

线聚光菲涅耳集热器的端部损失与补偿

浦绍选^{1,2}, 夏朝凤²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650092)

摘要: 线聚光菲涅耳集热器的端部损失对其光学性能的影响非常重要。基于南北向菲涅耳反射镜场, 该文从分析入射太阳光线与反射镜单元跟踪轴线之间的夹角出发, 导出了反射光线到达接收器时在南北向偏离的距离(即端部损失)的计算公式。以北纬 25°01' 为例计算分析了在月平均日、春分秋分日和夏至冬至日的端部损失随反射镜单元焦距、反射镜距接收器的水平距离的变化情况, 并通过光线跟踪模拟实验对春分秋分日的计算结果进行验证, 两者十分吻合。同时, 对端部损失的补偿方法进行了探讨。该研究方法和结果对如何减少线聚光菲涅耳集热器的端部损失具有实际指导作用。

关键词: 太阳能聚光器, 太阳能集热器, 线聚光菲涅耳集热器, 端部损失, 端部损失补偿

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.z1.054

中图分类号: S214, TK51

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-Supp.1-0282-04

浦绍选, 夏朝凤. 线聚光菲涅耳集热器的端部损失与补偿[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 282-285.

Pu Shaoxuan, Xia Chaofeng. End-loss and compensation of linear fresnel collectors [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.1): 282-285. (in Chinese with English abstract)

0 引言

线聚光菲涅耳集热器是由几条平的或略带弯曲的镜子(称为初级反射镜)将太阳直接辐射反射到位于初级反射镜场上方的接收器上的一种聚光装置。和抛物槽聚光器相比, 线聚光菲涅耳集热器具有相对简单的结构、低风载、固定的接收器和土地利用率高等优点, 虽然效率低一些, 但比较便宜, 近年来已在一些大型的太阳能热发电中得到示范应用^[1-5]。菲涅耳线聚光初级镜场可以布置为南北向或东西向, 典型的大型镜场接收器高度约 10 m 左右, 光口宽度有 20~30 m, 设计热功率在 10 MW 以上。为了有效地提高地面的利用和减少反射镜的相互遮挡, Mills 和 Morrison 等人^[6-7]还提出了适合大规模太阳能热发电厂的紧凑型线聚光菲涅耳反射器多接收塔技术。此外, 为过程热应用的小型线聚光菲涅耳集热器也已有了研究示范^[8]。为了获得更高的聚光比, 菲涅耳线聚光集热器通常有更宽的光口和更高的接收器, 这就会造成有一部分阳光跑出接收器端头之外, 即所谓的端部损失。在大型的集热器场中, 可以通过增加集热器的长度来减少损失的比例, 但对于小型的菲涅耳线聚光集热器来讲, 端部损失更显得特别重要。Buie 等人^[9-10]对南北向菲涅耳线聚光器的端部损失已有所讨论, 并提出了近似估算的公式, 实际上该公式只适合于太阳正午。同时, 他们指出需要通过加长初级反射镜的长度来对端部损失进行补偿。本文研究南北向菲涅耳线聚光器不同季节和时间的端部损失, 并给出计算公式, 为减少端部损失提出一些建议。

1 太阳光线与初级反射镜跟踪轴之间的夹角分析

设有南北向放置的一块反射镜单元, 可绕镜自身的南北轴旋转以跟踪太阳。为了描述其在跟踪过程中反射光线的位置, 需要确定反射光线与反射镜跟踪轴之间的夹角。为此设 x 轴为转轴, 在反射镜面建立如图 1 所示的坐标系。图中 n 为反射镜的法向单位矢量, 它随镜面的转角而变; s 为指向太阳中心的太阳单位矢量, 可表示为:

$$s = i \cos \alpha_s \cos \gamma_s + j \cos \alpha_s \sin \gamma_s + k \sin \alpha_s \quad (1)$$

式中 i 、 j 、 k 分别为 x 、 y 、 z 方向的单位矢量, α_s 和 γ_s 分别为太阳的高度角和方位角, 正午时 γ_s 为 0, 偏东 γ_s 取“-”, 偏西 γ_s 取“+”。 α_s 和 γ_s 是地理纬度 ϕ 、太阳赤纬角 δ 和太阳时角 ω 的函数, 可以由下面的公式计算^[11]:

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (2)$$

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \phi} \right) \right| \quad (3)$$

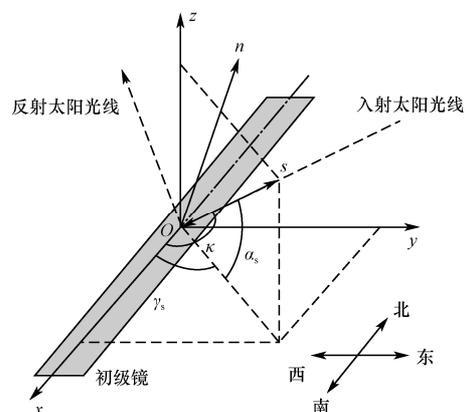


图 1 描述南北镜场太阳位置的坐标系

Fig.1 Coordinate system for describing the sun position in north-south mirror field

收稿日期: 2011-01-10

修订日期: 2011-02-17

作者简介: 浦绍选 (1962-) 男, 云南宣威人, 副教授, 博士生, 主要从事太阳能利用研究。Email: sxpu2004@hotmail.com

(3) 式中 $\text{sign}(\omega)$ 是符号函数，当时角 ω 为正（下午）时取“+”， ω 为负（上午）时取“-”。赤纬角 δ 可用 Cooper 公式近似计算^[12]：

$$\delta = 23.45^\circ \sin[(284 + n)(360^\circ/365)] \quad (4)$$

式中， n 为计算日在一年中的天数（从 1 月 1 日开始计）。太阳正午时， $\gamma_s=0$ ， $\omega=0$ ，太阳高度角为： $\alpha_s=90^\circ-(\phi-\delta)$ 。

由图 1 中的几何投影关系，结合 (1) 式可知，入射太阳光线与 x 轴（镜旋转轴）之间的夹角（也即太阳单位矢量与 x 轴之间的夹角） κ 可以用下式表示：

$$\tan \kappa = \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha_s \sin^2 \gamma_s + \sin^2 \alpha_s}}{\cos \alpha_s \cos \gamma_s} \quad (5)$$

太阳正午时， $\gamma_s=0$ ， $\kappa=\alpha_s$ 。

如果入射光的方向不变，则经镜面反射后，不论镜面的转角如何，反射光线与 x 轴之间的夹角仍为 κ ，不会发生改变。这对于我们研究太阳光反射射到菲涅耳线聚光集热器上的接收位置十分重要。

2 南北向线聚光菲涅耳集热器的端部损失的理论分析

为了简化分析，在此做以下假设：太阳的直射光为平行光；镜面没有误差，反射为理想的镜反射；初级镜和接收器具有相同长度；仅考虑入射到初级镜中心轴上的太阳光线的反射；跟踪轴线位于镜面内。

图 2 为位于镜场中的某反射镜单元和接收器之间的位置关系，接收器距离反射镜中心轴线的水平距离为 d 、垂直高度为 h ；某一时刻的太阳光线经镜面反射后的情况如图中所示，反射后的一部分光线不能被接收器接收到，其长度范围为 L_{end} ，此即为端部损失。由图中的几何关系可得端部损失为

$$L_{\text{end}} = \sqrt{d^2 + h^2} / \tan \kappa \quad (6)$$

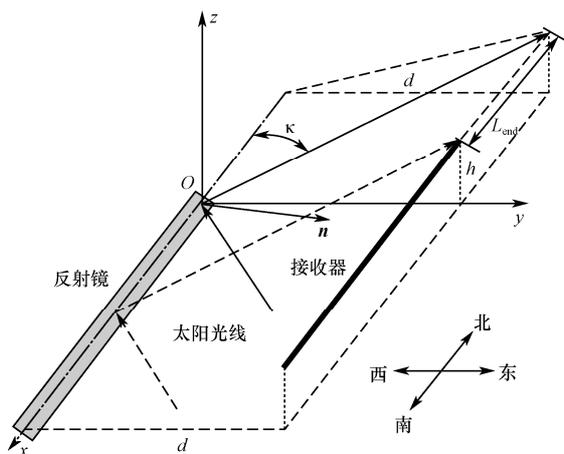


图 2 南北向线聚光菲涅耳集热器的端部损失示意图

Fig. 2 Schematic of end loss of a linear Fresnel concentrator

上式中 $\sqrt{d^2 + h^2}$ 为反射镜单元中心轴到接收器中心线的距离，可以称为镜单元的焦距。将 (5) 式代入 (6) 式，有

$$L_{\text{end}} = \sqrt{d^2 + h^2} \frac{\cos \alpha_s \cos \gamma_s}{\sqrt{\cos^2 \alpha_s \sin^2 \gamma_s + \sin^2 \alpha_s}} \quad (7)$$

由 (7) 式可知，对于南北向镜场的菲涅耳集热器，除了当太阳高度角 α_s 或太阳方位角 γ_s 为 90° 时，端部损失为 0 外，其它情况下端部损失总是存在。而且端部损失随地理纬度、季节和一天中时间而变，不同纬度的损失不同，不同季节的损失不同，不同时间的损失也不同。 L_{end} 可为正，也可为负。 $L_{\text{end}} > 0$ 表示端部损失在接收器的北端； $L_{\text{end}} < 0$ 表示端部损失在接收器的南端。在同一时刻，距离接收器越远的反射镜，造成的端部损失越大。

在太阳正午时，(7) 式变为： $L_{\text{end}} = \sqrt{d^2 + h^2} \cot \alpha_s = \sqrt{d^2 + h^2} \tan(\phi - \delta)$ 。

3 南北向线聚光菲涅耳集热器端部损失的计算与模拟

若用 f 表示反射镜单元到接收器的距离（焦距），即 $f = \sqrt{d^2 + h^2}$ ，可见，端部损失与 f 成正比，反射镜距接收器越远，端部损失越大。以昆明（北纬 $25^\circ 01'$ ）为例，计算 f 从 2~20 m（不管接收器高度）、1 月到 12 月各月平均日^[11]太阳正午时端部损失的情况，如图 3 所示。（注：按某日算出大气层外的太阳辐射量和该月的日平均值最为接近，则将当日定作该月的平均日。）

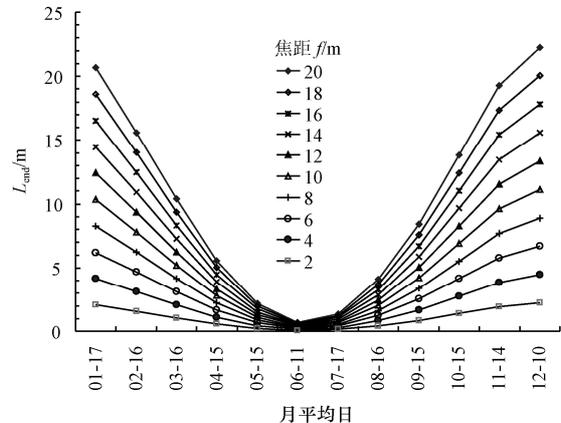


图 3 纬度 $25^\circ 01'$ 处，不同反射镜焦距在月平均日太阳正午时的端部损失

Fig. 3 The end loss with different focal distances f at solar noon on monthly average days for a latitude of $25^\circ 01' N$

从图上可以看出，冬季的端部损失比夏季大得多，如焦距为 20 m 的反射镜，12 月比 6 月的端部损失长约 21.6 m。100 m 长的聚光器，12-10 正午，焦距为 20 m 的反射镜将有 21.6% 的端部损失，若聚光器长 50 m，则有 43.2% 的端部损失；若为 1 000 m 长，则端部损失将得到有效降低，只有 2.16% 的损失。因此线聚光菲涅耳集热器的镜场光口不宜太宽，但可以从长度方向尽量加长。需要多宽合适，还要考虑接收器和镜场单位长度的成本效益。对于焦距一定的反射镜，我们也可计算一天中端部

损失随时间的变化。图 4 给出了在昆明纬度下，吸收器中心平面距反射镜单元水平距离 d 和垂直高度 h 均为 10 m 时，在各月平均日的端部损失随一天时间的变化。从图中可以看出，在该纬度地区，正午时的端部损失均为正，即端部损失在接收器的北端。4~9 月期间（从春分过后秋分以前），一天中早晚有一段时间的端部损失为负，即端部损失在接收器南端。这是由于太阳方位角在早晨小于 -90° 和在傍晚大于 90° 。

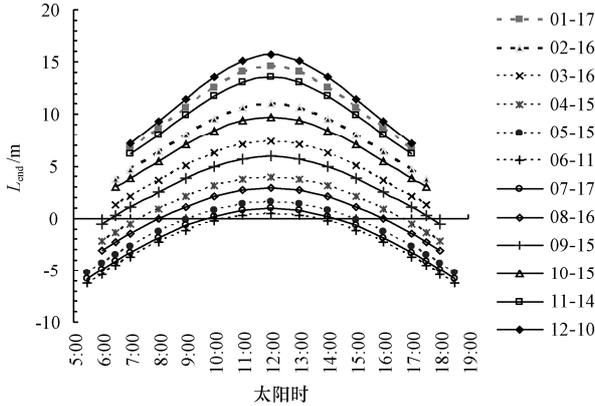


图 4 纬度 25°01'处，月平均日的端部损失随时间的变化 ($h=10\text{ m}$, $d=10\text{ m}$)

Fig.4 Variations of end loss as a function of solar time on monthly average days for a latitude of 25°01'N. ($h=10\text{ m}$, $d=10\text{ m}$)

图 5 给出了上述接收器高度下，在春秋分日、夏至日和冬至日端部损失随反射镜单元到接收器中心水平距离 d 的变化情况，它反映了不同位置的反射镜单元产生的端部损失在一天中和一年中的变化范围。反射镜离接收器越远，端部损失的变化范围越大，冬天的变化范围比夏天大。这些结果可以通过给定时刻的太阳单位矢量，设定反射镜偏转角，用光学设计软件（如 TracePro）进行光线跟踪模拟得到验证。表 1 给出了春、秋分日早晨 7:00 和太阳正午时计算和用 TracePro 光线跟踪的一些结果，公式计算和模拟的结果完全一致。

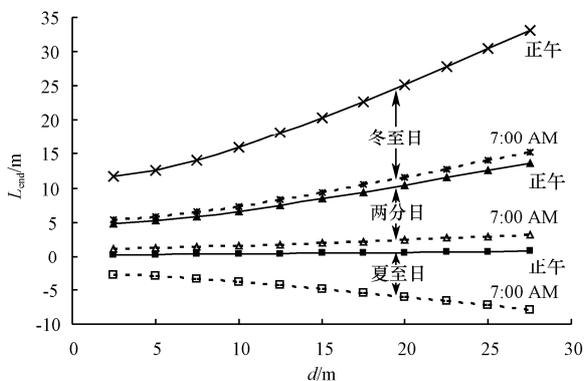


图 5 北纬 25°01'处，春秋分日、夏至日和冬至日端部损失随 d 的变化情况

Fig.5 Variations of end loss as a function of d on the solstices and the equinoxes for a latitude of 25°01'N

表 1 计算和模拟的春、秋分日的端部损失

Table 1 Calculated and simulated end loss for the equinoxes

| d/m | L_{end}/m | | | |
|-------|--------------------|--------|---------|-------|
| | 太阳正午 | | 上午 7:00 | |
| | 计算值 | 光线跟踪 | 计算值 | 光线跟踪 |
| 2.5 | 4.810 | 4.808 | 1.135 | 1.134 |
| 5.0 | 5.217 | 5.218 | 1.232 | 1.230 |
| 7.5 | 5.833 | 5.833 | 1.376 | 1.376 |
| 10.0 | 6.600 | 6.599 | 1.558 | 1.556 |
| 12.5 | 7.470 | 7.469 | 1.763 | 1.761 |
| 15.0 | 8.413 | 8.412 | 1.985 | 1.984 |
| 17.5 | 9.406 | 9.404 | 2.219 | 2.218 |
| 20.0 | 10.435 | 10.432 | 2.462 | 2.461 |
| 22.5 | 11.490 | 11.487 | 2.711 | 2.710 |
| 25.0 | 12.565 | 12.562 | 2.965 | 2.963 |

4 端部损失的补偿方法探讨

从上面的研究结果可以看出，在线聚光菲涅耳集热器中，如果反射镜和接收器的长度相同，则由于太阳的运动，反射的太阳光不能完全到达接收器的整个长度上，而有一部分超出接收器的端部。对南北向反射镜场，端部损失可能在接收器北端，也可能在其南端。接收器高度固定时，损失的大小与地理位置、太阳赤纬角、时角以及反射镜单元在镜场中的位置等有关，离接收器最远的反射镜单元造成的端部损失最大。为了减少端部损失的比例，通常的方式是将集热器场做得很长，如比利时 Solarmundo 公司的菲涅耳集热器长 1 000 m^[2]。但我们也可以根据本文提出的计算方法，一方面可通过增加反射镜长度来补偿接收器的端部损失，另一方面可以通过移动接收器来进行跟踪补偿。前者适合于中大规模的集热器场，后者对小型的较短的集热器是可行的，对大规模集热器，这种跟踪是不易实现的，且会导致设备成本和输入能源的增加。为了增加初级反射镜单元的长度，要计算需减小的端部损失，在南端（或北端）增加反射镜单元的长度。根据前面的计算可知，并不需要使所有反射镜单元的长度都相同，离接收器远的增加长一些，近的可增加少一些。对南北向菲涅耳集热器，移动接收器跟踪补偿仅仅是接收器沿南北向水平运动跟踪反射辐射，也可主要跟踪由于太阳赤纬角变化带来的端部损失，这种调整可一天一次。一天中虽然正午和早晚损失相差较大，但太阳高度角较低时，一方面太阳辐射弱，另一方面反射镜相互遮挡，实际到达接收器所在位置的辐射也是较小的。除了补偿之外，在设计集热器时，在综合考虑反射镜遮挡的情况下，应尽量降低接收器的高度，这对于小型菲涅耳线聚光集热器显得非常重要。

5 结论

线聚光菲涅耳集热器的端部损失对其性能的影响非常重要。本文基于南北向菲涅耳反射镜场，从分析入射太阳光线与反射镜单元跟踪轴线之间的夹角出发，导出了反射光线到达接收器时在南北向偏离的距离（即接收

器的端部损失)的计算公式。以北纬 25°01' 为例计算分析了在月平均日、春分秋分日和夏至冬至日的端部损失随反射镜单元焦距 f 、距接收器的水平距离 d 的变化情况, 并通过 TracePro 光学设计软件的光线跟踪模拟试验验证了春分秋分日的计算结果, 两者十分吻合。根据本文的研究方法, 对端部损失的补偿方法进行了探讨。该研究方法和结果对如何减少线聚光菲涅耳集热器的端部损失、提高其性能具有实际指导作用。当然本文公式是基于理想镜反射和不考虑太阳光的锥角导出的, 实际的情况会有一定误差。

[参 考 文 献]

- [1] Mills D R and Morrison G L. Advanced Fresnel reflector power plants-Performance and generating costs[C]//Proceedings of Solar '97 - Australian and New Zealand Solar Energy Society. December 1997, Canberra, Australia.
- [2] Häberle A, Zahler C, Lerchenmüller H, et al. The Solarmundo line focusing Fresnel collector: Optical and thermal performance and cost calculations[C]//Proceedings of the 11th SolarPACES International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies. September 2002, Zürich, Switzerland.
- [3] Mertins M, Lerchenmüller H, Häberle A, et al. Geometry optimization of Fresnel-collectors with economic assessment[C]//Conference Proceedings EuroSun 2004: 1-918 to 1-925. June 2004, Freiburg, Germany.
- [4] Eck M, Uhlig R, Mertins M, et al. Thermal load of direct steam generating absorber tubes with large diameters in horizontal linear Fresnel collectors[J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(1): 42-48.
- [5] Bernhard R, Laabs H G, Lalaing J de, et al. Linear Fresnel collector demonstration on the PSA Part I - Design, construction and quality control[C]//Proceedings of the 14th SolarPACES International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies. March 2008, Las Vegas, USA.
- [6] Mills D R and Morrison G L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants [J]. Solar Energy, 2000, 68(3): 263-283.
- [7] Mills D R, Morrison G L, Pye J, et al. Multi-tower line focus Fresnel array project[J]. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 2006, 128(1): 118-121.
- [8] Häberle A, Berger M, Luginsland F, et al. Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications [C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies. June 2006, Seville, Spain.
- [9] Buie D, Dey C J, and Mills D. Optical considerations in line focus fresnel concentrators [C]// Proceedings of the 11th SolarPACES International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies. September 2002, Zürich, Switzerland, pp. 197-203.
- [10] Buie D. Optical considerations in solar concentrating systems[D]. Sydney: The University of Sydney, 2004.
- [11] Duffie J A and Beckman W A. Solar Engineering of Thermal Processes (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc., New York, 2006.
- [12] Cooper P I. The absorption of solar radiation in solar stills [J]. Solar Energy, 1969, 12(3): 333-346.

End-loss and compensation of linear fresnel collectors

Pu Shaoxuan^{1,2}, Xia Chaofeng²

(1. Collage of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: The end-effect of a linear Fresnel collector is very important to its optical performance. Based on a north-south mirror field, the equation for estimating the end losses was derived from analyzing the angle between incident sunlight and the tacking axis of a reflecting mirror. For latitude of 25°01'N, as an example, variations of the end losses on monthly average days, solstices and equinoxes were calculated and plotted as a function of the mirror-receiver distances, horizontal distances from the mirror to the receiver and solar time. The calculated results were verified by ray-tracing simulation and the end-effect compensation was discussed. The theory and results of this study are of actual significant on how to reduce end losses of linear Fresnel collectors.

Key words: solar concentrator, solar thermal collector, linear Fresnel collector, end loss, end-effect compensation