

太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响

陈 飞¹ 李 明¹ 季 旭¹ 罗 熙¹ 王六玲²

(¹ 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650092
² 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650092)

摘要 针对太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响进行了理论、模拟和实验研究。研究表明, 平行光下反射镜玻璃越厚, 入射光线距光轴距离越远, ΔX 、 ΔY 越大。对焦距为 1200 mm, 反射镜玻璃折射率为 1.6 的槽式系统进行了理论计算, 玻璃厚度为 1 mm 的反射镜, 当距光轴距离为 200 mm 和 2000 mm 时, ΔX 为 0.03 mm 和 1.69 mm, ΔY 为 0.19 mm 和 0.31 mm; 当距光轴距离仍为 2000 mm 时, 玻璃厚度为 5 mm 的反射镜, ΔX 为 8.41 mm, ΔY 为 1.55 mm。通过 TracePro 模拟以及实际实验测量, 结果与理论计算相符。

关键词 光学器件; 太阳能; 槽式聚光; 厚度; 特性

中图分类号 O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1208002

Influence of Glass Thickness of Reflector on the Concentrating Characteristics in the Solar-Energy Trough System

Chen Fei¹ Li Ming¹ Ji Xu¹ Luo Xi¹ Wang Liuling²

(¹ Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China
² School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

Abstract The concentrating characteristics with the glass thickness of reflector of the solar parabolic trough system are studied by theoretical analysis, simulation, and experiments. The results show that the thicker glass of the reflector and the farther distance of the incident light from the optical axis, the bigger both ΔX and ΔY are. The theoretical analysis has been done for the solar parabolic trough system whose focal length is 1200 mm, and the refractive index of glass of reflector is 1.6. For 1-mm thickness glass of reflector, when the distance from the optical axis of the incident light is 200 mm and 2000 mm respectively, ΔX is 0.03 mm and 1.69 mm respectively, ΔY is 0.19 mm and 0.31 mm respectively. For 5-mm thickness glass of reflector, when the distance from the optical axis of the incident light still is 2000 mm, ΔX is 8.41 mm, and ΔY is 1.55 mm. The theoretical analysis is consistent with TracePro simulation and experiments. The research can provide references to further design of solar parabolic trough system.

Key words optical devices; solar energy; trough concentrating; thickness; characteristic

OCIS codes 000.6850; 080.2740; 220.4830; 260.2160

1 引 言

太阳能热发电技术主要有槽式系统、塔式系统和碟式系统, 其中槽式系统研究最为广泛, 技术最为成熟, 成本越来越低, 可提供 400 °C 的温度, 已在诸多国家商业化运行^[1~4]。槽式系统主要由集热及热

转换设备组成, 集热设备的聚光特性是整个系统的关键, 聚光性能的优劣直接影响了系统的热效率^[5,6], 为此国内外学者进行了大量的研究。江守利^[7]研究了半抛物槽式反射聚光系统的光线性能, 研究结果表明半抛物面反射聚光系统中太阳影像大

收稿日期: 2012-06-12; 收到修改稿日期: 2012-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(51106134)和国家自然科学基金云南联合基金重点项目(U1137605)资助课题。

作者简介: 陈 飞(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事太阳能热利用方面的研究。E-mail: solarchenfei@163.com

导师简介: 李 明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事太阳能利用方面的研究。E-mail: lmllldy@126.com

小和系统几何聚光比与聚光镜的焦距长度及开口有关。Coventry^[8]研究了槽式太阳能热电联供系统轴向和横向聚光特性, 研究结果显示槽式太阳能热电联供系统在柱面抛物镜边缘处受到的应力大, 反射汇聚的太阳光线到达柱面抛物镜焦线位置时偏移量大。崔映红等^[9]对抛物面槽式太阳能集热器场的热损失进行了研究, 文中指出集热器反射镜光学损失和集热元件光学损失约占总损失的 20%。帅永等^[10]对抛物面式太阳能聚能系统聚光特性进行了模拟研究, 结果显示集热器反射镜聚光比受焦距的影响较小, 最大相对差值为 1.76%。Maccari 等^[11]通过对槽式系统反射镜的面形测定研究了聚光特性, 研究发现槽式系统反射镜的面形发生微小的改变, 会明显地降低系统的聚光效果。

但在已有的研究中, 近似认为反射镜直接将太阳光线反射汇聚到焦平面, 忽略了反射镜玻璃厚度的存在而导致汇聚光线的偏移, 因此本文针对太阳能槽式系统中反射镜玻璃厚度对太阳能槽式系统聚光特性的影响进行了理论计算、软件模拟和实验分析。

2 考虑反射镜玻璃厚度存在汇聚光线方程求解

太阳能槽式聚光系统在跟踪装置的调节下, 太阳光到达反射镜后, 会经过无限次反射、折射、透射, 但实际的太阳能槽式聚光系统中, 为了提高系统的热效率, 反射镜一般采用超白镀膜玻璃, 超白玻璃具有高透射比、低吸收比和反射比, 且银的反射率在 95% 以上^[12]。因此太阳光到达反射镜后所经过的主要路径如图 1 所示。太阳能槽式聚光系统反射镜为弯曲的柱面镜, 一般是将平面镜通过热弯或冷弯

而成, 平面镜发生的是纯弯曲变形。弯曲平面镜上下表面互为等距曲面。在平面镜弯曲时, 一般将其放置在模具上进行成形, 模具通常都是抛物柱面, 最常见的长焦距太阳能槽式聚光系统反射镜下表面为抛物柱面, 上表面是距离抛物柱面为反射镜玻璃厚度的等距曲面。

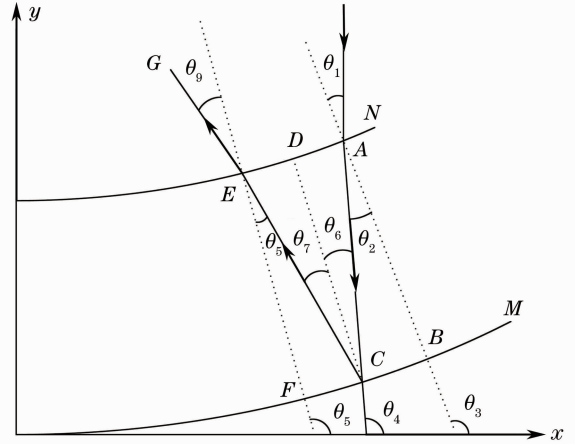


图 1 太阳光到达下表面为抛物柱面的槽式系统主要路径

Fig. 1 Main path of sunlight reaching the trough system with lower surface of parabolic reflector

设图 1 中太阳能槽式系统反射镜下表面 M 的参数方程为

$$\begin{cases} x = 4ft \\ y = 4ft^2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 t 为参数, f 为焦距。所以曲面 N 的参数方程为

$$\begin{cases} x = 4ft - \frac{2\delta t}{\sqrt{1+4t^2}} \\ y = 4ft^2 + \frac{\delta}{\sqrt{1+4t^2}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 δ 为反射镜玻璃厚度。由 Snell 定律可求得折射光线 AC 的方程为

$$y - \left(4ft^2 + \frac{\delta}{\sqrt{1+4t^2}}\right) = \frac{4t^2 + u}{2t - 2tu} \left(x - 4ft + \frac{2\delta t}{\sqrt{1+4t^2}}\right), \quad (3)$$

式中 $u = \sqrt{4n^2t^2 + n^2 - 4t^2}$, n 为反射镜玻璃的折射率。联立 (1) 式和 (3) 式可求出 C 点横坐标 x_c 、切线斜率 $k_{c//}$ 、法线斜率 $k_{c\perp}$ 分别为

$$x_c(t) = -2f \frac{4t^2 + u}{2tu} + \sqrt{\left(2f \frac{4t^2 + u}{2tu - 2t}\right)^2 + 4f \left(4ft^2 + \frac{\delta}{\sqrt{1+4t^2}} + \frac{4t^2 + u}{2t - 2tu}\right) \left(\frac{2\delta t}{\sqrt{1+4t^2}} - 4ft\right)}, \quad (4)$$

$$k_{c//} = \frac{y'_c(t)}{x'_c(t)} = \frac{1}{4f} \frac{\{[x_c(t)]^2\}'}{x'_c(t)} = \frac{x_c(t)}{2f}, \quad (5)$$

$$k_{c\perp} = k_{cD} = -\frac{2f}{x_{c(t)}}. \quad (6)$$

所以反射光线 \overline{CE} 的方程为

$$y - y_C(t) = k_{\overline{CE}}[x - x_C(t)], \quad (7)$$

式中 $k_{\overline{CE}} = \frac{k_{\overline{AC}} - 2k_{\overline{CD}} - k_{\overline{CD}}^2 k_{\overline{AC}}}{k_{\overline{CD}}^2 - 2k_{\overline{CD}}k_{\overline{AC}} - 1}$, $k_{\overline{AC}} = \tan \theta_4 = \frac{4t^2 + u}{2t - 2tu}$ 。联立 (7) 式和曲面 N 的一般方程可求得 E 点坐标,

曲面 N 的一般方程为

$$x = \left[4f - \frac{2\delta}{(2/3) \sqrt{3(1+y/f) \cos(\alpha/3)}} \right] \frac{\sqrt{[(2/3) \sqrt{3(1+y/f) \cos(\alpha/3)}]^2 - 1}}{2}, \quad (8)$$

式中 $\alpha = \arccos\left(\frac{-3q\sqrt{-3p}}{2p^2}\right)$, $p = -\left(1 + \frac{y}{f}\right)$, $q = \frac{\delta}{f}$ 。因此 y_E 为

$$y_E - y_C = k_{\overline{CE}} \left\{ \left[4f - \frac{2\delta}{(2/3) \sqrt{3(1+y_E/f) \cos(\alpha/3)}} \right] \frac{\sqrt{[(2/3) \sqrt{3(1+y_E/f) \cos(\alpha/3)}]^2 - 1}}{2} - x_C \right\}, \quad (9)$$

(9) 式是超越方程, 可通过程序进行求解。折射光线 \overline{EG} 的方程为

$$y - y_E = k_{\overline{EG}}(x - x_E), \quad (10)$$

式中 $k_{\overline{EG}} = \frac{\tan \theta_9 + k_{\overline{EF}}}{1 - k_{\overline{EF}} \tan \theta_9}$, $k_{\overline{EF}} = -\frac{1}{2t_E}$, $\tan \theta_9 =$

$$\frac{n \sin \theta_8}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta_8}}, \sin \theta_8 = \frac{\tan \theta_8}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_8}}, \tan \theta_8 =$$

$\frac{k_{\overline{CE}} - k_{\overline{EF}}}{1 + k_{\overline{CE}} k_{\overline{EF}}}$ 。在 (10) 式中, 令 $x = 0$ 可计算出直线

\overline{EG} 的截距 l_y 值。反射镜玻璃厚度导致汇聚光线偏离焦点的纵向偏移量 $\Delta Y = l_y - f$, 令 (10) 式中 $y = f$ 可计算出反射镜玻璃厚度导致汇聚光线偏离焦点的横向偏移量 ΔX 。

(10) 式是认为太阳光为平行光时太阳能槽式聚光系统对太阳光线汇聚时的主要路径方程。实际上太阳对地球有 $32'$ 张角^[13], 只需将 θ_1 替换为 $\theta_1 \pm 16'$ 。

3 反射镜玻璃厚度对聚光特性影响的理论计算及分析

为分析太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的具体影响, 在不考虑太阳张角的条件下对典型的焦距为 1200 mm, 反射镜玻璃的折射率为 1.6, 反射镜玻璃厚度分别为 1、2、3、4、5 mm 的槽式系统进行了理论计算。

3.1 反射镜玻璃厚度对汇聚光线纵向离焦偏移量的影响

槽式系统的反射镜玻璃在不同的厚度, 汇聚光线的 ΔY 与入射光线距光轴距离的关系如图 2 所示。可以看出, ΔY 均为正, 汇聚光线与光轴的截距大于焦距, 与距离光轴位置的远近、反射镜玻璃厚度的大小无关。

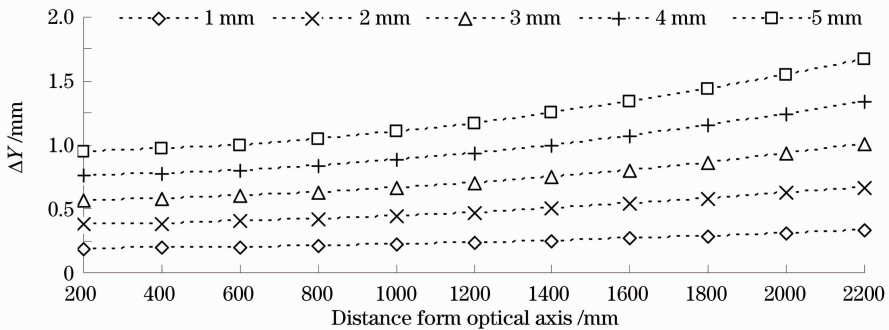


图 2 纵向偏移量 ΔY 与入射光线位置的关系

Fig. 2 Relation of vertical offset ΔY and location of incident light

在入射光距光轴相同的距离, 反射镜玻璃越厚, ΔY 越大。距光轴距离为焦距 2000 mm 的入射光线, 玻璃厚度为 1 mm 的反射镜 ΔY 为 0.31 mm; 而玻璃厚度为 5 mm 的反射镜 ΔY 为 1.55 mm。这是由于太阳光线在反射镜玻璃内部的光程会引起汇聚

光线与光轴的交点偏离焦点。而反射镜玻璃越厚, 太阳光线在反射镜玻璃内部通过的光程越多, 汇聚光线与光轴的截距就越大。

玻璃厚度相同的反射镜, 距光轴距离越远, ΔY 越大。玻璃厚度为 3 mm 的反射镜, 入射光线距光

轴距离为 200 mm 时, ΔY 为 0.57 mm; 入射光线距光轴的距离为 2000 mm 时, ΔY 为 0.93 mm。这是由于反射镜玻璃厚度的存在导致汇聚光线方向发生偏移, 玻璃厚度相同的反射镜, 距光轴距离越远, 边缘角越大, 光程越大, 汇聚光线与光轴的截距就越偏离焦距。

3.2 反射镜玻璃厚度对汇聚光线横向离焦偏移量的影响

平行光下槽式系统反射镜玻璃在不同厚度时,

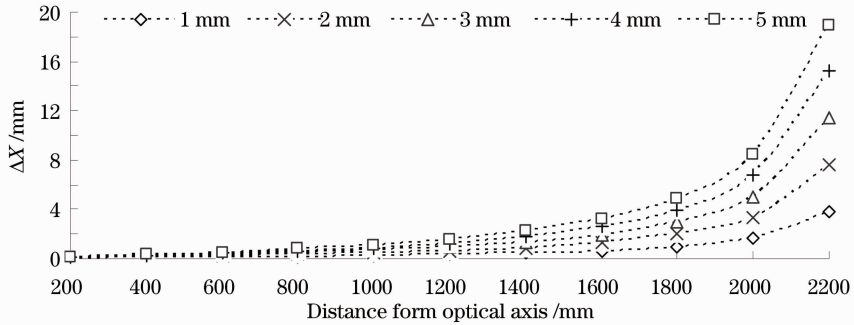


图 3 横向偏移量 ΔX 与入射光线位置的关系

Fig. 3 Relation of horizontal offset ΔX and location of incident light

汇聚光线到达在焦距位置的接收器时, 玻璃厚度相同的反射镜, 入射光线距光轴距离越远, ΔX 越大。当反射镜玻璃的厚度为 3 mm 时, 距光轴距离为 200 mm 的入射光线, ΔX 为 0.10 mm; 而距光轴距离为 2200 mm 的入射光线, ΔX 达到了 11.42 mm。这是由于反射镜玻璃厚度导致汇聚光线到达在焦距位置的接收器时与光轴发生偏离, 而距光轴距离越远, 偏移光线的光程越多, 汇聚光线到达在焦距位置的接收器时与光轴的偏离就越多。

4 反射镜玻璃厚度对聚光特性影响模拟实验

理论计算结果用 TracePro 软件进行了模拟, 其中反射镜焦距为 30 mm, 反射镜玻璃厚度为 3 mm, 反射镜玻璃折射率为 1.6。几何光路模拟实验结果如图 4 所示, 可以看出, 平行光达到反射镜后, 依次发生折射、再反射、最后再折射, 然后才将太阳光线汇聚, 且距光轴距离越远的位置, 汇聚的光线到达槽式系统光轴时, 越偏离焦点, 这与理论计算结果相符。

5 反射镜玻璃厚度对聚光特性影响实验及分析

为了验证理论计算和模拟的结果还进行了实

汇聚光线的 ΔX 与入射光线距光轴距离的关系如图 3 所示。汇聚光线到达在焦距位置的接收器时, 距光轴距离相同的入射光线, 反射镜玻璃越厚, ΔX 越大。当入射光线距光轴距离为焦距 1200 mm 时, 玻璃厚度为 1 mm 的反射镜 ΔX 为 0.31 mm, 玻璃厚度为 5 mm 的反射镜 ΔX 达到了 1.55 mm。这是由于距光轴距离相同的位置, 反射镜玻璃越厚, 汇聚光线斜率的绝对值越大, 汇聚光线越倾斜, 汇聚光线到达在焦距位置的接收器时与光轴的距离就越大。

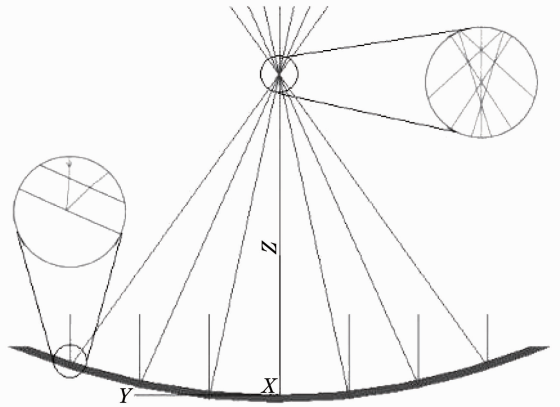


图 4 TracePro 模拟几何光路结果

Fig. 4 Result of the geometric optical path simulated by TracePro



图 5 实验太阳能槽式系统

Fig. 5 Experimental solar-energy trough system

验。图 5 是实际实验的太阳能槽式系统,该系统的开口宽度 160 cm,焦距 106 cm,反射镜玻璃厚度 2 mm,反射镜玻璃的折射率为 1.5。

采用电荷耦合器件(CCD)对系统的聚光特性进行了测试,所拍摄的焦斑图像如图 6 所示,用 Matlab 软件对焦斑图片进行处理分析,灰色部分表示焦斑所对应区域,其宽度为光斑宽度。

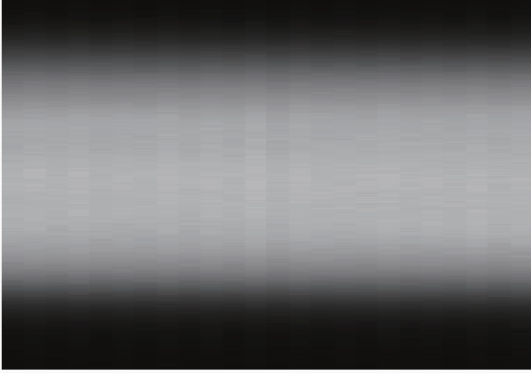


图 6 焦斑灰度图片

Fig. 6 Image of focal spot Grayscale

采用辐射计标定法得到灰度与能流比例系数,进而对聚光能流进行标定,获得聚光能流分布曲线如图 7 所示,可以看出,系统聚光后的能量基本在 $-10 \sim 10$ mm 范围内,理论计算结果在 $-7.8 \sim 7.8$ mm 范围内,这是由于在槽式系统制作过程中各种工艺误差、跟踪精度等导致了实际系统的反射镜是一个近似的抛物柱面导致的。

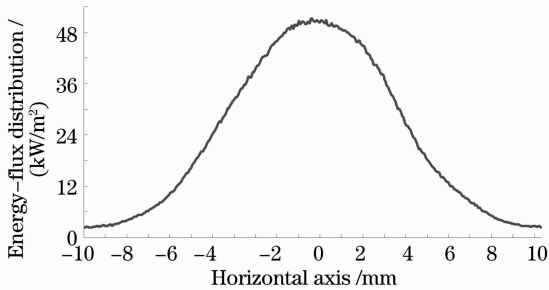


图 7 能流分布实验结果

Fig. 7 Experimental results of energy-flux distribution

6 结 论

反射镜玻璃厚度会影响太阳能槽式系统的聚光特性,入射光线距光轴距离相同的位置处,反射镜玻璃越厚,汇聚光线的 ΔY 越大,聚光特性越差;而玻璃厚度相同的反射镜,入射光距光轴距离越远, ΔY

亦越大。入射光距光轴距离相同的位置处,反射镜玻璃越厚, ΔX 越大;同样,玻璃厚度相同的反射镜,入射光距光轴距离越远, ΔX 越大。

参 考 文 献

- 1 Wang Fuqiang, Shuai Yong, Tan Heping. Thermal analysis of solar cavity receiver [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2011, **32**(5): 843~846
王富强, 帅 永, 谈和平. 腔式太阳能吸热器的热分析 [J]. *工程热物理学报*, 2011, **32**(5): 843~846
- 2 C. S. Solanki, C. S. Sangani, D. Gunashekar *et al.*. Enhanced heat dissipation of V-trough PV modules for better performance [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, **92**(12): 1634~1638
- 3 Tao Tao, Zheng Hongfei, He Kaiyan *et al.*. A new trough solar concentrator and its performance analysis [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(1): 198~207
- 4 A. F. García, E. Zarza, L. Valenzuela *et al.*. Parabolic-trough solar collectors and their applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(7): 1695~1721
- 5 He Yaling, Xiao Jie, Cheng Zedong *et al.*. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector [J]. *Renewable Energy*, 2011, **36**(3): 976~985
- 6 Gong Guangjie, Huang Xinyan, Wang Jun *et al.*. An optimized model and test of the China's first high temperature parabolic trough solar receiver [J]. *Solar Energy*, 2010, **84**(12): 2230~2245
- 7 Jiang Shouli. Fundamental Theory and Experimental Study of Reflective Concentrating Solar Energy Utilization [D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2009. 77~103
江守利. 反射聚光利用太阳能的基础理论与实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009. 77~103
- 8 J. Coventry. A Solar Concentrating Photovoltaic/Thermal Collector [D]. Canberra: Australian National University, 2004. 101~138
- 9 Cui Yinghong, Bei Zhenhua, Zhao Xi. Research on the heat loss of parabolic trough solar collector field [J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, **28**(5): 5~9
崔映红, 卑振华, 赵 熙. 抛物面槽式太阳能集热器场热损失分析[J]. *可再生能源*, 2010, **28**(5): 5~9
- 10 Shuai Yong, Zhang Xiaofeng, Tan Heping. Simulation for concentrating characteristic of parabolic solar collector system [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2006, **27**(3): 484~486
帅 永, 张晓峰, 谈和平. 抛物面式太阳能聚能系统聚光特性模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2006, **27**(3): 484~486
- 11 A. Maccari, M. Montecchi. An optical profilometer for the characterization of parabolic trough solar concentrators [J]. *Solar Energy*, 2007, **81**(2): 185~194
- 12 Du Jinglong, Tang Dawei, Li Tie *et al.*. Design and experiment research of a solar simulator in dish solar power generation system [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(11): 1183~1185
杜景龙, 唐大伟, 李 铁等. 蝶式太阳热发电系统太阳模拟器的设计与实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, **31**(11): 1183~1185
- 13 J. A. Duffie, W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Process* [M]. Wisconsin: A Wiley-Interscience Publication, 1980. 5~6

栏目编辑: 韩 峰