

光学学报

一种新型槽式太阳能 CPV/T 聚光器的光学传输特性

孟宪龙^{1,2,3*}, 刘备^{1,2,3}, 段辰星^{1,2}, 刘存良^{1,2**}

¹西北工业大学动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

²陕西省航空动力系统热科学重点实验室, 陕西 西安 710129;

³西北工业大学太仓长三角研究院, 江苏 太仓 215400

摘要 如何充分利用大开口面积下槽式抛物面聚光器(PTC)的全区域辐射能量是需要考虑的关键问题,为此提出一种新型槽式自由曲面太阳能聚光器(TFFC),利用光伏/光热同时收集的形式扩展 PTC 聚光器的开口利用面积,在靠近 PTC 内侧采用传统槽式换热器形式,外侧则基于边缘光线传输原理设计一种自由曲面聚光光伏系统,采用倾斜的方式使太阳能电池板扩展能量接收面积,并获得均匀性极佳的聚光能流分布。之后采用光线追迹方法验证了其光学特性,并与传统 PTC 系统进行对比以完成结构参数的敏感性分析和误差因素的探讨,所得结果对槽式太阳能集热器系统的改进优化具有重要意义。

关键词 光学设计; 自由曲面; 太阳能聚光器; 几何构造法; 光线追迹法; 能流分布

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1522002

Optical Transmission Characteristic of Novel Trough Type CPV/T Concentrator

Meng Xianlong^{1,2,3*}, Liu Bei^{1,2,3}, Duan Chenxing^{1,2}, Liu Cunliang^{1,2**}

¹ School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

² Shaanxi Key Laboratory of Thermal Sciences in Aero-Engine System, Xi'an, Shaanxi 710129, China;

³ Yangtze River Delta Research Institute, Northwestern Polytechnical University,

Taicang, Jiangsu 215400, China

Abstract How to make full use of the full-area radiant energy of parabolic trough collector (PTC) under a large opening area is a key issue that needs to be considered. For this reason, a new trough free-form solar concentrator (TFFC) is proposed, which uses the form of photovoltaic/photothermal simultaneous collection to expand the PTC concentrator. The opening utilization area of the optical device adopts the traditional trough heat exchanger form on the inner side close to the PTC, and the outer side is based on the edge light transmission principle to design a free-form surface concentrating photovoltaic system, which uses an inclined method to expand the energy receiving area of the solar panel, and obtains a very uniform concentrating energy flow distribution. After that, the line tracing method is used to verify its optical characteristics, and compared with the traditional PTC system to complete the sensitivity analysis of structural parameters and the discussion of error factors. The results obtained are of great significance to the improvement and optimization of the trough solar collector system.

Key words optical design; free-form surface; solar concentrator; geometric construction method; ray tracing; method; energy flow distribution

OCIS codes 220.1770; 350.6050; 080.4298

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-01-28; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51806180)、中国博士后科学基金(2018M641018)、陕西省博士后科学基金(2018BSHTDZZ09)

通信作者: *mengxl@nwpu.edu.cn; **liucunliang@nwpu.edu.cn

1 引言

太阳能作为最有前途的可再生能源之一,是人类应对能源挑战的重要手段。聚光太阳能技术能够将大量的太阳光线会聚到小面积的接收器上,用于太阳能高温热转换或发电。太阳能聚光器是能量收集的关键部件,收集方式包括点聚焦和线聚焦两种类型^[1]。与点聚焦类型相比,槽式抛物面聚光器(PTC)这类线聚焦聚光器在国际上占据了最大的装机容量^[2],虽然 PTC 系统的聚光比相对较低,但具有更为简单的制造工艺和更高的性价比。为降低太阳能聚光器的度电成本而获得更高的商业竞争力,当前的 PTC 系统有以下两个方面发展趋势:1)采用非成像光学设计理念提升 PTC 的聚光能流密度,使其趋近于理想的聚光比^[3];2)开发具有更大开口面积的 PTC 系统以收集更多能量^[4],但这也意味着其对跟踪精度、风载荷、镜面质量、系统控制和安装不精确性等因素提出了更加严苛的要求。目前国际上较为领先的 PTC 系统—Spacetube 采用的槽式聚光开口宽度达到了 8.2 m,边缘角达到 82°^[5],其劣势在于扩大的开口尺寸增加了光学损耗,对容差角度提出了更高的要求。在重力和风载荷的影响之下,大口径 PTC 结构的应力特性面临巨大挑战,这将显著降低 PTC 系统的光学性能。另一方面,由于太阳跟踪系统和反射镜的积灰老化等原因,太阳能聚光系统的光学误差随运行时间的增加而增加^[6]。随着跟踪误差和反射误差等因素的影响加剧,聚焦光斑在接收面上的发散程度增加,形成更加明显的高斯分布,即较高聚光比的能量在接收面中心附近,而较低聚光比的能量出现在边缘区域^[7]。本文的研究目的是如何获得更多的辐射能量并最大限度地利用这种聚光能流分布,研究过程中结合了 PTC 系统目前的发展趋势,将先进的光学设计方法融合到大口径 PTC 的设计。

随着加工技术的不断发展,自由曲面技术已经在各个领域得到应用。自由曲面没有固定的数学表达式,其由若干曲面(如 B 样条曲面)构成^[8],实现了更高的设计自由度,可用于对光路传输的精准控制。自由曲面技术是在近几年进入到太阳能利用领域,目前还处于研发阶段,没有实现量产商业化,但通过发展新型自由曲面聚光器件,可以为聚光光伏电池提供均匀性相当优异的能流分布,大幅度提升聚光光伏(CPV)系统的效率、紧凑度和容差性能^[9],具有很大的工程应用潜力。从光学原理上看,自由

曲面 CPV 模块有透射式、反射式和科勒混合阵列式。在该领域最具代表性的是由西班牙马德里理工大学和美国波音公司等多家科研机构联合研制的 XR 型聚光光伏系统^[10-12],该系统采用偏轴结构,光学元件分别由一次反射镜“X”和二次折射镜“R”组成,采用单自由曲面(SMS)方法设计了自由曲面二次透镜,能够保证入射容差角度在 $\pm 1.84^\circ$ 范围内的光学效率不低于 82.12%^[13],且其几何聚光比(CG)达到 1000。XR 型系统具有光学效率高和光程短等独特优势,但该系统要求电池和二次镜之间的贴合非常准确,否则造成光学效率损失很高。在实际操作中,为防止电池短路,往往采用硅胶材料将电池进行贴合固定,但这造成了电池位置偏差和效率的降低^[14]。因此,该团队又发展了多套基于科勒混合聚光阵列原理的聚光系统^[15-16]。采用一次菲涅耳透镜结合二次自由曲面透镜的结构,制成了菲涅耳-科勒聚光器(FK)^[17],实验测试获得聚光比达到 595,入射光容差角度达到 $\pm 1.24^\circ$ 。为解决二次反射系统的光路遮挡问题,Alvarez 等^[18]还曾研发了全反射-透射(TIR-R)透镜,其具有大接收角和小横纵比的优点,聚光比达到 1256,理论光学效率达到 100%。RXI 则是另外一种电介质固态填充聚集器,采用二次卡塞格林反射结构,起初源于非成像光学领域^[3],而后被改进为带有自由曲面的 RXI 系统和采用一次菲涅耳透镜联合 RXI 的 F-RXI 系统^[19],都获得了很均匀的聚光能流分布和高容差性能评价。除了聚光光伏领域,在太阳能热利用领域已有人开始使用自由面形技术,Tsai 等^[20]基于偏斜光线矢量传输原理和齐次坐标矩阵的数学方法,构建了自由曲面槽式聚集器模型,基于该模型下的光线追迹结果显示,管式换热器接收的能流非常均匀,有利于高效率热转换。综上所述可以看出,以往的研究很少将自由曲面聚光系统应用于光热联用及 PTC 系统。

根据几何光学原理,聚光系统呈现高斯能流分布的边缘低能流区域主要是聚光外侧表面做出贡献的,利用这一特点,本文创新性将自由曲面光学设计方法引入 PTC 系统的设计,采用光伏/光热能(CPV/T)联合利用的方法来扩展 PTC 的开口利用面积,从而获取更高的接收能量和转化效率。新的结构模型由传统抛物面槽式聚光器和扩展的自由曲面反射器组成,称为槽式自由曲面太阳能聚光器(TFFC),其中抛物面槽式聚光器搭配管式换热器进行换热,扩展的自由曲面反射器通过几何构造方

法产生,并配合倾斜结构的太阳能电池板以期对光伏侧获得均匀的聚光能流分布。本文采用光线追迹方法验证 TFFC 系统的光路传输特性,并与传统 PTC 系统进行对比完成参数敏感性分析和误差因素的讨论,本文的研究内容对槽式太阳能集热器系统的改进具有重要意义。

2 光学模型

为了解释本文提出的新型 TFFC 的结构设计原理,这里简单阐述抛物面聚光器的几何光学性质。对于抛物面型聚光器,焦斑宽度和聚光比是评价太阳能聚光特性的关键要素,垂直于反射矢量的焦斑宽度取决于抛物面的几何参数和误差角度因素,这里将后者的影响归纳为接收半角 θ ,即考虑了跟踪误差、太阳形状、镜面面型误差、控制及安装不精确性和镜面倾斜误差等因素对入射光线随机不平行度造成的影响^[21],接收半角 θ 表征的是由这些影响导致聚光表面获得的入射光线角度可能达到的最大

值,这样聚焦焦斑的最大宽度可根据几何关系获取,表达式为^[22]

$$W = \frac{4f \cdot \tan \theta}{1 + \cos \psi}, \quad (1)$$

式中: f 为抛物面的焦距; ψ 为从 PTC 上任意点到焦点的直线与光轴之间的夹角, ψ 的取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

确定发散宽度的意义在于,可根据系统误差引起的接收半角来确定管式换热器的半径,这里基于 Eurotrough-LS3 尺寸参数将焦距 f 和接收半角 θ 分别设为 2.358 m 和 14 mrad,如图 1 所示。从图 1 可以看到,抛物面焦斑发散宽度 W 随夹角 ψ 的增大明显增大。这类传统成像聚光器的接收表面都呈现高斯分布,如抛物面碟式/槽式聚光器的能流密度随着与光轴之间距离的增加而下降,即较高能流密度的能量由接收中心获得,而较低能流密度的能量出现在边缘区域,因此在抛物线外侧收集的太阳光线更适合用于光伏转换。

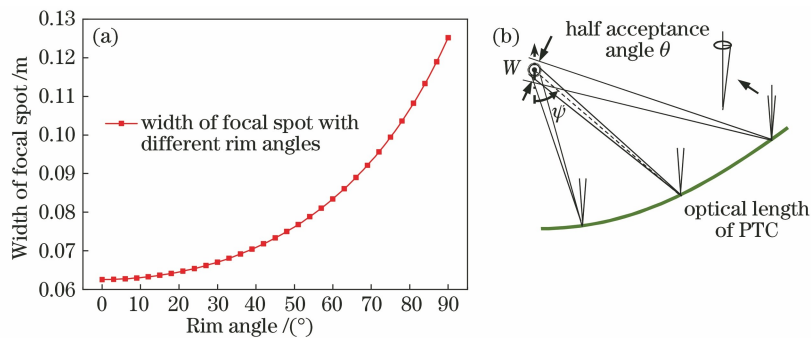


图 1 抛物面太阳能聚光器形成的焦斑宽度关系。(a) 曲线分布;(b) 光路模型

Fig. 1 Width of focal spot formed by parabolic solar concentrator. (a) Curve distribution; (b) optical path model

TFFC 结构和边缘光线原理如图 2 所示。PTC 技术的发展趋势是以更大的开口面积来获取更多的辐射能量,这意味着对跟踪精度提出了更高的要求,同时对风载荷、镜面质量、控制和安装不精确性等造成的系统误差更加敏感^[21],本文研究使用自由曲面和 CPV/T 接收器来扩展 PTC 的开口尺寸,从而实现更高的接收功率和光学效率。为了最大化利用收集到的太阳辐射能量,将圆管换热器布置在焦点位置(假设小于当地焦斑尺寸)以收集来自抛物线内部区域的接收能量,此处聚集光斑尺寸更小,因此光学损耗明显降低,这一部分通过使用高度商业化和成熟的 PTC 系统来确保最大聚光比。布置自由曲面

反射器的目的是为太阳能电池板形成均匀的辐照度和更高的光学效率,基于 CPV 应用还可以在一定程度上放宽对表面反射镜的精度限制,采用两块具有一定倾斜角的对称光伏板来替代平行板,以减少光伏板背面反射所带来的光损耗,允许更多的太阳光被聚光系统接收。为避免被抛物面聚光器反射后的一部分光线出现在光伏板局部而导致其过热,令一对称的光伏板以一定角度倾斜布置在圆管换热器上侧某一基点 S_{PV} 以上的位置处,该基点 S_{PV} 刚好通过从抛物面区域反射的外部边缘光线,这样既避免了电池板局部过热的的问题,也有利于形成表面均匀聚光能流分布。

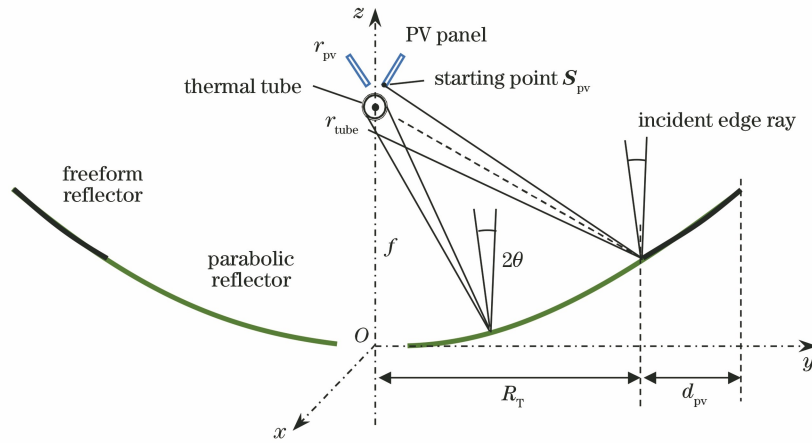


图 2 TFCC 结构和边缘光线原理

Fig. 2 TFCC structure and edge ray principle

图 2 中的 TFCC 结构参数如下:将 PTC 的光轴设置为笛卡儿坐标中的 z 轴,抛物线原点与坐标原点重合,TFCC 的所有光学/接收元件沿 x 轴的长度为 1000 mm,抛物面反射器区域的半径为 R_T ,自由曲面区域的长度设置为 d_{pv} ,圆管换热器被布置在焦距为 f 的焦点上, r_{pv} 和 r_{tube} 为光伏板和管的长度。此外,在反射器的中间留出间隙以安装支撑支架,用以支撑沿抛物面焦点线定位的圆管换热器,由于接收器总是遮蔽这个区域,这在不损失效率的前提下控制反射器的制造成本。光伏板长度 r_{pv} 与 CPV 的聚光比高度相关,同时光伏板的中心法线与光线经过自由曲面反射器的角平分线后重合,以确保最大化的光线接收率。

3 数理模型

本文基于几何构造法(GCM)构建自由曲面反射器,GCM 是一种离散点的直接生成方法,其根据光线传递规律和几何光学原理构建自由曲面反射或折射面型,特别适用于对光源和目标之间存在特定关系的情况。目前已有研究采用 GCM 构建连续微小平面组成的自由面镜,将其应用于非成像照明系统^[23],但这种使用平面过渡连接的方法具有表面误差大的缺点。为了规避传统 GCM 的缺点,基于圆弧过渡假设、精确求解下的几何构造法在近几年来受到关注^[24],该构造方法基于 D-H 矩阵变换和偏斜光线矢量传输原理,在保证圆弧过渡的同时生成离散点的精确解。本文为槽式太阳能热/电联用聚光系统开发了自由曲面构建模型,将所用方法称为圆弧过渡假设下的几何构造法(CGCM)。点生成过程如图 3 所示,步骤如下。

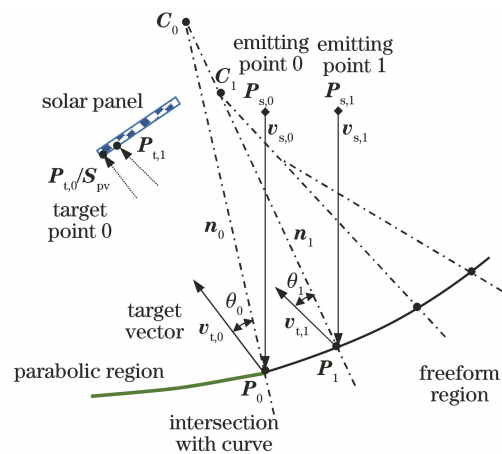


图 3 利用 CGCM 生成 TFCC 表面的原理

Fig. 3 Principle of TFCC surface generation by using CGCM

1) 已知初始点 $P_{s,0}$ 发射一个矢量为 $v_{s,0}$ 的光束,假设该光线同目标曲面相交于 P_0 以确定曲面放置的相对位置。根据目标矢量和目标点 $P_{t,0}$ 求解交点法向 $n_0 = \frac{v_{t,0}}{|v_{t,0}|} - \frac{v_{s,0}}{|v_{s,0}|}$,并获得该法线延长线 $\overline{C_0P_0} = P_0 + \lambda_0 t_0$,其中 t_0 为幅角, $v_{t,0}$ 为反射矢量, λ_0 为入射波长。

2) 从第二起始点 $P_{s,1}$ 开始,已知光线以矢量 $v_{s,1}$ 投射至目标曲面且被要求反射至 $P_{t,1}$ 点,则存在标量 $\lambda_{s,1}$ 使得光线 $[P_{s,1} v_{s,1}]^T$ 同目标曲面的交点 P_1 为

$$P_1 = P_{s,1} + \lambda_{s,1} v_{s,1} \quad (2)$$

至此,若能获得标量 $\lambda_{s,1}$ 的值即可确定光线交点 P_1 位置。

3) 为求解标量 $\lambda_{s,1}$,假设微圆弧线段 $\widehat{P_0P_1}$ 为圆弧形状,而根据法向向量 n_0 和 n_1 皆垂直于弧线,因此存在关系式

$$\overline{C_0 P_0} = \overline{C_0 P_1}, \quad (3)$$

其中

$$P_1 = P_{s,1} + \lambda_{s,1} v_{s,1}, \quad (4)$$

式中: C_0 为向量 n_0 和 n_1 的交点, 线段 $\overline{C_0 P_0}$ 是自变量 t_0 的单个函数, 表达式为

$$\overline{C_0 P_0} = P_0 + n_0 t_0. \quad (5)$$

同样, $\overline{C_0 P_1}$ 可以表示为

$$\overline{C_0 P_1} = P_1 + n_1 t_1. \quad (6)$$

局部法向矢量 n_1 可表示为

$$n_1 = \text{Rot}(y, \theta_1)(-v_{s,1}), \quad (7)$$

式中: θ_1 为入射/反射矢量平分角, 可表示为

$$\theta_1 = 1/2 \arccos(-v_{s,1} \cdot v_{t,1}). \quad (8)$$

一旦标量 $\lambda_{s,1}$ 被求解, 坐标 P_1 和相应的法向矢量 n_1 可通过(4)式和(7)式求解。同理, 点 P_2 、 P_3 、 P_4 和局部法向矢量可求。通过连接这些离散点, 可以生成自由曲面轮廓。另外, 入射矢量 $v_{s,0}$ 和 $v_{s,1}$ 与入射太阳光线平行, 光伏面板上的采样目标点 $P_{t,0}$ 和 $P_{t,1}$ 等应沿某一半径均匀分布。

可以肯定的是, 随着点数的增加, 生成的曲线变得更加精确。在计算机 CAD 辅助设计软件的帮助下, 当前模型选择了 50 个点来创建 B 样条曲线和槽式聚光器表面。基于表 1 的典型结构参数, 采用

表 1 用于射线追踪模拟的 TFFC 结构参数

Table 1 Structural parameters of TFFC for ray tracing simulation

Structure	Parameter	Value
Parabolic surface	Length /mm	2358
	Aperture /mm	4100
	Length along x -axis /mm	1000
	Gap distance /mm	400
	Reflectivity	1.0
Freeform surface	CG	5.0
	d_{pv} /mm	1741.7
	Number of discrete points	50
	Length along x -axis /mm	1000
	Reflectivity	1.0
Solar thermal tube	Diameter /mm	70
	Thermal energy ratio	0.7
	Length along x -axis /mm	1000
	Absorptivity	1.0
	y -coordinate of point S_{pv} /mm	50
PV receiver	r_{pv} /mm	234
	Slope angle /($^\circ$)	72.85
	PV energy ratio	0.3
	Length along x -axis /mm	1000
	Absorptivity	1.0

Tracepro 光线追迹软件可以计算获得 TFFC 的能量传输性能, 光源场设为长方形格点光源, 将光束设置的入射角分布设为日照分布, 即考虑了入射太阳圆锥半角($16'$)的影响, 光线追踪的太阳光线采样数设为 3×10^6 , 以保证光线模拟的精度, 同时忽略光谱的影响, 将所有表面和吸收器部件都视为反射率与吸收率比值为 1.0 的理想表面。为了验证本文数理模型的正确性, 将本文模型和文献[21]中对 LS3 聚光模型在不同入射角度下的光线追迹结果进行对比, 如图 4 所示。从图 4 可以看出模型的吻合度较好, 其中文献[21]没有考虑太阳圆锥半角的影响, 因此本文模型的计算结果也没有考虑这一影响。

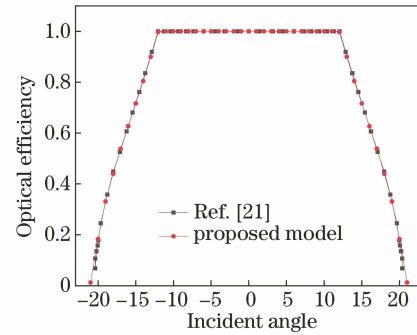


图 4 不同模型下的光学效率

Fig. 4 Optical efficiency under different models

4 模拟结果和讨论

以下讨论 TFFC 的光学特性模拟结果, 将其与传统 PTC 系统进行对比, 并进行系统参数的敏感性分析和误差因素的探讨。

4.1 光线传输路径分析

这里通过采样一部分光线传输路径作为 TFFC 光学特性的直观表达并进行探讨分析, 如图 5 所示。从图 5(a)可以看出, 在最理想状态下, 即入射倾斜角为 0, 聚集太阳能达到最大值, 槽式聚光器收集的太阳光线全部被圆管换热器收集。与原始的 PTC 系统相比, 本文提出的 TFFC 采用自由曲面反射镜来收集聚光系统的外边缘部分能量。从图 5(b)可以看出, 聚集的太阳光线被 TFFC 分成两个部分, 即一部分被中心的圆管换热器收集, 另一部分被反射到外侧的光伏接收器中。在入射倾斜角为 0 的条件下, 光学效率/截取因子达到 1, 自由曲面反射收集的太阳光线均匀分布在太阳能板上。同时, 注意到光伏电池板和圆管换热器之间有一个“空白区域”, 没有光线通过, 即最大化利用聚光辐射能量, 可见本文设计的自由曲面光学系统的模拟结果达到

了预期,验证了本文模型的正确性。另一方面,考虑对于此开口尺寸范围下的跟踪精度、反射镜质量以及控制和安装不精确度等条件下所带来的实际影响,将接收半角设为 14 mrad,对于有入射倾角的情

况[图 5(c)和图 5(d)],在一定程度上出现了光学损失,存在一些光线穿过了“空白区域”,但聚集光线仍然较为均匀地分布在太阳能电池板上,说明本光学模型的效果依然明显,这一点将在下文再次被证明。

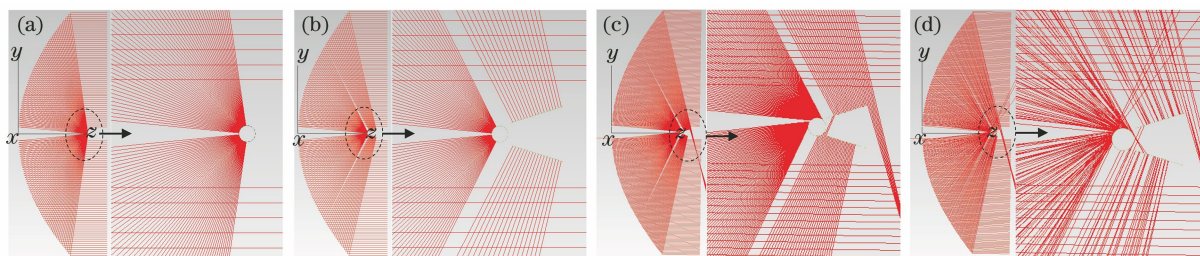


图 5 抛物面槽式和 TFCC 之间的光线传输路径比较。(a)入射角为 0 的 PTC;(b)入射角为 0 的 TFCC;
(c)入射倾角为 14 mrad 的 TFCC;(d)入射倾角为 14 mrad 和太阳圆锥角的 TFCC

Fig. 5 Comparison of ray paths between parabolic trough and TFCC. (a) PTC with incident angle of 0; (b) TFCC with incident angle of 0; (c) TFCC with incident inclination of 14 mrad; (d) TFCC with incident angle of 14 mrad and solar cone angle

4.2 TFCC 结构参数敏感性分析

4.2.1 光伏电池板接收几何聚光比的影响

CG 是由输入/反射面积和输出/接收面积之比进行定义的,其对太阳能接收器上的热流分布起着决定性的作用。这种效应使用图 6 的二维分布云图表示,使用图 7 的中心截面分布表示,其中 CG 设定在 3~7 个太阳之间。方块虚线之内是太阳能电池

板区域,辐射能流聚光比(CE)是采用聚光热流密度除以 1000 W/m^2 (1 个太阳)来作为接收能量的度量单位。从图 6 和图 7 可以看出,实际聚集能流分布仍然保持很高的均匀性,并且与预设的 CG 保持一致;随着预设 CG 值的增大,光伏电池板上覆盖的接收面积明显变小,均匀性变差;接收器的边缘部分能流出现急剧下降,这是由反射光线的发散引起的。

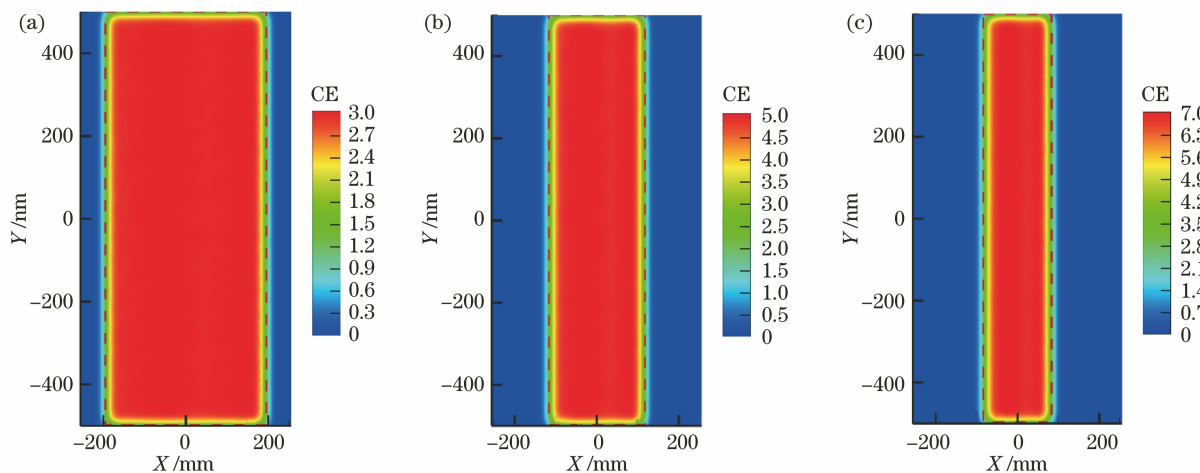


图 6 不同光伏几何聚光比条件下的太阳能电池板接收能流分布。(a) 3.0 ;(b) 5.0 ;(c) 7.0

Fig. 6 Distribution of received energy flow of solar panels under different concentration ratio of photovoltaic geometry.

(a) 3.0; (b) 5.0; (c) 7.0

4.2.2 光伏和光热能量占比的影响

光伏和光热利用的能量分配对 TFCC 系统的光学性能有很大影响,这里将“光伏比”定义为光伏板接收能量占总接收能量的比例,研究光伏比分别为 0.1、0.2 和 0.4 的光学特性,如图 8 所示。从图 8 可以看出,在相同预设几何聚光比的前提下,能流分布的均匀性随着光伏比的减小而降低;特别是

在光伏比为 0.1 的情况下,边缘热流密度的下降趋势更加明显,这将影响光伏转换的效率。自由曲面反射器在小面积条件下的误差因素影响更大,最终将影响光线传输;相反,随着光伏比的增加,能流分布的均匀性大大提升。综上可知,当将 TFCC 系统应用在较低光伏比条件下时,需要选择合理的 CG 参数以确保能流分布的均匀性。

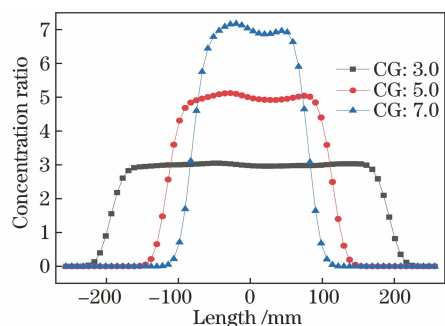


图 7 不同几何聚光比下太阳能电池板沿 $y=0$ 截面的聚光能流分布

Fig. 7 Concentrating energy flow distribution of solar panel along $y=0$ section under different CG values

4.2.3 不同误差条件下的光学特性

图 9 为 PTC 和 TFCC 两种聚光系统受聚光器开口尺寸和综合误差参数的影响,其中综合误差指的是镜面面型误差和光学误差等所导致的随机不平

行度偏差,这里取值范围为 $11 \sim 18$ mrad。从图 9 可以看出,获得的光学效率/截取因子处于 $0.7 \sim 1.0$ 之间,且随开口尺寸和误差程度的增大而急剧减小。特别是对于 10 m 开口尺寸(全开口宽度)和 18 mrad 随机误差的 PTC 系统,截取因子低至 0.727 ;相比之下,本文设计的 TFCC 系统的光学性能得到了显著提升,光伏能量占比为 0.3 的截取因子达到了 0.821 。在 9 m 和 10 m 的大开口尺寸条件下,TFCC 系统在不同误差下的截取因子持续高于传统 PTC 系统。另一方面,对于 7 m 和 8 m 开口尺寸的情况,TFCC 系统在低误差下几乎没有产生作用。如在 $11 \sim 13$ mrad 误差下的 7 m 开口尺寸的 TFCC 获得了比原始 PTC 系统更低的截取因子,而在较高误差下 TFCC 系统的作用效果显著。由此可知,TFCC 系统更加适用于大开口尺寸和误差的应用场景。

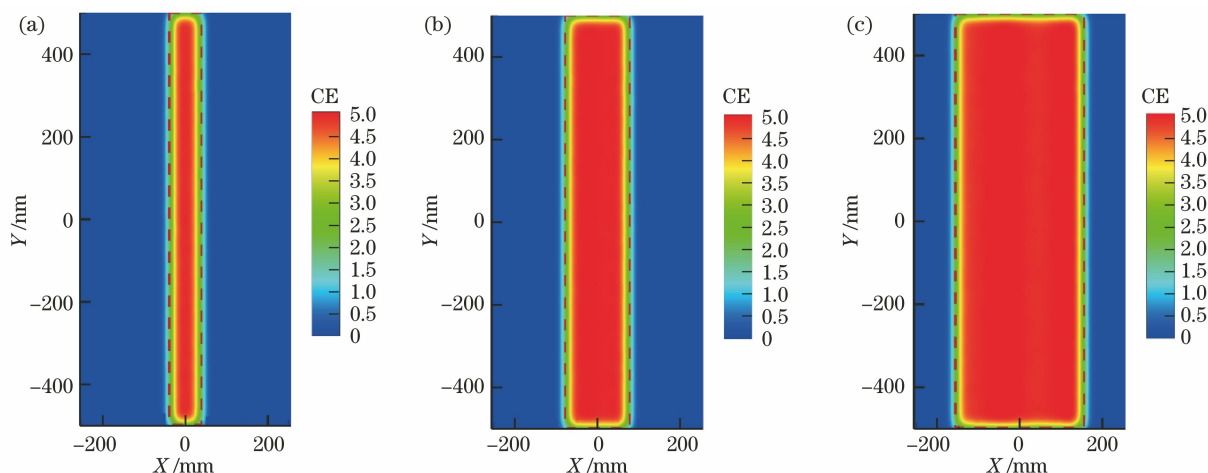


图 8 不同光伏比下太阳能电池板上的聚光能流分布。(a)光伏比为 0.1 ; (b)光伏比为 0.2 ; (c)光伏比为 0.4

Fig. 8 Concentrating energy flow distribution on solar panels with different photovoltaic ratios.

(a) Photovoltaic ratio is 0.1 ; (b) photovoltaic ratio is 0.2 ; (c) photovoltaic ratio is 0.4

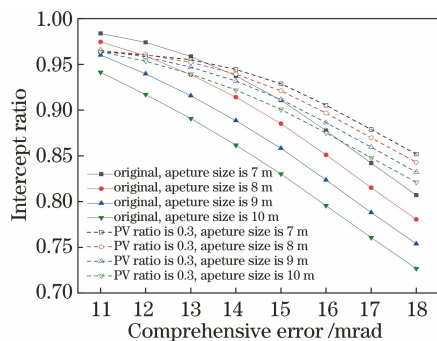


图 9 综合误差和开口尺寸对传统 PTC 和 TFCC 光学截取因子的影响

Fig. 9 Effect of comprehensive error and aperture size for original PTC and TFCC

对于聚光光伏系统应用的自由曲面,结构精度限制可以放宽。图 10 为综合误差分别为 $10, 14, 18$ mrad 的电池板聚光能流密度分布。根据模拟结果,在太阳能电池板主要中心区域的能流密度仍然保持在 5 个太阳上下;随着综合误差的增加,能量分布面积略微减小,导致总的接收能量有所降低,只对电池板边缘区域产生微小影响。因此当将自由曲面替换原始 PTC 系统的一部分聚光面时,可以在一定程度上降低光学损失,准许其对误差有更高的容忍度,这对工程实际应用的意义是显著的。

太阳跟踪误差将会导致失配问题,并严重影响接收器模块的光路传输特性、光热/电输出效率和使用寿命,因此针对跟踪角度误差所造成的影响进行

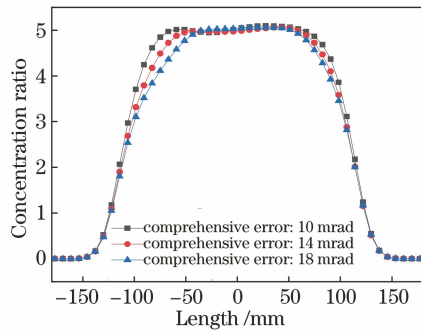


图 10 不同综合误差下的光伏电池聚光能流分布
Fig. 10 Concentration distributions under different comprehensive errors

研究是有必要的。

图 11 为太阳能槽式聚光系统的关键性能沿 x 轴旋转的跟踪角性能。这里将采用半径为 35 mm/58 mm 两种管式换热器的 PTC 和 TFCC 的光学效率进行对比,发现 PTC 的截取因子在低跟踪误差角下保持较高的水平,之后随着入射角的增加而急剧下降。对 35 mm 圆管来说,截取因子将在 7 mrad 处下降,当达到 19 mrad 的跟踪角时,截取因子几乎为零;对于 58 mm 圆管,则出现在 11 mrad 位置,在达到 29 mrad 跟踪角的情况下,截取因子几乎为零。相比之下,TFCC 的光学效率在这个范围内保持相对较好的水平,其角度容差性能比 PTC 更佳。与光伏电池板结合的圆管换热器可在 110 mrad 的角度范围内接收太阳辐射,接收功率的两个波峰分别出现在 0 和 31 mrad。第二个峰值出现在跟踪误差角度为 31 mrad 的情况下,此时圆管换热器的接收能量下降不明显,而光伏板的接收能量显著提升,使 TFCC 总的截取因子达到 0.57。上述结果表明,TFCC 相比 PTC 具备明显的优势,系统效能的提升则取决于具体的设计参数,包括聚光器开口尺寸、光伏电池板几何聚光比和光伏比等。

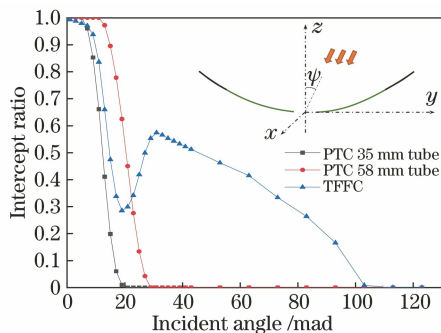


图 11 不同模型下的跟踪误差角度光学特性对比
Fig. 11 Comparison of tracking error angle optical characteristics under different models

5 结 论

本文的研究旨在通过自由曲面技术和组合式光电/热利用的创新设计来扩展槽式太阳能聚光系统的开口面积,以期获取更高的聚光能量和光学效率。借助圆弧过渡假设下的几何构造法和光线追迹法,研究了 TFCC 的光学特性,并验证了模型的有效性,完成了结构参数敏感度分析。结果表明,1)对于 9 m 和 10 m 等大开口尺寸的情况,TFCC 在不同误差条件下的光学效率持续高于传统 PTC,表明 TFCC 更加适用于大孔径和误差条件;2) TFCC 的光伏电池板的聚光能流分布具备很高的均匀性,且与预设的几何聚光比保持一致,由于受到反射光线矢量的发散角影响,接收器的边缘部分会出现急剧下降;3)光伏/热利用的能量占比分配对 TFCC 的光学性能有很大影响,当光伏占比能量较低时,选择一个合理的光伏几何聚光比参数是十分必要的;4) TFCC 的使用大大降低了综合误差的容限,使其更加实用。当将自由曲面替换原始 PTC 系统的一部分聚光面时,可以在一定程度上降低光学损失,准许其对误差有更高的容忍度。

TFCC 的聚光模式适用于热电联产的太阳能电站系统,目前对传统槽式太阳能利用系统的创新发展已陷入瓶颈,本文的研究将对其在未来的改进和更大潜力的开发提供一定程度的参考。

参 考 文 献

- [1] Lü J Q, Zhang N, Yin P, et al. Research progress on optically designed solar photovoltaic concentrators [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230002.
吕家祺, 张宁, 尹鹏, 等. 太阳能光伏聚光器光学设计类型研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230002.
- [2] Yan S Y, Chang Z, Wang F, et al. Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration optimization [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0722002.
闫素英, 常征, 王峰, 等. 积尘对槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的影响及聚光优化 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0722002.
- [3] Winston R, Miñano J C, Benítez P. Manufacturing tolerances [M] // Nonimaging Optics. Amsterdam: Elsevier, 2005: 395-413.
- [4] Marcotte P, Manning K. Development of an advanced large-aperture parabolic trough collector

- [J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 145-154.
- [5] Núñez Bootello J P, Schramm M, Silva Pérez M, et al. Parametric trough solar collector with commercial evacuated receiver: performance comparison at plant level[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2017, 139(4): 041014.
- [6] Wang Z M, Chan W W, Yang C, et al. Effect and prediction method of specular dust based on trough solar system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1808001.
王志敏, 产文武, 杨畅, 等. 基于槽式太阳能系统的镜面积尘的影响及预测方法分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1808001.
- [7] Ma B H, Ge S H, Li S Y. Investigation of energy-flux-density distribution of parabolic trough solar concentrators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080801.
马保宏, 葛素红, 李守义. 槽式抛物面聚光器能流密度分布的理论研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080801.
- [8] Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2422001.
曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2422001.
- [9] Cheng Y, Zhu N, Lu Y B. Design and experimental study of secondary concentrator used in concentrating photovoltaic system[J]. *Applied Physics*, 2020, 10(7): 8.
程颖, 朱宁, 卢永斌. 用于聚光光伏系统二级聚光镜的设计及实验研究[J]. *应用物理*, 2020, 10(7): 8.
- [10] Hernández M, Benítez P, Miñano J C, et al. The XR nonimaging photovoltaic concentrator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6670: 667005.
- [11] Cvetkovic A, Hernandez M, Benítez P, et al. The free form XR photovoltaic concentrator: a high performance SMS3D design [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7043: 70430E.
- [12] Hernández M, Benítez P, Miñano J C, et al. XR: a high-performance PV concentrator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6649: 664904.
- [13] Cvetković A, Hernandez M, Benítez P, et al. The SMS3D photovoltaic concentrator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7059: 705909.
- [14] Benítez P, Miñano J C. The future of illumination design[J]. *Optics and Photonics News*, 2007, 18(5): 20-25.
- [15] Zamora P, Cvetkovic A, Buljan M, et al. Advanced PV concentrators[C]//2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 7-12, 2009, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 929-932.
- [16] Symko-Davies M. High and low concentration for solar electric applications II[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6649: 66490E.
- [17] Miñano J C, Benítez P, Zamora P, et al. Free-form optics for Fresnel-lens-based photovoltaic concentrators[J]. *Optics Express*, 2013, 21(103): A494-A502.
- [18] Alvarez J L, Hernandez M, Benitez P, et al. TIR-R concentrator: a new compact high-gain SMS design [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4446: 32-42.
- [19] Buljan M, Miñano J C, Benitez P, et al. Improving performances of Fresnel CPV systems: Fresnel-RX Kohler concentrator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(S2): A205-A210.
- [20] Tsai C Y. Optimized solar thermal concentrator system based on free-form trough reflector[J]. *Solar Energy*, 2016, 125: 146-160.
- [21] Núñez Bootello J P, Price H, Silva Pérez M, et al. Optical analysis of a two stage XX concentrator for parametric trough primary and tubular absorber with application in solar thermal energy trough power plants [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2016, 138(4): 041002.
- [22] Shuai Y, Xia X L, Tan H P. Numerical simulation for focal region characterization in paraboloidal dish solar concentrators[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(3): 263-267.
帅永, 夏新林, 谈和平. 碟式抛物面太阳能聚能器焦面特性数值仿真[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(3): 263-267.
- [23] Cheng Y, Fang F Z, Zhang X D. Design and manufacture of off-axis optical reflective integrator with faceted structure [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 094001.
- [24] Tsai C Y. Improved irradiance distribution on high concentration solar cell using free-form concentrator [J]. *Solar Energy*, 2015, 115: 694-707.