驱动复叠式非共沸工质有机朗肯循环系统热力学分析[J]. *可再生能源*, 2019, 37(5): 776-783.  
XIE Zhiyong, DUAN Yuanyuan, GE Zhong, et al. Thermodynamic analysis of cascade zeotropic working fluid organic Rankine cycle system driven by flue gas waste heat[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(5): 776-783.
- [18] ZHAO Y J, WANG J F. Exergoeconomic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power system[J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 159-170.
- [19] LI J, GE Z, DUAN Y Y, et al. Parametric optimization and thermodynamic performance comparison of single-pressure and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles[J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 409-421.
- [20] LI J, YANG Z, HU S Z, et al. Influences of fluid corrosivity and heat exchanger materials on design and thermo-economic performance of organic Rankine cycle systems[J]. *Energy*, 2021, 228: 120589.
- [21] 莫一波, 黄柳燕, 袁朝兴, 等. 地热能发电技术研究综述[J]. *东方电气评论*, 2019, 33(2): 76-80.  
MO Yibo, HUANG Liuyan, YUAN Chaoxing, et al. Reviews of geothermal power generation technologies[J]. *Dongfang Electric Review*, 2019, 33(2): 76-80.
- [22] 刘强. 地热有机朗肯循环性能优化及异丁烷的热力学性质研究[D]. 北京: 清华大学, 2013: 1.  
LIU Qiang. Performance optimization for geothermal ORC and thermodynamic property measurements for isobutane[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013: 1.
- [23] WALRAVEN D, LAENEN B, D'HAESELEER W. Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 66: 220-233.
- [24] SUN J, LIU Q, DUAN Y Y. Effects of reinjection temperature on thermodynamic performance of dual-pressure and single-pressure geothermal ORCs[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 6016-6023.
- [25] USMAN M, IMRAN M, YANG Y M, et al. Thermo-economic comparison of air-cooled and cooling tower based organic Rankine cycle (ORC) with R245fa and R1233zde as candidate working fluids for different geographical climate conditions[J]. *Energy*, 2017, 123: 353-366.

(责任编辑 杨嘉蕾)