

文章编号: 0253-2239(2007)10-1775-4

旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析*

刘 颖¹ 戴景民¹ 郎治国² 辛春锁¹

(¹ 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001
² 哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种计算太阳能聚光器聚光焦斑能流密度分布的新方法。在考虑太阳形状、聚光器表面形状误差、跟踪误差、接收器位置误差、漫反射及接收器遮挡作用等各项光学误差和影响因素的基础上, 结合旋转抛物面聚光器的光学特性, 采用有限元法对焦面能流密度分布进行计算, 并与文献中的结果进行比较, 证明了该方法的正确性和可行性。同时又对半球形接收器和圆柱形接收器进行了实例计算, 结果表明该方法不受聚光器或接收器面型的限制, 算法简单, 通用性也较强, 从而为系统的优化设计和能流密度的测量奠定基础。

关键词: 太阳能; 能流密度分布; 有限元法; 聚光器; 接收器

中图分类号: TK513.1 文献标识码: A

Finite-Element Analysis for Flux Distribution on Focal Plane of Rotating Parabolic Concentrators

Liu Ying¹ Dai Jingmin¹ Lang Zhiguo² Xin Chunsuo¹

(¹ Department of Automation Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
² Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: A new analysis method is proposed for calculating the flux density distribution on focal plane of solar concentrators. On the basis of considering the optical errors and the influence factors which are the sunshape, the random surface error of concentrators, the tracking error, the position error of receivers, the diffuse reflection and the shadow of receivers, with the optical properties of concentrators, the finite element method is used to calculate the flux distribution on the focal plane. The validity and the feasibility of the method are demonstrated by comparing results with those in references. The flux density of hemispheric receiver and cylindrical receiver are also calculated. The results show that the method is independent of the surface contour of concentrators or receivers. It is a simple and universal method that establishes the base for optimizing the system efficiency and measuring the flux-density distribution.

Key words: solar energy; flux-density distribution; finite-element method; concentrator; receiver

1 引 言

太阳能是一种能流密度低、辐射具有间歇性、空间分布又不断变化的能源, 与常规能源相比, 它的收集和利用要求更高。在太阳能的中高温利用中, 抛物面聚光器是比较常用的聚光设备, 它能提高入射阳光的能流密度, 使之聚集在较小的集热面上。聚

光器聚焦光斑能流密度分布的研究对最优化系统效率起到关键作用, 对于焦面能流密度的理论分析和计算, 常用的方法有锥体光学法、光线跟踪法、微角锥光学法等^[1~8]。这些方法的普遍缺点是, 当考虑各项误差因素影响时模型复杂、计算量大, 对于不同面型的聚光器或接收器要做不同的分析。针对这些

* 国家 973 计划(2003CB214500)资助课题。

作者简介: 刘 颖(1975—), 女, 黑龙江人, 博士研究生, 主要从事太阳能聚光器聚光焦斑能流密度方面的研究。

E-mail: lychg@163.com

导师简介: 戴景民(1963—), 男, 辽宁新民人, 教授, 博士生导师, 主要从事辐射测温及红外辐射测量、热物性及光学特性测试、光电仪器与仪表等方面的研究。E-mail: djm@hit.edu.cn

收稿日期: 2007-01-10; 收到修改稿日期: 2007-05-30

问题,本文提出一种新的计算方法,即有限元分析法(Finite-element analysis, FEA),该方法算法简单、通用性强,适用于任何理想及非理想面型聚光器或接收器聚光焦斑能流密度分布的计算。

本文对旋转抛物面聚光器焦平面能流密度分布进行计算,得出能流密度沿接收器半径的分布情况,为了证明该算法的通用性,又对两种常用接收器进行了数值模拟。

2 焦面能流密度的基本计算公式

假设聚光器的面积为 S_1 , n_1 和 n_2 分别为聚光器和接收器上微元面的法线, O_1 和 O_2 为各微元面上的点, β_1 和 β_2 分别为 O_1 和 O_2 的连线与各法线的夹角,如图 1 所示,则点 O_2 处的能流密度解析式为

$$E = \iint_{S_1} \frac{I_0 F \cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dS_1, \quad 0 \leq \beta_1, \beta_2 \leq \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

式中 I_0 为地面上太阳辐射能流密度, r 为 O_1 与 O_2 之间的距离, F 为考虑太阳形状和各项光学误差在内的反射光线分布函数。当每项光学误差都近似服从高斯分布(或不服从高斯分布的误差不起主导作用)时,总的光学误差分布的标准差可表示为^[8]

$$\sigma_{opt}^2 = \sigma_{track}^2 + (2\sigma_{slope})^2 + \sigma_{displ}^2 + \dots, \quad (2)$$

式中 σ_{track} 、 σ_{slope} 和 σ_{displ} 分别表示跟踪误差、反射面的表面形状误差和接收器位置误差的标准差。则服从高斯分布的光学误差分布函数为

$$H(\mu) = \frac{R \exp(-\mu^2/2\sigma_{opt}^2)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{opt}}, \quad (3)$$

式中 μ 为实际反射光线与理想反射光线夹角, $R = \rho / \sqrt{1 - \exp(-n^2/2)}$, ρ 为反射面反射率, n 为误差参量。

描述太阳形状模型很多,适用于陆地观察,且

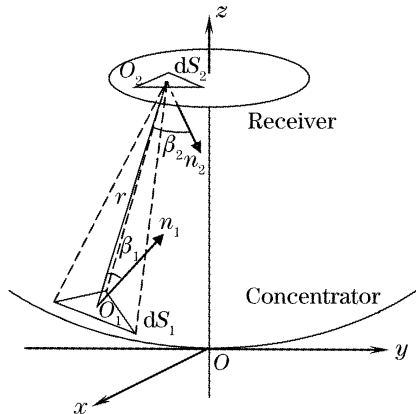


图 1 聚光器与接收器上微元面的几何关系

Fig. 1 The geometrical relation of infinitesimal areas of concentrator and receiver

不受地理位置影响的 Buie 模型为^[9]

$$\phi(\theta) = \begin{cases} \frac{\cos(0.326\theta)}{\cos(0.308\theta)}, & 0 \leq \theta \leq a_s \\ e^k \theta^\gamma, & \theta > a_s \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ 为入射光矢量的径向角,

$$k = 0.9 \ln(13.5\chi)\chi^{-0.3},$$

$$\gamma = 2.2 \ln(0.52\chi)\chi^{0.43} - 0.1,$$

χ 为太阳周边率, a_s 为太阳光不平行度,即地球上观察太阳圆盘的最大半角,近似等于 4.65 mrad。将光学误差分布函数(3)式与(4)式卷积,便可求得反射光线分布函数 F 。

3 有限元模型

有限元法的基本思想是将求解域看成由许多小的互连子域组成,对每个单元用一个合适的(较简单的)近似解来表示,从而得到离散模型的数值解。

3.1 积分计算的数值求和形式

为了对(1)式进行有限元法的计算,将两个面分别剖分成 L_1 和 L_2 个单元,设

$$G = \cos \beta_1 \cos \beta_2 / r^2, \quad (5)$$

则(1)式可写成

$$E = I_0 F \iint_{S_1} G dS_1, \quad (6)$$

数值求和形式为

$$E = I_0 F \sum_{i=1}^{L_1} G_i \Delta S_{1i}, \quad (7)$$

式中 G_i 是函数 G 在单元 dS_1 和 dS_2 内的平均值,根据积分平均的概念,可得

$$G_i = \frac{1}{\Delta S_{1i}} \iint_{\Delta S_{1i}} G d(\Delta S_{1i}), \quad (8)$$

采用高斯数值积分可得

$$G_i = \sum_{K=1}^M \omega^{(K)} G''[N_i^{(K)}, N_j^{(K)}, N_m^{(K)}], \quad (9)$$

式中 M 为求积基点数, (N_i, N_j, N_m) 为面积坐标, ω 为求积系数, G'' 为以面积坐标表示的求积函数。最简单的高斯积分只在一个求积基点上积分,为了提高精度,可以采用三个甚至七个基点的高斯积分,但工作量也会提高很快。计算指出,即使在单元划分很粗大的情况下,三基点的高斯积分已能得到较高精度的近似值^[10]。对于三基点的高斯积分, $\omega = 1/3$, $N_i^{(1)} = 0, N_j^{(1)} = N_m^{(1)} = 1/2, N_i^{(2)} = N_m^{(2)} = 1/2, N_j^{(2)} = 0, N_i^{(3)} = N_j^{(3)} = 1/2, N_m^{(3)} = 0$ 。(9)式即为有限元法的基本关系式。

3.2 单元平面的空间解析式

如图 1, 设点 O_1 和 O_2 的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) , 并且 O_1 和 O_2 为两个微元面的重心, 则 O_1O_2 的方向向量 \mathbf{r} 为 $[x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1]$, 则

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \quad (10)$$

因此可以求出

$$\cos \beta_1 = \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{r} / (n_1 r), \quad \cos \beta_2 = \mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{r} / (n_2 r), \quad (11)$$

将(10)式和(11)式代入(5)式, 可以求得

$$G = (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{r}) / (n_1 n_2 r^4), \quad (12)$$

直角坐标和面积坐标的关系为

$$\begin{cases} x = N_i x_i + N_j x_j + N_m x_m, \\ y = N_i y_i + N_j y_j + N_m y_m, \\ z = N_i z_i + N_j z_j + N_m z_m, \end{cases} \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式中, 即可求得函数 G'' , 将该函数代入(9)式, 即可完成二重高斯积分的运算。

3.3 有限元模型的建立

在用有限元法进行计算时, 将旋转抛物面聚光器的反射面按照圆盘面单元剖分规则进行剖分^[10]。为了计算焦平面上的能流密度, 假设接收器为半径为 R_f 的圆面, 单元剖分方法为将其中心层划分成若干三角形单元, 而在圆周层, 将其划分成四边形单元, 有限元模型如图 2 所示。

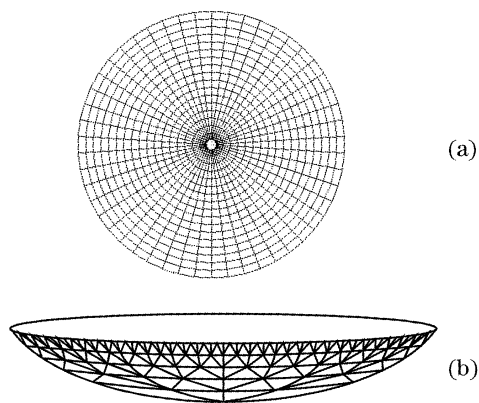


图 2 接收器(a)和聚光器(b)的有限元模型

Fig. 2 The finite-element model of receiver (a) and concentrator (b)

4 方法验证

为验证该方法的正确性, 首先与文献[3]的计算结果进行比较。本文所用参量为 $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$, $\rho = 0.9$, 聚光器焦距 $f = 1 \text{ m}$, $R_f = 0.25 \text{ m}$, $\chi = 0.05$ 。分别计算边缘角 $\varphi_{\text{rim}} = 60^\circ, 45^\circ$ 两种面型聚光器焦面能流密度沿接收器半径的分布情况, 如图 3 所示, 可

见两者基本吻合, 峰值处的差别是由于选用了不同的太阳模型。

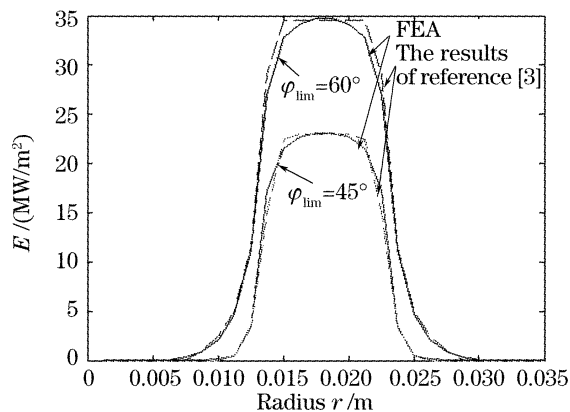


图 3 本文计算结果与文献[3]中的结果

Fig. 3 The calculation results and that of Ref. [3]

图 3 没有考虑各项光学误差, 为进一步证明本方法的正确性, 又与文献[7]中太阳能聚光器焦面能流分布计算结果进行比较。由于该聚光器应用在空间, 所以太阳模型选用适用于空间观察的柯伊帕(Kuiper)分布:

$$\phi(\theta) = I_0 \frac{1 + \beta \cos \nu}{1 + \beta}, \quad (14)$$

式中 ν 为太阳圆盘中心和地球连线与该中心和太阳圆盘上一点连线的夹角, β 为边缘暗淡系数。其他参量和文献[7]的一致, 即聚光器开口直径 $D = 8.2 \text{ m}$, $R_f = 1.2 \text{ m}$, $f = 3.55 \text{ m}$, $\rho = 0.9$, $I_0 = 1309.2 \text{ W/m}^2$, 考虑接收器的遮挡, 且 $\sigma_{\text{slope}} = 2.5 \text{ mrad}$, $\sigma_{\text{track}} = 2.5 \text{ mrad}$ 。本文计算结果与文献[7]的比较如图 4 所示。

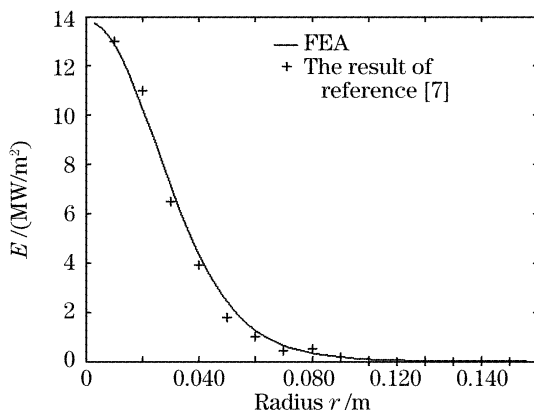


图 4 本文计算结果与文献[7]中的结果

Fig. 4 The calculation results and that of Ref. [7]

因此有限元法计算旋转抛物面聚光器焦面能流密度分布是可行的。

5 计算实例

为了进一步证明该方法对不同面型聚光器或接

接收器的适用性,本文对常用的半球形接收器和圆柱形接收器进行了模拟,任意选取聚光系统中的各个参量和各项误差取值,其中聚光器的开口直径为 $D=1.67\text{ m}$, $f=1\text{ m}$, $\rho=0.9$, $I_0=1000\text{ W/m}^2$,考虑接收器的遮挡,且 $\sigma_{\text{slope}}=1\text{ mrad}$, $\sigma_{\text{track}}=1\text{ mrad}$, $\sigma_{\text{displ}}=2.4\text{ mrad}$ 。图5中半球形接收器的底面中心放置在聚光器的焦点处,底面半径为 0.025 m ,所采用的剖分方法与图2(a)相同。图6中圆柱接收器的底面中心与焦点重合,底面半径为 0.025 m ,高为 0.03 m ,上底面的剖分方法与图2(a)相同,侧面划分成面积相等的四边形单元。从图中可以清楚地看到接收器内部的能流密度分布情况。

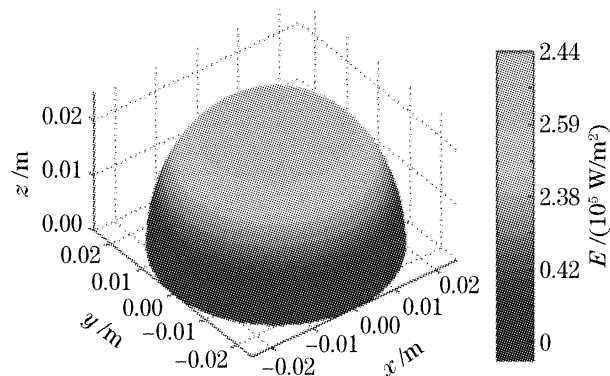


图5 半球形接收器的能流密度分布

Fig. 5 The flux density distribution of hemispheric receiver

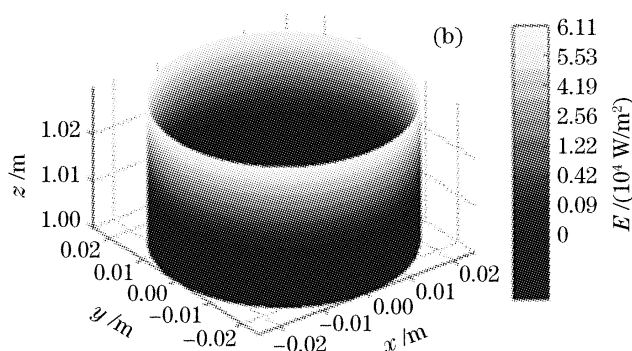
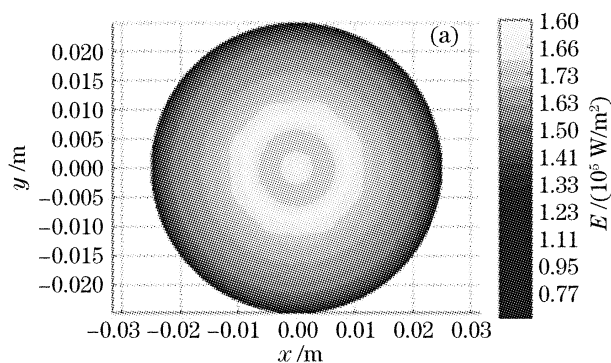


图6 圆柱形接收器的能流密度分布。(a)上底面,(b)圆柱侧面

Fig. 6 The flux density distribution of cylindrical receiver. (a) upper surface, (b) side of the cylinder

6 结 论

采用有限元法计算旋转抛物面聚光器接收器的能流密度分布,并且考虑多种误差因素的影响,通过实例计算,证明了该方法的正确性。对于其他面型的聚光器或接收装置,只要对剖分方法加以改动,就可以实现。通过计算接收器的能流密度分布,可以推算出接收器的温度分布、聚光系统的光学效率和聚光比等参量,对系统的优化设计和热设计有重要的参考价值和指导意义,并为聚光焦斑能流密度的测量奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 J. C. Daly. Solar concentrator flux distributions using backward ray tracing[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(5): 2696~2699
- 2 James A. Harris, William S. Duff. Focal plane flux distributions produced by solar concentration reflectors[J]. *Solar Energy*, 1981, **27**(5): 403~411
- 3 S. M. Jeter. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors[J]. *J. Solar Energy Engng.*, 1986, **108**: 219~225

- 4 A. Mobarak, A. A. Rahim. Determination of focal flux distribution of a parabolic dish solar concentrator applying real sunshape[C]. *Twelfth Annu. Int. Sol. Engng.*, 1990. 79~86
- 5 I. I. Pirmatov, T. T. Riskiev, A. A. Sagatov. The calculation technique for the mirror-concentrating system radiation field[J]. *Appl. Solar Energy*, 1998, **34**(5): 49~55
- 6 H. Sammouda, C. Royere, A. Belghith *et al.*. Reflected radiance distribution law for a 1000 kW thermal solar furnace system[J]. *Renewable Energy*, 1999, **17**: 9~20
- 7 Li Ruiheng, Xing Yuming, Liu wei. Heat flow distribution on the focal plate of the 10 kW concentrator of the space solar dynamic system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2005, **26**(1): 116~120 (in Chinese)
李瑞恒,邢玉明,刘伟. 空间太阳能热动力发电系统 10 kW 聚能器焦平面热流密度分布计算[J]. *太阳能学报*, 2005, **26**(1): 116~120
- 8 Paul Bendt, Ari Rabl. Optical analysis of point focus parabolic radiation concentrators[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(4): 674~683
- 9 D. Buie, A. G. Monger, C. J. Dey. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations[J]. *Solar Energy*, 2003, **74**(2): 113~122
- 10 Kong Xiangqian. *The Application of Finite Element Method in the Heat Transfer* [M]. Third edition, Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 第三版,北京:科学出版社, 1998