

基于蒙特卡罗法的太阳能聚光接收器布局及形状优化设计

马宏财^{1,2} 金光¹ 钟兴¹ 任秉文^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 太阳能聚光系统接收面能流密度的均匀性对系统的性能及转换效率有着重要影响。为了提高聚光系统接收面上能流密度分布的均匀性,提出了一种对聚光系统接收器的布局及几何形状进行设计和优化的方法。该方法通过蒙特卡罗光线追迹法确定聚光系统接收面上的辐射能流分布,同时考虑了太阳形状。建立了以接收面口径大小为约束,以接收面辐射能流密度分布均匀度最高为目标的优化模型,并利用 Kiefer-Wolfowitz 随机逼近算法进行求解,从而实现了系统的优化。对二维抛物柱面聚光系统实例进行设计优化,在接收面上获得了光强的最佳均匀分布,同时能保持 78.25% 的高能量接收率,证明了该方法的有效性。该优化方法相比传统的试凑法计算效率高,并且得到的设计结果更接近最优解。

关键词 光学器件;太阳能;几何布局优化;Kiefer-Wolfowitz 算法;蒙特卡罗法;辐射能流密度;均匀性

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0308001

Arrangement and Shape Optimization of Solar Concentrating Receivers Using Monte Carlo Method

Ma Hongcai^{1,2} Jin Guang¹ Zhong Xing¹ Ren Bingwen^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Uniform radiation flux distribution in the received surface is crucial for the performance and conversion efficiency of a solar concentrating system. In order to improve the uniformity of radiation flux distribution in the receiving surface, the arrangement and shape optimization of solar concentrating receivers is proposed. Considering the sun shape, the radiation flux distribution is determined by Monte Carlo ray-tracing method, and an optimization model is established, which takes the receiver aperture size as the constraint condition and aims at the highest uniformity of radiation flux distribution combining Kiefer-Wolfowitz algorithm. We take a linear parabolic-trough concentrating system for example, resulting in the most uniform intensity distribution while achieving a high energy reception of 78.25%, which testifies the validity of this optimization procedure. The optimization procedure computes more efficiently than the traditional trial-and-error methodology, and the obtained solutions are also near optimal.

Key words optical devices; solar energy; arrangement and shape optimization; Kiefer-Wolfowitz algorithm; Monte Carlo method; radiation flux; uniformity

OCIS codes 350.6050; 080.4298; 080.2740; 080.4295

收稿日期: 2012-07-05; 收到修改稿日期: 2012-09-05

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z113)资助课题。

作者简介: 马宏财(1985—),男,博士研究生,主要从事高效太阳能转换技术方面的研究。E-mail: hongcma@gmail.com

导师简介: 金光(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感光机方面的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn

(通信联系人)

1 引 言

太阳能聚光系统可以将大面积太阳光的能量集中到很小的面积上,得到高的聚光比,从而提高接收器的能量利用率。太阳能接收器是整个聚光系统的核心部件,其性能由光电/热电转换效率决定,所以从如何提高转换效率的角度对聚光系统进行布局优化是聚光系统的关键技术。实验结果表明太阳能接收器能流密度分布的均匀性对光伏/光热系统的性能有较大影响^[1];会聚太阳光将使得接收器能量分布不均,导致局部受热过高,因此在浪费太阳能能量的同时也降低了太阳能电池的转换效率,而均匀分布的能流密度可提高接收器的转换效率^[2~4]。因此在对聚光系统进行布局优化时,其接收器上光强分布的均匀性是需要考虑的主要问题之一。

对聚光系统进行布局优化的方法主要有边缘光线法^[5]和光线追迹法^[6~8]。边缘光线法基于解析几何,有复杂的数学过程及大量的计算,在聚光系统入射口径和出射口径之间以最高辐射能流聚光比为目标来设计和优化聚光系统的布局。这种方法需要大量的数学推导,计算繁琐复杂。为了提高计算效率,人们提出并发展了光线追迹法。该方法可以简单并详细地模拟各种光学过程,包括太阳形状、聚光器面形误差等因素对系统性能的影响。但是这种方法无法获得系统性能和各项因素之间的函数关系,因此在对聚光系统进行优化设计时,人们往往需要基于试凑法调整系统各项参数来获取所需要的光强分布,所以这种方法非常耗时,并且很难找到最优的解^[9,10]。因此,需要提出一种高效、简单、直观的聚光系统布局优化方法。

本文为了提高接收器上能流密度分布的均匀性,提出一种对聚光系统接收器布局及形状进行设计和优化的方法,即应用蒙特卡罗光线追迹法计算接收器接收的辐射能流密度分布,考虑接收器口径

大小约束,以接收面的辐射能流密度均方差为目标函数,建立了优化模型,并利用 Kiefer-Wolfowitz 随机逼近算法,高效地搜寻并求解目标函数的最优解,进而获得接收面均匀性最佳的能流密度分布。

2 设计和优化方法

2.1 基于蒙特卡罗法的优化模型

以抛物柱面聚光系统为例,应用蒙特卡罗法对其接收面能流密度的分布特性进行分析。蒙特卡罗方法通过取样大量随机路径的光线来模拟太阳光及其与聚光器发生的反射、吸收等相互作用。每条光线携带特定的能量,其方向由特定的概率密度函数确定。最后通过跟踪光线路径,统计接收面上各区域光线数目,得到接收面上辐射能流密度的分布。

考虑该抛物柱面聚光系统为二维系统,即入射太阳光线平行于系统的 XY 平面,且与抛物面对称轴 Y 轴夹角为 θ , θ 的最大值与太阳半张角相等,即 $\theta_{\max} = 4.65 \text{ mrad}$, 其强度分布服从太阳形状模型^[11],如图 1(a)所示。图 1(b)为二维抛物柱面聚光系统的横截面。系统中由三个随机变量来产生取样入射光线,其中两个随机变量确定每一条入射光线的入射位置,即与抛物面交点的坐标 $O_0(x, y)$;另外一个随机变量确定入射光线的入射方向 θ 。光线在聚光器表面的传播满足反射定律,反射后的光线与接收器表面相交。接收器的横截面形状由二阶贝塞尔曲线定义^[12]:

$$C(u) = (1-u)^2 c_0 + 2u(1-u)c_1 + u^2 c_2, \quad u \in [0, 1], \quad (1)$$

式中 $c_0 = (x_0, y_0)$, $c_1 = (x_1, y_1)$, $c_2 = (x_2, y_2)$ 为控制曲线形状的特征点坐标, u 为确定点在曲线上位置的参数,在 0 和 1 之间取值, $C(u) = (x, y)$ 为曲线坐标函数值。

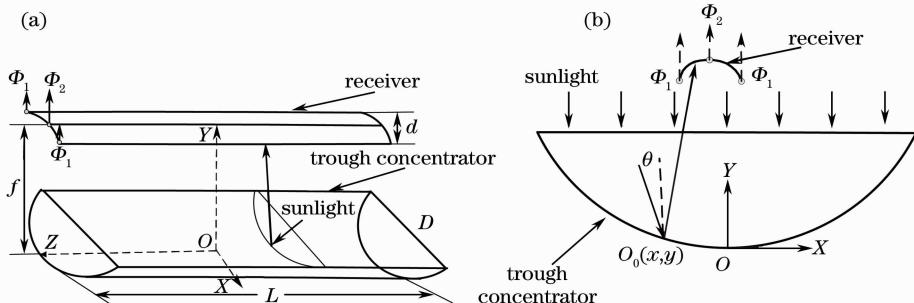


图 1 二维抛物柱面聚光系统(a)结构及(b)横截面图

Fig. 1 (a) Configuration and (b) cross section view of two-dimensional parabolic trough concentrating system

由于抛物柱面聚光器关于 Y 轴对称, 则取接收器形状也以 Y 轴为对称轴。设接收器的口径为 $2a$, 得到接收器特征点坐标为 $\mathbf{c}_0 = (-a, y_0)$, $\mathbf{c}_1 = (0, y_1)$, $\mathbf{c}_2 = (a, y_0)$, 则设计变量为 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2) = (y_0, \Delta y)$, 其中 $\Delta y = y_1 - y_0$, Φ_1 为接收器的布局参数, Φ_2 为接收器的几何形状参数。

应用蒙特卡罗法进行光线追迹, 将接收面划分为 N 个分区, 统计每个分区的接收光线能量及面积, 从而获得每个分区的能流密度 $q_i(\Phi)$,

$$q_i(\Phi) = \frac{\sum_{m=1}^{N_i} e_m}{s_i}, \quad (2)$$

式中 e_m 为接收的第 m 条光线携带的能量, s_i 为第 i 个分区的面积, N_i 是接收面第 i 个分区上入射光线的数目。

为了表征接收面上能流密度分布的均匀度, 定义优化目标函数为:

$$F(\Phi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [q_i(\Phi) - q_{\text{average}}]^2, \quad (3)$$

式中 q_{average} 为平均辐射能流目标值, 其值根据系统要求及接收器材料特性设定。

由此, 以接收器口径大小为约束, 根据表征接收面能流密度分布均匀度的目标函数, 通过优化接收器布局及形状变量参数, 改善接收面能流密度的均匀性, 进而建立起优化聚光系统能流密度均匀性的模型。优化求解途径由下述算法确定。

2.2 最速下降算法

利用最速下降算法^[13]求解时, 设 $F(\Phi)$ 为优化目标函数, Φ 为设计变量参数,

$$L = \min[F(\Phi)], \quad \Phi \in \mathbf{R}^n, \quad (4)$$

式中函数 $F(\Phi)$ 具有一阶连续偏导数, \mathbf{R}^n 为 n 维向量空间, L 为求解优化目标函数 $F(\Phi)$ 的最小值。

最速下降算法利用的迭代公式为

$$\Phi_{k+1} = \Phi_k + \alpha_k \mathbf{P}_k, \quad (5)$$

式中 Φ_k 为第 k 次迭代的设计变量参数值, \mathbf{P}_k 是从 Φ_k 出发的搜索方向, α_k 是从 Φ_k 出发沿方向 \mathbf{P}_k 进行搜索的步长。最速下降算法选择一个目标函数值下降最快的方向进行搜索从而尽快达到极小点, 而目标函数在点 Φ 处沿负梯度方向变化率最小, 所以将负梯度方向设为最速下降方向, 即

$$\mathbf{P}_k = - \frac{\nabla F(\Phi_k)}{\|\nabla F(\Phi_k)\|}. \quad (6)$$

2.3 Kiefer-Wolfowitz 随机逼近算法

在对随机系统进行优化设计时, 由于无法直接

获得目标函数梯度值, 所以许多优化随机系统的方法都是基于优化确定目标函数梯度系统的方法。Kiefer-Wolfowitz 随机逼近算法^[14]是优化随机系统的特定方法, 其基于最速下降算法, 在目标函数梯度的解析解不确定的情况下, 通过估计目标函数的梯度函数值来逼近最优解, 可有效地解决随机系统的优化问题, 适用于基于蒙特卡罗法的随机系统。

在 Kiefer-Wolfowitz 随机逼近算法中, 与最速下降算法不同的是, 优化目标函数的梯度值 $\nabla F(\Phi_k)$ 为 $F(\Phi_k)$ 的梯度向量在第 k 次迭代的设计参数 Φ_k 处的二阶中心差分, 则与第 p 项设计变量对应的近似梯度值 $\nabla_p F(\Phi_k)$ 为

$$\nabla_p F(\Phi_k) = \frac{F(\Phi_k + \mathbf{e}_p h_k) - F(\Phi_k - \mathbf{e}_p h_k)}{2h_k}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{e}_p 为单位向量在第 p 个方向的分量, h_k 为第 k 次迭代的有限差分的区间长度。

h_k 的选择在每次迭代后递减:

$$h_k = \frac{h_0}{k^b}. \quad (8)$$

在第 k 次迭代, 搜索的步长 α_k 为

$$\alpha_k = \frac{\alpha_0}{k^a}, \quad (9)$$

式中 α_0, h_0 为初始常量。选择 $a=1, b=1/3$, 可以控制整个优化过程的不确定性^[15]。

3 设计实例分析

利用该方法对二维抛物柱面聚光系统实例进行设计与优化。设聚光器口径 $D=4$ m, 长度 $L=0.1$ m, 抛物面焦距为 5.8 m, 接收面平均辐射能流目标值 $q_{\text{average}}=0.25 \times 10^5$ W/m², 接收器口径为 0.2 m。

为了量化由蒙特卡罗法光线取样带来的误差, 定义由于接收面分区数的不同而带来的目标函数值取样误差为 $\delta(\Phi) = F_N(\Phi) - F_\infty(\Phi)$, 选择 $\Phi_0 = (5.8, 0)$ 情况对其进行研究, 设取样光线数与分区数的关系为 $N_{\text{bundles}}/N = 2 \times 10^5$, 进而来计算在每一次分区数细化时的取样误差。取分区数 $N = 1024$ 时的目标函数值为与分区数无关的目标函数理想估计值, 即 $F_\infty(\Phi_0) \approx F_{1024}(\Phi_0) = 0.3841$ 。如图 2 所示, 当分区细化数 $N = 512$ 时, 目标函数的取样误差为 -1.5061×10^5 。

基于以上结果, 根据系统对取样误差的要求, 选择分区细化数 $N=512$ 来计算目标函数值。随着设计变量 Φ_k 接近最优变量值 Φ^* , 为了减小取样误差

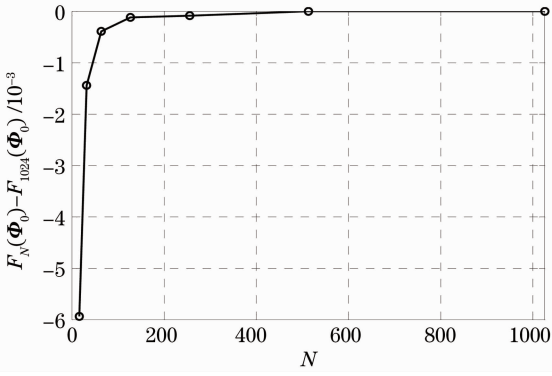


图 2 接收面分区数与取样误差的关系

Fig. 2 Relationship between the subarea number of discrete receiver plane and sampling error

$\delta(\Phi_k)$, 每次取样的光线数随着自变量迭代次数的增加而增大, 其值由下式给出^[16]:

$$N_{\text{bundles}} = A \ln k + B. \quad (10)$$

基于取样光线数及接收面分区数, 选择 $A=20 \times 10^6$, $B=5 \times 10^5$ 。

具体的优化设计过程如下: 考虑接收器的形状是平面, 例如聚光系统中的光伏电池平板或平面光热吸收体, 则设计变量为单变量, 即 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2) = (y_0, 0)$ 。在 Matlab 软件仿真环境下编程, 利用 Kiefer-Wolfowitz 算法实现系统的优化设计。设置接收面起始位于焦面上 $\Phi = (5.8, 0)$, 此时目标函数值 $F(5.8, 0) = 0.3860$ 。设定初始值 $\alpha_0 = 0.1$, $h_0 = 0.025$, 优化停止标准为 $|F(\Phi_k) - F(\Phi_{k-1})| < 1 \times 10^{-3}$ 。执行此算法对优化模型求解, 通过 5 次搜索迭代优化停止, 系统设计变量到达 $\Phi = (6.028, 0)$, 目标函数 $F(6.028, 0) = 1.3517 \times 10^{-4}$, 相对于起始点处的函数值大幅度减小, 说明接收面能流密度的均匀性得到提高。

图 3 为单变量优化前后平面接收器的布局。优

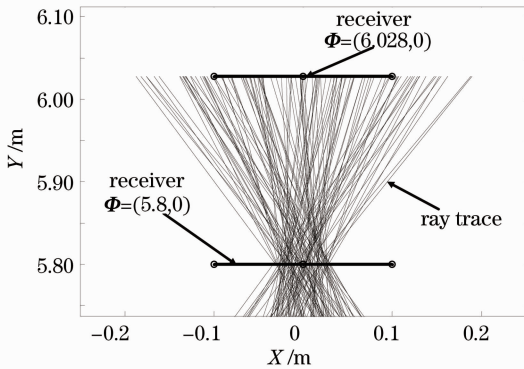


图 3 单变量优化前后平面接收器的布局

Fig. 3 Plane receiver arrangements before and after single variable optimization

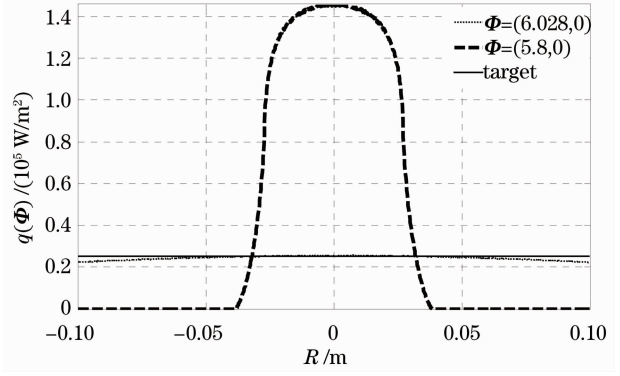


图 4 单变量优化前后接收面上辐射能流密度分布

Fig. 4 Radiation flux distributions in the receiver plane before and after single variable optimization

化前, 平面接收器位于焦面上, 接收器接收的光束非常集中。优化后, 平面接收器位于焦面上方一定距离, 在整个接收器上接收到一个更加发散的光束。图 4 为优化前后平面接收器 10 cm 范围内的辐射能流密度 $q(\Phi)$ 分布。由图中可看出, 优化前接收面辐射能流分布近似为高斯分布, 中间强度高, 两边强度低, 接收面中心处辐射能流密度值高达 $1.42 \times 10^5 \text{ W/m}^2$, 接收器边缘处的辐射能流密度值则基本为 0, 接收面上整体光强均匀度很低。而优化后接收面整体范围内的能流密度分布非常均匀, 接近 $0.25 \times 10^5 \text{ W/m}^2$, 证明了此优化方法的有效性。值得注意的是优化后部分入射光能从接收器边缘溢出, 能量接收率为 60.93%。虽然优化后损失了部分接收光能, 但在接收面上可以得到更加均匀的光强分布。

为了进一步说明此方法的有效性, 将接收器的形状扩展为非平面, 例如非平面光热吸收体, 则设计变量为双变量, 即 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2) = (y_0, \Delta y)$, 其中 $\Delta y = y_1 - y_0$ 。优化过程与单变量类似, 设置初始值为 $\Phi = (5.8, 0)$, 此时目标函数值 $F(5.8, 0) = 0.3860$; 设定初始值 $\alpha_0 = 0.1$, $h_0 = 0.025$, 优化停止标准为 $|F(\Phi_k) - F(\Phi_{k-1})| < 1 \times 10^{-4}$ 。执行此算法对优化模型求解, 通过 6 次搜索迭代优化停止, 变量到达 $\Phi = (5.973, 0.1114)$, 目标函数值 $F(5.973, 0.1114) = 3.1133 \times 10^{-4}$, 相对于起点位置函数值大幅度减小, 说明接收面能流密度的均匀性得到大幅度提高。图 5 为双变量优化设计的寻优路径示意图, 图中阴影区域是优化目标函数的一个极小值区域。由图 5 可以看出, 优化过程以一个简捷的路径到达这个区域, 花费时间短。该区域中若布局参数 Φ_1 较大时, 则形状参数 Φ_2 较小; 反之, 若布局参数

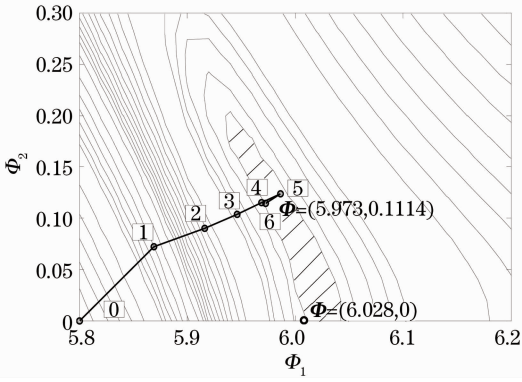


图 5 双变量优化设计的寻优路径

Fig. 5 Searching path for double variables optimization

Φ_1 较小时,则形状参数 Φ_2 较大,此关系可为优化路径选择提供参考。

图 6 为双变量优化后与单变量优化后接收器的布局及形状。单变量优化后,平面接收器位于 $\Phi=(6.028,0)$ 面上。双变量优化后,接收器的形状变成凹面,同样位于焦面上方,但其口径位于平面接收器下方一定距离。图 7 为双变量优化后与单变量优化后接收器平面上 10 cm 范围内的辐射能流密度分布。可以看出,双变量优化得到的接收面辐射能流密度分布均匀一致,且相比于单变量优化,能流密度值更高。虽然双变量优化后与单变量优化后接收器的口径一致,且同样在优化目标函数的最小值区域,如图 5 所示,但优化后曲面接收器口径位置相比平面接收器与焦面间的距离更小,接收的能量更多,能量接收率可以达到 78.25%。据此,可对此优化方法进行引申,为了提高接收器的能量接收率,通过设置不同的 α_0, h_0 初值,以不同的优化路径,到达布局参数较小、形状参数较大的目标函数最小值区域。双变量优化后接收器上接收到的辐射能流总量相比单变量优化后增加了 28.5%,说明了双变量优化的有效性。

4 结 论

提出了一种对聚光系统接收面辐射能流密度分布的均匀性进行优化设计的方法,它通过改变接收器的布局及几何形状提高了聚光系统光学性能。优化了口径为 4 m 的二维抛物柱面聚光系统实例,在半径为 0.1 m 的接收器上,通过优化布局变量,得到能量接收率为 60.93%,而同时优化接收器布局及形状时,获得 78.25% 的高能量接收率,且其接收面辐射能流密度接近 $0.25 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 的最佳光强均匀分布,证明了此方法的有效性。同时得到了为提高接收面能量接收率,亦可通过选择不同优化路

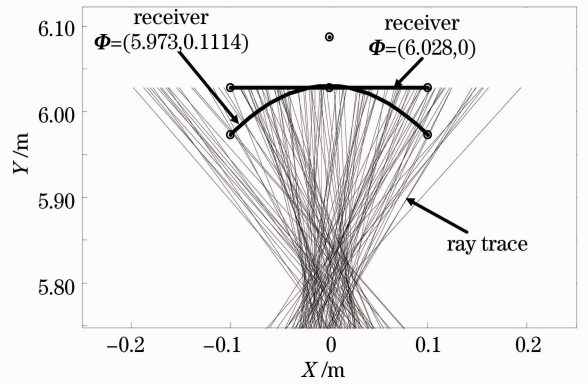


图 6 双变量优化后与单变量优化后接收器的布局及形状

Fig. 6 Arrangement and shape of receivers after single variable and double variables optimization

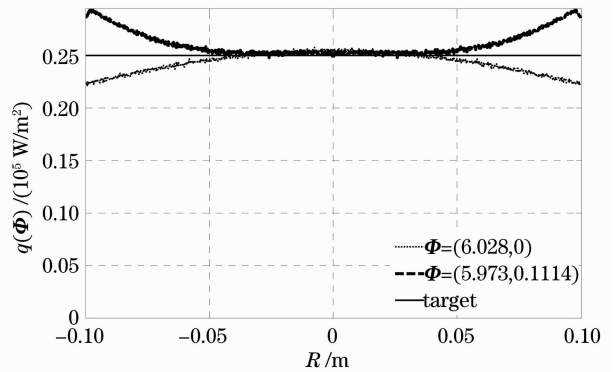


图 7 双变量优化后与单变量优化后接收面上辐射能流密度分布

Fig. 7 Radiation flux distributions in the receiving surface after single variable and double variables optimization

径的方式来实现的结论。这种方法需要很少的计算时间,且解的质量常常比传统的试凑法要好。该优化方法可以扩展到三维抛物面形式的点聚焦系统。

参 考 文 献

- 1 Winston Roland, Juan C. Miñano, Pablo Benitez. Nonimaging Optics [M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2004. 319~324
- 2 W. J. Cassarly. Nonimaging Optics: Concentration and Illumination. In: Handbook of Optics[M]. New York: McGraw Hill, 2010. 71~109
- 3 Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu *et al.*. Investigation of the output characteristics of GaAs solar cell based on Fresnel concentrating system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0716003
王文博, 李明, 季旭等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓太阳能电池输出特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0716003
- 4 Gao Yue, Zhang Guoyu, Zheng Ru *et al.*. Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0623003
高越, 张国玉, 郑茹等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0623003

- 5 H. Ries, A. Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2627~2632
- 6 M. Schubnell, J. Keller, A. Imhof. Flux density distribution in the focal region of a solar concentrator system [J]. *J. Solar Energy Engineering*, 1991, **113**(2): 112~116
- 7 R. Siegel, J. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer (4th ed.) [M]. New York: Taylor & Francis, 2002. 390~406
- 8 Wang Yunfeng, Ji Jie, He Wei *et al.*. Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122002
王云峰, 季杰, 何伟等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0122002
- 9 Zhigang Li, Dawei Tang, Jinglong Du *et al.*. Study on the radiation flux and temperature distributions of the concentrator-receiver system in a solar dish/Stirling power facility [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, **31**(10): 1780~1789
- 10 Kathi Kreske. Optical design of a solar flux homogenizer for concentrator photovoltaics [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 2053~2058
- 11 D. Buie. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations [J]. *Solar Energy*, 2003, **74**(2): 113~122
- 12 L. Piegl, W. Tiller. The NURBS Book (2nd ed.) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997
- 13 Chen Baolin. Theory and Algorithms for Optimization (2nd ed.) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 281~287
陈宝林. 最优化理论与算法 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 281~287
- 14 J. C. Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1992, **37**(3): 332~341
- 15 Pflug C. George. Optimization of Stochastic Models: The Interface Between Simulation and Optimization [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996. 281~288
- 16 K. J. Daun, D. P. Morton, J. R. Howell. Geometric optimization of radiant enclosures containing specular surfaces [J]. *J. Heat Transfer*, 2003, **125**(5): 845~851

栏目编辑: 韩峰