中国太阳能热发电行业

Blue Book of Concentrating Solar Power Industry

蓝皮书

2021

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟
中国可再生能源学会太阳能热发电专业委员会
中关村新源太阳能热利用技术服务中心

敬告读者

版权所有　翻印必究　严禁抄袭　引用务必注明出处

编写不足之处敬请谅解

中国太阳能热发电行业蓝皮书

Blue Book of Concentrating Solar Power Industry

2021

2022 年 1 月

2021 中国太阳能热发电行业蓝皮书

Blue Book of Concentrating Solar Power Industry 2021

编写组

批　　准： 何雅玲　中国科学院院士、太阳能光热联盟专家委员会主任委员

统　　筹： 王志峰　中国科学院电工研究所研究员、太阳能光热联盟理事长

主　　编： 杜凤丽　太阳能光热联盟常务副理事长兼秘书长
中国可再生能源学会太阳能热发电专委会秘书长

王志峰

校　　核： 杜凤丽　洪　松　董清风

排　　版： 焦　芳

审　　核： 太阳能光热联盟专家委员会

正文目录

图表目录

一、太阳能热发电的发展机遇和定位

1.1 新型电力系统的需求和挑战

2021 年 3 月 15 日召开的中央财经委员会第九次会议提出，要构建清洁低碳安全高效的能源体系，控制化石能源总量，着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。这是中央层面首次明确了新能源在未来电力系统中的地位。构建以新能源为主体的新型电力系统，意味着随机波动性强的风电和光伏将成为未来电力系统的主体，目前占主导地位的煤电将成为辅助性能源 [1]。据预测，在“双碳”目标下，2060 年我国一次能源消费总量将达到 46 亿吨标煤，其中非化石能源占比将达到 80% 以上，风、光成为主要能源，且主要转换成电能进行利用；2060 年电力占终端能源消费比例将达到 79%~92%[2]。

中国工程院郭剑波院士表示：新型电力系统仍主要以交流同步机制运行，面临充裕性、安全性、经济性、市场机制等方面的挑战。其中，新能源资源特性对电力系统带来充裕性挑战：功率波动大、预测难，对系统调节能力提出更高要求；长时间高出力，给系统安全和储能技术带来挑战；长时间低出力，给供电保障带来挑战；电力电量不确定性大，增加系统规划难度；尖峰出力功率大、电量小，全额消纳代价大。新能源设备特性带来安全性挑战：系统惯量降低、电源支撑能力弱，系统稳定问题突出；稳定特性复杂、不确定性增加，安控策略配置困难、失配风险增大；宽频振荡现象相继出现，危害设备安全和电网运行安全；单体容量小、数量多，调控运行复杂 [2]。中国工程院刘吉臻院士指出：构建新型电力系统需要关键技术的支撑，需要从电源侧、电网侧和负荷侧三个方面发力突破。其中，电源侧大力发展电网友好型先进发电技术、多元互补与灵活发电技术 [3]。

在 2021 年 8 月 10 日国家发改委、国家能源局印发的《关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知》中明确提出：随着我国可再生能源的迅猛发展，电力系统灵活性不足、调节能力不够等短板和问题突出，制约更高比例和更大规模可再生能源发展。未来我国实现 2030 年前碳达峰和努力争取 2060 年前碳中和的目标任务艰巨，需要付出艰苦卓绝的努力。实现碳达峰关键在促进可再生能源发展，促进可再生能源发展关键在于消纳，保障可再生能源消纳关键在于电网接入、调峰和储能。同时，该文件鼓励多渠道增加调峰资源。承担可再生能源消纳对应的调峰资源，包括抽水蓄能电站、化学储能等新型储能、气电、光热电站、灵活性制造改造的煤电。

1.2 太阳能热发电发展的新机遇

国家能源局新能源和可再生能源司新能源处副处长孔涛出席“2021 中国太阳能热发电大会”时表示，随着碳达峰、碳中和以及构建以新能源为主体的新型电力系统目标的提出，在今后较长一段时期内，我国风电、光伏都将以更快速度发展，这也为光热行业的发展带来了新的机遇 [4]。

一是我国部分地区将光热发电作为调峰电源有需求。一些大规模开发利用新能源的地区不具备抽水蓄能、气电等灵活电源的建设条件，同时由于生态保护等原因难以新增煤电装机，缺少为新能源提供调峰能力的解决方案。因此，这些地区将光热电站作为调峰电源建设，有利于改善新能源快速发展中出现的消纳问题。

二是参与电力市场有利于在国家补贴退出后保证光热产业可持续发展。目前光热电站建设成本较高，作为普通电源建设经济性不足。当前一些地方的电力现货市场、辅助服务市场等建设工作正在有序推进，将光热发电作为调峰电源，其出力灵活可调、可长时储能的优势将能够通过市场化的方式为项目赢得更多收益，从而有效支持国内光热产业可持续发展。

三是通过积累项目建设运行经验有利于参与国际市场竞争。近年来中东、北非等太阳能资源丰富的地区开始将光热发电作为持续利用可再生能源发电的解决方案，利用光热在夜间发电并在白天为光伏调峰，光热发电在这些地区有很好的市场前景。通过国内的光热项目不断积累调峰方面的建设运行经验，将使我国光热产业在国际市场更具竞争优势。

国家能源局一直积极支持光热发电行业发展。“十四五”期间也将继续支持在资源优质区域，通过与风电、光伏发电基地一体化建设等方式，建设一定规模的光热发电项目，充分发挥光热发电的调节作用和系统支撑能力，保障光热发电产业能够接续发展。

国家发展改革委 2021 年 6 月 7 日发布的《关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》中提出：鼓励各地出台针对性扶持政策，支持光伏发电、陆上风电、海上风电、光热发电等新能源产业持续健康发展。国务院《2030 年前碳达峰行动方案》明确：积极发展太阳能光热发电，推动建立光热发电与光伏发电、风电互补调节的风光热综合可再生能源发电基地。加快建设新型电力系统。构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统，推动清洁电力资源大范围优化配置。大力提升电力系统综合调节能力，加快灵活调节电源建设；加快新型储能示范推广应用。

1.3 太阳能热发电的定位和作用 [5]

风力发电和光伏发电具有“极热无风”、“晚峰无光”等特点和“大装机、小电量”特征，随着“双碳”目标的推进，高比例、间歇性和波动性的风电与光伏在电力系统中的比重不断增加，在满足电力系统电量需求的同时，也带来较大的调峰压力。2020 年，时任国家电网总工程师的陈国平在电力系统发展方向暨学术方向研讨会的主旨报告《现代电力系统中问题，挑战与重构》中指出，电力系统发展需要重构；大力发展具有传统同步电源特性的光热电源。2019 年，清华大学能源互联网研究院在《高比例可再生能源电力系统中光热发电的价值发现》一文指出：灵活可控的特点使得光热发电并网既具有可再生能源效益又具有灵活性效益。发挥运行灵活性特性，可以实现光热与风电光伏及其他能源打捆的平滑效益，提升区内消纳和打捆外送中的可再生能源消纳水平。高比例可再生能源并网下，太阳能热发电的电力支撑效益显著，有望成为部分地区主要的调节电源重要选项之一；可以起到利用可再生能源消纳可再生能源作用。

1.3.1 太阳能热发电储热连续发电调节能力强

根据我国 2018 年并网的 3 座商业化太阳能热发电示范项目的运行结果，太阳能热发电机组调峰深度最大可达 80%；爬坡速度快，升降负荷速率可达每分钟 3% ～ 6% 额定功率，冷态启动时间 1 小时左右、热态启动时间约 25 分钟，可 100% 参与电力平衡，可部分替代化石类常规发电机组，对保障高比例可再生能源电网的安全稳定运行具有重要价值。电力规划设计总院以目前新疆电网为例进行过模拟计算，假定建设 100 万千瓦 ~500 万千瓦不同规模的太阳能热发电机组，可减少弃风弃光电量 10.2%~37.6%。

太阳能热发电也具有承担基础负荷的能力，且已被验证。西班牙有 18 个太阳能热发电站不间断运行达 3 周，其中带 15 小时储能、装机容量 2 万千瓦的 Gemasolar 电站实现连续 36 天全天候运行。在我国，装机容量 5 万千瓦的中广核德令哈太阳能热发电站连续运行 32 天（2021 年最新数据为 107 天），青海中控德令哈光热电站连续运行 12 天（292.7 小时），首航高科敦煌 10 万千瓦光热电站连续运行 9 天（216 小时）。

清华大学能源互联网研究院研究结果显示，如果安装 22GW 光伏和 7GW 风电，青海电网在丰水期可连续 3 日全清洁能源供电（包括省内负荷以及特高压外送河南）；如在此基础上配置 4GW 太阳能热发电，青海省在丰水期可高达创世界纪录的连续 30 日全清洁能源供电。

1.3.2 安全性高，适合大容量储能使用

储能安全性是大容量储能的一个重要方面，带有二元硝酸盐的储热是一种安全性较高的储热方式。目前，国内单机容量最大的首航高科塔式光热电站储电已达 1.7GWh；全球达到了 1000GWh。自 1982 年 4 月美国 SOLAR ONE 以来，全球 669 万千瓦的太阳能热发电装机还未发生过类似锂电爆炸等安全性事故，是一种高安全性的储能方式。

1.3.3 太阳能热发电储热系统可双向连接电网

太阳能热发电的熔融盐储能系统，既可通过太阳能集热系统给其充热、储热，也可通过电加热系统将网上的峰值电力转化为热能存储发电。这样的使用方式非常有利于电力系统的电力平衡，也能很好地参与电力市场交易。2021 年 9 月 23 日，吉林省白城市人民政府发布“吉西基地鲁固直流白城 140 万千瓦外送项目入选推荐企业评优结果公示”，风电 800MW、光伏 400MW、光热 200MW。其中太阳能热发电系统熔融盐储罐中带有可接纳可再生能源电力的电加热系统，太阳能热发电系统对电网形成双向连接，达到灵活调节可再生能源电力的目的。2021 年 9 月 28 日，海南基地青豫直流二期 340 万千瓦外送项目、海西基地青豫直流二期 190 万千瓦外送项目也进行了中标候选人公示。其中，光伏项目规模 3.5GW，风电项目规模 1.5GW，光热发电项目规模 300MW。太阳能热发电加可再生能源电力项目正在起步。

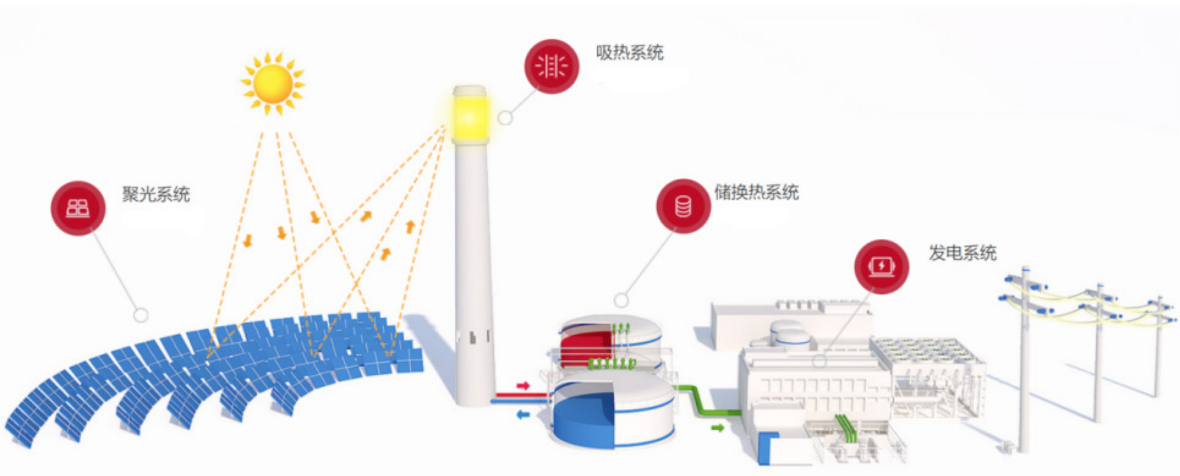
二、太阳能热发电市场发展

2.1 我国兆瓦级太阳能热发电系统的技术起步

为推动我国太阳能热发电技术进步及产业发展，2006 年，科技部国家高技术研究发展计划（863 计划）先进能源技术领域启动了“太阳能热发电技术及系统示范”重点项目。通过中国科学院电工研究所牵头的 11 家单位协同攻关，历时 6 年的不懈努力，2012 年 8 月 9 日，我国自行设计、研发并建成的亚洲首座兆瓦级塔式太阳能热发电实验电站成功发电。项目实现了核心装备、协调控制、系统集成等多项技术突破，全面掌握了高精度聚光器、聚光场、直接过热型吸热器、储热和发电单元及系统设计技术，以及总体、光场、机务、仪控和电气设计技术，取得了以光热场耦合直接产生过热蒸汽工艺为代表的一批自主创新成果，建立起太阳能热发电技术的研发体系和标准规范体系，编制了太阳能热发电首部国家标准，并实现了 100% 的设备国产化率，为我国太阳能热发电技术的发展奠定了坚实的基础。[6-7]

2013 年 7 月，国家高技术研究发展计划支持的青海中控德令哈塔式太阳能热发电站一期 10MW 项目（东西两塔各 5MW）示范工程并入青海电网发电。项目研制了单台反射面积为 2 平方米的智能定日镜，开发了定日镜高精度智能跟踪技术和大规模镜场控制系统；实现了规模化定日镜集群的整体聚光和集热；研究了不同地理、气候环境下，塔式太阳能热发电能量动态建模和优化设计；设计了基于水工质的高能流密度的吸热器、蒸汽缓冲、发电的能量回路和装备，实现了规模化光热技术路线的光电能量转换技术 [8]。2014 年 9 月初，国家发改委核定其上网电价（含税）为每千瓦时 1.2 元，这也是太阳能热发电项目首次获得国家批复的上网电价，标志着中国自主研发的太阳能光热发电技术向商业化运行迈出了坚实步伐 [9]。

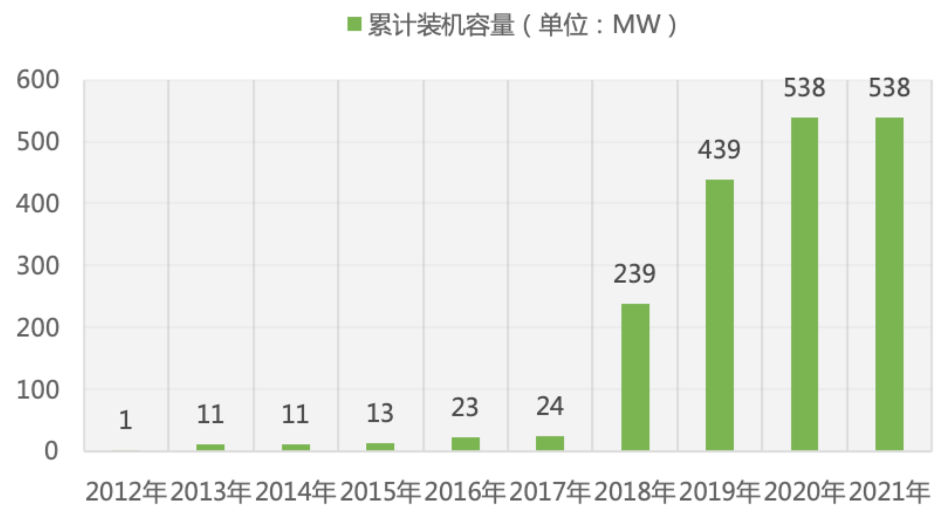
在国家 863 计划“基于小面积定日镜的 10MW 塔式太阳能热发电技术研究及示范”主题项目支持下，2016 年 8 月 20 日，中控太阳能德令哈 10MW 光热电站将水 / 蒸汽传热介质改为熔盐后成功并网发电，8 月 21 日实现满负荷发电，充分展示了我国具有自主知识产权的塔式光热系统集成技术水平，以及适应高寒高海拔环境的核心装备研制能力 [10]。项目培育了包括可胜技术、杭锅，杭汽等在内的又一批骨干企业，为我国建设并发展大规模应用的商业化太阳能热发电站提供了技术支撑与示范引领。



图：熔盐储能塔式太阳能热发电系统示意图

2.2 我国太阳能热发电装机容量

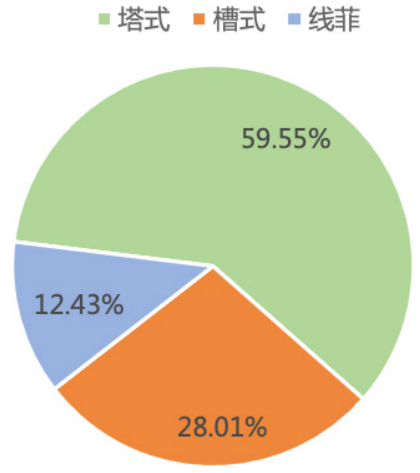
我国首座 MW 级太阳能热发电站完成试验发电后的第 3 年，国家能源局启动了太阳能热发电示范项目建设申报工作。2016 年国家发改委和国家能源局分别发布了太阳能热发电标杆上网电价政策（每千瓦时 1.15 元）及第一批太阳能热发电示范项目名单。根据太阳能光热产业技术创新战略联盟统计，截至 2021 年底，我国太阳能热发电累计装机容量 538MW（含 MW 级以上规模的发电系统）。



制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：我国太阳能热发电累计装机容量

在我国已建成的太阳能热发电系统中，塔式技术路线占比约 60%，槽式约 28%，线性菲涅耳技术（以下简称线菲）约占 12%。



制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：我国已建成太阳能热发电项目中的装机技术类型

2.3 全球太阳能热发电装机容量

2.3.1 美国 230MW 槽式电站退役

2021 年 9 月 20 日，美国能源信息管理局（EIA）官网发布消息表示，2021 年 7 月 ~9 月，于 1986 年 ~1989 年期间投运的 SEGS 3~ 8 号槽式电站退役，总净容量 230MW。SEGS 太阳能光热电站是世界上运行时间最长的太阳能热发电系统，包括 9 座不同容量的槽式电站，总净容量 354MW。分别建于 1984 年和 1985 年的 SEGS 1 号和 2 号槽式电站于 2015 年退役，运行寿命超过 30 年。目前还有一座 1990 年投运的 SEGS 9 号（净容量 80MW，总容量 88MW）槽式电站仍在运行 [11]。SEGS 槽式电站往年发电量情况如下表所示 [12]。

图：建于上个世纪 80 年代的 SEGS 槽式电站实景图

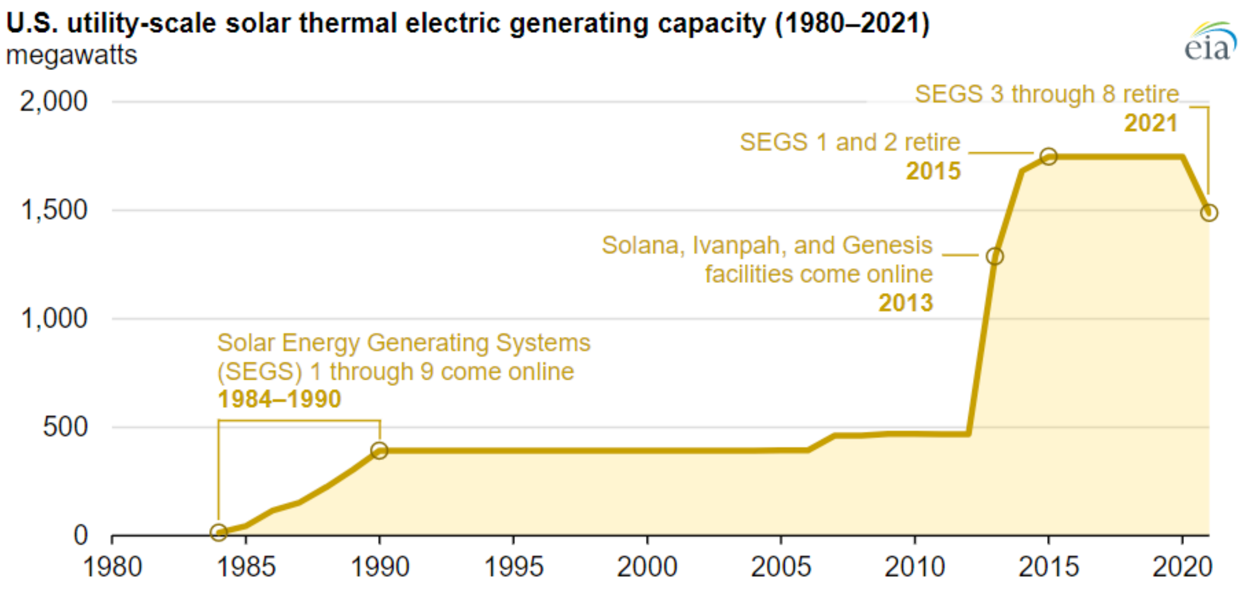
SGES 8 号和 9 号槽式电站近 5 年发电量情况（单位：MWh）

电站	净容量 (MW)	2016	2017	2018	2019	2020	1985–2020 总发电量（MWh）
SEGS VIII	80	140,849	123,451	132,871	120,530	114,557	4,073,525
SEGS IX	80	142,867	131,268	137,564	124,375	122,045	4,079,595

表：SGES 1~9 号槽式电站 2003~2015 年发电量情况

电站名称	净容量（MW）	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	总发电量（MWh）	2003–2015 平均发电量（MWh）
SEGS I	14	6,913	8,421	6,336	5,559	0	10,705	9,033	10,648	11,164	11,666	9,403	8,583	12,562	110,993	8,538
SEGS II	30	11,142	14,582	13,375	7,547	5,445	28,040	18,635	22,829	26,198	25,126	23,173	7,611	0	203,703	15,669
SEGS III	30	59,027	64,413	56,680	51,721	59,480	69,012	62,971	60,029	61,350	56,877	56,824	54,407	52,073	764,864	58,836
SEGS IV	30	58,100	62,006	56,349	52,439	59,799	69,338	63,563	63,084	57,684	62,414	58,317	54,321	53,117	770,531	59,272
SEGS V	30	61,921	67,717	62,309	53,471	59,547	69,316	59,820	54,328	60,451	62,877	57,758	56,354	52,646	778,515	59,886
SEGS VI	30	50,504	53,618	51,827	45,076	65,832	67,156	62,750	63,576	59,327	56,082	52,539	50,547	46,937	725,771	55,829
SEGS VII	30	49,154	50,479	46,628	42,050	58,307	65,185	58,950	58,836	57,378	54,147	48,183	46,762	37,771	673,830	51,833
SEGS VIII	80	119,357	124,089	120,282	117,451	122,676	135,492	131,474	155,933	152,463	145,247	141,356	145,525	138,149	1,749,494	134,576
SEGS IX	80	115,541	123,605	120,915	117,310	122,699	150,362	139,756	163,899	160,506	164,203	154,082	147,883	145,863	1,826,624	140,510
总计	354	531,659	568,930	534,701	492,624	553,785	664,606	606,952	653,162	646,521	638,639	601,635	571,993	539,118	7,604,325	584,948

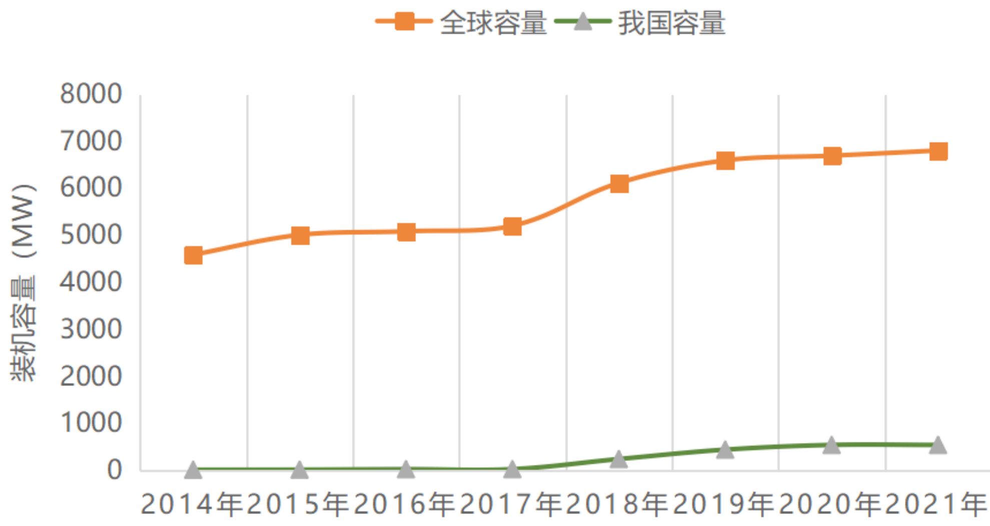
截至 2021 年 6 月，美国共有约 52600MW 的公用事业规模太阳能发电装机；其中约 3.3% 来自太阳能热发电，装机容量情况如下图所示 [11]。据太阳能光热产业技术创新战略联盟统计，美国太阳能热发电累计装机容量中，槽式技术路线占比 66.7%，塔式技术占比 33.3%。



图：美国公共事业规模太阳能热发电站装机容量

2.3.2 全球太阳能热发电装机容量

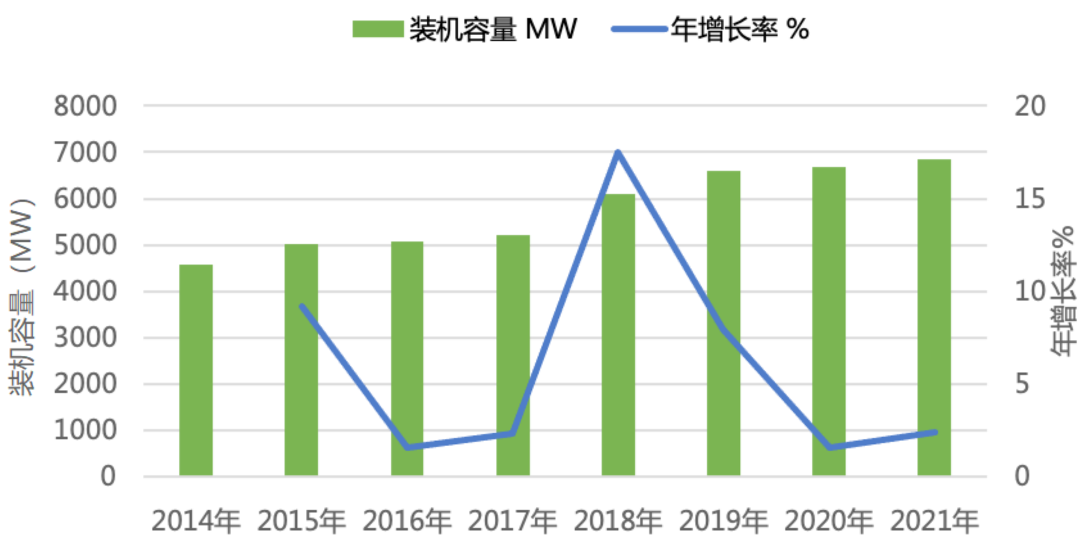
2021 年，全球新增太阳能热发电装机容量 110MW，为智利太阳能光热光伏混合项目中的太阳能热发电站，装机容量 110MW/ 储热时长 17.5 小时 [13]。我国 2021 年没有太阳能热发电项目并网。结合太阳能光热联盟以往统计数据，2021 年底全球太阳能热发电累计装机容量约 6800MW（含已退役电站容量）。2014~2021 年全球太阳能热发电累计装机容量发展情况如下图所示。



制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：2021 年全球太阳能热发电累计装机容量

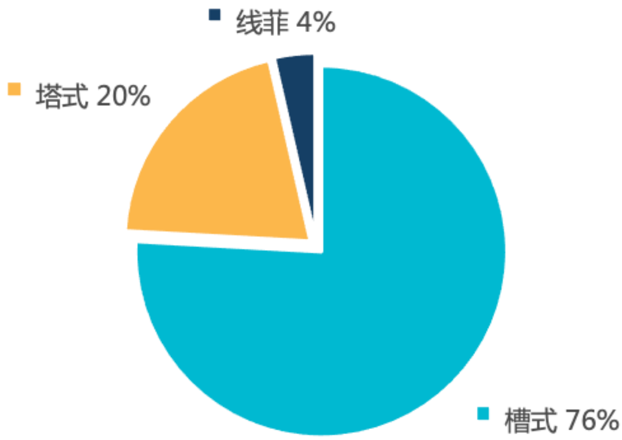
从全球太阳能热发电累计装机容量发展曲线可以看出，2018 年年增长率较高，主要原因是我国在 2018 年集中投运了 3 座，总容量 200MW 的太阳能热发电示范项目。



制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：全球太阳能热发电装机容量发展情况

据太阳能光热产业技术创新战略联盟粗略统计，在全球主要国家和地区的太阳能热发电装机中，槽式技术路线占比约 76%，塔式约 20%，线菲约 4%。统计数据覆盖西班牙、美国、中东、北非、南非、以色列、印度、智利、法国以及中国等国家和地区。



制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：全球主要国家和地区光热发电装机技术占比概况

2.4 2021 年我国新增太阳能热发电项目

根据国家能源局 2021 年 5 月发布的《关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知》，对于保障性并网范围以外仍有意愿并网的项目，可通过自建、合建共享或购买服务等市场化方式落实并网条件后，由电网企业予以并网。并网条件主要包括配套新增的抽水蓄能、储热型光热发电、火电调峰、新型储能、可调节负荷等灵活调节能力。作为落实并网条件的配套选择之一，储热型光热发电与光伏、风电等波动性电源共同互补，不仅能够发挥光热发电的储能和调峰能力，体现光热作为调峰电源支持新能源发展的作用，还能利用近年来风电光伏成本快速下降的成果，充分释放光伏、风电的低成本优势，填补用电高峰期的光伏发电的电力供应缺口，有效提升能源利用效率和经济效益。

2021 年 10 月 12 日，习近平主席在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上发表主旨演讲时表示：中国将持续推进产业结构和能源结构调整，大力发展可再生能源，在沙漠、戈壁、荒漠地区加快规划建设大型风电光伏基地项目。2021 年 10 月 15 日，青海省和甘肃省分别举行了新能源项目集中开工仪式；10 月 28 日，吉林省举行了“陆上风光三峡”工程全面建设启动仪式。这些项目将在 2023 年底前建成并网，其中包含光热发电装机容量共计 101 万千瓦。

青海省千万千瓦级大型风电光伏基地包括 8 个就地消纳和 7 个青豫直流二期外送项目，总装机容量达 1090 万千瓦；其中，光伏 800 万千瓦，风电 250 万千瓦，光热 40 万千瓦。

表：青海省太阳能光热＋一体化项目（容量：万千瓦）

项目名称	建设情况	光伏	光热	中标人
海南、海西基地青豫直流二期 340 万千瓦 +190 万千瓦外送项目	1 标段（共和塔拉滩）；塔式技术，拟建设采光面积为 80 万平米聚光场及 12 小时储热系统；项目总投资预计 188872 万元	90	10	国家能源投资集团有限责任公司（牵头）、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司
	2 标段（共和塔拉滩、格尔木乌图美仁）	90	10	国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司（牵头）、浙江可胜技术股份有限公司、中海油融风能源有限公司
	3 标段（共和塔拉滩、格尔木乌图美仁）；塔式技术，项目总投资 461199 万元；光伏项目容配比不超过 1:1.245，直流侧按照 1120.5MWp 进行配置；同时将按照 20%/4h 进行储能配置	90	10	中国三峡新能源（集团）股份有限公司（牵头）、首航高科能源技术股份有限公司
三峡能源海西基地格尔木光伏光热项目	格尔木	100	10	中国三峡新能源（集团）股份有限公司
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA				

甘肃省集中开工新能源装机总规模达 1285 万千瓦；其中，风电项目 265 万千瓦、光伏发电项目 979 万千瓦、光热项目 41 万千瓦。

表：甘肃省“光热＋储能”项目（容量：万千瓦）

项目名称	建设情况	风光	光热	中标人
国家能源集团敦煌“10 万千瓦光热 +60 万千瓦光伏”项目	总占地 21547 亩，总投资 43 亿元。包括 60 万千瓦光伏发电工程、10 万千瓦熔盐线菲光热发电工程，配套建设一座 330kV 汇集站，通过 1 回 330kV 线路就近接入沙洲 750kV 变电站 330kV 侧。	60（光伏）	10	国家能源集团甘肃电力公司和兰州大成科技股份有限公司

中核集团玉门“10万千瓦光热+20万千瓦风电+40万千瓦光伏”项目	规划区面积约45平方公里。其中，光热发电与光伏发电场占地15平方公里，场址位于玉门市花海光电基地内；风电场占地30平方公里，场址位于玉门市红柳泉风光储综合能源示范基地内。	20+40（风电+光伏）	10	中核集团玉门新奥新能源有限公司
恒基伟业（三峡集团）瓜州“10万千瓦光热+20万千瓦光伏+40万千瓦风电”项目	项目已经开始场地平整、道路建设、通水通电等施工前准备工作。项目运行后年平均发电量为19.12亿kWh，每年可节约标准煤约64万吨。	20+40（光伏+风电）	10	中国三峡新能源（集团）股份有限公司
汇东新能源公司（华东电力设计院）阿克塞“11万千瓦光热+64万千瓦光伏发电”项目	项目位于甘肃省酒泉市阿克塞哈萨克族自治县四十里戈壁千万千瓦级太阳能热发电基地内，用地面积约20.6平方公里，总投资约50.6亿元。建成后，可实现年均上网电量17亿kWh。	64（光伏）	11	阿克塞哈萨克族自治县汇东新能源有限责任公司（中电工程华东电力设计院下属全资子公司）
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA				

吉林省“陆上风光三峡”工程中的吉西基地鲁固直流白城140万千瓦外送项目包含风电80万千瓦、光伏40万千瓦、光热20万千瓦。

表：吉西基地鲁固直流白城140万千瓦外送项目（容量：万千瓦）

项目名称	编号	风光	光热	入选企业
吉西基地鲁固直流白城140万千瓦外送项目（通榆县）	1号	20+10	10	国家能源投资集团有限责任公司（牵头）、浙江中光新能源科技有限公司
	2号	20+10		中国电力建设集团有限公司
吉西基地鲁固直流白城140万千瓦外送项目（大安市）	3号	20+10	10	中国广核集团有限公司（牵头）、白城市能源投资开发有限公司
	4号	20+10		中国大唐集团新能源股份有限公司（牵头）、中国能源建设集团投资有限公司
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA				

三、我国太阳能热发电示范项目运行情况 [1]

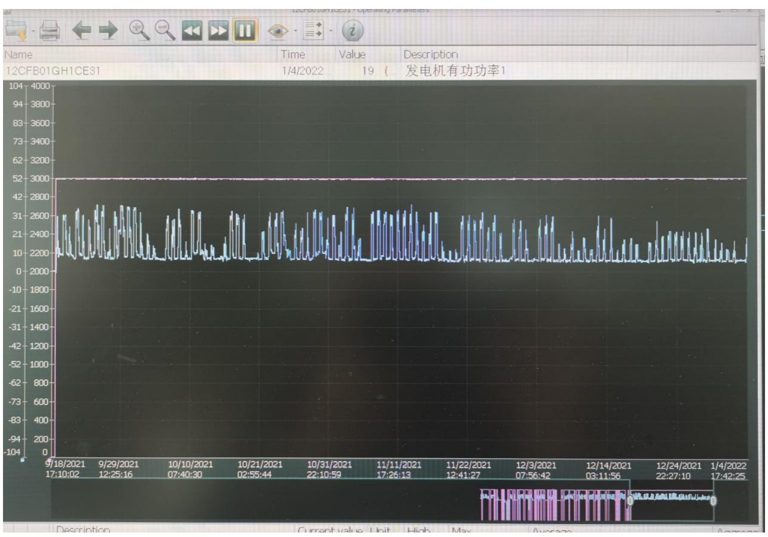
在国家能源局批复的首批 20 个太阳能热发电示范项目中，截至 2021 年底共有 7 个项目并网发电。按照国家发改委《关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》文件，这些项目均执行 1.15 元 / kWh 的上网电价。另外，国家能源局多能互补示范项目中也有一座太阳能光热电站建成投产，详见下表。通过不断消缺，这些太阳能热发电示范项目的性能和发电量逐步提升。

表：我国太阳能热发电示范项目简况

项目简称	储热时长（小时）	初投资（亿元）	设计年发电量（亿度）
中广核德令哈 50MW 槽式项目	9	17	1.975
首航高科敦煌 100MW 塔式项目	11	30	3.9
青海中控德令哈 50MW 塔式项目	7	10.88	1.46
中电建青海共和 50MW 塔式项目	6	12.22	1.569
中能建哈密 50MW 塔式项目	13	16.4	1.983
兰州大成敦煌 50MW 线菲项目	15	16.88	2.14
乌拉特中旗 100MW 槽式项目	10	28.8	3.92
鲁能格尔木多能互补 50MW 塔式项目	12	19.86	1.6
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA			

3.1 中广核德令哈 50MW 槽式太阳能光热电站

中广核德令哈 50MW 槽式电站是我国首个大型商业化光热示范电站。2021 年度上网电量同比 2020 年度提升 31.6%。自 2021 年 9 月 19 日至 2022 年 1 月 4 日，机组已经连续运行 107 天，刷新了 2020 年最长连续运行 32.2 天的记录，在国内外处于领先地位。



图：中广核德令哈光热电站汽轮机转速与负荷曲线图

1 特别感谢毕成业、陈晨、陈登平、范玉磊、金建祥、贾永柱、祁万年、张军、赵雄等对本节内容的贡献。

3.2 首航高科敦煌 100MW 塔式太阳能光热电站

首航高科敦煌 100MW 熔盐塔式光热示范电站 2019 年 6 月实现满负荷运行 [14]。自投运以来，首航高科不断改进系统软硬件方面性能，镜场效率有明显提升，机组整体性能稳步提高。在 2021 年敦煌地区 DNI 较 2020 年同期略低，且多风沙气候（定日镜的清洁度受到严重影响）的情况下，2021 年第三季度（7 月～9 月期间的 92 个自然日中，电站所在地天气为晴天少云天气 40 天，多云天气 38 天，阴天 14 天）电站实现总发电量为 7838.3862 万 kWh，在 2020 年同期发电量较 2019 年增长 31.3% 的基础上，2021 年同期再度增长 39.7%，实现了发电量的按规划有序增长。项目进入 4 年“学习曲线”（性能提升期）的第三年， 电站各项性能指标仍在大幅度提升 [15]。

3.3 青海中控德令哈 50MW 塔式太阳能光热电站

青海中控德令哈 50MW 太阳能光热电站 2018 年 12 月 30 日并网发电，2019 年 4 月 17 日实现了满负荷运行。后通过不断消缺，逐步解决了冷盐泵震动、电伴热故障率高、吸热屏的堵管、汽轮机组热应力故障而返厂整修等问题。其中，解决冷盐泵震动和吸热屏堵管问题先后历时一年，取得了很好的效果，期间对于发电量影响甚微。而汽轮机及相连管道的热应力问题经过近一年的反复整改，最终取得了较为理想的结果，期间有三个多月时间对发电量产生严重影响。自 2019 年 10 月开始，除了汽轮机发生故障的个别月份外，绝大多数月份电站实际发电量达到或超过设计值。

2021 年 9 月份入秋以来至 12 月份，电站一直处于良好的运行状态，4 个月的发电量累计达 6099.12 万 kWh，月度发电量情况如下表所示。

表：青海中控德令哈 50MW 光热电站 2021 年 9~12 月发电量数据 [16]

月份	理论发电量（万 kWh）	实际发电量（万 kWh）	太阳法向直射辐射（DNI）（kWh/m^2）
2021 年 9 月	1457.43	1457.08	193.77
2021 年 10 月	1337.08	1367.13	169.81
2021 年 11 月	1715.73	1790.68	217.23
2021 年 12 月	1451.51	1484.23	186.13

3.4 中电建共和 50MW 塔式太阳能光热电站

中电建青海共和 50MW 光热发电项目位于青海省海南州共和县生态太阳能发电园区，项目总占地面积 2.12 平方公里，采用 20 平方米的定日镜 30016 面，集热塔高度 193 米，吸热器中心标高 210 米，设计储热时长 6 小时，采用超高压、一次再热、双缸双转速、直接空冷凝汽式汽轮机。

中电建共和 50MW 塔式光热电站于 2020 年 11 月 6 日实现满负荷运行，2021 年 4 月通过国家光热发电项目示范性验收。根据共和西北水电光热发电有限公司提供的数据，2021 年 5 月 7 日当天电站总计运行时长 16 小时 43 分钟，日上网电量达到 53.9 万 kWh，创下投运以来最高纪录；吸热器出口熔盐温度最高达到 568℃（设计值 565℃）。

3.5 中电哈密 50MW 塔式太阳能光热电站

中电哈密 50MW 塔式电站位于哈密市伊吾县内，总投资 15.8 亿元。聚光场共安装 14500 面定日镜，单台定日镜面积 48.5 平方米，储热时长 13 小时，首次采用双热罐 + 单冷罐设计方案以及国产首台用于光热发电的超高温、超高压、一次中间再热、双缸、轴向排汽、8 级回热的直接空冷凝汽式汽轮机。

项目于 2017 年 10 月 19 日正式开工建设，2019 年 12 月 29 日实现首次并网。2021 年 6 月 18 日凌晨 01 时 26 分并网发电，9 月 6 日实现全容量发电。2021 年 8 月 26 日至 9 月 27 日期间，系统连续运行时间超过 240 小时；9 月 15 日至 19 日，机组实现连续运行 5 天，每天持续不间断运行小时数 4.16~24h，平均值达到 8.674h；在设计气象条件下，实现了 5 天内机组在设计出力 90% 以上负荷每天连续运行 1h 以上，平均 1.3h。

3.6 兰州大成敦煌 50MW 线菲太阳能光热电站

兰州大成敦煌 50MW 太阳能光热电站是全球首个实现商业化运行的以熔盐为传热和储热介质的线性菲涅耳式光热电站。项目于 2019 年 12 月 31 日实现并网发电。2020 年 6 月初进行热态进盐调试，2020 年 6 月 18 日太阳能集热场系统整体并网发电投运 [17]。在 2020 年整个冬季低温环境中，电站保持熔盐集热场的连续发电运行。

图：兰州大成敦煌 50MW 太阳能光热电站集热场

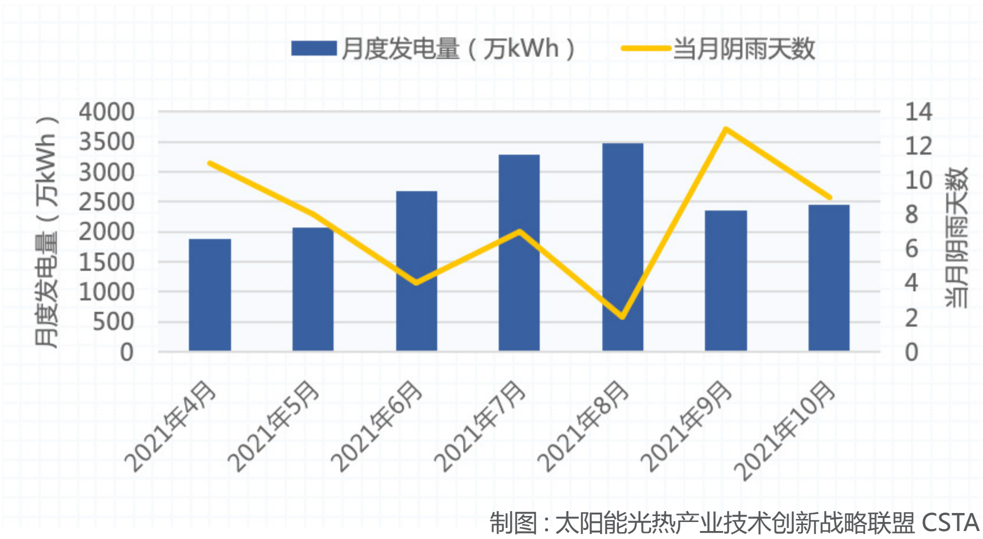
2021 年 5 月 5 日，在仅投运了 50% 集热场的情况下，电站实现满负荷发电，单日发电量达到 51.77 万 kWh。自 2021 年 5 月上旬开始，电站发电量连续创新高；5 月整月累计发电量 863.35 万 kWh，当月累计上网电量 855.8 万 kWh。项目单日最高发电量达到 61.04 万 kWh，多个月份发电量超过 800 万 kWh。目前电站聚光集热系统已分批全部投运，项目发电量还有较大提升空间。

3.7 内蒙古乌拉特 100MW 槽式太阳能光热电站

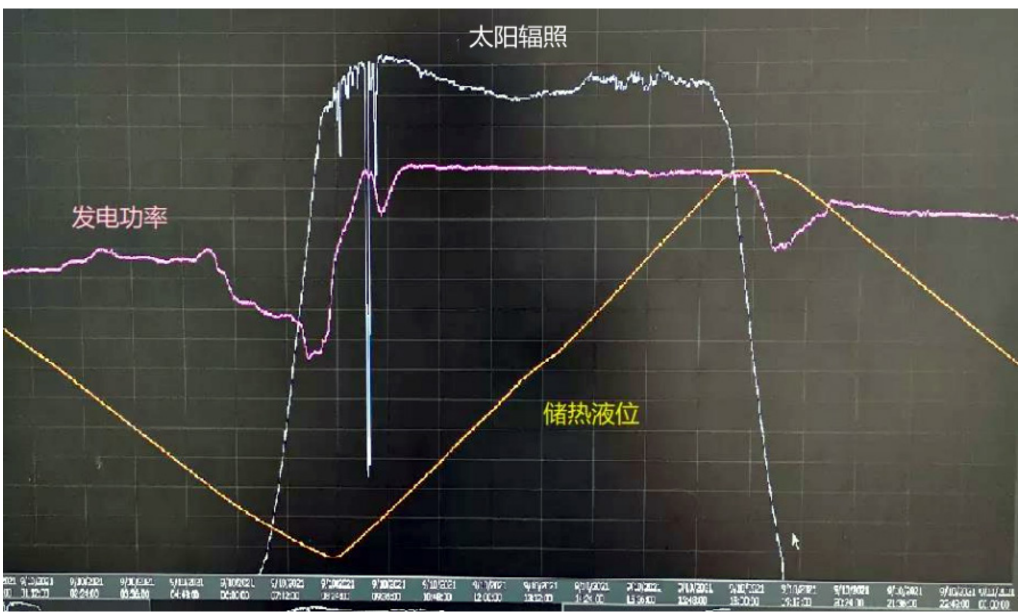
内蒙古乌拉特中旗 100MW 槽式光热示范电站项目于 2018 年 6 月正式动工，2020 年 1 月 8 日首次实现并网发电，2020 年 12 月 16 日实现满负荷发电，2021 年 10 月 20 日通过国家示范性验收。自 2021

年 7 月 13 日熔盐储能系统全面投运以来，电站实现了连续 24 小时不间断、稳定、高负荷发电运行，各项指标达到甚至超过设计值；其中，光学指标——拦截率经过欧洲第三方权威实验室检测，达到 98%，高于目前国际水平 1 个百分点 [18]。

据中国船舶重工集团新能源有限责任公司提供的数据，2021 年 4~10 月期间，项目所在地乌拉特中旗地区共有阴雨天 54 天；7~8 月期间，累计实际直射光辐射只有典型年的 68%；8~10 月期间，每月的多云天气超过 10 天，为历史罕见。截至 2021 年 10 月，电站已累计发电约 2.2 亿 kWh；其中连续 5 天累计发电量超过 1000 万 kWh；单日最高发电量达 212.8 万 kWh[19-20]。内蒙古乌拉特中旗 100MW/1000MWh 槽式光热储能电站 2021 年 4~10 月份发电量情况及 2021 年 9 月 10 日当日运行曲线如下图所示。



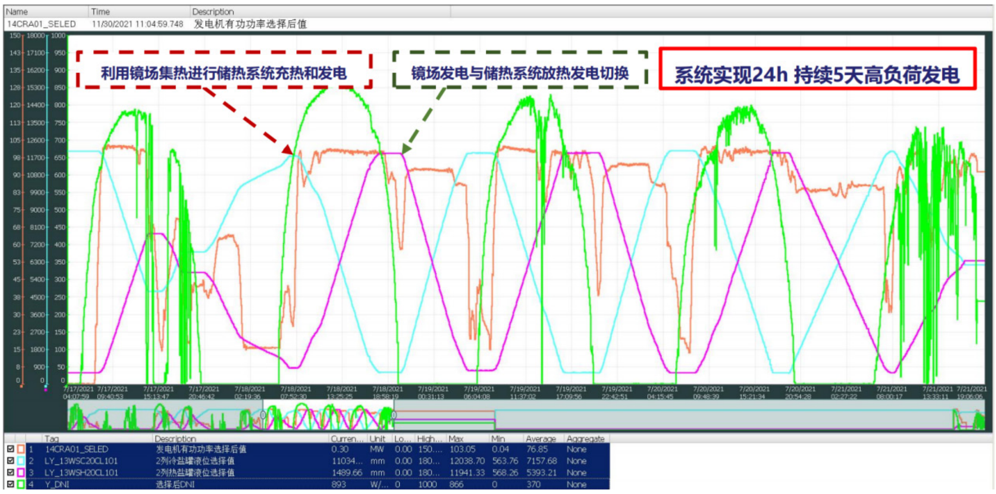
图：乌拉特中旗 100MW/1000MWh 槽式光热储能电站 2021 年 4~10 月份发电量



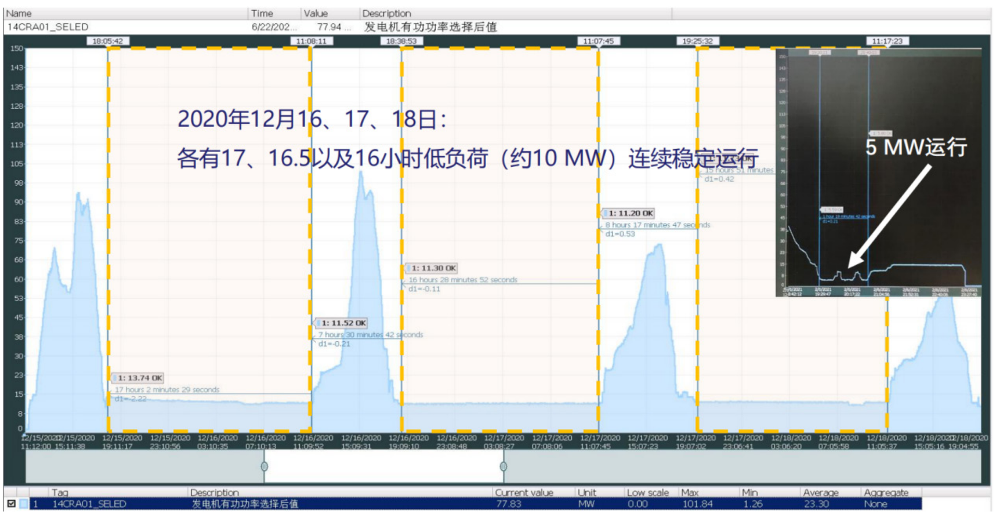
图：在上午多云情况下，2021 年 9 月 10 日电站最高发电量达 212.8 万 kWh

目前电站已经实现了 24 小时持续 5 天不间断高负荷发电的记录。电站通过实际运行数据，验证了

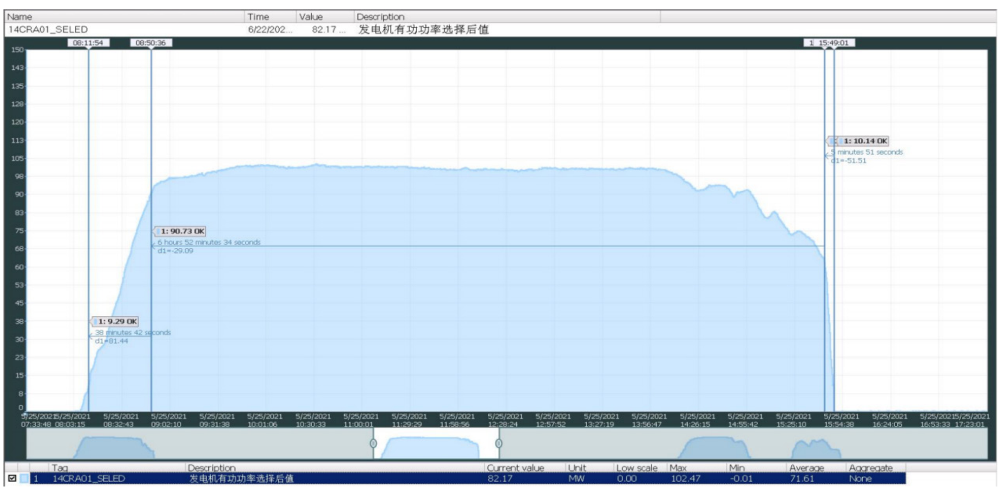
槽式光热电站连续运行作为基础负荷，低负荷稳定运行以及快速调负荷参与调峰等性能。具体情况如下图所示。



图：2021 年 7 月 17~21 日，电站实现利用储热系统 24 小时连续五天高负荷发电



图：机组最低负荷可达 5 MW（常规火电机组 20%~40%），低负荷稳定运行参与调峰

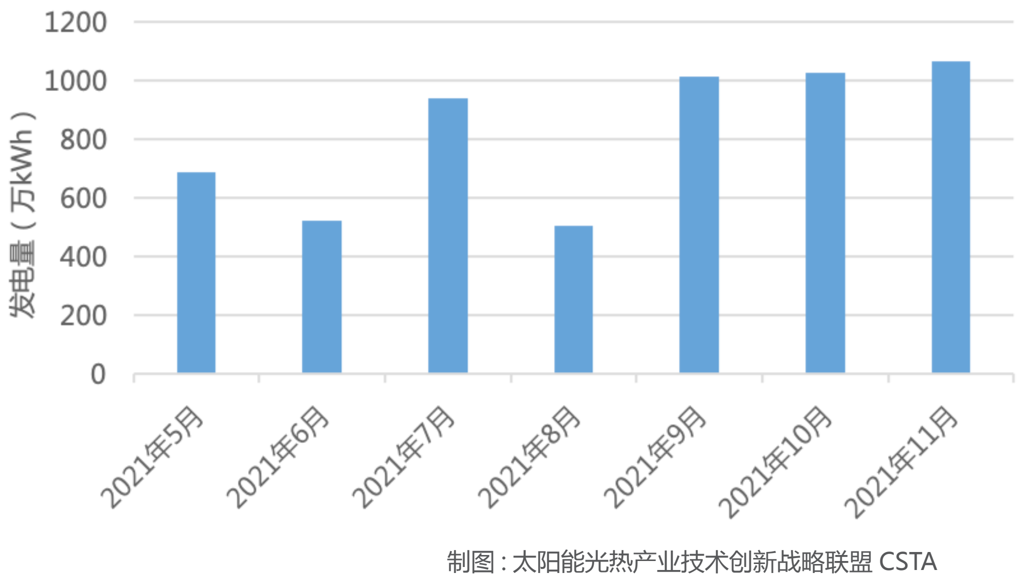


图：机组升降负荷速率最高可达 10 MW/min（常规调峰电站爬坡速率 2%/min~5%/min）

3.8 青海格尔木鲁能多能互补光热电站

鲁能海西州多能互补集成优化国家示范项目总装机容量 700MW，其中光伏发电 200MW、风电 400MW、光热发电 50MW、电化学储能 50MW，配套建设 330 千伏汇集站和国家级多能互补示范展示中心，是世界首个集风光热储调荷于一体的多能互补科技创新项目。带有 12 小时熔盐储热系统的光热发电是多能互补工程的重要组成部分，肩负着为风电、光伏等间歇性电源调峰的重任。光热电站于 2019 年 9 月 19 日成功一次并网 [21]，2020 年 8 月 27 日完成了 120 小时可靠性运行。

2021 年 5 月 14 日，光热电站完成涉网联合试验。在涉网试验期间，机组实现了 5 天连续运行，累计运行 120.57 小时，累计发电量 309.35 万 kWh，平均负荷率 62%，最大负荷 51MW，单日最大发电量 76.497 万 kWh[22]。2021 年 6 月 4 日单日发电量 109.62 万 kWh，创历史最高。2021 年 11 月，电站月度发电量达到 1067.3775 万 kWh。鲁能海西州多能互补光热电站 2021 年 5 月 ~11 月发电量情况如下图所示。



图：鲁能格尔木多能互补光热电站发电量情况

四、我国太阳能热发电产业链情况

4.1 太阳能热发电产业链体系和特点

太阳能热发电是将太阳能转换为热能，通过热功转换过程发电的系统。太阳能热发电产业链体系可分为研发、设计、制造、安装、运维等环节。

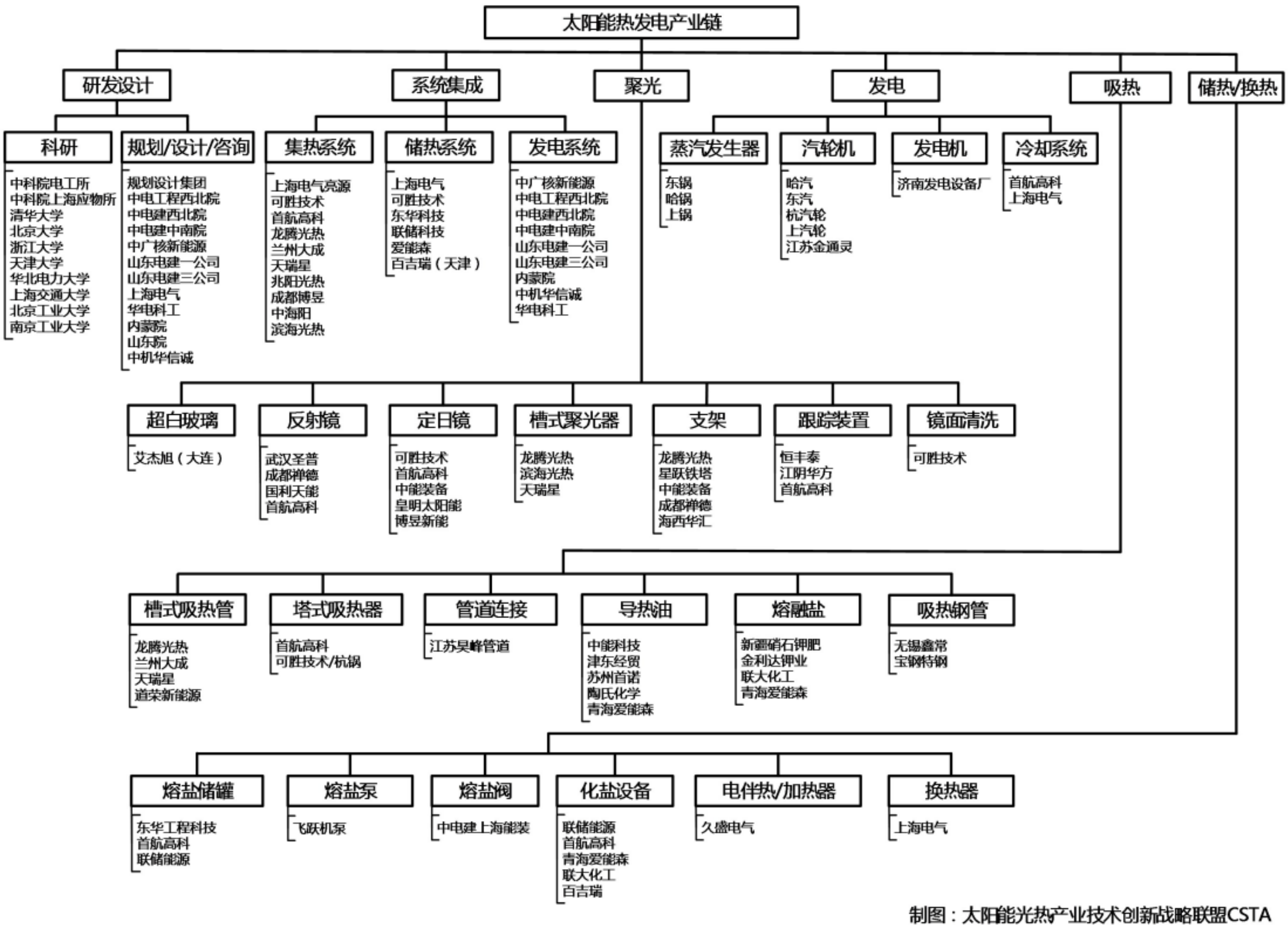
其中，研发体系主要包括相关大、专院校，各大研究院所及各企业的研究部门；设计体系主要包括从事发电行业的设计单位，新能源和可再生能源的设计单位，具有相应资质的设计单位；制造体系主要包括各大制造企业（国企、民企、合资企业），大、专院校、研究院所的生产单位等；安装体系主要包括专业电力安装单位和工业建设安装单位 [23]。

我国太阳能热发电产业链的主要特点是以易于获得、安全且丰富的原材料为出发点和起点，如钢铁、水泥、超白玻璃、高温吸热及传储热材料（导热油、熔融盐）、保温材料等，带动了自主知识产权的产业链核心装备的发展，如反射镜、定日镜、塔式吸热器、槽式聚光器、槽式吸热管、高精度传动箱、支架、就地控制器、储热装置 / 系统、滑压汽轮机等。在国家第一批光热发电示范项目中，设备、材料国产化率超过 90%，技术及装备的可靠性和先进性在电站投运后得到有效验证 [24]。在青海中控德令哈 50MW 塔式光热发电项目中，设备和材料国产化率已达到 95% 以上 [25]。

4.2 我国太阳能热发电产业链主要代表性企事业单位

据太阳能光热产业技术创新战略联盟不完全统计，2021 年，我国从事太阳能热发电相关产业链产品和服务的企事业单位数量近 550 家；其中，太阳能热发电行业特有的聚光、吸热、传储热系统相关从业企业数量约 320 家，约占目前太阳能热发电行业相关企业总数的 60%，以聚光领域从业企业数量最多，约 170 家 [26]。我国太阳能热发电产业链的主要环节以及代表性企事业单位如下图所示 [2]。

2 特别感谢中科院电工所多学科交叉研究中心常春博士绘制此图。



图：我国太阳能热发电产业链的主要环节及代表性企事业单位

4.3 我国太阳能热发电关键部件装备 / 材料制造产能

2021 年，由于没有新增开工建设的太阳能热发电项目，因此装备制造与产能情况与 2020 年调研情况基本相同。根据太阳能光热产业技术创新战略联盟《中国太阳能热发电及采暖行业蓝皮书 2020》显示，我国已经建立了数条太阳能热发电专用的部件和装备生产线，具备了支撑太阳能热发电大规模发展的供应能力，年供货量可满足 2~3GW 太阳能热发电项目装机。

据太阳能光热联盟不完全统计，我国已经拥有太阳能超白玻璃原片生产线 5 条，年产能 9200 万平米；槽式玻璃反射镜生产线 6 条，年产能 2350 万平米；平面镜生产线 6 条，年产能 3360 万平米；槽式真空吸热管生产线 10 条，年产能 100 万支；跟踪驱动装置生产线 21 条，年产能 2 万套；导热油生产线 9 条，年产能 50 万吨；熔融盐生产线 15 条，年产能 60 万吨；塔式定日镜和槽式集热器组装生产线各 19 条。我国太阳能热发电关键部件 / 材料生产线情况如下表所示。

表：我国太阳能热发电关键部件 / 材料生产线情况

关键部件生产线	数量（条）	产能
太阳能超白玻璃原片	5	9200 万平米
槽式玻璃反射镜	6	2350 万平米

平面镜	6	3360 万平米
槽式真空吸热管	10	100 万支
跟踪驱动装置	21	2 万套
导热油	9	50 万吨
熔融盐	15	60 万吨
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA		

其中，AGC 集团艾杰旭特种玻璃（大连）有限公司的太阳能超白玻璃年产能最大，产能设计为 700 吨 / 天，年产光热发电用太阳能超白玻璃可达 2GW。目前已经为国内太阳能光热发电以及太阳能热利用项目供应 556MW 的太阳能超白玻璃，国外供货数量达到 473MW，总计约 1.03GW。艾杰旭特种玻璃（大连）有限公司近 6 年太阳能超白玻璃原片销售情况如下图所示。

图：艾杰旭特种玻璃（大连）近几年太阳能超白玻璃原片销售情况

4.4 我国太阳能热发电关键部件销售应用情况[3]

太阳能热发电关键部件的生产销售和太阳能热发电项目的建设密切相关。目前我国共有 8 座规模化太阳能热发电项目并网发电，每个项目的使用情况与设备部件供应商的出货量基本吻合，可依据项目的使用情况看出关键部件的销售情况。

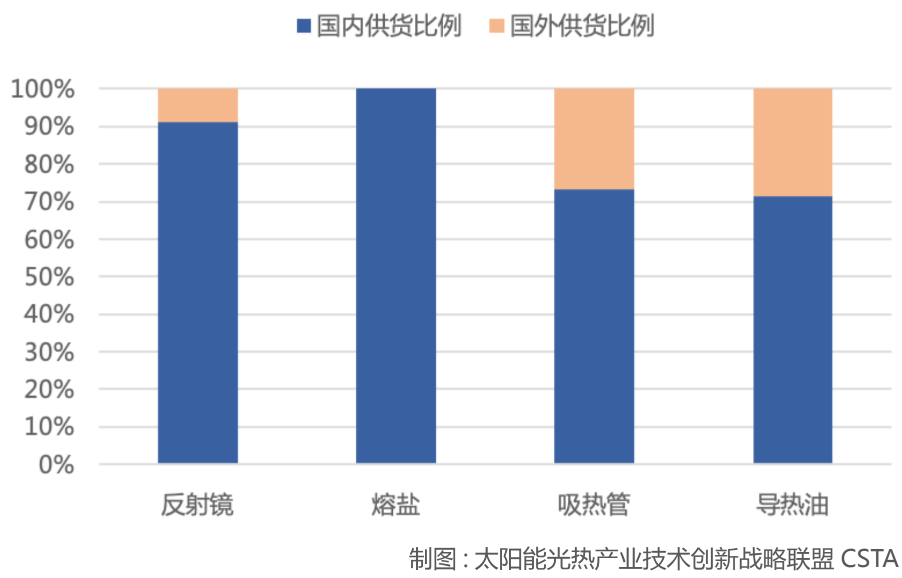
根据太阳能光热产业技术创新战略联盟统计，2018~2020 年期间投产的 8 座太阳能热发电站共使用反射镜 6912922 平方米，熔盐 214523 吨，真空吸热管 102300 支，导热油 10500 吨（下表中按照储能时长排序）。正在建设的玉门鑫能塔式电站以及阿克塞熔盐槽式电站的部件用量未计入。

3 特别感谢李志清、蒋新锋、杨继宏、俞科、张磊等对本节内容的贡献。

表：我国已并网发电的 8 座商业化太阳能光热电站关键设备使用情况

项目简称	储能时长（小时）	反射镜面积（平方米）	熔盐用量（吨）	吸热管用量（支）	导热油用量（吨）
大成敦煌 50MW 线菲项目	15	1270000	24000	22000	/
中能建哈密 50MW 塔式项目	13	719902	16000	/	/
鲁能格尔木 50MW 塔式项目	12	610000	16000	/	/
首航敦煌 100MW 塔式项目	11	1400000	30000	/	/
乌拉特 100MW 槽式项目	10	1150000	73130	52800	7500
中广核德令哈 50MW 槽式项目	9	620000	36000	27500	2000
中控德令哈 50MW 塔式项目	7	542700	10093	/	/
中电建共和 50MW 塔式项目	6	600320	9300		
小计		6912922	214523	102300	10500
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA					

从国别来看，反射镜供货方主要以国内企业为主，在投运的太阳能热发电示范项目总使用量中占比约 91.03%；熔盐供货商均为国内企业；在 3 座线聚焦型太阳能热发电项目中（槽式和线菲），吸热管国内供货占比 73.12%；导热油国内供货比例占 71.43%。详见下图。

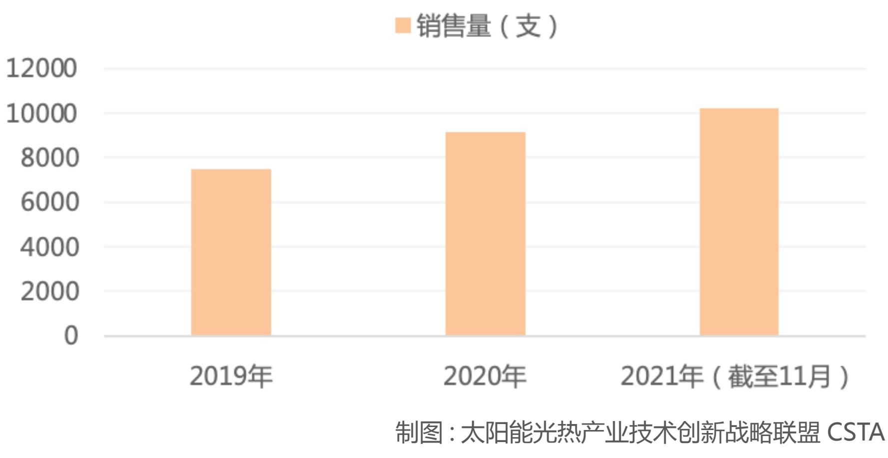


图：太阳能热发电示范项目关键部件材料国内外供货比例情况

需要特别说明的是，上述四项太阳能热发电用材料和部件的国外供货均发生在中广核德令哈 50MW 槽式光热发电项目中。该项目是我国最早建设的大容量太阳能热发电项目，采用了 1.5 亿美元的亚洲开发银行（ADB）低息贷款；在面向全球的公开招标中，对于供货商的经验业绩做了较高要求，由于我国属于首次进行大规模的太阳能热发电技术示范，因此在一些产品采购招标中国内企业没能参与。

例如，按照 2015 年对于导热油的采购招标要求，投标人应拥有至少两个槽式光热发电、化工厂或石油化学工厂项目的联苯—联苯醚导热油产品供货经验，每个项目供货量需大于 1000 吨，在上述项目中导热油的连续正常运行温度范围应在 280℃～ 400℃之间，在正常热循环周期中导热油的最高运行温度应达到 393℃～ 400℃。同时，上述项目必须商业化运行 2 年以上，并提供项目业主出具的认证证书复印件。国内联苯 - 联苯醚导热油生产企业虽然原料及成品工艺都比较成熟，但在国内首次应用的情况下，很难满足采购招标中关于经验的要求。因此共有首诺、陶氏化学以及美国万达三家国外导热油企业参与投标。而在熔盐产品的采购招标中，由于没有提出光热电站应用的经验业绩要求（只要求产品制造商必须拥有 ISO9001 质量管理体系认证证书；投标方和制造商必须获得商品所在地授权单位或机构签发的危险化学品安全生产许可证），而熔盐为硝酸钾和硝酸钠的晶体混合物，这就为国内大型硝酸钠和硝酸钾制造商参与创造了有利条件。新疆硝石钾肥有限公司（硝酸钠）、文通钾盐集团有限公司、江西金利达钾业有限责任公司和 SQM（北京）贸易有限公司（硝酸钾）4 家企业参与了投标；最终，新疆硝石和文通钾盐分别中标硝酸钠和硝酸钾产品采购。

对于槽式吸热管和反射镜采购，中广核德令哈光热项目要求投标商在反射镜业绩方面要具备 200 万平方米的供货业绩，同时供货电站的运营时间需超过两年；吸热管方面则要求具备 4 万支的供应业绩，且供货电站的运营时间超过 5 年。在投标人的资格要求下，反射镜仅 Rioglass 和 Flabeg 两家国外厂商具备竞标条件，吸热管则仅有 Rioglass 公司满足要求。然而，随着近几年国内外太阳能热发电项目的建设，我国槽式吸热管生产企业出货量逐步增加，实现了在国内外商业化槽式电站中的规模化应用。例如，截至目前，常州龙腾光热科技股份有限公司累计实现国内供货近 60000 支，国外供货近 10000 支。北京天瑞星光热技术有限公司近三年吸热管销售量超过 26800 支，如下图所示。



图：北京天瑞星公司近三年槽式吸热管销售情况

对于槽式电站而言，集热器离不开柔性连接，其主要功能为：真空集热管和冷热汇管连接；补偿真空集热管的轴向位移；补偿集热器方位角旋转位移。以上三项功能需要同时实现，并达到较长的使用寿命，因此对产品的性能要求比较高。

国内外柔性连接主要有三种结构形式：球形接头组合形式、平面旋转接头金属软管组合形式、单根金属软管连接形式。在已经投运的中广核德令哈和乌拉特槽式电站中，柔性连接均由国外公司提供。目前，我国企业研制的旋转接头金属软管组件也实现了工程验证应用，累计应用数量达到 1040 套。

五、我国太阳能热发电技术研发项目情况

5.1“宽波段平面超表面太阳能聚光器及其集热系统”项目

2021 年 4 月，国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项“宽波段平面超表面太阳能聚光器及其集热系统”项目启动。该项目牵头单位为武汉理工大学，参加单位包括中国科学院电工研究所、复旦大学、厦门大学、中国科学技术大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。其中，武汉理工大学官建国教授为项目首席兼课题二负责人，复旦大学孙树林研究员为课题一负责人，中科院电工所白凤武研究员为课题三负责人。项目围绕宽波段广角度平面超表面太阳能聚光器及其集热系统的设计方法和制造技术的关键科学问题，借助平面超表面的电磁耦合效应发展免跟踪、低成本的广角度宽频段太阳辐射平面聚光的变革性技术，旨在解决目前通用的曲面聚光器需要高精度支架和复杂的太阳跟踪装置导致太阳能光热发电成本难以降低的问题。项目技术指标先进、完成难度大，着眼于颠覆性技术突破，对推动太阳能热发电领域的发展意义重大。

5.2 “太阳能光热发电及热利用关键技术标准研究”项目

2021 年，国家重点研发计划“太阳能光热发电及热利用关键技术标准研究”项目完成全部研究工作。该项目是 2017 年度国家重点研发计划“国家质量基础（NQI）的共性技术研究与应用”的重点专项立项项目，由中国能源建设集团有限公司牵头，中国标准化研究院、中国电力企业联合会、中国大唐新能源股份有限公司等单位共同承担，执行期限为 2017 年 7 月～ 2020 年 12 月。项目下设“太阳能高温热发电站关键技术标准研究”、“中温太阳能热利用关键技术标准研究”两个子课题，研究建立太阳能光热发电与热利用标准体系以及有关的技术条件、检测方法、评价方法、性能试验、设计规范等规程、标准。

5.3“第四代光热发电高温固体颗粒吸热器研究”项目

该项目为北京市科委资助的新能源前沿技术研究项目（原始创新类），实施周期为 2018 年 1 月至 2021 年 6 月。承担单位为中国科学院电工研究所。课题的主要研究工作包括：

1）研究了 3 种固体吸热器，包括固体颗粒，球流，柱体等。吸热器研究采用了室内冷态实验，室外塔式热态实验两个方面。在理论方面通过建立能流密度与得热量之间的关系分析影响吸热器热效率的因素，设计并制作了吸热器。其中球流和柱体吸热器温度达到 1100℃，颗粒吸热器最高达到 845℃，热功率达到 415kW。对于颗粒吸热器，课题从理论和实验研究了颗粒热物性，尺寸等对颗粒流动和吸热性能的影响，进行了一些列冷态和室内外热态实验，所研制的 MW 级颗粒吸热器日工作最长时间达到 9 小时，达到了较高的性能。

2）研究了太阳能颗粒集热系统得热过程。建立定日镜场的聚集能流动态模型，石英管颗粒吸热器吸热传热动态模型，基于 TRNSYS 搭建了颗粒集热器动态过程仿真平台，可对太阳能辐照，定日镜投入工作台数及面积，环境气象条件，颗粒流速等变化对集热性能的影响进行动态计算，编制了相应的仿真软件。基于以上模型分析，设计了吸热器系统，包括吸热器，进料系统，储热系统，转运机构的工艺参数，设计了控制系统并提出了运行方式等。

3）基于对颗粒吸热器大量实验测试的基础上，对包括颗粒吸热器系统的性能测试和评价方法进行

了研究，编制了相应规范，并设计制作了相应的测试仪器及数据处理软件。

4）对 800℃吸热器涉及到的辅机设备，包括高温提升机，高温储热罐，吸热器上下物料系统控制运行模式进行了研究，结合工业界开发了相应的产品。通过应用，证明了辅机设备工作情况良好。本课题开发的 800℃高温颗粒阀门，高温颗粒提升机等填补了国内空白，为今后高温工业，特别是高温储热利用提供了装备基础。

5.4 “第四代光热发电超临界二氧化碳换热器研究”项目

第四代太阳能热发电技术以颗粒为吸热介质，以超临界 CO_2 为发电工质，具有稳定性高、设备体积小、造价低廉以及效率高的优势。高温颗粒与超临界 CO_2 的高效换热成为实现下一代太阳能热发电的关键技术之一。在北京市科委的资助下（新能源前沿技术研究项目 - 原始创新类），中国科学院电工研究所和清华大学通过对超临界二氧化碳 - 高温太阳能吸热介质换热器关键技术的研究，解决了该类换热器的设计难题，研制超临界二氧化碳作为换热介质的换热器，为第四代光热发电技术中实现超临界二氧化碳布雷顿循环奠定坚实技术基础。研究指标达到世界先进水平，填补了国内技术空白，并形成了超临界二氧化碳—高温太阳能吸热介质换热器设计方法和技术条件，对第四代太阳能发电技术的发展具有重要意义。

项目实施周期为 2018 年 1 月至 2021 年 6 月。主要研究成果如下：

1）设计并搭建了 20 kW 颗粒 / 超临界 CO_2 小试换热实验系统。开展了流化床流化特性实验研究，获得了不同床层高度、表观气速下的颗粒流化特征。

2）开展了换热系统研究，总结了单管、管束以及不同管排排列方式条件下颗粒侧的传热模型，建立了考虑包括系统传热、颗粒侧换热、超临界 CO_2 侧换热以及流化风换热在内的颗粒 / 超临界 CO_2 换热系统模型。针对系统操作中出现或可能出现的问题，提出了具体的解决方法和应对措施。开展了低气速下流化床流动换热模拟研究。研究成果可为改进颗粒 / 超临界 CO_2 流化床换热技术提供理论依据，对发展高效太阳能热发电技术也有重要意义。

3）搭建了 1MW 颗粒 / 超临界 CO_2 换热样机试验系统。进行了流化床换热器的调试运行。建立了颗粒 / 超临界 CO_2 换热器热性能计算与预测方法，利用该方法能够较准确获得换热器性能参数。在颗粒侧满足约定工况条件下，该换热器可以实现超临界 CO_2 出口温度 550℃以上，系统压力高于 10MPa，1MWth 以上热功率的指标。

5.5 “光热发电用耐高温熔盐特种合金研制与应用”项目

2021 年 12 月 13 日，由中国科学院金属研究所牵头承担的“光热发电用耐高温熔盐特种合金研制与应用”项目列入国家重点研发计划“先进结构与复合材料”重点专项 2021 年度拟立项项目公示清单。项目实施周期 4 年。根据申报南，该项目研究内容具体包含：针对太阳能光热发电产业低成本高效发电可持续发展需求，以下一代低成本高效超临界二氧化碳光热发电系统中耐高温氯化物混合熔盐特种金属材料及其制造技术为研究对象，研究耐高温不锈钢、高温合金板材及其焊接界面在高温氯化物、硝酸盐中的腐蚀机理和服役寿命预测技术，研究满足氯化物和硝酸盐熔盐发电系统用的耐高温不锈钢、高温合金板材成分和组织设计及其批量制造技术，开发耐高温熔盐不锈钢、高温合金成型和焊接行为及其先进制备技术，发展高温合金长寿命高吸收率吸热涂层，实现高性能不锈钢、高温合金产品开发及应用示范。

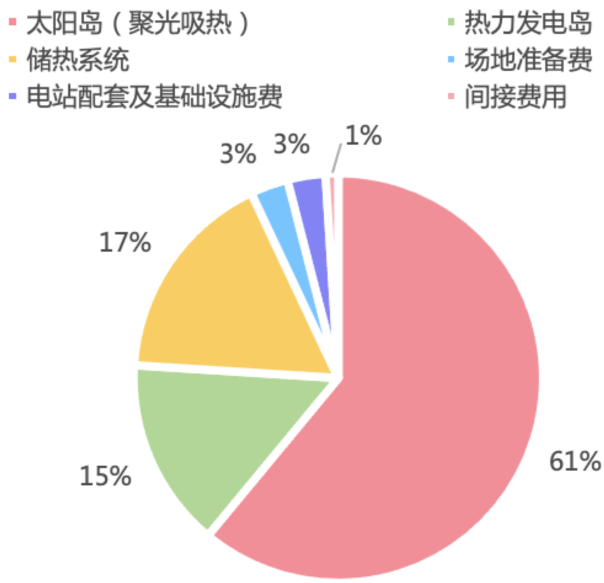
六、太阳能光热电站投资成本

6.1 塔式光热电站建造成本及构成

6.1.1 7 小时储热 50MW 塔式光热电站投资组成

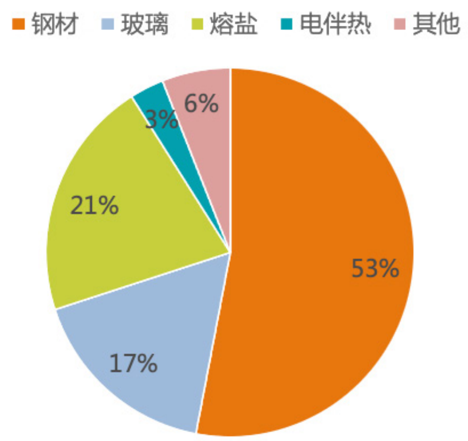
太阳能热发电是技术和资金双密集型行业，产业链长，涉及学科多，系统复杂；项目的投资受装机容量规模、储热时间影响较大。李心、赵晓辉等在《塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析》中，按系统功能将 50MW 塔式太阳能热发电建造成本分为太阳岛成本、热力发电岛成本、储热系统成本、场地准备费、电站配套及基础设施费和间接费用，各部分具体占比如下图所示。

太阳岛是塔式太阳能热发电站完成光—热能量转换的系统，主要包括聚光系统和吸热系统；其中，定日镜成本约占太阳岛成本的 75%，镜场控制系统成本占 10%，吸热器成本占 6%，吸热塔成本占 9%。热力发电岛主要包括热力系统及辅机设备、水循环、水处理系统、换热设备、热工控制系统、电气系统、电网接入系统及仪表阀门管路等。[25]



图：7 小时储热 50MW 塔式太阳光热电站投资组成

以可胜技术与浙江中光新能源联合投资的开发青海中控德令哈 50MW 塔式太阳能热发电示范项目为例，从制造角度划分，太阳能热发电行业专有的聚光、吸热、储热子系统投资成本结构中，材料成本占比 <30%，制造加工成本占比 >50%，包装运输、安装等成本 <20%。其中，聚光、吸热、储热子系统中原材料的成本构成比例如下图所示：钢材约占 53%、熔盐约占 21%，玻璃约占 17%[27]。



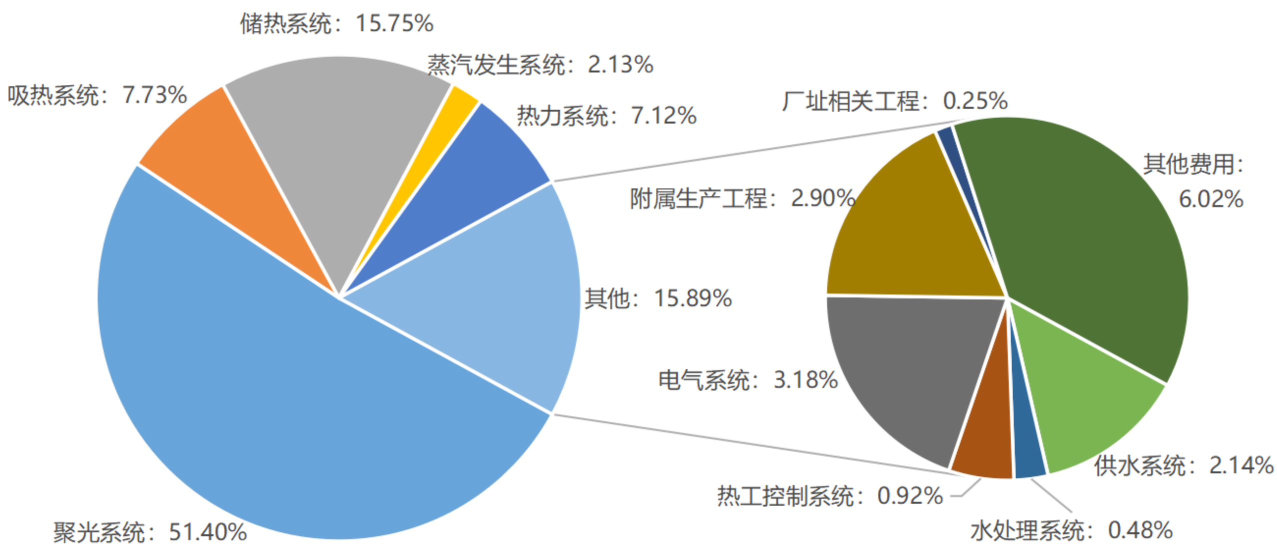
制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：聚光吸热储热子系统中原材料的成本构成比例

青海中控德令哈 50MW 塔式太阳能热发电示范项目占地 3.3 平方公里，吸热塔高 200 米，定日镜 27000 多台，储热时长 7 小时，共消耗约 55 万平方米玻璃，2 万吨钢材，1 万吨熔盐，3 万吨水泥 [29]。

6.1.2 12 小时储热 100MW 塔式光热电站投资组成

根据太阳能光热产业技术创新战略联盟委托浙江可胜技术股份有限公司编写的《太阳能热发电成本下降路径分析》报告，12 小时储热 100MW 塔式太阳能热发电站的总投资在 25~30 亿元之间。按照功能划分，电站投资主要发生在集热系统（聚光系统、吸热系统），储换热系统（包括储热系统、蒸汽发生系统），热力系统，供水系统，水处理系统，热工控制系统电气系统，附属生产工程以及厂址相关工程及其他费用。从下图可以看出：聚光、吸热、储换热系统约占整个电站成本的 77% 左右，是决定太阳能光热发电站造价高低最重要的因素。



制图：浙江可胜技术股份有限公司

图：12 小时储热 100MW 塔式太阳能光热电站投资组成

需要说明的是，随着电站规模变大，或储能时间增加（根据不同的边界条件，储能时间会有个最优值），定日镜数量会相应增加，这样太阳岛成本所占的投资成本比例也会增加；但电站年利用小时数和所发电量都会有所提升，因此电站整体经济性将会提高，发电成本会有所下降。

6.1.3 定日镜成本构成

根据统计数据，定日镜场的成本约占整个塔式电站投资成本的 40%~50%。而定日镜场中每一个单台定日镜主要由支撑结构、反射镜单元、驱动装置、控制系统等组成；其中，传动装置和反射镜单位在定日镜总成本中所占比例较大，约占 50%~60%。单台定日镜成本构成及比例如下表所示。[30]

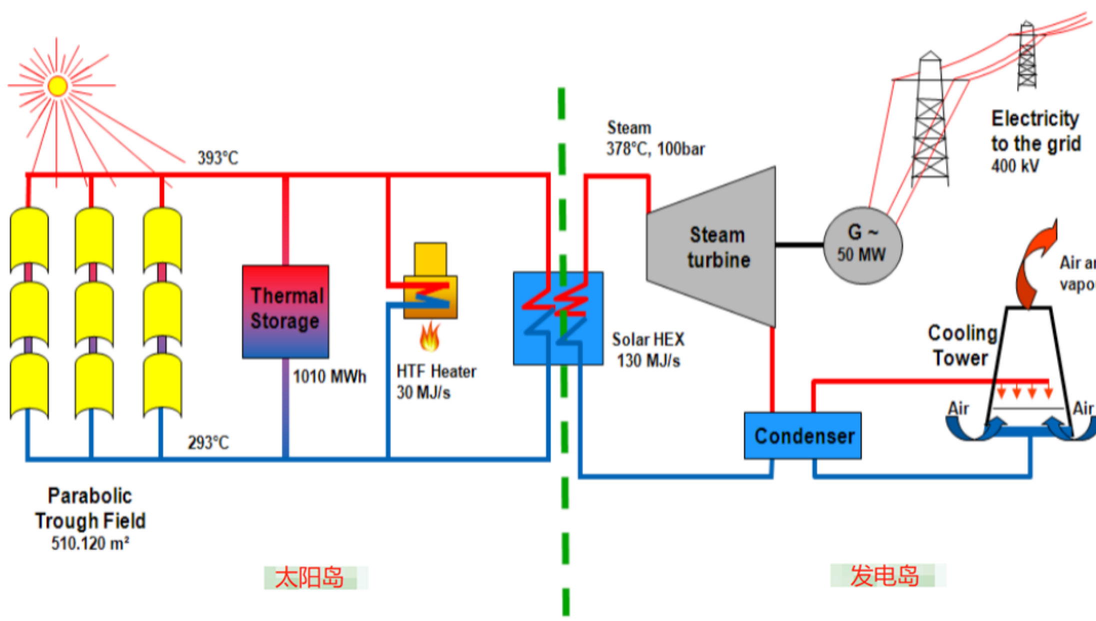
表：定日镜成本构成

主要部件	所占成本比例
驱动装置（水平和俯仰）	30%~35%
反射镜单元	25%~30%
支撑结构	15%~20%
立柱和基础	10%~15%
控制系统	5%~10%
安装和调试费用	10%~15%

6.2 槽式太阳能光热电站建设成本及构成

6.2.1 全球首座 7.5 小时储热 50MW 槽式电站投资构成

槽式技术是全球最早实现商业化运行的太阳能热发电技术。西班牙 Andasol 1 号是全球首座带有长时间储热系统的槽式太阳能热发电站，其投资成本构成具有典型性。Andasol 1 号槽式光热电站位于西班牙南部的温暖地区，装机容量 50MW，于 2009 年 3 月投运，其系统流程图及项目信息见下 [30]。

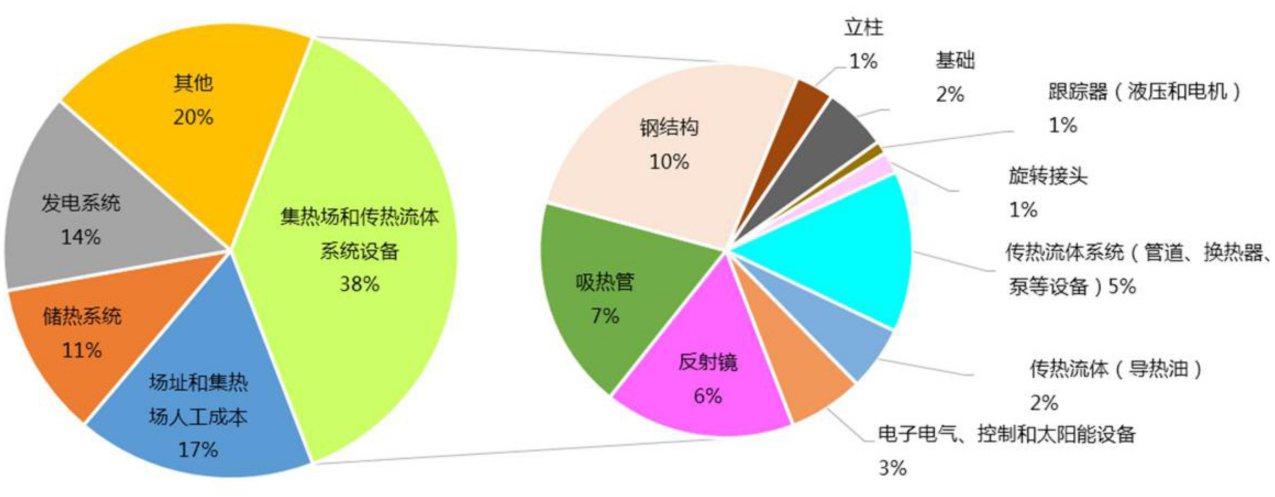


图：Andasol 1 号槽式太阳能热发电站系统流程图

表： Andasol 1 号 50MW 槽式光热电站主要参数

类别	说明
法向直接辐射值（DNI）	2136kWh/m^2/ 年
额定容量	50MW
聚光场采光口总面积	51 万平方米（每个聚光器开口 5.677 米，长 144 米，采光口面积 817 平方米；聚光器总数量 624 个）
集热器型号	SKAL ET-150（反射镜型号 RP3）
回路数量	156 个（每个回路由 4 个聚光器组成，长度 576 米；回路总长度 89,856 米）
吸热管数量	11,232 支（吸热管型号 PTR 70，UVAC 2008）
传热介质	导热油 （镜场入口温度 293℃、出口温度 393℃）
储热系统	双罐间接熔盐储热，储热罐高 14 米，直径 36 米，熔盐用量 2.85 万吨；储热容量 1010MWh，可实现汽轮机满负荷运行 7.5 小时
汽轮机效率	38.1%（西门子 SST-700）
年均光—电效率	16%（实测）
总投资	3.1 亿欧元（2008 年）
上网电价	27 欧分 /kWh（25 年）
年设计发电量	179GWh（年运行小时数 3580 小时）
度电成本（LCOE）	$ 0.29/kWh（2020 年）

根据 Ernst & Young 和 Fraunhofer 的报告，该电站集热场和传热流体系统的设备成本在电站总投资中占比最高，约为 39%（其中，钢结构、吸热管和反射镜的总投资占比分别为 10.7%、7.1% 和 6.4%）；储热系统约占总投资的 10.56%（熔盐材料占比 5.1%），储热系统成本约 50 美元 /kWh；项目总承包成本（其他类别）占总投资的 7.7%。另外，场址准备和集热场人工成本占比达 17.1%[32]。



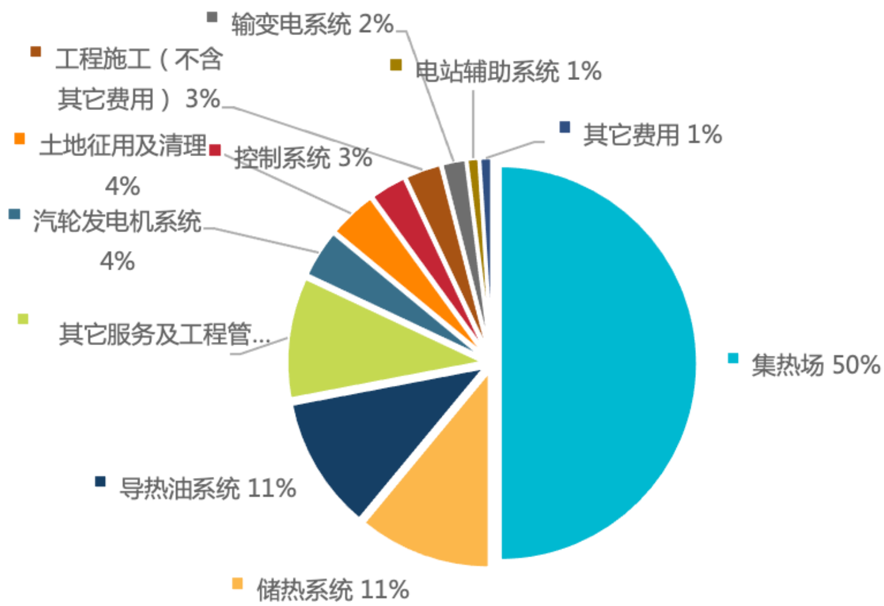
制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：全球首座 7.5 小时储热 50MW 槽式电站投资成本构成

6.2.2 我国 4 小时储热 50MW 槽式电站投资构成

2013 年，受国家能源局委托，太阳能光热产业技术创新战略联盟等组织开展了《中国太阳能热发电产业政策研究报告》的编写工作。其中，联合克林顿基金会对我国的太阳能热发电项目成本进行了分析[33]，选取的案例电站为我国第一个太阳能热发电工程项目——鄂尔多斯 50MW 槽式太阳能热发电电站，该电站于 2011 年完成了特许权招标。

案例电站当地法向直射辐射值（DNI）1900kWh/m^2/ 年，工程初始投资包括太阳能集热、储热、换热、热力发电及其他辅助系统和设施（如采暖、生产办公设施等），不包括电网基础设施建设。案例电站一次性初投资约 14.56 亿元，其中，集热场设备成本（主要由聚光器、真空吸热管、就地控制器和安装费等构成）占整个电站建设成本的 50%；储热系统和导热油系统占总投资的 22%，主要是熔盐与储罐的投资成本；工程设计与施工建设成本占总投资成本的 10% 左右；汽轮发电机组等动力部分占总成本的 4% 左右。该案例电站投资组成情况如下图所示。

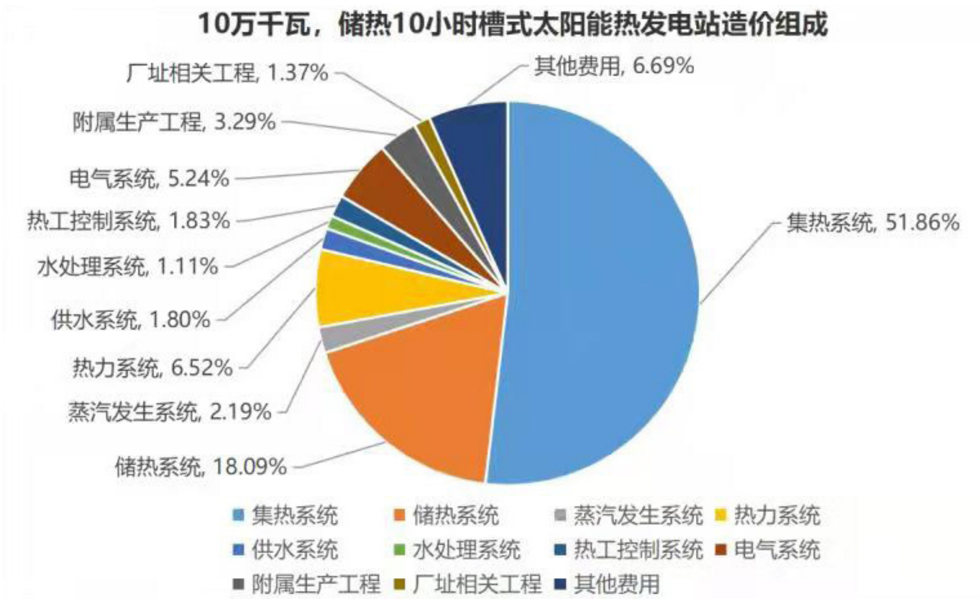


制图：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA

图：我国内蒙古 4 小时储热 50MW 导热油槽式电站投资组成

6.2.3 我国 10 小时储热 100MW 槽式电站投资构成

下图是我国某装机 10 万千瓦储热 10 小时典型槽式光热电站的投资构成图。该电站总投资约 28 亿元，主要由集热系统、蒸汽发生系统、储热系统、热力系统、供水系统、水处理系统、热工控制系统、电气系统、附属生产工程、厂址相关工程及其他组成。其中，集热系统占比约 52%，储热系统占比约 18%。

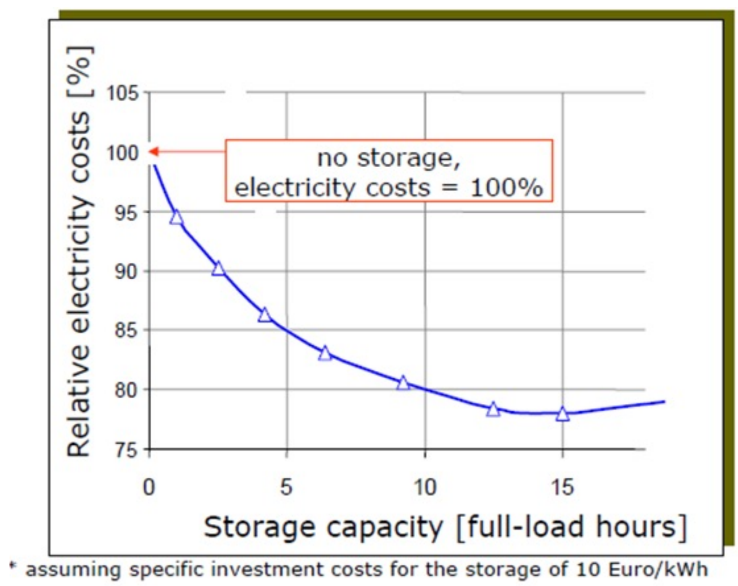


制图：内蒙古中核龙腾新能源有限公司

图：我国 10 小时储热 100MW 导热油槽式电站投资组成

6.3 储能时长和度电成本

从系统容量配置角度，太阳能热发电站的装机容量、储能时长和镜场面积与电站的经济性密切相关。一般来说，为了储存更长时间的能量，就需要增加聚光场的面积，这种情况下一次投资的成本就会增加；然而由于储能时长的增加，电站发电量将提高，度电成本则会下降。但针对不同的气象条件、可用土地面积和电站设计等存在一个最优化的储热值。



图：太阳能热发电储能时长与电力成本的关系

根据德国宇航中心（DLR）早期的研究结果（如上图所示），当储能时长超过 15 小时，相对于没有储能的太阳能热发电 100% 的电力成本而言，度电成本将呈上升趋势 [34]。因此，需要根据实际情况对储能时长进行优化。

七、太阳能热发电站全生命周期碳排放

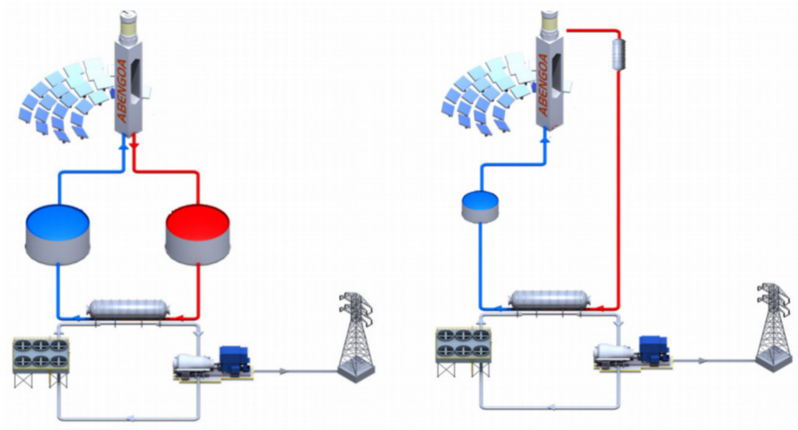
生命周期评估（Life Cycle Assessment，简称 LCA）是一项重要环境管理工具。据 MBA 智库据 . 百科词条，生命周期是指某一产品（或服务）从取得原材料，经生产、使用直至废弃的整个过程，即从摇篮到坟墓的过程。按 ISO14040 的定义，生命周期评估是用于评估与某一产品（或服务）相关的环境因素和潜在影响的方法，它是通过编制某一系统相关投入与产出的清单记录，评估与这些投入、产出有关的潜在环境影响，根据生命周期评估研究的目标解释清单记录和环境影响的分析结果来进行的。为确保我国实现碳达峰、碳中和目标，生命周期全过程的碳排放核算至关重要。

2021 年，西班牙莱里达大学联合西班牙 Abengoa Energia 公司（开发建设并运营全球较多的太阳能光热电站的企业）对塔式太阳能热发电站（带储热和不带储热两种配置）进行了全生命周期分析 [35]。研究结果发现：带 17.5 小时储能的 110MW 塔式太阳能光热电站全生命周期（30 年）每千瓦时净发电量的气候变化指标为 9.8 gCO_2 当量 /kWh。

在研究中，案例电站容量为 110MW，运行寿命按照 30 年，以能够提供基础负荷的配置设计，其中带储能的电站储能时长为 17.5 小时。功能单位为“并网 1 度电”，包括塔式光热电站的全部部件，评估了从建设、运行到拆除全周期的环境影响。全生命周期分析评估的塔式光热的特征如下表所示。

表：全生命周期评估的塔式太阳能热发电站特征

特征	无储热	有储热	单位
容量，总	120.8	120.8	MW
容量，净	110.0	110.0	MW
定日镜数量	3300	10600	台
镜场开口面积	0.457	1.469	km^2
塔高	140	240	m
吸热器功率等级	266	690	MW
直射辐射	3332	3332	$kWh/(m^2·年)$
传热介质	5300	56160	公吨
储热容量	-	5330	MWhth
年净并网电量	274.61	776.24	GWh
年厂用电量	18.5	0.9	GWh
年用水量	23100	64250	m^3
项目用地类型	荒漠	荒漠	



图：带（左）和不带（右）储能系统的塔式光热电站设备配置

两座塔式电站在制造阶段的清单数据被分为 9 组，包括：镜场区、吸热器系统、塔、蒸汽发生系统、储热 & 传热流体系统、基础及辅助建筑、接线、管道（吸热器系统管道以外的）。带有 17.5 小时储热以及不带储热的容量 110MW 塔式电站制造清单中使用的材料和重量如下表所示。

表：110MW 塔式电站制造清单中使用的材料和重量

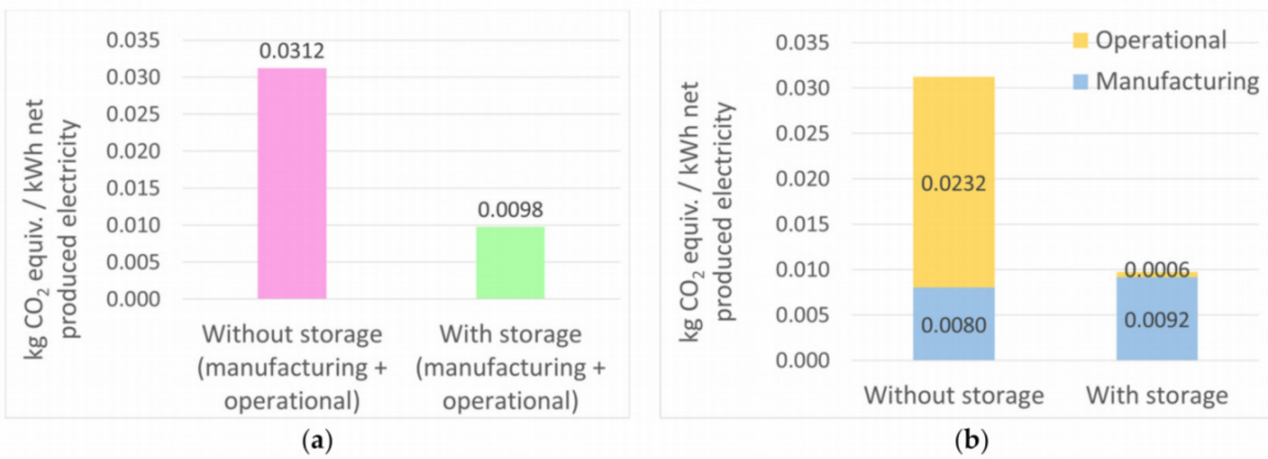
部 件	塔式电站 - 无储热	塔式电站 - 有储热	单位
镜场区部件			
镀膜平板玻璃	$3.3\cdot10^{3}$	$1.1\cdot10^{4}$	吨
低合金钢	$1.1\cdot10^{4}$	$3.6\cdot10^{4}$	吨
镀锌件	$8.5\cdot10^{4}$	$2.7\cdot10^{5}$	平方米
非合金钢	$9.6\cdot10^{2}$	$3.1\cdot10^{3}$	吨
润滑油	$1.8\cdot10^{2}$	$5.7\cdot10^{2}$	吨
混凝土	$3.0\cdot10^{4}$	$9.5\cdot10^{4}$	立方米
硅胶产品	$3.3\cdot10^{1}$	$1.1\cdot10^{2}$	吨
用于控制单元的电子设备	$4.6\cdot10^{1}$	$1.5\cdot10^{2}$	吨
吸热器系统			
钢筋	$1.4\cdot10^{3}$	$1.7\cdot10^{3}$	吨
钢，铬钢 18/8，热轧	$1.6\cdot10^{2}$	$2.5\cdot10^{2}$	吨
有机硅涂料	$3\cdot10^{-1}$	$7\cdot10^{-1}$	吨
基本的耐火材料	$1.0\cdot10^{2}$	$2.6\cdot10^{2}$	吨
石棉	$1.2\cdot10^{1}$	$2.5\cdot10^{1}$	吨
塔			
混凝土	$1.1\cdot10^{4}$	$1.9\cdot10^{4}$	立方米
钢筋	$2.1\cdot10^{3}$	$3.6\cdot10^{3}$	吨
液压挖掘机	$7.5\cdot10^{3}$	$1.3\cdot10^{4}$	立方米

部 件	塔式电站 - 无储热	塔式电站 - 有储热	单位
蒸汽发生系统			
钢筋	$8.2\cdot10^{1}$	$8.2\cdot10^{1}$	吨
低合金钢	$1.0\cdot10^{2}$	$1.0\cdot10^{2}$	吨
钢，铬钢 18/8，热轧	$3.5\cdot10^{2}$	$3.5\cdot10^{2}$	吨
石棉	$8.4\cdot10^{-2}$	$8.4\cdot10^{-2}$	吨
玻璃纤维	$2.3\cdot10^{0}$	$2.3\cdot10^{0}$	吨
发电动力模块（包括动力循环组件和水箱）			
钢，铬钢 18/8，热轧	$3.2\cdot10^{2}$	$3.7\cdot10^{2}$	吨
钢筋	$1.8\cdot10^{2}$	$3.0\cdot10^{2}$	吨
低合金钢	$5.3\cdot10^{2}$	$5.3\cdot10^{2}$	吨
非合金钢	$7.5\cdot10^{1}$	$7.5\cdot10^{1}$	吨
铸铁	$6.0\cdot10^{-2}$	$6.0\cdot10^{-2}$	吨
铜	$1.8\cdot10^{1}$	$1.8\cdot10^{1}$	吨
铝	$6.2\cdot10^{1}$	$6.2\cdot10^{1}$	吨
石棉	$2\cdot10^{0}$	$2\cdot10^{0}$	吨
镀锌件	$6.1\cdot10^{3}$	$6.1\cdot10^{3}$	平方米
储热 & 传热流体系统			
太阳能用硝酸盐	$5.3\cdot10^{3}$	$5.6\cdot10^{4}$	吨
钢，铬钢 18/8，热轧	$4.3\cdot10^{1}$	$1.2\cdot10^{3}$	吨
钢筋	$4.8\cdot10^{2}$	$1.4\cdot10^{3}$	吨
石棉	$1.9\cdot10^{2}$	$5.8\cdot10^{2}$	吨
基础和辅助建筑			
混凝土	$3.2\cdot10^{3}$	$9.7\cdot10^{3}$	立方米
钢筋	$2.7\cdot10^{2}$	$8.0\cdot10^{2}$	吨
开挖，液压挖掘机	$2.5\cdot10^{3}$	$7.4\cdot10^{3}$	立方米
建筑，大厅	$1.6\cdot10^{3}$	$4.8\cdot10^{3}$	平方米
接线			
电缆	$7.8\cdot10^{2}$	$1.9\cdot10^{3}$	千米
管道（吸热器系统管道以外的）			
钢筋	$2.72\cdot10^{2}$	$2.9\cdot10^{2}$	吨
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA			

表：两座被分析塔式电站运行中的水电消费量

参数	塔式电站 - 无储热	塔式电站 - 有储热	单位
厂用电	$1.9 \cdot 10^{1}$	$9.0 \cdot 10^{-1}$	GWh/ 年
用水	$2.3 \cdot 10^{4}$	$7.8 \cdot 10^{4}$	立方米 / 年
加工化学品水处理	$2.4 \cdot 10^{4}$	$7.1 \cdot 10^{4}$	千克 / 年
制表：太阳能光热产业技术创新战略联盟 CSTA			

通过对两个塔式电站全生命周期的评估分析（其中没有配置储热系统的作为参考，另一个配置了储热系统），研究对比发现：带有储热的光热电站比不带储热的光热电站环境影响更小，使用 ReCiPe 指标评估每千瓦时净发电量的总影响时，无储能的塔式电站多产生了 46% 的影响。当考虑每千瓦时净发电量的气候变化指标时，带储能的塔式电站的环境影响为 9.8 gCO_2 当量 /kWh，没有储能的塔式电站的环境影响为 31 gCO_2 当量 /kWh。



（a）总体影响；（b）制造阶段和运营阶段的影响

图：IPCC 方法[4]：每千瓦时净发电量 GW20a 指标

研究发现，运营阶段的影响决定了两个电站之间的环境影响差异，并且这可以归因于没有储能的塔式电站所需的用电量源于电网。电站系统中产生更大影响的是聚光场、传热和储热流体系统。但是当使用 ReCiPe 指标时，接线的环境影响也较突出；而当使用气候变化指标时，必须考虑集热塔自身。

对于无论是否有储热的太阳能热发电站来说，在聚光场组成部件中，产生环境影响最高的是定日镜金属支架（无论是 ReCiPe 指标还是 IPCC 指标），其次是混凝土基础。尽管如此，如果采用气候变化指标，混凝土基础的影响更大；如果采用 ReCiPe 指标，金属部件的影响较多。在传热介质和储热系统（HTF

4 IPCC 方法由联合国气候变化委员会编写，提供了计算温室气体的详细方法，其研究区域主要为能源部门、工业部门、农林和土地利用变化部门、废弃物部门四大部门。不同部门计算方法不同，较为通用的计算公式是：碳排放量 = 活动数据 × 排放因子。来源：董雪，柯水发，国内外碳足迹计算方法、评估标准及研究进展 . 会议论文：绿色经济与林业发展论——第六届中国林业技术经济理论与实践论坛论文集，2012 年：97-104

& TES system）组成部件中，硝酸盐产生的影响最大。Ecoinvent 数据库中包含的硝酸盐来自矿山或通过化学反应合成。当盐的类型改变时，硝酸盐对太阳能热发电站 LCA 的影响也会发生变化。影响最小的盐是那些从矿山（比使用合成产品低 20%）提取的。

研究总结指出，储能对于太阳能光热电站至关重要，这不仅能够确保电力的可调度性，而且能够减少其全生命周期对环境的影响。

八、太阳能热发电发展面临的挑战及对策

太阳能热发电易于配置大容量、长周期、更安全低碳的储能系统，且采用常规汽轮发电机组，系统具有转动惯量和电网同步机特性，是一种灵活性调节电源，非常符合当前高比例不稳定可再生能源电源并网情境下电网安全稳定运行对快速调峰电源的迫切需要，能够为构建新能源为主体的新型电力系统奠定安全稳定的基础。目前太阳能热发电大规模发展面临的最主要的障碍是一次投资过大、发电成本相对较高。如何降低太阳能热发电成本是产业进一步发展面临的重大挑战。美国能源部近期在其官网公开表示，降低太阳能成本对于加快部署并实现美国拜登 - 哈里斯政府到 2035 年实现 100%清洁电力的气候目标至关重要。

根据国际能源署（IEA）曾公布的一种计算可再生能源系统发电成本的简化公式（如下所示），总投资、运维费用和电站年净发电量（年发电量减去厂用电量）是关键指标。降低太阳能热发电站的总投资和运维费用，同时提高太阳能热发电站的年净发电量是降低太阳能热发电成本的有效途径。初始投资成本的降低可通过各子系统和关键部件的成本来实现。太阳能热发电站的年发电量与系统年均效率、投射在镜场上的年太阳直射辐照量相关，在相同的太阳辐照条件下，系统年均效率越高，电站的年发电量就越多。年净发电量的提高可通过提高系统效率，降低厂用电来实现。[36]

$$LEC=\frac{crf\cdot K_{\mathrm{invest}}+K_{\mathrm{OM}}+K_{\mathrm{fuel}}}{E_{\mathrm{net}}}$$

式中：K_{invest} 为电站总投资；K_{OM} 为年运行管理费用；K_{fuel} 为年燃料费用；E_{net} 为年净发电量。$crf=\frac{k_d(1+k_d)^n}{(1+k_d)^n-1}+k_{\mathrm{insurance}}$，其中：$k_d$ 为实际利率；n 为电站寿命；$k_{\mathrm{insurance}}$ 为年保险费。

8.1 降低总投资和运维成本

如前所述，在太阳能热发电站总投资中，聚光、吸热和储热系统成本所占比例较高。根据可胜技术公司的数据，在塔式电站中，设备购置费约占总投资的 73%，安装费约占 12%，建筑工程约占 9%，其他约占 6%。其中，设备购置部分成本下降的主要途径如下表所示。

表：太阳能热发电设备购置部分成本下降途径

设备	成本下降途径	电站造价降低值（≥，绝对值）
聚光场	定日镜：用钢量降低、生产效率提高、新的传动结构、竞争效益；镜场控制系统：软件、硬件成本下降	10.7~15.4%
吸热器系统	材料国产化、加工优化及产业规模化	1.03~1.49%
储换热系统	储罐设计优化、加工成熟、集中采购；熔盐阀门及熔盐泵国产化；运维费降低；熔盐规模化发展	3.59~5.66%
热力发电系统	设计优化、集中采购	1.4~2.1%

此外，根据国际经验，技术进步对太阳能热发电成本降低的贡献率约 42%，规模化的贡献率约 37%，批量生产的贡献率约 21%。据我国企业的测算，在理想情况下，由于规模化发展带来的电站总投资整体下降可达 18.42~27.56%。

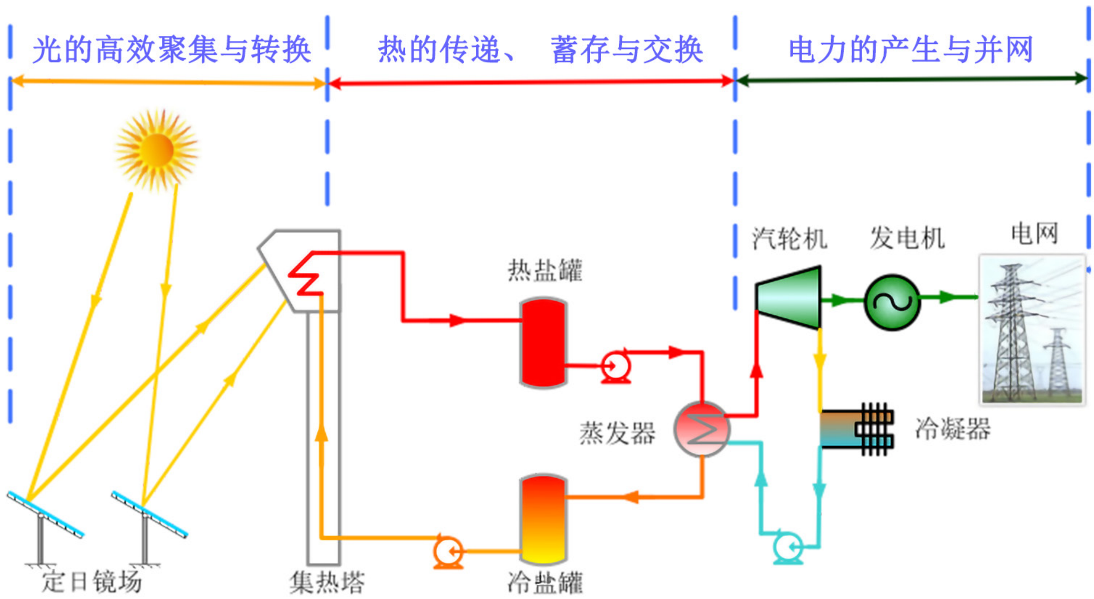
通过分析西班牙 PS10 和 PS20 塔式电站（这两座电站采用了同样的技术，只是容量不同，PS10 为 10MW，PS20 为 20MW）发现：电站容量大小和单位投资成本有一定关系。在同样技术条件下，机组容量越大，单位千瓦投资成本和年运行费用越低；同时，机组容量较大时，机组本身的运行效率明显提高，电站辅助设备及管道系统的效率也较高，则电站综合效率明显提高。然而电站容量的翻倍并不会导致投资成本增长的翻倍。根据 Kistner 研究，随着电站容量的翻倍，一些部件的相对成本增加的并不多，但有一些却呈现出了规模效应。当电站容量从 50MW 增加到 100MW 时，下列部件的成本降低甚微：集热场：97.5%；传热介质：92.2%。下列部件的成本降低显著：发电系统：81.1%；电站平衡系统：76.6%；并网：65.0%。另外，还有一些费用的相对权重在运行期间保持稳定，例如储热系统、土木工程以及用水[29]。最后，最能体现规模效应的方面包括项目管理和项目开发，其成本以绝对数值的形式带有固定性。

根据国际可再生能源机构（IRENA）的报告（2018 年），因为没有化石燃料的成本支出，太阳能热发电站的运维成本主要包括两大类：保险（这部分每年的费用约占初始资本支出的 0.5 ～ 1%）和维护（主要包括反射镜清洗和更换）。因此，国外光热电站业主降低运维费用的方式侧重在维护；对于运营商来说，一种降低维护费用的方法就是采用预测分析工具，另一种方法就是以最小化清洁成本的方式设计电站。一些新的研究表明，在太阳能热发电站的设计和建设中提前进行良好决策和计划，可持久性地降低其后期的运维成本，从而提高盈利能力。国际上槽式太阳能光热电站平均运维成本约合人民币 0.15~0.211 元 /kWh，塔式光热电站约合人民币 0.211~0.282 元 /kWh。

华北电力大学的一份研究报告指出，如果运维成本下降 20%，塔式、槽式、线菲太阳能热发电站的内部收益率将分别从 12.33%、11.72% 和 11.43 增加至 13.41%、12.79% 和 12.49%。我国某 50MW 光热电站运行费用大约在 0.05 元 /kWh，主要包括人工成本、检修费用、备品备件费用、外购电、水费、材料费等；其中人工成本占比最高。随着运行经验的提升，预计未来几年运维成本将会显著下降；而且随着装机规模的提高，人工成本上升幅度不大。

8.2 提高效率

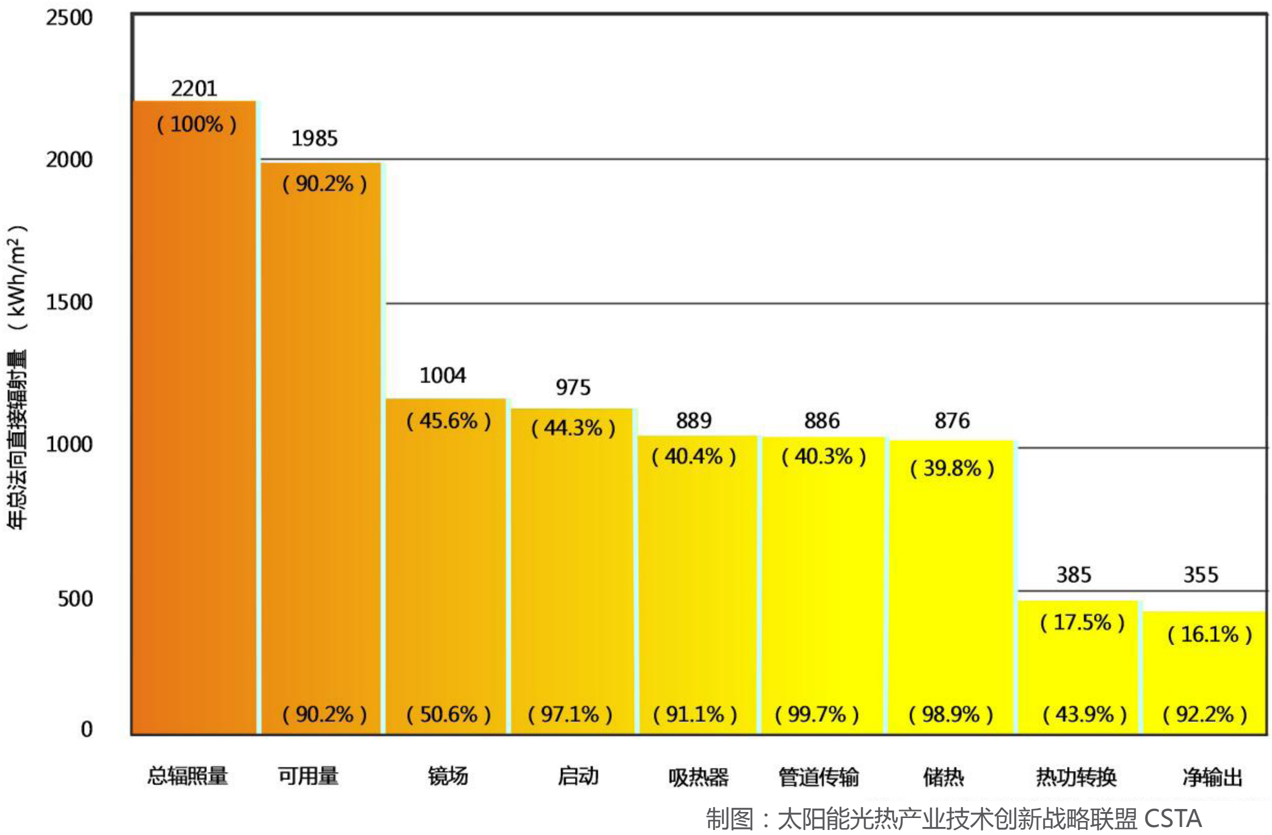
太阳能热发电的基本过程涉及聚光、传热和热功转换等方面，太阳能通过热的形式转换成电能需要经过多个能量转换和传输过程。从光—热—功转化过程来看，太阳能热发电主要包括以下 3 个过程（如下图所示）：1）光的聚集与转换过程；2）热量的吸收、蓄存与传递过程；3）热功转换过程。而电站的年效率则反映一个电站技术水平的先进程度，太阳能热发电站年效率越高说明太阳能到电能的转化能力越强。太阳能热发电站年效率是一年中太阳能热发电站的发电量与投射至聚光场采光面积上太阳法向直射辐照量之比，其与装机容量、设计点太阳直射辐照度、汽轮机入口参数、蓄热系统容量、年日照时数、辅助能源所占百分比等诸多因素有关。



图：熔融盐传热介质太阳能热发电站系统示意图

热力学、传热学、光学、材料学等多个学科以及这些学科的交叉是太阳能热发电技术的理论基础。各能量传递与转换环节的热传递机理及热流特性、光 - 热 - 功转换系统的集成理论和关键材料及技术等是太阳能热发电技术中需要重视和解决的基础问题。

下图是一座典型塔式太阳能热发电站的能量传递构成图。由图可见，聚光、吸热及热功转换过程是构成系统能量和效率损失的主要部分，约占总损失的 97%，因此提高太阳能热发电效率关键在于提高聚光、吸热及热功转换过程的效率。国内外的研究也大都集中于这两个过程及非稳态条件下的系统热力学循环特性以求得到稳定的运行技术。



图：典型太阳能热发电系统各环节效率及能量损失情况 5

在现有熔盐塔式技术路线体系下，通过以下各部分的优化，光电转换效率可提升 12~27%[26]。

表：工程角度建议的熔盐塔式技术优化项

技术	优化项	提升值（≥，绝对值）
定日镜清洁技术	清洁度	2~6% ↑
云预测技术	弃光率	2~4% ↓
定日镜镜面工艺	反射率	0.4~1% ↑
镜场排布优化	镜场效率	0.4~0.7% ↑
截断效率优化	截断效率	1~2% ↑
吸热器涂层	吸热器表面吸收率	1~2% ↑
汽轮机效率	汽轮机效率	1~1.5% ↑
设备的可靠性模型研究	设备可用率	1~2% ↑
全场优化运营技术	发电量	1~2% ↑
光伏代替部分厂用电	厂用电率	4~6% ↓
改进系统的保温效果	厂用电、储热效率	/
最佳规模带来经济性的改善	成本	2 分钱 ↓

5 感谢中科院电工所多学科交叉研究中心常春博士绘制此图。

8.3 太阳能热发电技术和产业发展建议

未来，我国太阳能热发电产业需要围绕以下八个部分开展工作：

1）太阳能热发电站集成：摸索太阳能热发电站运行工艺，建立太阳能热发电站设计和运行规范。已建成的太阳能热发电系统在系统运行、系统改进、系统分析方面进行扎实的工作。通过改进，优化系统的安全性和可靠性，提升系统效率，得出运行操作规范、系统设计规范和事故处理大纲。对系统中各设备的参数进行详细分析，提出各个设备技术规格书，总结出一批行业和国家标准。

2）高温集热储热换热：储热是太阳能热发电连续性的一个重要因素。储热问题涉及到材料和热学的耦合，需要对低成本储热材料和系统，具有固有安全性的熔融盐吸热储热系统设计方法等进行研究。

3）聚光器：通过已建成电站数据发现，聚光器成本约占整个光热电站投资的 50%。我国太阳能热发电聚光器的技术指标与国外相比差别不大，单位面积重量等经济指标与国外相比也相差无几。未来应侧重减少溢出损失，提高聚光比等聚光方式探索，以及目前槽式聚光器和塔式定日镜的可靠性改进。

4）吸热器：吸热器种类较多，目前常用的槽式吸热器和塔式吸热器。碟式以及菲涅尔聚光器目前应用较少。吸热器的安全性是吸热器最重要的指标，吸热器每天在高温、非均匀和非稳定热流边界条件下工作，需具备一定的抗疲劳寿命。需要对吸热器的用材以及运行相关的力学和传热特性进行探索，研制固有安全性和长寿命的太阳能吸热器，效率和工作温度均比目前提高。

5）太阳能部件生产线专用设备：太阳能关键部件生产线技术在我国发展缓慢。我国目前在玻璃镜、吸热管、聚光器、专用透平等生产线方面的研究成果还不足以支撑大规模工业化的需要。需要在规模化实践中完善产品的质量控制技术和工艺，建立聚光，吸热和传热部件的生产线和生产工艺。

6）核心材料、装备和系统性能检测平台：开发或研制大型高能流密度测量系统、聚光器聚光精度测量和评价、核心材料和装备可靠性和热性能测试仪器和方法、关键系统性能检测平台等。

7）技术规范和标准：建立太阳能热发电核心材料、装备和系统性能评价的规范和标准。通过对新型聚光形式、聚光系统优化设计、适应于不同形式热发电技术、不同工质类型和运行温度的吸热器技术、储热材料与储热系统、高效热电转化技术等领域持续地研发和关注，推动我国太阳能热发电技术向高参数—高效率—低成本—基础负荷方向发展。

8）超临界二氧化碳太阳能热发电技术：提高吸热器工质温度到 800℃，研究提高颗粒与二氧化碳换热器换热系数的方法，采用超临界二氧化碳做发电工质，高效发电。

九、附录

9.1 我国 2021 年发布的太阳能热发电相关政策

2021 年是“十四五”开局之年，国家相关部门研究并出台了一系列关于促进新时代新能源高质量发展的若干政策。其中涉及太阳能热发电的政策主要包括（按照发布时间排序）：

表：我国 2021 年发布的太阳能热发电相关政策清单

政策名称	发布部门	发布时间	主要内容
2021 年能源工作指导意见	国家能源局	4 月 19 日	2021 年风电、光伏发电量占全社会用电量的比重达到 11% 左右。在确保安全的前提下积极有序发展核电。推动有条件的光热发电示范项目尽早建成并网。
关于 2021 年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知	国家能源局	5 月 11 日	建立保障性并网、市场化并网等并网多元保障机制。对于保障性并网范围以外仍有意愿并网的项目，可通过自建、合建共享或购买服务等市场化方式落实并网条件后，由电网企业予以并网。并网条件主要包括配套新增的抽水蓄能、储热型光热发电、火电调峰、新型储能、可调节负荷等灵活调节能力。
关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知	国家发改委	6 月 7 日	2021 年起，新核准（备案）海上风电项目、光热发电项目上网电价由当地省级价格主管部门制定，具备条件的可通过竞争性配置方式形成，上网电价高于当地燃煤发电基准价的，基准价以内的部分由电网企业结算。鼓励各地出台针对性扶持政策，支持光伏发电、陆上风电、海上风电、光热发电等新能源产业持续健康发展。
关于加快推动新型储能发展的指导意见	国家发改委、国家能源局	7 月 15 日	抽水蓄能和新型储能是支撑新型电力系统的重要技术和基础装备。到 2025 年，实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变。装机规模达 3000 万千瓦以上。到 2030 年，实现新型储能全面市场化发展。大力推进电源侧储能项目建设。充分发挥大规模新型储能的作用，推动多能互补发展，规划建设跨区输送的大型清洁能源基地，提升外送通道利用率和通道可再生能源电量占比。坚持储能技术多元化，以需求为导向，探索开展储氢、储热及其他创新储能技术的研究和示范应用。

政策名称	发布部门	发布时间	主要内容
关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知	国家发改委、国家能源局	8 月 10 日	实现碳达峰关键在促进可再生能源发展，促进可再生能源发展关键在于消纳，保障可再生能源消纳关键在于电网接入、调峰和储能。鼓励多渠道增加调峰资源。承担可再生能源消纳对应的调峰资源，包括抽水蓄能电站、化学储能等新型储能、气电、光热电站、灵活性制造改造的煤电。 自建调峰资源指发电企业按全资比例建设抽水蓄能、化学储能电站、气电、光热电站或开展煤电灵活性改造。购买调峰资源指发电企业通过市场交易的方式向抽水蓄能、化学储能电站、气电、光热电站或开展灵活性改造的火电等市场主体购买调峰能力，包括购买调峰储能项目和购买调峰储能服务两种方式。超过电网企业保障性并网以外的规模初期按照功率 15% 的挂钩比例（时长 4 小时以上，下同）配建或购买调峰能力，按照 20% 以上挂钩比例进行配建或购买的优先并网。
2030 年前碳达峰行动方案	国务院	10 月 26 日	积极发展太阳能光热发电，推动建立光热发电与光伏发电、风电互补调节的风光热综合可再生能源发电基地。加快建设新型电力系统。构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统，推动清洁电力资源大范围优化配置。大力提升电力系统综合调节能力，加快灵活调节电源建设；加快新型储能示范推广应用。 加快优化建筑用能结构。深化可再生能源建筑应用，积极推动严寒、寒冷地区清洁取暖，推进热电联产集中供暖，加快工业余热供暖规模化应用，因地制宜推行热泵、生物质能、地热能、太阳能等清洁低碳供暖。引导夏热冬冷地区科学取暖，因地制宜采用清洁高效取暖方式。加快生物质能、太阳能等可再生能源在农业生产和农村生活中的应用。推进熔盐储能供热和发电示范应用。 探索建立分时电价动态调整机制。

政策名称	发布部门	发布时间	主要内容
关于推进 2021 年度电力源网荷储一体化和多能互补发展工作的通知	国家能源局综合司	11 月 10 日	各省级能源主管部门应在确保安全前提下，以需求为导向，优先考虑含光热发电，氢能制输储用，梯级电站储能、抽水蓄能、电化学储能、压缩空气储能、飞轮储能等新型储能示范的“一体化”项目。“一体化”项目应根据系统运行需要和自身情况，响应电力调度机构调节指令，提供电力辅助服务并获得相应补偿，在紧急情况下可作为地区应急电源，为地区电网提供必要支持。

9.2 美国能源部 2021 年度支持的太阳能热发电项目清单

2021 年 3 月，美国能源部（DOE）宣布，在未来十年内将太阳能成本削减 60%；此外还有将近 1.28 亿美元的资金用于降低成本，改善性能并加快太阳能技术的部署。2021 年 10 月，能源部太阳能办公室（SETO）宣布了为推进下一代太阳能，储能和工业技术的 40 个项目名单，这些项目获得了总额近 4000 万美元资金。具体详见下表。

表：美国能源部 2021 财年支持的太阳能研究项目概览

项目主题	数量	奖金总额	说明
光伏研究	3 个	450 万美元	帮助 PV 系统持续 50 年，比目前的光伏系统寿命长 20 年，这将减少太阳能系统的更换和维护成本。这些项目将使模块化组件能够在正常的磨损和断裂或极端天气事件之后可以轻松更换，以及更好地进行系统监控。
太阳能热发电	13 个	2500 万美元	这些项目旨在让太阳能光热电站在非常高的温度下运行，用于生产燃料和太阳能化学品。这些项目还提高了商业化光热电站的总体可靠性。
泵送的热能存储	3 个	400 万美元	项目将开发长时间的热能存储，能够存储和按需提供至少 10 小时的电力。
光伏和光热研究的进步	21 个	600 万美元	项目将测试能在不到两年的时间内产生显著成果的新颖思想。这些项目申请流程简化，旨在鼓励传统代表性团体中的工程和科学研究人员，以及从未申请过的早期职业研究人员申请。

表：美国能源部 2021 财年资助的太阳能热发电相关项目清单

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Silicon-Carbide Receiver/Reactor by Additive Manufacturing for Concentrated Solar Thermocatalysis with Thermal Energy Storage	用增材制造的碳化硅吸热器 / 反应器用于具有储热的聚光太阳能热催化	Dimensional Energy 和 Heliogen 两家公司合作设计，开发和测试太阳能驱动的化学反应器生产可持续喷射燃料的原料。反应器将捕获的二氧化碳和绿色氢气转入原料，燃料目标价格低于每加仑 2 美元。该团队将利用在大于 1,000℃的温度下保持稳定的含有添加剂的碳化硅材料以实现该技术。该概念集成了储热技术以实现反应器的连续操作。	承担单位：DIMENSIONAL ENERGY 公司 DOE 奖金：270 万美元 费用分担：70 万美元
Ultra-High Operating Temperature Silicon-Carbide-Matrix Solar Thermal Air Receivers Enabled by Additive Manufacturing (Ultra-HOTSSTAR)	增材制造的超高温碳化硅基太阳能热空气吸热器	Ultra-Hotsstar 项目利用 GE 的高温制造技术来设计容积式碳化硅（SiC）吸热器，以有效地将阳光转化为热能。SiC 使太阳能吸热器超出金属合金的温度限制，并使该团队能够设计出适合高温工业过程的吸热器。该团队将与 Heliogen 合作，通过提高可制造性，降低成本和验证现实条件下的热机械可靠性，利用 3D 打印技术来优化有前途的设计。	承担单位：通用电气公司，GE 研究 DOE 奖金：260 万美元 费用分担：90 万美元
Light Trapping, Enclosed Planar-Cavity Receiver for Heating Particles to Enable Low-Cost Energy Storage and Chemical Processes	实现低成本储能和化学过程的用于加热颗粒的光俘获及封闭的平面腔吸热器	该项目团队将设计，开发和测试 100 千瓦太阳能吸热器，在大于 700℃的温度下向颗粒传输能量。创新方法将颗粒包裹在镍合金吸热器中“捕获光”，以防止能量重新发射到环境中。光线捕获将成为团队努力设计热效率高于 90％的吸热器中的关键组成部分。该团队还将使用涂层来防止吸热器结构过热，也将使用一种气体使吸热器内的颗粒能够像流体一样以最大化传热。	承担单位：美国国家可再生能源实验室 DOE 奖金：300 万美元 费用分担：75 万美元
Scalable, Infiltration-Free Ceramic Matrix Composite (CMC) Manufacturing for Molten Salt Receiver	用于熔盐吸热器的可扩展的无渗透陶瓷基质复合材料制造 (CMC)	该项目将为 CMC 开发可扩展的制造工艺，该流程将旨在将这些高温稳定材料的成本降低至当前商业产品成本的 3 倍以下。为实现这一目标，他们将开发生产方法，避免需要长时间的步骤并使用昂贵的材料。该技术将有助于解决与高温氯化氢盐相容的可扩展，耐腐蚀吸热器材料的需求。	承担单位：PALO ALTO RESEARCH CENTER DOE 奖金：250 万美元 费用分担：60 万美元

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Intensified Solar Reactor for Green Ammonia Manufacture and Gen3 Thermochemical Energy Storage	用于绿色制氨和第三代热化学储能的强化太阳能反应器	该项目团队将开发太阳能热系统，以使氨合成反应器不需要化石燃料输入。通过使用流程强化策略，该团队将设计一种氨反应器，可在整个过程中有效地使用热量以驱动氨反应。氨可以作为封闭的热化学能量存储系统的一部分，用于电力生产，或作为商品化学品生产氨。在这个项目中，该团队将专注于其热恢复技术的设计和验证，以显著提高效率。	承担单位：TEXAS TECH UNIVERSITY（德克萨斯理工大学） DOE 奖金 : 200 万美元 费用分担 : 50 万美元
Design and Manufacturing of Transparent Refractory Insulation for Next-Generation Receivers	下一代吸热器用透明耐火材料的设计与制造	密歇根大学与 AeroShield 合作，为项目团队开发的新型气凝胶材料开发一种制造策略。该材料具有大幅提高槽式集热器效率的潜力。气凝胶对太阳光谱是透明的，可以被改善以吸收从吸热管散失的热量。该团队计划证明气凝胶可以在 700℃实现高效的太阳能热能收集，使抛物面槽式集热器能够与高温和高效功率的循环耦合。	承担单位：UNIVERSITY OF MICHIGAN（密歇根大学） DOE 奖金：250 万美元 费用分担：60 万美元
Advanced Ice Slurry Generation System for a Carbon Dioxide–Based Pumped Thermal Energy Storage System	二氧化碳为基础的热泵储热系统用先进冰浆生产系统	Echogen 将开发热交换器，该热交换器将降低在热能储存系统中使用冰的成本作为冷热储存器。该团队将通过简化现有商业系统的设计，机械地从传热表面刮冰来实现这一目标。该项目可以改善使用热泵将电力转换为热量进行长期储能的高效热能存储系统的成本和运行复杂性。	承担单位：ECHOGEN POWER SYSTEMS DOE 奖金：120 万美元 费用分担：40 万美元
Characterization of Inlet Guide Vane Performance for Discharge Compressor Operation near the Dome of an sCO_2 Pumped Heat Electricity Storage	sCO_2 泵辅热电储能装置圆顶附近的放热压缩机运行的入口导向叶片性能表征	该项目将推进入口导向叶片（IGV）的设计，它们是超临界二氧化碳压缩机中的关键部件。它们用于引导压缩机中的流体流动以优化旋转叶片上的流动。该项目将 IGV 集成到压缩机中，以收集可以在整个行业使用的流体流程图数据。压缩机是用于长时热能存储的充放热循环的关键部件。	承担单位：SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE（西南研究所） DOE 奖金：50 万美元 费用分担：10 万美元

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Development of a Multiphase-Tolerant Turbine for Pumped Thermal Energy Storage	用于泵送储热的多相耐热涡轮机	西南研究所将设计一种涡轮机，以最大限度地提高基于二氧化碳的热泵循环的效率，这是一种有前景的技术，可以有效地在长周期储热系统中储电。该项目将优化涡轮机设计，该设计将能够耐受不断变化的流体性质，因为它将与机器内的液体和气相相互作用。该热泵涡轮机是一种关键部件，以实现具有成本效益的电力 - 热能储存，潜在的充放往返系统效率高于 65%。	承担单位：SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE （西南研究所） DOE 奖金：240 万美元 费用分担：60 万美元
Improved O&M Reliability for CSP Plants through Application of Steam Generator Damage Mechanisms Theory & Practice	提高槽式电站运维维可靠性的蒸汽发生器损伤机理理论与实践	该项目旨在通过技术最终用户（如电站运营商，设计师和其他利益方）的输入，开发“理论和实践”文档以提高光热电站蒸汽发生器的的可靠性，可操作性和生产力。此参考和指导文件将涵盖光热电站蒸汽循环设备损坏的演变以及管理此损坏的必要运营和维护实践。它将完全描述导致每个组件损坏的机制，并提供有关识别问题的指导，并理解如何管理和防止其再次发生。	承担单位：ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE（电力研究所） DOE 奖金：190 万美元 费用分担：50 万美元
Improved Design Standard for High Temperature Molten Nitrate Salt Tank Design	高温熔融硝酸盐储罐设计标准的改进	该项目将为熔融硝酸盐热能储罐开发综合设计指南。该团队将为储罐结构设计制定方法，考虑腐蚀效果和其他因素，并编写材料选择、焊接接头、疲劳评估，储罐基础设计以及其泄漏检测系统的指南，此外也包括选择储罐内部与外部保温隔热的效果。本指南可能是硝酸盐储罐的标准，用于开发商在新建电站中采用和实施。	承担单位：IDOM DOE 奖金：200 万美元 费用分担：50 万美元
CSP Plant Optimization Study for the California Power Market	加州电力市场的光热电站优化研究	该项目团队将进行详细的系统研究，以确定光热电站的最佳配置，以支持加州市场的新兴需求。本研究将与加州独立系统运营商（CAISO）和萨默斯市和萨克拉门托市政公用事业区等电网运营商和公用事业公司合作，评估不同光热发电技术和配置的技术经济潜力，以及如何降低光热发电项目开发和商业化中面临的障碍。	承担单位：SOLAR DYNAMICS DOE 奖金：100 万美元 费用分担：25 万美元

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Design Basis Document/ Owners Technical Specification for Nitrate Salt Systems in CSP Projects	使用硝酸盐系统的光热发电项目设计基础文件 / 业主技术规范	该项目团队将为使用硝酸盐的光热发电系统开发设计基础文件，并将其广泛可供公众使用。本文件将从现有商业化光热电站中收集获得有关的最佳实践和经验教训等关键信息，并将提供一个关键工具，以在未来的电站所有者，工程 - 采购 - 建设（EPC）承包商，运营和维护承包商中达成共识。该文件的焦点将包括吸热器材料决策，避免应力松弛开裂，适当的焊接程序，热交换器制造技术和伴热设计等。该项目将邀请大部分光热发电行业人员参与，以确保该文件的广泛相关性。	承担单位：SOLAR DYNAMICS DOE 奖金：45 万美元 费用分担：10 万美元
Evaluation High-temperature Sensors for Molten Solar Salt Applications	熔融太阳盐用高温传感器的应用评估	Sporian MicroSystems 将设计和制造用于熔盐光热电站的传感器。传感器将能够监测流速，流体压力和化学杂质，以确保电站可靠运行。Sporian 公司正在与三个国家实验室合作，评估和验证这些传感器的性能。在运行温度下，精确测量熔盐的流动、压力和化学成分将为光热电站运营商提供可提高控制，以提高性能并延长关键光热系统组件的寿命。	承担单位：SPORIAN MICROSYSTEMS DOE 奖金：100 万美元 费用分担：25 万美元
Performance Improvement in CSP Plant Operations	光热电站运行性能改进	该项目将通过创建电站操作模型来提高现有光热电站的性能，这些电站将模拟真实电站，为运营人员提供培训。该模型能够评估替代运营和控制策略，以提高电站性能和成本效益。光热电站运营商将能够在低风险但现实的模型环境中测试控制决策，这对于罕见的事件特别有利，这些事件可能对电站发电量产生重大影响。从商业化运行的电站中获取的数据 将用于确保电站仿真模型的保真度。	承担单位：UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON（威斯康星大学 - 麦迪逊大学） DOE 奖金：160 万美元 费用分担：50 万美元
Performance Optimization of Sold Particle TES Heat Exchanger by Combining Benefit of Extended Surfaces and Particle Fluidization	结合扩展表面和颗粒流化的性能优化	固体颗粒在传统的以硝酸熔融盐作为传热介质的塔式电站中具有若干优点。对于使用蒸汽朗肯循环的颗粒系统，需要使用粒子 - 蒸汽热交换器的新设计。该项目团队将利用颗粒流化和延伸的表面翅片设计和开发这种热交换器，以最大化部件的传热性能。该团队将构建和测试原型热交换器，以验证性能模型和可操作性。	承担单位：BRAYTON ENERGY（布雷顿能源） DOE 奖金：190 万美元 费用分担：50 万美元

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Concentrated Solar Thermal Fuels Production by Electric Field Enhanced Two-Step Gas Splitting	电场强化两步气体分裂生产聚光太阳能热燃料	该团队将开发一种新的太阳能热化学循环，用于生产来自二氧化碳的可再生燃料。目前的热激活二氧化碳概念受到执行反应所需的极端温度（约 1,500℃）的限制。该团队将设计一种原型反应器，该原型反应器将小电压浸入熔融盐中的氧化铈以产生电场，从而降低反应所需的温度。该项目目标是二氧化碳分裂温度降低 600℃，使得与在聚光太阳能热发电集成的过程中可行。	承担单位：ARIZONA STATE UNIVERSITY (亚利桑那州立大学) DOE 奖金：31 万美元 费用分担：8 万美元
Technology for Electrically Enhanced Thermochemical Hydrogen	电增强热化学制氢技术	该项目团队将开发和测试热 - 电化学过程，从太阳能蒸汽中产生“绿色”氢气。这种方法将高温太阳能 - 热化学水分解（TCWS）与通过质子传导膜的氢气电化学泵送相结合。这减轻或消除了实现 TCWS 的许多关键挑战。该技术将使低成本的太阳能 - 氢效率超过 25%（理论极限 > 50%）。	承担单位：ARIZONA STATE UNIVERSITY (亚利桑那州立大学) DOE 奖金：40 万美元 费用分担：10 万美元
In-Operando Thermal Transport Characterization of Moving Particle Bed Heat Exchanger	移动颗粒床热交换器操作中的热传输表征	该项目团队将一种新颖的传热测量技术集成至桑迪亚国家实验室的 1MW 热交换器。该技术测量动态表面辐射信号，以确定与表面不同距离处的热传输速率。该技术将用于观察在颗粒 - 超临界二氧化碳热交换器中的靠近壁和散装颗粒的热传输速率。热交换器是桑迪亚实验室第三代颗粒试验电站中的关键部件。	承担单位：REGENTS OF UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO DOE 奖金：40 万美元 费用分担：10 万美元
High-Temperature Permanent Magnet-Biased Active Magnetic Bearing Development for Supercritical Carbon Dioxide Machinery Applications	超临界二氧化碳太阳能热发电机械应用的高温永磁偏置主动磁轴承的开发	该项目旨在识别和测试超临界二氧化碳（sCO_2）发电循环和在高于 540℃的温度下运行的太阳能热发电站轴承的磁性材料。该团队将设计永磁体偏置的主动磁轴承（PM-AMBS），这是一种密封 sCO_2 机械的启用技术，预计将提高循环效率。PM-AMBS 可能具有优于燃气轴承的优势，包括对未对准、减少磨损，可调性和诊断能力的容忍。该团队还将测试高温二氧化碳环境中暴露的兼容性关键材料。项目将开发以 PM-AMBS 的机器布局以证明可行性。	承担单位：SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE （西南研究所） DOE 奖金：40 万美元 费用分担：11 万美元

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Development and Experimental Optimization of High-Temperature Modeling Tools and Methods for Concentrated Solar Power Particle Systems	颗粒太阳能热发电系统高温建模工具和方法的开发和实验优化	与使用液体传热流体的常规系统相比，在下一代太阳能热发电系统中对固体颗粒的流动和传热精确建模具有挑战性。Dayton 大学将对开展各种颗粒流动和传热实验，为基于颗粒系统的研究人员的开发和验证一种广泛适用的计算模型。DCS 计算将被验证的框架集成到建模工具包中。如果成功，广大的研究人员和技术开发人员可以使用建模工具来研究其系统，而无需进行进一步的基础属性测量。	承担单位： UNIVERSITY OF DAYTON DOE 奖金：40 万美元 费用分担：10 万美元
Spectral and Temperature-Dependent Optical Metrology: Towards More Robust, Effective and Durable Materials for Concentrated Solar Power	光谱和温度依赖光学计量：为聚光太阳能提供更稳健、有效和耐用的材料	该项目团队将探讨温度对与光热发电相关的材料光学特性的影响。传统光谱测量焦点关注室温特性，这可能在高温下不具有特性代表性。该团队将开发标准化的光谱测量技术，协议和程序来确定材料的辐射特性。他们将其数据纳入数字化的光学属性数据库，以应用到实用的实验数据和预测建模工具中。	承担单位： UNIVERSITY OF MICHIGAN（密西根大学） DOE 奖金：24 万美元 费用分担：6 万美元
Development of Gas Bearings for Supercritical Carbon Dioxide Recompression Brayton Cycle	超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环气体轴承的研制	该项目团队将探索在燃气轴承中使用多孔石墨，该气体轴承支撑超临界二氧化碳（SCO_2）循环涡轮机械的涡轮机轴。气体轴承注入高压气体以避免由涡轮轴的旋转引起的摩擦导致的效率下降。他们将在高压和高温 CO_2 气体环境中测试这种轴承，以验证其性能。如果成功，这些轴承能够允许涡轮机几乎无摩擦运行，最大限度地减少磨损和简化系统操作，这将降低维护成本并提高循环效率。	承担单位： UNIVERSITY OF NEVADA – LAS VEGAS（内华达大学 - 拉斯维加斯） DOE 奖金：25 万美元 费用分担：6 万美元
Innovative Technology for Continuous, Online (In Situ) Monitoring of Corrosivity of Molten Salts to Prevent Catastrophic Failure of Solar Thermal Plants	防止光热电站灾难性故障的连续在线（原位）熔盐腐蚀性监测的创新技术	该项目团队将根据测量“光学碱度”（代表了流体的腐蚀性），为氯化物盐开发和评估一种创新传感器。该团队将开发和验证概念，并设计可用于商业电站的在线监测系统。	承担单位： UNIVERSITY OF NEVADA – RENO（内华达大学 - 里诺） DOE 奖金：40 万美元 费用分担：10 万美元

项目译文名称	中文译名	项目说明	承担单位 / 研发经费
Low-Cost Heliostat for High-Flux Small-Area Receivers	用于高热流小面积吸热器的低成本定日镜	该项目团队将为小型太阳能镜设计一种新的定日镜，与商业系统相比可能会大幅降低元件成本。该概念使用两步设计，其中第一反射阶段通过一组共享一套通用跟踪系统的旋转定日镜实现，从而显著降低成本；固定镜的第二阶段聚集阳光到吸热器上。	承担单位：UNIVERSITY OF WISCONSIN – MADISON（威斯康星大学 – 麦迪逊） DOE 奖金：33 万美元 费用分担：8 万美元

9.3 2021 年发布的太阳能热发电相关国家标准 5

序号	标准名称	主要起草单位	归口单位	发布日期
1	《太阳能光热发电站代表年太阳辐射数据集的生成方法》（GB/T 40099-2021）	中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司、中国大唐集团新能源股份有限公司、中国气象局公共气象服务中心、内蒙古电力勘测设计院有限责任公司	中国电力企业联合会	2021-05-21
2	《太阳能光热发电站术语》（GB/T 40104-2021）	中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司、中国大唐集团新能源股份有限公司、内蒙古电力勘测设计院有限责任公司	中国电力企业联合会	2021-05-21
3	《太阳能热发电站接入电力系统检测规程》（GB/T 40102-2021）	中国电力企业联合会、中国电力科学研究院有限公司、国家电网有限公司、中广核新能源投资（深圳）有限公司	全国太阳能光热发电标准化技术委员会	2021-05-21
4	《太阳能热发电站接入电力系统技术规定》（GB/T 40103-2021）	中国电力企业联合会、中国电力科学研究院有限公司、国家电网有限公司、中广核新能源投资（深圳）有限公司	全国太阳能光热发电标准化技术委员会	2021-05-21

5 本节内容由洪松整理。

序号	标准名称	主要起草单位	归口单位	发布日期
5	《太阳能中低温蓄热装置》（GB/T 40517-2021）	中国建筑科学研究院有限公司、中国标准化研究院、建科环能科技有限公司、北京工业大学、中国科学院电工研究所、西安建筑科技大学、浙江省太阳能产品质量检验中心、中国科学院重庆绿色智能技术研究院、山东力诺瑞特新能源有限公司、山东桑乐集团有限公司、河北道荣新能源科技有限公司、皇明太阳能股份有限公司、江苏昂彼特堡能源集团有限公司、江苏启能新能源材料有限公司、淄博博一新能源科技发展有限公司、山东京普太阳能科技股份有限公司、山东中科蓝天科技有限公司、北京华业阳光新能源有限公司、安徽苏立新能源科技研究院有限公司、上海电气工程设计有限公司、国家太阳能热水器质量监督检验中心（北京）、上海交通大学、宁波市正杰建设工程检测有限公司、山西奥博能源电力有限公司、山东博日明能源科技有限公司、合肥工业大学、湖南大学	全国太阳能标准化技术委员会	2021-08-20
6	《太阳能光热发电站集热管通用要求与测试方法》（GB/T 40858-2021）	常州龙腾光热科技股份有限公司	全国太阳能光热发电标准化技术委员会	2021-10-11
7	《太阳能光热发电站调度命名规则》（GB/T 40866-2021）	国网山西省电力公司、国家电网有限公司、中广核太阳能德令哈有限公司、浙江中控太阳能技术有限公司（现更名：浙江可胜技术股份有限公司）	全国太阳能光热发电标准化技术委员会	2021-10-11
8	《太阳能热发电站换热系统检测规范》（GB/T 40821-2021）	机械工业北京电工技术经济研究所、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、哈尔滨电气集团有限公司、中国电器工业协会、中国能源建设集团规划设计有限公司、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、中国能源建设集团有限公司工程研究院、内蒙古电力勘测设计院有限责任公司、常州龙腾光热科技股份有限公司、中国长江三峡集团有限公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、杭州锅炉集团股份有限公司、浙江大学	全国太阳能光热发电标准化技术委员会	2021-10-11

序号	标准名称	主要起草单位	归口单位	发布日期
9	《光热发电站性能评估技术要求》（GB/T 40614-2021）	中国电力科学研究院有限公司、中广核新能源投资（深圳）有限公司	中国电力企业联合会	2021-10-11
10	《太阳能中温工业热利用系统设计规范》（GB/T 40703-2021）	山东力诺瑞特新能源有限公司、中国标准化研究院、中国建筑科学研究院有限公司、建科环能科技有限公司、上海交通大学、山东省产品质量检验研究院、湖北省产品质量监督检验研究院、中国科学院电工研究所、中国科学院工程热物理研究所、成都博昱新能源有限公司、桑普能源科技有限公司、山东奇威特太阳能科技有限公司、北京建筑材料检验研究院有限公司、山东京普太阳能科技股份有限公司、广东五星太阳能股份有限公司	全国太阳能标准化技术委员会	2021-10-11

9.4 我国太阳能热发电行业发展主要历程

2006

科技部国家高技术研究发展计划（863 计划）先进能源技术领域启动“太阳能热发电技术及系统示范”重点项目。

2011.5

我国第一个太阳能热发电工程项目——鄂尔多斯 50 兆瓦槽式太阳能热发电电站完成特许权示范招标。经招标，国家能源局正式同意由中国大唐集团新能源股份有限公司负责项目建设和经营。

2012.7

《太阳能发电发展“十二五”规划》，光热发电装机目标 1GW。

2012.8.9

北京延庆八达岭太阳能热发电实验电站首次发电实验获得成功。

2012.9

国家能源局新能源和可再生能源司发函委托光热联盟会同国家可再生能源中心等单位，就太阳能热发电产业发展政策开展课题研究。

2013.4

国家能源局委托水电总院和电规总院就“我国太阳能热发电项目的资源普查和选址方案”及“光热发电示范工程的技术条件及实施方案”进行研究。

2013.5

太阳能光热联盟完成《太阳能热发电产业发展政策研究》5 个专题报告并提交国家能源局。

2013.7

青海中控德令哈 10MW 光热示范工程并网发电。2014 年 9 月初，国家发改委核定其上网电价（含税）为每千瓦时 1.2 元。

2015.7

原国家能源局刘琦副局长考察青海中控德令哈 10MW 塔式光热电站，并指示：尽快启动示范项目；抓紧协调出台电价政策；做好发展规划；组织技术攻关。

2015.9

国家能源局发布《关于组织太阳能热发电示范项目建设的通知》。2015 底水电总院、电规总院、太阳能光热联盟联合完成了示范项目的评选工作。

2016.8

中控太阳能德令哈 10MW 光热电站将水 / 蒸汽传热介质改为熔盐后成功并网发电。

2016.8.29

《国家发改委关于太阳能热发电标杆上网电价政策的通知》，明确太阳能热发电示范项目执行上网电价 1.15 元 /kWh。

2016.9.13

《国家能源局关于建设太阳能热发电示范项目的通知》，确定第一批太阳能热发电示范项目共

20 个，总计装机容量 134.9 万千瓦。

2016.11

国家发展改革委、国家能源局发布《电力发展“十三五”规划》, 光热发电装机目标 5GW。

2018.5.18

《国家能源局关于推进太阳能热发电示范项目建设有关事项的通知》，多措并举，着力构建项目推进机制。

2018.10~12

中广核德令哈、首航敦煌、青海中控德令哈光热示范电站并网。

2019

中电建共和、兰州大成、中能建哈密光热示范项目、鲁能海西州多能互补示范项目并网发电。

2020.1

乌拉特光热示范电站并网发电。

财政部、发改委、能源局联合发文《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》，明确新增海上风电和光热项目不再纳入中央财政补贴范围，按规定完成核准（备案）并于 2021 年 12 月 31 日前全部机组完成并网的存量光热发电项目，按相应价格政策纳入中央财政补贴范围。

2021.6.11

《国家发展改革委关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》，2021 年起，新核准（备案）海上风电项目、光热发电项目上网电价由当地省级价格主管部门制定，具备条件的可通过竞争性配置方式形成，上网电价高于当地燃煤发电基准价的，基准价以内的部分由电网企业结算。

2021.6.11

国家发改委办公厅发至国家能源局综合司《关于落实好 2021 年新能源上网电价政策有关事项的函》明确：对国家能源局确定的首批光热发电示范项目，于 2021 年底前全容量并网的，上网电价继续按每千瓦时 1.15 元执行，之后并网的示范项目中央财政不再补贴。

2021.7.29

《国家发展改革委 国家能源局关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力 增加并网规模的通知》，鼓励多渠道增加调峰资源。承担可再生能源消纳对应的调峰资源，包括抽水蓄能电站、化学储能等新型储能、气电、光热电站、灵活性制造改造的煤电。超过电网企业保障性并网以外的规模初期按照功率 15% 的挂钩比例（时长 4 小时以上）配建调峰能力，按照 20% 以上挂钩比例进行配建的优先并网。

2021.10.26

国务院《2030 年前碳达峰行动方案》，积极发展太阳能光热发电，推动建立光热发电与光伏发电、风电互补调节的风光热综合可再生能源发电基地。加快建设新型电力系统。构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统，推动清洁电力资源大范围优化配置。大力提升电力系统综合调节能力，加快灵活调节电源建设；加快新型储能示范推广应用。

9.5 太阳能光热联盟 2020~2021 年度理事成员单位及业务范围名录[6]

单位名称（按拼音排序）	业务范围
艾杰旭特种玻璃（大连）有限公司	主要生产和销售太阳能用途的高品质超白浮法玻璃、太阳能光伏用途的 TCO 镀膜玻璃、工业及建筑用在线低辐射镀膜玻璃，以及建筑用、汽车用、各种工业用途的透明浮法玻璃。
北京大学	北京大学工学院对利用超临界 CO_2 等流体工质实现高效利用太阳能、环境低品质热能源等进行发电、制冷、制热的能源转换系统开展了系统性的研究。目前，已研制出了低品质热能超临界 CO_2 发电、制冷 / 制热系统以及高效商用 CO_2 制冷热泵等，并进行了大量的实验测试和示范工程建设。
北京工业大学	熔盐传热蓄热和单螺杆膨胀机是北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室的特色研究方向，在低熔点高工作温度混合熔盐配制与改性、熔盐热物性测定与推算理论、熔盐对流传热等方面取得了世界领先的研究成果，拥有二百多种混合熔盐配方，研发了三代低熔点熔盐，实现了低熔点、高工作温度和低成本的完美结合。
北京嘉寓门窗幕墙股份有限公司	集研发、设计、生产、施工于一体的建筑节能、智能、光热光伏、门窗幕墙系统提供商。
北京启迪清洁能源科技有限公司	业务范围包括：太阳能光热、核能供热、压缩空气储能、风电开发建设、配售电与能效管理、清洁能源综合服务、能源环境全过程咨询等。
北京天瑞星光热技术有限公司	专业从事太阳能光热技术领域研发、核心产品制造、技术服务。已研制出拥有完全知识产权的高温太阳能集热管，并通过德国中心 DLR 和欧洲太阳能试验中心 PSA 的测试。通过一系列工程示范和商业应用，已掌握槽式系统集成的核心技术，具备在全球大规模部署槽式聚光集热系统的能力。
北京兆阳光热技术有限公司	提供菲涅耳太阳能热电技术咨询、装备集成、工程服务，以及开发、投资、建设、运营菲涅耳太阳能热电工程。研究开发了一套具有完整自主知识产权的类菲涅耳技术体系，除可整体应用于太阳能热发电之外，其各组成部分及其衍生产品可以被单独应用于工业蒸汽、火电站灵活性改造、城镇供热、海水淡化、农业畜牧业供热等领域。

6 本节内容由太阳能光热联盟秘书处根据公开资料整理，理事成员单位名单每年都有更新；内容如有不妥之处，请以各单位网站内容为准。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
常州龙腾光热科技股份有限公司	致力于光热发电及分布式太阳能热利用领域的研发创新和产业推广，业务涵盖高温真空集热管、集热场系统集成、分布式太阳能冷热电联供系统等领域。
成都博昱新能源有限公司	提供光热太阳岛的产品、集成和服务的全套解决方案。是国内较早掌握槽式集热器支架全套设计、生产、安装、调试的企业之一，拥有产品的完全自主的知识产权，具有丰富的槽式系统运行经验。
德州金亨新能源有限公司	致力于高性能太阳能集热器的研发、生产、应用，拥有多项自主知识产权的核心技术，包括高耐候选择性吸收涂层磁控溅射制备技术、帮定（BONDING）传热技术、高温选择性吸收涂层制备技术等。专注集热器研发 / 制造领域，设计研发的核心产品有：平板集热器、线性聚焦集热器、STC500 集热器（性能是普通平板的 2~3 倍）、U 型管集热器、长寿 U 型管集热器、热管集热器、蒸汽集热器等。
电力规划设计总院	国家级高端咨询机构，主要面向政府部门、金融机构、能源及电力企业，提供产业政策、发展战略、发展规划、新技术研究以及工程项目的评审、咨询和技术服务，组织开展科研标准化、信息化、国际交流与合作等工作。
东华工程科技股份有限公司	隶属于中国化学工程集团有限公司，是工程勘察设计行业较早进行股份制改造并上市的现代科技型企业。拥有国家工程设计综合甲级资质，专业从事化工、石油化工、医药、市政、建筑、环保等多领域工程建设的工艺研发、咨询、设计、采购、施工管理、开车指导、工程监理、工程总承包、PMC 管理、运营等全过程服务。曾承揽中船重工乌拉特中旗导热油槽式 100MW 光热发电项目热传储热岛设计等项目，拥有光伏发电相关领域的工程业绩。
甘肃省建材科研设计院有限责任公司	主要从事新型建材、绿色建筑、新能源利用等行业的新材料研究开发、检验检测认证、科研成果产业化、工程咨询设计监理等工作。
甘肃光热发电有限公司	成立于 2013 年 9 月，是一家混合所有制企业，主要进行新能源电力、热力的生产、运营及销售等。公司正在甘肃省阿克塞县负责实施国家首批太阳能热发电示范项目——金钒能源阿克塞 50 兆瓦熔盐槽式光热发电示范项目，电站采用熔盐为传热和储热介质，配置 15 小时的储热系统。其先导项目于 2016 年 10 月投运，系统集热回路 800 米、储热功率 8.7MWt、换热功率 1.62MWt，发电机组功率 200kW，包含了集热、储热、换热、发电的全部功能。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
广东五星太阳能股份有限公司	产品涵盖太阳能光热、光伏、热泵三大领域，形成了太阳能热水器、太阳能蒸汽锅炉、太阳能光伏组件、太阳能路灯、太阳能光伏发电系统、热泵热水器、太阳能（热泵）采暖、太阳能（热泵）烘干等多个产品系列。
国家电力投资集团公司中央研究院	从事核能、火电、太阳能及新能源领域的战略先导性技术、交叉前沿技术、共性关键技术研究，战略与技术经济研究，科技成果转化与推广等综合性研究与咨询业务。
河北道荣新能源科技有限公司	集光热产品研发、设计、制造、销售于一体，专注于“光热＋”清洁能源开发利用。产品覆盖槽式光热系统、CPC 光热系统、平板、真空管等户用供暖系统，80℃ -500℃的中高温热能供应商，广泛应用于光热发电、工业蒸汽、采暖制冷、海水淡化、燃煤锅炉替代、石油开采、智慧农业、农副产品烘干等领域。
华北电力大学	华北电力大学能源动力与机械工程学院主要研究方向：强化传热、火力发电过程节能、太阳能和新能源发电、储能材料与储能技术、氢能与燃料电池、海水淡化等。
江苏飞跃机泵集团有限公司	是一家集生产、研发、销售为一体的高新技术企业。主要产品包括：各类高温、高压、低温、耐磨、耐腐蚀的泵、阀、管道、耐磨耐热铸件、衬氟化工设备、合金钢制品等。
江苏联储能源科技有限公司	从事储能技术开发应用与储能核心装备制造集成，产品及服务包括：化盐设备、储罐、换热器、储热技术服务、总承包、储热岛 EPC 等。
江苏中能化学科技股份有限公司	以合成导热油与功能性化学品的研发、生成、销售为主。具备合成高温导热油及功能性化学产品均超 10000 吨的年生产能力。
兰州大成科技股份有限公司	聚光太阳能光热发电组件产品研发、生产，聚光太阳能热源系统和光热发电系统集成建设、绿色镀膜设备、铁路信号设备等。
兰州兰石换热设备有限责任公司	从事板式换热器研发、设计、生产和服务，产品主要应用于节能环保、核电军工、石油化工、暖通空调、船舶、冶金、生物能源、钢铁、电力、制药、纺织、造纸、食品等众多领域。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
美欣达欣旺能源有限公司	专注于热电厂的运营管理、实业投资、投资管理、热电厂的投资、煤炭经营、热电技术咨询、污泥无害化处理、天然气分布式能源、光伏发电、再生资源、储能等一系列项目。
南京工业大学	主要从事过程强化与节能环保装备、新能源技术与装备、表面强化处理、承压设备结构完整性等研究。
内蒙古电力勘测设计院有限责任公司	国家甲级电力勘测设计企业、总承包企业。具有电力工程设计、勘察、咨询、测绘、总承包、环境影响评价、水土保持方案编制、电子通讯、热力工程等数十项国家甲级资质，拥有对外承包工程资格和国家特种设备设计许可证，可承担各种等级的发电、输变电、新能源工程的咨询、勘测、设计、监理 、总承包业务及新能源项目投资运营。
内蒙古绿能新能源有限责任公司	主营业务为前期工作申请报告、备案申请报告、能源审计、合同能源管理、可行性研究报告、项目建议书、项目申请报告、资金申请报告、规划报告、节能评估报告、社会稳定风险评估报告等编制工作；以及工程项目包括无人机航拍等国内最尖端技术地形图测绘和岩土勘测。
内蒙古旭宸能源有限公司	太阳能光热系统的研发、制造与销售。已建成年产 20 万支金属直通式真空集热管智能生产线 2 条、集热器支架生产线以及 CPC 集热器生产线，可实现集热镜场 250 万平方米，可满足集中供热面积约 1000 万平方米的配件供给。
宁夏中昊银晨能源技术服务有限公司	主营业务包括：“煤改电”清洁取暖示范、供热领域节能改造、供热节能和煤改清洁能源、太阳能供热分布式光伏、能耗分析、节能诊断、节能改造实施、煤改电采暖工程、工业余热利用等。
青海爱能森新材料科技有限公司	业务类型：传储热系统、EPC/ 设计 / 工程 / 施工；核心产品及服务：储热介质、储热系统、化盐服务。
清华大学建筑学院	清华大学建筑学院设有 4 个系，即建筑系、城市规划系、景观学系和建筑技术科学系。曾承担“十二五”国家科技支撑计划“太阳能储热技术研究与示范”项目，在赤峰市建设并成功运行首个大型太阳能集热与工业余热相结合的跨季节储热集中供热示范工程，开展了大规模太阳能跨季节储热的关键技术研究及技术经济性分析。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
日出东方控股股份有限公司	专注于太阳能热利用，通过自主创新及国内外并购与合作，逐步形成太阳能、空气能、净水、厨电等主营业务。拥有“太阳雨”、“四季沐歌”、“帅康”、“日出东方阿康”等行业知名品牌。
山川秀美生态环境工程股份有限公司	从事燃煤电厂锅炉烟气治理工程，包括袋式除尘器的设计、制造、安装、调试和技术服务等工程项目总承包。
山东电力工程咨询院有限公司	业务范围涵盖火电、新能源、电网和增量配网、核电、综合智慧能源以及非电业务 6 大板块，规划、咨询、勘察、设计、EPC 总承包、服务、科技研发和投资运营 8 大领域。
山东电力建设第三工程有限公司	中国电建集团的全资 A 级子公司，是以 EPCO、EPC、BOT、BOO、PMC 等方式承包火电、核电、燃气、水电、风电、变电站、生物发电、光伏发电、光热发电、海水淡化等工程建设为主的专业化公司。业务范围遍及电力与金融投资、设计咨询、设备制造与租赁、国际物流与贸易、调试运行、房地产、休闲旅游等多个领域。以联合体形式总承包了摩洛哥努奥槽式和塔式太阳能热发电项目，是鲁能格尔木塔式光热电站总承包单位。
山东电力建设第一工程有限公司	集火电、核电、新能源发电、电站设计、电站调试、检修运维、输电变电、基础设施和起重机械设计制造、商贸物流、投资融资于一体的综合性、集团化、多元化国有大型电力工程公司。曾参与了兰州大成敦煌光热电站的建设，负责土建及发电设备安装工作。
山东济南发电设备厂有限公司	是集科研开发、生产制造、经营销售和其他多种经营于一体的国有电机制造企业，以生产汽轮发电机为主，主导产品为国产 QF 系列空冷汽轮发电机和引进 ALSTOM 公司 WX 系列空内冷汽轮发电机。发电机应用于多个光热发电示范项目中。
山东龙光天旭太阳能有限公司	主要从事高硼硅特种玻璃及太阳能光热、光电、空气能等新能源产品研发、生产、销售等。主要有高硼硅太阳能玻璃管、高硼硅玻璃棒、工艺管等系列高硼硅特种玻璃产品，以及太阳能热水器、真空集热管、太阳能集热工程、空气源热泵等新能源系列产品。
上海电气电站集团有限公司	产品包括火力发电机组（煤电、气电）、核电机组、风力发电设备、输配电设备、环保设备、自动化设备、电梯、轨道交通、医疗设备、油气海工和工业互联网等。是迪拜 950MW 光热光伏混合项目总包方。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
上海交通大学	上海交大太阳能发电及制冷教育部工程研究中心在太阳能建筑一体化应用、太阳能制冷、太阳能采暖、高效太阳能集热器、太阳能光伏应用、空气源热泵热水系统、基于热泵的综合能源利用技术、地源热泵、水源热泵、冷热电联供系统的匹配与优化等领域具有显著优势，并已实施相关技术的工程化应用。在余热制冷、吸附技术、冷却塔技术、吸收式空调等领域也积累了充分的研究开发经验。
涉县津东经贸有限责任公司	是以热媒制造与精细化工为主体的综合性生产企业，主导产品联苯。近年来，相继研发优化技改了以联苯为主导的氢化三联苯、联苯－联苯醚等环保型新能源高温导热油系列产品。
首航高科能源技术股份有限公司	主要从事光热发电、电站节水、余热利用、水务技术、清洁供暖、氢能利用、烟羽消白等领域的研发、设计、制造、建设、运维，项目投资及项目总承包等。
水电水利规划设计总院	国务院批准的事业单位，主要职责是参与编制水电水利及风电长远发展规划，制订和部署前期工作计划；代部组织预审河流规划和风电规划报告，负责审查部管大中型水电水利和风电工作预可行性研究和可行性研究（原初步设计）；组织编制和审查水电水利、风电勘测设计技术标准和定额；归口领导部属勘测设计院，并对全国水电水利和风电勘测设计单位实行行业管理等。
天津大学	机械工程学院下设机械工程、力学和能源与动力工程 3 个系，及机械工程实践教学中心。建有机械设计制造及其自动化、工程力学、能源与动力工程、工业设计、智能制造工程等 5 个本科专业。拥有内燃机燃烧学国家重点实验室、机构理论与装备设计教育部重点实验室、中低温热能高效利用教育部重点实验室、先进陶瓷与加工技术教育部重点实验室（与材料科学与工程学院共建）、3 个天津市重点实验室以及若干高水平科研基地和合作平台。赵力教授课题组在热泵系统优化、新型制冷剂循环特性研究分析、太阳能高效利用等方面开展了很多卓有成效的研究工作。
武汉圣普太阳能科技有限公司	具有全系列槽式、塔式、菲涅耳式反射镜、二次反射镜（CPC）和聚光光伏反射镜等产品的研发和批量生产能力，广泛应用于太阳能光热发电、太阳能中低温热利用和聚光光伏等领域。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
无锡鑫常钢管有限责任公司	是以开发、生产、销售不锈钢无缝钢管、不锈钢焊管、钛无缝管、钛合金焊管、高性能铜合金管、高效传热管、高温合金、镍基合金和多元复杂黄铜的企业，年产量达到 1.3 万吨。生产规格范围：外径 6mm-426mm，壁厚 0.8mm-35mm。产品广泛应用于空调、冰箱、发电机组、船舶制造、海水淡化、核工业、石油化工装备、化纤、医药、食品、纺织、印染、机械等行业。
西安交通大学	化学工程与技术学院下设化学工程与工艺、过程装备与控制工程两个本科专业，均入选国家级一流本科专业建设点名单。获批省部级重点实验室 2 个并建设多个校企合作科研基地。在化工系统集成优化、天然气压缩机、太阳能利用等多方面实现成果转化。特色研究方向为：能源化工工艺系统集成与排放控制、能源化工过程强化与放大、煤－油－气－盐资源的绿色转化、能源化工系统及装备的长周期安全运行、高效化工过程机械与设备技术等。
云南师范大学	能源与环境科学学院（太阳能研究所）是集教学、科研及工程应用为一体的教学科研单位，是国内最早开展太阳能利用研究的单位之一。以太阳能、生物能源等可再生能源利用研究和高层次人才培养为主要优势特色，具有本科、硕士、博士和博士后完整的人才培养体系。
浙江大学	浙江大学可持续能源研究院致力于太阳能热发电与高效利用领域的研究工作，涵盖高温集热（空气、颗粒、超临界 CO_2、熔盐等）、热化学与显热储热、高温工质换热（如颗粒与超临界 CO_2 等）、布雷顿循环（空气、超临界 CO_2 等）、斯特林循环，以及多能互补与余热梯级利用等。倪明江和肖刚教授的光热研发团队在青山湖地区占地约 1 万平方米的太阳能热发电试验平台，可用于太阳能高温集热（吸热温度可达 900℃以上）、热化学储热、高温布雷顿循环系统、熔融盐吸热器热性能测试及高温防护研究、斯特林发动机、PETE 等先进技术的研究和示范。
浙江可胜技术股份有限公司	专注于塔式熔盐储能光热发电技术的技术研究、装备研制与工程化应用，已成功掌握塔式熔盐储能光热发电全流程核心技术，并建立起光热发电全产业链，实现了核心装备的产业化、国产化，能够为光热电站建设提供成熟、可靠的解决方案。
浙江中光新能源科技有限公司	致力于打造成为拥有“光热＋”、“熔盐储能＋”、多能互补、智慧能源管理等技术的新能源科技企业，目前正加快实现投资、建设、运营全产业链布局。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
中广核工程有限公司	是我国第一家专业化的核电工程管理公司。业务范围主要包括：核电、常规电力、热力、燃气、港口、公路、水利、给排水以及民用建筑工程的承包、管理、咨询、监理；工程建设技术服务、咨询；经济信息咨询；工程建筑项目招标代理；经营进出口业务；建筑工程施工；电力设备和材料的购销；工程设计。
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	是我国首批成立的大型综合性勘察设计院，拥有包括工程勘察、设计综合甲级资质在内的数十项甲级资质，是集勘测设计、工程总承包、投资运营于一体的科技型工程公司。在水、风、光、地热、生物质能等清洁能源综合利用领域，水环境治理、水污染防治、水生态修复、垃圾集成利用等环境工程领域，水利工程、市政工程、交通工程、轨道交通、海绵城市、城市地下综合管廊、城市地下空间开发、区域社会经济规划、城乡发展规划、特色小镇等基础设施建设领域形成了鲜明的技术特色、工程能力和投融资能力。
中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司	拥有全国勘察、设计、咨询、监理“四综甲”级资质，中国工程设计企业 60 强，中国承包商企业 80 强。业务领域包括：能源电力、水资源与环境、基础设施三大版块。业务类型包括：技术服务（规划、勘察、设计、监理、检测、监测、科研实验、水情测报、全过程咨询、招标代理、信息化、数字化、智慧化）、工程承包、投资运营（能源电力、水务、环保、基础设施、建筑材料、城市片区开发）。是兰州大成敦煌光热发电示范项目总包方。
中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司	是具有工程设计综合甲级、工程勘察综合甲级、工程咨询、造价咨询、环境影响评价、测绘等十余种甲级资质的大型国有企业，致力于高端咨询规划、工程勘察设计、工程总承包等业务领域。通过在百万千瓦超超临界二次再热燃煤发电、特高压输变电、空冷技术、大塔技术、节能减排技术、IGCC 发电、太阳能热发电、生物质发电、多能互补等前沿科技领域积极开展科研攻关，现在能源规划研究、火力发电、新能源发电、多能互补、输变电、市政工程和环境保护等方面保持全面的行业技术领先优势。是中国能建哈密 50MW 塔式太阳能热发电示范项目的总承包方并自主独立提供全厂全过程工程设计。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
中国电力工程顾问集团有限公司	中电工程于 2002 年底在原国家电力公司所属中国电力工程顾问（集团）有限公司基础上组建，现为中国能源建设股份有限公司的全资子公司。中电工程是面向国内外市场，为政府部门、金融机构、投资方、发展商和项目法人提供工程建设一体化解决方案的服务商，主要从事能源与基础设施领域规划研究、咨询、评估、工程勘察、设计、服务、工程总承包、投资与经营、相关专有技术产品开发等业务。中电工程技术力量雄厚，专业配套齐全，具有丰富的工程实践经验和坚实的综合管理能力，是中国电力工程服务行业的“国家队”和“排头兵”。
中国广核新能源控股有限公司	是一家电源种类和地理分布多元化的独立发电商，专注于收购清洁及可再生能源发电项目，资产组合包括位于中国及韩国的风力、太阳能、燃气、燃煤、燃油、水力、热电联产及燃料电池发电项目。建成、投产我国首个大型商业化光热示范电站，依托该项目，获批建设了国家能源光热研发中心，具备大型光热电站系统集成的核心能力。
中国华电科工集团有限公司	是中国华电集团有限公司科工产业的重要组成部分和发展平台。成为投资、产品、工程协同发展，高端制造及系统工程、环保水务、电站投资建设、清洁能源四大板块齐头并进的国有大型企业集团，综合实力位居国内同行业前列。
中国科学院电工研究所	太阳能热利用技术研究部自上个世纪 70 年代开始从事太阳能热发电、中低温利用等方面的研究，已取得诸多研究成果：先后建成了我国首座 MW 级塔式和槽式太阳能热发电实验示范系统，我国首个大型太阳能水体跨季节储热项目，全球首个太阳能热电联供系统等。在北京延庆建成国际一流的全方位学科实验平台和科普教育基地，拥有风洞装备气动力学测试平台、光学测试平台、储热 / 传热材料与系统性能测试平台、材料抗老化性测试平台、槽式集热器及真空管系统能稳态热性能测试平台、中低温集热器热性能测试平台、反射面精度测试台、定日镜跟踪准确度测试仪、槽式反射镜精度在线测量仪等检测实验平台设施。分别于 2007 年和 2009 发起创立了中国太阳能热发电大会、太阳能光热产业技术创新战略联盟，是 973 项目“高效规模化太阳能热发电的基础研究”以及国家重点研发计划“超临界二氧化碳太阳能热发电基础问题研究”项目的牵头单位。

单位名称（按拼音排序）	业务范围
中国科学院上海应用物理研究所	上海应物所是国立综合性核科学技术研究机构，以钍基熔盐堆核能系统、高效能源存储与转换等先进能源科学技术为主要研究方向，致力于熔盐堆、钍铀燃料循环、核能综合利用等领域的关键技术研发。唐忠锋研究员所在的熔盐传蓄热团队拥有熔盐物性、分析、制备净化、传蓄热试验、腐蚀评价等 5 大平台，新熔盐体系设计、熔盐分析和测试、熔盐质量评价及寿命评估、腐蚀控制与防护、熔盐净化与回收、关键设备研制与寿命评估、回路设计研发、 熔盐传蓄热技术开发与验证等 8 项技术能力。围绕光热、储能等洁净能源开展研究，以工程应用为导向，提供工质设计、测试分析评价、设备研发、系统设计、储换热的运维调试服务。具备 CNAS 及 CMA 资质。
中国能建集团装备有限公司	中能装备是集能源装备研发、设计、制造、服务于一体的大型企业集团，主要产品：电站辅机、钢结构、电气设备及电网器材、成套设备等。扬州设备公司研发的“塔式太阳能热发电站用定日镜”通过江苏省经信委新产品鉴定。北京电力设备总厂研发的长轴调温熔盐泵中标中国能建哈密 50MW 塔式太阳能热发电示范项目。
Pacific Green Solar Technologies Inc. 太平洋绿色太阳能公司	PGST 是太平洋绿色技术集团 PGTK 的太阳能热发电业务支线。2019 年，PGTK 通过收购首航高科旗下子公司上海鹰吉，进一步扩展了其环境能源技术的产品组合，包括太阳能热发电，海水淡化和垃圾发电等领域业务。PGST 拥有先进的太阳能热发电技术，有能力为客户提供可靠，合规且最经济的全套交钥匙解决方案。PGST 的技术还可以与海水淡化和电解制绿氢相结合。

参考文献

[1] 上海证券报 . 以新能源为主体的新型电力系统构建该如何推进？ [EB/OL]. (2021-03-17).
https://news.cnstock.com/industry,rdjj-202103-4673011.htm

[2] 全国能源信息平台 . 国家电网郭剑波：以新能源为主体的新型电力系统面临的挑战 [EB/OL]. (2021-09-13).
https://www.163.com/dy/article/GJOVHPD105509P99.html

[3] 火力发电网 . 如何构建以新能源为主体的新型电力系统 [EB/OL]. (2021-09-09).
http://www.chinatpg.com/home/news/pages/n_id/124937.html

[4] 中国科技网 . 2021 中国太阳能热发电大会在浙江湖州召开 [EB/OL]. (2021-09-30)
http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/2021-09/30/content_1223345.shtml

[5] 王志峰 何雅玲 康重庆 王伟胜 杜凤丽 . 明确太阳能热发电战略定位促进技术发展 [J]. 华电技术，2021, 43(11)：1-4.

[6] 科技部 . 赵玉海司长赴延庆考察国内首个 MW 级塔式太阳能热发电实验电站 [EB/OL]. (2012-08-10).
http://www.most.gov.cn/kjbgz/201208/t20120809_96172.html

[7] 科技部 . 北京延庆八达岭塔式太阳能热发电站发电实验成功 [EB/OL]. (2012-08-29).
http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201208/t20120829_96435.htm

[8] 科学中国 . 中国太阳能光热发电技术将向商业化运行迈进 [EB/OL]. (2013-12-10).
http://science.china.com.cn/2013-12/10/content_30851823.htm

[9] 世纪新能源网 . 青海德令哈太阳能光热发电站 “精准追日”获取清洁能源 [EB/OL]. (2014-09-22).
https://www.ne21.com/news/show-59510.html

[10] 科技部 . 国家 863 计划先进能源技术领域主题项目“基于小面积定日镜的 10MW 塔式太阳能热发电技术研究及示范”取得重要进展 [EB/OL]. (2017-02-09).
http://www.most.gov.cn/kjbgz/201702/t20170208_130821.htm

[11] EIA. World’s longest-operating solar thermal facility is retiring most of its capacity[EB/OL]. (2021-09-20).
https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=49616

[12] Wikipedia. Solar Energy Generating Systems. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems

[13] 每日财经网 . EIG 旗下 Cerro Dominador 在智利举行聚光太阳能热发电站 (CSP) 落成典礼 [EB/OL]. (2021-6-10).
https://www.mrcjcn.com/business/nengyuan/317851.html

[14] 凤凰网 . 看到中国这座“超级镜子电站” 外国网友直呼震撼！ [EB/OL]. (2019-06-23).
https://news.ifeng.com/c/7njk0VzOUJp

[15] 腾讯网 - 敦煌发布 . 增长强劲！首航高科敦煌 100MW 光热电站三季度发电总量超 7800 万度 [EB/OL]. (2021-10-29).
https://new.qq.com/omn/20211029/20211029A0BFBQ00.html

[16] 阳光工匠光伏网 . 枯水期保电力供应！青海中控德令哈 50MW 光热电站冬季运行表现持续稳定 [EB/OL]. (2021-12-31)
http://www.21spv.com/news/show.php?itemid=108494

[17] 中国甘肃网 . 兰州大成敦煌 50MW 熔盐线性菲涅尔式光热电站投运 [EB/OL]. (2020-07-08)
https://www.sohu.com/a/406499962_119798

[18] 世纪新能源网 . 中船新能内蒙古乌拉特中旗 100MW 光热发电示范项目实现满负荷发电 [EB/OL]. (2020-

12-17)
https://www.ne21.com/news/show-124462.html
[19] 新华社客户端 . 中船新能（乌拉特中旗）100MW/1000MWh 光热储能项目通过国家示范性验收 [EB/OL]. (2021-11-1).
https://cj.sina.com.cn/articles/view/1882481753/7034645902000uxyb
[20] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 . 乌拉特中旗 100MW 10 小时储能槽式光热发电项目发电量超过设计指标 [EB/OL].(2021-09-12)
[21] 国资委网站 . 鲁能海西州 50 兆瓦光热发电项目并网成功 [EB/OL]. (2019-09-24).
http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c12310534/content.html
[22] 中国电力网 . 山东三建鲁能海西州多能互补光热电站顺利完成涉网联合试验 [EB/OL]. (2021-05-19).
http://www.chinapower.com.cn/tynfd/xmdt/20210519/74417.html
[23] 廖文俊 苏青 陈宇 . 太阳能热发电技术进展及产业链分析 [J]. 装备机械，2011 年 03 期 : 63-68
http://www.gs.xinhuanet.com/jiuquan/2021-04/14/c_1127329179.htm
[24] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 . 太阳能热发电和储能技术研讨会召开 [EB/OL]. (2020-09-25)
http://www.cnste.org/html/huiyi/2020/0925/6984.html
[25] 李心，等 . 塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析 [J]. 电力系统自动化，2015, 39 (7): 84-8
[26] 杜凤丽等编 . 中国太阳能热发电及采暖行业蓝皮书 2020[R]. 北京 : 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 , 2020.
[27] 李心，塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析 [R]. 2018, 杭州：中国太阳能热发电大会
[28] 浙江在线 . 首个完全拥有自主知识产权 青海德令哈 50 兆瓦塔式光热项目并网发电 [EB/OL]. (2018-12-31)
http://biz.zjol.com.cn/zjjbd/ycxw/201812/t20181231_9126070.shtml
[29] 王志峰，杜凤丽，等 . 太阳能热发电产业及投资分析报告（2011-2012）[R]. 太阳能光热产业技术创新战略联盟 , 兴业证券股份有限公司研究发展中心，北京 : 2011.
[30] 浙江在线 . 首个完全拥有自主知识产权 青海德令哈 50 兆瓦塔式光热项目并网发电 [EB/OL]. (2018-12-31)
http://biz.zjol.com.cn/zjjbd/ycxw/201812/t20181231_9126070.shtml
[31]SolarPACES. Andasol 1 CSP Project
https://solarpaces.nrel.gov/project/andasol-1
[32] ESMAP. MENA Assessment of the Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power Projects
https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/ESMAP_MENA_Local_Manufacturing_Chapter_1.pdf
[33] 杜凤丽，谢宏 . 太阳能热发电经济性分析和产业激励政策建议 [J]. 新能源进展，2013, 1 (3)：199
[34] DLR, Solar Thermal Power Plants, September 2007
[35]Gasa, G.; Lopez-Roman, A.; Prieto, C.; Cabeza, L.F. Life Cycle Assessment (LCA) of a Concentrating Solar Power (CSP) Plant in Tower Configuration with and without Thermal Energy Storage (TES). Sustainability 2021, 13, 3672.
[36] 杜凤丽 . 降低聚光太阳能热发电成本的途径 [J]. 太阳能，2011(007)：11-13

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟秘书处

地址：北京市海淀区中关村北二条6号中国科学院电工研究所北院317
邮编：100190
电话：010-82547214
网址：http://www.cnste.org
邮箱：cnste@vip.126.com
微信号：nafste