

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403069

二次反射塔式电站运行测试与模拟研究

谢文韬¹, 顾新壮², 代彦军²

(1. 鑫晨光热(上海)新能源有限公司, 上海 201114;

2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

[摘要] 光热发电中的二次反射塔式技术具有高聚光比、低泵耗和安装维护要求低等优点, 依托玉门鑫能第一电力有限公司 50 MW 二次反射塔式电站建立了定日镜场、二次反射模、吸热器、熔盐储罐和发电循环等关键部件模型, 并完成了模型验证。运行测试结果表明: 当直射辐射为 739.70 W/m^2 时, 熔盐出口温度可以在 $559 \text{ }^\circ\text{C}$ 下维持 50 min; 12:00 定日镜场的余弦效率、阴影与遮挡效率、二次反射阴影效率和大气透射率分别为 0.856 8、0.999 7、0.994 1、0.974 6, 二次反射镜照度和吸热器照度分别为 11.3 kW/m^2 和 400.5 kW/m^2 , 同时电站在 50 MW 的额定发电功率下维持 16 h。该研究内容对二次反射塔式电站运行和理论研究具有一定参考意义。

[关键词] 光热发电; 二次反射电站; 镜场效率; 照度; 发电量

[引用本文格式] 谢文韬, 顾新壮, 代彦军. 二次反射塔式电站运行测试与模拟研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 50-57.
XIE Wentao, GU Xinzhuang, DAI Yanjun. Run-test and simulation research of a beam-down concentrating solar power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 50-57.

Run-test and simulation research of a beam-down concentrating solar power plant

XIE Wentao¹, GU Xinzhuang², DAI Yanjun²

(1. Xincheng CSP (Shanghai) New Energy Co., Ltd., Shanghai 201114, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The beam-down concentrating solar power plant has the advantages of high concentrating ratio, low installation and maintenance requirements, and low pump consumption. Relying on the 50 MW beam-down tower concentrating solar power station in Yumen Xinneng First Power Co., Ltd., the mathematical models of the heliostat field, hyperboloid mirror, receiver, molten salt tank, and power generation cycle are established and verified. The run-test results reveal that, the maximum outlet temperature of the molten salt can be maintained at $559 \text{ }^\circ\text{C}$ for 50 minutes at an average direct normal irradiation of 739.70 W/m^2 . The cosine efficiency, shading and blocking efficiency, shading efficiency of the hyperboloid mirror, and attenuation efficiency of the heliostat field at 12:00 are 0.856 8, 0.999 7, 0.994 1, and 0.974 6, respectively. The average hyperboloid mirror flux density and receiver flux density are 11.3 kW/m^2 and 400.5 kW/m^2 , respectively. Meanwhile, the power station is maintained for 16 h at the rated generation power of 50 MW. The research has certain reference significance for the operation of a beam-down concentrating solar power plant.

Key words: concentrating solar power; beam-down power station; heliostat field efficiency; flux; power generation

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项项目(2022YFE0196500); 上海市 2023 年度“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项项目(23DZ1201000); 中国电力工程顾问集团有限公司 2023 年度第二批重大科技专项项目(DG3-A03-2023); 国家重点研发计划“可再生能源技术”重点专项项目(2023YFB4204301, 2023YFB4204303)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2022YFE0196500); Shanghai 2023 “Science and Technology Innovation Action Plan” Science and Technology Support Carbon Peak and Carbon Neutrality Special Project (23DZ1201000); Key Scientific and Technological Projects of China Power Engineering Consulting Group in 2023 (DG3-A03-2023); National Key Research and Development Program of China (2023YFB4204301, 2023YFB4204303)

第一作者简介: 谢文韬(1983), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太阳能发电与热利用、DAC 和新能源制氢, xiewentao@bcpsolarx.com。

通信作者简介: 代彦军(1971), 男, 教授, 主要研究方向为太阳能热利用与建筑节能, 除湿空调、海水淡化和热电制冷, yjdai@sjtu.edu.cn。

“碳中和”和“碳达峰”的双碳目标下，我国绿色清洁能源发电技术制定了相应的发展规划^[1]；风能和太阳能作为主要的新型能源发电技术，预计到 2050 年将分别占中国发电量的 33%和 39%。然而，由于风能和光伏发电的间歇性会对电网产生波动影响，配备热储能的太阳能热发电技术可以提高源侧电力的灵活输出，进而提高电网的稳定性^[2]。因此，国内外科研院所和产业界对太阳能热发电领域的关注度均持续增加。

太阳能热发电技术按类别主要分为以下 4 种：抛物面槽式系统、抛物面碟式系统、线性菲涅尔式系统、塔式系统^[3]。其中，塔式系统相对于槽式系统和线性菲涅尔式系统具有更高工作温度和更高聚光比，可以实现更高的发电循环效率，同时相对于碟式系统具有更高的装机容量，更适合于大规模技术应用。塔式系统主要有中央塔式系统和二次反射塔式系统 2 种技术形式。由于中央塔式系统的高度较高，需要更高的安装高度和维护要求以及较高的泵耗。为了克服上述缺点，Rabl^[4]在 1976 年首次提出二次反射塔式系统，采用二次反射镜将光线反射到位于地面的接收器内，主要缺点是光学效率低于中央塔式系统。

目前，国内外已建成 6 座二次反射塔式电站。国外主要为阿联酋 100 kW 电站、日本 300 kW 电站、以色列 650 kW 电站以及意大利的 2 MW 电站 4 座二次反射塔式电站，国内主要是玉门鑫能第一电力有限公司 50 MW 二次反射塔式电站和江苏盐城 300 kW 二次反射塔式电站。本文基于甘肃省玉门鑫能第一电力有限公司 50 MW 电站，研究镜场效率、二次反射镜照度、吸热器照度和发电量等理论性能指标，拟为二次反射塔式电站运行和理论研究提供参考。

1 二次反射塔式电站介绍

二次反射塔式电站原理如图 1 所示。二次反射塔式电站主要由 5 个部件组成，分别为定日镜场、二次反射镜、吸热器、熔盐罐和发电循环。定日镜场将光线聚焦到二次反射镜的上焦点处，随后光线被二次反射镜和复合抛物面聚光器（CPC）聚焦到吸热器内用于加热熔盐，加热后的熔盐通入热熔盐罐。热熔盐罐出口处的熔盐分别通过过热器和再热器进一步提升了进入高压汽轮机和低压汽轮机的蒸汽温度，然后将蒸发器进口处的水加热为出口处的蒸汽，其次通过预热器进一步提高了出口水

温，最后熔盐返回冷熔盐罐并在吸热器内被加热为热熔盐，进而组成熔盐的吸热、储热和换热等全过程。在发电循环中，高压汽轮机采用三级抽汽系统并通过 1—3 号高压加热器加热给水，其中部分第三级抽汽在再热器中被重新加热并作为低压汽轮机的主蒸汽。低压汽轮机的第一级抽汽与来自 3 号高压加热器和 3 号低压加热器的冷凝水在除氧器中混合，完成冷凝过程中的除氧过程，第二级至第四级抽汽分别通过 1—3 号低压加热器与水换热，最后低压汽轮机的排汽被排放到冷凝器中以保持汽轮机的真空度。

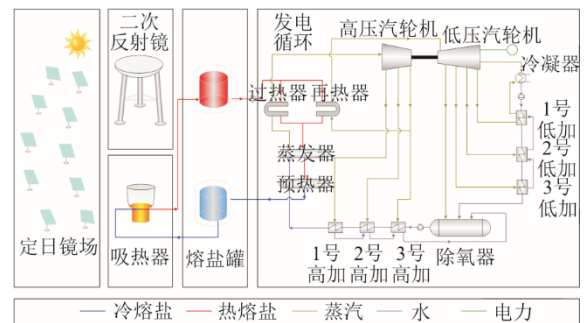


图 1 二次反射塔式电站原理
Fig.1 Schematic diagram of principle the beam-down concentrating solar power station

玉门鑫能第一电力有限公司 50 MW 二次反射塔式电站位于甘肃省玉门市，玉门市的全年总太阳辐射量超过 6 300 MJ/m²，属于我国太阳能资源最丰富的地区。气候类型是中文区半干旱气候，主要气候特点是降水量少、空气干燥以及光照充足。电站的年设计发电量为 2.15 亿 kW·h，可同时满足 2 万户家庭用电需求。

2 数学模型及验证

2.1 定日镜场

二次反射塔式电站定日镜场的光学效率定义为：

$$\eta_{hf} = \eta_{\cos,h} \times \eta_{sb,h} \times \eta_{sb,hm} \times \eta_{at,h} \times \eta_{at,hm} \times \eta_{in,hm} \times \eta_{in,cpc} \times \rho_{r,h} \times \rho_{c,h} \times \rho_{r,hm} \times \rho_{c,hm} \quad (1)$$

式中： η_{hf} 为定日镜场的总光学效率； $\eta_{\cos,h}$ 、 $\eta_{sb,h}$ 和 $\eta_{at,h}$ 分别为定日镜的余弦效率、阴影与遮挡效率和大气透射率； $\eta_{sb,hm}$ 、 $\eta_{at,hm}$ 和 $\eta_{in,hm}$ 分别为二次反射镜阴影效率、大气透射率和截断率； $\eta_{in,cpc}$ 为 CPC 的截断率； $\rho_{r,h}$ 和 $\rho_{c,h}$ 分别为定日镜的反射率和清洁度； $\rho_{r,hm}$ 和 $\rho_{c,hm}$ 分别为二次反射镜的反射率和清洁度。

定日镜场的余弦效率为^[5]：

$$\eta_{\cos,h} = \cos \theta_{in} = \hat{d}_s \cdot \hat{d}_n \quad (2)$$

式中: θ_{in} 为两向量的夹角, rad; \hat{d}_s 为太阳指向定日镜中心的方向向量; \hat{d}_n 为定日镜的法向量。

定日镜和二次反射镜的阴影和遮挡效率分别为^[6]:

$$\eta_{sb,h} = 1 - \frac{s_{s,h} + s_{b,h}}{s_h} \quad (3)$$

$$\eta_{sb,hm} = 1 - \frac{s_{s,hm}}{s_h} \quad (4)$$

式中: $s_{s,h}$ 和 $s_{b,h}$ 分别为相邻定日镜的阴影面积和遮挡面积, m^2 ; s_h 为定日镜的面积, m^2 ; $s_{s,hm}$ 为二次反射镜对定日镜的阴影面积, m^2 。

定日镜的大气透射率为^[7]:

$$\eta_{at,h} \begin{cases} 0.99321 - 0.0001176 \times d + 1.97 \times 10^{-8} \times d^2 & (d \leq 1000 \text{ m}) \\ e^{-0.0001106 \times d} & (d > 1000 \text{ m}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: d 为定日镜到二次反射镜的距离, m; $\eta_{at,h}$ 可基于二次反射镜到吸热器的距离由式(5)获得。

二次反射镜和 CPC 的截断率分别为^[8]:

$$\eta_{in,hm} = \frac{n_{r,hm}}{n_{l,h}} \quad (6)$$

$$\eta_{in,cpc} = \frac{n_{r,re}}{n_{l,hm}} \quad (7)$$

式中: $n_{r,hm}$ 为到达二次反射镜的光线数; $n_{l,h}$ 为离开定日镜的光线数; $n_{r,re}$ 为到达吸热器的光线数; $n_{l,hm}$ 为离开二次反射镜的光线数。

2.2 二次反射镜

二次反射镜的三维坐标为^[9]:

$$z_{hm} = \sqrt{\frac{(z_{f1} - z_{f2})^2}{4e^2} + \frac{x_{hm}^2 + y_{hm}^2}{e^2 - 1}} + \frac{z_{f1} - z_{f2}}{2} \quad (8)$$

式中: x_{hm} 、 y_{hm} 和 z_{hm} 分别为二次反射镜的三维坐标, m; z_{f1} 和 z_{f2} 为二次反射镜的上焦点和下焦点高度, m; e 为离心率。

顶点比用于确定二次反射镜的形状, 定义为:

$$f = \frac{1}{2} + \frac{c_{hm}}{z_{f1} - z_{f1}} = \frac{z_{min} - z_{f2}}{z_{f1} - z_{f2}} \quad (9)$$

式中: f 为顶点比; c_{hm} 为短半轴, m; z_{min} 为二次反射镜最低点的高度, m。

二次反射镜的最大半径取决于镜场半径:

$$\frac{z_{max} - H_h - L_h \sin \varphi}{R_{hf} - R_{hm} + L_h \cos \varphi} = \frac{z_{f1} + L_h \cos \varphi \cot g \varphi - H_h}{R_{hf} + L_h \cos \varphi} \quad (10)$$

式中: z_{max} 为二次反射镜最高点的高度, m; L_h 和 H_h 为定日镜的长度和高度, m; R_{hf} 和 R_{hm} 为定日镜

场和二次反射镜的最大半径, m; φ 为天顶角, rad。

2.3 CPC 和吸热器

二次反射镜的三维坐标方程为^[9-10]:

$$x_{cpc} = \frac{2 \times l_{fl,cpc} \sin \alpha \sin(\beta - \gamma)}{1 - \beta} - r_{o,cpc} \sin \alpha \quad (11)$$

$$y_{cpc} = \frac{2 \times l_{fl,cpc} \cos \alpha \sin(\beta - \gamma)}{1 - \beta} - r_{o,cpc} \cos \alpha \quad (12)$$

$$z_{cpc} = \frac{2 \times l_{fl,cpc} \cos(\beta - \gamma)}{1 - \beta} \quad (13)$$

式中: x_{cpc} 、 y_{cpc} 和 z_{cpc} 分别为 CPC 的三维坐标, m; $l_{fl,cpc}$ 为焦距, m; α 的范围为 $0 \sim 2\pi$; γ 为接收角, rad; $r_{o,cpc}$ 为 CPC 的出口半径, m。

吸热器效率为^[11]:

$$\eta_{re} = \frac{m_{ms} C_{p,ms} (T_{o,ms} - T_{i,ms})}{Q_{i,re}} = \frac{Q_{i,re} - Q_{loss,re}}{Q_{i,re}} \quad (14)$$

式中: η_{re} 为吸热器效率; m_{ms} 为熔盐的质量流量, kg/s; $C_{p,ms}$ 为熔盐比热容, J/(kg·K); $T_{i,ms}$ 和 $T_{o,ms}$ 为吸热器的进出口温度, K; $Q_{i,re}$ 为吸热器的输入热量, W; $Q_{loss,re}$ 为吸热器的热损失, W, 可由式(15)计算。

$$\begin{aligned} Q_{loss,re} &= Q_{con,re} + Q_{rad,re} \\ &= h_c \times s_{re} \times (T_{i,re} - T_0) + \sigma \times \varepsilon \times s_{re} \times (T_{i,re}^4 - T_0^4) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $Q_{con,re}$ 和 $Q_{rad,re}$ 为吸热器的对流热损失和辐射热损失, W; h_c 为传热系数, W/($m^2 \cdot K$); s_{re} 为吸热器面积, m^2 ; $T_{i,re}$ 为吸热器进口温度, K; T_0 为环境温度, K; σ 为斯蒂芬波尔兹曼常数, W/($m^2 \cdot K^4$); ε 为发射率。

2.4 熔盐罐

熔盐能量平衡方程和质量平衡方程分别为^[12]:

$$\frac{d(m_{ms} C_{p,ms} T_{ms})}{dt} = m_{i,ms} h_{i,ms} - m_{o,ms} h_{o,ms} - Q_{ms} + Q_{reh} \quad (16)$$

$$\frac{dm_{ms}}{dt} = m_{i,ms} - m_{o,ms} \quad (17)$$

式中: m_{ms} 为熔盐的质量流量, kg/s; $C_{p,ms}$ 为熔盐的比热容, J/(kg·K); $m_{i,ms}$ 和 $m_{o,ms}$ 为储罐进出口熔盐流量, kg/s; T_{ms} 为熔盐温度, K; $h_{i,ms}$ 和 $h_{o,ms}$ 分别为熔盐罐进出口处的比热容, J/kg; Q_{ms} 为熔盐的热量, W; Q_{reh} 为熔盐向环境的散热, W; $m_{i,ms}$ 和 $m_{o,ms}$ 分别为熔盐罐进出口处的质量流量, kg/s; t 为时刻。

2.5 发电循环

高压汽轮机和低压汽轮机的输出功和效率分别为^[13-14]:

$$W_{hpt,pc} = m_{i,hpt,sm} h_{i,hpt,sm} - m_{1e,hpt,sm} h_{1e,hpt,sm} - m_{2e,hpt,sm} h_{2e,hpt,sm} - m_{3e,hpt,sm} h_{3e,hpt,sm} \quad (18)$$

$$\eta_{hpt,pc} = \frac{h_{i,hpt,sm} - h_{1e,hpt,sm}}{h_{i,hpt,sm} - h_{1e,hpt,sm,s}} \quad (19)$$

$$W_{lpt,pc} = m_{i,lpt,sm} h_{i,lpt,sm} - m_{1e,lpt,sm} h_{1e,lpt,sm} - m_{2e,lpt,sm} h_{2e,lpt,sm} - m_{3e,lpt,sm} h_{3e,lpt,sm} - m_{4e,lpt,sm} h_{4e,lpt,sm} - m_{ex,lpt,sm} h_{ex,lpt,sm} \quad (20)$$

$$\eta_{lpt,pc} = \frac{h_{i,lpt,sm} - h_{1e,lpt,sm}}{h_{i,lpt,sm} - h_{1e,lpt,sm,s}} \quad (21)$$

式中： $W_{hpt,pc}$ 和 $W_{lpt,pc}$ 为高压汽轮机和低压汽轮机的输出功， W ； $\eta_{hpt,pc}$ 和 $\eta_{lpt,pc}$ 为高压汽轮机和低压汽轮机的效率； $m_{i,hpt,sm}$ 和 $m_{i,lpt,sm}$ 为高压汽轮机和低压汽轮机进口处蒸汽的质量流量， kg/s ； $h_{i,hpt,sm}$ 和 $h_{i,lpt,sm}$ 为高压汽轮机和低压汽轮机进口处蒸汽的焓值， J/kg ； $m_{1e,sm}$ 、 $m_{2e,sm}$ 、 $m_{3e,sm}$ 、 $m_{4e,sm}$ 和 $m_{ex,sm}$ 分别为第一级至第四级抽汽和排汽的质量流量， kg/s ； $h_{1e,sm}$ 、 $h_{2e,sm}$ 、 $h_{3e,sm}$ 、 $h_{4e,sm}$ 和 $h_{ex,sm}$ 分别为第一级至第四级抽汽和排汽的焓值， J/kg ； $h_{1e,sm,s}$ 为等熵焓， J/kg ；下标 hpt 和 lpt 分别代表高压汽轮机和低压汽轮机。

2.6 模型验证

为验证定日镜、二次反射镜和吸热器等主要部件数学模型的有效性，对比分析了本文模型仿真结果和参考文献[8]二次反射镜照度、吸热器照度实测结果。本文模型仿真结果与参考文献[8]二次反射镜照度对比如图 2 所示。参考文献[8]计算时刻为 3 月 21 日 12:00，区域 1 的二次反射镜照度比区域 4 更高。主要原因是中午时刻区域 1 所对应的镜场效率更高，可以将更多光线反射到区域 1 处的二次反射镜。区域 2 的一部分二次反射镜照度低至 0。这是因为对应位置的定日镜被二次反射镜阴影所遮挡。本研究中的二次反射镜照度平均值为 33.8 kW/m^2 。

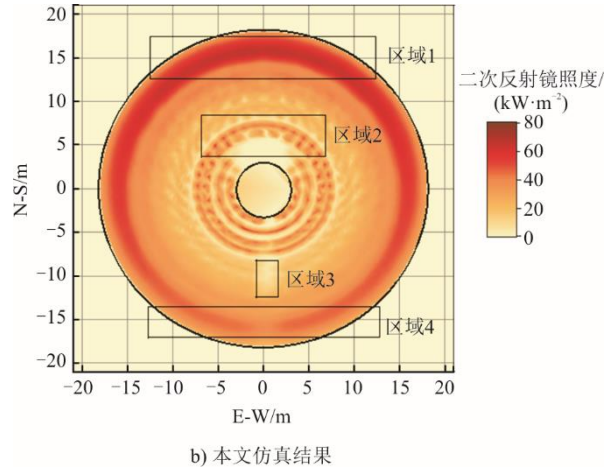
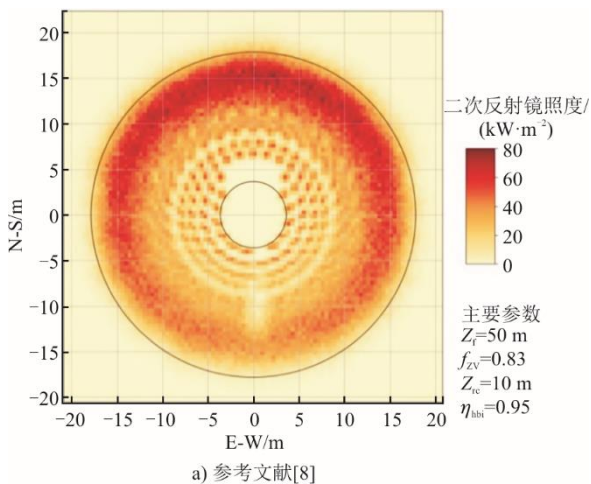


图 2 本文模型仿真结果与参考文献[8]二次反射镜照度对比
Fig.2 Comparison of hyperboloid mirror flux density between reference [8] and the simulation results

本文模型与参考文献[8]吸热器镜照度仿真结果对比如图 3 所示。

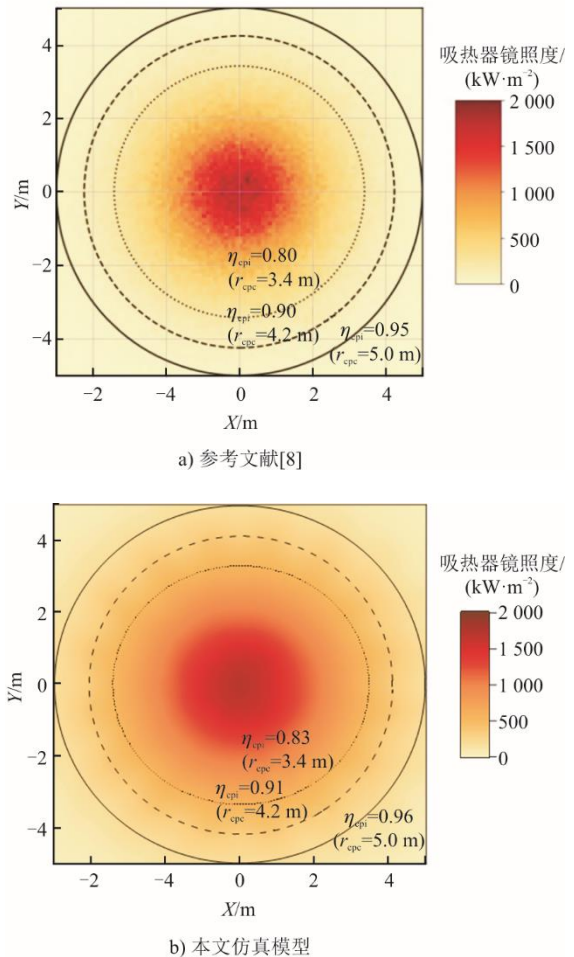


图 3 本文模型仿真结果与参考文献[8]吸热器镜照度对比
Fig.3 Comparison of receiver flux density between reference [8] and the simulation results

由于二次反射镜和 CPC 的 2 次聚焦效应，在原

点处可以观察到吸热器最高照度。吸热器在 3.4、4.2、5.0 m 半径内的平均通量密度分别为 460.5、414.4、373.9 kW/m²，相对应的 CPC 截断率分别为 0.83、0.91 和 0.95，存在一定光学误差的原因为二次反射镜的子反射镜不是理想曲镜面。图 2、图 3 中本文模型与参考文献[8]结果基本一致，验证了本文数学模型的有效性和准确性。

3 结果分析

首先对玉门鑫能第一电力有限公司 50 MW 二次反射塔式电站进行运行测试并分析太阳辐射、风速、进出口熔盐温度等参数，对定日镜场进行仿真模拟，得到余弦效率、阴影与遮挡效率、二次反射镜阴影效率和大气透射率等参数；然后，分析了二次反射镜和吸热器照度等参数的变化；最后评估了电站的发电性能。

3.1 运行测试结果分析

电站在 2023 年 6 月 12 日开展了运行测试，结果如图 4 所示。当天太阳直射辐射从 10:45 的 667 W/m² 增至 13:31 时 753 W/m² 的最大值，并逐渐降低到 18:00 时的 577 W/m²。风速波动范围 3.5~11.6 m/s，主要影响二次反射镜和 CPC 的截断率，远低于定日镜 36 m/s 的生存风速。

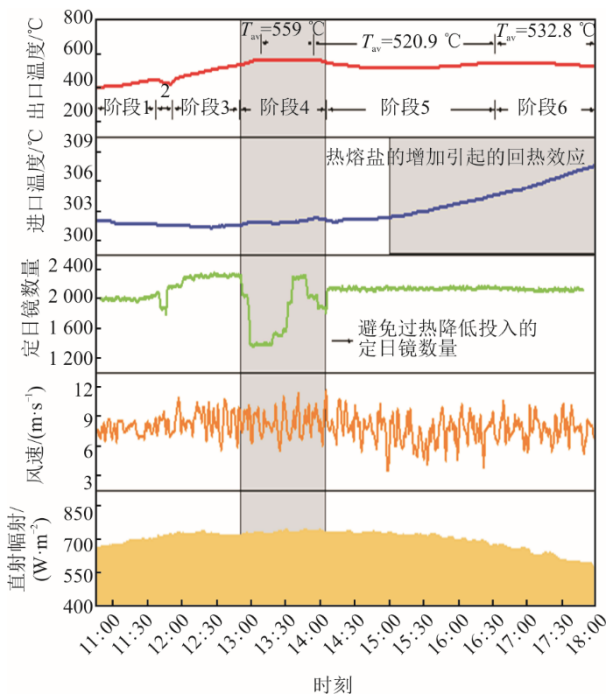


图 4 6 月 12 日运行测试结果
Fig.4 Operational results on June 12th

1) 对于图 4 中阶段 1，投入定日镜数量从 1 990 增至 2 035，因此熔盐的出口温度从 10:45 时的 384.9 °C

增至 11:36 时的 439.9 °C，相应熔盐进口温度在 301.6~301.9 °C。

2) 在 11:36—11:50 阶段 2 中，定日镜数量从 2 035 降至 1 789，导致出口温度从 439.9 °C 降至 411.8 °C，进口温度基本保持在 301.5~301.6 °C。

3) 在 11:50—12:51 阶段 3，熔盐出口温度从定日镜数量为 2 173 时的 411.8 °C 增至定日镜数量为 2 311 时的 528 °C，对应的熔盐进口温度 301.2~301.5 °C。

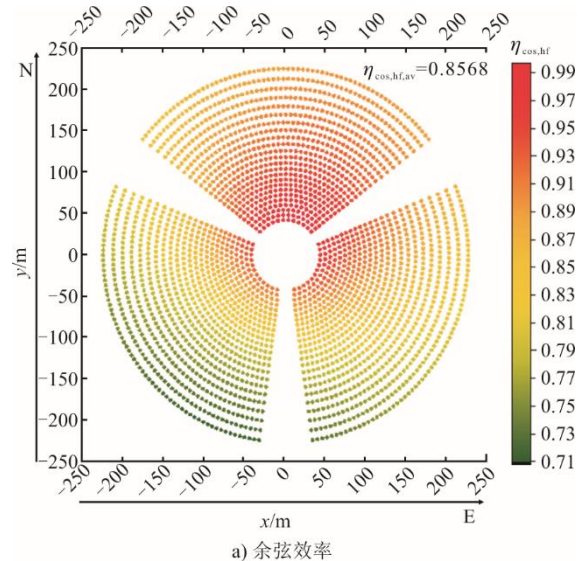
4) 为了防止吸热器过热，投入的定日镜数量从 12:51 时的 2 311 减至 13:18 时的 1 388 个，然后在 13:47 时逐渐增加到 2 316 时的最大值，并在 14:05 时减少到 1 808，由于热惯性，熔盐的出口温度从 12:58 时的 528 °C 增至 13:07 时的 558 °C。在 13:07—13:56 熔盐出口温度平均值为 559 °C，定日镜数量的减少导致出口温度从 13:56 时的 558.4 °C 降至 14:05 时的 542.7 °C。

5) 第 5 阶段直射辐射从 14:05 时的 740 W/m² 降至 16:37 时的 682 W/m²，为提高熔盐出口温度，定日镜数量从 1 808 增至 2 126。熔盐出口温度从 14:05 时的 542.7 °C 将至 15:05 时的最小值 506.4 °C，然后逐渐增至 16:37 时的 540.9 °C。

6) 阶段 6 熔盐出口温度从 683 W/m² 时的 540.9 °C 降至 577 W/m² 时的 515.0 °C。

3.2 镜场效率

2023 年 6 月 12 日 12:00 定日镜场效率包括余弦效率、阴影与遮挡效率、二次反射镜阴影效率和大气透射率等性能参数如图 5 所示，其中，直射辐射为 900 W/m²。每个定日镜场共 2 603 个定日镜，其中北区、西区和东区的定日镜数量分别为 869、867 和 868，镜场半径的范围为 42.8~225.0 m。



a) 余弦效率

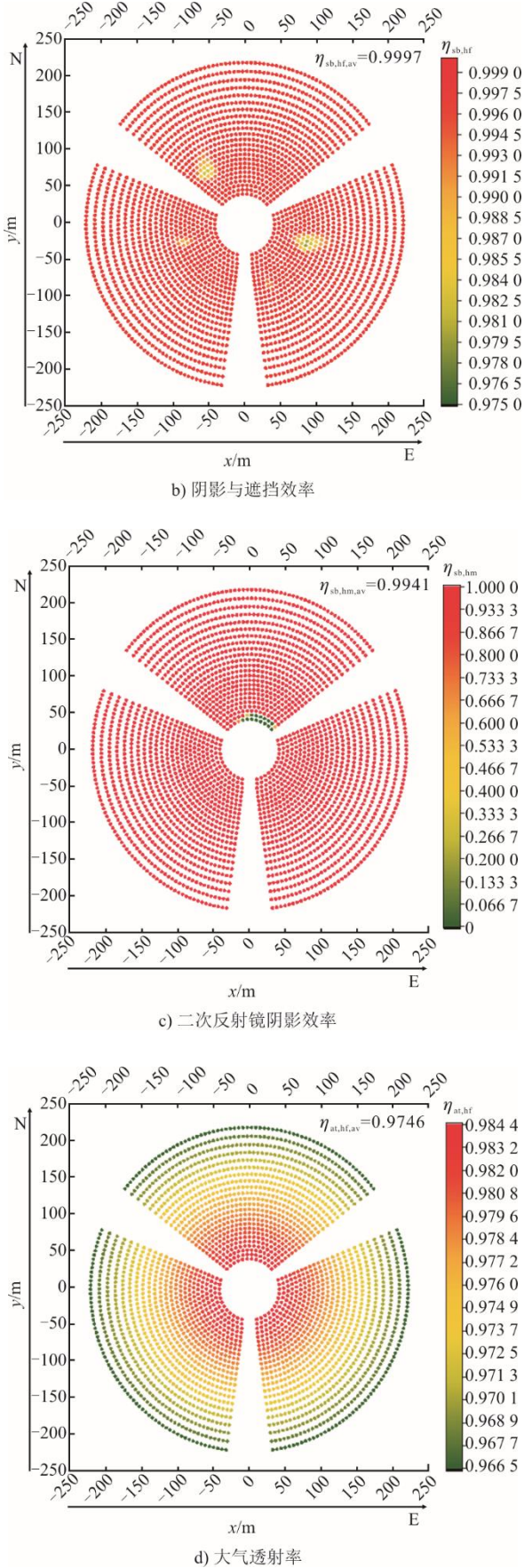


图 5 6 月 12 日定日镜效率

Fig.5 The simulated heliostat field efficiency on June 12th

由图 5a)可见,北区比西区和东区的余弦效率高,北区和整个镜场的平均余弦效率分别为 0.918 8 和 0.856 8。这主要因为当太阳位于镜场南侧时,式(2)中北区太阳入射夹角小于西区和东区的角度,因此北区表现出更高的余弦效率。此外,12:00 太阳方位角接近于正南,因此西区和东区的平均余弦效率相近,平均值分别为 0.803 2 和 0.848 2。对于图 5b)中的阴影和遮挡效率,镜场阴影和遮挡位置主要靠近内侧,北区、西区和东区的阴影遮挡效率平均值分别为 0.999 68、0.999 92、0.999 56。阴影与遮挡位置随着太阳方位角的增加而顺时针旋转,阴影遮挡效率随着太阳高度角的增加而降低。图 5c)中的二次塔阴影主要影响北区第 1 圈和第 2 圈的定日镜,第 1 圈和第 2 圈分别有 9、8 台被遮挡,二次反射镜阴影效率平均值为 0.994 1,二次阴影区域随着太阳高度角的降低向镜场边缘侧移动。由式(5)可知图 5d)中的镜场大气透射率仅和定日镜到二次反射镜的距离有关,因此大气透射率从第 1 圈定日镜的 0.984 4 降至第 24 圈的 0.966 6,镜场大气透射率的平均值为 0.974 6。

3.3 二次反射镜照度和吸热器照度

图 6 和图 7 分别描述了二次反射镜照度和吸热器照度分别随坐标的变化情况,其中,直射辐射为 900 W/m^2 。对于二次反射镜,北区照度最大为 20 kW/m^2 ,且北区、西区和东区二次反射镜照度平均值分别为 13.62、9.81、 10.46 kW/m^2 。

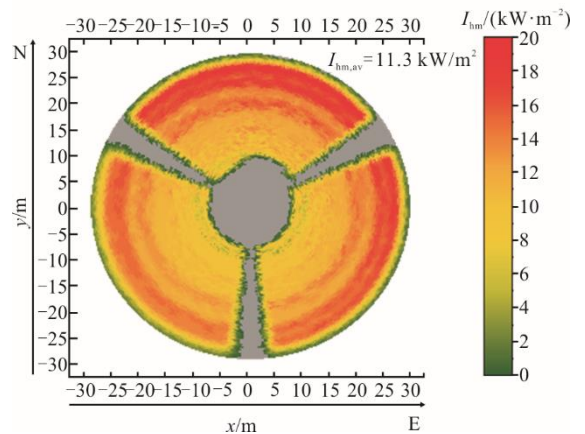


图 6 二次反射镜照度仿真结果

Fig.6 Simulation results of hyperboloid mirror flux density

北区二次反射镜照度较高是因为图 5a)中北区镜场余弦效率均高于西区和东区。图 5c)中二次反射镜阴影效率所对应北区二次反射镜阴影区域,是二次反射电站相对于中央塔式电站的另一个特征,主要影响北区高度为 64.82~65.24 m 的二次反射镜,

二次反射镜遮挡位置分别为 x 坐标(-2.74、6.31)和 y 坐标(7.54、9.83)。

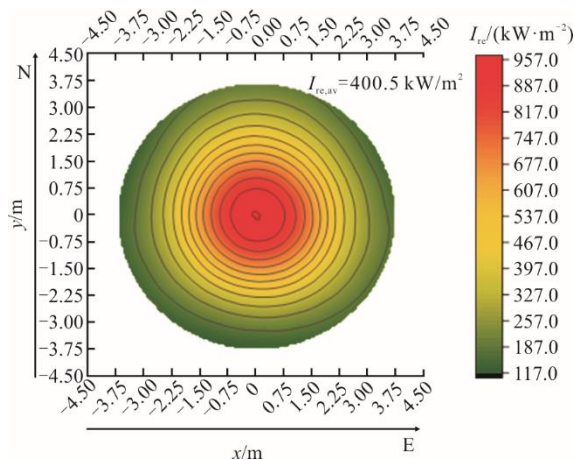


图7 吸热器照度仿真结果
Fig.7 Simulation results of receiver flux density

由图7可见,当 y 坐标为0时,吸热器照度从 $x=0$ 时的 957.2 kW/m^2 降低到 $x=3.75$ 时的 167.8 kW/m^2 ,照度降低规律遵循近似的高斯分布。半径 1.00、2.00、3.00、3.75 m 的平均吸热器照度分别为 895.43、713.85、516.47、400.5 kW/m^2 。在 x 坐标为0的情况下,吸热器照度在 $y=3.75$ 和 $y=-3.75$ 处的数值分别为 195.86 kW/m^2 和 123.86 kW/m^2 ,照度差异的主要原因是图6中北区的二次反射镜平均照度最高,导致更多的光线到达吸热器的北部区域。

3.4 电站综合性能

图8展示了二次塔式电站在6月1日到6月7日的定日镜场效率、镜场功率、接收器功率、储罐热量和发电量随着太阳直射辐射和风速变化情况。6月1日至4日为晴天,6月5日至7日为多云天气,以6月1日为例,当天的太阳直射辐射范围为 $0 \sim 682 \text{ W/m}^2$,风速在 $0.7 \sim 5.0 \text{ m/s}$ 波动。由图8可见,由于太阳高度角小于 0 ,因此定日镜场效率在 $00:00 \sim 04:00$ 和 $19:00 \sim 24:00$ 时段为 0 ,然后从 $05:00$ 的 0.4779 增加到 $12:00$ 的 0.5575 ,并在 $18:00$ 降低至 0.4771 。镜场功率和吸热器功率的波动主要取决于太阳直射辐射的变化,在 39045 台定日镜(15个定日镜场)的运行下,镜场功率和吸热器功率从 $05:00$ 的 $32.54 \text{ MW}/20.66 \text{ MW}$ 增加到 $10:00$ 的 $235.23 \text{ MW}/223.35 \text{ MW}$ 的最大值,然后在 $18:00$ 降低到 $64.38 \text{ MW}/52.5 \text{ MW}$ 。电站的运行策略是优先将热熔盐储存在热熔盐罐中,并将多余的热量用于发电循环,储罐热量从 27.44 MW 增加到 1125.00 MW

的设计容量。电站在 $04:00 \sim 10:00$ 时段的发电量保持在 0 MW , $11:00$ 在储罐外多余热量的作用下发电量为 8.6 MW ,随后在 $12:00$ 至6月2日的 $02:00$ 之间电站保持 50 MW 的额定发电量,最后在6月2日的 $03:00$ 和 $04:00$ 发电量分别降低至 47.54 、 21.53 MW 。电站在6月2日至6月7日的综合性能变化规律与6月1日一致。

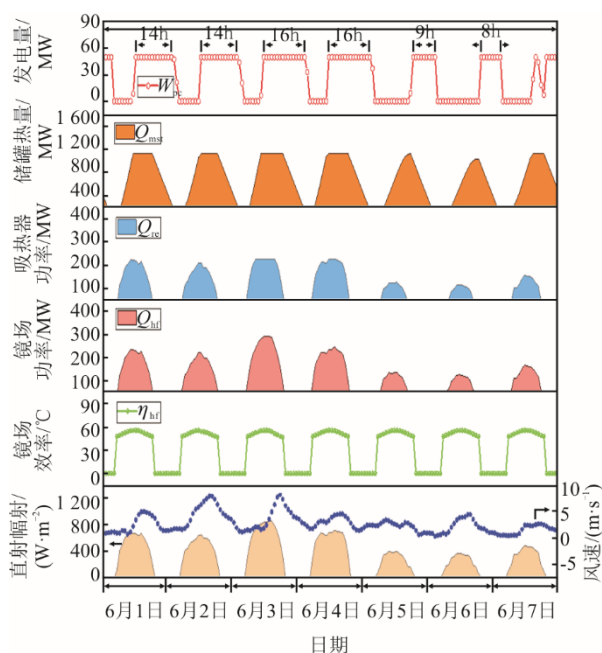


图8 50 MW 二次反射电站在6月的综合性能评估
Fig.8 Performance evaluation of the 50 MW beam-down tower concentrating solar power station

4 结 论

本文依托玉门鑫能第一电力有限公司 50 MW 二次反射塔式电站开展了运行测试及联合运行的仿真计算,并得出了以下结论。

1) 6月12日运行测试结果表明,当直射辐射为 739.7 W/m^2 时,熔盐出口温度可以在 $559 \text{ }^\circ\text{C}$ 下维持 50 min 。

2) 6月12日 $12:00$ 定日镜场余弦效率、阴影遮挡效率、二次反射阴影效率和大气透射率分别为 0.8568 、 0.9997 、 0.9941 、 0.9746 。

3) 6月12日中午,二次反射镜照度和吸热器照度在 DNI 为 900 W/m^2 时的理论结果分别为 11.3 、 400.5 kW/m^2 。

4) 二次反射塔式电站在6月3日至6月4日可保持额定发电功率 50 MW 16 h 。

[参考文献]

[1] 徐敏,刘涛,朱自伟,等.基于时空互补特性的多能源

- 源荷协调优化调度[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 104-111.
- XU Min, LIU Tao, ZHU Ziwei, et al. Coordinated optimal scheduling of multi energy sources and loads based on spatiotemporal complementarity[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 104-111.
- [2] 梁立晓, 陈梦东, 段立强, 等. 储热技术在太阳能热发电及热电联产领域研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 8-15.
- LIANG Lixiao, CHEN Mengdong, DUAN Liqiang, et al. Research progress of thermal energy storage technology in solar thermal power generation and combined heat and power generation[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 8-15.
- [3] 郑建涛, 裴杰. 我国聚光型太阳能热发电技术发展现状[J]. 热力发电, 2011, 40(2): 8-9.
- ZHENG Jiantao, PEI Jie. Status quo of developing power generation technology by using heat of light-concentrating solar energy in China[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(2): 8-9.
- [4] RABL A. Tower reflector for solar power plant[J]. Solar Energy, 1976, 18: 269-271.
- [5] NOONE C J, TORRILHON M, MITSOS A. Heliostat field optimization: a new computationally efficient model and biomimetic layout[J]. Solar Energy, 2012, 86: 792-803.
- [6] EDDHIBI F, AMARA M, BALGHOUTHY M, et al. Design and analysis of a heliostat field layout with reduced shading effect in southern Tunisia[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 28973-28996.
- [7] SCHMITZ M, SCHWARZBÖZL P, BUCK R, et al. Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators[J]. Solar Energy, 2006, 80: 111-120.
- [8] SALDIVIA D, BILBAO J, TAYLOR R. Optical analysis and optimization of a beam-down receiver for advanced cycle concentrating solar thermal plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 197: 117405.
- [9] LEONARDI E. Detailed analysis of the solar power collected in a beam-down central receiver system[J]. Solar Energy, 2012, 86: 734-745.
- [10] COOPER T, DÄHLER F, AMBROSETTI G, et al. Performance of compound parabolic concentrators with polygonal apertures[J]. Solar Energy, 2013, 95: 308-318.
- [11] ALI M, RADY M, ATTIA M, et al. Consistent coupled optical and thermal analysis of volumetric solar receivers with honeycomb absorbers[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 1849-1861.
- [12] TAGLESALAZAR P, PRIETO C, LÓPEZ-ROMÁN A, et al. A transient heat losses model for two-tank storage systems with molten salts[J]. Renewable Energy, 2023, 219: 119371.
- [13] KINDI A, SAPIN P, PANTALEO A, et al. Thermo-economic analysis of steam accumulation and solid thermal energy storage in direct steam generation concentrated solar power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 274: 116222.
- [14] LI P, QIAN T, LI J, et al. Thermo-economic analysis of a novel partial cascade organic-steam Rankine cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 283: 116941.

(责任编辑 杨嘉蕾)