

对称型太阳能聚光集热系统吸热器 能流分布的运动累加计算方法

颜 健 彭佑多 程自然 余佳焕

湖南科技大学机械健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201

摘要 基于太阳能聚光集热系统的几何对称特性, 提出一种运动累加方法来计算吸热器的能流密度分布。采用光线跟踪方法, 推导了吸热器表面能流分布的运动累加数学模型, 此模型可以将光线跟踪过程转换为旋转运动或平移运动, 避免大量求解光线与吸热器曲面的联立方程组。在 Visual C++ 平台编制运动累加程序, 计算了典型的碟式和槽式系统配置不同吸热器的能流密度分布, 并与文献对比验证了该方法的正确性。结果表明, 在碟式一腔式吸热器中, 跟踪光线 6.10×10^8 根需 112 s, 在结果符合的情况下可跟踪光线 9.648×10^7 根, 这样仅需 16 s。运动累加方法的计算过程较简单, 且具有一定的计算效率, 可以为对称特征的聚光集热系统参数协同优化提供一定参考。

关键词 几何光学; 运动累加方法; 光线跟踪方法; 聚光集热系统; 几何对称性; 能流密度分布

中图分类号 TK513.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0508001

Moving Accumulative Computation Method for Flux Distribution of Heat Absorber in Symmetry Concentrating Solar Collector System

Yan Jian Peng Youduo Cheng Ziran Yu Jiahuan

*Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China*

Abstract Based on the characteristics of geometric symmetry of the concentrating solar collector system, a moving accumulative method is put forward, which is used to compute the solar flux distribution of the absorber. Using the ray tracing method to deduce the moving accumulative mathematical model of the absorber flux distribution, the model can effectively convert the ray tracing process into rotary or rectilinear motion. Therefore, the numerous equations of rays and absorber calculation are avoided. The moving accumulative programs are compiled and the absorber solar flux distributions of the dish system and parabolic trough system are calculated by Visual C++ software. Then the results are compared with references, which validate the correctness of the moving accumulative mathematical model. The result shows that, in dish system with cavity receiver, calculation of 6.10×10^8 rays need 112 s, but calculation of 9.648×10^7 rays just need 16 s and calculated results are basically consistent. The moving accumulative method calculation process is relatively simple and the computational efficiency is improved, which can provide reference to collaborative optimization for the symmetry solar concentration and collector system.

Key words geometric optics; moving accumulative method; ray tracing method; concentrating solar collector system; geometric symmetry; flux density distribution

OCIS codes 080.1753; 080.2740; 220.2740

1 引 言

太阳能是清洁环保、供应充足的可再生能源, 但能流密度低, 易受环境影响, 要实现太阳能光热的高品位

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51275166, 51576061)、湖南科技大学研究生创新基金项目(S140018)

作者简介: 颜 健(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事太阳能光热发电系统光机热多场耦合协同优化方面的研究。

E-mail: yanjiancaoyue@163.com

导师简介: 彭佑多(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事机械系统动力学、新能源技术与装备等方面的研究。

E-mail: ydpeng1964@163.com (通信联系人)

利用,必须进行大面积的能量聚集^[1-3]。此技术中吸热器表面能流分布是评价聚光集热系统性能的重要指标,是系统关键热利用部件性能分析的热流边界,也是系统参数协同优化设计的重要耦合数据。然而,吸热器能流分布模拟涉及太阳光能的传输和吸收等复杂过程,尤其是几何结构复杂的聚光器和吸热器,其计算效率较低,一般难以适用复杂聚光集热系统的优化设计。因此,发展既高效又准确的吸热器表面能流分布的计算方法,是太阳能光热利用领域的研究重点之一^[4-5]。

吸热器能流密度分布的模拟方法主要有:理论计算方法、锥体光学法、光线跟踪方法、有限元方法和蒙特卡罗方法等^[5-10]。Jeter^[6-7]提出了基于几何分析和数值积分的理论方法,探讨了碟式和槽式聚光系统的能流分布特性,但提出的理论方法较难适用复杂几何形状的聚光集热系统,具有一定的局限性。刘颖等^[9]基于有限微元离散的思想,提出了碟式聚光系统焦面能流分布的有限元计算方法,且能适用较复杂的腔式吸热器能流分布计算,但公式推导较为复杂。许成木等^[11]提出了槽式系统能流分布的频数统计方法,但仅探讨了焦平面的能流分布特性。蒙特卡罗的光线跟踪方法具有理论模型简单且实施过程方便灵活的特点,得到了广泛应用^[4-5,12-14]。何雅玲课题组提出了聚光集热系统统一的蒙特卡罗建模方法,并以碟式、槽式、塔式以及线性菲涅耳式等系统为对象,开展了吸热器能流分布的研究,得到了诸多有益的结果^[4-5,13-14]。此外,确定性的光线跟踪方法也得到较好的应用^[8,10]。上述诸多的能流分布计算方法,均能通过增加离散网格或跟踪光束的数量来提高模拟结果的准确性,但仍需权衡结果精度和计算效率。

实际工程应用的碟式^[15-16]、槽式^[14]、线性菲涅耳式^[13,17-18]和复合抛物面集热器(CPC)等太阳能聚光集热系统,结构上具有几何对称特性。本文依据聚光集热系统的几何对称特性,基于光线跟踪方法,发展了一种吸热器能流分布的运动累加计算方法。针对旋转对称型和等截面平面对称型的聚光集热系统,详细推导了典型几何结构的吸热器表面能流分布的运动累加计算数学模型,并以碟式—平面吸热器、碟式—腔式吸热器、槽式—平面吸热器、槽式—圆柱吸热器等系统为例,开展吸热器表面的能流分布模拟,并与文献对比验证运动累加方法的正确性。

2 旋转对称型的聚光集热系统

将反射镜曲面的母线绕中心轴线旋转一周,获得旋转对称型聚光系统,工程应用时配置的吸热器结构一般也具有旋转对称性,且旋转对称轴与反射镜曲面的中心轴线重合,例如碟式/斯特林技术、CPC技术等^[15-16]。典型旋转对称型聚光集热系统的光学示意如图1所示。旋转对称型的运动累加计算方法,是将反射镜面按径向和周向进行网格等分;计算任意一个周向分区的所有网格内太阳反射光线与吸热器腔体曲面的交点;而后将各交点依次绕中心轴线旋转相应角度,得到下一个周向分区内太阳反射光线与吸热器的交点,并将光线携带的能量累加至交点从属的吸热器网格区域;依次进行多次旋转运动、从属区域判别及能量累加,即可完成吸热器整体的能流分布计算。

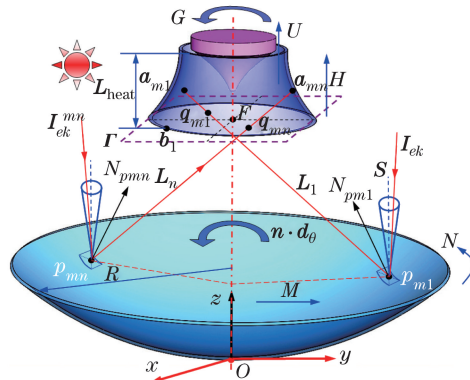


图1 旋转对称型聚光集热系统的光学分析

Fig. 1 Optical analysis of rotational symmetry concentrating system

2.1 聚光器离散及光学分析

运动累加计算方法需要在光学特性上满足旋转对称性,即反射镜曲面和太阳光锥的离散均要满足旋转

对称性。显然,蒙特卡罗光线跟踪方法是概率随机性的^[4,12],不能满足上述要求,因此必须采用确定性的离散网格形式。

如图 1 和图 2 所示,将反射镜面沿半径方向等间距划分为 M 份,沿周向等夹角划分为 N 份,网格的起始位置在 y 轴。在全局坐标系 $O-xyz$ 中(z 轴指向反射镜曲面的特征点,例如抛物曲面的焦点),聚光器反射镜曲面的统一空间方程 $F_1(x, y, z)$ 为

$$F_1(x, y, z) = z - f_1(x, y) = 0, \quad (1)$$

式中 $f_1(x, y)$ 为以 x 和 y 为变量的函数。

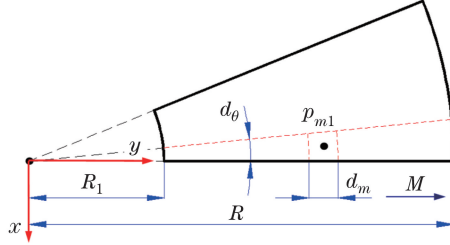


图 2 聚光器反射镜面的离散网格

Fig. 2 Discrete grid of mirror on concentrator

将编号为 $m1$ 的离散网格的中心点记为 p_{m1} , 其位置矢量为

$$p_{m1} = \left\{ 0, R_1 + \left(m - \frac{1}{2}\right) d_m, f_1 \left[0, R_1 + \left(m - \frac{1}{2}\right) d_m \right] \right\} \begin{bmatrix} \cos \frac{d_\theta}{2} & \sin \frac{d_\theta}{2} & 0 \\ -\sin \frac{d_\theta}{2} & \cos \frac{d_\theta}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 R_1 为反射镜面的空域半径,能够考虑吸热器的遮挡影响; $d_m = \frac{R-R_1}{M}$ 为离散网格的径向尺寸; R 为反射镜面的有效采光半径, $d_\theta = \frac{2\pi-\theta}{N}$ 为离散网格的周向夹角; θ 为反射镜面的缺角(为满足运动要求而设计,如碟式/斯特林光热发电系统^[10,15-16])。

根据微分几何理论,得到 $m1$ 网格中点 p_{m1} 的法线向量 \mathbf{N}_{pm1} 为

$$\mathbf{N}_{pm1} = s \cdot \left(\frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial x}, \frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial y}, \frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial z} \right) \Bigg|_{\substack{x=x_{pm1} \\ y=y_{pm1} \\ z=z_{pm1}}}, \quad (3)$$

式中 s 为符号变量,保证法线向量 \mathbf{N}_{pm1} 指向反射镜面的内侧,

$$s = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=z_{pm1}} > 0 \\ -1 & \text{if } \frac{\partial F_1(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=z_{pm1}} < 0 \end{cases}. \quad (4)$$

取 $m1$ 网格内太阳入射光锥中任意光线 I_{ek} (太阳光锥离散见第 4 节),其入射方向向量为 \mathbf{I}_{ek} 。根据镜面反射定律,推导点 p_{m1} 的反射光线参数方程

$$[x, y, z] = p_{m1} + [\mathbf{I}_{ek} - 2(\mathbf{I}_{ek} \cdot \mathbf{e}_{m1}^T) \mathbf{e}_{m1}] \cdot t, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{e}_{m1} = \frac{\mathbf{N}_{pm1}}{\|\mathbf{N}_{pm1}\|}$ 为向量 \mathbf{N}_{pm1} 的单位向量;右上标 T 为向量的转置符号; t 为参数。

依据(2)式~(5)式,依次计算第一周向分区网格内所有反射光线的参数方程,即完成了旋转对称型聚光器的光学反射计算。

2.2 吸热器能流分布计算

吸热器的结构形式和网格划分形式均会影响到运动累加方法的具体计算过程,以典型的腔式吸热器和平面吸热器为例,进行吸热器能流分布的运动累加计算的详细推导。

2.2.1 腔式吸热器

如图 1 所示,将腔式吸热器向平面 $O-xy$ 投影,并划分如图 3 所示的网格。腔式吸热器结构沿圆周等夹角分为 G 份,热管曲面(实际为金属盘管形式^[10],为简化计算将其看成曲面)沿 z 轴方向等分为 H 份,内部的反射锥体曲面沿 z 轴方向等分为 U 份,网格编号的起始位置在图 3 中进行了标识(以 No.1 标注,反射锥体的 No.1 位于锥顶位置,且均以 y 轴为起始位置进行逆时针旋转编号)。

联立反射光线方程式(5)式与吸热器的热管曲面方程,求得交点 $a_{m1}(x_1, y_1, z_1)$,如图 1 所示。在图 3 中,交点 a_{m1} 的周向夹角 θ_{m1} (向量 $\mathbf{F}_{a_{m1}}$ 与 y 轴的夹角)为

$$\theta_{m1} = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\mathbf{F}_{a_{m1}} \cdot \mathbf{e}_y}{\|\mathbf{F}_{a_{m1}}\|}\right) & x_1 < 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{\mathbf{F}_{a_{m1}} \cdot \mathbf{e}_y}{\|\mathbf{F}_{a_{m1}}\|}\right) & x_1 \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{F}_{a_{m1}}$ 为点 F 和点 a_{m1} 构成的矢量;点 F 的位置矢量为 $\mathbf{F} = [0, 0, f]$; f 为聚光器反射镜面的特征参数(如碟式聚光器的焦半径); $\mathbf{e}_y = [0, 1, 0]$ 为 y 轴的单位方向向量。

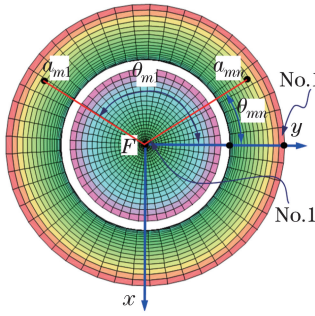


图 3 腔式吸热器的旋转对称型网格划分

Fig. 3 Grid division of rotational symmetric cavity receiver

如图 1 所示,反射镜面和腔式吸热器呈共轴旋转对称特性,理想聚光情况(太阳光锥的中心轴线与旋转对称轴平行),反射镜面 mn 网格的入射光线 I_{ek}^{mn} 与 $m1$ 网格的入射光线 I_{ek} 呈 z 轴旋转对称且唯一存在(反射镜面各网格接收的太阳光锥相同),显然相应的反射光线也是呈 z 轴旋转对称的。因此,点 a_{mn} 可以看成是将点 a_{m1} 绕 z 轴旋转角度 $n \cdot d_\theta$ 得到,此时点 a_{mn} 的周向夹角 θ_{mn} 为

$$\theta_{mn} = \text{rem}(\theta_{m1} + n \cdot d_\theta, 2\pi), \quad (7)$$

式中 n 为反射镜面网格的周向编号;函数 $\text{rem}(x, y)$ 功能为获得 x 除以 y 的余数。

当交点 a_{mn} 从属于热管曲面 hg 网格区域时满足

$$\begin{cases} (g-1) \frac{2\pi}{G} \leq \theta_{mn} \leq g \frac{2\pi}{G} & g = 1, 2, \dots, G \\ (h-1) \frac{L_{\text{heat}}}{H} + L_h \leq z_1 \leq h \frac{L_{\text{heat}}}{H} + L_h & h = 1, 2, \dots, H \end{cases}, \quad (8)$$

式中, L_{heat} 为热管曲面沿 z 轴方向的长度, L_h 为热管曲面端点 b_1 的 z 轴坐标,如图 1 所示。

识别交点 a_{mn} 的从属网格后,将该光线携带的能量累加至 hg 网格,能量累加计算为

$$E_h(h, g) = E_h(h, g) + I(e, k) \cdot A_{mn} \cdot \rho_1, \quad (9)$$

式中 $E_h(h, g)$ 用于存储热管曲面 hg 网格接收的能量; ρ_1 为反射镜面的反射率; $I(e, k)$ 为太阳入射光线携带的能流密度(具体见第 4 节); A_{mn} 为反射镜面 mn 网格的有效采光面积:

$$A_{mn} = \frac{2\pi - \theta}{2N} \{ (m \cdot d_m + R_1)^2 - [(m-1) \cdot d_m + R_1]^2 \}. \quad (10)$$

综上推导过程可知,只需计算 $m1$ 网格内所有反射光线与吸热器的交点,并计算周向夹角 θ_{m1} 和长度分区 h ,其余同环 mn 网格的聚光过程均可采用(7)式~(9)式进行快速求解,不需要再联立其他光线与吸热器曲面的方程(反射光线与吸热器曲面的交点计算最为耗时,尤其是复杂的高次曲面),这是运动累加方法的主

体思想及优点。此外,由(8)式可知,交点 a_{mn} 的从属网格识别中参数 h 是不变的,也即只需进行周向参数 g 的识别。另一方面,(7)式则说明了入射光线的分布必须满足旋转对称性,而考虑跟踪误差或其他随机误差时,旋转对称性将不再满足,即运动累加方法仅适用理想聚光情况。但运动累加方法具有一定的计算效率(见第 5.1 节),这对理想聚光情况复杂的旋转对称型系统参数协同优化研究仍具有较好的参考价值。

限于篇幅,上述推导未涉及吸热器内反射锥体的能量吸收(反射锥体表面的反射率为 ρ_2)和二次反射等过程,但就方法而言仍适用运动累加方法,仅是增加二次反射光线及投射交点的计算。

2.2.2 平面吸热器

平面吸热器的网格划分,可以采用旋转对称型的辐射网格或等面积的矩形网格,两种网格形式在交点计算及区域识别时有所不同。

1) 辐射网格

取平面圆盘形吸热器的半径为 R_{in} ,将圆盘沿半径方向等间距分为 H_1 份,沿周向等夹角分为 G_1 份,辐射网格的效果与图 3 内环网格一致。联立(5)式和平面方程,求得交点 $q_{m1}(x_2, y_2, z_2)$ 。同理,应用(6)式的方法计算周向夹角 β_{m1} 为

$$\beta_{m1} = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\mathbf{F}_{q_{m1}} \cdot \mathbf{e}_y}{\|\mathbf{F}_{q_{m1}}\|}\right) & x_2 < 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{\mathbf{F}_{q_{m1}} \cdot \mathbf{e}_y}{\|\mathbf{F}_{q_{m1}}\|}\right) & x_2 \geq 0 \end{cases}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{F}_{q_{m1}}$ 为点 F 和点 q_{m1} 构成的矢量。

同理,按照旋转运动的方法,点 q_{mn} 的周向夹角为 $\beta_{mn} = \text{rem}(\beta_{m1} + n \cdot d_\theta, 2\pi)$,当点 q_{mn} 从属于平面吸热器 hg 网格区域时满足

$$\begin{cases} (g-1) \frac{2\pi}{G_1} \leq \beta_{mn} \leq g \frac{2\pi}{G_1} & g = 1, 2, \dots, G_1 \\ (h-1) \frac{R_{in}}{H_1} \leq \|\mathbf{F}_{q_{m1}}\| \leq h \frac{R_{in}}{H_1} & h = 1, 2, \dots, H_1 \end{cases}. \quad (12)$$

2) 正方形网格

平面吸热器划分为正方形网格,具体划分方法参见文献[10]。网格起始区域在左上角位置,采用包络区域的边长为 D_1 ,且大于有效接收半径 R_{in} ,等间距划分网格($H_2=U_2$)。此时,交点 q_{mn} 需要由点 q_{m1} 进行旋转获得,点 q_{mn} 的空间位置矢量为

$$\mathbf{q}_{mn} = [x_3, y_3, z_3] = [x_2, y_2, z_2] \begin{bmatrix} \cos(n \cdot d_\theta) & \sin(n \cdot d_\theta) & 0 \\ -\sin(n \cdot d_\theta) & \cos(n \cdot d_\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

当交点 q_{mn} 从属于平面吸热器 hu 网格区域(矩形网格)时满足

$$\begin{cases} (u-1) \frac{D_1}{U_2} - \frac{D_1}{2} \leq x_3 \leq u \frac{D_1}{U_2} - \frac{D_1}{2} & u = 1, 2, \dots, U_2 \\ (h-1) \frac{D_1}{H_2} - \frac{D_1}{2} \leq y_3 \leq h \frac{D_1}{H_2} - \frac{D_1}{2} & h = 1, 2, \dots, H_2 \end{cases}. \quad (14)$$

进行上述的交点计算、旋转运动、从属网格区域识别以及能量累加,并对平面吸热器各网格区域接收的能量进行统计,进而计算得到相应的能流密度分布。

3 等截面的平面对称型聚光集热系统

按照特定的截面形状(反射镜面和吸热器的截面)沿长度方向拉伸,形成等截面的平面对称型聚光集热系统,如槽式技术、线性菲涅耳技术等^[13-14, 17-18]。典型的等截面平面对称型聚光集热系统如图 4 所示(对称平面为 $O-yz$ 平面),由于沿长度方向各截面的聚光及能流分布一致(除端部的聚光损失外),只需简单的平移运动。总体来说,是将反射镜面按宽度方向等分为 W 份,沿长度方向等分为 V 份;取长度方向第 1 分区

的所有网格(图4中虚线标识的区域),计算各网格内太阳反射光线与吸热器的交点;并将各交点沿 y 轴移动距离 d_v (进行 $V-1$ 次平移运动,交点的从属网格区域识别及能量累加)。

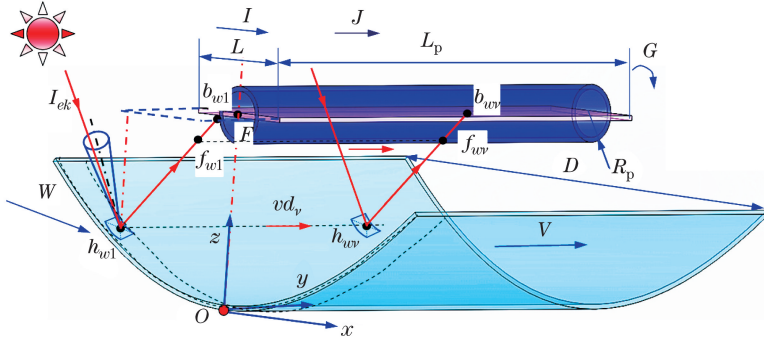


图4 等截面平面对称型聚光集热系统

Fig. 4 Plane symmetric concentrating system with constant section

3.1 聚光器离散及光学分析

如图4所示,第1分区内任意 $w1$ 网格中心点 h_{w1} 的空间位置矢量为

$$\mathbf{h}_{w1} = \left\{ \left(w - \frac{1}{2} \right) d_w - \frac{D}{2}, \frac{1}{2} d_v, f_1 \left[\left(w - \frac{1}{2} \right) d_w - \frac{D}{2}, \frac{1}{2} d_v \right] \right\}, \quad (15)$$

式中 D 为反射镜面的开口宽度; $d_w = \frac{D}{W}$ 为反射镜面的网格宽度; $d_v = \frac{L_p}{V}$ 为反射镜面的网格长度; L_p 为聚光集热系统的总长度。

同理,根据(3)式~(5)式计算点 h_{w1} 的太阳光锥内任意入射光线 \mathbf{I}_{ek} 的反射光线参数方程为

$$[x, y, z] = \mathbf{h}_{w1} + [\mathbf{I}_{ek} - 2(\mathbf{I}_{ek} \cdot \mathbf{e}_{w1}^T) \mathbf{e}_{w1}] \cdot t, \quad (16)$$

式中, $\mathbf{e}_{w1} = \frac{\mathbf{N}_{h_{w1}}}{\|\mathbf{N}_{h_{w1}}\|}$ 为向量 $\mathbf{N}_{h_{w1}}$ 的单位方向向量; $\mathbf{N}_{h_{w1}}$ 为点 h_{w1} 的内法线向量,根据(3)式和(4)式计算。

3.2 吸热器能流分布计算

取平面吸热器和圆柱吸热器来开展研究,将圆柱吸热器以圆周等夹角分为 G 份,平面吸热器则沿宽度等间距分为 I 份,均沿长度方向等间距分为 J 份,如图4~图5所示。

联立圆柱吸热器曲面方程和光线方程(16)式求解交点 $f_{w1}(x_4, y_4, z_4)$,由于是平移运动,反射镜面 wv 网格的入射光线 \mathbf{I}_{ek}^{wv} 与 $w1$ 网格的入射光线 \mathbf{I}_{ek} 呈平行关系且唯一存在,显然相应的反射光线也是平行的。由于反射镜面各处接收的太阳光锥相同,对于任意太阳跟踪角均能满足上述的唯一性条件,即能有效地适应槽式和菲涅耳等单轴跟踪系统的采光特性。此时,点 f_{wv} 可以看成是将点 f_{w1} 沿 y 轴平行移动 $v \cdot d_v$ 获得,其位置矢量为

$$\mathbf{f}_{wv} = [x_5, y_5, z_5] = [x_4, y_4, z_4] + [0, v \cdot d_v, 0]. \quad (17)$$

如图5(a)所示,点 f_{wv} 的周向夹角 ψ_{wv} 为

$$\psi_{w1} = \psi_{wv} = \begin{cases} \arccos\left(\frac{\mathbf{F}_{f_{wv}} \cdot \mathbf{e}_{z1}}{\|\mathbf{F}_{f_{wv}}\|}\right) & x_5 \leq 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{\mathbf{F}_{f_{wv}} \cdot \mathbf{e}_{z1}}{\|\mathbf{F}_{f_{wv}}\|}\right) & x_5 > 0 \end{cases}, \quad (18)$$

式中,向量 $\mathbf{e}_{z1} = [0, 0, 1]$; $\mathbf{F}_{f_{wv}}$ 为由点 F 和点 f_{wv} 构成的矢量。

当交点 f_{wv} 从属于圆柱吸热器的 jg 网格区域时满足(19)式,并将该光线携带的能量累加到 jg 网格。

$$\begin{cases} (g-1) \frac{2\pi}{G} \leq \psi_{w1} \leq g \frac{2\pi}{G} & g = 1, 2, \dots, G \\ (j-1) \frac{L_p}{J} \leq y_4 + v \cdot d_v \leq j \frac{L_p}{J} & j = 1, 2, \dots, J; \text{ if } y_4 + v \cdot d_v \in [0, L_p] \end{cases}, \quad (19)$$

式中,条件 $y_4 + v \cdot d_v \in [0, L_p]$ 用于考虑吸热器端部的聚光损失。

由(19)式可知,周向分区编号 g 只需识别 1 次,而分区编号 j 只需简单的平移运动即可获得。

对于平面吸热器,联立光线方程 (16) 式和平面方程求解交点 $b_{w1}(x_6, y_6, z_6)$, 而交点 b_{wv} 为点 b_{w1} 沿 y 轴平移距离 $v \cdot d_v$ 得到,结合图 5 所示的网格及起始位置,当交点 b_{wv} 从属于 ij 网格区域时满足

$$\begin{cases} (i-1) \frac{L}{I} - \frac{L}{2} \leq x_6 \leq i \frac{L}{I} - \frac{L}{2} & i = 1, 2, \dots, I \\ (j-1) \frac{L_p}{J} \leq y_6 + v \cdot d_v \leq j \frac{L_p}{J} & j = 1, 2, \dots, J; \text{ if } y_6 + v \cdot d_v \in [0, L_p] \end{cases}, \quad (20)$$

式中, L 为平面吸热器的宽度。

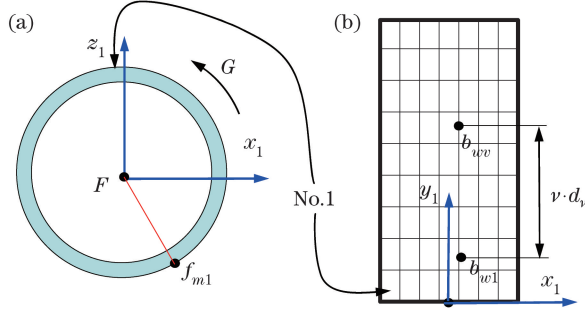


图 5 (a)圆柱和(b)平面吸热器的离散网格

Fig. 5 Discrete grid of (a) cylinder and (b) plane receiver

4 太阳光锥的离散

太阳圆盘模型如图 6 所示,即太阳入射光束均为半顶角 $\delta = 4.65 \text{ mrad}$ 的光锥。太阳圆盘内的辐射强度是由圆心向边缘逐渐减弱的,采用的太阳圆盘辐射强度分布模型为^[19-20]

$$I(\gamma) = \begin{cases} I_1 \left[1 - 0.5138 \left(\frac{\gamma}{\delta} \right)^4 \right] & 0 \leq \gamma \leq \delta \\ 0 & \gamma > \delta \end{cases}, \quad (21)$$

式中 γ 为入射光线与中心光线的夹角, I_1 为中心光线的辐射强度。

由于反射镜面各网格微元接收的太阳光锥相同,即入射光线的方向向量和太阳光锥携带的能量密度 e_0 是一样的。因此,为方便太阳光锥的离散,在全局坐标系的原点 O 处建立太阳光锥,并采用如图 6(b)所示的均匀离散方式。具体来说,是在反射镜面的特征平面 ($Z = f$ 平面) 构建半径为 $R_s = f \cdot \tan(\delta)$ 的圆盘,采用正方形包围后离散成正方形网格(其中 $E = K$)。此种太阳光锥的离散形式,针对旋转对称型聚光系统,将离散的太阳光锥绕中心轴线旋转,能够满足旋转对称性要求;而等截面平面对称型聚光系统是平移运动,显然对太阳光锥的离散无任何特别要求,均能满足平行对称性。

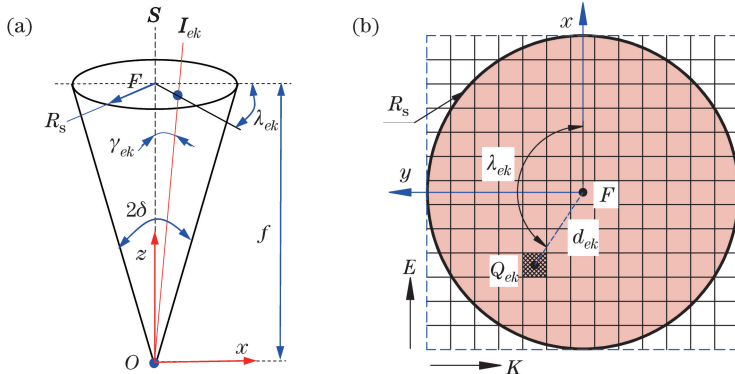


图 6 (a)太阳光锥模型及(b)圆盘的离散

Fig. 6 Discrete for (a) solar cone model and (b) disk

太阳光锥离散网格 ek 中心点 Q_{ek} 的位置矢量为

$$Q_{ek} = \left[(e - 0.5) \frac{2R_s}{E} - R_s, R_s - (k - 0.5) \frac{2R_s}{M}, f \right]. \quad (22)$$

点 Q_{ek} 与点 F_1 的距离为 $d_{ek} = \|Q_{ek} - F\|$, 网格 ek 的有效性(是否在圆盘内)判别函数 flg_{ek} 为

$$flg_{ek} = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{ek} \leq R_s, \\ 0 & \text{if } d_{ek} > R_s, \end{cases} \quad (23)$$

根据能量守恒关系, 反射镜面和太阳光锥的离散前后满足

$$A_{ref} \cdot W_0 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (A_{mn} \cdot e_0) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left\{ A_{mn} \cdot \sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K flg_{ek} \cdot I_1 \cdot \left[1 - 0.5138 \left(\frac{\gamma_{ek}}{\delta} \right)^4 \right] \right\}, \quad (24)$$

式中 A_{ref} 为反射镜面的采光总面积; W_0 为反射镜面接收的太阳辐射能流密度, 单位为 W/m^2 ; γ_{ek} 为太阳光锥内离散光线 ek 与中心光线的夹角:

$$\gamma_{ek} = \arctan\left(\frac{d_{ek}}{f}\right). \quad (25)$$

由(24)式明显看出: $A_{ref} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn}$, 则推导得到太阳光锥离散后的中心光线辐射强度 I_1 为(文献[10]的中心光线是考虑微元面积的)

$$I_1 = \frac{W_0}{\sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K flg_{ek} \left[1 - 0.5138 \left(\frac{\gamma_{ek}}{\delta} \right)^4 \right]}. \quad (26)$$

由图6可知, 离散光线 ek 的入射向量即为点 Q_{ek} 的位置矢量的反方向, 当考虑跟踪角度(槽式、菲涅耳等系统一般是单轴跟踪, 即太阳入射中心光线与 z 轴不平行)时, 太阳光锥内 ek 光线的入射方向向量 I_{ek} 为

$$I_{ek} = -\frac{Q_{ek}}{\|Q_{ek}\|} \cdot \text{Rot}(\varphi_1, e_y) \cdot \text{Rot}(\varphi_2, e_z), \quad (27)$$

式中, $\text{Rot}(\varphi_1, e_y)$ 为绕 y 轴旋转角度 φ_1 , 其中 φ_1 为高度角偏差; $\text{Rot}(\varphi_2, e_z)$ 为绕 z 轴旋转 φ_2 角度, 其中 φ_2 为方位角偏差; 旋转功能矩阵为

$$\text{Rot}(\varphi_1, e_y) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & 0 & -\sin\varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi_1 & 0 & \cos\varphi_1 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$$\text{Rot}(\varphi_2, e_z) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

5 运动累加方法的应用

基于 Microsoft Visual C++ 平台, 编制了吸热器能流密度分布的运动累加计算程序, 以典型的碟式系统和槽式系统来验证运动累加方法的正确性。

5.1 碟式聚光集热系统

5.1.1 碟式聚光系统—平面吸热器

为了便于验证, 与 Jeter^[6] 的理论结果进行对比。计算基本参数为: $W_0 = 1000 W/m^2$, 反射镜面的反射率 $\rho_1 = 0.90$, 焦半径 $f = 1000 \text{ mm}$, 边缘角为 60° 。运动累加方法的离散参数: 反射镜面离散网格参数, $M = 1000$, $N = 360$; 太阳光锥的离散参数 $E = 200$; 平面吸热器划分矩形网格时 $D_1 = 40 \text{ mm}$, $U_2 = 160$; 平面吸热器划分辐射网格时 $R_{in} = 20 \text{ mm}$, $H_1 = 80$, $G_1 = 360$ 。焦平面能流密度分布曲线及云图如图7和图8所示, 可以看出计算结果与 Jeter 的理论计算结果符合较好, 验证了所提出模型及编制程序的正确性。其中能流分布峰值存在微小的误差, 是由太阳圆盘模型和网格离散形式及数量引起的, 而后者涉及聚光器、吸热器和太阳光锥的离散形式及数量的匹配问题, 影响关系较为复杂, 其网格无关性考核指标及考核方法仍是难点^[5]。

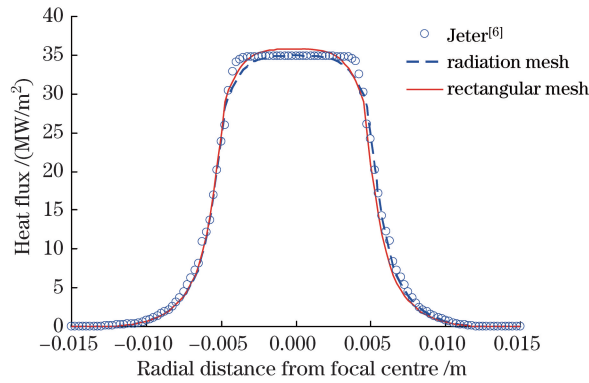


图 7 焦平面能流密度分布对比验证

Fig. 7 Comparison and confirmation for solar flux density in focal plane

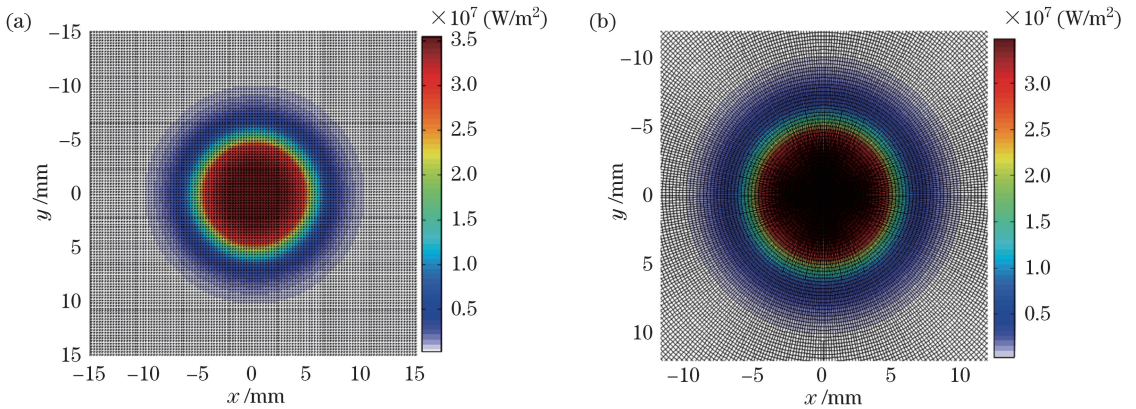


图 8 焦平面能流密度分布云图。(a)矩形网格;(b)辐射网格

Fig. 8 Cloud chart of solar flux density distribution in focal plane. (a) Rectangular mesh; (b) radiation mesh

5.1.2 碟式聚光系统—腔式吸热器

以研制的 38 kW 碟式/斯特林光热发电系统为例^[10,15], 计算参数为: 反射镜面的半径 $R = 8850.0$ mm, 空域半径 $R_1 = 900.0$ mm, 焦半径 $f = 9490.0$ mm, 缺角 $\theta = 30^\circ$, $W_0 = 1309.2$ W/m², 镜面反射率 $\rho_1 = 0.95$, 吸热器内反射锥体的反射率 $\rho_2 = 0.70$, 假定热管曲面的吸收率为 1.0, 详细的吸热器参数参见文献[10]。前期在 Matlab 7.0 平台对腔式吸热器能流分布进行了计算, 总跟踪光线数量为 2.51×10^8 根, 计算时长约 92 h, 计算结果如图 9(a)所示^[10]。采用运动累加方法, 反射镜面离散参数 $M = 1000$, $N = 360$; 太阳光锥的离散参数 $E = 200$, 计算时长为 31 min(跟踪光线 97.89×10^8 根), 计算结果如图 9(b)所示, 可以看出两者的能流密度分布符合较好。

为进一步考察计算结果的吻合程度, 取图 9(b)中箭头标识截面的能流分布进行对比, 如图 10 所示。可以看出, 太阳光锥不同离散数量时的能流密度分布结果基本一致。其中, 太阳光锥离散参数 $E = 50$ 时, 计算时长为 112 s(跟踪光线达 6.10×10^8 根); $E = 20$ 时(跟踪光线 9.648×10^7 根), 计算时长仅为 16 s(计算机处理器: Core(TM) i7-4770K, CPU 3.50 GHz, 文献[10]的计算也是基于此硬件)。对比上述的计算时间可知, 运动累加方法表现出一定的高效性, 能为理想聚光情况的旋转对称型聚光集热系统参数协同优化提供参考, 尤其是复杂腔式吸热器的参数优化。

5.2 槽式聚光集热系统

文献[11]的平面吸热器实验参数为: 槽式聚光器宽度 $D = 1565.0$ mm, 焦距 $f = 1060.0$ mm, $W_0 = 1068.0$ W/m²。运动累加方法参数: 平面接收器宽度 $L = 30$ mm, 系统长度 $L_p = 400$ mm; 聚光器长度等分 $V = 200$, 宽度等分 $W = 1000$; 平面接收器网格 $I = 60$, $J = 400$; 太阳光锥离散 $E = 200$ 。文献[11]仅给出了归一化的能流密度分布曲线, 运动累加方法计算的归一化结果(取无端部损失的截面)如图 11(a)所示, 可以看出两者基本一致, 而端部存在聚光损失的能流分布真值如图 11(b)所示。

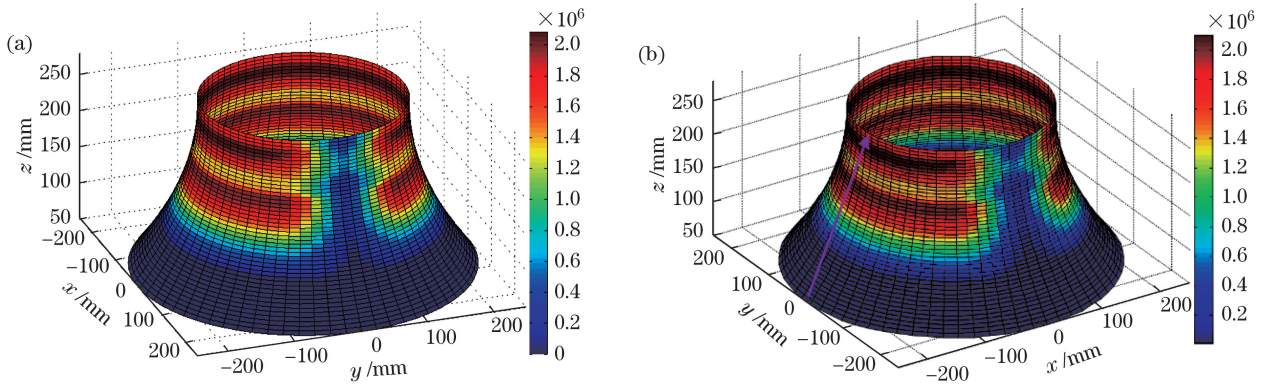


图 9 腔体吸热器热管曲面的能流密度分布(W/m^2)。(a)文献[10]计算结果;(b)本文计算结果

Fig. 9 Solar flux density distribution in the heat pipe surface of cavity receiver (W/m^2).

(a) Result of reference [10]; (b) result of this paper

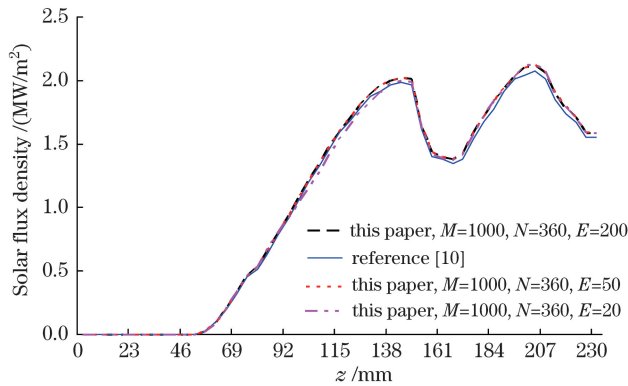


图 10 热管曲面长度方向的能流密度分布

Fig. 10 Solar flux density distribution in the length direction of heat pipe surface

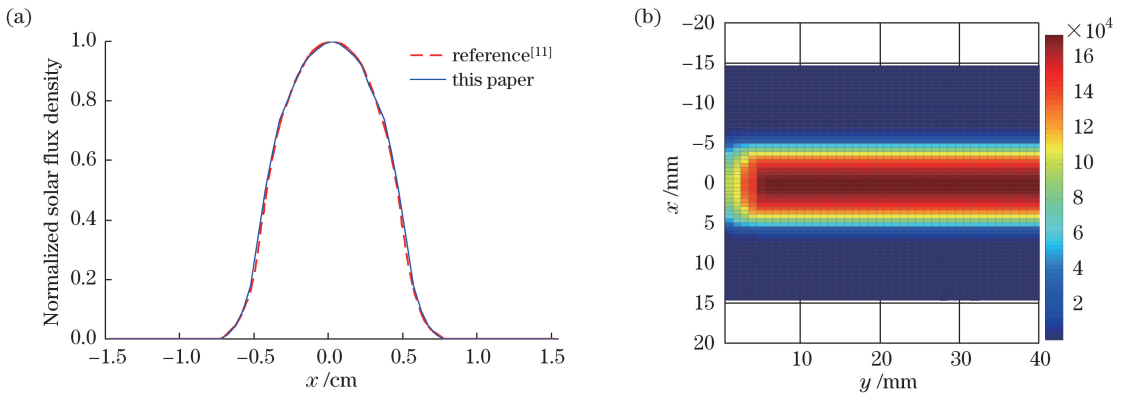


图 11 槽式系统平面接收器能流密度分布。(a)对比验证;(b)能流密度分布云图(W/m^2)

Fig. 11 Solar flux density distribution of plane receiver in trough system. (a) Comparison and confirmation;

(b) cloud chart of solar flux density distribution (W/m^2)

对于圆柱吸热器,与 Jeter^[7]的理论计算结果、文献[14]的蒙特卡罗方法计算结果综合对比,基本参数为: $W_0=1000 \text{ W}/\text{m}^2$,槽式聚光集热系统的几何聚光比为 20,边缘角为 90° , 0° 入射角。运动累加方法参数为:系统长度 $L_p=400 \text{ mm}$;聚光器长度等分 $V=200$,宽度等分 $W=500$ (考虑圆柱吸热器的遮挡效应,即将遮挡的反射镜面网格剔除);太阳光锥离散分别为 $E=200$ 和 $E=100$;圆柱接收器离散网格 $J=200$,周向等分 $G=360$;计算结果如图 12(a)所示,可以看出本方法计算结果与文献[14]的蒙特卡罗光线跟踪计算结果符合很好,与文献[7]的理论计算结果的变化趋势基本一致,验证了本计算方法的正确性。其中 $E=100$ 时,计算时长为 17.8 s (跟踪的总光线达 6.77×10^8 根)。

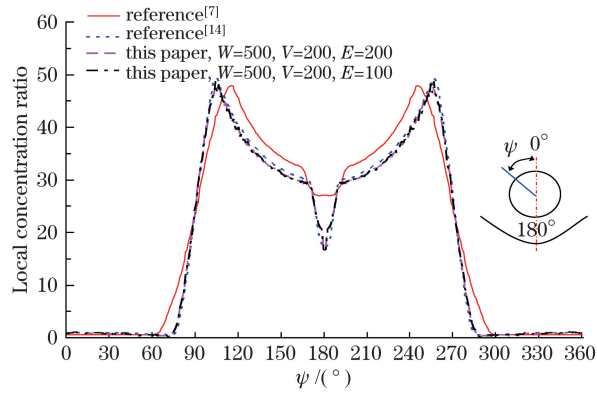


图 12 槽式聚光系统圆柱吸热器的能流密度分布对比验证

Fig. 12 Heat flux density distribution comparison and confirmation of cylinder receiver in parabolic trough system

6 结 论

采用运动累加方法计算具有几何对称特性的聚光集热系统吸热器的能流密度分布,可以将光线跟踪过程转换为旋转运动或平移运动,无需大量求解光线与吸热器曲面的联立方程组,通过典型实例的计算,验证了该方法的正确性,且表现出较好的计算效率。运动累加方法对等截面平面对称型系统,能适用于任意太阳跟踪角情况,且能考虑端部聚光损失。对于旋转对称型系统虽仅适用于理想双轴跟踪聚光情况,但聚光集热系统各参数的顶层协同优化一般也是基于理想情况,运动累加方法的效率优势能得到充分体现,这为几何对称特征的聚光集热系统参数协同优化提供了一定参考,尤其是为后续即将进行的复杂异形腔式吸热器参数优化提供了基础。

参 考 文 献

- 1 J C L Chien, N Lior. Concentrating solar thermal power as a viable alternative in China's electricity supply[J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 7622-7636.
- 2 D Barlev, R Vidu, P Stroeve. Innovation in concentrated solar power[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95(10): 2703-2725.
- 3 D A Baharoon, H A Rahman, W Z W Omar, *et al.*. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently-A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 996-1027.
- 4 Z D Cheng, Y L He, F Q Cui. A new modelling method and unified code with MCRT for concentrating solar collectors and its applications[J]. Applied Energy, 2013, 101: 686-698.
- 5 Cheng Zedong, He Yaling, Cui Fuqing. Studies on concentrating solar collectors with a new modelling method and unified MCRT code[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(22): 2127-2136.
程泽东, 何雅玲, 崔福庆. 聚光集热系统统一 MCRT 建模与聚光特性[J]. 科学通报, 2012, 57(22): 2127-2136.
- 6 S M Jeter. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1986, 108(3): 219-225.
- 7 S M Jeter. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation[J]. Solar Energy, 1986, 37(5): 335-345.
- 8 Zhao Jinlong, Li Lin, Cui Zhengjun, *et al.*. Calculation of flux density distribution on focal plane in linear Fresnel reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1208001.
赵金龙, 李 林, 崔正军, 等. 线性菲涅耳反射聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1208001.
- 9 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo, *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1775-1778.
刘 颖, 戴景民, 郎治国, 等. 旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1775-1778.
- 10 Yan Jian, Peng Youduo, Yu Jiahuan, *et al.*. Research on thermal-structural-optical multi-field coupling modeling and concentrating performance predication of solar dish system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 138-

151.

颜 健, 彭佑多, 余佳焕, 等. 碟式太阳能光热系统光-机-热多场耦合建模及其聚光性能预测应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 138-151.

- 11 Xu Chengmu, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Frequency statistics analysis for energy-flux-density distribution on focal plane of parabolic trough solar concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0408001.
许成木, 李 明, 季 旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0408001.
- 12 Y Shuai, X L Xia, H P Tan. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(1): 13-21.
- 13 Y Qiu, Y L He, Z D Cheng, *et al.*. Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods[J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 162-173.
- 14 Z D Cheng, Y L He, F Q Cui, *et al.*. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1770-1784.
- 15 Peng Youduo, Yan Jian, Yi Chenfei, *et al.*. Frame bearing capacity mechanism of 38 kW solar dish string power system [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 30(1): 29-35.
彭佑多, 颜 健, 易陈斐, 等. 38 kW 级碟式光热发电系统机架结构的承载性能[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(1): 29-35.
- 16 K Wang, H Wu, D Wang, *et al.*. Experimental study on a coiled tube solar receiver under variable solar radiation condition[J]. *Solar Energy*, 2015, 122: 1080-1090.
- 17 C Daniele, S Fabio. Performance comparison of two-tank direct and thermocline thermal energy storage systems for 1 MWe class concentrating solar power plants[J]. *Energy*, 2015, 81: 526-536.
- 18 M J Montes, C Rubbia, R Abbas, *et al.*. A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power[J]. *Energy*, 2014, 73: 192-203.
- 19 M M Elsayed, K A Fathalah, O M Al-Rabghi. Measurements of solar flux density distribution on a plane receiver due to a flat heliostat[J]. *Solar Energy*, 1995, 54(6): 403-411.
- 20 P L Leary, J D Hankins. User's guide for MIRVAL: a computer code for comparing designs of heliostat-receiver optics for central receiver solar power plants[R]. Sandia Labs, Livermore, CA (USA), 1979.