

原创研究型文章

面向太阳能全光谱有效利用的分光技术浅析

尹贵庆, 贾兴运*, 苗智灏, 倪睿

北京化工大学, 北京 100029, 中国

* 通讯作者: 贾兴运, jiaxingyun92@126.com

引用格式

尹贵庆, 贾兴运, 苗智灏, 倪睿. 面向太阳能全光谱有效利用的分光技术浅析. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(4): 216.
<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i4.216>
Ying GQ, Jia XY, Miao ZH, Ni R. A brief analysis of spectral technology for effective utilization of the full spectrum of solar energy (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(4): 216.
<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i4.216>

文章信息

收稿日期: 2024-07-20
录用日期: 2024-09-26
发表日期: 2024-10-09

版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/240>

摘要: 本文基于槽式抛物面聚光镜, 提出了一种通过光导纤维进行光线传输的太阳能全光谱有效利用的分光技术, 其中包括聚集、传输、分光、检测应用四部分的技术, 探讨其在清洁能源领域的应用。装置中引入单向玻璃作为光线传输约束装置。单向玻璃的单向透射性有效保证了太阳光的传输方向。经TracePro软件的光线模拟结果知光线经过单向玻璃反射装置的输送后, 可以保证光强度满足使用要求。再经过准直透镜、菲涅尔透镜聚焦后, 光线将通过光导纤维导入罗兰圆分光系统。分光后各类光经过检测系统将分别被导入各自的光导纤维中进行远距离传输及运用。经过实验, 通过合理装置的分光并针对性的利用不同波段, 可显著提高太阳能全光谱的有效利用途径, 验证了该装置设计思路的可行性。

关键词: 太阳能全光谱; 新型槽式太阳能聚集与光运输装置; 光导纤维; 罗兰圆分光; 分光利用

1. 引言

随着社会的不断发展, 能源消耗需求量不断增加, 目前世界能源依然以传统化石能源为主, 导致环境问题愈发严峻 [1–3]。自 2020 年中国提出“双碳目标”以来 [4], 能源的绿色低碳化转型迫在眉睫 [5]。太阳能作为一种绿色清洁、资源丰富和可再生的能源, 在替代化石能源方面具有很大的发展潜力 [6–9]。同时作为一种全波长辐射能量, 有数以万计的吸收线和发射线, 是一个极为丰富的太阳信息宝藏。在太阳光中 99.9% 的能量集中在紫外区 (UV)、可见光区和红外区 (IR), 其中紫外区以其杀菌特性被广泛应用于消毒和促进某些化学反应, 如光固化过程; 可见光区作为人类视觉和植物光合作用的基础, 同时也是太阳能电池板转换光能为电能的关键波段; 红外区则在热能收集、夜视技术和遥感探测等领域展现出其重要性, 如红外热像仪和太阳能热水器的应用, 这些应用体现了太阳光分波段利用具有较好的前景, 但目前对于全光谱梯级利用的途径主要有光伏-热电、光伏余热-热力循环以及光伏 余热综合利用等 [10], 可见目前对太阳能的利用途径相对有限。

基于上述背景, 在本文中, 为了增加对太阳能的有效利用途径, 尽可能的提高对此清洁能源的利用, 我们通过对太阳能全光谱特性分析、光传输损耗分析、光栅分光原理分析, 提出了一种全新的太阳能全光谱有效利用的分光技术, 其中包含聚光部分、传输部分、分光部分、检测部分, 在分光部分选用罗兰圆作为其基础元件, 该技术目的是使不同波长的太阳光都得到充分的利用, 以此来进一步提高太阳能的有效利用途径, 促进能源的绿色低碳转型。

2. 太阳能全光谱有效能转换技术

由图 1 所示，展示了太阳能全光谱有效利用的分光技术整体技术路线，包括聚光部分、传输部分、分光部分、检测部分四个部分，囊括了太阳能采集、导入、分光、检测等流程。经过研究，初步计划采用槽式太阳能聚集装置，利用其高聚光比、高精度等优点，为后续利用提供高质量且足量的太阳光来源；传输过程中使用光纤传输；后基于光栅分光原理，将太阳光中的可见光、紫外光、红外光及各类具有不同属性的射线，分别导入不同导光管中；经检测正确后，进行后续利用，充分提高了太阳能的利用效率。

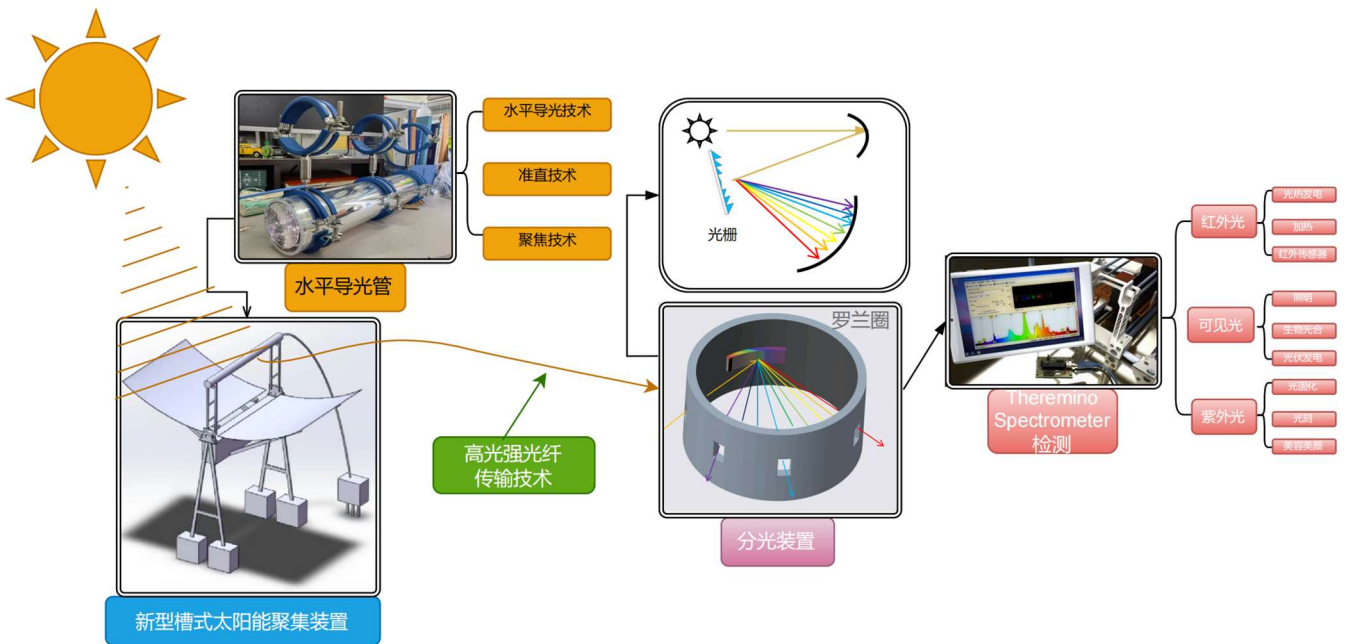


图 1. 整体技术路线图。

Figure 1. Overall technology roadmap.

2.1. 太阳能捕集与光运输部分

根据光学原理，太阳能聚光器可分为折射式、反射式、混合式、荧光式、热光伏式及全息式 [11]，在日常应用中比较广泛的是反射式太阳能聚光器和折射式太阳能聚光器。反射式的聚光器主要有抛物面聚光器，其中抛物面型聚光器分为三种，槽式太阳能聚光器、碟式太阳能聚光器和复合抛物面型聚光器为主，透射式的太阳能聚光器主要有菲涅尔聚光器等 [12]。考虑到槽式太阳能聚光器有成本低、太阳能利用率高的特点，我们基于槽式太阳能聚光器搭建一种新型槽式太阳能聚集与运输装置。该装置主要由槽形抛物面聚光器、水平导光管、单向玻璃、TIR 准直透镜、菲涅尔透镜与光导纤维构成。

2.2. 一种新型槽式太阳能聚集与光运输装置

本装置主要分为聚光部分和光运输部分。

聚光部分由槽型抛物面聚光器、机架、跟踪系统所构成。槽式抛物面聚光镜，是整个系统的核心，反光镜一般具有高精度、高反射率的特点，以保证该装置聚光效率。通过光路模拟分析比较后，反光镜选用以厚玻璃为基础材料的反射镜面，保证太阳能聚光效率。抛物面深度为 370 mm，宽度为 1470 mm，焦点距离抛物面顶点 850 mm。太阳光在时刻运动着，通过不同时刻光线模拟，以 GZW-1 控制系统作为核心控制系统，配置东西方向布置，南北方向跟踪的遮光式太阳能追踪系统，二者形成闭环控制，保证跟踪精度，提高太阳能利用效率。

传输部分包括单向导光系统、光导纤维传输系统、准直系统三部分。槽式反光镜将光线聚焦到其轴线上后，光线将保持其原方向，光线聚集点呈线性排列。如对光线直接采集利用，成本极大。为提高光束利用率并控制采集成本，选用管式导光装置，使光线方向由纵向扩散变为横向运输，约束光线传输途径，提高采集效率。

新型槽式太阳能捕集与运输装置的安装过程需将单向玻璃放入水平导光管中，并且满足单向玻璃镜面朝向筒中心的条件，在单向玻璃上方的导光管内壁部分覆盖高反射涂层的反光膜。装置如图 2 所示。



图 2. 新型槽式太阳能捕集与光运输装置。

Figure 2. A new type of trough solar photovoltaic composite device.

槽式太阳能抛物型镜面将太阳光聚集到其轴线上后，使其透过加有单面玻璃原件的导光管，实现光线方向由纵向扩散变为横向运输，约束光线传输途径。在导光管出口端安装 TIR 准直透镜，对于大发散角区域的光束，通过光线在透镜玻璃壁面上反射的方式进行准直优化；而对于小发散角区域光线，则采用类似于透镜透射的方式，利用光线在穿过透镜的折射进行准直处理。菲涅尔透镜安装在 TIR 准直透镜的端口处，经过准直后的光束通过菲涅尔透镜达到聚焦效果，提高单位面积上的光照强度，提高光能利用效率。最后将聚焦成一点的光束导入光导纤维中，进行光线的长距离运输。装置三维效果图如图 3 和图 4 所示。

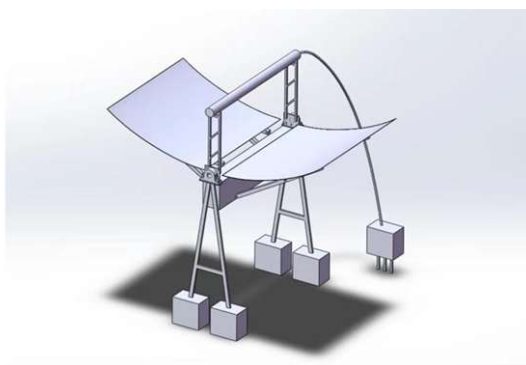


图 3. 一种新型槽式太阳能聚集与光运输装置三维示意图。

Figure 3. Three-dimensional schematic diagram of a novel trough solar energy gathering and transportation device.

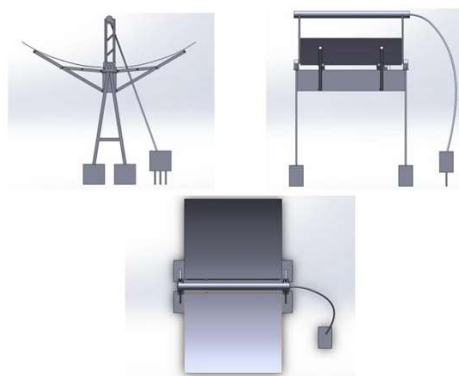


图 4. 一种新型槽式太阳能捕集与光运输装置各方位三维示意图。

Figure 4. Three-dimensional schematic diagram of a novel trough solar capture and transportation device.

在实际应用中，太阳光线与抛物线的轴线相平行，入射到反光镜表面上，而抛物线形的反射镜结构则把入射光线反射聚集并射出，即槽式抛物面的焦线上。抛物面反射镜的聚光比主要取决于槽形结构的口径比，即入射光线和聚焦光线的几何焦点处直径的比值。以抛物线底端顶点为原点，以中心线为图像纵坐标为轴建立坐标系，则有抛物线的方程为 $x^2 = 2py$ ，而抛物线的焦点坐标为 $F(\frac{p}{2}, 1)$ 。利用 Tracepro 软件对槽式反光镜的光路图进行模拟。如图 5 所示，光线垂直投射在抛物面上，经镜面反射聚焦在上端的抛物线交点处。

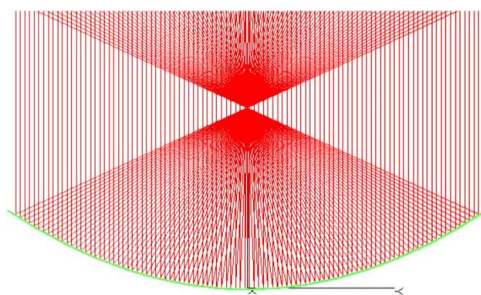


图 5. 抛物线型光路模拟示意图。

Figure 5. Schematic diagram of parabolic optical path simulation.

在实际场景中，太阳光斜射进入反射镜中。利用 Tracepro 模拟北京地区 10~14 时太阳方位角，并选取为 45°、60°、75°的情况下进项抛物面聚焦情况分析。如下图 6-8 所示。

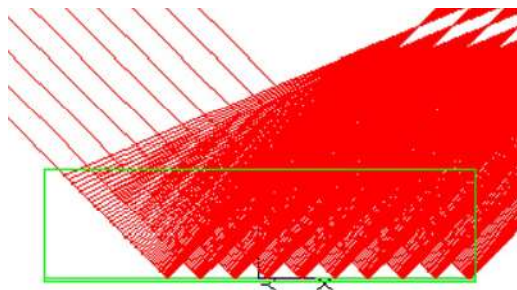


图 6. 45°阳光照射下聚光器聚光效果。

Figure 6. Condenser concentrator effect under 45° sunlight.

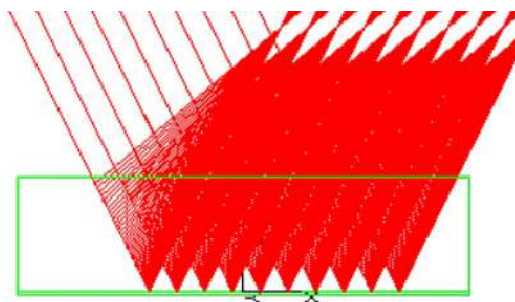


图 7. 60°阳光照射下聚光器聚光效果。

Figure 7. Condenser concentrator effect under 60° sunlight.

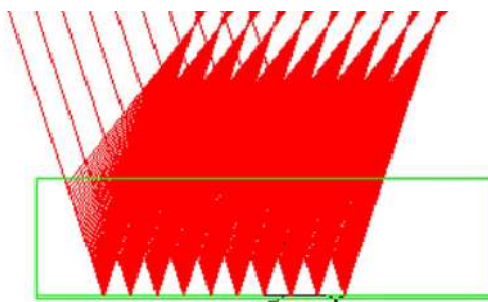


图 8. 75°阳光照射下聚光器聚光效果。

Figure 8. Condenser concentrator effect under 75° sunlight.

由模拟图可知，使用东西方向布置，南北方向跟踪的新型槽式太阳能捕集与光运输装置时，当太阳光线以任意角度投射到聚光器中时，光线总能在抛物面焦线高度上聚焦且聚光效果稳定。则采用槽式聚光器可行性得以验证。

在光束传输中，光能不可避免的存在不可逆损失 [10]，因此，光运输系统设计上，降低传能损耗应放在第一位。

单向导光系统主要有导光管和单向玻璃组成。导光管内壁覆盖有高反射率涂层，尽可能的减少光线传输过程中可能会发生的吸收耗散。图 9 是导光管装

置示意图。但传统导光管无法直接应用到槽式聚光器中，需要对光线进行整合约束，通过加装单向玻璃元件进行改进。

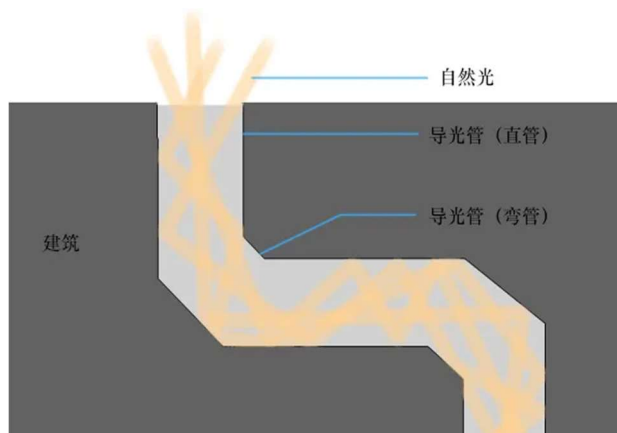


图 9. 导光管装置示意图。

Figure 9. Schematic diagram of the light guide device.

所选用的单向透视玻璃光学性质如表 1:

表 1. 单向透视玻璃光学性能。

Table 1. Optical properties of unidirectional see-through glass.

| 光学性能 | 透光率 | | | 反射率 | |
|------|-----|-----|------|-----|------|
| | 可见光 | 紫外线 | 总太阳能 | 可见光 | 总太阳能 |
| 镜面 | 5% | 2% | 16 | 93% | 30 |
| 玻璃面 | 85% | 28% | 16 | 10% | 6 |

经过测量，槽式抛物面反光镜的聚焦光斑在 10 mm 左右，保证该宽度光斑入射到发射筒的中心部位，为此加装 50 mm 宽的单向玻璃放入导光管中，如图 10 所示。管内光路模拟图如图 11 所示，经过该装置的汇集、整合，在导光管输出端得到辐射量更高的可利用光能。

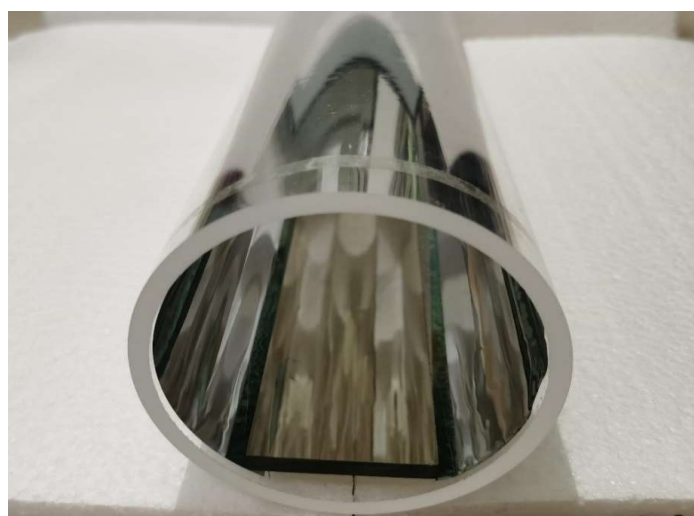


图 10. 导光管内部示意图。

Figure 10. Schematic diagram of the inside of the light guide.

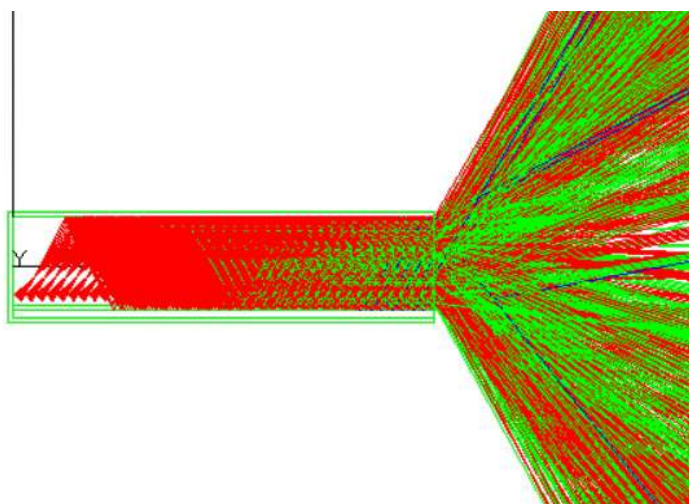


图 11. 导光管内光路模拟示意图。

Figure 11. Schematic diagram of the optical path simulation in the light guide.

光线经导光管汇集后从输出端输出，经过光导纤维传输。可得出不同角度进入光纤时，传输效率不同。因此对输出端光线进行准直处理，再进行进一步的光利用。由此 TIR 透镜进行准直聚焦处理，提高了光纤传输效率，由准直后光栅图可看出 TIR 透镜有效提高单位面积上的光照强度、光能利用效率，同时出口端光强分布更为均匀，单位光照强度更高 (图 12)。

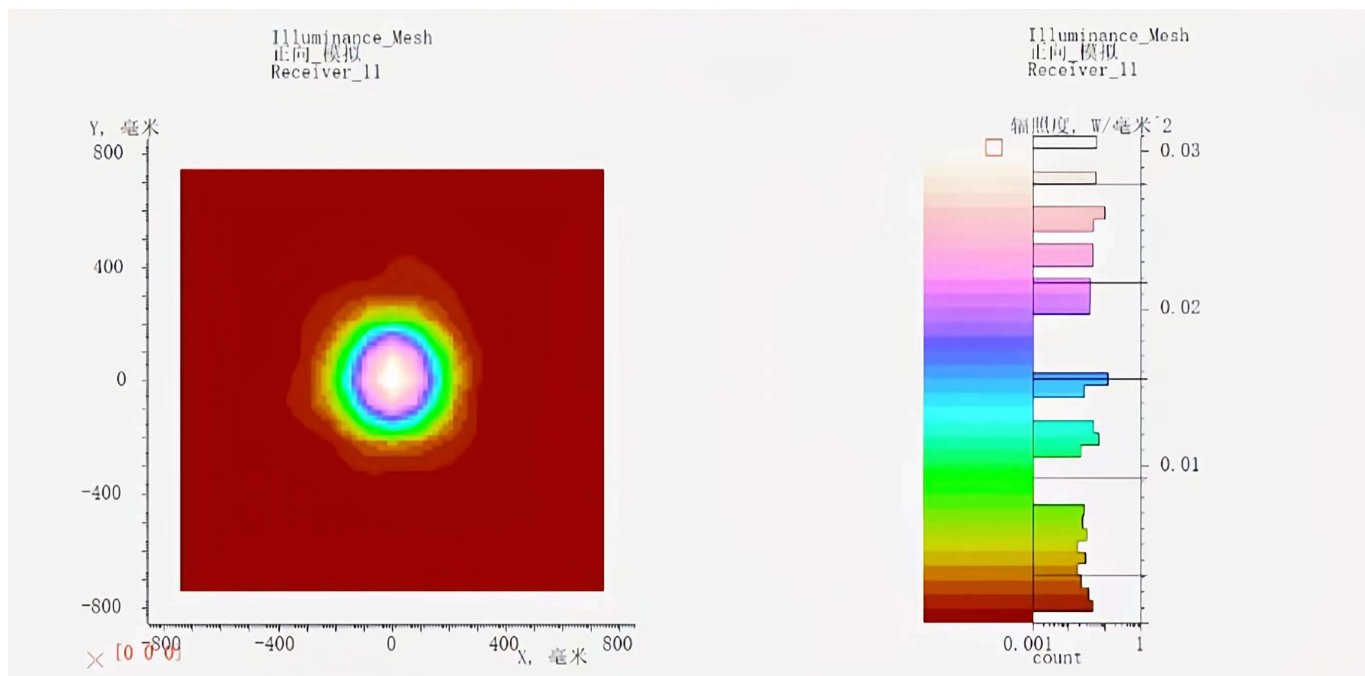


图 12. 经 TIR 透镜准直后光栅图。

Figure 12. Raster diagram after collimation through a TIR lens.

如图 13 是光运输效果图，可见出口端有光斑照明，证明其技术路线可行性。

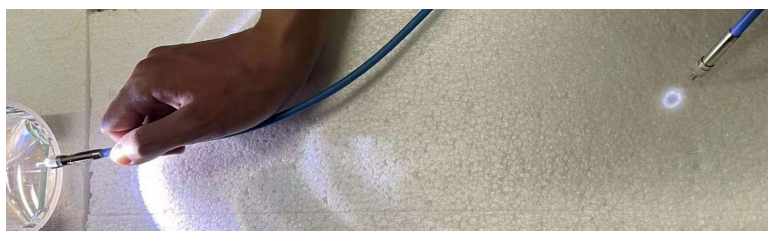


图 13. 光传输效果图。

Figure 13. Rendering of beam transmission.

2.3. 分光 and 检测系统

太阳光谱是指太阳辐射按波长（频率）分布的特征。它可以分为无线电波、红外线、可见光、紫外线和射线（如 X 射线）等，其中可见光又可分为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光。太阳辐射能量最为集中的波长范围是 $0.2\text{--}4\ \mu\text{m}$ ，由于地球大气中的臭氧、水气以及其他物质的吸收影响，波长在 $200\ \text{nm}$ 以下和 $2500\ \text{nm}$ 以上的太阳光辐射基本无法抵达地面，能够到达地球表面的太阳辐射波段主要包括： $250\text{--}400\ \text{nm}$ 的紫外光（能量占比 7%）、 $400\text{--}760\ \text{nm}$ 的可见光（能量占比 50%）以及 $760\text{--}2500\ \text{nm}$ 的近红外光（能量占比 43%）[13,14]。但在日常应用中对太阳能的开发利用大多仅停留在可见光部分，为此提出将太阳光分为红外光、可见光、紫外光三个部分，对太阳光进行阶梯利用，提高太阳光有效利用途径。

对聚集传输后的太阳光进行分光，并在分光结束后对其分出光线进行验证，最后再用相同的传输系统导到利用端。

2.3.1. 分光系统

罗兰圆光学结构的特点是凹面衍射光栅的中心和入射狭缝均放置在直径等于凹面光栅表面曲率半径的圆上，经凹面衍射光栅色散后的谱线也会聚焦在圆上 [15]。经准直透镜准直、聚焦后由狭缝入射，然后投射至凹面衍射光栅上，凹面光栅利用色散作用将不同波长的光分散开，再利用聚焦作用把波长相同的光聚焦到罗兰圆上 [16]，所设计的罗兰圆分光结构如图 14 所示。在罗兰圆对应位置接入导光装置即可完成分光导入检测系统，如图 15 所示。

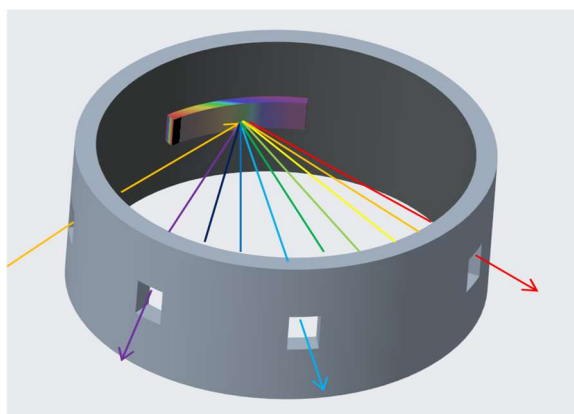


图 14. 罗兰圆分光结构。

Figure 14. Roland circular spectrographic configuration.

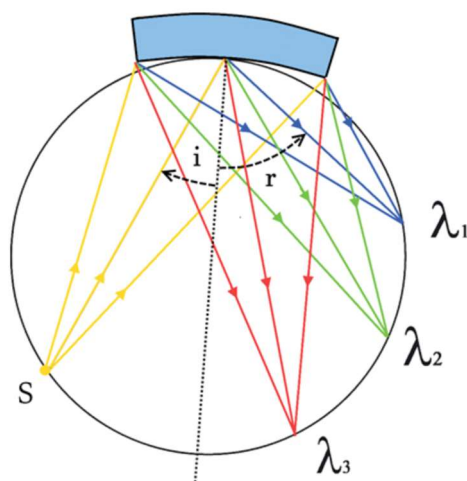


图 15. 罗兰圆分光效果图。

Figure 15. Rendering of Roland circle spectroscopic light.

2.3.2. 检测系统

基于 Theremino Spectrometer 软件，通过电子电路对光线号进行转换。分出光导入摄谱仪器，采用 USB 通信接口传输至通信仪器，进行光谱分析，再由该软件对光谱进行可视化操作，与期望得到的光谱图像进行对比，对比不同光源的频谱特征，区分紫外光、可见光以及红外光，借此对分光后的效果进行检测。确保整条技术路线的正确性。

在应用前需要对分析结果进行校准，采用较为便利的荧光灯，校准光谱图如图 16 所示，调整位于 436 和 546 nm 处的两个汞特征峰的尖端，校准后可应用 Theremino Spectrometer 的分析软件，对分光效果进行质量检测，以确认分光效果。

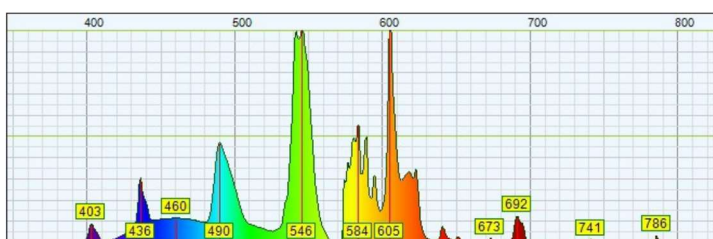


图 16. 荧光灯校光光谱图。

Figure 16. Fluorescent light calibration spectrum.

3. 结论

(1) 当太阳光线以任意角度投射到新型槽式聚光器中时，经过模拟实验验证，光线总能在抛物面焦线高度上聚焦，聚光效果稳定，验证了槽式聚光器可行性。

(2) 将单向透视玻璃作为核心部件加入到导光管装置中，使得光线从侧面进入导光管。单向透视玻璃的单向透光性实现了对太阳光束传播的约束，将

槽式聚光器所聚集的横向扩散的太阳能光束转化为纵向传输,使得槽式聚光器的高聚光比优势得以在太阳能精细化利用中应用。

(3) 对输出端光线通过 TIR 透镜进行准直聚焦处理后,使得光线以合适的角度进入光导纤维中,提高所聚集光能的利用率,进一步提高了对太阳光的利用;同时可使出口端光强分布更为均匀,保障了太阳能光纤传输的效率。

(4) 分光部分采用了罗兰圆光学结构来对聚焦的光线进行操作,经过 Thermo Spectrometer 软件检测后,确保了整体路线的可行性。

作者贡献: 模型设计,尹贵庆和苗智灏;仿真模拟,尹贵庆和苗智灏;实验验证,尹贵庆和苗智灏;数据计算,倪睿;写作—初稿准备,尹贵庆和苗智灏;装置设计和加工,贾兴运;写作—审阅和编辑,贾兴运;监督,贾兴运。所有作者均已阅读并同意稿件的出版版本。

利益冲突: 作者声明没有潜在的利益冲突。

参考文献

- Bai S, Zhang N, Gao C, et al. Defect engineering in photocatalytic materials. *Nano Energy*. 2018; 53: 296-336. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.08.058
- 秦宏宇,柯义虎,李景云,等.光热协同效应在催化反应中的应用研究进展. *分子催化*. 2021; 35(4): 375-389. doi: 10.16084/j.issn1001-3555.2021.04.008
Qin H, Ke Y, Li J, et al. Research progress on the application of photothermal synergistic effect in catalytic reactions (Chinese). *Journal of Molecular Catalysis (China)*. 2021; 35(4): 375-389. doi: 10.16084/j.issn1001-3555.2021.04.008
- Li Q, Lu G. Significant Effect of Pressure on the H₂ Releasing from Photothermal-Catalytic Water Steam Splitting over TiSi₂ and Pt/TiO₂. *Catalysis Letters*. 2008; 125(3-4): 376-379. doi: 10.1007/s10562-008-9548-8
- 刘晓曼,王超,高吉喜,等.服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径. *生态学报*. 2023; 43(14): 5662-5673.
Liu X, Wang C, Gao J, et al. Carbon sink enhancement pathways for China's artificial forest ecosystems serving dual carbon goals (Chinese). *Acta Ecologica Sinica*. 2023; 43(14): 5662-5673.
- 王佳忍,何凯,李春雷,等.太阳能光热催化制氢研究进展. *工业催化*. 2024; 32(2): 20-25.
Wang J, He K, Li C, et al. Research progress of solar thermal catalytic hydrogen production (Chinese). *Industrial Catalysis*. 2024; 32(2): 20-25.
- Kalogirou S. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2005; 31(3): 242-281. doi: 10.1016/j.peecs.2005.03.001
- Kamat PV. Meeting the Clean Energy Demand: Nanostructure Architectures for Solar Energy Conversion. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007; 111(7): 2834-2860. doi: 10.1021/jp066952u
- Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*. 2012; 488(7411): 294-303. doi: 10.1038/nature11475
- Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011; 15(3): 1513-1524. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037
- 曲万军.槽式聚光太阳能光伏—光热化学互补机理与方法研究[博士论文].中国科学院大学;2019. doi: 10.27540/d.cnki.ggrws.2019.000002
Qu W. Research on the Mechanism and Method of Complementary Photovoltaic-Photothermal-Chemical Trough-Type Concentrated Solar Energy (Chinese) [PhD thesis]. University of Chinese Academy of Sciences; 2019. doi: 10.27540/d.cnki.ggrws.2019.000002
- 李霜.新型菲涅尔聚光器结构优化设计[硕士论文].电子科技大学;2018.
Li S. Optimization Design of New Fresnel Concentrator Structure (Chinese) [Master's thesis]. University of Electronic Science and Technology of China; 2018.

12. 李浩岳. 分光式两级聚光太阳能光纤耦合传能系统 [硕士学位论文]. 东华大学; 2022.
Li H. Splitting Two-Stage Concentrated Solar Fiber Coupled Energy Transmission System (Chinese) [Master's thesis]. Donghua University; 2022.
13. Granqvist CG. Solar Energy Materials. *Advanced Materials*. 2003; 15(21): 1789-1803. doi: 10.1002/adma.200300378
14. Gueymard CA. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*. 2004; 76(4): 423-453. doi: 10.1016/j.solener.2003.08.039
15. 陈希. CCD 火花直读光谱仪光机结构设计 [硕士学位论文]. 华中科技大学; 2016.
Chen X. Optical-Mechanical Structure Design of CCD Spark Direct-Reading Spectrometer (Chinese) [Master's thesis]. Huazhong University of Science and Technology; 2016.
16. 鲁毅, 任万杰, 郭国建, 等. 双罗兰圆结构光谱仪的光学系统设计. *应用光学*. 2022; 43(3): 415-423.
Lu Y, Ren W, Guo, G, et al. Optical system design of double Roland circle spectrometer (Chinese). *Journal of Applied Optics*. 2022; 43(3): 415-423.

Article

A brief analysis of spectral technology for effective utilization of the full spectrum of solar energy

Guiqing Yin, Xingyun Jia^{*}, Zhihao Miao, Rui Ni

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

*** Corresponding authors:** Xingyun Jia, jiaxingyun92@126.com

Abstract: Based on the trough-type parabolic condenser, this paper proposes a spectroscopic technology that effectively utilizes the full spectrum of solar energy for light transmission through optical fibers, which includes four parts of technology: concentration, transmission, splitting, and detection applications, and explores its application in the field of clean energy. One-way glass is introduced into the installation as a light transmission restriction device. The one-way transmittance of one-way glass effectively ensures the transmission direction of sunlight. According to the light simulation results of TracePro software, after the light is transmitted through the one-way glass reflection device, the light intensity can be guaranteed to meet the usage requirements. After being focused by the collimating lens and Fresnel lens, the light will be introduced into the Roland circle spectroscopic system through the optical fiber. After splitting, various types of light passing through the detection system will be introduced into their respective optical fibers for long-distance transmission and use. After experiments, it was found that through reasonable device splitting and targeted use of different wavelength bands, the effective utilization of the full spectrum of solar energy can be significantly improved, verifying the feasibility of the device design idea.

Keywords: full spectrum of solar energy; new trough-type solar energy collection and light transport device; optical fiber; Roland circle spectrometry; spectroscopic utilization