

# 从理论到实际： 各种客观因素对光热发电系统效率曲线的影响



常州龙腾光热科技股份有限公司  
卢智恒 博士  
2023年8月，长沙

1. 光热发电效率表达式及理论效率曲线
2. 实际情况导致的变化及实际效率曲线
3. 槽式技术降本的一些新措施
4. 龙腾光热公司及项目业绩介绍

# 光热发电系统效率的一般表达式

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_{\text{SolarField}} \cdot \eta_{\text{PowerCycle}} \\ &= \frac{Q_{\text{absorbed}} - Q_{\text{lost}}}{Q_{\text{incident}}} \cdot \eta_{\text{PowerCycle}} \\ &= \frac{\eta_{\text{optics}} \cdot \alpha \cdot I \cdot C \cdot A - Q_{\text{lost}}}{I \cdot C \cdot A} \cdot \eta_{\text{PowerCycle}} \\ &= \left( \eta_{\text{optics}} \cdot \alpha - \frac{Q_{\text{lost}}}{I \cdot C \cdot A} \right) \cdot \eta_{\text{PowerCycle}}\end{aligned}$$

以上表达式中，

$\eta_{\text{SolarField}}$ 为集热场的光→热转换效率

$Q_{\text{absorbed}}$ 为吸热器吸收的热量

$Q_{\text{incident}}$ 为投射到集热场的太阳能量

$\alpha$ 为吸热器的吸收率

$C$ 为集热场聚光比

$\eta_{\text{SolarField}}$ 为热力循环的热→电转换效率

$Q_{\text{lost}}$ 为吸热器损失的热量

$\eta_{\text{optics}}$ 为集热场光学效率（吸热器的吸收率除外）

$I$ 为入射太阳辐照强度（单位W/m<sup>2</sup>）

$A$ 为吸热器的集热面积（m<sup>2</sup>）

# 理想情况下的简化假设及表达式

$$\eta = \left( \eta_{\text{optics}} \cdot \alpha - \frac{Q_{\text{lost}}}{I \cdot C \cdot A} \right) \cdot \eta_{\text{PowerCycle}}$$

## ●理想情况下的简化假设：

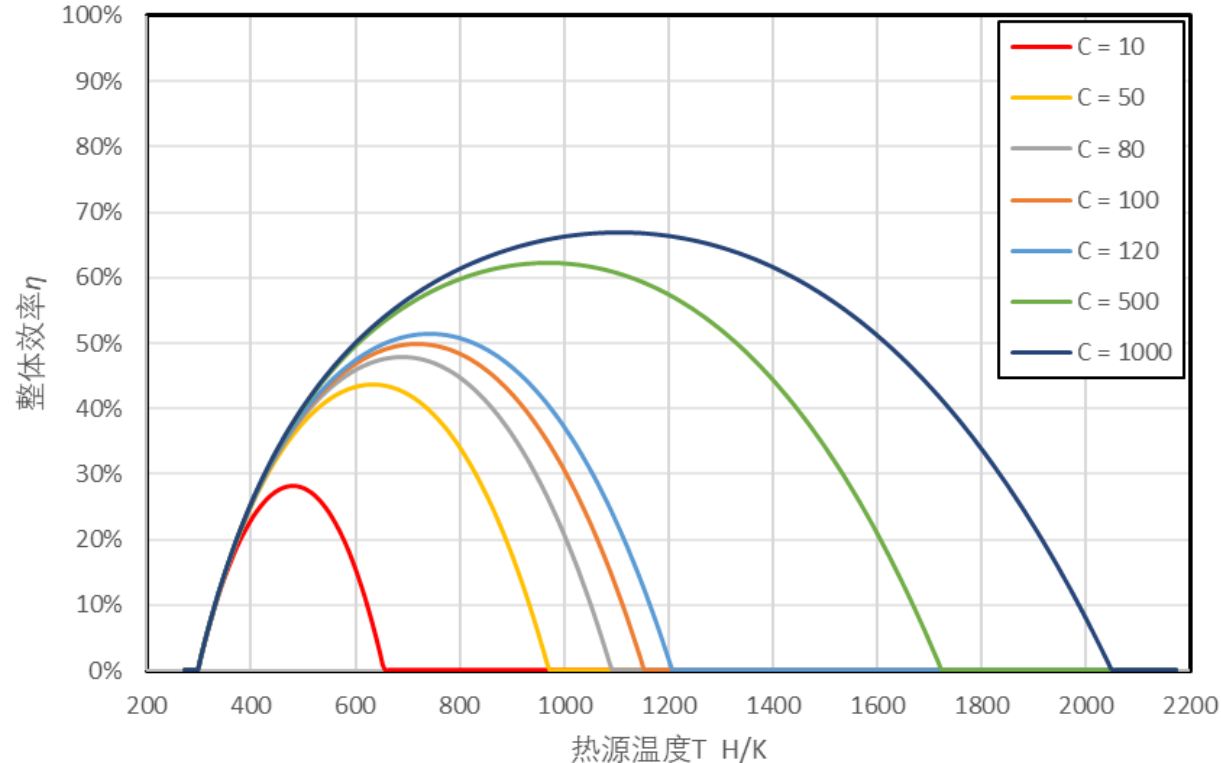
1. 除吸热器吸收率以外的集热场光学效率 $\eta_{\text{optics}} = 1$ ；
2. 吸热器的吸收率 $\alpha = 1$ ；
3. 热损失只考虑辐射热损失，忽略对流热损失，即 $Q_{\text{lost}} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{H}}^4$ ，其中 $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数， $\varepsilon$ 为吸热器表面发射率；假设为吸热器辐射为黑体辐射，发射率 $\varepsilon=1$ ，则 $Q_{\text{lost}} = A \cdot \sigma \cdot T_{\text{H}}^4$
4. 发电循环效率按卡诺循环效率考虑，即 $\eta_{\text{PowerCycle}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{H}}}$

将上述假设分别代入 $\eta$ 表达式，可得理想情况下的系统发电效率表达式：

$$\eta = \left( 1 - \frac{\sigma T_{\text{H}}^4}{IC} \right) \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{H}}} \right)$$

# 理论效率曲线

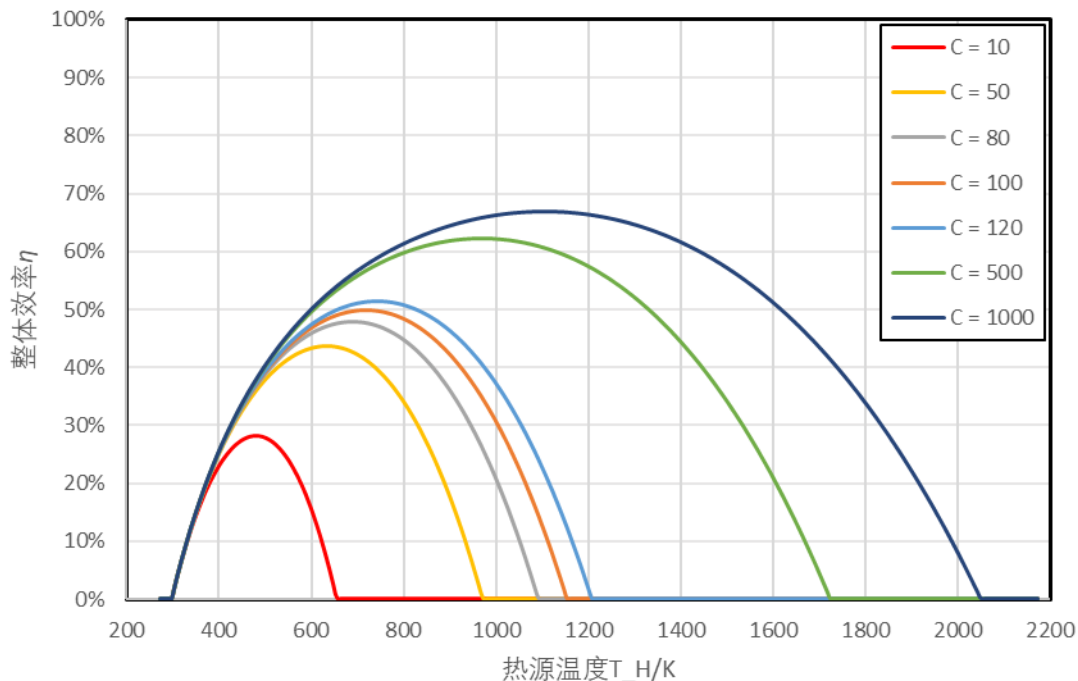
- 理想情况下的光热发电系统效率的表达式： $\eta = \left(1 - \frac{\sigma T_H^4}{IC}\right) \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$
- 令  $I=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_0=25^\circ\text{C}$ , 代入计算可得如下曲线：



参考资料：[https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power)

# 理论效率曲线的分析

1. 相同聚光比 $C$ 下，存在一个最佳热源温度 $T_{opt}$ ，使光热系统发电效率达到最高值 $\eta_{max}$ 。若热源温度进一步升高，集热效率不升反降。
2. 当聚光比 $C$ 增大时，对应的最佳热源温度 $T_{opt}$ 和最高效率 $\eta_{max}$ 也随之增加。
3. 两个不同聚光比的系统 $C_1 > C_2$ ，如果热源温度设计不合理，也可能出现效率倒挂 $\eta_1 < \eta_2$ 。



| 聚光比 $C$ | 最高效率 $\eta_{max}$ | 最佳热源温度 $T_{opt}/^{\circ}C$ |
|---------|-------------------|----------------------------|
| 10      | 26.5%             | 205                        |
| 50      | 43.3%             | 360                        |
| 80      | 47.7%             | 415                        |
| 100     | 49.7%             | 445                        |
| 120     | 51.3%             | 470                        |
| 500     | 62.3%             | 695                        |
| 1000    | 66.8%             | 830                        |

1. 光热发电效率表达式及理论效率曲线
- 2. 实际情况导致的变化及实际效率曲线**
3. 槽式技术降本的一些新措施
4. 龙腾光热公司及项目业绩介绍





# 实际情况导致的变化

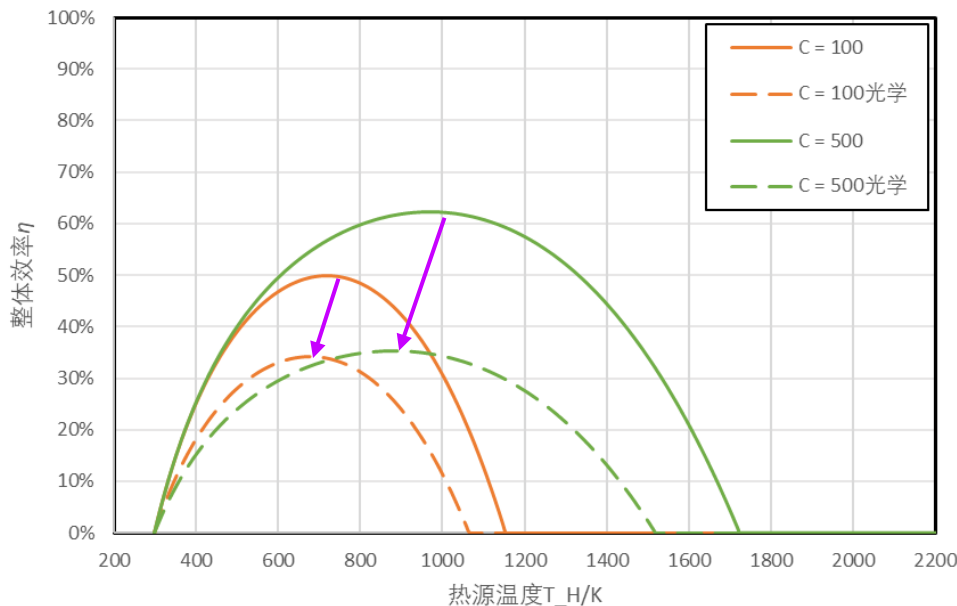
- 1. 考虑实际光学效率 $\eta_{optics} < 1$ ，其中包括余弦、反射镜反射率、反射镜面清洁度、吸热器清洁度、沿程光强损失、跟踪系统精度、玻璃罩管透过率（槽式）、集热管有效长度（槽式）、拦截率（包括面型精度、装配误差、风致扭曲及溢出）等损失；
- 2. 考虑吸热器吸收率 $\alpha < 1$ ，目前槽式的选择性吸收涂层和塔式的高吸收涂漆都可以使吸收率达到约95%的水平。

则整体效率表达式变为：

$$\eta = \left( \eta_{optics} \cdot \alpha - \frac{\sigma T_H^4}{IC} \right) \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

按照目前工艺水平， $\eta_{optics} \cdot \alpha$ 的数值约为：


|    | $\eta_{optics} \cdot \alpha$ 数值 | 备注                                      |
|----|---------------------------------|---|
| 槽式 | 72.4%                           | 其中 $\eta_{optics}=76%$ ， $\alpha=95.3%$ |
| 塔式 | 60.2%                           | 其中 $\eta_{optics}=63.4%$ ， $\alpha=95%$ |






# 影响光学效率的实际因素：气象条件

光热电站一般建设在沙漠、戈壁、荒地地区，大多面临沙尘、大风、低温等自然气象条件，在我国适合建设光热电站的区域主要分布在西北部，这些挑战尤为突出。

 **沙尘天气（大气通透度）**：普遍存在扬沙天气和浮尘，沙尘暴频发

 影响反射镜面清洁度、吸热器清洁度、沿程光强损失



 **大风**：普遍存在瞬时阵风、日内大风等天气

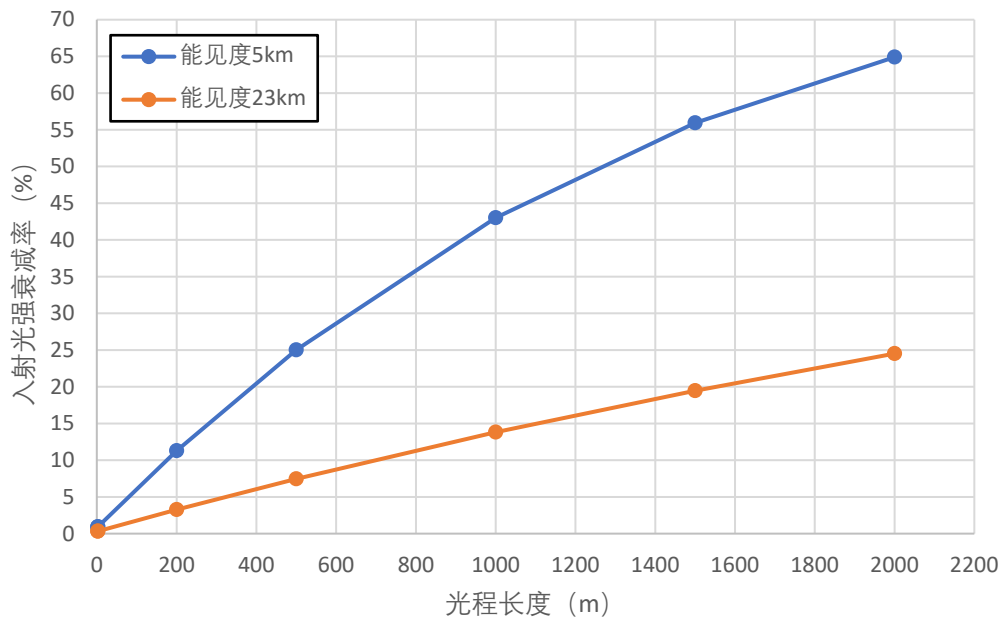
 影响拦截率



 **低温**：冬季极端低温零下20-30°C

# 影响光学效率的实际因素：沿程光强损失

参考沿程光强在不同大气能见度下的衰减计算结果：



|      | 光程    | 能见度5km<br>光程衰减 | 能见度23km<br>光程衰减 |
|------|-------|----------------|-----------------|
| 常规槽  | 2.11m | 0.90%          | 0.33%           |
| 大开口槽 | 2.87m | 0.94%          | 0.34%           |
| 定日镜  | 200m  | 11.30%         | 3.27%           |
| 定日镜  | 500m  | 25.02%         | 7.46%           |
| 定日镜  | 1000m | 43.02%         | 13.81%          |
| 定日镜  | 1500m | 55.93%         | 19.46%          |
| 定日镜  | 2000m | 64.90%         | 24.51%          |

参考资料：J. Ballestrín and A. Marzo, 2012. Solar radiation attenuation in solar tower plants. Solar Energy 86, 388–392.

# 影响光学效率的实际因素：拦截率



## 槽式

槽式反射镜与集热管为一体化固定安装，相对位置固定，整体跟踪太阳聚光，且反射光程较短，受风载荷时拦截率变化较小



## 塔式

塔式定日镜与吸热器分别独立安装，相对位置不固定，且反射光程较长，受风载荷时塔的摆动和定日镜的抖动，为定日镜正确对焦造成较大困难，导致出现冷热斑、焦点偏离、溢出损失等现象



# 实际情况导致的结果变化

3.a) 考虑**对流热损失**， $h$ 为混合对流换热系数 ( $W/m^2 \cdot K$ )， $T_w$ 为吸热器外壁面温度，则

$$Q_{lost} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_H^4 + A \cdot h \cdot (T_w - T_0)$$

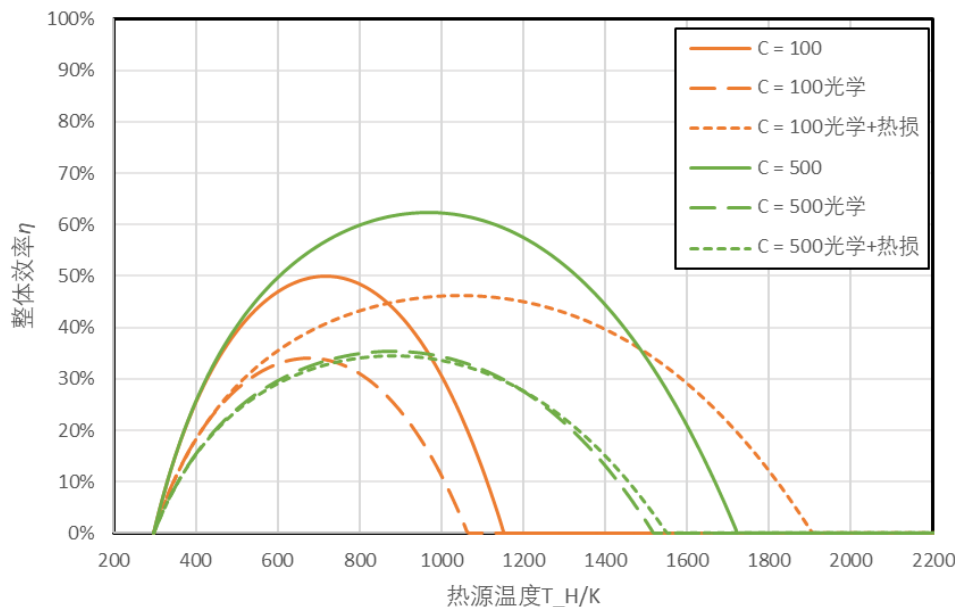
3.b) 考虑辐射热损失中吸热器的发射率实际值  $\varepsilon < 1$ ，目前槽式集热管选择性涂层在工作温度下的发射率约为**9.5%**，塔式吸热器高吸收涂漆在工作温度下的发射率为**80%—89%**。

则整体效率表达式变为：

$$\eta = \left[ \eta_{optics} \cdot \alpha - \frac{\sigma \varepsilon T_H^4}{IC} - \frac{h(T_w - T_0)}{IC} \right] \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$$

➤ 按照目前工艺水平， $h(T_w - T_0)$ 的值为：

|    | $h(T_w - T_0)$ 数值<br>( $W/m^2$ ) | 备注  |
|----|----------------------------------|---|
| 槽式 | 1296                             | 按3m/s空气横掠水平圆管，工作温度下 $T_w = T_0 + 70^\circ C$  |
| 塔式 | 10389                            | 按3m/s空气横掠竖直圆管，工作温度下 $T_w = T_H = 565^\circ C$ |



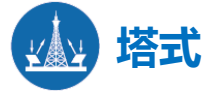


# 影响光学效率的实际因素：散热损失

无论对槽式还是塔式，低温都会增加吸热器、管道的辐射和对流散热损失，减少有效集热量，从而导致系统集热效率降低。但具体实践中，两者存在差别：



真空集热管的选择性吸收光学特性，能够有效减少辐射热损失；玻璃罩管和金属管之间的真空结构，可以极大减少对流换热损失。



吸热器的高温管屏是直接裸露在冷空气中，对流热损失较高；管屏外表面涂覆的油漆，虽然吸收率高但发射率也高，辐射热损失也处于较高水平。



# 实际情况导致的结果变化

4. 发电循环效率按**实际蒸汽朗肯循环效率**考虑，在卡诺循环效率表达式中乘以一个系数 $\eta_{discount} < 1$ ，代表实际朗肯循环效率与卡诺循环效率之间的差距，则

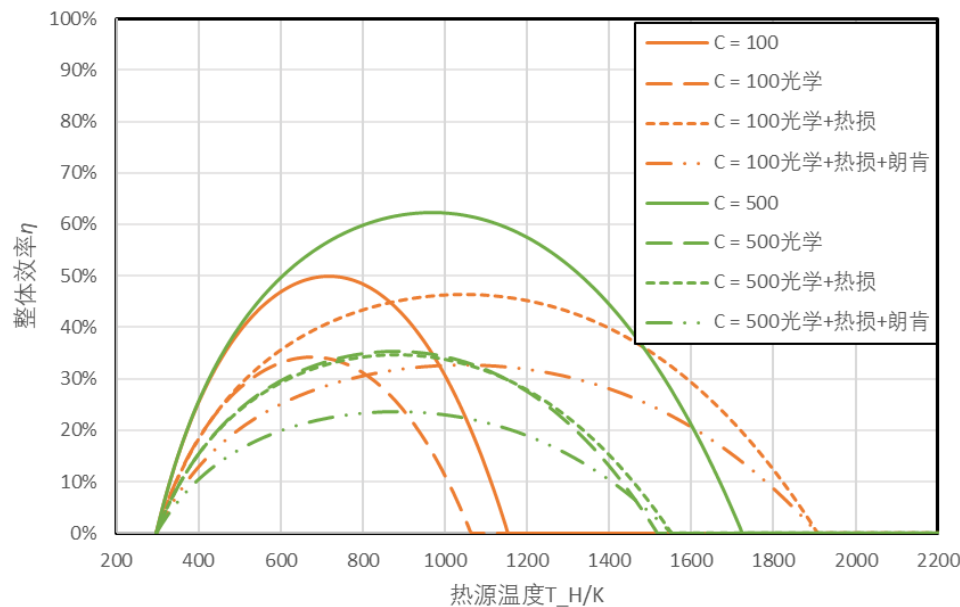
$$\eta_{PowerCycle} = \eta_{discount} \cdot \eta_{Carnot} = \eta_{discount} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

则整体效率计算表达式变为：

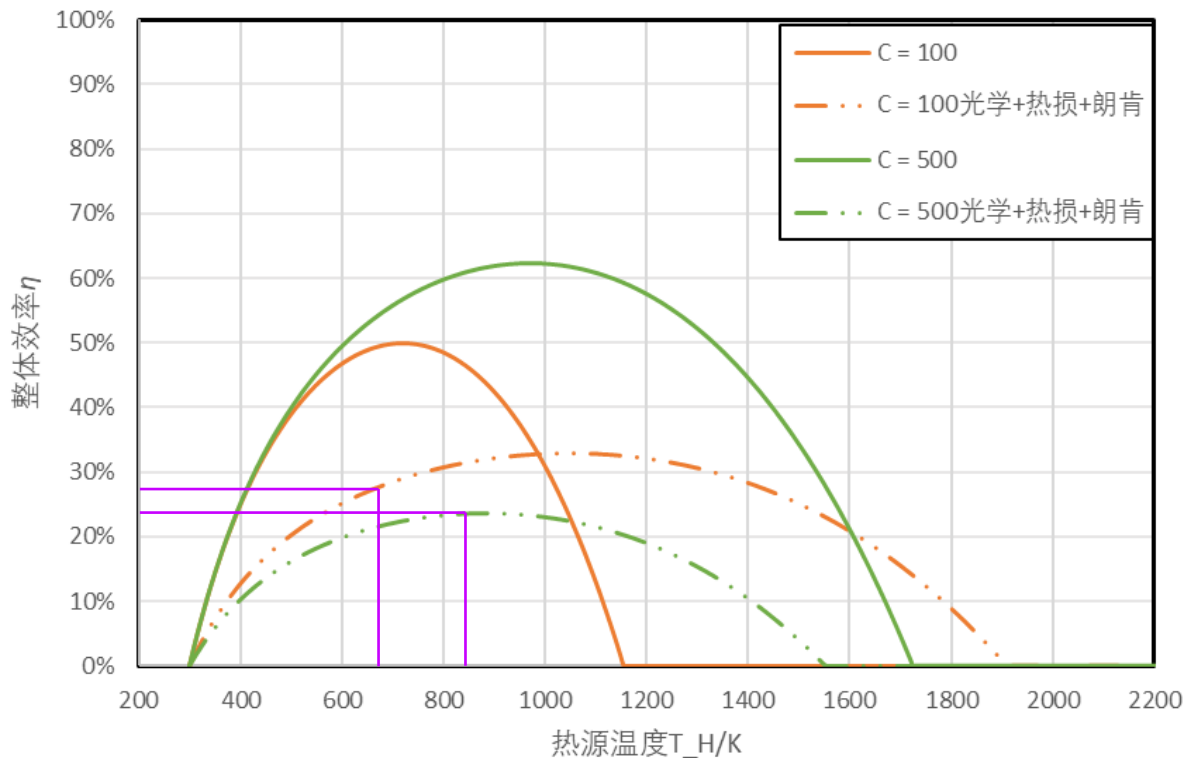
$$\eta = \left[ \eta_{optics} \cdot \alpha - \frac{\sigma \varepsilon T_H^4}{IC} - \frac{h(T_W - T_0)}{IC} \right] \times \eta_{discount} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

➤按照目前汽轮机工艺水平， $\eta_{discount}$ 的值为：

|    | $\eta_{discount}$ 数值 | 备注                |
|----|----------------------|-------------------|
| 槽式 | 0.707                | 按381°C实际汽机效率38.5% |
| 塔式 | 0.681                | 按535°C实际汽机效率43.0% |



# 最终结果：实际效率曲线



|    | 理论最高效率 $\eta_{max}$ | 理论最佳热源温度 $T_{opt}$ (°C) | 实际最高效率 $\eta'_{max}$ | 实际最佳热源温度 $T'_{opt}$ (°C) |
|----|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| 槽式 | 49.7%               | 445                     | 32.7%                | 775                      |
| 塔式 | 62.3%               | 695                     | 23.6%                | 610                      |

理论效率与实际效率出现了“反转”！

|    | 实际工作温度 $T'_H$ (°C) | 对应整体效率 $\eta$ |
|----|--------------------|---------------|
| 槽式 | 395                | 27.5%         |
| 塔式 | 565                | 23.5%         |

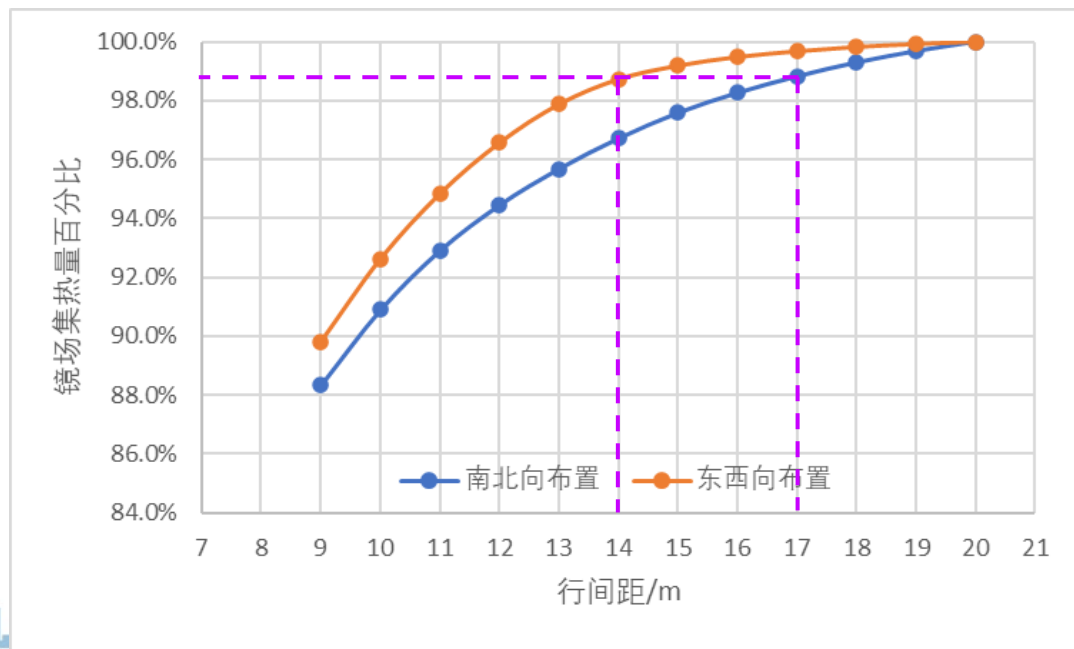
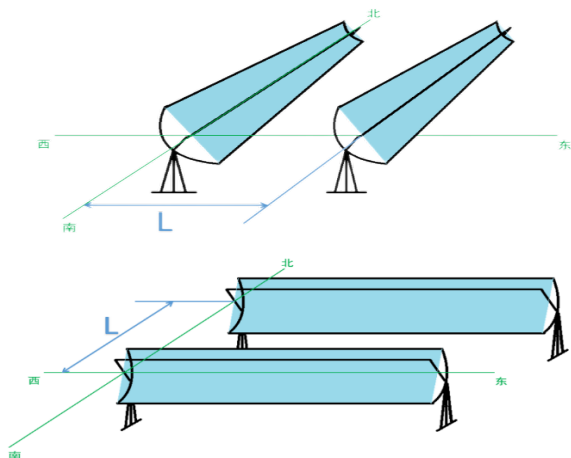


1. 光热发电效率表达式及理论效率曲线
2. 实际情况导致的变化及实际效率曲线
- 3. 槽式技术降本的一些新措施**
4. 龙腾光热公司及项目业绩介绍



# 采用东西向布置

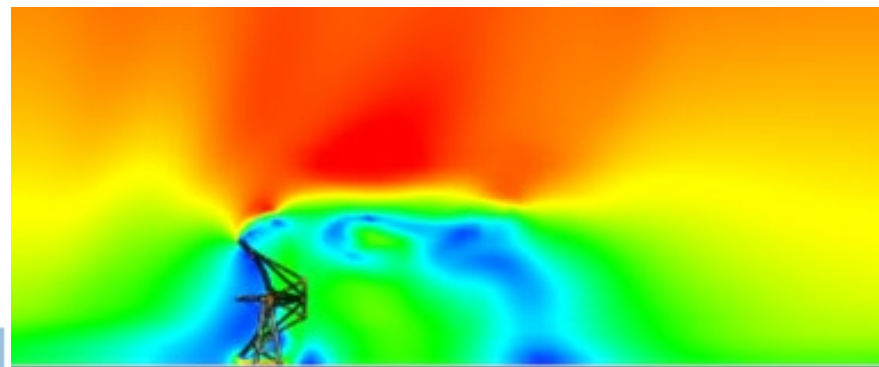
- ✓ 采用东西向布置方案，可缩小集热器行间距，有利于节省用地，降低征地费用，同时缩短管道长度，减少管道和导热油用量，场地平整的土石方量也相应减小。
- ✓ 与南北向布置的方案相比，可节省用地面积约20%。



# 优化集热器设计风载荷

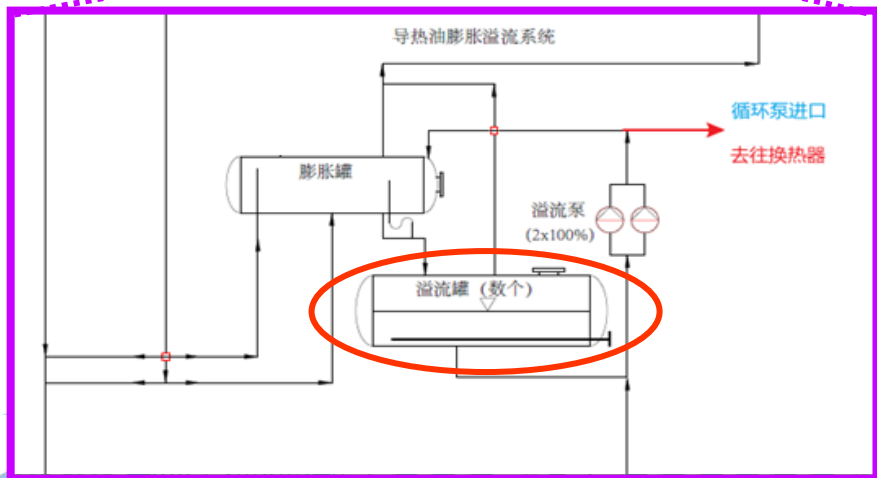
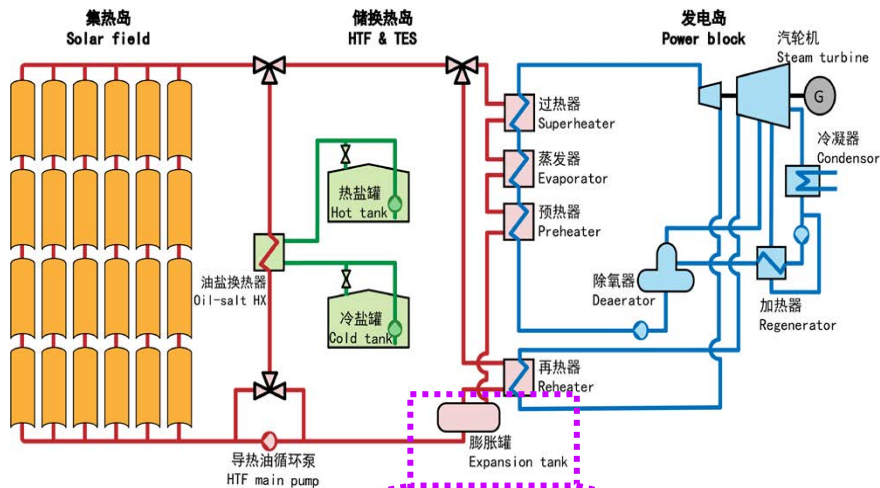
- ✓ 槽式集热器是风荷载主导控制的受力部件，因此设计风压的大小将直接影响集热器重量，并最终影响集热场的造价。
- ✓ 乌拉特中旗场址的设计基本风压在处于很高的水平，因此乌拉特项目的集热器耗钢量较大，集热场造价较高。
- ✓ 西北其他各省市地区的设计风压绝大部分都低于乌拉特中旗，因此这些地区的槽式集热器重量均有较大的成本优化空间，通过集热器的场址适应性优化设计，集热场造价有较大的下降潜力。

| 地区    | 50年一遇基本风压<br>kN/m <sup>2</sup> |
|-------|--------------------------------|
| 青海德令哈 | 0.35                           |
| 西藏日喀则 | 0.30                           |
| 甘肃酒泉  | 0.55                           |
| 宁夏中卫  | 0.45                           |
| 新疆哈密  | 0.60                           |
| 乌拉特中旗 | 0.60                           |



# 充分利用导热油的储热能力

- ✓ 以200MW槽式电站为例，系统共有约11000吨导热油和9400吨导热油管道。在电站正常运行时，导热油和管道处于 $300^{\circ}\text{C}$ - $400^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围之间；
- ✓ 导热油和管道中本身具有比热容，可以储存大量热量，是除了熔盐储热系统外另外一个巨大的储能热源，特别是溢流罐中的导热油；
- ✓ 经初步计算结果，系统导热油热量可供汽机满发约0.5小时，按照热量折算至熔盐用量，预计可减少熔盐用量约7100吨。



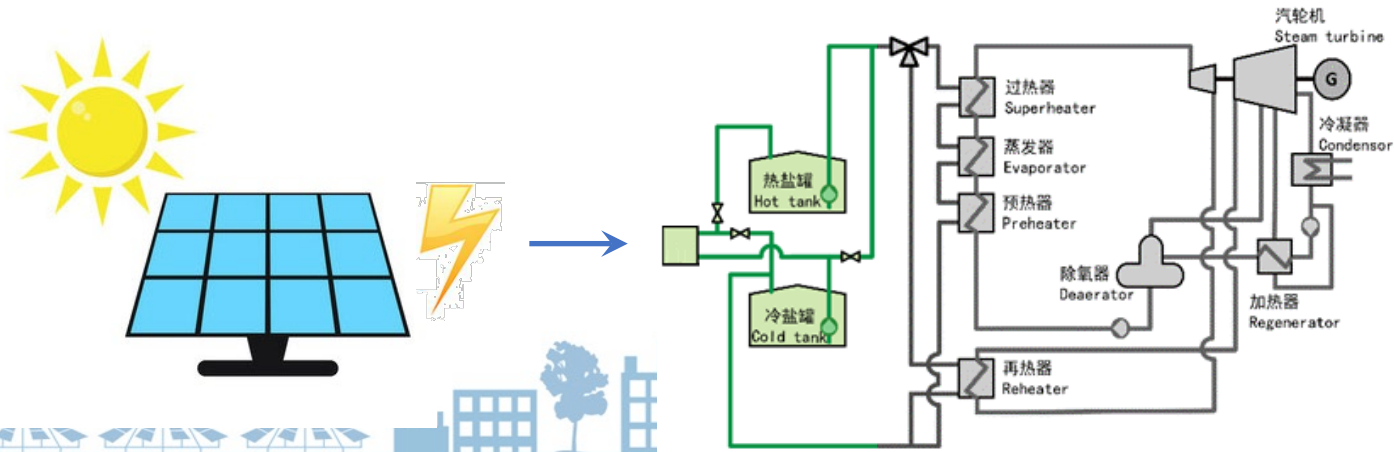
# 合理选取槽式电站的熔盐技术规格

| 熔盐技术要求<br>(GBT36376-2018太阳融盐) | 优等品   | 一等品   | 合格品   |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| 纯度要求 w/% $\geq$               | 99.83 | 99.55 | 99.34 |
| 水分 W/%                        | 0.1   | 0.2   | 0.3   |
| 水不溶物W/%                       | 0.03  | 0.05  | 0.1   |
| 氯化物 (以Cl计) W/%                | 0.01  | 0.03  | 0.05  |
| 氟化物 (以F计) W/%                 | 0.003 | 0.004 | 0.005 |
| 钡离子沉淀物(以SO4计) W/%             | 0.08  | 0.1   | 0.12  |
| 亚硝酸盐 (以NO2计) W/%              | 0.01  | 0.02  | 0.03  |
| 铵盐 (以NH4计) W/%                | 0.01  | 0.03  | 0.04  |



# 利用熔盐电加热器提温

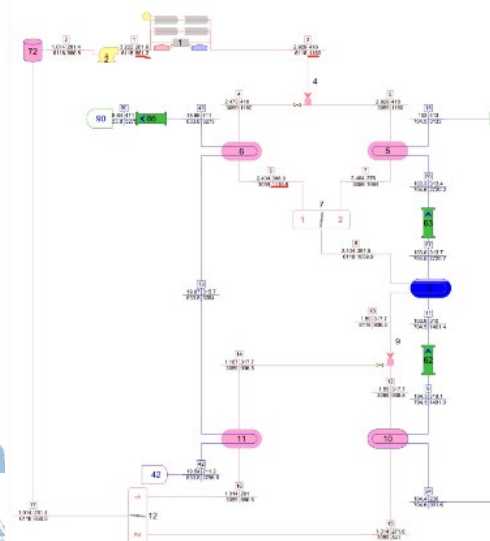
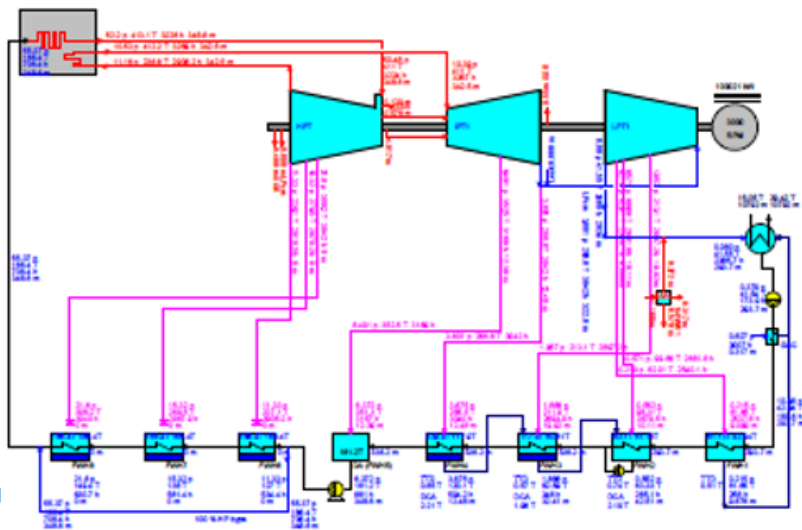
- ✓ 理论上，在光伏弃电时段，通过设置大功率电制热设备加热熔盐进行储能，减少弃电损失；
- ✓ 实际上，光伏弃电大部分情况会发生在下午光伏大发时段，此时日照强度很好，因此光热镜场集热量也很高，自身已经可以满足熔盐的充热需求，所以在此场景下熔盐系统如果吸收了光伏弃电，将导致光热镜场弃热。有两种情况吸收光伏弃电的逻辑可以成立：
  1. 在白天日照强度不高，并且发生光伏弃电；
  2. 用于将熔盐提温，例如 $380^{\circ}\text{C} \rightarrow 390^{\circ}\text{C}$ 或 $400^{\circ}\text{C}$ ，则不受前述限制。此情况下只提升熔盐温度，不增加熔盐用量，而最终效果仍然是增加了储热时长。
- ✓ 按照将熔盐提温 $10^{\circ}\text{C}$ 计算，200MW/6h槽式电站熔盐86000吨，需要100MW电加热器运行3.7小时。





# 降低汽轮机组给水温度

- ✓ 在目前每100MW装机规模配置80万平米集热场的前提下，槽式的发电效率是略显“过剩”的；
- ✓ 通过分析汽机循环和SGS的热平衡计算结果，可通过降低汽机给水温度，在牺牲一小部分汽机效率的条件下，降低SGS出口工质温度，扩大熔盐储热温差，减少熔盐用量，最终降低电站造价。
- ✓ 对于200MW/6h的槽式电站，经初步计算：
  1. 给水 $250^{\circ}\text{C} \rightarrow 230^{\circ}\text{C}$ ，汽机效率绝对值降幅 $< 0.3\%$ ，SGS出口油温降低 $5^{\circ}\text{C}$ ，熔盐用量减少3400吨；
  2. 给水 $250^{\circ}\text{C} \rightarrow 190^{\circ}\text{C}$ ，汽机效率绝对值降幅约 $1\%$ ，SGS出口油温降低 $17^{\circ}\text{C}$ ，熔盐用量减少11000吨。





- 光热发电系统的理论效率曲线是通过一系列假设简化后得到的结果。理论效率曲线显示，在相同聚光比下，存在一个最佳热源温度，使得系统的整体效率达到最高值，若热源温度继续升高，集热效率不升反降；当聚光比增大时，最佳热源温度和最高效率也随之升高。如果热源温度设计不合理，可能会出现聚光比与效率倒挂。
- 结合实际边界条件和工艺水平，将实际参数代入效率表达式后得到实际效率曲线，与理论效率曲线相差较大，槽式和塔式的实际效率出现了“反转”。结果显示，实际工作温度下槽式效率为27.5%，塔式为23.5%。
- 在实际工程设计中，槽式发电技术可以通过考虑采用东西向布置减少占地、优化设计风荷载降低集热器重量、充分利用导热油储热能力减少熔盐用量、合理选取熔盐技术规格、利用大功率电制热设备为熔盐提温、降低汽机给水温度扩大熔盐储热温差等手段，进一步降低造价，提升价格竞争力，促进行业降本。



1. 光热发电效率表达式及理论效率曲线
2. 实际情况导致的变化及实际效率曲线
3. 槽式技术降本的一些新措施
- 4. 龙腾光热公司及项目业绩介绍**



## ● 企业文化

### ➤ 使命

通过不断技术创新实现光热发电降本增效，推动光热技术的商业化应用与产业发展，为全球节能环保创造更多价值。

### ➤ 愿景

依托持续的技术创新与核心装备产业优势，成为拥有全球竞争力的光热发电整体解决方案提供商。

### ➤ 价值观

专注研发 追求卓越  
服务客户 创造价值

### ➤ 主营业务



真空集热管



槽式集热器



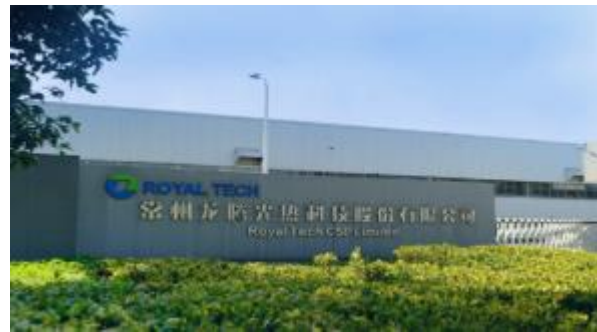
分布式光热

## ● 公司概况

常州龙腾光热科技股份有限公司成立于**2009年12月**，专业致力于太阳能光热发电技术与装备的研发应用，业务涵盖**高温真空集热管的生产与销售**，**聚光集热系统集成**，及**分布式太阳能冷热电联供系统的解决方案**。

龙腾光热作为国内最早进入光热领域的行业开拓者之一，自成立以来始终坚持集热管和集热系统的核心技术的研发与产业化。不仅实现了国产集热管再海外商业电站的首次应用，也凭借一系列的核心技术具备了在全球大规模部署聚光集热系统的能力。

龙腾光热还将通过持续不断地研发、创新和产业化，推动光热发电项目与分布式热利用项目的降本增效，将可靠、稳定、低成本的清洁能源输往全球，助力实现“2030碳达峰2060碳中和”的目标。



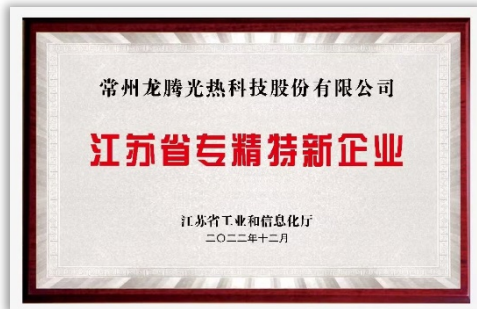
# 公司介绍



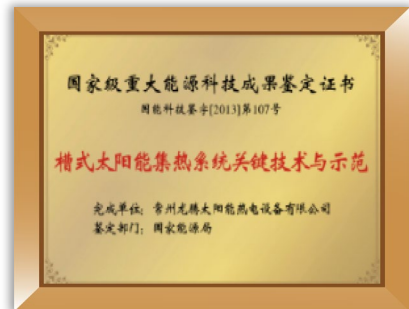
## ● 企业资质&获奖荣誉



2019苏南国家自主创新示范区潜在独角兽企业



2022江苏省专精特新企业



2013获国家能源局颁发“国家级重大能源科技成果”



江苏省太阳能光热发电工程中心



江苏省研究生工作站



2022江苏省高新技术企业证书



2017国际能源署技术创新奖



# 公司介绍

## ● 研发体系

24 项发明专利

32 实用新型专利



德国宇航中心DLR

全球最权威的集热管  
检测实验室QUARZ

德国



巴彦淖尔光热储能科创园

内蒙古光热发电装备制造集群



中科院电工所IEECAS

新能源技术及新型电力技术  
专业研究所先进涂层研发中心



德国SBP

光热行业全球业绩领先的结  
构设计公司

西班牙



乌拉特100MW光热电站

槽式导热油光热电站项目

中国



江苏常州制造中心

集热管生产基地



德国 Fraunhofer ISE

全球权威的涂层  
光学检测实验室



西班牙CIEMAT&PSA

全球领先的光热技术  
示范与检测机构



中科院宁波材料研究所

共建先进涂层研发中心

# 项目介绍：乌拉特100MW槽式光热项目

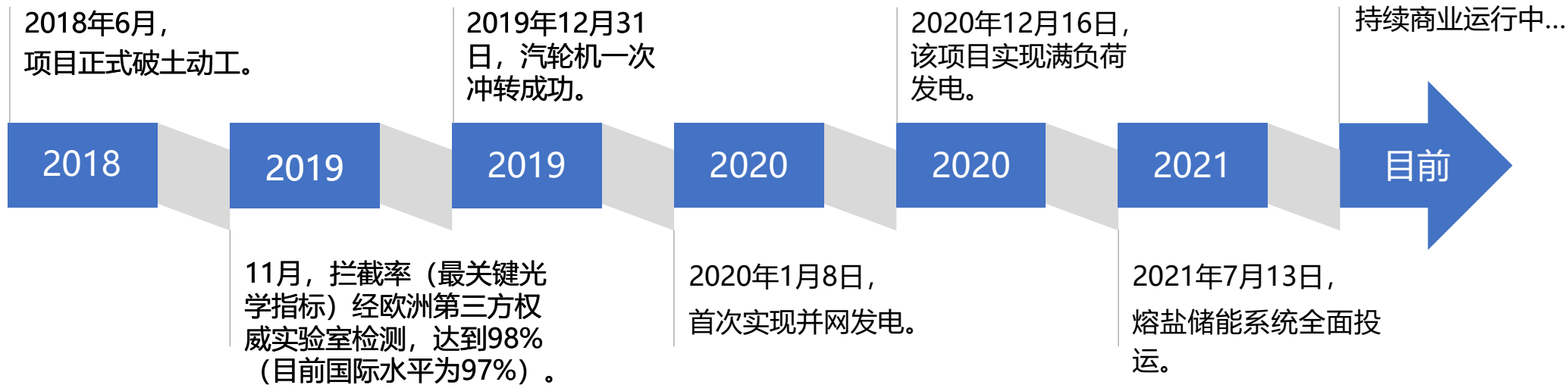
## 属于国家第一批光热发电示范项目



## 全球纬度（北纬41.5°）最高的槽式光热电站

- 装机容量：100MW
- 项目地点：内蒙古巴彦淖尔市乌拉特中旗
- 纬度：北纬41.5°
- 经度：东经108.8°
- 技术路线：抛物面槽式(ET)
- 传热介质类型：联苯联苯醚
- 集热面积：1151040m<sup>2</sup>
- 回路数量：352条
- 储热容量：10小时
- 储热介质：熔盐

# 项目介绍：乌拉特100MW槽式光热项目



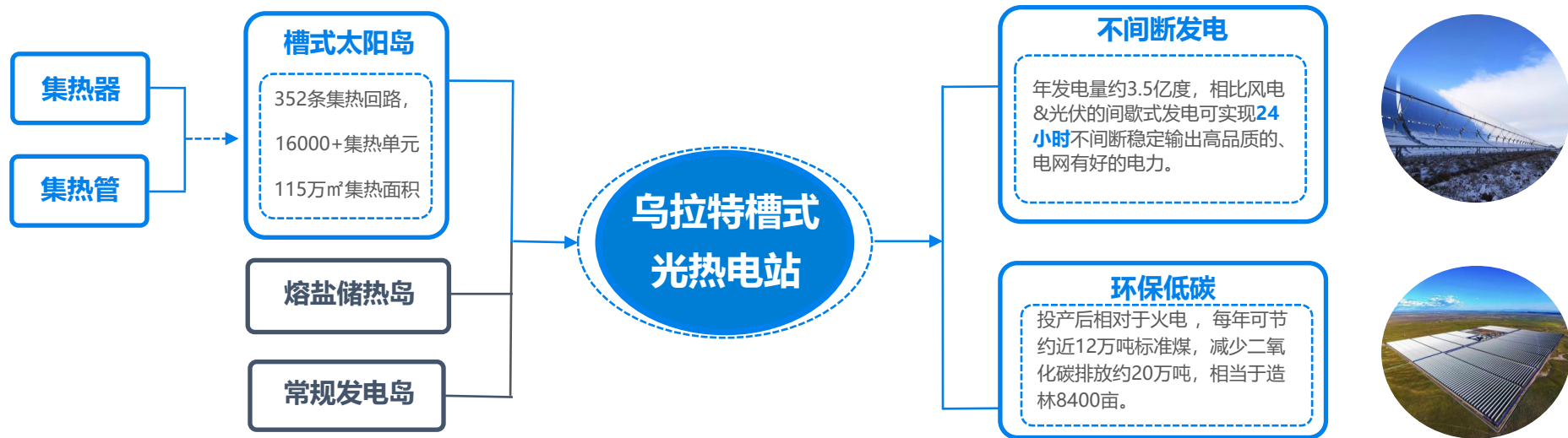


# 项目介绍：乌拉特100MW槽式光热项目

- 最高发电功率达**105.54MW**（设计值100MW）；
- 单日最高发电量**219.2**万千瓦时，相当于全天**22**小时满负荷发电；
- 2022年4月至2023年3月一个完整年度内，纯光热发电量**3.3**亿度；
- 2022年6月4日-15日，实现纯光热连续发电（无中间停机）12天，共发电**2232万**千瓦时，6月份单月发电量**4216万**千瓦时；
- 2023年6月1日-12日，连续12天未停机，共计发电**2307万**千瓦时，6月份单月发电量**5230万**千瓦时。

| 日期       | 天气   | 发电量[MWh] |
|----------|------|----------|
| 2022/6/4 | 晴    | 1544     |
| 6/5      | 晴    | 2192     |
| 6/6      | 多云~晴 | 1928     |
| 6/7      | 晴~多云 | 2056     |
| 6/8      | 多云~晴 | 1752     |
| 6/9      | 多云~晴 | 2088     |
| 6/10     | 多云   | 1928     |
| 6/11     | 晴    | 1920     |
| 6/12     | 晴    | 1784     |
| 6/13     | 晴    | 1736     |
| 6/14     | 晴    | 2080     |
| 6/15     | 多云~晴 | 1312     |
| 日期       | 天气   | 发电量[MWh] |
| 2023/6/1 | 晴    | 2008     |
| 6/2      | 晴    | 1928     |
| 6/3      | 晴    | 1872     |
| 6/4      | 晴    | 1848     |
| 6/5      | 晴    | 2040     |
| 6/6      | 多云~晴 | 1752     |
| 6/7      | 多云   | 1472     |
| 6/8      | 晴    | 1808     |
| 6/9      | 晴    | 2176     |
| 6/10     | 晴    | 1976     |
| 6/11     | 晴    | 2056     |

# 项目介绍：乌拉特100MW槽式光热项目



该项目采用龙腾光热核心技术和装备, 实现了中国槽式光热电站领域的首次国产化替代, 性能指标达到国际先进水平, 也成为国内同纬度下第一个满负荷发电的光热项目, 圆满完成了国家主管部门的示范目标。

专注研发 追求卓越  
成就员工 创造价值



# 感谢聆听!

常州龙腾光热科技股份有限公司  
**Royal Tech CSP Limited**

地址：江苏省常州市武进区牛塘镇虹光路12号  
NO.12 Hongguang Road, Wujin District,  
Changzhou City, Jiangsu Province, China

<http://www.royalcsp.com>

Tel:0519-69695673



光热利用方案咨询 胡先生  
邮箱: [joey.hu@royalcsp.com](mailto:joey.hu@royalcsp.com)



真空集热管 徐先生  
邮箱: [xujunjie@royalcsp.com](mailto:xujunjie@royalcsp.com)



供应链 霍先生  
邮箱: [lisen.huo@royalcsp.com](mailto:lisen.huo@royalcsp.com)