

槽式和塔式两种太阳能热发电技术的经济性分析

目前由山东电建三公司建设的摩洛哥努奥二期200MW槽式与三期150MW塔式光热电站已实现稳定的满负荷运行,累计向摩洛哥电网输送了数亿度电;由上海电气总承包的迪拜950MW光热光伏混合电站中,包括3个200MW槽式电站和1个100MW塔式电站。项目方将槽式和塔式两种太阳能热发电技术路线充分结合,发挥各自优势。内蒙古电力勘测设计院有限责任公司(简称内蒙院)是迪拜太阳能热发电项目的技术咨询服务方,首次在国际太阳能光热发电项目中展示了其扎实的技术能力与优质的服务水平。内蒙院发电事业部工程师乔木森近期对槽式和塔式两种太阳能热发电技术的经济性进行了对比分析,特整理如下,以供参考。

一、光热电站的技术路线

从现有光热电站现有装机容量来看,目前槽式光热项目占比较大,同时槽式光热项目起步较早,最为成熟,约占CSP总装机的80%以上,且美国加州SEGS电站已有全生命周期运行的机组,成为槽式安全可靠运行的一个最佳案例。

虽然现在世界在运行光热电站中槽式占比远远大于其他技术,但从现有光热电站的商业化发展规模综合判断,未来塔式光热发电技术可能是光热发电的主要技术方向。根据太阳能采集方式分类,太阳能热发电主要分为抛物槽式热发电、塔式热发电、碟式热发电和线性菲涅尔热发电技术。本文就槽式与塔式光热发电技术的经济性进行论证分析。

二、各种技术方案对比基础

结合本工程地理厂址条件、厂址处典型年光资源情况等,分析对比了导热油槽式、熔盐槽式以及熔盐塔式电站等不同方案下的技术经济指标。

假定新建100MW太阳能光热发电机组,厂址位于甘肃省某地。属于光资源一类地区。

光热电站成本构成主要由集热系统、传热系统、储能系统、发电系统、辅助系统、土地成本等组成,另外还有EPC等项目管理成本。在机组容量确定前提下,各组成部分在总静态投资的占比主要通过太阳倍数(主要反映集热系统、传热系统规模以及土地成本等),储能小时数(主要反应储能系统规模)等反映,各分系统配置不同会导致不同的平准化度电成本(LCOE)。

通过收集分析国内外光热产业成本信息,形成了下表所示各种技术路线参考成本模型系数表。其中熔盐塔式电站塔高成本与高度为指数函数关系,吸热器成本也与吸热器表面积为指数函数关系,表中未列出,两者成本模型在计算过程中均已考虑。

表1 各种技术路线参考成本模型系数

成本构成	单位	技术路线				
		槽式(ET)	槽式(UT)	槽式(UT)	槽式(UT)	塔式
		传热介质 传热介质	VP-1 熔盐	VP-1 熔盐	硅油 熔盐	熔盐 熔盐
集热系统成本	元/m ²	基础	0.98(根据制造商介绍)	0.98(根据制造商介绍)	1.03(需考虑高温真空集热管、集热场高温母管材质等因素)	0.94
传热系统成本	元/m ²	基础	1	1.15(需考虑硅油成本增加、防腐件热净化系统成本减少等因素)	无(单一传热储热介质、无需二次换热)	无(单一传热储热介质、无需二次换热)
储能系统成本	元/kWh	基础	1	0.85(需考虑工作温差拉大引起的熔盐量减少、储罐规格变小等因素)	0.69(需考虑工作温差拉大引起的熔盐量减少、储罐规格变小、高温储罐材质等级变高等因素)	0.69
发电系统成本	元/kWe	基础	1	1	1.03(主要考虑汽轮机本体、高温管道材质因素)	1.03(主要考虑汽轮机本体、高温管道材质因素)
辅助系统成本	元/kWe	基础	1	1	1	1
土地成本	元/亩	基础	1	1	1	1
土地整理成本	元/m ²	基础	1	1	1	0.5

注:1)本表依据行业信息编制,待下一步通过询价核实。

2)表中传热系统成本模型参考太阳倍数约2.5的工程导热油主泵配置方案推算。

3)表中储能系统成本模型参考太阳倍数约2.5的工程的一对熔盐储罐+1组油盐换热器配置方案推算。

表2 各技术路线在参考成本模型下计算结果表

序号	项目	集热场方案简述	太阳倍数	设计点DNI值 (W/m ²)	回路数	反射面积 (万 m ²)	储能小时数 (h)	储热容量 (M Wh)	动力岛综合效率 (%)	LCOE (元)	静态投资 (亿元)	年上网电量 (亿 kWh)	年发电量 (亿 kWh)	年均光电转化效率 (%)
1	1×100MW VP-1 导热油槽式	UT 槽, 90 管	3.6	760	240	164.4	11.5	2925	39.32	0.768	38.1	3.70	3.99	13.12
2	2×50MW VP-1 导热油槽式	ET 槽, 70 管	3.5	760	2×257	2×84.0	11.5	2×1492	38.54	0.795	2×19.6	2×1.80	2×1.95	12.51
3	1×100MW 硅油槽式	UT 槽, 90 管	3.5	760	233	159.6	12	2999	40.02	0.760	37.0	3.67	3.93	13.31
4	1×100MW 熔盐槽式	UT 槽, 70 管	3.6	760	218	149.3	16.5	3759	43.89	0.850	32.5	2.80	3.85	13.92
5	2×50MW 熔盐槽式	UT 槽, 70 管	3.8	760	2×118	2×81.2	19	2180	43.58	0.888	2×17.6	2×1.40	2×1.98	13.20
6	1×100MW 熔盐塔式	96.3m ² 定日镜	2.35	650	13900 台	133.9	13	2962	43.89	0.708	32.24	3.53	3.90	15.74

注：以上分析只是不考虑静态投资规模前提下理论追逐低LCOE结果，实际工程方案还应考虑静态投资规模以及各技术路线优缺点，实际运行情况等其他因素。一味追求低LCOE风险很高，应在现有技术能够顺利实现前提下以较小投资增幅实现较大LCOE降幅为目标，进一步优化各路线技术方案，相关分析见后续分析。

三、槽式光热电站技术经济论证

槽式光热发电现今提出的技术路线主要有导热油槽式光热电站和熔盐槽式光热电站，上述所指导热油为世界现有商业电站应用最广的联苯-联苯醚低共熔混合物，主要产品有首诺的VP-1和陶氏的DowthermA，下面简称：导热油。

在国内也有把传统传热介质更换为有机硅（下面简称：硅油）导热油的案例，本章节也针对此进行技术经济性论证。

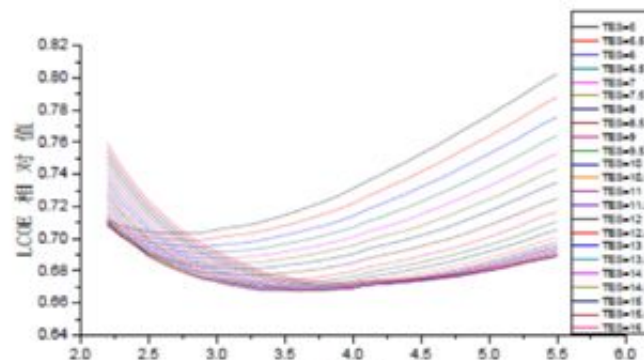
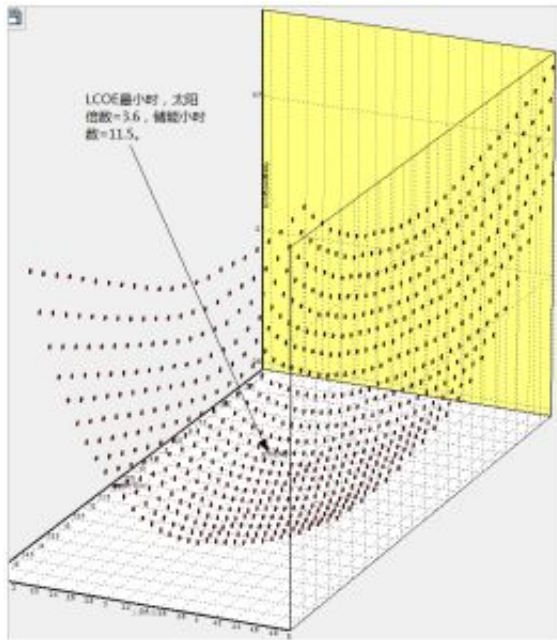
1 1×100MW槽式导热油光热发电技术方案

在本项目站址地规划场地及参考光资源情况下，利用SAM软件对该地建设一台100MW导热油槽式光热发电站进行模拟。

²⁾，储能小时数为11.5h。此时静态投资约为38.1（参考数据）亿元。

因此须在投资增幅和LCOE降幅之间找到一个合理的平衡点，争取用增加较小的静态投资换取LCOE的较大降幅。

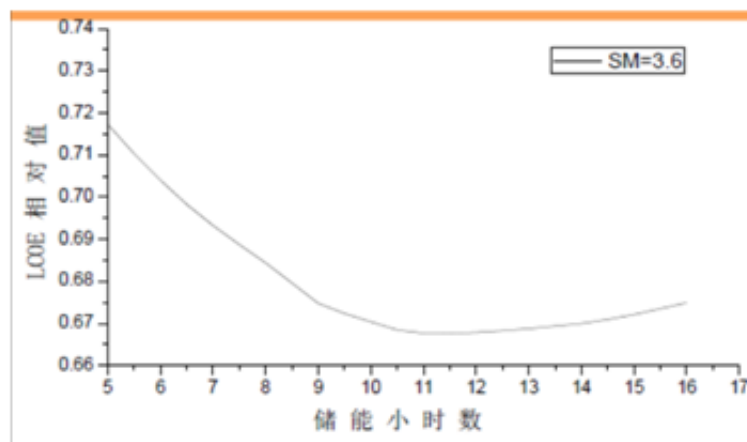
模拟结果三维图示如下图所示。

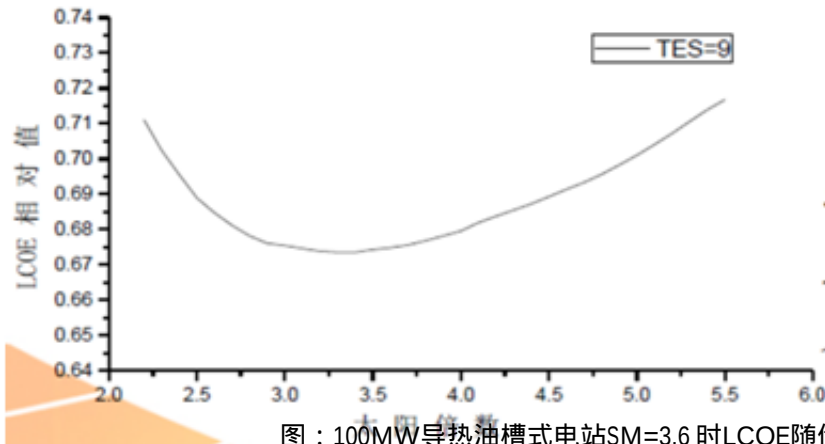


图：100MW导热油槽式电站LCOE在不同储能小时下随太阳倍数变化曲线

可以看出太阳倍数在2.5-3之间LCOE降低速率较大，并且此时的参考成本模型较稳定，有利于分析结果，因此选取太阳倍数2.7（集热场UT槽式：回路数为180，反射面积约为123.3万 m^2 ）较为合理。

且根据前述分析，在太阳倍数为3.6时，LCOE出现最小值，因此绘制太阳倍数为3.6时，LCOE随储能小时数的变化曲线，如下图所示。





图：100MW导热油槽式电站SM=3.6时LCOE随储能小时数的变化曲线

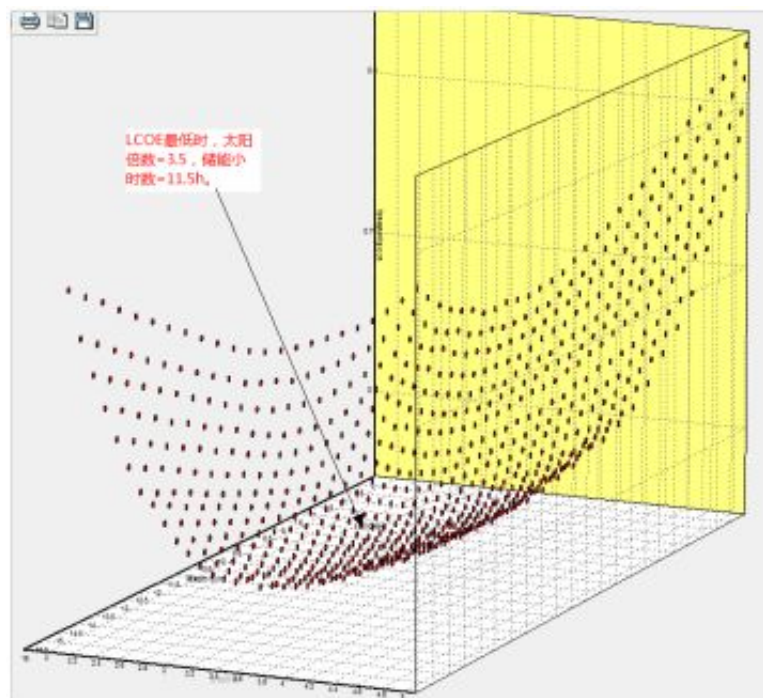
由图可知，当储能小时为8-10h时LCOE下降速率出现转折，是曲线导数的拐点位置。因此，将储能小时设置为8-10h是合理的。

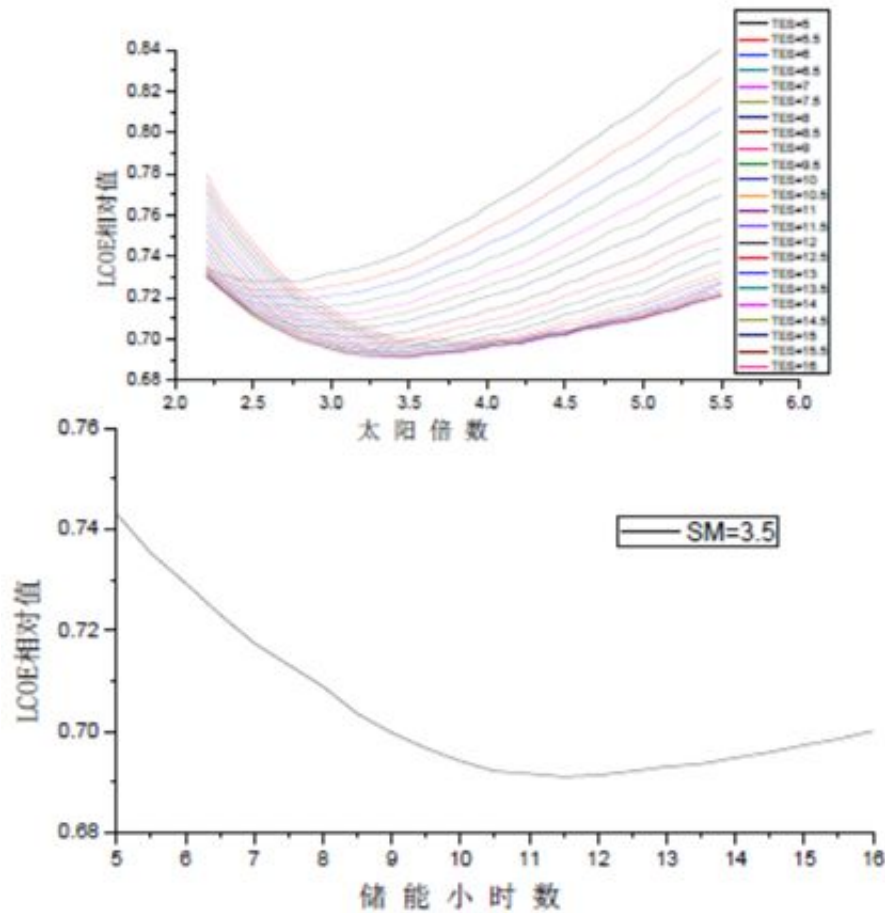
储能小时数定为9h后，从图中可以看出将太阳倍数定为2.7较为合理，其接近LCOE下降速率转折点，以较小静态投资能实现较大LCOE降幅。

因此1×100MW导热油槽式方案方案确定镜场太阳倍数为2.7，对应的集热场UT槽回路数为180个，反射面积为123.3万m²，储能小时为9h，对应的储能容量为2289MWh。

2.2×50MW槽式导热油光热发电技术方案

2个50MW槽式电站相邻配置完全一致，以下方案描述主要叙述单台50MW机组配置，2个50MW槽式电站配置即为1个槽式电站数量的2倍。





2×50MW导

热油槽式方案确定镜场太阳

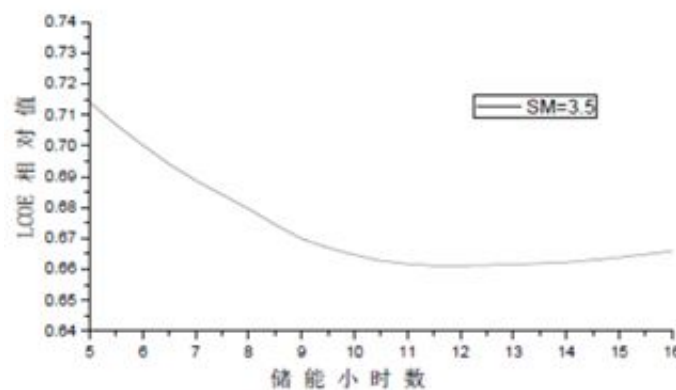
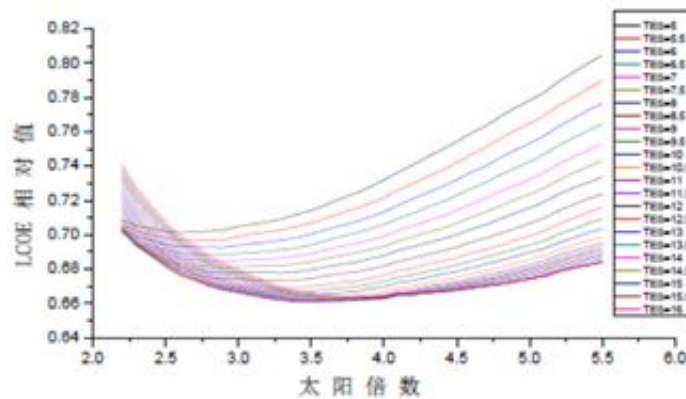
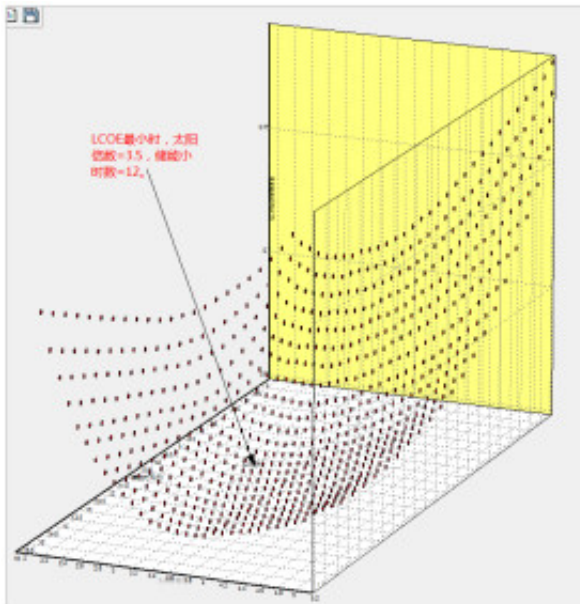
倍数为2.6，集热场ET槽回路数为191个，反射面积为62.5万m²，储能小时为9h，对应的储能容量为1168MWh_t。

3 硅油槽式光热电站技术经济论证

硅油传热介质高温性能稳定、运行温度区间宽（-40 ~ 425℃），因此硅油介质的使用将会提高汽轮机效率、降低储热成本、降低导热油防凝系统成本，简化导热油净化系统。

SAM模型建立基础：根据现有资料分析，硅油为传热介质的槽式光热系统中，系统省去了防凝装置、简化了传热介质净化系统、传热介质伴热电缆等，同时较大的温差也可使的熔盐储热介质质量变小，减少储罐成本。硅油为传热介质的槽式系统其他方面几乎与传统导热油介质槽式技术基本相同。

由以上分析建立硅油槽式电站模型，装机规模定为100MW。采用与100MW传统导热油槽式技术相同的集热系统。集热器主要采用现今应用于商业化电站的UT槽（也称终极槽）方案，真空集热管采用90管，模型运行结果如下图所示。



1 × 10

0MW硅油槽式

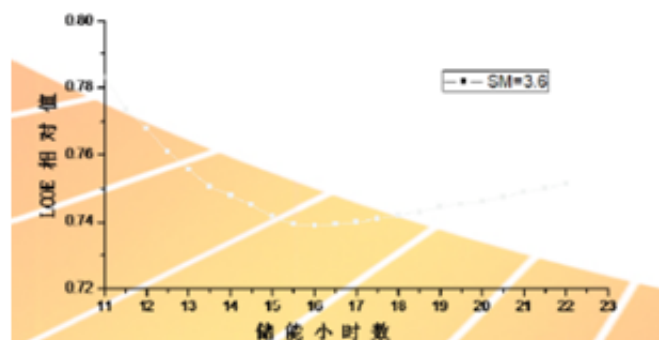
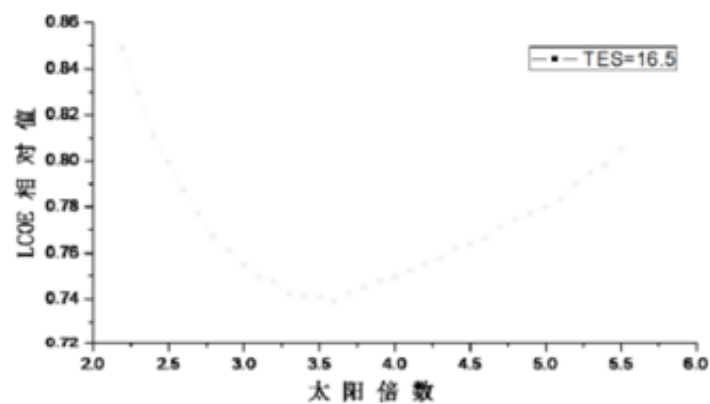
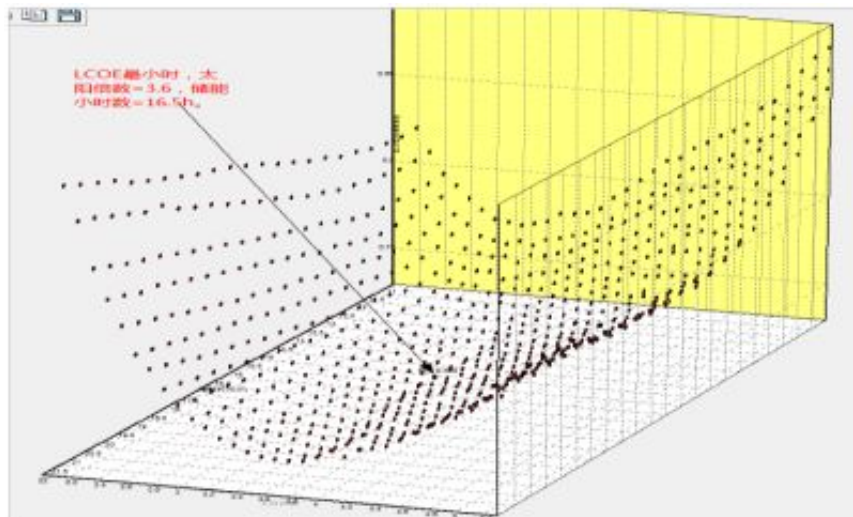
方案确定镜场太阳倍数为2.7,

对应的集热场UT槽回路数为180个, 反射面积为123.3万m², 储能小时为9.5h, 对应的储能容量为2374MWh。

4 熔盐槽式光热电站技术经济论证

工业上广泛应用的熔盐为硝酸熔盐, 其主要特点体现在: 热容量大、较低的粘度以及化学稳定性。二元盐是现今光热电站唯一商业化的传热介质。以下关于熔盐槽式光热电站的论述, 传热储热介质采用二元盐进行分析。

1) 1 × 100MW熔盐槽式光热发电技术方案



1 × 100

MW熔盐槽式方案

确定镜场太阳倍数为3，对应的集热

场UT槽回路数为182个，反射面积为124.7万m²，储能小时为13h，对应的储能容量为2962MWht。

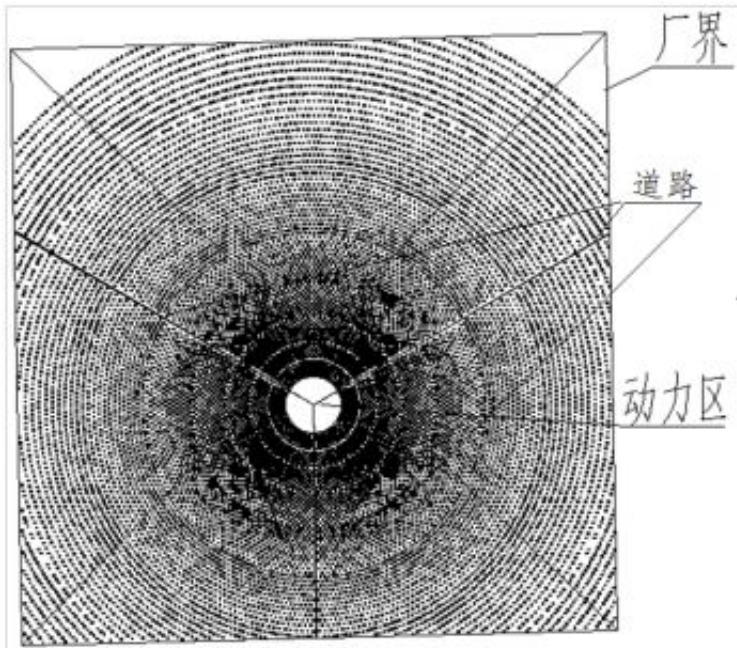
根据以上5种方案优化结果，列各个方案最优化结果如下表所示，主要方案包括：1 × 100MW导热油槽式，2 × 50MW导热油槽式，1 × 100MW硅油槽式，1 × 100MW熔盐槽式，2 × 50MW熔盐槽式。

表3 槽式方案配置及技术经济对比

序号	项目	1×100MW 导热油槽式	2×50MW 导 热油槽式	1×100MW 硅油槽式	1×100MW 熔盐槽式	2×50MW 熔 盐槽式
1	集热场方案	UT 槽, 90 集热管	ET 槽, 70 集 热管	UT 槽, 90 集热管	UT 槽, 70 集热管	UT 槽, 70 集热管
2	太阳倍数	2.7	2.6	2.7	3	3
	回路数	180	2×191	180	182	2×93
	反射面积 (万 m ²)	123.3	2×62.5	123.3	124.7	2×64.0
3	储能小时数 (h)	9	9	9.5	13	15
	储能容量 (MWh _t)	2289	2×1168	2374	2962	2×1721
4	发电机组综合 效率 (%)	39.32	38.54	40.02	43.89	43.58
5	全厂占地面积 估算 (km ²)	4.95	2×2.60	4.95	5.00	2×2.57
6	平均光电转化 效率 (%)	14.23	13.55	14.27	14.35	14.00
7	上网电量 (亿 kW·h)	2.996	2×1.442	3.033	2.416	2×1.195
8	LCOE (元)	0.772	0.802	0.764	0.855	0.882
9	静态投资 (亿 元)	30.45	2×15.55	30.28	28.03	2×14.62

四、塔式光热电站技术经济论证

对于塔式技术方案，前文已列举了在现有市场塔式各设备成本的基础上优化到的最优塔式配置，此时定日镜场面积为133.9万m²，储能小时为13h，储热容量为2962MWh_t，此时根据参考DNI，塔式电站的上网电量为约为3.53亿kWh/a，静态投资约为32.24亿元，其定日镜场布置如下图所示。

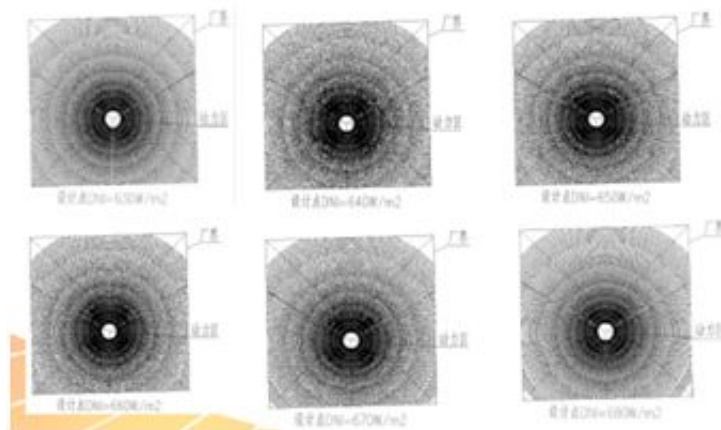


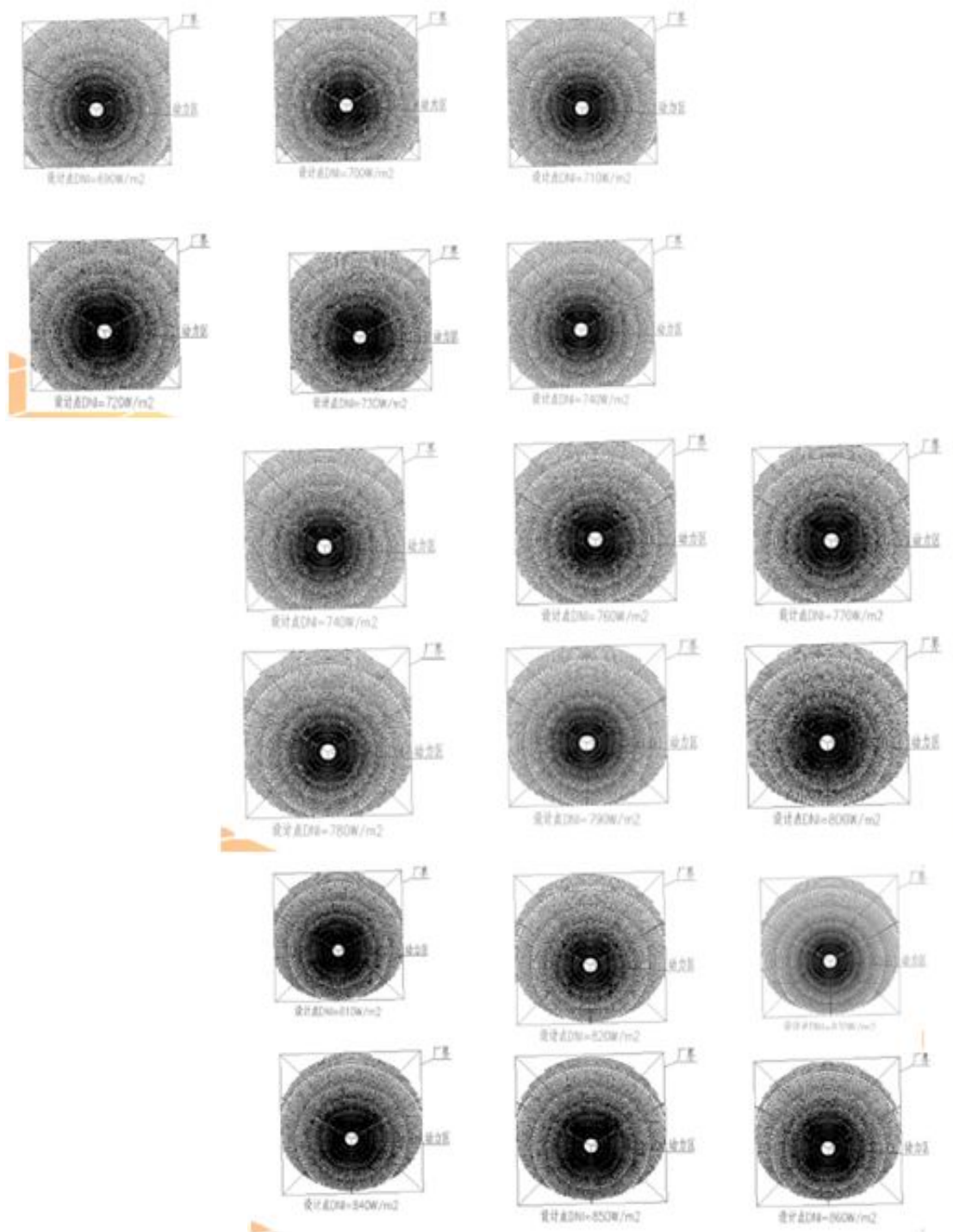
同时纵向对比100MW光热电站最优化配置下的LCOE，熔盐塔式电站由于其较好的系统效率，其LCOE是技术方案中最优的方案。

塔式优化过程不同于槽式，其镜场布置受设计点DNI选择的影响较大，不同的设计点DNI下布置镜场具有不同定日镜数量及定日镜定位。本次槽式和塔式技术路线对比分析当中为了简化过程，暂按较为常见96.3m²定日镜和常见535MW圆柱形吸热器进行对比，待下一步可单独比选塔式定日镜规格和吸热器。

绘制不同设计点DNI值下镜场如下图所示。

绘制了设计点DNI从630~900W/m²，间隔为10W/m²的定日镜场布置图：





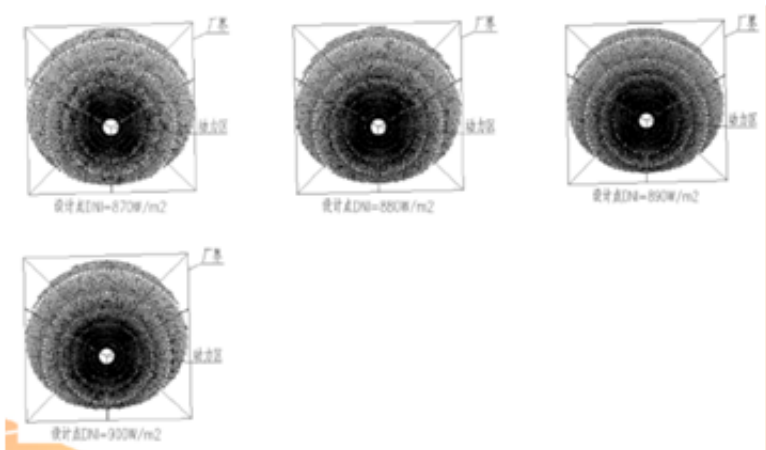
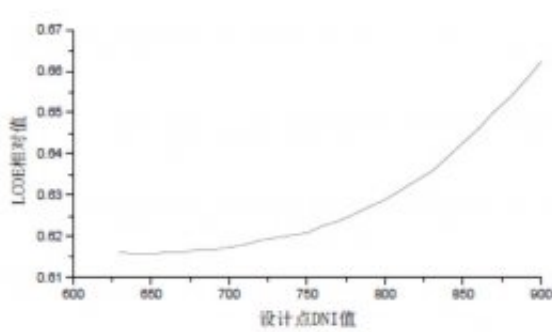


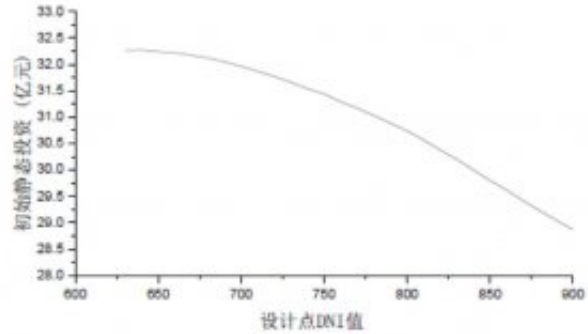
表4 不同设计点DNI值下熔盐塔式各方案技术经济参数

序号	设计点 DNI (W/m ²)	用厂界及道路修正 完定日镜数量	LCOE 相对值	静态投资估 值 (亿元)	上网电量 (亿 kWh)
1	630	13935	0.709	32.26	3.534
2	640	13935	0.708	32.27	3.538
3	650	13900	0.708	32.24	3.534
4	660	13882	0.709	32.22	3.530
5	670	13836	0.709	32.17	3.524
6	680	13794	0.709	32.12	3.517
7	690	13732	0.709	32.05	3.508
8	700	13650	0.710	31.96	3.495
9	710	13571	0.711	31.87	3.481
10	720	13489	0.712	31.77	3.466
11	730	13387	0.713	31.66	3.448
12	740	13294	0.713	31.54	3.432
13	750	13207	0.714	31.44	3.419
14	760	13085	0.716	31.29	3.393
15	770	12983	0.717	31.17	3.371
16	780	12866	0.719	31.03	3.346
17	790	12747	0.721	30.89	3.322
18	800	12613	0.723	30.74	3.292
19	810	12469	0.726	30.57	3.263
20	820	12317	0.729	30.38	3.228
21	830	12156	0.731	30.20	3.192
22	840	11992	0.735	30.00	3.152
23	850	11823	0.739	29.80	3.107
24	860	11663	0.743	29.62	3.069

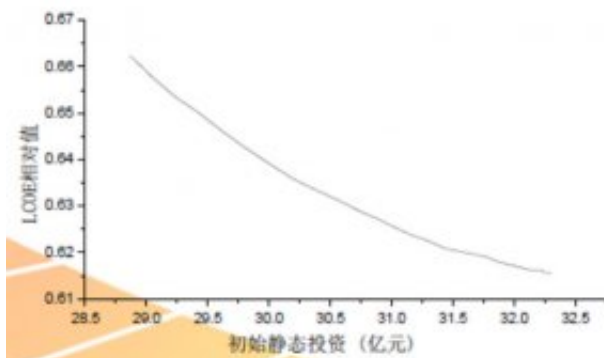
25	870	11496	0.748	29.42	3.026
26	880	11332	0.752	29.23	2.983
27	890	11175	0.756	29.05	2.942
28	900	11018	0.762	28.87	2.898



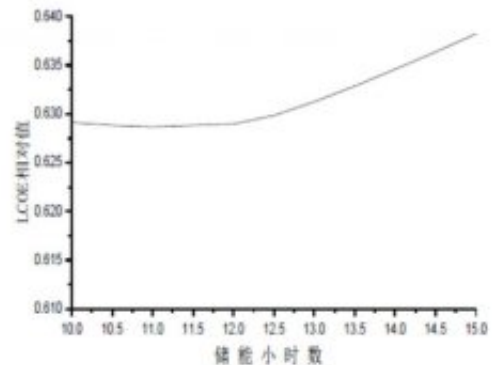
100MW熔盐塔式电站LCOE随设计点DNI值变化曲线



100MW熔盐塔式电站静态投资估值随设计点DNI值变化曲线



100MW熔盐塔式电站LCOE随静态投资估值变化曲线



100MW熔盐塔式电站设计点

DNI=780W/m²时LCOE随储能变化曲线

图：100MW熔盐塔式电站设计点DNI=780W/m²时LCOE随储能变化曲线

表5 本项目槽式与塔式方案对比

序号	项目	1×100MW 导热油槽式	1×100MW 熔盐塔式
1	回路数	180	12866（定日镜数量）
	反射面积（万 m ² ）	123.3	123.9
2	储能小时数（h）	9	12
	储能容量（MWh ² ）	2289	2734
3	平均光电转化效率（%）	14.23	16.23
4	LCOE（元）	0.772	0.719
5	上网电量（kW·h）	2.996 亿	3.346 亿
6	估算占地面积（km ² ）	4.95	6.86（圆形占地）
7	静态投资估算值（亿元）	30.45	31.10

注：1）初步估算，需在下一阶进一步优化。

2）厂址为类正方形，而塔式定日镜场为类圆形占地面积约 6.86km²。

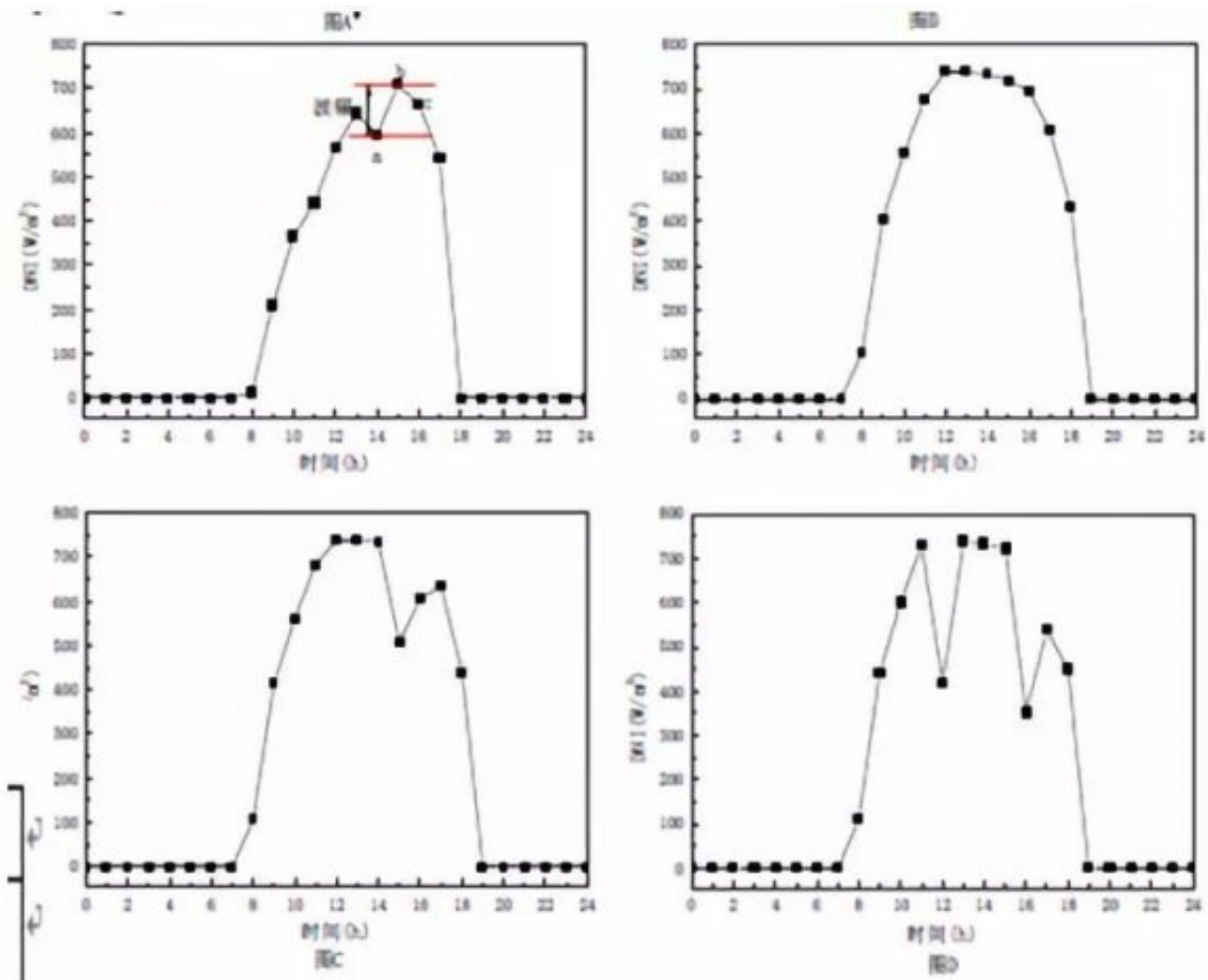
²，储能小时为12h。

五、影响光热电站正常运行因素分析

表6 不同地区光资源法向直接辐射波动频次出现大数统计

波动频次	DNI（地区 1）		DNI（地区 2）		DNI（地区 3）	
	波动 50% 出现天数	波动 30% 出现天数	波动 50% 出现天数	波动 30% 出现天数	波动 50% 出现天数	波动 30% 出现天数
1 次	31	38	51	71	57	68
2 次	11	24	17	34	18	28
3 次	3	4	2	18	11	17
4 次	3	4	0	1	2	7
≥5 次	1	5	1	1	0	5
总天数	49	75	71	125	88	125

注：本次只对参考 DNI 进行了分析，待下一步需要根据更准确 DNI 进一步核实。



(1) 气温影响分析

(2) 沙尘影响分析

(3) 风速影响分析

(4) DNI波动影响分析

(5) 地形坡度影响分析

(6) 其他因素影响分析： 辅助燃料供应 安全性防火 进口件

综上所述，太阳能热发电槽式塔式技术各有优势，选择什么样的技术路线，还需因地制宜，因地施策。但国际上成功案例已经表明将槽式和塔式两种太阳能热发电技术路线充分结合的可行性。（乔木森）

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/135128.html>