



上海发电设备成套设计研究院有限责任公司  
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE CO.,LTD

# 集成吸收式热泵的超临界CO<sub>2</sub>循环

## 聚光太阳能热发电系统

郑开云

2019年8月27日

[www.speri.com.cn](http://www.speri.com.cn)



## 集成吸收式热泵的超临界CO<sub>2</sub>循环聚光太阳能热发电系统

- 一、研究背景
- 二、系统布置
- 三、热力分析
- 四、经济性分析

# 1、研究背景



**国家太阳能光热产业技术创新战略联盟**  
China Solar Thermal Alliance

- 2016年9月14日，国家能源局正式发布关于建设太阳能热发电示范项目的通知，共20个项目入选中国首批光热发电示范项目名单，据统计总装机容量为134.9万千瓦。根据名单显示，这20个项目包括9个塔式电站项目，7个槽式电站项目和4个菲涅尔电站项目，无碟式项目入围。其中有10个示范项目来自联盟理事成员单位。

(<http://cnste.org/html/jiaodian/2016/0914/367.html>)

序号	项目名称	项目投资企业	技术路线	技术来源与系统集成企业	系统转换效率(企业承诺)
<b>塔式</b>					
1	青海中控太阳能发电有限公司德令哈塔式5万千瓦光热发电项目	青海中控太阳能发电有限公司	塔式塔式, 6小时熔融盐储热	浙江中控太阳能技术有限公司	18%
2	北京首航艾启威节能技术股份有限公司敦煌塔式10万千瓦光热发电示范项目	北京首航艾启威节能技术股份有限公司	塔式塔式, 11小时熔融盐储热	北京首航艾启威节能技术股份有限公司	16.01%
3	中国电建西北勘测设计研究院有限公司共和塔式5万千瓦光热发电项目	中国电建西北勘测设计研究院有限公司	塔式塔式, 6小时熔融盐储热	浙江中控太阳能技术有限公司/中国电建西北勘测设计研究院有限公司	15.54%
4	中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司哈密塔式5万千瓦光热发电项目	中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司	塔式塔式, 8小时熔融盐储热	浙江中控太阳能技术有限公司/中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司	15.5%
5	国电投黄河上游水电开发有限责任公司德令哈工质塔式13.5万千瓦光热发电项目	国电投黄河上游水电开发有限责任公司	水工质塔式, 3.7小时熔融盐储热	美国亮源能源有限公司/中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司	15%
6	中国三峡新能源有限公司金塔塔式10万千瓦光热发电项目	中国三峡新能源有限公司	塔式塔式, 8小时熔融盐储热	北京首航艾启威节能技术股份有限公司/中国电建西北勘测设计研究院有限公司	15.82%
7	达华工程管理(集团)有限公司尚义水工质塔式5万千瓦光热发电项目	达华工程管理(集团)有限公司, 中国科学院电工研究所	水工质塔式, 4小时熔融盐储热	中国科学院电工研究所	17%
8	玉门鑫能光热第一电力有限公司塔式5万千瓦光热发电项目	玉门鑫能光热第一电力有限公司	塔式塔式, 塔岩二次反射6小时	上海晶能新能源有限公司/江苏鑫展光热技术有限公司	18.5%
9	北京国华电力有限责任公司玉门塔式10万千瓦光热发电项目	北京国华电力有限责任公司	塔式塔式, 10小时熔融盐储热	北京首航艾启威节能技术股份有限公司	16.5%
<b>槽式</b>					
1	常州龙腾太阳能热发电设备有限公司玉门东镇导热槽式5万千瓦光热发电项目	常州龙腾太阳能热发电设备有限公司	导热槽式, 7小时熔融盐储热	常州龙腾太阳能热发电设备有限公司	24.6%
2	深圳市金凯能源科技有限公司阿克塞5万千瓦塔式光热发电项目	深圳市金凯能源科技有限公司	塔式槽式, 15小时熔融盐储热	天津滨海光热发电投资有限公司	21%
3	中海阳能源集团股份有限公司玉门东镇导热槽式5万千瓦光热发电项目	中海阳能源集团股份有限公司	导热槽式, 7小时熔融盐储热	中海阳能源集团股份有限公司	24.6%
4	内蒙古中核龙腾新能源有限公司乌拉特中旗导热槽式10万千瓦光热发电项目	内蒙古中核龙腾新能源有限公司	导热槽式, 4小时熔融盐储热	常州龙腾太阳能热发电设备有限公司/内蒙古中核龙腾新能源有限公司	26.76%
5	中广核太阳能德令哈有限公司导热槽式5万千瓦光热发电项目	中广核太阳能德令哈有限公司	导热槽式, 9小时熔融盐储热	中广核太阳能开发有限公司	14.03%
6	中节能环保武威太阳能发电有限公司吉雷导热槽式10万千瓦光热发电项目	中节能环保武威太阳能发电有限公司	导热槽式, 7小时熔融盐储热	常州龙腾太阳能热发电设备有限公司/中节能环保股份有限公司	14%
7	中阳张家口察北能源有限公司塔式槽式6.4万千瓦光热发电项目	中阳张家口察北能源有限公司	塔式槽式, 16小时熔融盐储热	天源公司/中阳张家口察北能源有限公司	21.5%
<b>菲涅尔式</b>					
1	兰州大成科技股份有限公司敦煌塔式线性菲涅尔式5万千瓦光热发电示范项目	兰州大成科技股份有限公司	塔式线性菲涅尔式, 13小时熔融盐储热	兰州大成科技股份有限公司	16.7%
2	北方联合电力有限责任公司乌拉特旗导热槽菲涅尔式5万千瓦光热发电项目	华能北方联合电力有限责任公司	导热槽菲涅尔式, 6小时熔融盐储热	中国华能集团清洁能源技术研究院	18.5%
3	中信张北新能源开发有限公司水工质类菲涅尔式5万千瓦光热发电项目	中信张北新能源开发有限公司	水工质类菲涅尔式, 14小时全固态配方混凝土储热	北京兆阳光热技术有限公司	10.5%
4	张北华强兆阳能源有限公司张家口水工质类菲涅尔式5万千瓦太阳能热发电项目	张北华强兆阳能源有限公司	水工质类菲涅尔式, 14小时全固态配方混凝土储热	北京兆阳光热技术有限公司	11.9%

# 1、研究背景

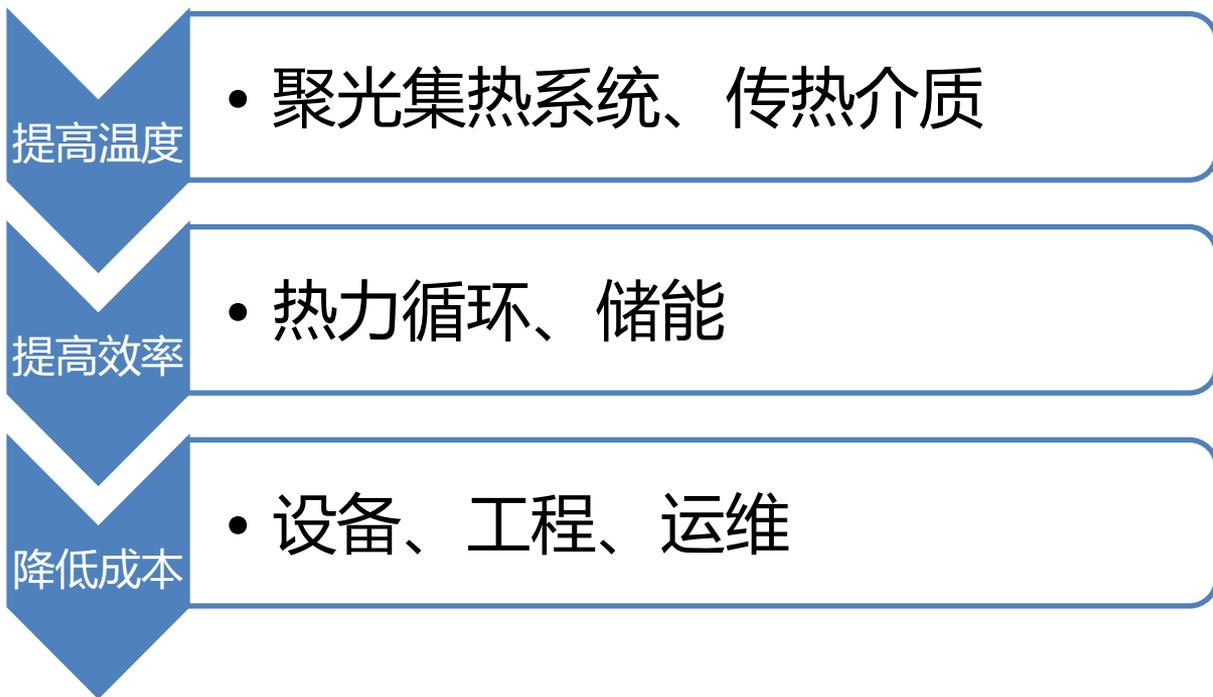
□ 相关数据表明，首批示范电站的初始投资成本约 ¥21.0/W 至 ¥39.7/W

Number	Projects	DNI (kWh/m <sup>2</sup> /yr)	Total investment (million RMB)	Annual power generation (GWh/yr)	TES capacity	TES medium
ST <sub>1</sub> [32]	Qinghai Delingha 50 MW MS ST-CSP plant	1,976	1,050	136	6 h	MS
ST <sub>2</sub> [33]	Dunhuang 100 MW MS ST-CSP plant	2,000	3,040	483	11 h	MS
ST <sub>3</sub> [34]	Qinghai Gonghe 50 MW MS ST-CSP plant	1,900	1,222	156.9	6 h	MS
ST <sub>4</sub> [35]	Xinjiang Hami 50 MW MS ST-CSP plant	1,920	1,580	198.4	8 h	MS
ST <sub>5</sub> [32]	Delingha 135 MW DSG ST-CSP plant	1,900	–	–	3.7 h	MS
ST <sub>6</sub> [36]	Gansu Jinta 100 MW MS ST-CSP plant	1,900	2,500	323.2	8 h	MS
ST <sub>7</sub> [37]	Yumen 50 MW MS ST-CSP plant	1,800	1,790	216	9 h	MS
ST <sub>8</sub> [38]	Yumen 100 MW MS ST-CSP plant	1,800	3,000	388	10 h	MS
ST <sub>9</sub> [32]	Shangyi 50 MW DSG ST-CSP plant	1,600	–	–	12 h	MS
PT <sub>1</sub> [39]	Yumen East Town 50 MW TO PT-CSP plant (Royal tech CSP Co., Ltd.)	1,800	1,344.77	169.3	9 h	MS
PT <sub>2</sub> [32]	Gansu Akesai 50 MW MS PT-CSP plant	2,056.5	1,986	256	15 h	MS
PT <sub>3</sub> [32]	Yumen East Town 50 MW TO PT CSP plant (Rayspower Energy Group Co., Ltd.)	1,800	–	–	9 h	MS
PT <sub>4</sub> [40]	Urat Middle Banner 100 MW TO PT-CSP plant	2,025	2,800	350	10 h	MS
PT <sub>5</sub> [32]	Delingha 50 MW TO PT-CSP plant	1,976	1,938.38	225	9 h	MS
PT <sub>6</sub> [32]	Gansu Gulang 100 MW TO PT-CSP plant	1,913	–	–	7 h	MS
PT <sub>7</sub> [41, 42]	Zhangjiakou 64 MW MS PT-CSP plant	1,700	1,800	300	16 h	MS
LF <sub>1</sub> [43]	Dacheng Dunhuang 50 MW MS LF-CSP plant	2,000	1,680	201.5	13 h	MS
LF <sub>2</sub> [32]	Zhangbei 50 MW DSG LF-CSP plant	1,750	–	–	14 h	ASSC
LF <sub>3</sub> [44, 45]	Huaqiang Zhaoyang Zhangjiakou 50 MW DSG LF-CSP plant	1,750	1,800	250	14 h	ASSC
LF <sub>4</sub> [46]	Urat Middle Banner 50 MW TO LF-CSP plant	2,025	1,476	195.88	8 h	MS

Note. MS: molten salt; TO: thermal oil; ASSC: all solid state concrete; DSG: direct steam generation.

# 1、研究背景

## □ 技术创新路径



# 1、研究背景

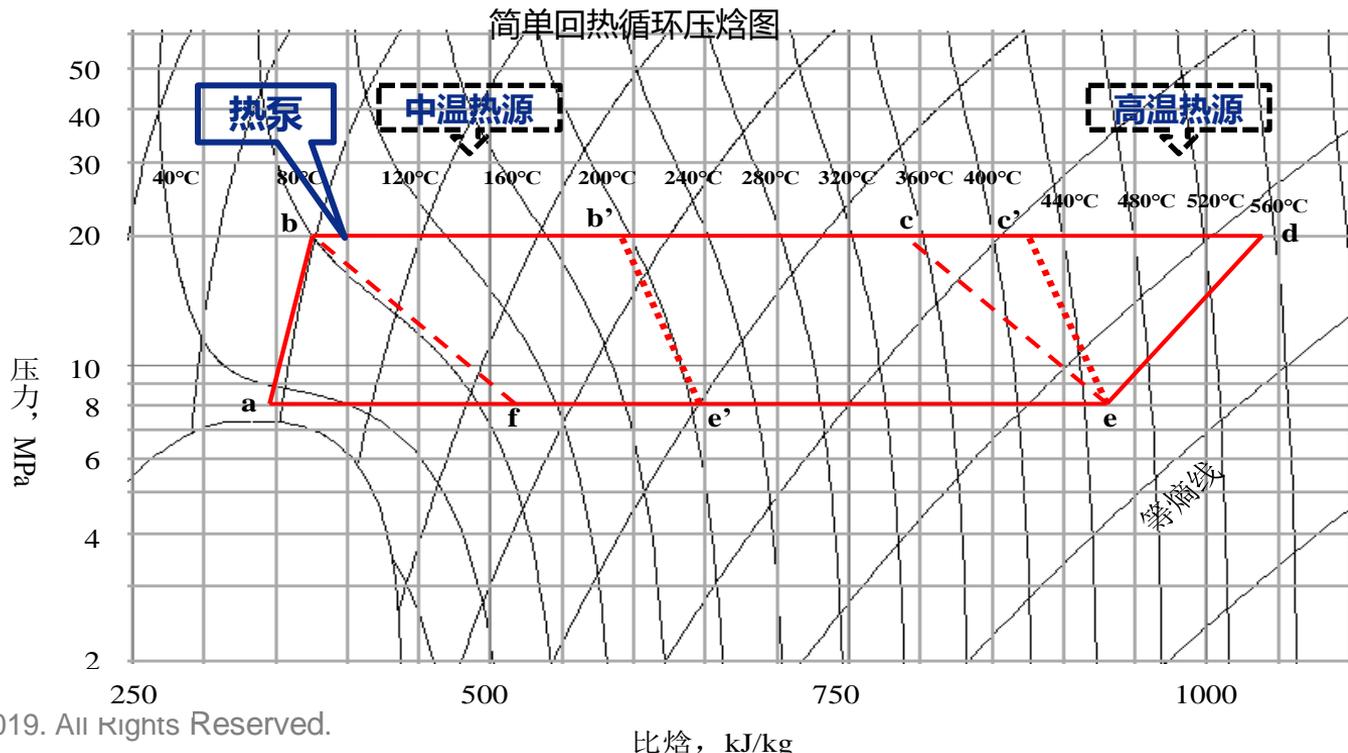
## □ 热力循环模块，新型的超临界CO<sub>2</sub>循环将用于替代汽轮机组

美国能源部的Sunshot计划提出研发新一代太阳能热发电技术，拟采用超临界CO<sub>2</sub>循环作为动力岛，运行于700°C以上的温度参数，空冷条件下，循环效率超过50%

我国的国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项2018年立项项目《超临界CO<sub>2</sub>太阳能热发电关键基础问题研究》，中国科学院电工研究所牵头，清华大学、浙江大学、西安交通大学和西安热工研究院有限公司等18家单位共同承担，项目拟建立基于采用太阳能聚光集热的超临界CO<sub>2</sub>太阳能热发电系统。

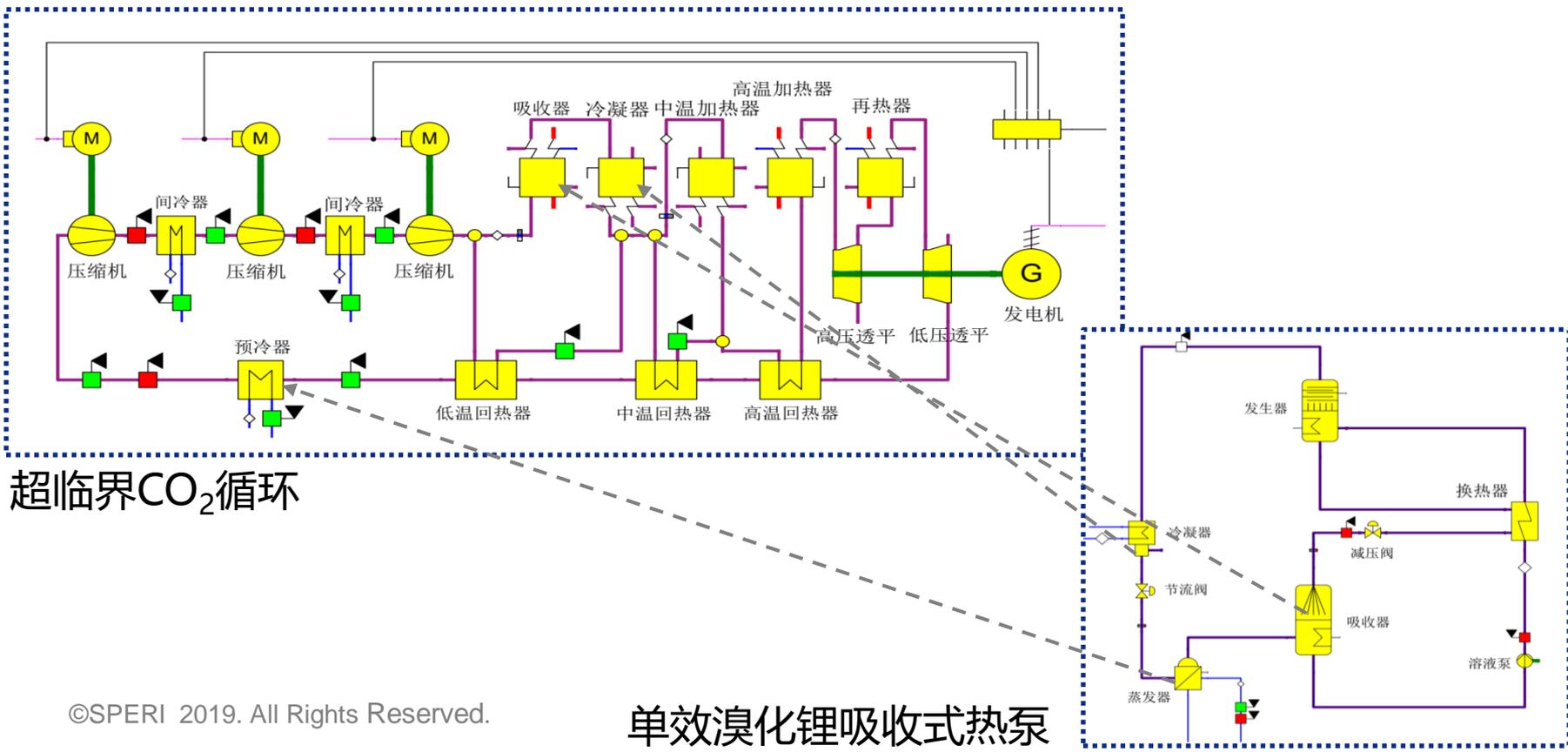
# 1、研究背景

- 当前商业化电站的技术水平下，太阳能热发电的温度参数为550°C等级
- 采用简单回热超临界CO<sub>2</sub>循环，分流部分工质吸收中温热能，以减少高温热源容量



## 2、系统布置

### 基于Epsilon热力循环分析软件构建循环系统



## 2、系统布置

- 超临界CO<sub>2</sub>循环为简单回热循环的变形，即在低温段的大比热区将一部分工质分流至低温热源加热，以减少高温热源的加热量
- 吸收式热泵为非常成熟的单效溴化锂吸收式热泵，吸收器和冷凝器作为超临界CO<sub>2</sub>循环的低温热源之一，蒸发器的热量来自超临界CO<sub>2</sub>循环的预冷器
- 热源分为高温热源和中温热源，前者为温度560°C以上的显热（如：高温熔盐），用于将超临界CO<sub>2</sub>工质加热至550°C，后者为温度180°C左右的潜热（如：饱和蒸汽）

### 3、热力分析

- 超临界CO<sub>2</sub>循环的工质总流量取为400kg/s，使循环的发电功率约为42.7MWe，高温热源的输入热量约为77.2MWth，中温热源的输入热量约为22.1MWth，低温热源的输入热量为21.8 MWth
- 吸收式热泵的参数对应于超临界CO<sub>2</sub>循环进行匹配，吸收器的放热温度约为75℃，放热量约为12.3MWth，冷凝器的平均放热温度约为100℃，放热量约为9.5MWth。吸收式热泵发生器的温度约为177℃，吸收外部热源的热量约为13.4MWth

参数	取值
CO <sub>2</sub> 工质总流量/kg/s	400
高压透平入口温度/°C	550
高压透平入口压力/MPa	20
低压透平入口温度/°C	550
低压透平入口压力/MPa	12.3
预冷器出口压力/MPa	7.3
预冷器和间冷器出口温度/°C	30
第一级压缩机出口压力/MPa	9.8
第二级压缩机出口压力/MPa	14.1
第三级压缩机出口压力/MPa	20.4
压缩机等熵效率/%	85
高压透平、低压透平等熵效率/%	90
透平和压缩机机械效率/%	99
发电机效率/%	98.5
回热器端差/°C	10
吸收器出口CO <sub>2</sub> 工质温度/°C	70.5
冷凝器出口CO <sub>2</sub> 工质温度/°C	94.5
中温加热器出口CO <sub>2</sub> 工质温度/°C	177
吸收器压损/MPa	0.075
冷凝器压损/MPa	0.075
中温加热器压损/MPa	0.05
高温加热器压损/MPa	0.1
再热器压损/MPa	0.1
低温回热器压损/MPa	0.15
中温回热器压损/MPa	0.05
高温回热器压损/MPa	0.1
预冷器和间冷器压损/MPa	0.03
辅助设施耗电及其他损失率/%	0.5

### 3、热力分析

#### □ 系统热力分析结果

效率参数	计算结果
超临界CO <sub>2</sub> 循环发电效率/%	35.3
吸收式热泵COP	1.63
集成系统发电效率/%	37.9

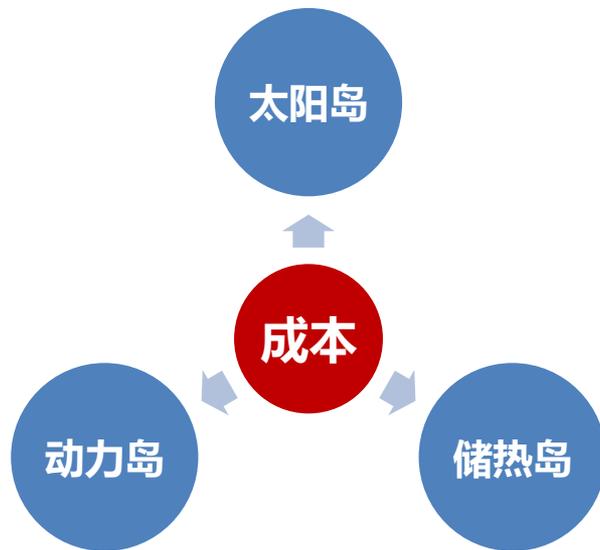
## 4、经济性分析

- 集成吸收式热泵的超临界CO<sub>2</sub>循环发电系统 VS. 现有的汽轮发电机组
- 目前采用汽轮发电机组的太阳能热发电站，在温度参数为550°C时，汽轮机组的发电效率约为41.2%

	本文的超临界CO <sub>2</sub> 循环	汽轮发电机组
发电功率/MWe	42.7	42.7
发电效率/%	37.9	41.2
高温热量/MWth	77.2	103.6
中温热量/MWth	35.5	0

## 4、经济性分析

- 本文的超临界CO<sub>2</sub>循环和汽轮发电机组太阳能热发电站在硬件组成上的区别主要有两方面：一是动力岛，分别采用超临界CO<sub>2</sub>循环机组与汽轮机组，二是聚光集热系统，前者引入了中温热量。
- 由于动力岛占电站总造价的比例较小，且超临界CO<sub>2</sub>循环的成本优势相对较小，所以忽略动力岛对电站经济性的影响。
- 高温集热系统和低温集热系统的设备成本差异决定了本文的超临界CO<sub>2</sub>循环和汽轮发电机组太阳能热发电站的经济性优劣。



## 4、经济性分析

- 假设高温集热系统的设备成本为 $C_h$  ¥ /MWth, 中温热源系统 (含吸收式热泵) 设备成本为 $C_m$  ¥ /MWth, 则超临界CO<sub>2</sub>循环集热系统的总成本 ( $C_{t-co2}$ ) 为:

$$C_{t-co2} = 77.2 \cdot C_h + 35.5 \cdot C_m$$

- 汽轮发电机组集热系统的总成本 ( $C_{t-h2o}$ ) 为:

$$C_{t-h2o} = 103.6 \cdot C_h$$

$$\text{当 } \frac{C_m}{C_h} < 0.74$$

$$C_{t-co2} < C_{t-h2o}$$

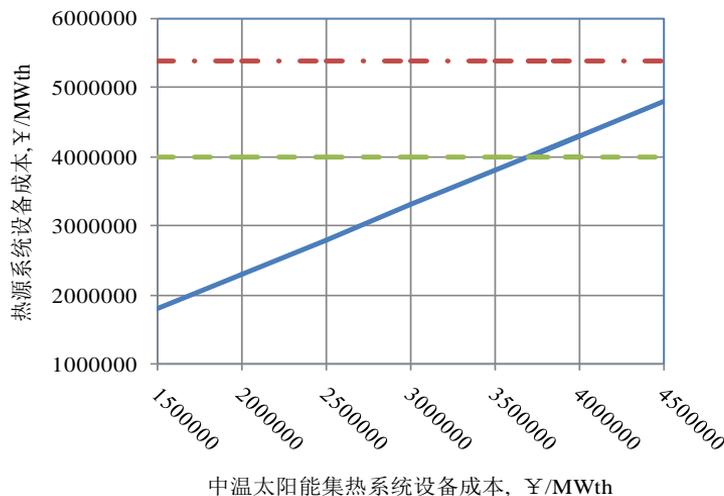
## 4、经济性分析

- 高温集热系统的设备成本 $C_h \approx 5,400,000$  ¥ /MWth
- 吸收式热泵的成本 $C_{hp} \approx$  ¥ 500,000/MWth
- 对于200°C等级的中温太阳能集热系统，其设备成本 ( $C_{200}$ ) 有望大幅降低
- 中温热源系统（含吸收式热泵）设备成本为 $C_m$  ¥ /MWth:  $C_m = [35.5 \cdot C_{200} + (12.3 + 9.5) \cdot C_{hp}] / 35.5$

$$\text{当 } C_{200} < \text{¥ } 3,700,000/\text{MWth} \quad \frac{C_m}{C_h} < 0.74$$

$$\text{当 } C_{200} = \text{¥ } 2,000,000/\text{MWth} \quad C_{t-h_2o} - C_{t-co_2} = \text{¥ } 60,660,000$$

电站总的造价约为 ¥ 1,281,000,000，则  
电站的投资可减少5%



## 结语

- 集成吸收式热泵的超临界CO<sub>2</sub>循环聚光太阳能热发电系统将太阳能热源分为高温热源和中温热源两部分，并且引入吸收式热泵以进一步减少中温热源的容量
- 热力分析表明，上述系统的发电效率低于现有的汽轮机组太阳能热发电系统
- 经济性分析表明，上述系统的投资成本显著降低
- 因此，集成吸收式热泵的超临界CO<sub>2</sub>循环聚光太阳能热发电系统整体的性价比较高



上海发电设备成套设计研究院有限责任公司  
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE CO.,LTD

谢谢!  
THANK YOU !

[www.speri.com.cn](http://www.speri.com.cn)