

# Research Progress of Tower Solar Thermal Power Station

Xiaopeng Gao

Xiamen University Malaysia, Kuala Lumpur Malaysia  
Email: 2646292655@qq.com

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2019; published: Oct. 30<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper summarized the research progress of heliostats, heat sinks, supercritical CO<sub>2</sub> Braden cycle tower photothermal power generation systems and tower solar-assisted coal-fired power generation systems, and analyzed the economics of tower solar thermal power generation technology. The tower, trough, linear Fresnel, and dish-type, four solar thermal power stations were compared. Finally the feasibility of constructing a large-scale solar thermal power station in the northwest region was explored, and it was concluded that the tower solar thermal power station can sustain large-scale power generation continuously, but the improvement of its photoelectric efficiency and the feasibility of actual construction should be further developed in the future research.

## Keywords

Tower, Solar Energy, Solar Thermal Power Generation, Efficiency, Cost

---

# 塔式太阳能光热电站的研究进展

高晓鹏

厦门大学马来西亚分校, 马来西亚 吉隆坡  
Email: 2646292655@qq.com

收稿日期: 2019年10月8日; 录用日期: 2019年10月23日; 发布日期: 2019年10月30日

---

## 摘要

本文全面阐述了定日镜、吸热器、超临界CO<sub>2</sub>布雷登循环塔式光热发电系统和塔式太阳能辅助燃煤发电系统技术的研究进展情况, 剖析了塔式太阳能热发电技术的经济性, 对比了塔式、槽式、线性菲涅尔式、

碟式四种模式太阳能光热电站, 研究探讨了中国西北地区建设大规模光热电站的可行性。研究认为塔式太阳能光热电站能够持续稳定进行大规模发电, 具有明显的可持续性, 但是其光电效率和实际建设可行性还要在未来的研究中进一步提升。

## 关键词

塔式, 太阳能, 光热发电, 效率, 成本

Copyright © 2019 by author(s) 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. 引言

目前, 全球太阳能发电模式主要分为光伏发电和光热发电, 其核心分别是太阳能电池板和聚光系统[1]。聚光型太阳能热发电通过聚集太阳辐射获得热能并转化为高温蒸汽驱动汽轮机发电, 通常分为碟式、槽式、塔式和线性菲涅尔式四种发电方式。国内塔式太阳能热发电起步晚, 2007年, 国内首座发电量70 kW的塔式太阳能发电系统在南京江宁建成并发电成功; 2008年, 北京延庆建造了亚洲首座1 MW级塔式太阳能电站; 2013年, 全球第3座商业化运行的50 MW熔融盐塔式电站在青海建成并网发电[1][2]; 2016年, 亚洲第1座24 h连续发电的1万 kW熔盐塔式光热发电站在敦煌建成[3]。随着清洁能源需求的显著增加, 对太阳能发电的研究显得尤为迫切。本文全面阐述了塔式太阳能电站聚光系统的研究现状, 对定日镜场、吸热塔和电力转换3个子系统进行讨论, 为其未来研究发展方向提供理论依据[1][4]。

## 2. 研究进展

### 2.1. 塔式太阳能聚光系统的研究

提高定日镜反射率、镜面清洁度、余弦效率、抗阴影遮挡率、大气透射率、吸热器截断效率和吸热器热效率、追踪系统技术等条件, 可优化光热转换效率。目前, 镜场效率、吸热器截断率、吸热器效率、定日镜反射率、平均镜面清洁度分别为75%、90%、95%、96%、93%, 可使光电转换效率提升12% [1][5][6]。定日镜由太阳反射镜、追踪系统、镜架以及基座组成, 结构整体由刚性的金属材料进行支撑, 其与太阳同步运动能有效提高反射率, 但镜面旋转中心改变、基座安装倾斜、阴影遮挡等因素会降低跟踪精度。为减小误差, 王雪等人研究提出基于误差补偿和非误差补偿的定日镜系统[7]; 孙飞虎等人基于跟踪轴参考位错位法提出定日镜自动纠偏流程以及定日镜两旋转轴参考位偏差量的计算方法[8]; 蔡中坤等人则基于定日镜的运行规律和光学反射原理提出基于球面坐标的定日镜运动模型来简化计算过程[9]; 张茂龙等人融合平板投影法和射线追踪法提出的预判断模型和融合边界网格法的效率改进算法, 阴影方面预测准确率为90%~98%, 遮挡方面预测准确率为80%~85% [10]。太阳位置1分钟内变化极小, 定日镜可1分钟内只转动一次实现较佳的聚光效果和低功耗运行[11]。另外, 由于光斑溢出问题, 缪佩等人对矩形全场中不同地点和时段的光斑动态漂移特性进行仿真计算以减小溢出量[12], 其溢出量还受单元子镜的面形精度影响, 进一步提高镜面三维面形信息准确度可提高面形精度[13][14][15]。同时, 风荷载作用在镜面上亦产生结构挠曲变形, 降低面形精度。冯煜等人发现当长厚比大于200时可采用四点支承大挠度弯曲模型纠正面形。在大气风荷载作用下定日镜易引起振动导致光斑溢出, 特定设计的动力吸振器可抑制风致振动[16]。风还会影响传动装置的选型, 装置余量过大则成本高, 过小则电流过载。王筱翠等人设计

的蜗轮蜗杆可在 7 级风实现较大的输出力矩及自锁性, 整体传动效率为 22%, 输出精度 4 mrad [17]。此外, 基于整数规划的镜场能量调度和遗传算法改进的复合控制方案可解决多塔式电站运营控制复杂的问题, 满足系统实际能量需求和镜场整体[18] [19] [20]。镜场通常采用 UPS 作为集中备用电源, 但 UPS 设备发生故障的同时且厂用电断电。相比之下, 基于超级电容的分散备用电源在拓扑结构上更具可靠性且在应用特性上也更适用, 但该方案成本会高出 50% [21]。

目前, 塔式太阳能吸热器分为直接照射吸热器和间接照射吸热器[22]。其工质以水工质作为第 1 代, 熔盐作为第 2 代, 空气、超临界二氧化碳或固体粒子作为第三代[23]。熔盐因优质的传热性取代水工质, 但其超过 600℃会分解, 难适用于高参数电站, 而固体粒子因传热性能、蓄热性、耐高温性好被重视[24]。此外, 在吸热器表面进行特殊材料的图层可减少能量流失[25] [26], 涂层需测量其受光面的温度后选择, 但塔式太阳能吸热器受光面聚光比高、能流密度高以及伴生高温等特点导致测量困难, 可利用背光面温度间接计算受光面温度[27]; 聚焦目标单一会导致吸热器损毁, 采用多聚焦目标的聚焦优化策略并综合考虑吸热管的热参数和聚光光斑能流密度分布能选出多个优化的聚焦点[28] [29] [30]; 利用广角摄像机建立矢量图和采用阈值分辨法预测云层的运动可减少热应力损伤[31] [32]。

超临界 CO<sub>2</sub> 是气态和液态并存的流体, 其构成的光热发电系统由吸热器子系统、定日镜子系统、储热子系统、动力循环子系统组成。聚集的太阳能加热吸热器里的熔盐工质, 高温熔盐经下降管返回高温罐, 超临界 CO<sub>2</sub> 工质与其换热, 最后到涡轮机中膨胀做功。该发电循环使用逼近理论最优的布雷登循环, 循环过程中超临界 CO<sub>2</sub> 无相变, 属于单相循环。此外超临界 CO<sub>2</sub> 布雷登循环在 500℃~800℃具有高效率、高密度、循环简单的特点, 此高温区间正契合现有塔式光热发电的工质特性和运行温度。相比传统蒸汽朗肯循环, 其效率高、设备尺寸小、系统紧凑、且易实现干冷, 可将塔式配空冷的光热电站的效率提升至 50%, 降低平准化能源成本 10%, 但其在高压系统管道中存在较高的压力损失, 不适合大规模建设[33] [34], 而模块化的布雷登低压空气循环系统消除了高压系统的不足, 通过模块化集成可使系统达到 100 万 kW 级的发电规模, 为其提供了改良方向[23]。另外塔式太阳能辅助燃煤发电可弥补普通太阳能电站效益低的缺点。以 1000 MW 超临界机组和 10 MW 塔式太阳能集热器系统为例, 构建基于 CaO 高温储热的塔式太阳集热器辅助 CO<sub>2</sub> 捕集的燃煤发电系统, 系统发电效率可达 40.5%, 较单一的太阳能热发电效率高出 15.5%, 且可减少等效 CO<sub>2</sub> 排放 15.5 t/h。同时大型燃煤电站高参数、大容量的特点可平抑太阳能热发电的波动和系统对容量的要求[7] [35]。

## 2.2. 塔式太阳能聚光系统经济分析

塔式太阳能聚光电站的成本包安装费用、前期费用、设计费用、土地费用、管理费用、贷款利息等, 熔盐塔式电站单位热量储热系统的投资费用均为 30\$(kW·h) [35] [36], 产业成本电价约为 1.36~2.32 元/(kW·h) [37], 成本电价由收入和成本决定, 收入为上网电价与上网发电量的乘积, 成本包括固定资产折旧、运营维护成本、财务费用及税费等。太阳岛成本比例随着装机容量增加提升, 600 MW 时可达 70%, 当规模下降到 2 GW/a, 太阳岛造价为 3600~4000 元/kW, 定日镜成本可降低 650 元/m<sup>2</sup>, 占整个电站成本的 40%~50%, 在定日镜成本大幅下降的带动下, 成本电价可降到 0.6~0.8 元/(kW·h) [38] [39]。另外太阳能辅助燃煤发电可降低初投资[29], 1000 MW 塔式太阳能辅助燃煤电站项目平准化电力成本为 0.319 元/(kW·h), 所得税后财务内部收益率为 11.29%, 同比电力调度下 1000 MW 燃煤电站少燃煤 257.4 万 t, 减少 CO<sub>2</sub> 排放 723.8 万 t。考虑碳捕集成本, 需国家电价补贴 0.065/(kW·h) [29] [34]。除了投资, 运营维护成本包含故障修理费、人工费、材料费、水费及其他费用。修理费占据固定资产投资的 2%, 合理的优化定日镜的设计费用可降低 0.5%的修理费[1]; 人员工资参考火电标准; 材料费包括熔盐介质和辅助燃料, 为 30 元/(MW·h); 项综合耗水及其他费用按 20 元/(MW·h)计算。为保障项目的整体收益效果, 通常全投

资内部收益率要高 8%，而目前电站全投资内部收益率在电价处于 1.13~1.25 元/(kW·h)时为 11%~12%。考虑到目前的成本和新技术的大规模引进，光热发电的电力价格的制定需综合考虑平价上网和项目开发方的投资收益比例[40]。这需要政府相关部门合理调度电价，给予新能源产业的发展的更多支持。

### 2.3. 塔式太阳能聚光系统与其他太阳能聚光系统的对比研究

太阳能光热发电技术分为碟式、槽式、塔式和线性菲涅尔式四种发电方式，槽式和塔式太阳能热发电符合未来光热电站具备高参数、大容量、长周期蓄能等特点的发展趋势，是目前主流的光热利用技术[41]。槽式太阳能热发电通过槽式抛物面反射镜反射太阳能到位于集热器直管中，加热导热油到 393℃。而塔式太阳能热发电利用定日镜反射太阳能到光塔的吸收器上，加热熔盐 300℃~565℃，塔式光热电站采用熔盐作为导热介质，比槽式电站采用的导热油使用时间长，控制难度低，无毒且可回收利用；其聚光比介于 200~1000，远高于槽式太阳能电站；其系统效率在 23%波动，而槽式太阳能热发电在 14%波动。槽式热发电技术运用时间长，其技术更成熟且成本更可控[42]，但其难以突破目前固有的技术瓶颈。

线性菲涅尔式热发电系统由大量平放单轴转动的反射镜组成矩形镜场反射太阳光聚集到集热管上并加热管中流体介质，其优势在于反射镜和集热管可采用成本较低的平板式镜面与钢管管材；土地利用率高；风保能力好，无需考虑反射镜自重的提升及风阻的增大而必须加大对机械结构方面的经济投入；系统简单易于操作。但其集热系统聚焦比较小，温度提升受到限制，集热管既吸热的同时又在散热，运行中热损失比较大，系统效率甚至低于槽式系统。此外系统的集光面积的扩张只能通过增加槽式聚光镜的个数且总的热量需要从每个聚光镜上的吸热器上收集来，加大了经济支出。线性菲涅尔式电站的发展受到诸多限制，因此目前开展应用范围较小[39] [40]。

碟式太阳发电系统由聚光器、接收器、热机、支架、跟踪控制系统等主要部件构成。其工作时从聚光器反射的太阳光聚焦在接收器上，通过斯特林热机提升介质温度并带动发电机发电。其聚光比可达 3000，热电转换效率最高可达 32%，是四种光热发电技术中最高的。同时发电系统安装运行灵活简单，分布式安装离网运行和完全模块化皆可。但碟式光热发电技术无法像其他太阳能热发电技术一样进行储热以实现持续稳定发电。同时斯特林机大体积和大重量增加系统能耗的同时降低了系统的平衡性和抗风性，导致 25 kW 的单个发电系统已达到上限[41] [42]。塔式太阳能热发电技术可利用储热技术实现每日连续 24 h 发电且发电规模不断扩大，因此更具有发展前景。

综上，槽式和菲涅尔式属于线聚焦的集热方式，塔式和碟式属于点聚焦的集热方式；槽式采用单轴跟踪追日技术，碟式和塔式采用双轴跟踪追日技术，菲涅尔采用固定安装的方式；碟式光热电转化效率最高，塔式次之，槽式和菲涅尔式普遍低于 20%；槽式太阳能光热技术是商业化最成功的太阳能热发电技术，占目前太阳能光热电站总装机的 70%以上，塔式低于 20%，碟式和菲涅尔均小于 10%；但塔式太阳能热发电技术的传热介质污染程度低，工作温度提升范围广且聚光比大，在大规模高功率发电时成本更低，故而拥有最广阔的发展前景[43]。

### 2.4. 西北地区太阳能发电蓄热技术

我国西北的农村和牧区电力资源匮乏，大量农户难以用常规供电方法照明，太阳能发电技术的发展有利于促进对农村的正常供电[43]。《太阳能发电发展“十二五”规划》指出我国将新增 100 万 kW 太阳能光热发电装机容量[33]。西北地区幅员辽阔，纬度低且海拔高，光热资源丰富，正适合大规模的光热电站开发。但其风沙和昼夜温差大，飓风将直接影响系统效率和发电成本，沙尘除了增加阴影遮挡还将直接降低定日镜表面的清洁度，同时磨损吸热管涂层。上述因素都会造成聚光和集热效率的降低。过低的环境温度和气压将要求系统中电子器件具备较高的性能，降低工作人员的施工效率。因此电站建设前期

要设计能够兼顾发电效率和运营成本的方案。

以青海中控太阳能发电有限公司 10 MW 级塔式太阳能热发电集成技术与工程化项目为例,该项目研制二维运动的智能跟踪定日镜并构建大规模微元化定日镜集群的聚光效应与集热发电的技术方案;针对定日镜高精度聚光工程化难度大的问题,提出基于机器视觉最佳光斑拟合的动态跟踪轨迹算法,实现定日镜自主校正和批量精度调校,克服定日镜安装、地形等随机性误差影响。同时基于高原环境,开发清洗机器实现自动化镜面清洗,分析研究云漂移并设计高温蒸汽缓冲方法,克服云遮挡对汽轮机运转影响。通过监测分析高海拔地区气候环境,针对性开发指向点动态调度技术、耐热变和低温策略、紫外线、风沙等防护技术保证定日镜、吸热器、汽轮机等在 $-30^{\circ}\text{C}$ 及宽温变化的高海拔地区安全可靠运行[44]。

除了极端的自然环境,塔式太阳能电站的建设会因西北地区发达程度受到局限。区域地广人稀的特点会导致太阳能的开发利用投资规模但最终收益少;另外西北经济落后,人们思想相对保守,缺乏对太阳能的充分认识;由于工业基础薄弱且消纳能力有限,当地落后的经济条件导致弃光现象频发并造成资源浪费。2016年西北地区弃光电量达 70.4 亿 kW/h,全区弃光电量占全国弃光电量比重达到 99.4%。2017年,其弃光量达 66.7 亿 kW/h。电力交易市场化、电网配套建设与特高压外送通道的应用能有效克服西北弃光限电的弊病,刺激西北地区电力外送的潜力,促进西北建成能够向全国供电的能源基地,这需要国家在西北建立健全的电力消纳送出体系,打造全速新能源通道输送新能源电力。

### 3. 总结

基于目前塔式太阳能光热电站光热转化效率低,建设成本高且安装困难,本文认为未来该技术可进一步优化:定日镜效率的提高从追踪精度、光斑溢出、阴影遮挡、镜面清洁度、备用电源、传动装置、定日镜面形、镜场整体规划等方面着手研究。另外镜场中的吸热器容易因受热不均损坏,可以从涂层和聚焦方式两方面改良,发展新的吸热器和改进现有吸热器的缺陷要同时进行。超临界  $\text{CO}_2$  布雷登循环与塔式太阳能热发电结合能提高发电效率并节约成本,其发展有利于推动光热发电实现平价上网,且目前单一的太阳能热发电站成本过高,其与燃煤电站相结合可降低投资成本并减少  $\text{CO}_2$  排放。与其他太阳能热发电技术相比,塔式太阳能热发电技术在大规模发电时成本合适,发电稳定且效率高,最具发展潜力。环境恶劣且相对落后的西北地区光热资源丰富,可因地制宜建设大规模光热电站,打造更环保的能源基地,这需要国家给予光热产业更多政策优待和补贴,鼓励配套产业链、关键设备和部件的制造、系统集成技术的研发。

### 4. 展望

我国是能源需求大国,日益增长的能源需求加快了我国不可再生能源的枯竭,造成了大量的环境污染,制约了我国的经济的发展。塔式太阳能光热电站在我国这样太阳能资源丰富的国家具有广阔的发展和前景。其研究有利于缓解紧张的能源需求和环境压力,推动我国从以化工能源为基础的能源结构向无污染的新能源结构转型。虽然塔式光热电站的示范项目已经在进行,但其基础理论的研究在我国仍然处于起步阶段,理论研究的深度和广度还有待继续加强。未来,太阳能的能源战略地位会不断提升,其研究方面的突破将成为抢占能源革命新高地的决定性因素。

### 致 谢

本论文是在邱海源博士的严格要求和悉心指导下完成的,邱老师广博的学识,严谨的学术态度和精益求精的工作作风使我终身受益,激励我在今天后的学习过程中勇于创新,敢于实践。再次谨向邱老师致以最诚挚的谢意和最崇高的敬意。

同时感谢福建省电力勘测设计院电气二次办公室李毅主任及同事对我的照顾与关心。在实习期间为我提供了大量有关太阳能发电的资料,让我接触与太阳能相关的项目。这不仅扩大了我的知识储备,还让我明白了如何营造良好的工作氛围和提升沟通交流的能力。

感谢本文祝雪妹,冯煜,王熙等所有文献作者为本文提供的理论依据。

感谢各位专家百忙之中抽空评阅本文。

最后要感谢一直关注和支持我的家人,感谢父母对我们的无私付出和养育之恩,感谢你们无微不至的爱和对我理解与包容,感谢你们为我创造的良好学习条件。祝愿父母及所有关心我的人身体健康,万事如意。

## 参考文献

- [1] 田枫,祝雪妹.塔式太阳能热发电相关技术的最新进展[J].南京师范大学学报(工程技术版),2015,15(3):1-10.
- [2] 董清风,金建祥.国内熔融盐储能技术已趋成熟[J].太阳能,2017(7):56-57+37.
- [3] 亚洲首座24h熔盐塔式光热发电站并网投运[J].电力安全技术,2017,19(1):7.
- [4] 罗彦,杜小泽,杨立军,杨勇平.塔式太阳能热发电太阳倍数及储热时长优化研究[J].热力发电,2017,46(6):21-27.
- [5] 李心,赵晓辉,李江焯,李伟,徐能,黄文君.塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析[J].电力系统自动化,2015,39(7):84-88.
- [6] 刘翔.塔式太阳能热力发电技术进展综述[J].技术与市场,2017,24(11):144.
- [7] 王雪,王磊,陈丽.塔式太阳能热发电定日镜系统建模与效率优化研究[J].分布式能源,2017,2(3):10-16.
- [8] 孙飞虎,王志峰,郭明焕,梁文峰.基于跟踪轴参考位错位法的定日镜自动纠偏系统[J].太阳能学报,2016,37(4):877-883.
- [9] 蔡中坤,刘光宇.一种高性能定日镜姿态角计算方法[J].工业控制计算机,2018,31(2):103-104.
- [10] 张茂龙,卫慧敏,杜小泽,徐超.塔式太阳能镜场阴影与遮挡效率的改进算法[J].太阳能学报,2016,37(8):1998-2003.
- [11] 聂文.塔式太阳能定日镜间歇式运行方式设计[J].电子世界,2017(12):182.
- [12] 缪佩,祝雪妹,黄文君.定日镜光斑动态漂移特性的研究[J].太阳能学报,2016,37(8):2004-2011.
- [13] 冯煜,陈小安,王朝兵,李强.塔式太阳能定日镜镜面挠曲变形研究[J].太阳能学报,2015,36(9):2182-2188.
- [14] 刘明义,朱会宾,余强,王华荣.塔式太阳能热发电站定日镜镜面面形检测与三维重构[J].可再生能源,2015,33(7):971-976.
- [15] 徐海卫,张剑寒,余强,郭明焕,赵玉磊.塔式太阳能热发电站定日镜单元子镜面形研究[J].可再生能源,2015,33(12):1786-1792.
- [16] 王熙,郭树锋,赵文强,张节潭,杨斌堂.基于吸振器的太阳能热发电定日镜振动抑制研究[J].噪声与振动控制,2018,38(S1):353-357.
- [17] 王筱翠,张旭中,田军,江远财,王雪云.太阳能定日镜高精度传动装置的设计与应用[J].太阳能,2016(1):51-54.
- [18] 甘屹,曲凤挺,郭家忠,王子健,曾乐才.基于复合控制的塔式太阳能跟踪控制装置设计[J].能源研究与信息,2016,32(3):125-130.
- [19] 刘紫军,王昊,李佳燕,赵豫红.基于整数规划的塔式太阳能镜场能量调度方法[J].信息与控制,2016,45(5):615-620.
- [20] 徐能,田军,李心,宓霄凌,黄文君,付杰,李建华.塔式太阳能热发电站单塔最优装机容量分析[J].太阳能,2015(12):50-55.
- [21] 范立,刘强,徐能,毛永夫,蒲华丰,丁永健.基于超级电容的塔式太阳能光热发电备电设计[J].能源研究与管理,2018(1):80-83+95.
- [22] 布鲁斯·安德森,黄湘,孙海翔,王福华.新型布雷登塔式太阳能热发电系统[J].发电技术,2018,39(1):37-42.
- [23] 刘赞,李金芳,李永华.塔式太阳能接收器研究进展[J].北京工业大学学报,2018,44(7):1054-1062.

- [24] 闫凯, 乌晓江, 王刚. 塔式太阳能水工质吸热器性能分析[J]. 锅炉技术, 2019, 50(1): 14-19.
- [25] 李江焯. 塔式太阳能吸热器受光面测温方法研究[J]. 机电技术, 2017(1): 11-13+22.
- [26] 王楠, 王心愉, 孙飞虎, 郭明焕. 塔式太阳能热发电站圆月夜聚光实验研究[J]. 新能源进展, 2019, 7(1): 23-31.
- [27] 黎韦偲, 马纪明. 塔式太阳能电站定日镜场的聚焦策略研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(4): 475-480.
- [28] 杨勇平, 朱勇, 翟融融. 塔式太阳能辅助燃煤发电系统太阳能贡献度研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 56-63+94.
- [29] 李军, 张鹏, 聂立, 赵跃, 刘涵. 塔式太阳能聚热发电系统镜场天空云运动估计研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 132-138.
- [30] 周水良, 祝雪妹. 基于光流法的云层测速新方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3348-3354.
- [31] 朱含慧, 王坤, 何雅玲. 直接式超临界 CO<sub>2</sub> 塔式太阳能热发电系统光-热-功一体化热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(10): 2045-2053.
- [32] 程虎, 奚正稳, 孙登科. 超临界二氧化碳循环在塔式太阳能热发电中的应用[J]. 技术与市场, 2019, 26(4): 33-35.
- [33] 朱勇, 裴杰, 曹传钊, 刘明义. 塔式太阳能辅助燃煤发电系统技术经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 16-24.
- [34] 徐游波, 赵明, 邱亚林, 周驰, 顾鹏飞, 向文国. 太阳能氧化钙高温储热辅助二氧化碳捕集燃煤发电系统[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 180-185.
- [35] 刘文闯, 樊玉华, 杨静. 塔式太阳能热发电技术经济特性分析[J]. 工程技术研究, 2017(12): 41+43.
- [36] 张宏丽, 王树群. 定日镜及其成本分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2016, 12(4): 297-301.
- [37] 王金平. 槽式太阳能光热电站关键技术及运行特性的研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [38] 覃超. 光热发电中导热油与熔盐的运用分析[J]. 低碳世界, 2018, 186(12): 34-35.
- [39] 菲涅尔式太阳能发电[J]. 能源与节能, 2016(3): 163.
- [40] 杨文合. 线性菲涅尔镜场跟踪的优化设计[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [41] 孙浩. 碟式太阳能光热发电系统探究[J]. 工程技术研究, 2017(7): 130-131.
- [42] 邴旖旎. 大型碟式太阳能热发电系统热性能及经济性分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [43] 何靖雯, 郭俊良, 王心悦, 等. 太阳能在西北地区的应用调查[J]. 决策探索(下半月), 2017(5): 44-45.
- [44] 樊玉华, 刘文闯, 熊步青. 10 MW 级塔式太阳能热发电集成技术与工程化项目的研究[J]. 青海科技, 2017, 24(2): 28-31.