

Design and Economic Analysis of Parabolic Trough Collector Power ORC System with Molten Salt Heat Storage

Qingpeng Meng^{1*}, Hang Guo^{1#}, Yuting Wu¹, Fang Ye¹, Chongfang Ma¹, Yongsheng Wang²

¹MOE Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Jizhong Energy Jingxing Mining Group Co. Ltd., Shijiazhuang Hebei
Email: [#]1412168823@qq.com

Received: Feb. 5th, 2019; accepted: Feb. 20th, 2019; published: Feb. 28th, 2019

Abstract

8.5 kW parabolic trough collector power organic Rankine cycle (ORC) system is established with molten salt heat storage system to introduce the principle, design independent solar power system and analysis economics of the power generation system in the typical cities of the seven regions and Lhasa area. The results show that Lhasa is the least expensive electric field investment in typical cities in Southwest China. The single parabolic trough collector power ORC system is not feasible, and the cogeneration system can not only meet the scheme but also reduce CO₂ by 283.9 t/a, the average energy cost is only 0.45 RMB kW⁻¹·h⁻¹.

Keywords

Heat Storage, Molten Salt, Parabolic Trough Collector, Organic Rankine Cycle, Economic Analysis

熔盐蓄热槽式太阳能有机朗肯循环发电系统设计及经济性评价

孟庆鹏^{1*}, 郭航^{1#}, 吴玉庭¹, 叶芳¹, 马重芳¹, 王永生²

¹北京工业大学环境与能源工程学院, 传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室, 北京

²冀中能源井陉矿业集团有限公司, 河北 石家庄
Email: [#]1412168823@qq.com

*第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 孟庆鹏, 郭航, 吴玉庭, 叶芳, 马重芳, 王永生. 熔盐蓄热槽式太阳能有机朗肯循环发电系统设计及经济性评价[J]. 可持续能源, 2019, 9(1): 14-25. DOI: 10.12677/se.2019.91003

收稿日期：2019年2月5日；录用日期：2019年2月20日；发布日期：2019年2月28日

摘要

建立8.5 kW熔盐蓄热太阳能驱动有机朗肯循环发电系统，对独立的太阳能蓄热发电系统进行了原理介绍、初步设计、七大地地区典型城市及拉萨地区发电系统经济性分析。结果表明：拉萨作为西南地区典型城市电场投资最少，单一发电方案不可行，而通过热电联供系统不仅能够满足方案且年减排CO₂ 283.9 t，平均能源成本仅为0.405元kW⁻¹·h⁻¹。

关键词

蓄热，熔融盐，槽式太阳能，有机朗肯循环，经济分析

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

我国太阳能资源较丰富，适宜开展太阳能利用技术，而其中太阳能发电技术在近几十年已成为研究热点。太阳能发电主要有光直接转化成电的光伏发电与光转化成热再转化成电的光热发电两种，光伏技术已经达到了商业要求级别，发电过程简单，没有机械转动部件，不排放包括温室气体在内的任何物质，虽然可以通过蓄电池进行储存，但是晶体硅电池制造过程高污染、高耗能；而太阳能热发电采用稳定的蓄热技术不但可以匹配太阳能资源与需求、绿色环保制造简单，更实现了分布式能源的目标[1]。

太阳能热发电主要发电形式是太阳聚光热发电(Concentrated Solar Power, CSP) [2]，根据聚焦方式，可分为点聚焦和线聚焦系统。目前常见聚光太阳能热发电方式有槽式、塔式、碟式和线性菲涅尔式四类。槽式太阳能热发电属于线聚焦系统，是最早实现商业化的太阳能热发电方式，也是目前全球商业化运行电站中占比最多的技术。槽式太阳能热发电系统采用向一个方向弯曲的抛物线型槽式发射镜将太阳光聚集到位于焦线的吸热管上[3]，使管内的传热工质(油、水或熔盐)加热至一定温度，然后直接或间接经热交换器产生蒸汽驱动汽轮发电机组发电[4]。除根据不同集热器类型对太阳能热发电分类，也可通过集热温度分为高温集热系统和中低温集热系统。其中集热温度高于 400℃，属于高温发电，而当热源温度低于 300℃时属于中低温发电系统。由于太阳能波动性强，能流密度进入大气层后变低，所以更适合作为中低温热源，集热温度降低，设备要求低使得中低温发电系统的发电成本变少。目前槽式热发电系统因结构简单，集热器、跟踪系统等设备安装高度低、维修方便、聚光器与集热器可同步跟踪等优点[5]，其作为中低温热发电系统，已经进入了商业化初步应用阶段，并在不断地推广。

随着可再生能源电、热产量的提高，储存能量的方法和技术变得尤为重要。原则上，可再生能源可以转变成其他形式的能储存起来，当需要的时候再转换回来。目前主要储能分类：1) 电磁系统：超导磁蓄能；2) 电化学系统：电池，燃料电池，超级电容器；3) 水电系统：抽水储能；4) 气动系统：压缩空气储能；5) 机械系统：飞轮储能；6) 热系统：熔融盐，水[6]。其中熔融盐由于具有热容量大、粘度低、蒸汽压低、使用温度范围广等优势，成为了一种公认的中高温传热蓄热介质[7]。

熔融盐作为传热蓄热介质已经在一部分太阳能热发电站中得到了成功的应用。如1981年5月开始投入运行的意大利Eurelios塔式电站[8]和1983年6月开始运行的西班牙的CESA-1塔式电站[9]均采用Hitec盐作为蓄热介质、采用蒸汽作为传热介质,并成功运行。也为熔融盐蓄热提供了大量的宝贵材料,而法国的THEMIS电站和美国的MSEE/CatB实验装置是第一个直接用来加热熔融盐的塔式电站系统。1984年,美国新墨西哥州,Albuquerque建立一个750 kW的熔盐发电实验装置(MESS),采用硝酸盐作为传热和蓄热介质的双罐式蓄热系统,通过该电站的正常运行,验证了单工质熔盐蓄热系统技术的可行性和灵活性[10]。在以往熔盐实验的基础上,Solar Two太阳能实验电站在美国加利福尼亚建成[11] [12],该电站采用的是Solar Salt (60% NaNO_3 + 40% KNO_3)作为传热蓄热工质,蓄热能力为105 MWh,可供汽轮机满负荷运行3 h。电站从1996年一直运行到1999年结束,一直没有重大问题,也为熔盐这一新的传热蓄热介质在太阳能发电领域的广泛使用奠定了基础。

由于熔融盐在传热蓄热性能发面的优势,在光热发电系统中,为了解决系统中传热蓄热介质大量使用导致高投资成本的问题,采用熔融盐这种低成本的介质具有实际工程应用价值。单一组分熔盐熔点太高,无法满足传热工质对熔点的需要。相比单一组分盐,共晶混合熔盐的熔点显著降低,使其能够在较宽的运行温度范围内确保相和组分稳定及均匀的热物性[13]。目前国外已经建成运行和正在建设中带有蓄热的光热发电站,如西班牙Andasol系列电站和Gemasolar电站、美国的Ivanpah和意大利的Archimede电站等几乎全部用的熔盐蓄热。2008年,首座商业化熔融盐蓄热槽式热电站50 MW Andasol-1 [14]投入运行,此电站采用Solar Salt进行7.5 h蓄热;2011年,17 MW的塔式太阳能热电站Gemasolar [15]利用熔融盐作为传热蓄热工质开始并网发电,利用15 h蓄热系统首次实现了24 h连续发电;美国的110 MW Ivanpah [16]电站于2014年竣工,10 h储热系统,并在2016年投入运行,它也是目前沙漠中世界规模最大的太阳能发电场。我国虽然太阳能热发电技术研究起步较晚,但近几年也得到了蓬勃发展。2016年9月14日国家能源局正式发布了《国家能源局关于建设太阳能热发电示范项目的通知》,中国首批光热发电示范项目出炉,总装机约为1.35 GW,共20个项目。20个发电示范项目中,7个槽式电站17个采用了熔融盐蓄热,也充分证明了熔融盐在应用方面的可靠性。

有机朗肯循环是一种已经被证实的可以利用低沸点的有机工质来代替水,从而能够回收由太阳能、地热、生物质能等产生的中低温热能来发电的新技术。由于它较高的热效率以及环境友好等优势,是一种公认的具有重大应用潜力的节能新技术。ORC系统能够捕捉低温到中温范围($60^\circ\text{C}\sim 350^\circ\text{C}$)的热源来发电。目前研究领域中有许多种热力循环,如有机朗肯循环、超临界朗肯循环、卡琳娜循环以及三角形闪蒸循环[17],这些循环都可以作为低品位热能到电力的转换。与卡琳娜循环结构复杂、三角形闪蒸循环两相蒸发困难性以及超临界朗肯循环运行压力高相比,ORC有其独特的优点,如尺寸小、成本低、维护费用低、简易、可靠性高,当与可再生能源连接时环境污染小。

从2000年至今,对中低温热回收的日趋关注,ORC的研究活动持续增长。各种热源、低复杂性的自动化控制、分布式能源的应用,使得ORC技术成为了从低温热源废热中获取热量产电的理想选择[18]。ORC的潜在应用包括生物质能、太阳能、地热能、海洋热能以及废热回收。目前来看未来人们会更加关注 CO_2 的排放,能源效率等问题,因此也为ORC领域未来发展和研究提供了充分的机会。通过文献统计学的方法[19]发现从2000年至2016年在ORC领域中全世界研究人员对ORC研究所做的贡献,在71个国家中有997个研究机构的3443名作者发表了2120篇文章,充分说明了研究人员认为ORC在现实生活中的应用的重要性。

综上所述,将太阳能、熔盐蓄热、有机朗肯循环有机结合对于太阳能利用技术的不断改善、解决能源问题、探索未来能源结构具有重大意义。而目前对于联合太阳能、熔盐蓄热、有机朗肯循环的研究未

见公开文献报道, 本文目的是介绍太阳能有机朗肯循环发电技术原理及优势, 并提出8.5 kW熔盐蓄热太阳能ORC发电系统设计方案并对其进行技术经济评价。

2. 技术原理及优势

2.1. 基本原理

图1为太阳能驱动ORC发电流程图。该系统包括太阳能聚光系统、储能系统、ORC末端发电系统。在晴朗无云天气下集热器通过吸收太阳辐射加热集热器内传热流体, 吸热后的流体通过蒸发器把热量传给有机工质。在蓄热的模式下, 集热器内传热流体作为蓄热介质把热量储存在蓄热系统, 当需要发电时蓄热系统再将热量通过蒸发器传给有机工质。由工质泵加压后的有机工质进入蒸发器内, 经等压吸热后, 高压高温气态有机工质推动膨胀机做功, 通过与发电机连接进行发电; 膨胀机排出的有机工质进入冷凝器定压冷凝, 并由工质泵再次泵送进蒸发器内完成一次发电循环。

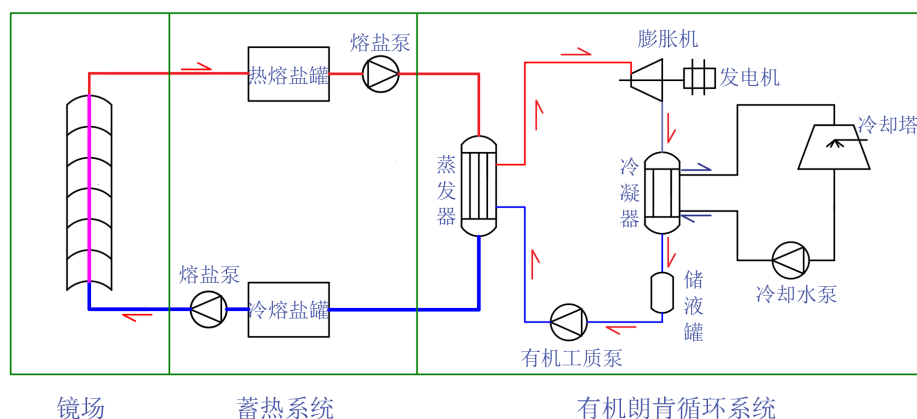


Figure 1. Schematic diagram of organic Rankine cycle for solar thermal power generation
图1. 太阳能有机朗肯循环发电系统流程图

2.2. 优势及应用范围

与光伏和风力发电相比采用蓄热技术的太阳能发电系统可以降低发电成本, 提升发电的可靠性, 电力输出更平稳, 并具有环境友好性。作为分布式能源, 可实现孤岛运行。相比于太阳能朗肯循环, 在装机量小于10 MW的系统中, 采用有机朗肯循环发电系统可降低初投资, 并且运行温度低, 安全系数高。由于有机朗肯循环工质沸点低可采用较低聚光比的太阳集热器, 且工质压力低对设备要求不高, 维护简单造价低廉。通过采用低熔点熔盐, 保温要求低, 电站的寄生耗电低。所以将低熔点熔盐、太阳能、有机朗肯循环相结合使系统运行更加安全可靠。

3. 8.5 kW 熔盐蓄热太阳能 ORC 发电系统设计

3.1. 系统流程

本文设计的熔盐蓄热槽式太阳能驱动有机朗肯循环发电系统装机量为8.5 kW, 每天发电9 h, 集热发电4 h, 蓄热发电5 h。采用北京天瑞星集热管, 成都禅德太阳能电力有限公司反光镜, 镜场支架委托北京建筑工程大学进行设计并由冀中能源井矿集团新能源事业部制造, 跟踪系统委托井矿集团大有机电公司进行设计加工, 采用北京工业大学研发的低熔点四元盐作为传热蓄热工质, 利用显热蓄热方式。采用北京工业大学自主研发的117型单螺杆膨胀机作为有机朗肯循环热工转换核心部件。

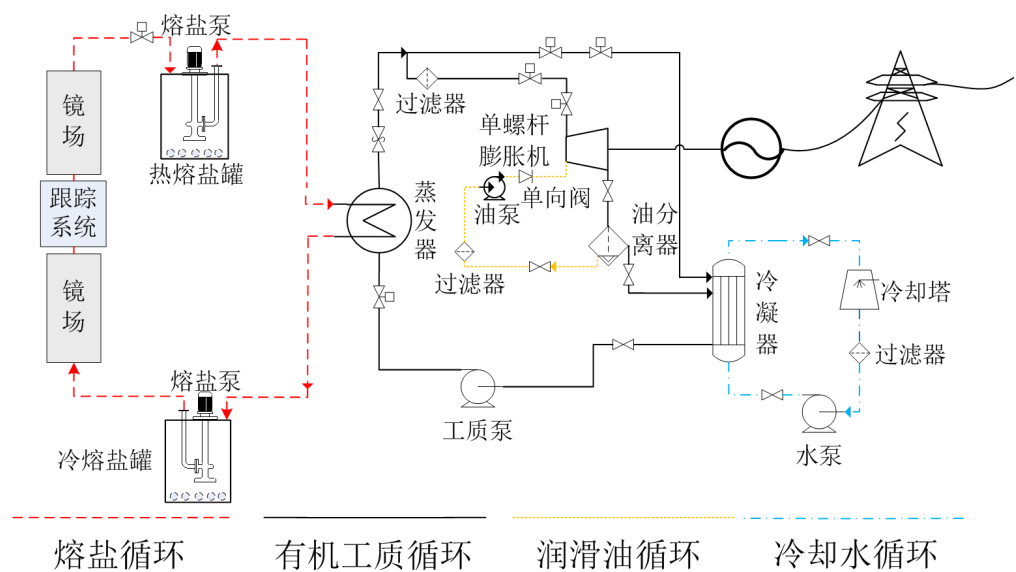


Figure 2. Schematic diagram of 8.5 kW ORC for solar thermal power generation
图 2. 8.5 kW 太阳能有机朗肯循环热发电基本原理图

图 2 给出了 8.5 kW 太阳能有机朗肯循环发电实验系统示意图。其中集热蓄热系统以红色线表示,ORC 循环系统由黑色线表示。该系统以太阳能集热系统加热熔融盐作为驱动热源,热能以熔融盐显热蓄热方式储存在熔盐罐内,以冷却水作为冷源,通过将热源传递给 ORC 进行发电。其中熔融盐作为传热蓄热介质,保证系统在太阳能非稳定工况及夜间稳定运行。

3.2. 槽式太阳能集热系统

本系统基于中国七大地区典型城市,并由 Solargis 太阳能资源评估工具提供各城市直射辐照度,对集热系统进行设计计算,假设光热转换效率 70%,热工转换效率 10%,并根据表 1 集热管与反光镜参数,设计计算结果如表 2。

Table 1. The basic parameters of the receiver and reflector
表 1. 集热管和反光镜的基本参数

集热管相关参数	数值	反光镜相关参数	数值
金属吸热管长度	4060 mm	内片尺寸	1700 × 1641 (mm)
金属吸热管外径	70 mm	外片尺寸	1700 × 1501 (mm)
金属吸热管壁厚	3 mm	玻璃厚度	4 mm
玻璃罩外径	125 mm	反射率	≥93%
金属吸热管材质	TP321	拦截率	≥99.99%
吸热管吸收率	≥95%	焦点偏差(Fdx)	≤8 mm
吸热管发射率	≤9.7%	斜率偏差(Sdx)	≤3 mrad
太阳光透射率	≥95%	焦距	1.71
绝对压力	≤0.1 Pa	聚光比	82:1
辐射投射比率	≥95%	材质	镀银低铁浮法玻璃

Table 2. Parameters of concentrated solar collector system in various regions
表 2. 各地区聚光系统参数

地理位置	城市	直射辐照度 /kWh/m ²	工作时长 /h	镜场进出口温度 /°C	发电功率 /kWe	镜场面积 /m ²	集热管 /根
华南	广州	744	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	528	23
华中	郑州	804	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	489	21
华东	上海	810	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	485	21
华北	北京	1143	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	344	15
东北	沈阳	1334	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	294	13
西北	德令哈	1930	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	203	9
西南	拉萨	2543	9 h (5 h 蓄热)	300/200	8.5	154	7

3.3. 熔盐蓄热系统

1) 熔盐蓄热系统主要组成：1 个热盐罐、1 个冷盐罐、1 个热盐泵、1 个冷盐泵。系统包括 8 个电加热器(每个盐罐各 4 个)。

2) 熔融盐 本系统采用北京工业大学研发的低熔点四元盐作为传热蓄热工质，其熔点为 84℃，初晶点为 163℃，潜热约为 71.75 J/g，分解温度为 628℃，利用显热蓄热。熔盐蓄热系统详细设计参数见表 3。

Table 3. Parameters of molten salt heat storage tank
表 3. 熔盐蓄热罐性能参数

熔盐蓄热罐性能	性能参数	熔盐蓄热罐性能	性能参数
蓄热容量/kWh	450	冷罐加热功率/kW	20
熔盐质量/t	12	冷罐加热功率/kW	20
热罐熔盐温度/°C	300	热罐材质	316L
冷罐熔盐温度/°C	200	冷罐材质	Q345R
热罐温度范围/°C	200~350	冷、热罐封头形式	椭圆形
热罐温度范围/°C	300~450	蓄热罐平均热效率/%	96

熔盐罐顶部和底部均采用封头设计，底部采用平底封头，顶部采用椭圆封头，有助于焊接及整体受力。在整个系统中包括集热管至熔盐罐的管道、阀门、换热器都需要伴热带进行加热保温防止熔盐凝固。在罐底部、罐顶、罐壁均设置保温层，罐底部保温考虑熔盐罐及罐内熔盐的重量，采用耐火砖与泡沫玻璃层结合的方式进行保温，耐火砖起到承重及保温的作用。

3) 熔盐泵 熔盐泵采用立式高温液下泵，主要由泵体、泵盖、叶轮、接管、出液管、轴承支架、电机支架、支架、安装地板、联轴器、冷却水管、立式电机等组成。两台熔盐泵均设置变频装置。

4) 熔盐换热系统 熔盐/有机工质换热器(蒸发器)用于将熔盐的热量传递给有机工质以驱动单螺杆膨胀机发电机组发电。蒸发器采用管壳式，其中换热器壳侧为熔融盐，换热器管侧为有机工质。

3.4. 有机朗肯循环发电系统

3.4.1. 基本组成

系统循环过程如图 3 所示，主要包含绝热膨胀过程(1'-2s)、定压冷却过程(2s-3')、绝热加压(3'-4s)以

及定压加热过程(5-1'),其中 1'为过热点, 2s 为等熵点, 3'为过冷点。本系统考虑膨胀机进口为过热蒸汽, 冷凝器出口为过冷液态, 且膨胀过程及加压过程均为非等熵过程(1'-2), 使得整个有机朗肯循环更加接近实际循环。在每个过程发生于四个主要设备: 蒸发器、膨胀机、冷凝器、工质泵。

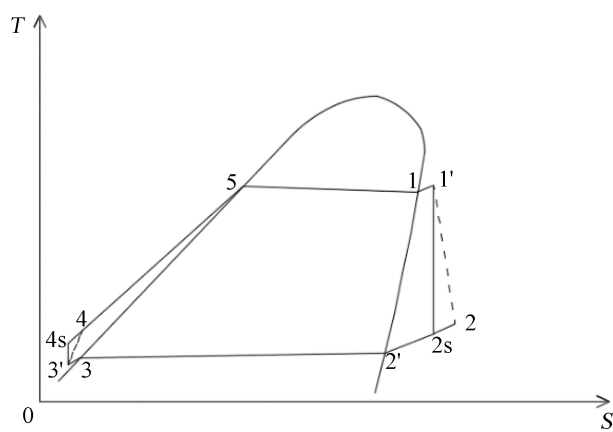


Figure 3. T-s diagram of ORC
图 3. 有机朗肯循环系统 T-s 图

3.4.2. ORC 主要设计参数

- 1) 工质的选择。采用工质 R123。
- 2) 膨胀机。采用北京工业大学自主研发的大膨胀比单螺杆膨胀机[7], 其详细参数如表 4。

Table 4. Parameters of single screw expander
表 4. 单螺杆膨胀机参数

螺杆直径 /mm	螺槽数	星轮直径 /mm	星轮齿数	啮合中心距 /mm	内容积比	最大基元容积 /mL	输出功率 /kW
117	6	117	11	93.6	4.86	478	8.5

- 3) 系统参数。根据单螺杆膨胀机参数, 该膨胀机转速为 3000 r/min 时, 理论进气体积流量为 17.7 m³h⁻¹, 最高蒸发压力在 1.2 MPa 左右, R123 质量流量在 1500 kg/h 左右。膨胀机进口设计温度 125℃, 冷凝温度 43℃, 对 ORC 系统进行工况点设计(如表 5)。
- 4) 工质泵。在 1500 kg/h 左右采用多级离心泵, 相对于其他类型泵效率较高, 且多级离心泵的耗功率较其他类型泵较低。工质泵参数如表 6。
- 5) 冷凝器。考虑到水冷效果优于风冷且不存在缺水情况, 在本实验系统中选用水冷, 根据表 5 所示, 系统放热功率理论值 80 kW 左右, 考虑极端情况, 本系统采用的冷凝器换热量为 100 kW, 换热器形式为管壳式, 冷源走管程, 工质走壳程。
- 6) 冷却系统。冷却系统为开式系统, 主要有冷凝器、冷却水泵、冷却塔等组成。作为冷却系统驱动力, 采用有格兰富生产的多级离心泵作为冷却水泵, 型号为 TP50-190/2, 冷却水泵的相关参数见表 7。冷却塔应匹配冷却水泵, 选用 20 m³·h⁻¹ 冷却塔。
- 7) 润滑油系统。为确保单螺杆膨胀机工作可靠, 利用润滑油系统对膨胀机进行润滑。润滑油系统主要包括油气分离器、润滑油泵和过滤器等。其中油气分离器根据膨胀机排气量进行选择, 由大连联合制冷公司定做, 型号为 LYF2-60-BJ, 容积为 60 L, 储油量为 27 L, 内设加热棒, 油温感应器, 液位控制器

等。润滑油泵采用齿轮泵，为润滑油进入膨胀机提供动力，型号为 CB-B2.5，功率 0.75 kW。润滑油泵和油分之间安装过滤器，防止杂质进入润滑油泵和单螺杆膨胀机内。

Table 5. Parameters of ORC
表 5. 有机朗肯循环的主要参数

工况点	温度 /℃	压力 /MPa	密度 /kg/m ³	焓 /kJ/kg	熵 /kJ(kg·K) ⁻¹
1	120.00	1.20000	73.23	449.600	1.6938
1'	125.00	1.20000	71.38	454.290	1.7055
2'	43.00	0.16957	10.52	407.240	1.6657
2s	60.57	0.16957	9.84	420.160	1.7055
2	67.23	0.16957	9.62	425.119	1.7202
3	43.00	0.16957	1417.20	243.560	1.1477
3'	40.00	0.16957	1425.20	240.440	1.1378
4	41.45	1.20000	1424.90	242.240	1.1412
4s	40.40	1.20000	1427.20	241.160	1.1378
5	120.00	1.20000	1175.00	328.970	1.3868
工质吸热量(kW)			92.50		
工质放热量(kW)			80.56		

Table 6. Parameters of the organic working fluid pump
表 6. 多级离心泵结构参数

型号	转速 r/min	流量 m ³ h ⁻¹	级数	扬程 m	配套功率 kW
CRN 3-27	2899	3	27	131	2.2

Table 7. Parameters of the cooling water pump
表 7. 冷却水泵泵参数

型号	转速 /r·min ⁻¹	流量 /m ³ h ⁻¹	级数	扬程 /m	配套功率 /kW
TP50-190/2	2870	22.2	2	15.5	1.5

8) 发电机。单螺杆膨胀机与发电机进行直连，选用同步发电机进行并网连接。主要参数包括额定功率 10 kW，功率因素 0.5，额定频率 50 Hz，额定转速 3000 r/min。

4. 系统经济性分析

4.1. 经济性评价指标

经济评价指标有很多，从不同角度分析系统经济性，主要有净现值、动态投资回收期、静态投资回收期、总投资收益率、内部收益率等[8]。

1) 净现值。指在项目计算期内，未来资金流入现值与未来资金流出现值的差额，按行业基准折现率来计算各年净资金流量现值的代数和

$$C_{NPV} = \sum_{t=0}^n (C_{CI} - C_{CO})_t (1+i_c)^{-t} \quad (1)$$

式中： C_{NPV} 为净现值； C_{CI} 为现金流入； C_{CO} 为现金流出； $(C_{CI} - C_{CO})_t$ 第 t 年的现金流量； n 为项目计算期； i_c 为基准折现率。 $C_{NPV} > 0$ ，方案可行，即项目实施后，不仅可以实现预期的收益率，还可以获得更好的收益； $C_{NPV} = 0$ ，方案可考虑接受，即项目实施后的投资收益率正好达到预期水平； $C_{NPV} < 0$ ，方案不可行，即未能达到预期的收益率水平。

2) 内部收益率。内部收益率即资金投入现值总额与资金产出现值总额相等、净现值等于零时的折现率。

$$\sum_{t=0}^n (C_{CI} - C_{CO})_t (1+i_{IRR})^{-t} = 0 \quad (2)$$

式中： i_{IRR} 为内部收益率。 $i_{IRR} > i_c$ ， $C_{NPV} > 0$ ，方案可行； $i_{IRR} = i_c$ ， $C_{NPV} = 0$ ，方案可行； $i_{IRR} < i_c$ ， $C_{NPV} < 0$ ，方案不可行。

3) 动态投资回收期。指在给定货币时间价值条件下，投资项目净现金流量的现值与原始投资现值相抵消所需的时间，即：动态投资回收期是指项目从投资开始到累计折现现金流量等于 0 时所需要的时间。

$$C_{NPV} = \sum_{t=0}^{P_t} (C_{CI} - C_{CO})_t (1+i_c)^{-t} = 0 \quad (3)$$

式中： $P_t \leq P_c$ ， $C_{NPV} \geq 0$ ，方案可行，即能在要求时间内收回投资； $P_t > P_c$ ， $C_{NPV} < 0$ ，方案不可行，应当舍弃。

4) 能源平均成本。能源平均成本是对一个电站的各项成本和装置效率之间进行综合考虑的指标，也是在国际经常用来比较可再生能源发电技术经济性的公式。

$$C_{LEC} = \frac{aC + C_{om} + C_f - C_c}{E} \quad (4)$$

$$a = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

式中： C 为总初投资； a 为年系数； C_{om} 为运行维护成本； C_f 为燃料成本； C_c 为二氧化碳减排受益； E 为年发电量； i 为利率； n 为系统寿命。

4.2.8.5 kW 熔盐蓄热太阳能 ORC 发电系统经济性分析

4.2.1. 电站设计

以 8.5 kW 槽式太阳能有机朗肯循环发电站为基础，分析比较中国七大地地区应用此发电站的经济性，并且比较 8.5 kW 槽式太阳能有机朗肯循环发电站与 8.5 kW 槽式太阳能有机朗肯循环热电联供系统。表 8 列出了两个电站的主要设计参数。

4.2.2. 电站系统经济分析

太阳能有机朗肯循环电站主要包括集热系统、蓄热系统、换热系统和发电系统。通过第三节提供的所有设备进行确定各项成本，除镜场部分，其他基础投资假设相同。若把冷凝器换位板式换热器进行小区供热，成本应高于上节所述系统，并添加至供热系统费用及其他费用，详细见表 9，并根据不同地区集热系统投资见图 4。

Table 8. Main parameters of power generation station
表 8. 发电站的主要设计参数

电站类型	ORC 发电	ORC 发电 + 供热
输出功率/kW	8.5	89
蓄热量/kW·h	450	450
ORC 功率	8.5	8.5
熔盐蓄热单元年均效率	99%	99%
ORC 发电机组平均效率	10%	10%

Table 9. Investment condition of two types of power generation station
表 9. 两个电站基础投资情况

项目	ORC 发电	ORC 发电 + 供热
熔盐蓄热换热系统成本费用/万	26	26
工程设计及建设成本费用/万	21	21
有机朗肯循环成本费用/万	24	24
其他费用/万	20	30
供热系统费用/万	0	10
年运行维护成本费用/万	1	2

从表 9 和图 4 可以看出：整个系统投资中，太阳能集热场的成本占比大，根据所列七个城市投资成本，西北、西南地区因其富饶的太阳能资源使得镜场面积小投资成本低。对拉萨地区的太阳能热电联供系统进行经济性分析，由于系统不用任何燃料，即太阳能 ORC 发电系统年减排 CO₂ 为 27.12 t，按照传统 CO₂ 减排成本 80 元/t，则年净增收益为 2169.5 元，而热电联供太阳能 ORC 发电系统年减排 CO₂ 为 283.9 t，年净增收益为 2.27 万元。假设基准折现率为 10%，系统寿命为 20a，利率为 6%，年运行小时数为 3200 h，电价按照 0.8 元/kWh 计算，热价按照 0.4 元/kWh 计算，根据式(1)~(4)得出各经济性指标见表 10。

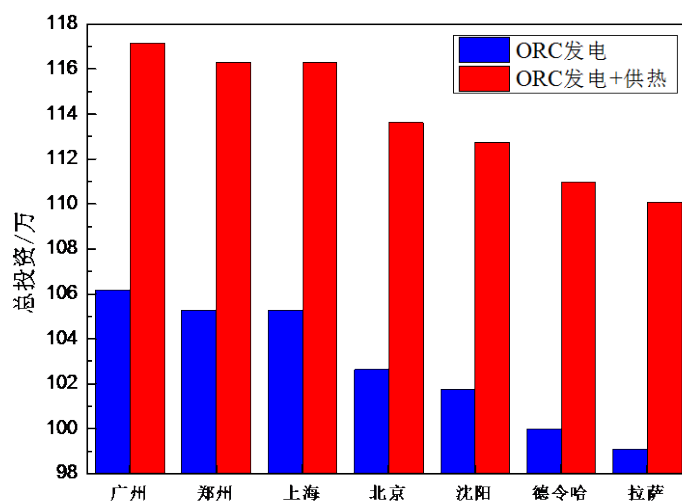


Figure 4. The total investment condition of two types of power generation station in various regions

图 4. 各地区太阳能 ORC 发电和太阳能 ORC 发电及供热总投资

太阳能驱动有机朗肯循环发电站 $C_{NPV} < 0$ ，即单一的太阳能电站不可行，需要依赖国家的政策补贴运行；热电联供太阳能有机朗肯循环发电站 $C_{NPV} = 7.9$ 万元， $i_{IRR} = 10.52\%$ ，高于 i_c ， $P_i = 18$ a， $C_{LEC} = 0.405$ 元·kW⁻¹·h⁻¹，远低于单纯太阳能发电成本。

Table 10. Calculation of economic index
表 10. 经济性指标计算

项目	ORC 发电	ORC 发电 + 供热
C_{NPV} /万元	<0	>0
$i_{IRR}/\%$	—	11.34%
P_i/a	—	17
$C_{LEC}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	4.56	0.405

由上可知：对比七大城市发电系统投资情况，拉萨分别在单纯太阳能电站及太阳能热电联供系统处于最低投资。熔盐蓄热槽式太阳能驱动有机朗肯循环热电联供系统是分布式能源可行方案，减排 CO₂ 为 283.9 t，内部收益率高于折现率，并且平均能源成本较低。开发利用太阳能有机朗肯循环热电联供系统对减少化石燃料消耗、降低排放和降低能源成本具有重大意义。

5. 结语

采用熔盐蓄热槽式太阳能驱动有机朗肯循环发电系统，提高了太阳能发电稳定性，降低了蒸发温度，提高了安全性。比较七大城市，拉萨作为西南地区典型城市，其电场投资最低。并以拉萨地区为例，通过熔盐蓄热槽式太阳能有机朗肯循环热电联供系统与单纯发电系统相比较，发现：热电联供系统节约燃料，减排 CO₂ 283.9 t，能源平均成本 0.405 元·kW⁻¹·h⁻¹，经济性比单纯发电系统具有明显优势。带有熔盐蓄热的中低温太阳能热发电系统是一项有发展前景的技术，但由于太阳能孤网系统尚未成熟需其他发电形式进行辅助，并且利用槽式太阳能进行集热温度相对于有机朗肯循环温度较高，能源成本较其他形式能源仍然很高，对系统耗电设备需进一步优化节能。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFE0124900)。

参考文献

[1] 顾煜炯, 耿直, 张晨, 等. 聚光太阳能热发电系统关键技术研究综述[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 6-13.

[2] Jebasingh, V.K. and Herbert, G.M.J. (2016) A Review of Solar Parabolic Trough Collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, 1085-1091. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.043>

[3] 陈静, 刘建忠, 沈望俊, 等. 太阳能热发电系统的研究现状综述[J]. 热力发电, 2012, 41(4): 17-22.

[4] 李四海, 张红, 战栋栋, 等. 槽式太阳能直接产生蒸汽热发电系统火用分析[J]. 热力发电, 2008, 37(11): 39-43.

[5] Zou, B., Yang, H., Yao, Y., et al. (2017) A Detailed Study on the Effects of Sunshape and Incident Angle on the Optical Performance of Parabolic Trough Solar Collectors. *Applied Thermal Engineering*, **126**, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.149>

[6] Olabi, A.G. (2017) Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energy*, **136**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.054>

[7] 雷标. 有机朗肯循环和单螺杆膨胀机性能提升的理论与试验研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2016.

[8] Gretz, J. (2008) Concept and Operating Experiences with Eurelios 1 MW Helioelectric Power Plant of the European

- Communities. *IEEE Proceedings A-Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, **134**, 399-406. <https://doi.org/10.1049/ip-a-1.1987.0061>
- [9] 廖葵, 龙新峰. 塔式太阳能热力发电技术进展[J]. 广东电力, 2007, 20(4): 6-11.
- [10] Brosseau, D., Kelton, J.W., Ray, D., *et al.* (2005) Testing of Thermocline Filler Materials and Molten-Salt Heat Transfer Fluids for Thermal Energy Storage Systems in Parabolic Trough Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, **127**, 109-116. <https://doi.org/10.1115/1.1824107>
- [11] Reilly, H.E. and Kolb, G.J. (2001) An Evaluation of Molten-Salt Power Towers Including Results of the Solar Two Project. Office of Scientific and Technical Information Technical Reports.
- [12] Bradshaw, R.W., Dawson, D.B., Wilfredo, D.L.R., *et al.* (2002) Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project. *Energy Storage*, **1**, 17.
- [13] 李英. 低熔点二元混合熔盐传热蓄热介质的制备及热物性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [14] Vilella, A.G. and Yesilyurt, S. (2013) Analysis of Heat Storage with a Thermocline Tank for Concentrated Solar Plants: Application to AndaSol I. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Seville, 1532-1537.
- [15] Tehrani, S.S.M., Shoraka, Y., Nithyanandam, K., *et al.* (2018) Cyclic Performance of Cascaded and Multi-Layered Solid-PCM Shell-and-Tube Thermal Energy Storage Systems: A Case Study of the 19.9 MW e Gemasolar CSP Plant. *Applied Energy*, **228**, 240-253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.084>
- [16] Ho, C.K., Sims, C.A. and Christian, J.M. (2015) Evaluation of Glare at the Ivanpah Solar Electric Generating System. *Energy Procedia*, **69**, 1296-1305. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.150>
- [17] Chen, H., Goswami, D.Y. and Stefanakos, E.K. (2010) A Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-Grade Heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 3059-3067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>
- [18] Vélez, F., Segovia, J.J., Martín, M.C., *et al.* (2012) A Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 4175-4189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>
- [19] Imran, M., Haglind, F., Asim, M., *et al.* (2018) Recent Research Trends in Organic Rankine Cycle Technology: A Bibliometric Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81**, 552-562. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.028>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-9219, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: se@hanspub.org