

DOI:10.11918/201911048

塔式光热电站吸热器的壁面热流分布

应兆平¹, 何伯述^{1,2}

(1.北京交通大学 机械与电子控制工程学院 燃烧与热力系统研究所,北京 100044;
2.北京交通大学海滨学院 机械与动力工程学院,河北 黄骅 061199)

摘 要: 为深入研究塔式光热电站吸热器壁面的热流密度分布,基于赤道聚光策略和基本光路原理,利用光学仿真分析软件 SolTrace 对西班牙 Gemasolar 塔式光热电站系统进行几何与光学建模. 通过结果敛散性判断,确定采用 5 000 000 条射线进行模拟研究;模拟结果与文献研究结果符合良好,证明模型准确可靠. 采用夏至日设计点标准状况下的太阳光入射辐射,通过射线追踪的方法,模拟获得外露管式吸热器壁面上的热流密度分布,发现不同吸热管壁面接收的太阳辐射热流密度变化规律与定日镜场环形分布方式有关;单根吸热管时壁面热流密度分布不均匀. 分析冬至日午时吸热管的热流密度分布,对比吸热管壁面热流分布的模拟结果与相应的近似高斯分布,发现近似处理与模拟结果差异较大. 研究结果表明,对于塔式吸热器壁面热流分布,采用 SolTrace 仿真分析比用近似高斯分布更具有实际指导意义.

关键词: 太阳能;塔式光热电站;SolTrace;热流分布;近似高斯分布

中图分类号: TK513 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)01-0087-07

Heat flux distribution on wall of receiver in a solar power tower plant

YING Zhaoping¹, HE Boshu^{1,2}

(1. Institute of Combustion and Thermal Systems, School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Haibin College of Beijing Jiaotong University, Huanghua 061199, Hebei ,China)

Abstract: To enhance the knowledge of non-uniform heat flux distribution of receiver in a solar power tower plant, an optical simulation software, SolTrace, was used to model the Gemasolar plant system geometrically and optically, and the wall heat flux distribution of the receiver was obtained. According to the convergence judgment, 5 000 000 rays were used for follow-up study. The accuracy of the model was verified by comparison with results from the litearture. Under the standard condition at the design point on Summer Solstice, the incident radiation of sunlight was adopted. From the simulation results, it is found that the variation of the solar radiation heat flux received on the wall of different receiver tubes is related to the annular distribution of the heliostat field. For a single absorber, the wall heat flux distribution is non-uniform, and the comparison with the Gaussian approximation distribution proves that this distribution is quite different from the design condition. Then, the heat flux distribution of the receiver at noon of Winter Solstice was obtained by using the model. Overall, it is concluded that SolTrace simulation is more practical than the simplified Gaussian approximation distribution for the treatment of wall heat flux distribution of external cylindrical absorber.

Keywords: solar energy; solar power tower plant; SolTrace; heat flux; Gaussian approximation

光热发电技术具有良好的应用前景,也是目前太阳能利用领域的研究热点之一. 塔式太阳能光热发电系统是利用定日镜场、塔式吸热器及常规发电装置,通过“光—热—电”的转化过程,有效转换太阳能的一种技术形式. 然而,对于塔式光热电站吸热器辐射热流密度分布的大量模拟计算和实验测量研究表明,吸热器壁面具有能流密度不均匀分布特性,并带来了相应的热强度挑战^[1]. 具体体现为:在

光转化为热的聚光过程中,不均匀的太阳辐射经定日镜聚集到吸热器表面后,会形成不均匀的热流密度分布,这将影响吸热器与传热流体运行温度的均匀性,导致局部温度过高和温度梯度过大,进而造成局部热斑烧毁、吸热涂层性能减退、传热流体分解以及吸热器应力破裂等问题. 例如,美国 Solar Two 塔式光热电站曾发生因吸热器壁面热流密度过高造成结构损坏的事故^[2].

目前,对塔式吸热器表面能流密度分布的研究分为实验测量、模拟计算和近似处理. 实验测量结果多来源于电站的运行报告,如美国 Solar One 电站^[2]和西班牙 TSA 电站^[3];模拟计算方面,若干光

收稿日期: 2019-11-11

作者简介: 应兆平(1994—),男,硕士研究生;

何伯述(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 何伯述,hebs@bjtu.edu.cn

学软件如 HFLCAL^[4]、MIRVAL^[5] 和 SolTrace^[6-7] 可以用于计算腔体吸热器壁面能流分布,但尚未见到这类软件用于对环绕型塔式光热电站建模及外露管式吸热器壁面热流分布的模拟. 目前,对光热电站吸热器壁面热流密度分布的研究主要侧重于整个吸热器表面,而对于组成吸热器的单一吸热管相关研究和分析较少. 吸热管壁面接受的非均匀热流对吸热管内换热流体(如水/水蒸气、熔盐和导热油)的流动换热特性^[8-9] 和吸热管的热应力场^[10] 具有重要的影响. 然而,目前多数研究采用的是近似处理的方式,例如一些研究者^[11-13] 采用近似高斯分布(Gaussian approximation)来近似处理管式吸热器壁面热流分布,但这种方法只是对实际工况的近似假设,且对于同一吸热器不同的吸热管采用相同的热流分布,与实际工况不符.

本文采用光学仿真分析软件 SolTrace 对环绕型塔式光热电站系统进行几何与光学建模,获得外露管式吸热器壁面上热流密度分布,通过与文献结果进行对比论证模型准确性. 通过对比分析夏至日设计点时刻和冬至午时时刻获得吸热管的壁面热流密度分布与相对应的近似高斯分布,论证利用仿真软件获得的结果更准确可靠,对工程应用具有更重要的指导意义.

1 塔式光热电站建模

塔式太阳能光热电站的主要组成部分包括聚光装置、塔式吸热器、热能转换装置、储热装置等. 为了获得在设计点工况下吸热器壁面热流分布,需要对聚光装置与吸热器进行几何与光学建模. 设计点取为北半球夏至日的正午 12 点. 建模对象为西班牙的 Gemasolar 电站,该电站是全球首座商业化全天候持续发电的大规模中央塔式熔盐传热蓄热电站,成功示范了熔盐塔式光热发电技术的可行性,是光热发电产业和可再生能源利用的一个里程碑,对光热电站的设计、建设和运行具有深远意义^[14-16].

该电站位于西班牙的 Fuentes de Andalucía,北纬 37.56°,西经 5.33°. 电站鸟瞰图如图 1 所示.

该光热电站定日镜场和吸热器的设计参数如下:定日镜场为环绕型,离吸热器中心点最小半径为 80 m,最大半径 880 m,定日镜数量 2 650 片,大小 11 m× 10 m、类型为焦点曲率单面镜. 吸热塔高 130.5 m,吸热器为开放圆柱形管式,高度 10.5 m,吸热器直径 8.5 m,吸热器上总计有 558 根吸热管,吸热管材质为 alloy 800H,每根吸热管外径 2.25 cm,壁厚 1.5 mm. 吸热器的组合形式为:首先由 18 根平直不锈钢制吸热管构成 1 块面板,再由 31 块面板以三十一边形组成吸热器.



图 1 Gemasolar 电站鸟瞰图^[14]

Fig.1 Aerial view of Gemasolar plant^[14]

1.1 建模

首先定义太阳光线信息,如图 2(a), s 为单位太阳位置矢量, $s = (\cos \varphi \sin \gamma, \sin \varphi, \cos \varphi \cos \gamma)$. φ 为高度角, γ 为方位角. 规定方位角由正南算起,向西为正,向东为负,取值范围为 $(-180^\circ \sim 180^\circ)$. 设计点时刻太阳的高度角和方位角分别为 $14.12^\circ, 0^\circ$. 则设计点时太阳矢量 s 的坐标为 $(0, 0.24, 0.97)$,太阳形状(Sun Shape)为 Gaussian 类型.

定日镜反射率 0.93,吸热管外涂有 Pyromark 涂层,假设吸收率等于 0.94. 在 SolTrace 软件的 Optics 面板中设置相关光学信息.

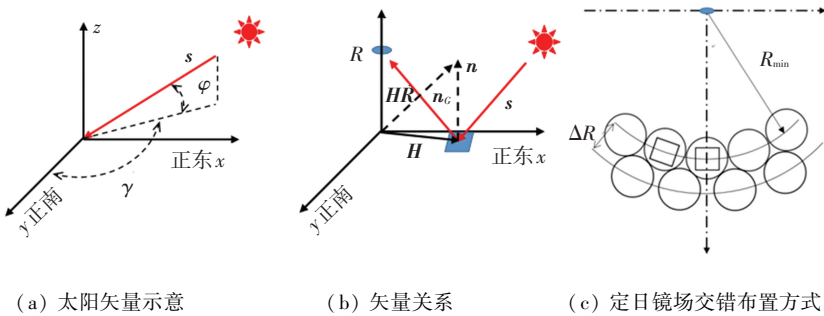


图 2 几何建模原理

Fig.2 Principle of geometric modeling

由图 1 可以看出,该电站定日镜与吸热器的数量较多,而该图只能得到定日镜的粗略相对位置. 本文的几何建模利用赤道聚光策略^[14]与光路基本原理,原理如图 2(b)所示,取单一定日镜,吸热管围绕坐标系原点布置. 具体设置方法为:假设定日镜 H 的坐标为 (x_H, y_H, z_H) ,吸热管 R 的坐标为 (x_R, y_R, z_R) ,吸热管 R 的坐标选取需满足定日镜到吸热管的向量 HR 指向 z 轴,其中向量 HR 表示为

$$HR = (x_R - x_H, y_R - y_H, z_R - z_H),$$

图 2(b)中法向量 n 的计算公式为

$$n = \frac{HR}{|HR|} + \frac{s}{|s|},$$

图 2(b)中法向量 n_G 的计算公式为

$$n_G = n + H = (x_n + x_H, y_n + y_H, z_n + z_H).$$

确定单一定日镜的几何关系后,可推广到定日镜场. 根据文献[17]中的方法,光热电站定日镜场的几何建模需要满足交错布置的原则. 定日镜场采用交错布置方式排列,布置形状如辐射网格状,如图 2(c)所示,这样可以最大程度避免因前方定日镜遮挡造成的光学损失. 吸热塔位于坐标系的原点,定日镜布置于离原点不同距离的圆环上,不同环的半径根据定日镜场最小半径依次类推. 最终 Gemasolar 电站几何建模示意图如图 3 所示.

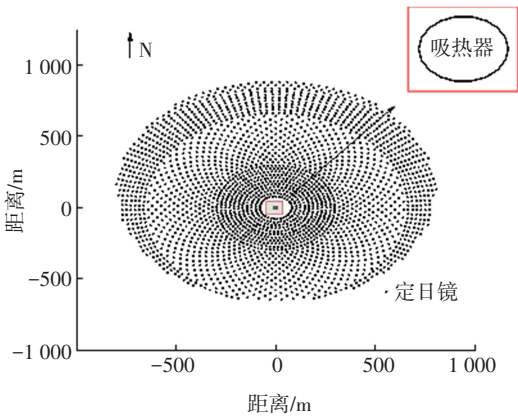


图 3 Gemasolar 电站定日镜场与吸热器位置信息
Fig.3 Heliostat field and receiver locations of Gemasolar plant

1.2 射线追踪

SolTrace 射线追踪基于蒙特卡洛算法^[6-7]. 射线追踪示意图如图 4 所示(图中只示出了部分光线). 结果收敛性判定如表 1 所示,选用 4 套不同追踪数量的射线,当平均热流密度与峰值热流不确定度达到相对误差<1%时,视为结果不再变化. 考虑到增加追踪数量会增加计算量,最终选用 5 000 000 条射线.

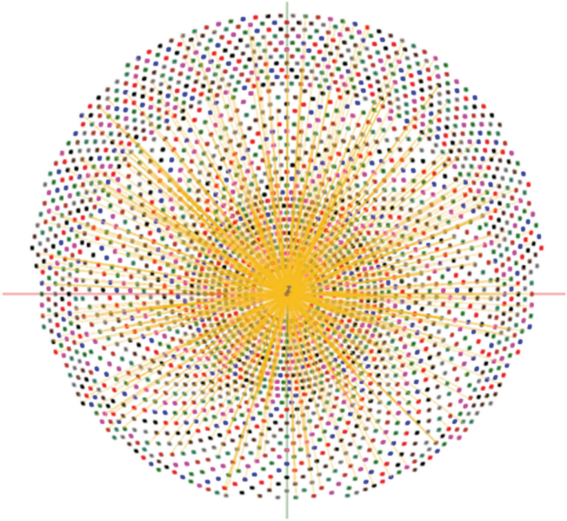


图 4 射线追踪示意
Fig.4 Schematic diagram of ray-tracing

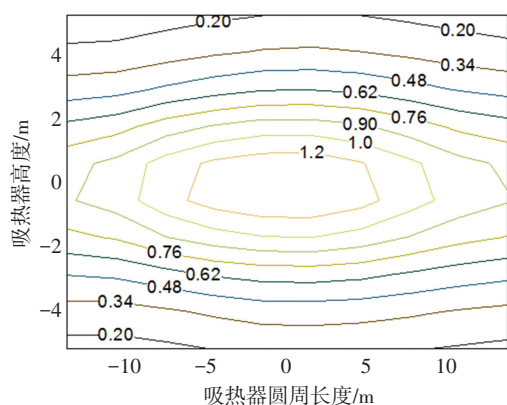
表 1 计算收敛判断

Tab.1 Convergence judgment of calculation

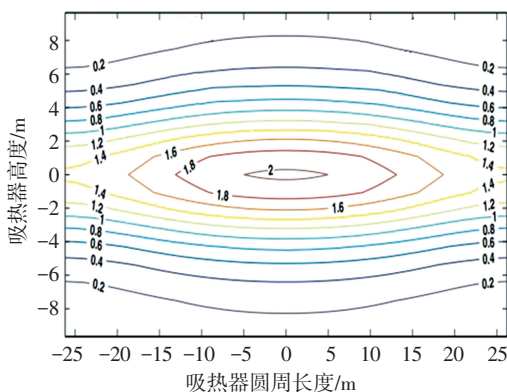
射线追踪数量	平均热流密度/ (MW · m ⁻²)	峰值热流 不确定度/%
1 000 000	559 522	±1.07
5 000 000	559 917	±0.48
10 000 000	560 238	±0.34
20 000 000	560 392	±0.24

1.3 模拟结果准确性验证.

夏至日设计点时刻标准状况下(直接法向辐射为 1 000 W/m²)射线追踪结果计算得出的吸热器壁面太阳辐射热流密度分布如图 5(a)所示. 从定性角度分析,由图 5(a)可看出,太阳光经过聚焦后到达吸热器表面上形成的热流密度分布线型与文献[18]中的结果(如图 5(b)所示)类似,证明了模拟结果准确可靠;从定量角度分析,模拟结果的热流峰值和均值分别为 1.35、0.70 MW/m²,而文献[15]中获得该值对应为 1.20、0.80 MW/m²,相对误差同为 12.50%,也证明了模拟结果准确. 此外,一份关于美国 Solar Two 光热电站实际运行情况的报告^[2]表明,在该电站吸热器面板的一个位置(北偏西 30°测点)测得最大太阳辐射热流为 0.75 MW/m². 均说明了吸热器壁面上热流密度量级在 MW/m²,相比入射光线强度提高了 3 个量级(聚光比约为 1 000);而从图 5 中可看出热流密度分布很不均匀. 因最大热流密度对吸热器安全有重要影响,因此,为保证吸热器安全运行,准确掌握吸热器壁面热流分布至关重要.



(a) 模拟结果

(b) 文献结果^[18]图 5 壁面热流密度分布 (MW/m^2)Fig.5 Wall heat flux distribution (MW/m^2)

2 设计点吸热器壁面热流密度分布

在针对吸热器管内工作流动换热的研究中^[11-13],对吸热管壁面的热流采用简单近似处理,即选用近似高斯分布,吸热管轴向热流密度服从正态分布函数,受热圆周热流密度服从余弦分布函数。

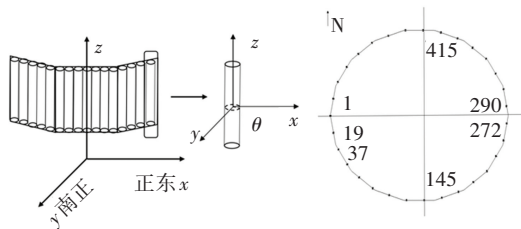
吸热管外表面上的热流密度近似高斯分布可表示为

$$q(z, \theta) = \begin{cases} M \cdot e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot \cos \theta, & \cos \theta \geq 0; \\ 0, & \cos \theta < 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为壁面能流密度的极大值; z 为吸热管壁面上一点离中心截面的距离,取值范围为 $(-5.25 \sim 5.25)$; θ 为径向角。为进一步简化,如图 6(a) 所示(未画出所有吸热管),在壁面热流分布图像绘制时,取每个管子的中心点为坐标系原点。并将 558 根吸热管按图 6(b) 所示方式逆时针进行编号。图中两个节点之间的直线表示 1 块面板,每个面板由 18 根吸热管构成,而 31 块面板(即 31 根直线)以三十一边形组成吸热器。如此标记的目的是为了方便区分不同方位上的吸热管。

根据编号得到不同吸热管(编号从 1 开始)的壁面热流密度峰值和平均值,如图 7 所示。从图 7 中可看出,吸热管壁面接收的太阳辐射热流密度峰值呈现出

一定的规律:吸热管按照环形布置,面向正西方向编号为 1 的吸热管壁面热流密度峰值为 $1.18 \text{ MW}/\text{m}^2$;吸热管编号增大表示逐渐朝向南方,壁面热流密度峰值逐渐降低,最低值出现在接近朝向正南方向编号为 136 的吸热管上,为 $0.93 \text{ MW}/\text{m}^2$;吸热管编号增大,从朝南方向逆时针逐渐转为朝向正北方向,壁面热流峰值显著增大,并在编号 412 时达到最大值 $1.72 \text{ MW}/\text{m}^2$;编号继续增大,吸热器朝向转为西方向,壁面热流密度峰值开始减小,壁面热流密度峰值最终接近编号为 1 的吸热管的数值。吸热管壁面热流密度峰值规律变化的原因是因为该塔式光热电站为北向环绕型布置的定日镜场,且以吸热塔为中心,定日镜场东西方向对称,而南面的定日镜少于北面,因此面向正西、正东方向的吸热管壁面所受热流相似;而朝向北方向吸热管壁面热流峰值更大,而朝向南方向的吸热管壁面热流峰值则最小。



(a) 吸热管局部坐标

(b) 吸热管编号

图 6 吸热管局部坐标与编号

Fig.6 Local coordinates and numbers of receiver tubes

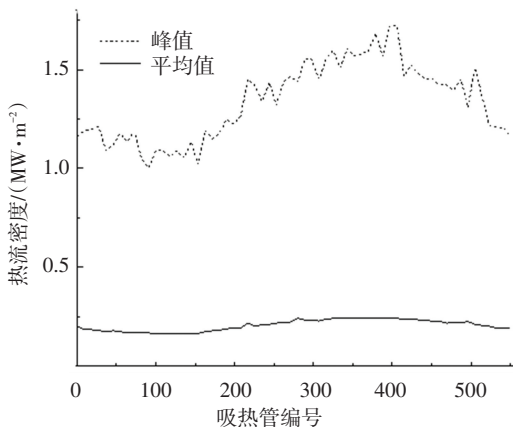


图 7 吸热管壁面热流密度峰值和平均值

Fig.7 Peak value and average value of wall heat flux of receiver tubes

由图 7 可知,大部分吸热管壁面热流密度平均值在 $0.20 \sim 0.30 \text{ MW}/\text{m}^2$,与峰值相差一个数量级,且变化程度很小;而吸热管壁面热流密度峰值变化明显,说明了吸热管壁面的热流密度分布很不均匀,且不均匀程度的规律类似于峰值热流分布规律。在设计光热电站时,建议重点研究壁面热流分布最不均匀的吸热管,对于北向环绕型布置定日镜场的电

站, 着重关注北向吸热管, 若是这些极端吸热管(高壁面热流密度)运行工况能满足安全要求, 说明其他吸热管也是安全的。

选取编号为 412 的吸热管进行分析, 图 8 分别为光学软件模拟获得的壁面热流密度分布图与根据公式(1)获得的近似高斯分布图。从定性角度分析, 通过对比可以发现, 吸热管上的热流密度分布接近为近似为高斯分布, 但热流密度等值线曲折而不平滑, 且热流分布更集中于吸热器中间部位, 说明不均匀程度更强。

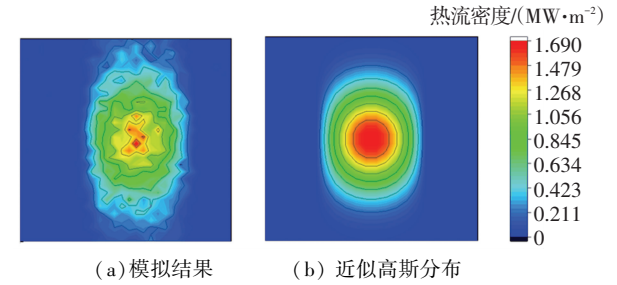


图 8 编号 412 管子壁面热流密度分布

Fig.8 Wall heat flux distribution on the No.412 receiver tube

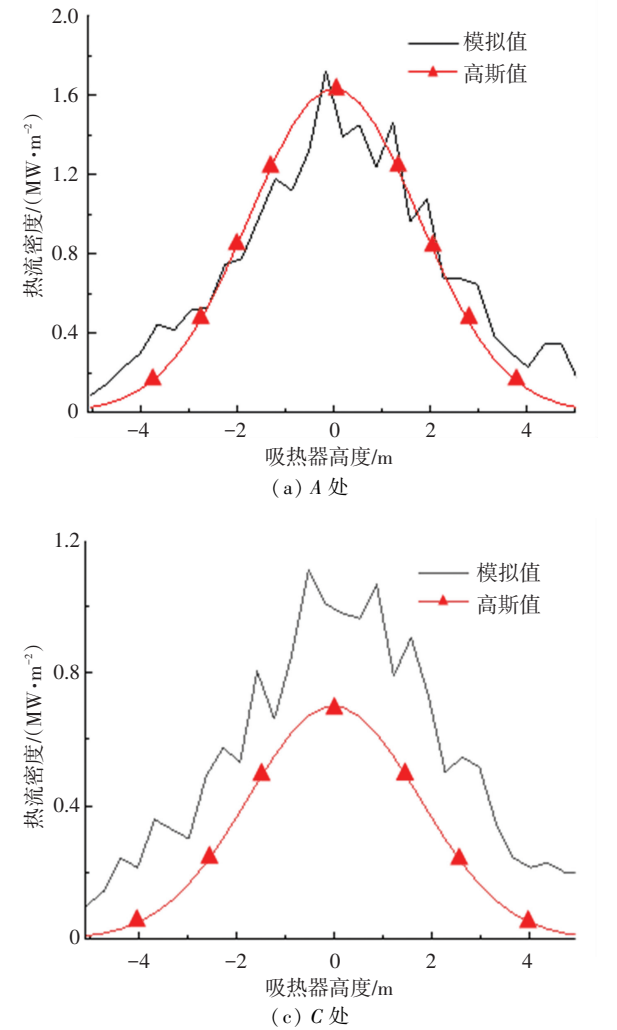


图 10 编号 412 吸热管壁面不同位置处热流密度分布与近似高斯分布对比

Fig.10 Comparison between simulative heat flux distribution and Gaussian approximation distribution at four locations on the wall of No. 412 receiver tube

编号 412 的吸热管壁面上 4 处不同位置 A、B、C、D (如图 9 所示) 的热流密度分布与近似高斯分布如图 10 所示。

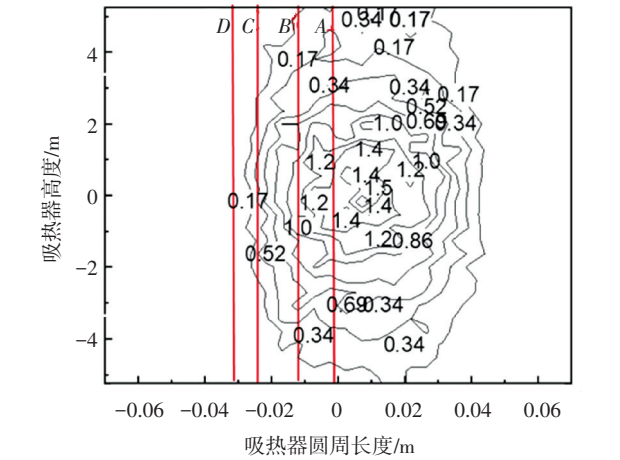
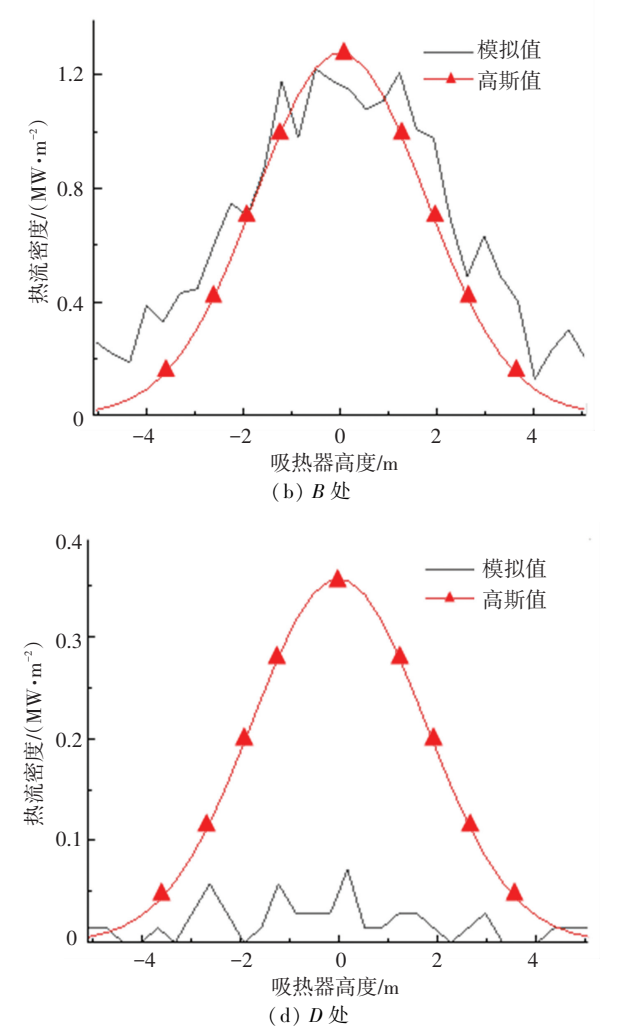


图 9 编号 412 吸热管壁面上 4 处不同位置 A、B、C、D

Fig.9 Four different locations (A, B, C, and D) on the wall of No. 412 receiver tube



由图 9 和图 10 发现,在这 4 个位置,吸热管壁面上模拟获得的设计点的热流密度分布与近似高斯分布差异较大,主要体现为热流密度分布更集中,且从管子两端到中心的热流密度波动变化更剧烈。由图 10 可发现,在该特定位置,高斯分布具有一定的代表性,这也是部分研究采用高斯分布来近似处理吸热管壁面热流分布的原因,而关于近似处理的有效性和误差需要进一步研究确定^[14]。近似高斯分布表现的变化规律更平缓,相较而言,设计点应考虑更极端的工况,即热流壁面更加集中,变化更剧烈的情况,这样设计的吸热器更能面对复杂而困难的运行条件。因此对于研究实际工况运行下塔式吸热器的换热特性,考虑到实验测量的困难,用光学软件模拟的方式比近似处理更具有指导意义。

3 冬至午时吸热器壁面热流密度分布

利用该模型获得了冬至(12月21日)午时时刻 Gemasolar 光热电站吸热器不同吸热管的壁面热流密度分布,该时刻北半球接受太阳辐射为全年最低,获得该时刻的热流密度分布可以检验电站吸热器能否正常运行。图 11 为编号 421、281、141 和 1 吸热管(分别代表北、东、南、西 4 个方位)壁面热流分布(上面 4 幅图)和对应的近似高斯分布(下面 4 幅图)。由图 11 可知,朝北的吸热管 421 接收了最大

的太阳辐射热流 1.36 MW/m^2 ,东西两侧的吸热管热流分布类似且最大辐射热流接近,约为 0.90 MW/m^2 。最南端的吸热管 141 壁面受到的辐射热流峰值仅为 0.41 MW/m^2 。与夏至午时光热电站吸热器接收热流密度极值(如图 7 所示)相比,冬至午时时刻不同吸热管壁面峰值热流有不同程度的降低,最大下降值(约 0.50 MW/m^2)出现在南向吸热管处。可见冬至午时吸热器所受太阳辐射最低,管内换热流体(如熔盐)可能会因吸热量不足而出现凝固现象,因此获得该时刻吸热器的热流分布对于分析换热流体流动换热行为和吸热器安全运行都至关重要。故对于电站设计及实际运行,不能仅考虑设计点(夏至),还应考虑冬至午时时刻。

对比图 11 不同的 4 根吸热管壁面的热流密度分布与近似高斯分布,发现二者差异较大,且对于 4 种具体的壁面热流分布,其近似高斯分布的特征相同。此外,如图 11(b)和图 11(d)所示,两根吸热管虽然热流分布不同,却因为最大辐射热流相近,造成对应的近似高斯分布接近相同。以上两点均与实际工况不符,从这个角度来看,对于研究实际工况运行下塔式吸热器的换热特性,用近似处理的方式并不合适,且考虑到实际测量的困难性,用光学软件模拟更可靠可行。

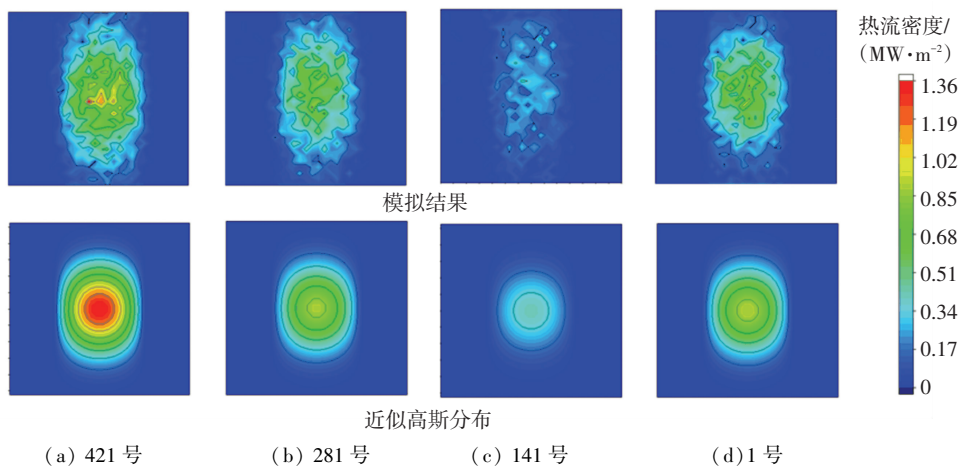


图 11 冬至午时 4 个编号吸热管热流密度分布模拟结果与近似高斯分布

Fig.11 Simulative heat flux distribution and Gaussian approximation distribution of four receiver tubes at noon on winter solstice

4 结 论

本文基于赤道聚光策略和基本光路原理,利用光学仿真分析软件 SolTrace 对 Gemasolar 塔式光热电站系统进行了几何与光学建模。采用夏至日设计点时刻标准状况下的太阳光入射辐射,通过射线追踪的方法,模拟获得了塔式光热电站吸热器的壁面热流密度,获得以下结论:

1) 吸热管壁面接收的太阳辐射热流密度呈现出一定的规律,变化的规律与定日镜场的布置方式相关。

2) 不同吸热管壁面热流密度平均值比峰值数值大小相差一个数量级,说明吸热管壁面的热流密度分布很不均匀,且不同吸热管的不均匀程度的变化规律类似于峰值热流分布规律。

3) 吸热器最北端面板编号为 412 吸热管壁面上

4 个位置处模拟获得的设计点下热流密度分布与近似高斯分布热流密度差异较大. 对于实际工况运行下塔式吸热器的换热特性, 用光学软件模拟获得壁面热流密度的方式具有指导意义.

4) 获得冬至午时时刻刻光热电站吸热器 4 个方位(北、东、南、西, 编号 421、281、141 和 1)吸热管的壁面热流密度分布, 发现冬至午时吸热器所受太阳辐射最低, 最小值出现在朝南向的吸热管壁面处, 最大下降值约 0.50 MW/m^2 . 并对比分析 4 根吸热管壁面的热流密度分布与对应的近似高斯分布, 证实对于研究实际工况运行下塔式吸热器的换热特性, 用光学软件模拟是比近似处理更可靠的方式.

参考文献

[1] 何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(30): 3208
HE Yaling, WANG Kun, DU Baocun, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(30): 3208. DOI: 10.1360/N972016-00604

[2] LITWIN R Z P, PACHECO J E. Receiver system lessons learned from solar two, No. SAND2002-0084[R]. Livermore: Sandia National Labs, 2002

[3] BAKER A, FAAS S, RADOSEVICH L G, et al. US-Spain evaluation of the Solar One and CESA-I receiver and storage systems, No. SAND88-8262[R]. Livermore: Sandia National Labs, 1989

[4] BUCK R, BRAUNING T, DENK T, et al. Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems (REFOS) [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 124(1): 2. DOI: 10.1115/1.1445444

[5] BESARATI S M, YOGI G D, STEFANAKOS E K. Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 84: 234. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.04.030

[6] WINSTON R, GORDON J M, YELLOWHAIR J, et al. Solar optical codes evaluation for modeling and analyzing complex solar receiver geometries[C]//Proceeding of Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XI. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2014, 9191: 91910M. DOI: 10.1117/12.2062926

[7] WENDELIN T. SolTRACE: A new optical modeling tool for concentrating solar optics[C]//ASME 2003 International Solar Energy Conference. Hawaii: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2003: 253

[8] BEHAR O, KHELLAF A, MOHAMMEDI K. A review of studies on

central receiver solar thermal power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23: 12. DOI: /10.1016/j.rser.2013.02.017

[9] HE Yaling, WANG Kun, QIU Yu, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 448. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006

[10] 王富强, 帅永, 谈和平. 间歇热流下管式吸热器温度场及热应力场分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(9): 70
WANG Fuqiang, SHUAI Yong, TAN Heping. Temperature and thermal stress field analyses of tube receiver under intermittent concentrated solar irradiation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(9): 70. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2013.09.013

[11] MAROCCO L, CAMMI G, FLESCHE J, et al. Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 105: 22. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.002

[12] 王婷, 庞力平, 杨勇平. 两段式塔式太阳能腔式吸热器设计及性能分析[J]. 动力工程学报, 2017, 37(4): 313
WANG Ting, PANG Liping, YANG Yongping. Design and performance analysis of a two-stage tower-type solar cavity receiver[J]. Journal of Power Engineering, 2017, 37(4): 313

[13] 王幸智. 外露管式太阳能熔盐吸热器的传热研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
WANG Xingzhi. Research on heat transfer performance of external tubular receiver using molten salt as HTF for tower solar plant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013

[14] ASTOLFI M, BINOTTI M, MZAAOLA S, et al. Heliostat aiming point optimization for external tower receiver[J]. Solar Energy, 2017, 157: 1114. DOI: 10.1016/j.solener.2016.03.042

[15] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M R, SORIA-VERDUGO A, ALMENDROS-IBÁÑEZ J A, et al. Thermal design guidelines of solar power towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1): 428. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.014

[16] MONTOYA A, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M R, LOPEZ-PUENTE J, et al. Numerical model of solar external receiver tubes: Influence of mechanical boundary conditions and temperature variation in thermoelastic stresses[J]. Solar Energy, 2018, 174: 912. DOI: 10.1016/j.solener.2018.09.068

[17] 王志峰. 太阳能热电站设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014
WANG Zhifeng. Design of solar thermal power plants[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014

[18] COLLADO F J, GUALLAR J. Fast and reliable flux map on cylindrical receivers[J]. Solar Energy, 2018, 169: 556. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.037

(编辑 杨 波)