

槽式太阳能聚光集热技术

北京工业大学 ■ 熊亚选 Modibo Kane Traore 吴玉庭 马重芳 张业强

摘 要：详细讨论了槽式太阳能聚光集热技术的最新进展,对不同聚光集热器支撑机构进行了对比分析。结果表明,EUROTROUGH聚光器的支撑机构性能最优。此外,还对抛物面聚光镜和主要的槽式太阳能集热管技术进行了讨论分析。

关键词：槽式太阳能聚光集热器; 聚光器支撑机构; 抛物面聚光镜; 槽式太阳能集热管

一 引言

槽式太阳能热发电技术是最早实现商业化运营的太阳能热发电技术,相对于其他太阳能热发电技术,它具有技术成熟、发电成本低和容易与化石燃料形成混合发电系统的优点。槽式太阳能聚光集热技术是槽式太阳能热发电系统的核心技术,是实现太阳能热发电系统的关键。槽式太阳能聚光器将来自太阳能低密度太阳辐射聚焦后,成为高辐射热流密度的太阳辐射,加热位于聚光器焦线上的太阳能吸热器内的传热流体或水,为电站的蒸汽发生系统提供高温热源或直接为汽轮机提供高温蒸汽。

二 聚光技术

为了给工业过程提供更加廉价的高温蒸汽,埃及人Shuman 于1912 年在开罗建成了世界上第一个槽式聚光器,该聚光器总长62m,开口宽4m,用于直接加热蒸汽。随后,许多公司开始安装这种用于工业热利用的槽式太阳能聚光器^[1]。

聚光器组由支撑钢结构、反光镜、跟踪驱动系统等部分组成,多个聚光器同轴安装,组成一个聚光器单元,实现对太阳能的独立跟踪。

1 LUZ 聚光器技术

从1984~1991年的8年间,LUZ公司在美国的沙漠中相继建成了9座净发电功率353.8MW的槽式太阳能热发电站。在这个过程中,LUZ公司完成LS-1~3 共三代槽式太阳能聚光器的设计,并成功实现了商业化运行。表1为LUZ公司三代聚光器的设计特征。

表1 几种槽式太阳能聚光器的结构特征

名称	LS - 1	LS - 2	LS - 3	IST	EUROTROUGH	Duck Solar
结构形式	轴管	轴管	V 型桁架	空间框架	矩形桁架	空间铝框架
开口宽度(m)	2.55	5	5.76	2.3	5.76	5
焦距(m)	0.94	1.49	1.71	0.76	1.71	1.49
模块长度(m)	6.3	8	12	6.1	12	8
单元长度(m)	50.2	49	99	49	150	49~65
最大驱动面积(m ²)	128	235	545	424	817	235~313
吸热管直径(m)	0.04	0.07	0.07	0.04	0.07	0.07
几何聚光比	61:1	71:1	82:1	50:1	82:1	71:1
聚光镜类型	低铁镀膜浮法玻璃	低铁镀膜浮法玻璃	低铁镀膜浮法玻璃	镀银薄玻璃	低铁镀膜浮法玻璃	低铁镀膜浮法玻璃
驱动类型	涡轮驱动	涡轮驱动	液压驱动	螺旋驱动	液压驱动	液压或涡轮驱动
单位面积重量(kg)		29	33	24	29	24
峰值光学效率(%)	71	76	80	78	80	(设计值)
备注	SEGS I - II	SEGS II - VII	SEGS V - IX	IST	PSA	DS - 1

由于LS-1 和LS-2 聚光器的生产、安装成本较高,导致电站的初期投资和运行维护成本较高。为

了降低LS 聚光器在大规模应用时的生产、安装成本,LUZ公司设计了LS-3 聚光器,并将其应用于太

阳能发电站 SEGS VII~IX 中, 如图 1 所示。

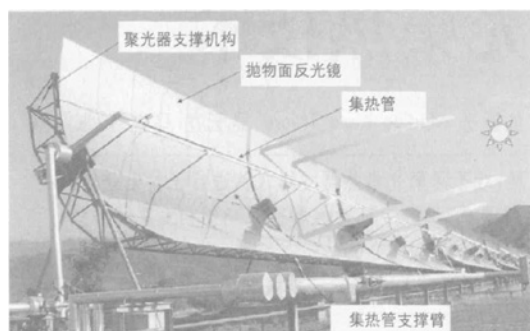


图1 LS-3槽式太阳能聚光器

结构设计的改变使LS-3聚光器在跟踪精度上得到了很大提高, 并且在安装时允许有一定的倾角。然而, SEGS的运行经验显示, 任何成本的降低都是以聚光器的性能和可维护性为代价。与LS-2聚光器相比, LS-3聚光器的热性能有所降低, 聚光器的维护变得更加困难。尽管如此, LUZ聚光器为新一代聚光器的设计提供了宝贵的经验。

随着LUZ公司的破产, Solel太阳能系统公司于1992年收购了LUZ公司所有的聚光集热器生产设备, 并为LUZ公司已建成的9座槽式太阳能热发电站提供关键零部件和聚光集热器技术支持。

2 EuroTrough 聚光器技术

迫于化石燃料价格的不断升高及对环境保护认识的提高, EuroTrough协会在LS系列聚光集热器结构设计的基础上完成了新一代槽式太阳能聚光器的设计和试验测试——EuroTrough聚光集热器^[2], 如图2所示。



图2 EUROTROUGH 聚光集热器

EuroTrough聚光集热器提出了一种扭矩框聚光器, 它消除了LS-2和LS-3聚光器在生产和运行中

产生的许多问题。这种扭矩框设计既实现了LS-3聚光器桁架设计概念低成本的目的, 又达到了LS-2聚光器扭矩管所具有的高扭转刚度和方便调整的优点。

EuroTrough聚光器的核心部件是一个约12m长的空间框架, 在其两侧面上固定了用于固定抛物面反光镜的支撑臂。该空间框架由四个不同部分组成, 可以现场安装、固定, 简化了加工过程, 降低了加工成本。

由于反光镜支撑臂的设计, EuroTrough聚光器因自重和风载产生的变形比LS-3小, 从而减小了聚光器在运行过程中的扭转变形和弯曲变形, 提高了聚光器的光学性能。高强度的扭矩框设计方法使单个驱动系统驱动的聚光器长度从100m扩展到150m, 降低了驱动系统和转接管(旋转接头或金属软管)的数量, 达到了降低聚光区成本和聚光损失的目的。

由于改进了聚光器支撑架设计, 聚光器可以以3%的坡度进行安装, 大大减少了现场地面处理成本。通过预加工和现场固定架安装结合的方式保证了聚光器的精度, 如图3所示。



图3 EUROTROUGH 聚光器组装现场

该设计目的之一是减小聚光器的重量, 其总重量相比LS-3的设计方案减小了14%。减少部件的多样性, 压缩聚光器结构的重量, 使用紧凑的运输方式, 这些改进被认为使成本又降低了10%。

热性能和光学性能的试验结果表明, EuroTrough聚光器在性能上比LS-3聚光器提高了3%。因此, 很多开发商和团体选择了EuroTrough聚光器技术。

3 Solargenix 聚光器技术

Solargenix DS-1聚光器采用全铝空间框架^[3], 设计模仿了LS-2聚光器实际的尺寸和操作特点, 但

在结构特性、重量、加工复杂程度、抗腐蚀性、生产成本及安装上都优于LS-2聚光器。风洞试验显示,这种设计方式的抗扭刚度和梁刚度(*beam stiffness*)与LS-2聚光器几乎相等^[4],提高了LS-2聚光器在运行过程中的风载抵抗力,如较高的抗弯曲和扭转刚度等,简化了加工过程,减少了部件的数目。结构中所使用支撑杆都是2英寸规格的矩形压制铝管,每个空间框架由137个支撑杆组成如桁架一样的三维型式,在施工现场通过套节(*hub system*)连接在一起。每个支撑杆的两端各有一个螺孔,用于和套节连接。Solargenix DS-1在重量上是LS-2结构重量的一半,便于生产加工、运输及现场安装,并且具有较好的抗腐蚀性。尽管DS-1聚光器的安装成本比LS-2聚光器低,但光学性能相当。图4为Solargenix DS-1聚光器的安装图。



图4 DS-1 聚光器

2005年, Solargenix 公司推出了新型的SGX-1聚光器。该类聚光器采用有机蛛丝网状套节结构,其结构组成的零件数比DS-1聚光器减少了一半,重量上减轻30%,聚光器的安装耗时减少了三分之一,并且使用低成本的挤压部件,反光镜无需排列校正,单一钻模提供了较大的耐性,如图5所示。目前,SGX-1聚光器技术应用于Nevada Solar One槽式聚光太阳能热发电站中。

4 IST 聚光器技术

IST(*Industrial Solar Technology*)聚光器起初用于低温工业过程加热。在NREL的USA Trough计划支持下,IST聚光器在效率上提高了很多,能够应用于高温太阳能热发电,同时降低了成本。最初IST聚



图5 SGX-1 聚光器结构

光器是由铝制成,后来用电镀钢结构代替了铝制结构,用薄的镀银玻璃反射镜取代了镀铝聚合物反射镜,提高了高温条件下集热管选择性涂层的热性能和耐久性^[5]。聚光器钢结构和薄玻璃反光镜的改进使系统成本降低了15%,系统性能提高了12%,所获得能量的成本降低了25%。

5 聚光器结构比较

图6和表2为三种不同结构聚光器的有限元分析结果。可以看到,在相同风速的作用下,同一点上弯曲和扭转最小的是EUROTROUGH聚光器。

综合以上分析及图6的有限元分析结果,EUROTROUGH聚光器在结构设计上具有很大的优势。

三 抛物面反光镜与集热器

1 抛物面反光镜技术

目前,尽管出现了一些低成本的替代型抛物面聚光镜,但真正大规模应用于商业化太阳能热发电站的抛物面聚光镜还是厚玻璃抛物面聚光镜,主要体现在户外的持久性和高反射率特性。

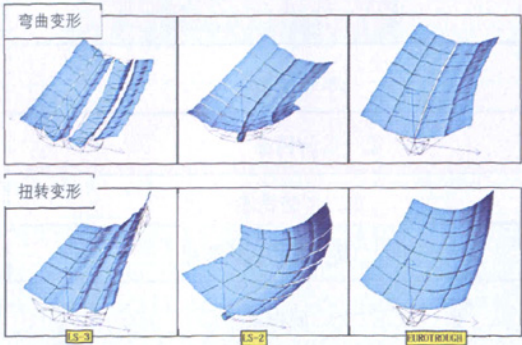
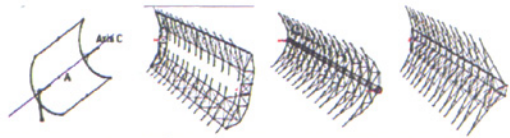


图6 三种不同结构聚光器的有限元分析结果^[2]

表2 三种不同结构聚光器的有限元分析比较^[2]



结构类型	LS - 3	LS - 2	EUROTROUGH
自重(kg)	1045	895	915
最高风速下 A 点弯曲变形(mm)	10.5	35.0	7.08
最高风速下镜面的弯曲变形(mrad)	4.15	1.6	1.6
最高风速下镜面的扭转变形(mrad)	4.2	1.9	1.7
最高风速下 C 点扭转变形(mrad)	4.4	2.0	1.69

(1) 厚玻璃抛物面反射镜

LUZ 公司的 LS 系列槽式聚光器一直使用厚玻璃抛物面反射镜作为系统的聚光设备，与桁架结构形成整体聚光器，结构如图 7 所示。这种厚玻璃反射镜由 Flagsol 公司(原为 Pilkington Solar International)提供，由 2.5~5mm 厚的低铁浮法玻璃(float glass)热成型制成，玻璃的太阳光透射率(solar-weighted transmittance)达 98% 以上。该玻璃经过在精确的抛物面模具上用特制的烤炉加热，制成抛物面形状。然后在抛物面玻璃的阳面镀银，并在银层上喷涂几层保护层，防止银过快氧化。用于将反光镜固定在支撑机构上的陶瓷垫用特种胶固定在抛物面反射镜上。该反射镜的太阳光谱反射率(solar-weighted specular reflectance)达 93.5%，能将 98.5% 的反射光聚焦到集热管上。

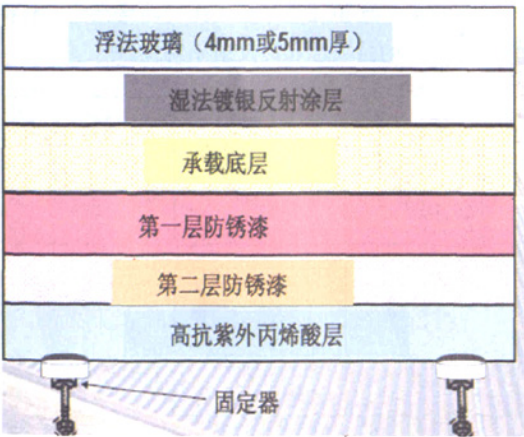


图 7 厚玻璃抛物面反射镜的结构组成

这种镜的支撑效果较好，能够保持高的反射率。使用 15 年以上还能够清洗到如新产品一样的反射率。通过优化设计，其破碎率大大降低。为降低聚光区边缘地带聚光镜的破碎率，Flagsol 公司在 SEGS VIII 和 SEGS IX 聚光区边缘地带换装 5mm 厚的抛物面反光镜，并开发了新型反光镜固定件，将风载荷转化到支撑钢结构上^[2]。考虑到环境问题，反光镜的保护层不含铜和铅。

(2) 替代型抛物面反射镜

基于厚玻璃反射镜昂贵的成本、复杂的加工工艺及易破碎的缺点，厚玻璃抛物面反射镜的替代品研究已经进行了 20 多年。以下是较有希望的几种厚玻璃抛物面反射镜的替代品^[6]。

① SAIC 超薄玻璃镜

SAIC 超薄玻璃镜是一种具有坚硬保护层的前表面反射镜，由 SAIC 和 NREL 开发。其材料通过离子束辅助薄膜沉积(IBAD: Ion-Beam-Assisted Deposition)方法沉积得到一层可清洗、坚硬的密集氧化铝保护层薄膜。该材料可以用聚合底层或钢底层在辊涂机上制得。NREL 还开发了另外两种硬质保护层用于前表面反射镜，其光学性能、耐久性及使用寿命与 LUZ 公司的 FSM 相似。

② 铝反射镜

德国 Alanod 公司使用抛光的铝基片、强化铝反射层和一种氧化铝保护层开发出一种前表面铝反射镜。在现场应用中，该反射镜使用初期的太阳光谱发射率为 93% 以上，具有耐磨、耐腐蚀的保护层，使用寿命达 10 年以上。同时，该公司还开发了一种镀银的铝基反射镜，太阳光谱反射率可达 95%。

此外，正在研发中的反射镜替代品还有很多，如薄玻璃反射镜、前表面反射镜、层状全聚合体反射镜、多层银—聚合体反射镜^[7]等，由于反射率、户外耐久性等原因，都没有实现大规模的商业应用。表 3 对后反射镜及其替代品进行了总结。

2 真空集热器

槽式太阳能真空集热管简称集热管(HCE)，是 LUZ 聚光器的核心部件。集热管由一根外表面涂有金属陶瓷太阳选择性吸收层的 70mm 外径不锈钢金属管和环形空间为真空、外径为 115mm 的玻璃管(内、外表面涂有抗反射层)组成。集热管将常规的玻璃—金属封和金属波纹管相结合，以实现金属不锈

表 3 几种反射镜的光学特性

名称	太阳光加权平均反射率(%)	成本(\$/m ²)	耐候性	耐水洗性	存在问题
厚玻璃镜	94	40	非常好	好	成本高, 易破碎
薄玻璃镜	93~96	15~40	非常好	好	加工困难, 易破碎
全聚合物镜	99	10	较差	差	抗紫外能力差
Reflectech 复合层镜	>93	10~15		差	
FSM	95			好	
超薄玻璃	95	10	较好	好	没有规模生产
Alanod 铝反射镜	>93	<20	较好	好	反射率稍低

钢管必须的真空密封空间,同时弥补了金属不锈钢管和玻璃管热膨胀系数不同造成的伸长量差。真空空间的压力必须达到或小于 Knudsen 气体导热压力范围,一般维持在 0.0001mmHg(0.013Pa, 10^{-4} torr),以降低环形空间的对流热损失。陶瓷选择性涂层喷涂到不锈钢金属管的外表面,以产生对太阳直接辐射较高的吸收率和降低工作温度下的发射率,以降低二次热辐射。玻璃套管内、外表面抗反射层(AR coating)使玻璃管的太阳光投射率达到最大。安置在真空空间的吸气剂是一种金属化合物,能够吸收渗入真空空间的氢气及其他气体分子,其示意图如图 8 所示。

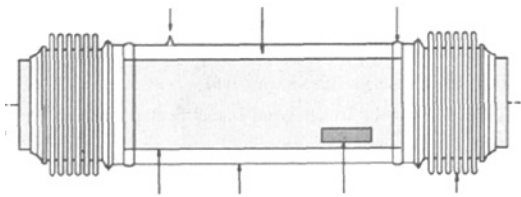


图 8 集热管结构示意图

LUZ 集热管的失效率每年约为 4%~5%。主要是因为真空失效、玻璃套管破碎及由于真空失效或玻璃管破碎引起的选择性吸收层氧化衰退^[8]。真空空间失去真空后,管内放置吸气剂变成白色,阻止大量的光穿过玻璃管。

集热管玻璃-金属封的失效也是引起集热管失效的一个非常关键的问题,主要是因为聚焦在玻璃-金属封上的高热流密度辐射所致,因此必须对玻璃-金属封进行保护,避免直接或间接的辐射光束^[9]。为此, KJC 和 Solel 公司开发出用于保护玻璃-金属封的保护罩^[10], SCHOTT 则是采用特殊的材料制成熔接式玻璃-金属封。

(1) UVAC 集热管

随着 LUZ 公司的破产, Solel 太阳能系统公司(简称 Solel 公司)获得了 LUZ 集热管的生产线和生产技

术,为 SEGS 电站提供备件。在 LUZ 公司集热管的基础上, Solel 公司提高了选择性涂层的性能和可靠性。UVAC 集热管就是在 LUZ 集热管的基础上使用一种新的陶瓷金属选择性涂层,避免涂层氧化的新一代集热管。表 4 分别为 SNL 和 LUZ 公司测得的 LUZ 陶瓷金属涂层与 UVAC 陶瓷金属涂层性能参数^[10~13]。

表 4 集热管光学特性

集热管	LUZ Cernet	Solel UVAC	Solel UVAC
数据源	SNL	SNL	SOLEL
玻璃套管投射率	0.95	0.96	—
选择性涂层吸收率	0.915	0.95~0.96	>0.96
选择性涂层发射率	0.14	0.15	0.091
测量条件(℃)	350	400	400

NREL 和 KJCOC 进行了为期 3 年的新型 UVAC 集热管测试,包括光-热属性测试、热性能测试及可靠性评估^[13]。结果表明,UVAC 集热管相对于 LUZ 集热管的性能提高很多。新一代 UVAC 集热管的玻璃管破碎后选择性涂层会退化,但不会产生阻挡太阳辐射的白色荧光层。

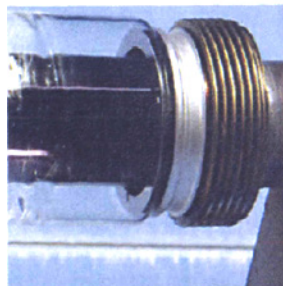


图 9 UVAC 集热管的波纹管和玻璃-金属封接

目前, Solel 的最新产品为 UVAC 2008 集热管。其工作温度为 400℃,选择性涂层的吸收率超过 96%,400℃时发射率小于 10%,玻璃管的投射率超过 96.5%,设计真空寿命超过 25 年。

(2) SCHOTT PTR70 集热管

SCHOTT 集热管是 2004 年德国 SCHOTT 开发的槽式太阳能真空集热管^[13], 可以与 LUZ 集热管、Solel 集热管互换使用。

该集热管的选择性涂层在热、光性能与 Solel 集热管相当, 最重要的创新是其波纹管、玻璃-金属封和抗反射涂层。为了通过波纹管降低集热管的遮光率, SCHOTT 设计了一种新型玻璃-金属封和波纹管。其他集热管的波纹管是同圆设置, 而 SCHOTT 集热管的波纹管嵌入玻璃管内部, 降低了集热管的折光率, 如图 10 所示。

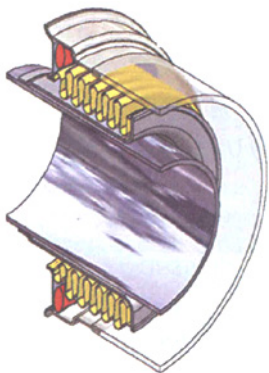


图 10 新型 Schott 集热管的波纹管

随着集热管工作温度的升高, 波纹管受压缩短, 提高了金属选择性涂层的受光面积。DLR 的测试结果显示, SCHOTT 集热管的工作长度与 LUZ 集热管相比, 提高了约 2%。与 Solel 集热管不同, SCHOTT 集热管采用热膨胀系数相同的标准镍合金与其开发的具有更高光线透射率的硼硅酸玻璃-金属封, 无需进行额外保护。

此外, SCHOTT 公司采用 SOL-GEL 浸渍技术开发了一种独特的耐磨抗反射涂层, 使玻璃管的投射率超过了 96%。

目前, PTRTM70 集热管应用于“Nevada Solar One”槽式太阳能热发电站(其中 PTRTM70 占其总集热管数量的 61%)、Kramer Junction 槽式太阳能发电站和 Andasol 1 & 2。

(3) ENEA 熔融盐集热管

意大利 ENEA 对熔融盐 Hitec 在槽式太阳能热发电站作为传热、蓄热介质进行了研究, 同时开发了一种工作温度为 550℃ 的槽式聚光系统用集热管, 如图 11 所示。目前, 该集热管还没有进入量化生产, 只是进行了初步试验研究。

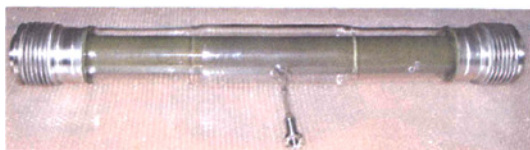


图 11 ENEA 研制的集热管原型

四 结论

槽式太阳能聚光集热技术是槽式太阳能热发电的核心技术, 槽式太阳能聚光集热器是槽式太阳能热发电站热量来源的核心部件。槽式太阳能聚光集热器性能的优劣直接关系到整个太阳能发电站的发电效率、发电成本及其发展前途。目前槽式太阳能聚光集热技术的研究在我国开展的比较少, 还没有性能有竞争性的技术及相关部件的加工工艺。随着槽式太阳能热发电技术大规模商业化发展的到来, 对槽式太阳能聚光集热技术的研究在我国已经十分必要。

参考文献

- [1] Hank Price. Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(2): 109 - 125.
- [2] Lüpfer, E., Geyer, M., Schiel, W., et al. EUROTROUGH design issues and prototype testing at PSA [A]. Proc. of ASME Int. Solar Energy Conference-Forum 2001 [C], Washington, DC, 2001, 389 - 394.
- [3] Duke Solar. Task 2 Report: New Space-Frame Parabolic Trough Structure[R]. Raleigh :Duke Solar, 2000.
- [4] Gee, R. Parabolic Trough Wind Tunnel Testing [A]. Solar Forum 2001[C], Washington, DC, 2001.
- [5] IST. Collector Development [A]. Solar Forum 2001[C], Washington, DC, 2001.
- [6] C. E. Kennedy, K. Terwilliger. Optical durability of candidate solar reflectors [J]. Transactions of the ASME, 2005, 127: 262 - 269.
- [7] <http://www.reflectechsolar.com/product.html>.
- [8] Dudley, V. E., Kolb, G. J., Mahoney, A. R. Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector[R]. Albuquerque NM: SNL, 1994.
- [9] Mahoney, A., Burchett, S., Reed, S., et al. Finite Element Analysis of Stainless Steel — Pyrex® Housekeeper Glass-to-Metal Seals[R]. Albuquerque NM: SNL, 1994.
- [10] Mahoney, A. R., Price, H. Solar Field Performance of New UVAC Receivers at SEGS VI. KJC Operation Co[R]. ASME J. Sol. Energy Eng., 2002.
- [11] Cable, R. Solar Trough Generation — The California Experience [A]. Solar Forum 2001 [C], Washington, DC: KJC Operating Company, 2001.
- [12] Solel Solar Systems. Solartechnik Prüfung Forschung: Beit Shemesh, Israel, 2001.
- [13] Price, H., Hale, M., Mahoney, A. R., et al. Developments in high temperature parabolic trough receiver technology [A]. Proceedings of the 2004 international solar energy conference [C], Portland, 2004.

作者: [熊亚选](#), [Modibo Kane Traore](#), [吴玉庭](#), [马重芳](#), [张业强](#)
作者单位: [北京工业大学](#)
刊名: [太阳能](#)
英文刊名: [SOLAR ENERGY](#)
年, 卷(期): 2009, (6)
被引用次数: 0次

参考文献(13条)

1. [Hank Price](#) [Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology](#) 2002(02)
2. [Lüpfert E.](#) [Geyer M.](#) [Schiel W](#) [EUROTROUGH design issues and prototype testing at PSA](#) 2001
3. [Duke Solar](#) [Task 2 Report:New Space-Frame Parabolic Trough Structure](#) 2000
4. [Gee R](#) [Parabolic Trough Wind Tunnel Testing](#) 2001
5. [IST](#) [Collector Development](#) 2001
6. [C E Kennedy.](#) [K Terwilliger](#) [Optical durability of candidate solar reflectors](#) 2005
7. [查看详情](#)
8. [Dudley V E.](#) [Kolb G J.](#) [Mahoney A R](#) [Test Results:SEGS LS-2 Solar Collector](#) 1994
9. [Mahoney A.](#) [Burchett S.](#) [Reed S](#) [Finite Element Analysis of Stainless Steel-Pyrex Housekeeper Glass-to-Metal Seals](#) 1994
10. [Mahoney A R.](#) [Price H](#) [Solar Field Performance of New UVAC Receivers at SEGS VI.KJC Operation Co](#) 2002
11. [Cable R](#) [Solar Trough Generation-The California Experience](#) 2001
12. [Solel Solar Systems.](#) [Solartechnik Prufung Forschung:Beit Shemesh](#) 2001
13. [Price H.](#) [Hale M.](#) [Mahoney A R](#) [Developments in high temperature parabolic trough receiver technology](#) 2004

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_tyn200906007.aspx

授权使用: 东南大学图书馆(wfndnx), 授权号: 543f3c4a-5852-4b48-9ad0-9e9a00d37546

下载时间: 2011年3月2日