一种新型圆柱面反射镜拼接式太阳能系统的模拟与优化

摘要：这篇文章描述了一种新型圆柱面反射镜拼接式太阳能集热系统，该系统反射镜由多个中心位置在一条抛物线上的圆柱面反射镜组成，且每个圆柱面反射镜中心法向量与所在抛物线点法线向量一致。该系统可以有效消除球差和子午面慧差，同时镜面结构更加简单，因此可以得到更低的镜面轮廓误差。本文将圆柱面反射镜拼接式太阳能系统与常规抛物槽系统进行了比较，发现可以通过调整系统数据，降低球差和子午面像差的影响，几乎可以忽略不计。同时因为圆柱面反射镜在相同的工艺下轮廓误差更低，较于常规槽式太阳能系统，新型圆柱面拼接式太阳能系统可以拥有更好的性能。

关键字：拼接式圆柱面反射镜，聚光比，太阳能，球差，子午面慧差

1.介绍

考虑到当前的能源安全和温室气体排放问题，可再生能源可以发挥很好的作用。近年来，太阳能已经成为发展最快的可再生能源技术[1]。常见的一类利用太阳能的方式是利用太阳能热聚焦系统将太阳能转化成热能。这类系统可以根据聚焦方式被分为点聚焦系统（它是系统和碟式系统）和线聚焦系统（抛物槽系统和线性菲涅尔式系统）[2]。

抛物槽式太阳能热发电系统是当前最主要的太阳能热发电系统之一，该技术商业上最成熟、在各种实际情况下测试最多并且应用最广泛[2-4]。抛物槽聚集器由跟踪系统、反射镜和接收器三部分组成，可以利用跟踪系统控制槽式反射镜聚焦太阳光，并通过安装在焦线上的接收器来吸收太阳能量，并将吸收到的热量转化为电能。反射镜和接收器都安装在跟踪设施上，并通过跟踪设备跟踪太阳位置变化。槽式系统追踪方式为二维，相比塔式和碟式系统结构更加简单，并且可以获得更高的精确性。对于槽式太阳能系统，常见的跟踪方式有四种，分别是南北水平轴跟踪、东西水平轴跟踪，极轴跟踪和双轴跟踪[5]。不同的跟踪方式下入射光线的入射角也不同，因此系统效率也会受到影响。

常规的槽式太阳能系统反射镜为一个完整的槽式镜面，而这种完整的槽式镜面的制作和更换是相当困难的，因此我们提出了采用拼接式圆柱镜面代替槽式镜面。这种新式拼接式系统反射镜是由多个条状圆柱镜面反射镜组成的，每个圆柱面镜的中心排列在一条抛物线上，每个圆柱面反射镜的中心法向量都与其安装位置的抛物线法向量一致。接收器安装在多个条状圆柱面反射镜中心构成的抛物线焦点上。

接收器是抛物槽太阳能系统最重要的组成部分之一，常见形态有两种，分别是空腔式接收器和管式接收器。对抛物槽系统进行优化时，接收器最重要的参数是聚光比GR-定义为收集光线区域与吸收光线区域面积之比[6]。聚光比会影响太阳辐射的损失，该损失被认为和1/GR成比例[7]。由于相对较高的聚光比，抛物槽系统的接收器通常可以达到很高的温度，长远来看会导致玻璃外管出现裂痕，进而导致对流热损失显著增加，引起效率的下降和吸收管温度的上升。相比传统的接收器，空腔式接收器可以在更高的温度下运行，热损失降低并拥有更高的效率[8]。

在这篇文章中，我们提出了一种新型圆柱面拼接式太阳能系统，这种系统与常规槽式太阳能系统类似，但使用多个圆柱面镜代替槽式反射镜。使用圆柱面反射镜拼接构成抛物面槽式反射镜，可以消除使用球面镜带来的球差和子午面像差，使得系统性能与普通槽式系统的差别很小。而槽式反射镜加工难度很高，同样工艺下，光学误差通常是圆柱面反射镜的2到3倍。因此使用圆柱面拼接槽式系统性能优于常规抛物面槽式系统。

2.计算方法

2.1光学效率计算

根据我们先前建立的槽式系统光学效率计算方法[9]，镜面上的有效太阳辐射分布由表示，一个反射点P上的太阳辐射量为。有效太阳光强分布计算为[7]：

其中σoptic是总光学误差，可以通过下式被计算：

因此，反射点P的光学效率为：

其中、、分别代表了镜面反射率、接收器玻璃外管透射率和接收器吸收率，即为反射点P反射到接收器上并被吸收的太阳能辐射量。此外，当入射光线不垂直于抛物槽时，一部分光线反射后可能会无法到达接收器上，这一部分光线对效率的影响被称为末端损失。公式后半段即为末端损失，L是抛物反射镜长度，为焦距，为点P的边缘角，为入射太阳能辐射量，为射到接收器上的最大角。

对平均光学效率的计算需要对整个反射面上的反射点光学效率进行积分，计算如下:

该公式中前半段代表着经反射镜反射后的光线，后半段指的是直接到达接收器的太阳辐射。R是真空管接收器的玻璃外管的半径，W是槽型反射镜的长度，是到达吸收管的入射角，可由几何布置计算。

本方法还考虑抛物槽效率受到太阳光线入射角的影响[9]。

2.2槽式系统参数确定

对于圆柱面拼接式槽式太阳能系统，其圆柱面反射镜的圆半径与其中心在抛物面位置的边缘角φ和抛物槽焦距相关，计算如下：

当接收器是管式接收器或空腔接收器时，其接收器半径的计算和确定也有所不同。当接收器是管式接收器时，接收器管半径R计算如下：

此时聚光比G为：

其中W是槽式太阳能集热系统半槽宽，φ是槽式太阳能集热系统边缘角，λ是太阳光在槽式太阳能集热系统的入射角，σ是反射光强高斯分布方差，可近似计算为：

其中σsun是太阳光强高斯分布方差，采用安装地点测量数据，σslopex和σslopey分别是x和y方向槽式反射镜坡度误差高斯分布方差，σtracking是跟踪误差高斯分布方差，σdisp是系统安装误差高斯分布方差，σspecular是反射镜材料误差高斯分布方差。

当接收器为空腔接收器时，接收器半宽计算如下：

聚光比为：

设计拼接式圆柱面槽式太阳能集热系统时，需要先设定系统的槽宽度，然后确定槽式太阳能集热系统的边缘角φ，对于圆柱接收器取值80-100度，对于空腔式接收器则为40-50度。最后可通过半槽宽W和边缘角φ计算抛物槽焦距f，计算公式为

对于圆柱面拼接式槽式太阳能系统，当接收器为管式接收器时，所需条状圆柱面反射镜宽度W和圆半径r之比应符合下式条件：

接收器为空腔式时，应符合：

其中，σ是反射光强高斯分布方差，λ是太阳光线入射角，φ是系统边缘角。

2.3消除子午面慧差和球差的方法

使用圆柱面镜代替槽式反射镜会导致系统出现子午面慧差和球差，进而导致系统性能下降。根据Rabl[10]提出的球面定日镜子午面焦距理论，类比到圆柱面反射镜上，我们通过几何光学推导了计算入射角>0时圆柱面反射镜焦距：当使用圆柱面反射镜拼接，当其安装中心位置对应抛物面槽式系统边缘角为φP时，太阳光线在槽式系统入射角λ，在该圆柱面上入射角为φP/2，若此时焦距为f，则子午面聚焦焦距=f\*cos(φP/2)。因此，我们需要适当放大圆柱面焦点才能将其聚焦在原本的焦点上。如果用于拼接的圆柱面反射镜中心对应边缘角为φP/2，则其距离系统焦点距离为f/cos2(φP/2)，可得到圆柱面焦距为：

圆柱面反射镜对应的圆半径为：

当反射镜被安装在边缘角为φP/2位置时，子午面慧差就可以被消除了。对此，不做子午慧差校正，常用设计是让圆柱面反射镜半径等于反射镜中心到槽式抛物面焦点距离的2倍。

要消除拼接式圆柱面反射镜的球差，主要方法是限制拼接反射镜宽度，本文中提出了用于拼接的圆柱镜面宽度与其圆半径之比的上限公式。参考[11]提出的球面反射镜作为主镜的情况，圆柱面反射镜的柱面横向球差δx计算式为：

其中w是用于拼接的圆柱面反射镜半宽度，r是圆柱面反射镜圆半径，ψ是圆柱面反射镜最大圆心角。研究表明，使用管式接收器时，消除球差的要求是横向球差不超过抛物面槽式系统半径 5%，就得到：

此时消除球差的条件是：

提出消除球差的条件，w/r≤1/5，由于选择r=2f，可换算为w/f≤1/2.5，远低于光学成像领域要求的1/10.8，实际实现更容易达到。当选取的圆柱面拼接式系统符合要求时，球差增加很小，基本不影响性能。

若使用空腔式接收器，横向球差不超过系统半径5%时，得到：

得到满足圆柱面反射镜球差所需满足条件为：

3.结果

我们对所述新型圆柱面拼接式太阳能系统进行了计算。分别考虑了圆柱面接收器和空腔式接收器两种情况，并与普通的槽式系统做了比较。所测试的太阳能系统数据如下表所示：

表1 Parameter of the typical parabolic trough solar collector

|  |  |
| --- | --- |
| Parameter | Data |
| Half trough width | 4 m |
| Radius of envelope of receiver R (cylinder) | 0.04 m |
| Radius of receiver tube r0 (cylinder) | 0.055m |
| Half width of receiver (flat) | 0.04\*pi m |
| Tracking error | 0 mrad |
| Operation temperature of receiver T | 400 ℃ |

对于使用圆柱式接收器和空腔式接收器的太阳能系统，系统最大边缘角分别取90°和45°，通过上文所述公式计算出配置了两种接收器的系统焦距分别为2m和4.8m。此外，由于抛物面加工难度较圆柱面更大，在相同的工艺下，光学误差通常是圆柱面反射镜的2~3倍。因此本文中，我们取圆柱面反射镜坡度误差为1mrad，抛物面误差为3mrad。管式接收器和平板接收器参数如【表1】所示，使用两种不同接收器的系统聚光比相同，均为31.85。

我们将圆柱面拼接式系统和槽式系统分别和管式接收器和空腔式接收器相结合，比较了四种情形下的系统性能。【图1】中是在春分日，在南北水平轴和东西水平轴两种跟踪模式下，配置了圆柱面拼接式反射镜的太阳能系统和常规槽式反射镜系统的光学效率对比，系统数值如上文所述。显然，在消除了子午面慧差和球差后，拼接式系统与常规槽式系统之间的表现差距几乎可以忽略不计。同时由于圆柱拼接式系统可以实现更低的坡度误差，性能上反而优于常规槽式系统。

抛物槽系统在使用不同跟踪方式时，会在不同时刻有不同的入射角，影响系统效率。在【图2】中我们计算了2020年度的这四种槽式太阳能系统在南北水平轴跟踪方式下每天的平均拦截率。显然在接近夏至日时，系统的表现最好，在接近冬至日时系统表现最差。【表2】给出了四种不同跟踪模式下四种槽式太阳能系统的年度平均拦截率。在聚光比一致时，相比管式接收器，使用空腔式接收器的系统有着更好的表现。使用南北水平轴跟踪系统时，四种组合中拼接式反射镜与空腔接收器的组合有着最高的拦截率，平均拦截率接近100%。同时，性能最差的槽式反射镜与管式接收器年平均拦截率仅有89.61%。双轴跟踪模式下系统入射角可以几乎忽略不计，因此表现最好。但相比其他跟踪方式，双轴跟踪系统也更为复杂，维护更加困难。【图3】中给出了随着入射角变化，上文所述的四种槽式太阳能系统的拦截率变化。

对于配置了空腔式接收器和管式接收器的太阳能系统所取值的最大边缘角也不同，一般来说配置了空腔式接收器的系统最大边缘角取值为40°~50°，配置了管式接收器的系统最大边缘角取值为80°~100°。【图4】是在不同的最大边缘角取值时，四种系统的拦截率变化。



图1 南北轴跟踪模式和东西轴跟踪模式下，在下春分日圆柱面拼接式太阳能系统和常规槽式太阳能系统效率比较



图2 NS轴跟踪模式下2020年度四种槽式太阳能系统每天的平均拦截率比较

表2 2020年度四种槽式太阳能系统在不同跟踪模式下的平均拦截率

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | NS | EW | Polar-axis | Two-axis |
| 圆柱拼接式+空腔 | 99.88% | 96.03% | 99.99% | 99.99% |
| 圆柱拼接式+管式 | 98.53% | 91.07% | 99.59% | 99.71% |
| 槽式+空腔 | 97.27% | 87.93% | 99.08% | 99.30% |
| 槽式+管式 | 89.61% | 77.19% | 93.84% | 94.79% |

表3 南北水平轴跟踪模式下，2020年度四种槽式太阳能系统在不同时间的平均拦截率

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 春分日 | 夏至日 | 秋分日 | 冬至日 |
| 圆柱拼接式+空腔 | 99.99% | 1 | 99.99% | 99.39% |
| 圆柱拼接式+管式 | 99.3% | 99.62% | 99.29% | 95.36% |
| 槽式+空腔 | 98.54% | 99.15% | 98.53% | 92.09% |
| 槽式+管式 | 92.04% | 94.12% | 92% | 79.21% |



图3不同入射角时四种槽式太阳能系统的平均拦截率变化



(a)空腔式接收器



(b)管式接收器

图4不同最大边缘角时四种槽式太阳能系统的平均拦截率变化(a)空腔式接收器(b)管式接收器

4.结论

本文中，我们提出了一种新型圆柱面拼接式槽式太阳能系统。通过对相关参数进行调整，降低了系统的球差和子午面慧差，几乎可忽略不计。同时，考虑到圆柱面镜更容易制作，在相同条件下相比槽式反射镜具有更低的轮廓误差，新型圆柱面系统在性能上优于常规槽式系统。通过运行在MATLAB软件上自行编写的程序，我们将使用常规槽式反射镜和圆柱面镜的系统分别与管式接收器和空腔式接收器相结合，并比较了四种槽式系统的性能。得出在相同的聚光比时，配置了拼接式圆柱面镜和空腔式接收器的太阳能聚集器有着最好的性能。

1. Schmela, M., et al., *Advancements in solar technology, markets, and investments – A summary of the 2022 ISA World Solar Reports.* Solar Compass, 2023. **6**: p. 100045.

2. Fernández-García, A., et al., *Parabolic-trough solar collectors and their applications.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(7): p. 1695-1721.

3. Thomas, A., *Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators.* Energy Conversion and Management, 1996.

4. Goel, A., G. Manik, and R. Mahadeva. *A Review of Parabolic Trough Collector and Its Modeling*. in *Soft Computing: Theories and Applications*. 2020. Singapore: Springer Singapore.

5. Chen, W. and J. Li, *Optical performance analysis for parabolic-trough focusing collector with several tracking modes.* Taiyangneng Xuebao/acta Energiae Solaris Sinica, 2003. **24**(4): p. 477-482.

6. Timpano, M. and T.A. Cooper, *Concentration ratio for a solar trough concentrator with circular mirror and flat receiver.* Solar Energy, 2022. **247**: p. 196-201.

7. Bendt, P., et al., *Optical analysis and optimization of line focus solar collectors.* Unknown, 1979. **29**(9): p. 568.

8. B, K., et al., *Linear cavity solar receivers: A review.* Applied Thermal Engineering, 2023. **221**: p. 119815.

9. Huang, W., P. Hu, and Z. Chen, *Performance simulation of a parabolic trough solar collector.* Solar Energy, 2012. **86**(2): p. 746-755.

10. Rabl, A., *Active Solar Collectors and Their Applications.* Oxford University Press, 1985.

11. 克略帕洛娃, et al., *光学系统的研究与检验*. 1983: 光学系统的研究与检验.