



# 太阳能热发电与燃煤互补技术

杨勇平 侯宏娟

华北电力大学

2020.08.26宿迁



# 目录

- 1 背景及研究现状.....
- 2 系统集成优化设计.....
- 3 系统运行特性研究.....
- 4 太阳能贡献度评价.....



# 目录

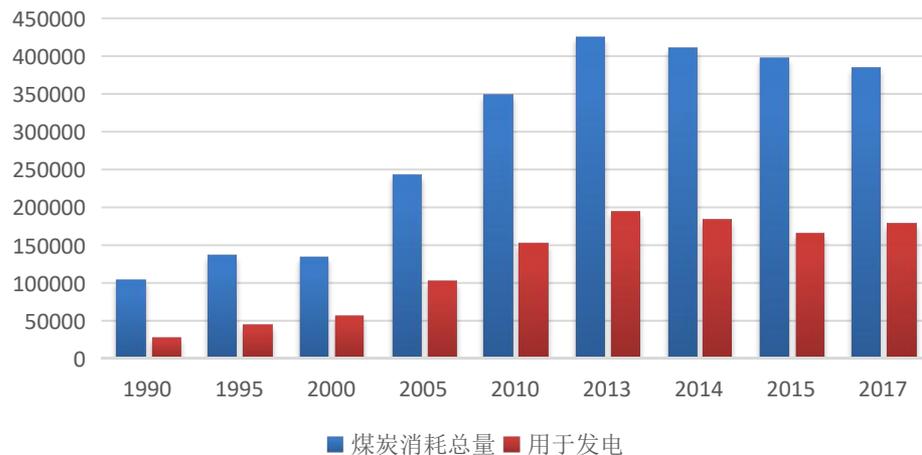
- 1 背景及研究现状.....
- 2 系统集成优化设计.....
- 3 系统运行特性研究.....
- 4 太阳能贡献度评价.....



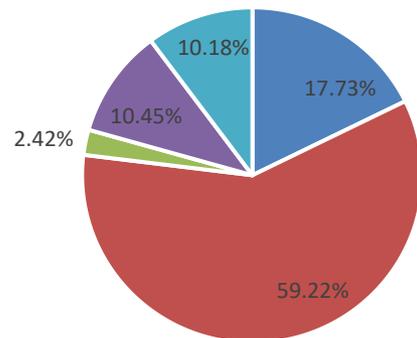
## 我国（电力）能源结构

- 2017年，煤炭资源消耗中，约46.64%用于火电发电。
- 2019年，我国电力装机容量，火电机组占比59.22%。
- 2019年，我国发电量中，火电发电占68.87%。

### 煤炭消耗（万吨）

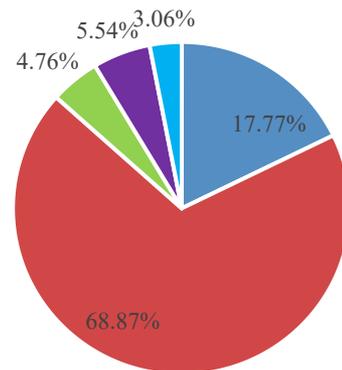


### 2019年我国电力装机容量图



■ 水电 ■ 火电 ■ 核电 ■ 风电 ■ 太阳能发电

### 2019年我国电力平衡图



■ 水电 ■ 火电 ■ 核电 ■ 风电 ■ 太阳能发电



## 能源短缺及污染

化石燃料的过量使用导致中国严重的环境污染与气候变化

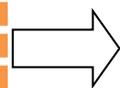


环境污染



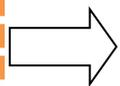
气候变化

提高能源的利用效率



- 现役机组煤耗降至 $310 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$ 以下
- 新建机组平均煤耗不超过 $300 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$

扩大可再生能源的使用份额



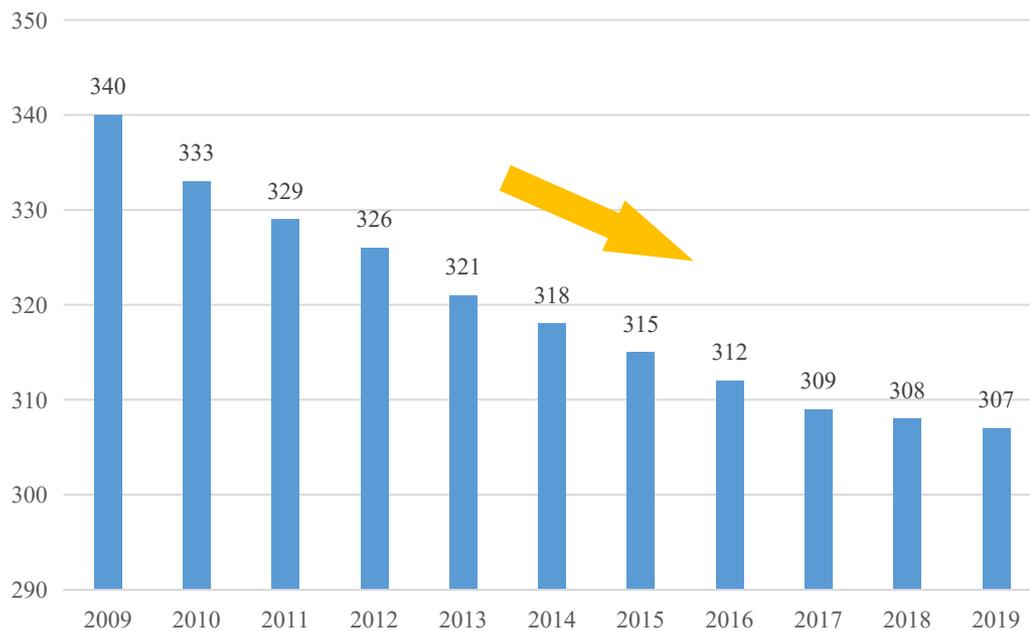
- 推进可再生能源发展
- 完善可再生能源发电扶持政策



## 提高能源利用率

2009年到2019年，我国火电发电中平均煤耗率每度电从340g下降至307g。

2009-2019国内平均煤耗率 (g/kWh)





## 发展可再生能源

- 可再生能源以**太阳能**、**风能**为代表，其中**太阳能**是地球表面**最为丰富**的可再生能源资源；
- 太阳能将在未来世界能源体系中居**主导地位**，也是我国建设清洁低碳、安全高效能源体系的**主导能源**。

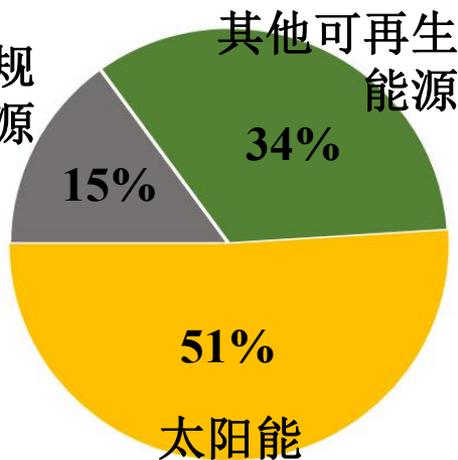
全球能源储藏

单位：万亿吨标煤/年

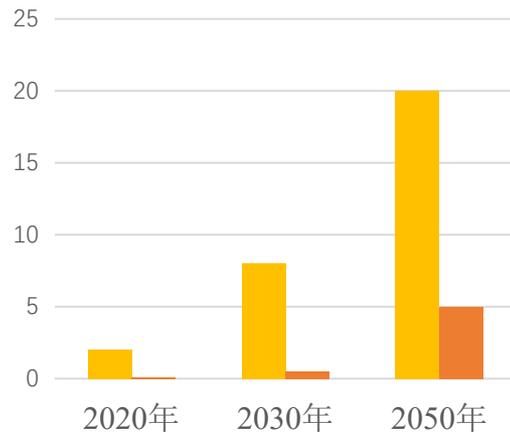


■ 太阳能 ■ 风能 ■ 煤炭 ■ 石油 ■ 天然气 ■ 消耗

常规能源



2050年全球能源利用情况



■ 光伏 ■ 光热  
我国太阳能应用发展规模



# 发展可再生能源——太阳能



光伏



电池储能



光热



大型蓄热系统

- 光伏+短时间储能的成本较低；
- 大规模电储能系统成本高，光伏+电池储能很难实现24/7连续发电小时。

- 储热系统规模大，可实现24/7连续发电小时；
- 电力可调度，可为风电在夜间做调峰电源。

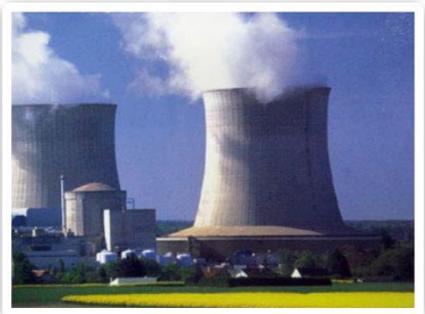


太阳辐照不稳定性



大型蓄热系统

经济性差



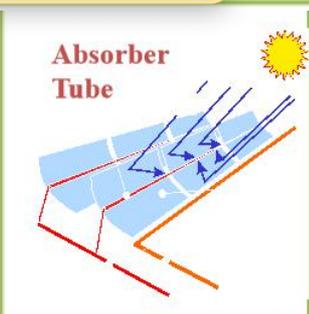
- ① 降低蓄热要求
- ② 共用透平系统
- ③ 能量品位梯级利用

降低太阳能热发电成本

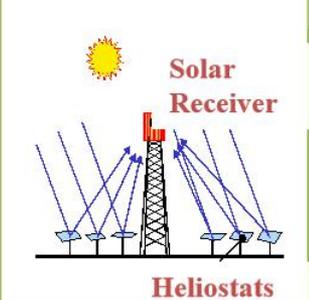
燃煤电站节能减排深入挖潜



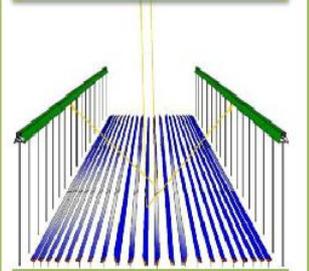
**集成方式**



槽式



塔式



菲涅尔式



国内目前装机容量最大的发电方式

燃煤电站

燃气轮机



电网

生物质电站



## 太阳能集热与**燃煤**集成互补发电（ISCoal）

早在2010年 Abengoa就已经在**美国**科罗拉多州的Xcel电站建成了世界上第一座ISCoal电站厂。

该项目与两个49MW燃煤机组的其中一个进行集成。

太阳场为8列150米的抛物线槽式集热系统。





## 太阳能集热与**燃煤**集成互补发电（ISCoal）

2012.10 在**澳大利亚**新南威尔士州，  
为Liddel火电站配置的Nova1光热-  
燃煤混合发电项目正式投运。  
配置9.3MWth的太阳能蒸汽发生装  
置。预计年减排二氧化碳5000吨。





## 太阳能集热与**燃煤**集成互补发电（ISCoal）

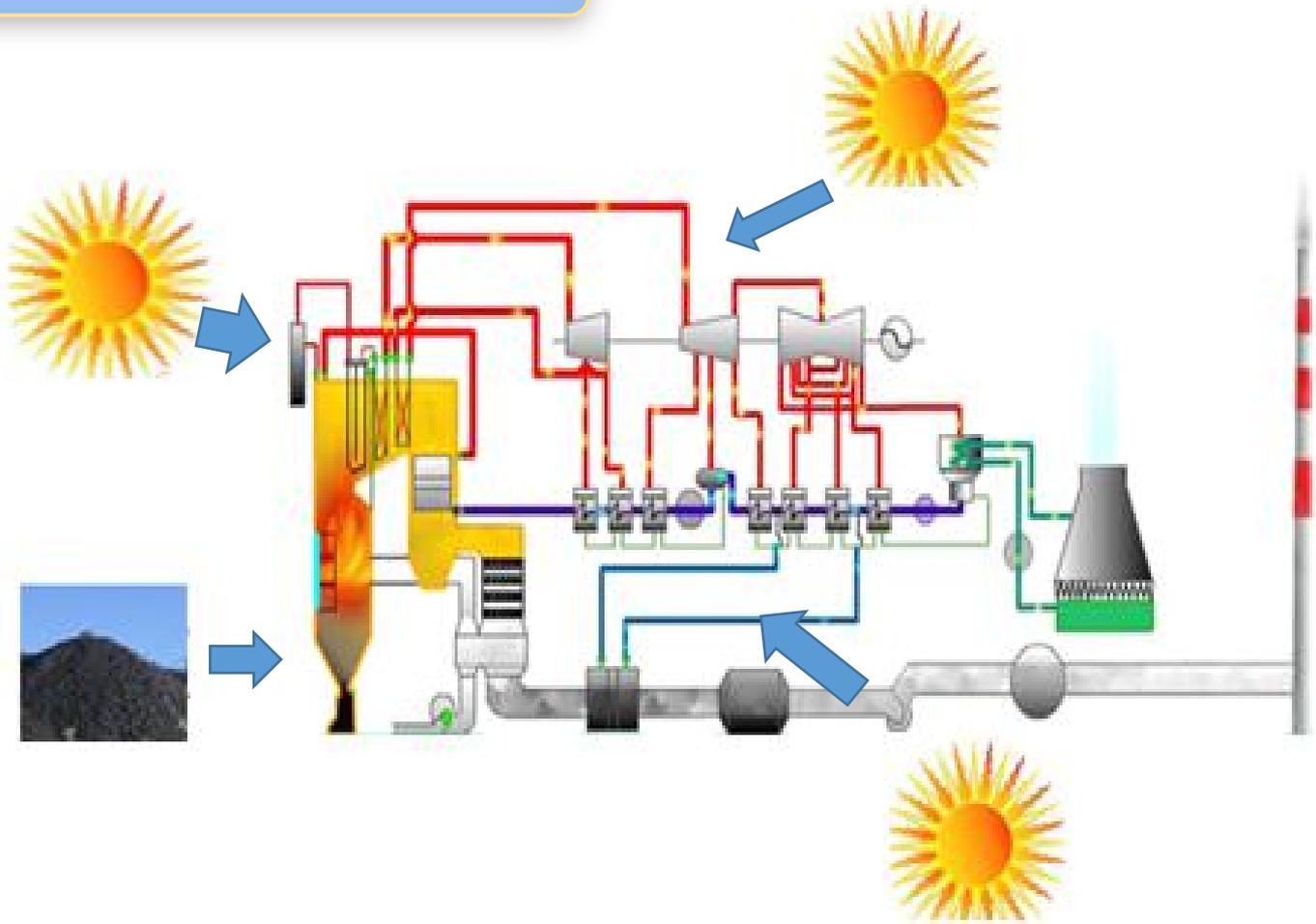
2019年7月，**印度**国家电力公司（NTPC）在其位于北方邦（Uttar Pradesh state）的达德里发电厂（Dadri power generation complex）配套建设了全球首个商业ISCoal项目。

该项目采用菲涅尔式技术路线，总采光面积33000m<sup>2</sup>。每年可生产14GWth的太阳热能，这些热能被输入一个210兆瓦的朗肯循环系统进行混合发电。





# 太阳能集热与**燃煤**集成互补发电



太阳能可以多种方式与燃煤电厂集成





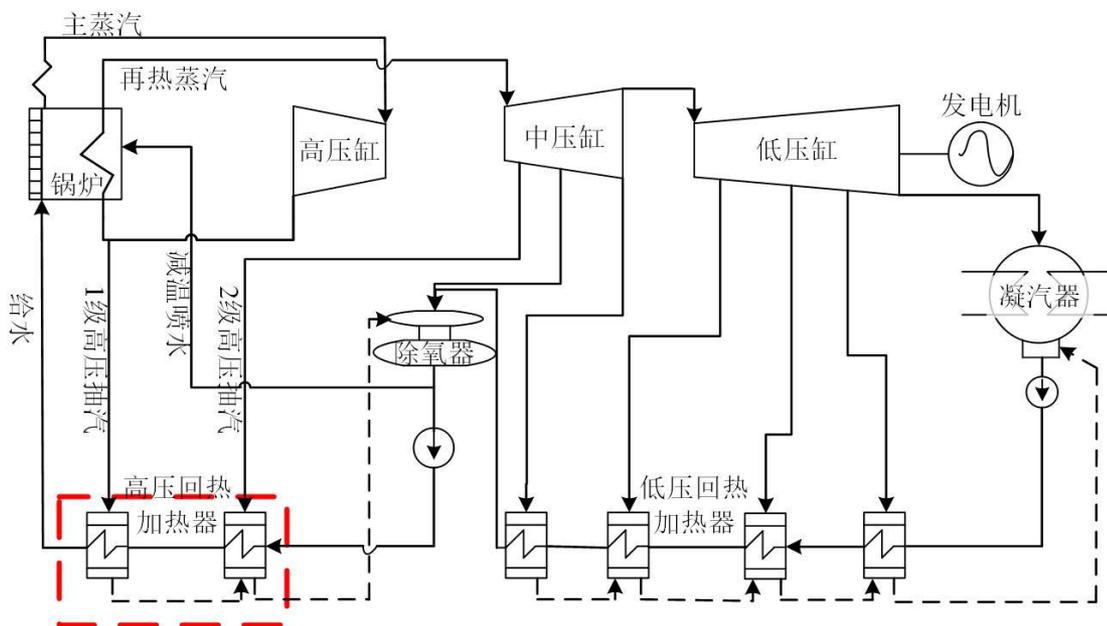
# 目录

- 1 背景及研究现状.....
- 2 系统集成优化设计.....
- 3 系统运行特性研究.....
- 4 太阳能贡献度评价.....



## 槽式太阳热与330MW燃煤机组互补发电案例分析

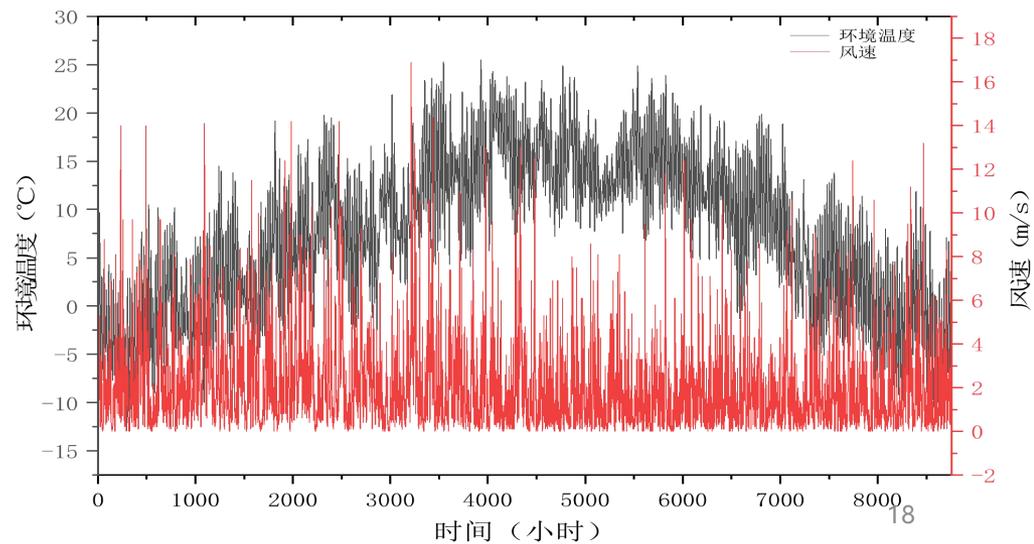
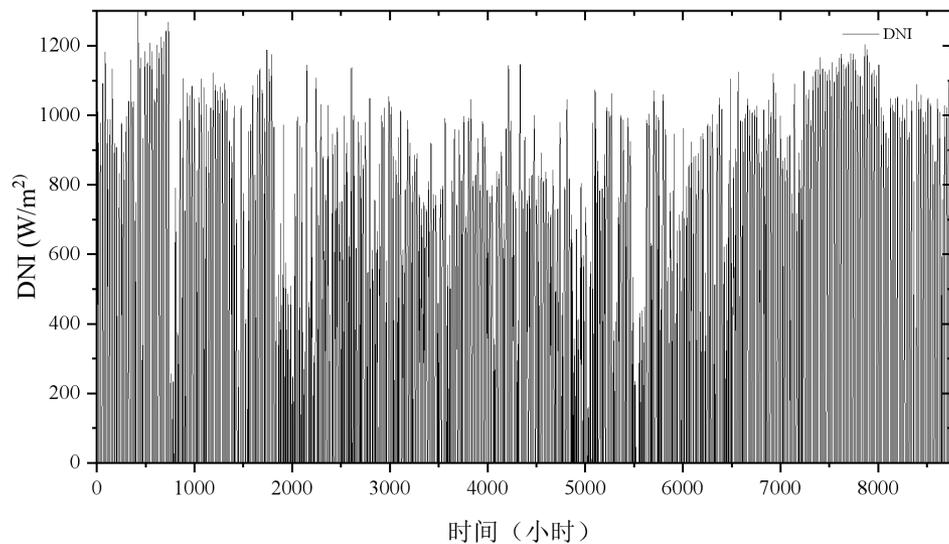
项目	单位	100%THA工况
发电功率	MW	330
注汽压力	Mpa	16.67
注汽温度	°C	543
注汽流量	t/h	934
再热温度	°C	543
给水温度	°C	249
排汽压力	kPa	5.20
排汽比焓	kJ/kg	2348.5





## 项目地点气象条件

- 选用槽式集热器。集热器追踪方式为南北轴追踪。
- 设计点选取夏至日（6月21日），DNI为 $818 \text{ W/m}^2$ ，太阳光线入射角 $\theta$ 为 $6.5^\circ$ ，空气温度 $T_a$ 为 $21.6^\circ\text{C}$ 。
- 假设换热介质与给水的换热温差为 $10^\circ\text{C}$
- 所需集热场面积约为11万平方米。





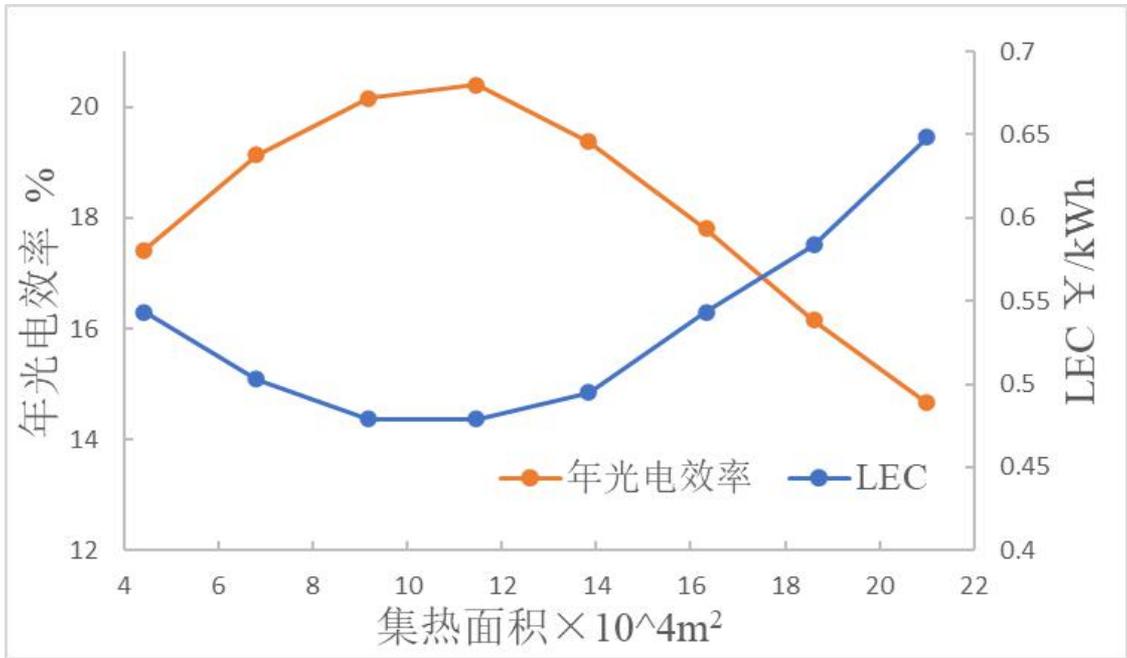
太阳能辅助燃煤机组运行工况	运行模式	序号
100% 额定工况	功率增大型	1
	节煤型	2
75% 额定工况	功率增大型	3
	节煤型	4
50% 额定工况	功率增大型	5
	节煤型	6

### 设计点太阳能辅助燃煤机组性能

项目	1	2	3	4	5	6
原机组发电功率 (MW)	330	330	248	248	165	165
互补发电功率 (MW)	360	--	266	--	176	--
给水流量 (t/h)	934	865	680	630	464	430
集热器功率温度 (°C)	190/260		180/243		165/231	
集热场输出热量 (W/m <sup>2</sup> )	546	546	552	552	554	554
太阳能发电功率 (MW)	30	25	18	15	11	9
太阳能光电效率%	26.7	24.7	23.0	20.7	20.0	17.6
原机组标煤耗(g/kWh)	297.4		303.1		317.7	
互补发电标煤耗 (g/kWh)	272.6	274.9	282.6	284.8	297.8	300.4



# 集热场面积优化



LEC和年光电效率随集热面积的变化

**优化结果**

最佳集热面积	发电量	年光电效率	LEC
1 15395 m <sup>2</sup>	50.85 × 10 <sup>6</sup> kWh	20.39%	0.472 ¥ /kWh



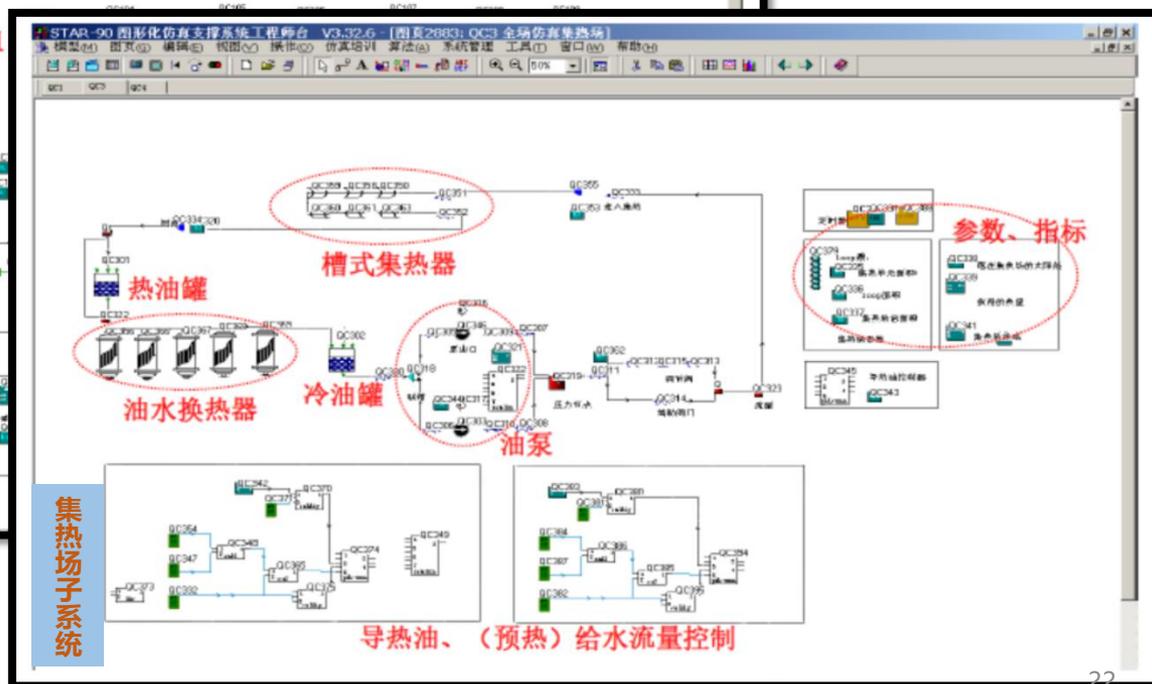
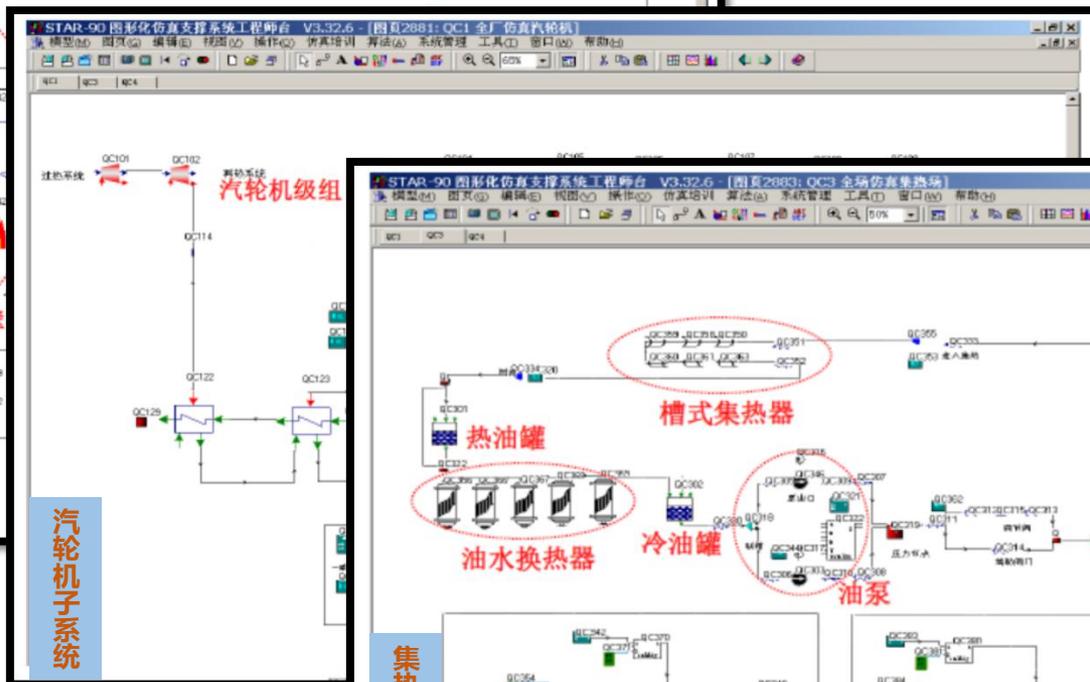
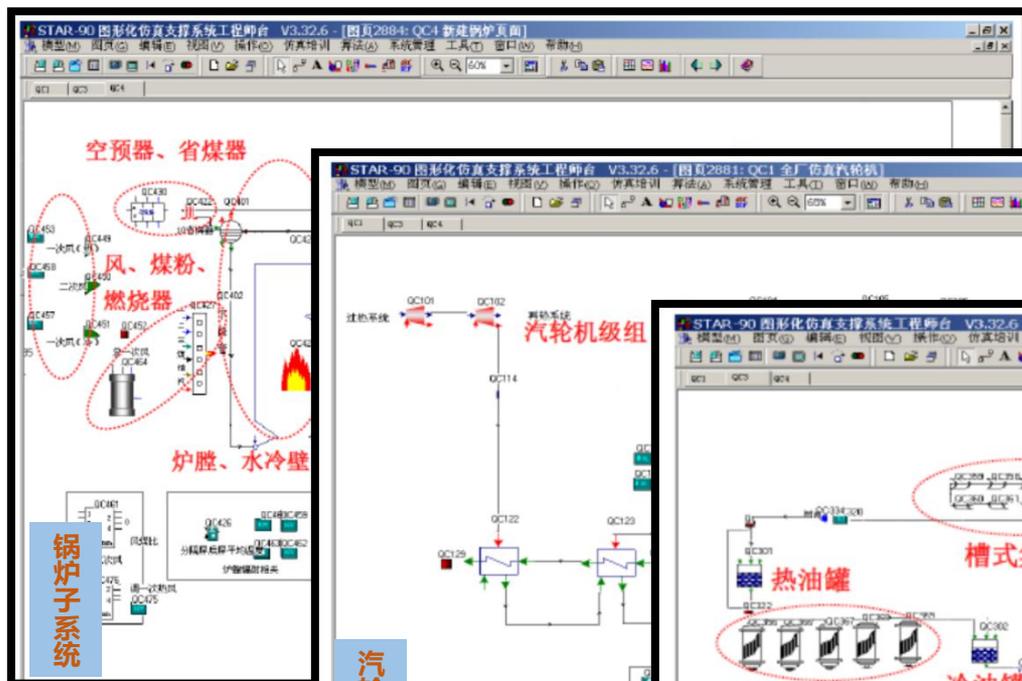
# 目录

- 1 背景及研究现状.....
- 2 系统集成优化设计.....
- 3 系统运行特性研究.....**
- 4 太阳能贡献度评价.....



# 动态仿真实验系统

开发的互补系统全工况动态仿真实验系统，主要由锅炉、汽轮机和槽式集热场三大子系统组成。





## 太阳能引入对互补系统关键参数的影响规律

### 案例分析

机组容量：**330MW**

回热：2高4低1除氧

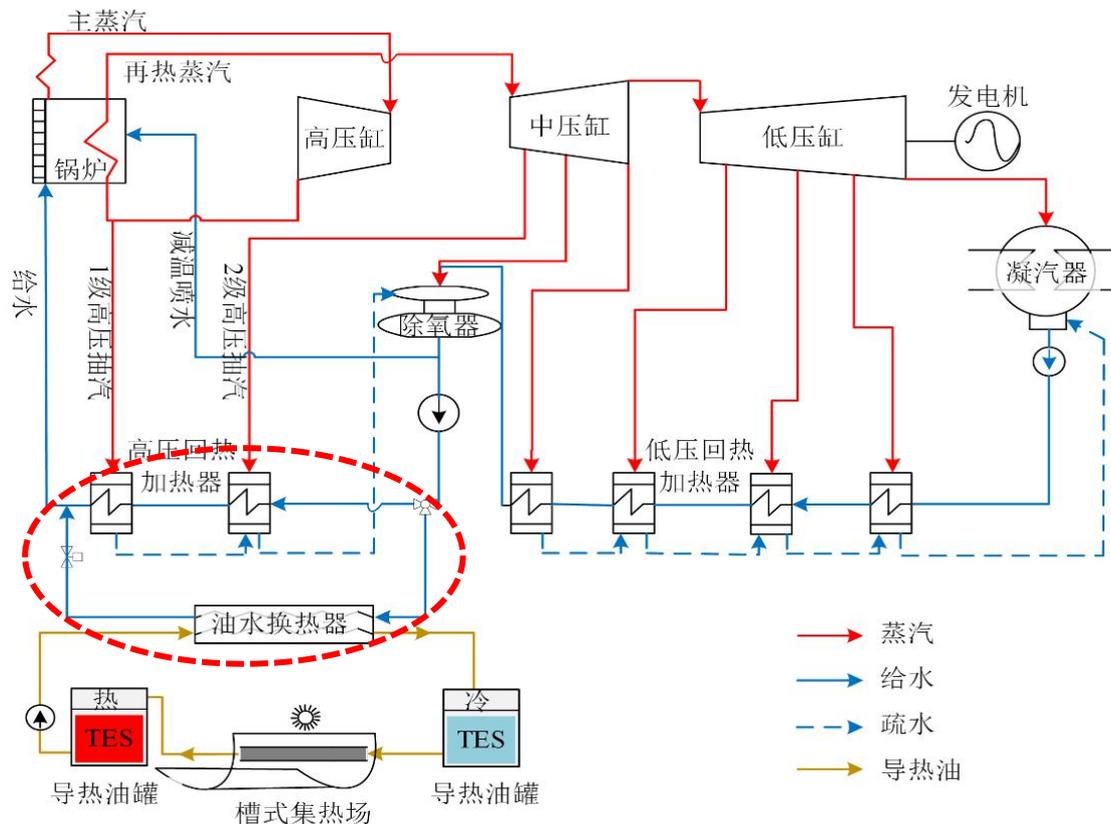
集成方案：

**取代1、2高加抽汽**

设计工况：

**恰好完全取代高抽**

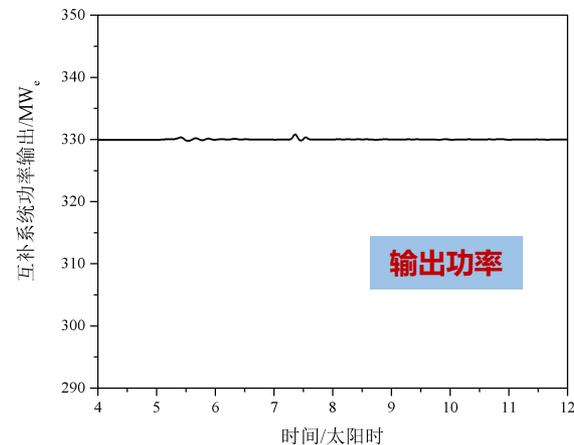
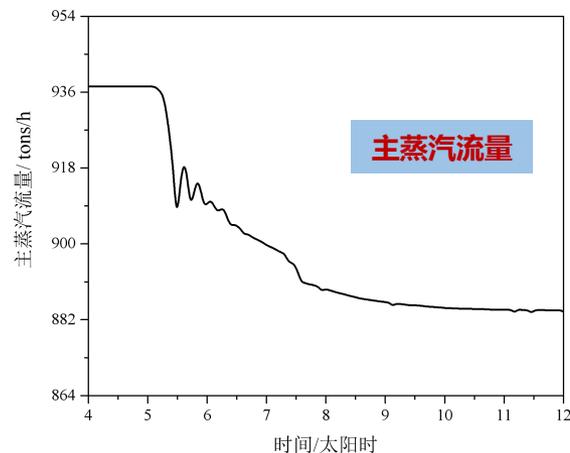
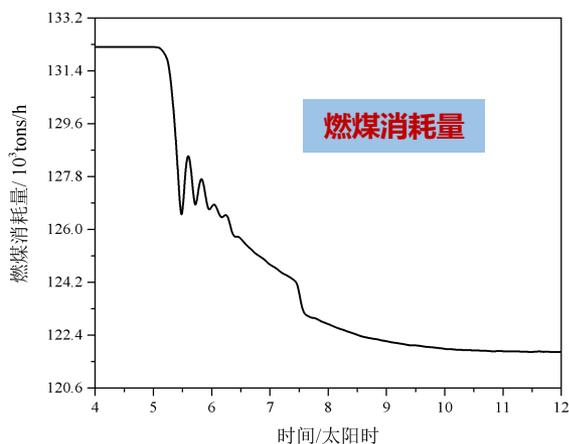
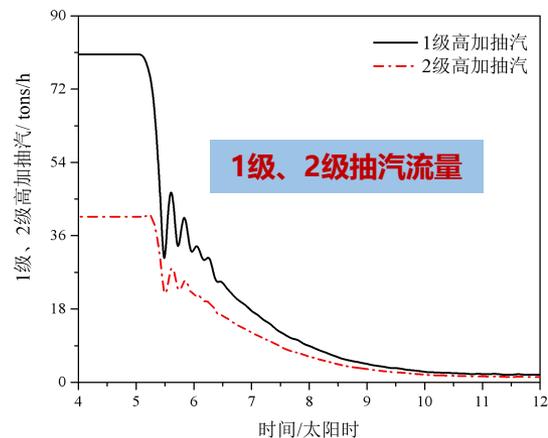
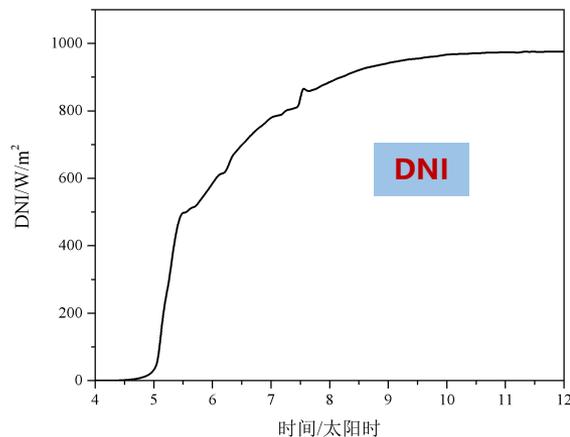
运行模式：**燃料节省型**





## 太阳能引入对互补系统关键参数的影响规律

- 输出功率、抽汽流量、燃煤消耗量、主蒸汽流量等主要参数的变化均在**安全范围内**。

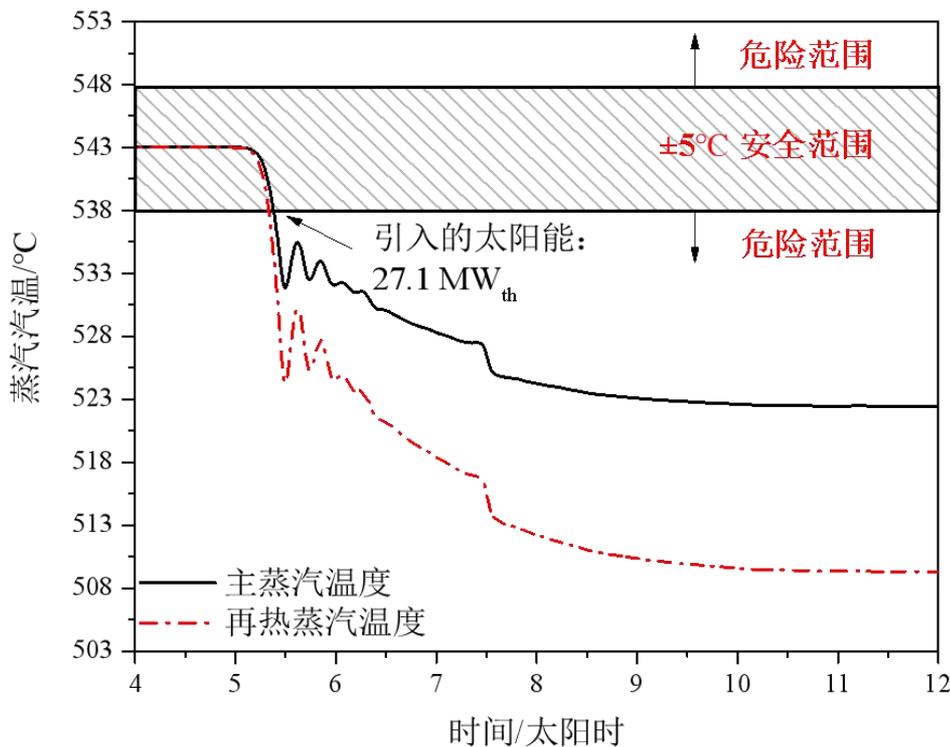




## 太阳能引入对互补系统关键参数的影响规律

### 主蒸汽、再热蒸汽汽温下降

- 太阳时12:00，主蒸汽汽温下降**20°C**，再热蒸汽汽温下降**33°C**，远超安全允许的**±5°C**
- 在安全允许范围内，太阳能吸纳极限仅为**27.1 MW<sub>th</sub>**，仅占热力循环输入能量的**1/25**。



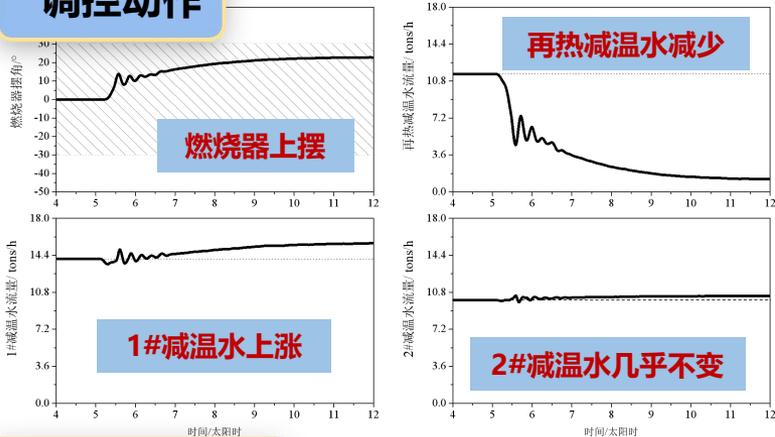
主蒸汽、再热蒸汽汽温



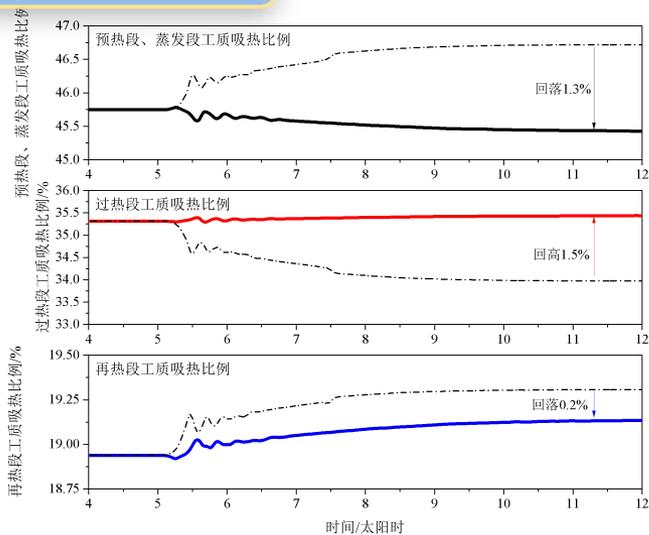


# 汽温调节控制系统——有效性验证

## 调控动作

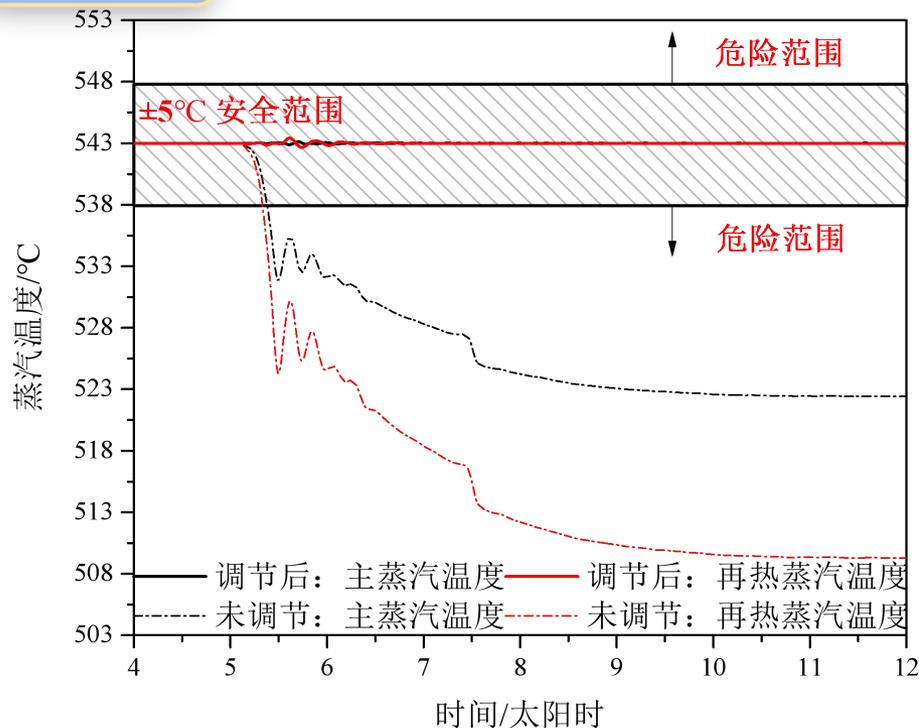


## 调整吸热比例



工质吸热比例得以重新调整

## 调控汽温

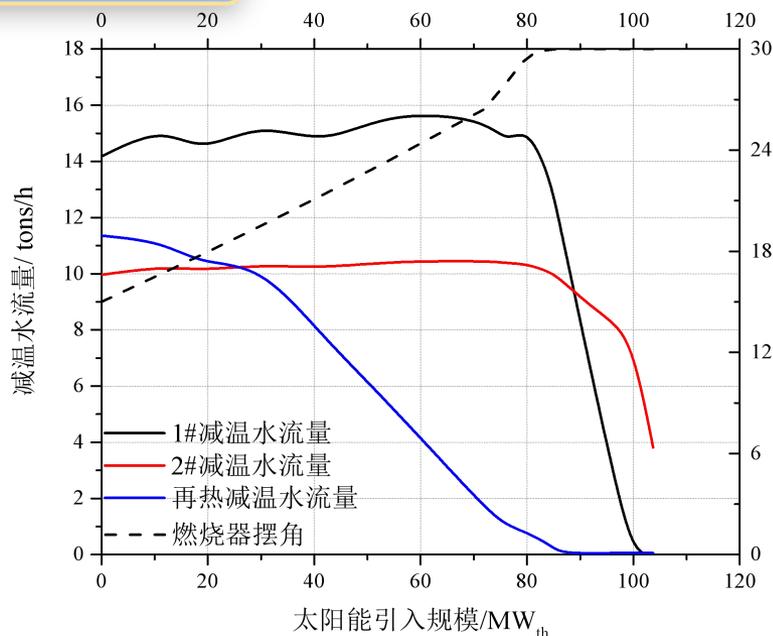


太阳能引入规模在**0-设计值**之间时，在制定的蒸汽汽温调节控制方案下，主蒸汽、再热蒸汽汽温能够稳定维持在额定值**543 °C**。

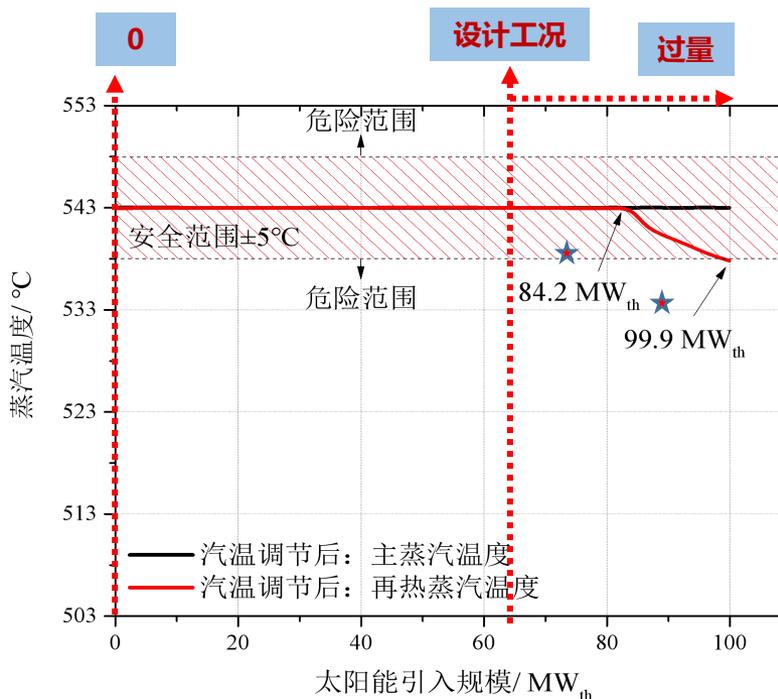


# 汽温调节控制系统——太阳能吸纳极限

## 汽温调控的局限性



汽温调控



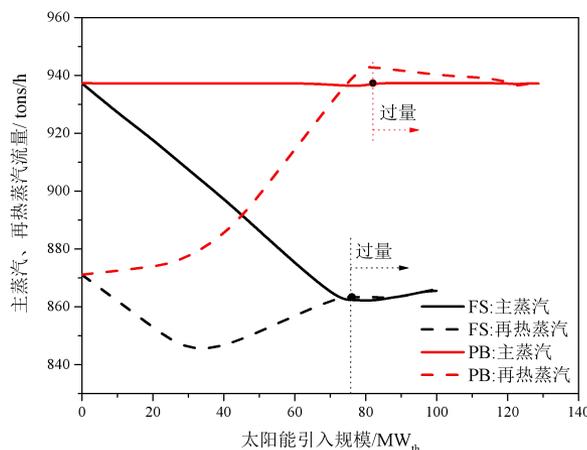
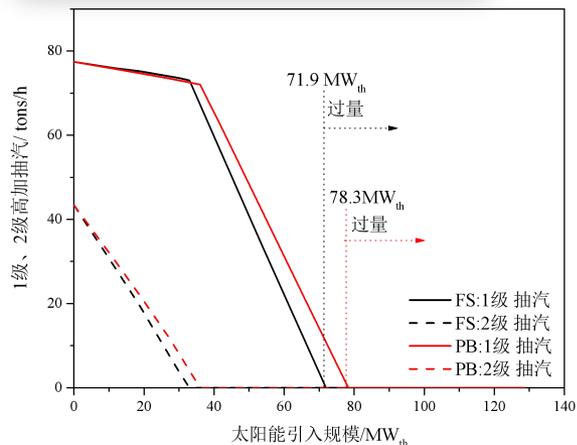
主、再热汽温

太阳能的吸纳极限从**27.1 MW**显著提高至**99.9 MW**

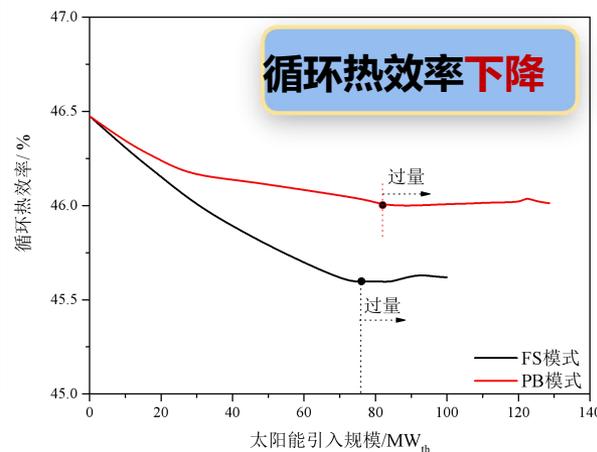


# 太阳能引入对互补系统整体性能的影响研究——汽轮机侧（循环效率）

## 热力循环能量输入规模



主蒸汽  
再热蒸汽流量

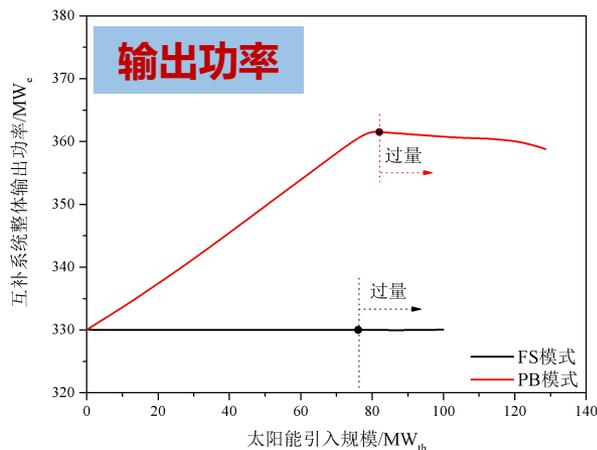


燃料节省型FS:

设计工况太阳能引入规模:  
**71.9 MW<sub>th</sub>**, 约占热力循环  
能量输入的1/10

功率增大型PB:

设计工况太阳能引入规模:  
**78.3 MW<sub>th</sub>**, 约占热力循环  
能量输入的1/10



燃料节省型FS:

循环效率从46.5%下降至45.6%  
下降幅度: **0.9%**

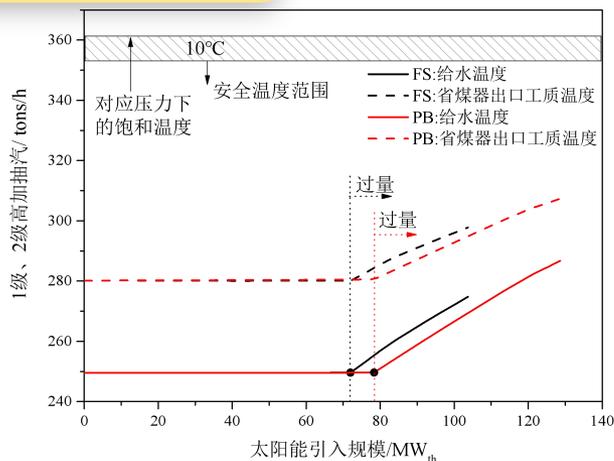
功率增大型PB:

循环效率从46.5%下降至46.1%  
下降幅度: **0.4%**

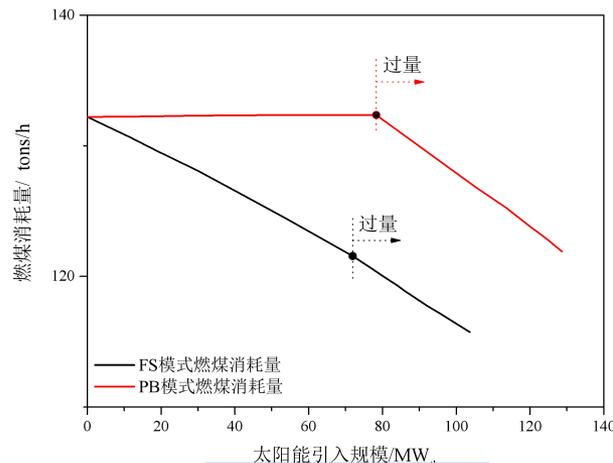


# 太阳能引入对互补系统整体性能的影响研究——锅炉侧（入口参数）

## 锅炉入口物质状态变化



**给水温度、省煤器出口工质温度**



**燃煤消耗**

输入物质	“燃料节省型”模式				“功率增大型”模式			
	设计值		过量		设计值		过量	
给水	减小	不变	不变	增大	不变	不变	不变	增大
高压缸排汽	增大	微变	不变	不变	增大	微变	不变	不变
烟气	减小	不变	减小	不变	不变	不变	减小	不变

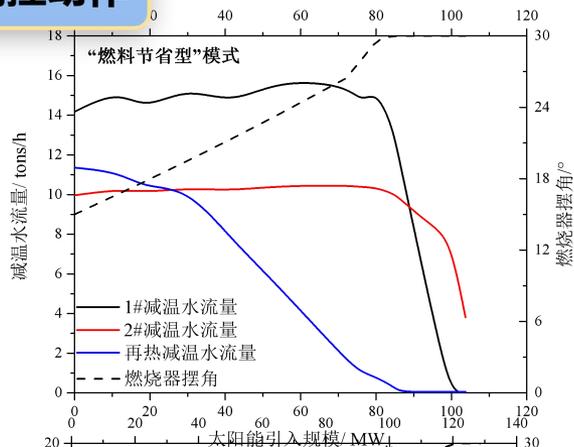
**结论：** 太阳能的引入所引起的锅炉侧入口参数变化情况，与传统燃煤电站常规工况有所不同。



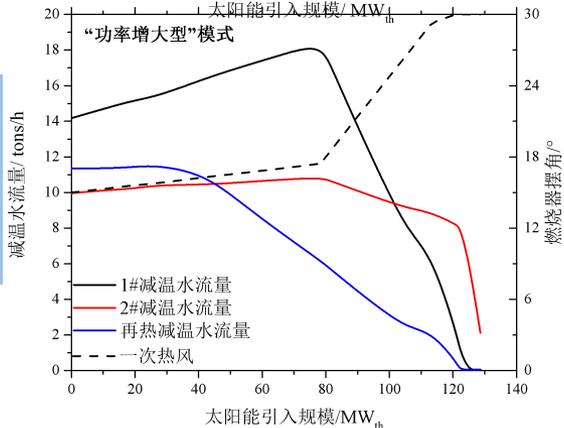
# 太阳能引入对互补系统整体性能的影响研究——锅炉侧（吸纳极限）

## 调控动作

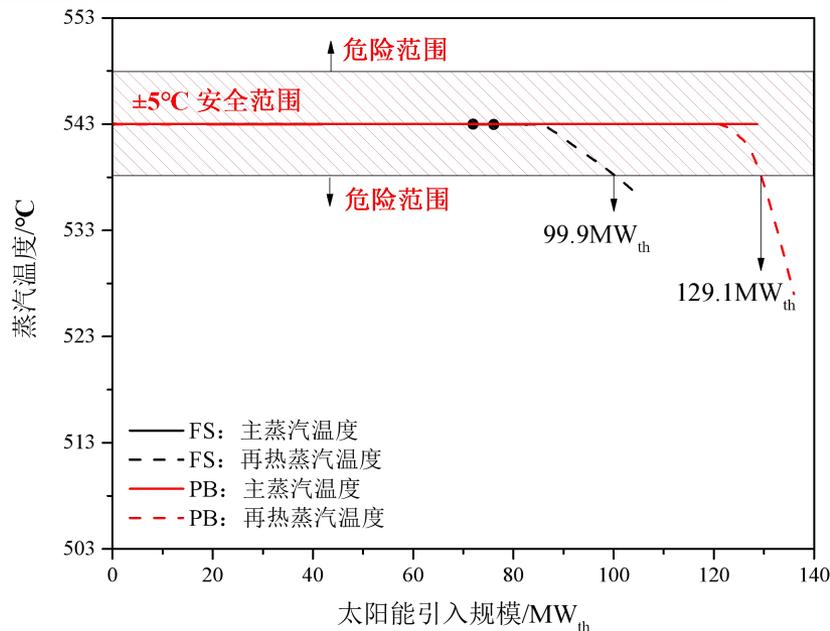
燃料节省型FS



功率增大型PB



主蒸汽  
再热蒸汽汽温



### 燃料节省型FS:

设计值**71.9MW<sub>th</sub>；吸纳极限为**99.9MW<sub>th</sub>，太阳能倍数**1.4**，约占热力循环能量输入的**1/7**。****

### 功率增大型PB:

设计值**78.3MW<sub>th</sub>；吸纳极限为**129.1MW<sub>th</sub>，太阳能倍数**1.6**，约占热力循环能量输入的**1/6**。****



# 太阳能引入对互补系统整体性能的影响研究——锅炉侧（锅炉效率）

## 烟温变化



### 1. 原燃煤机组（参照）

### 2. 燃料节省型FS（设计工况）

燃煤消耗下降，炉膛辐射换热比例增大，炉膛出口烟温下降

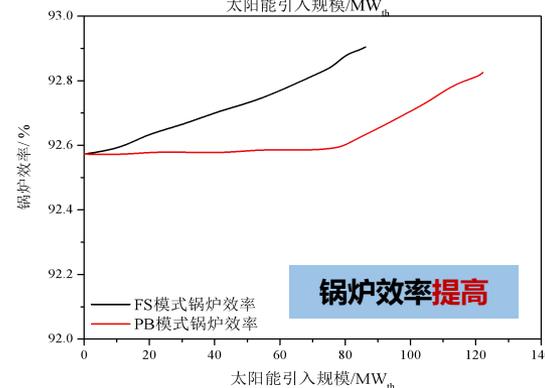
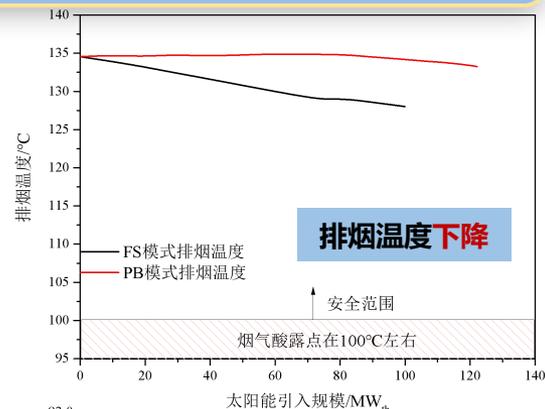
### 3. 燃料节省型FS（极限工况）

空预器换热量增大，炉膛内绝热燃烧温度提高

### 4. 功率增大型PB（设计工况）

燃烧器上摆，炉膛出口烟温增大，以满足再热段热功率需求。

### 5. 功率增大型PB（极限工况）同3。



### 燃料节省型FS:

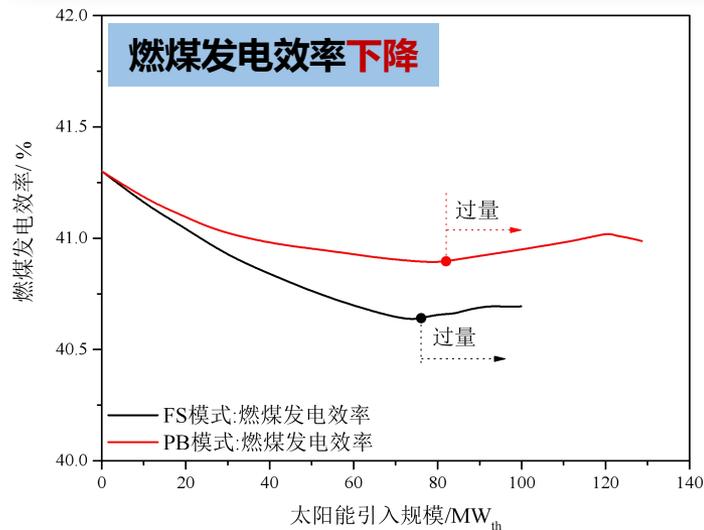
锅炉效率从92.6%增大至92.8%（设计工况）再增至92.9%（吸纳极限），增幅**0.3%**。

### 功率增大型PB:

锅炉效率（设计工况前）92.6%几乎不变，增至92.8%（吸纳极限），增幅**0.2%**。



## 太阳能引入对互补系统整体性能的影响研究——整体能效



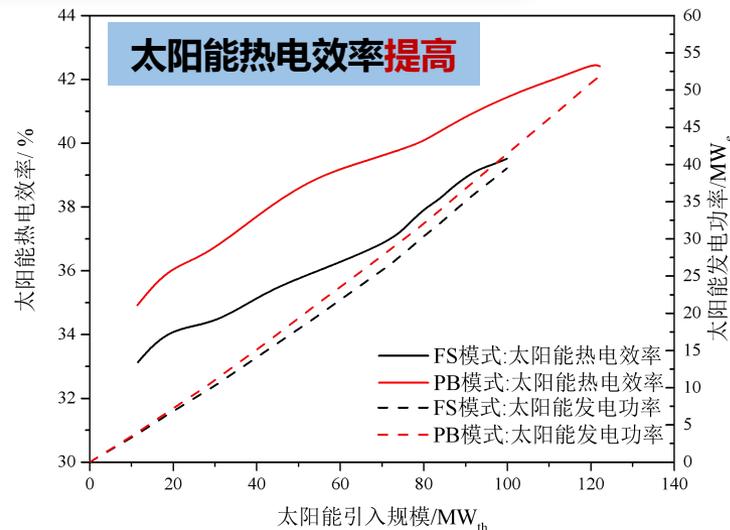
### 燃煤发电效率:

#### 燃料节省型模式FS

41.3% → 40.6% (设计工况) → 40.7% (极限工况), **降幅0.6%**

#### 功率增大型模式PB

41.3% → 40.9% (设计工况) → 41.0% (极限工况), **降幅0.4%**



### 太阳能热电效率:

#### 燃料节省型模式FS

33%(太阳能引入规模10MW<sub>th</sub>) → 36.9% (设计工况, 太阳能发电功率为26.6MW) → 39.5% (极限工况, 太阳能发电功率为39.5MW), **增幅6.5%**

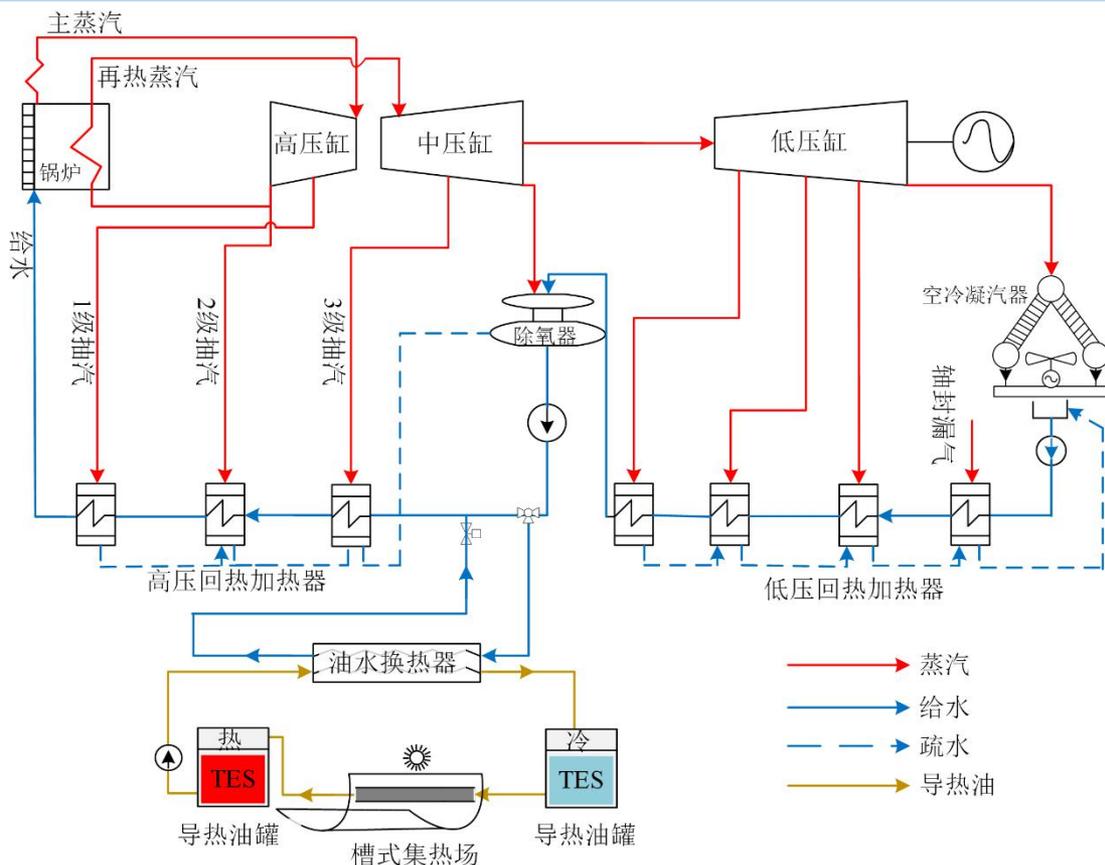
#### 功率增大型模式PB

35%(太阳能引入规模10MW<sub>th</sub>) → 40.0% (设计工况, 太阳能发电功率为31.3MW) → 42.4% (极限工况, 太阳能发电功率为54.0MW), **增幅7.4%**



## 太阳能引入对空冷机组的影响研究

太阳能资源丰富的地区往往水资源匮乏，因而多采用空冷机组。相比于湿冷机组，空冷机组的运行也对太阳能引入所引起的排汽流量改变更为敏感。因此有必要研究太阳能引入对空冷机组运行的影响规律，探究空冷机组安全、经济的运行模式。



机组容量：600MW  
回热：3高4低1除氧  
额定背压：15 kPa  
风机功耗：5.6MW

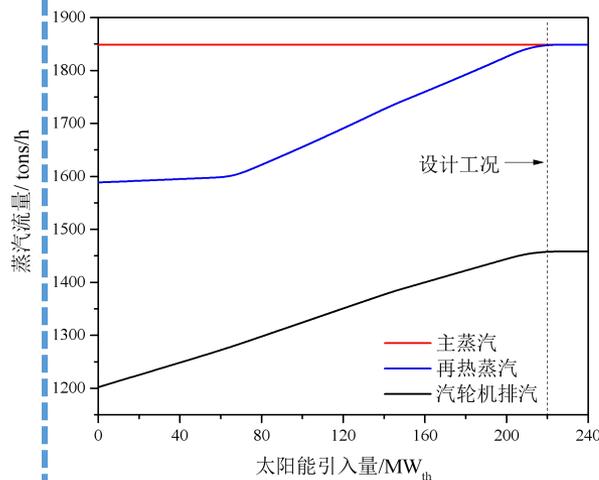
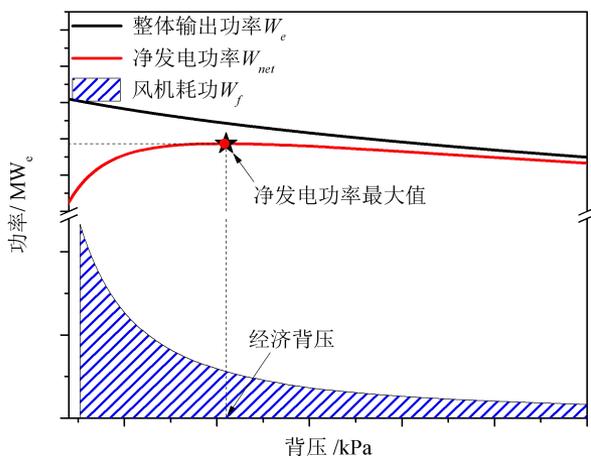
集成方案：  
取代1、2、3高加抽汽  
设计工况：  
恰好完全取代高抽

运行模式：  
功率增大型

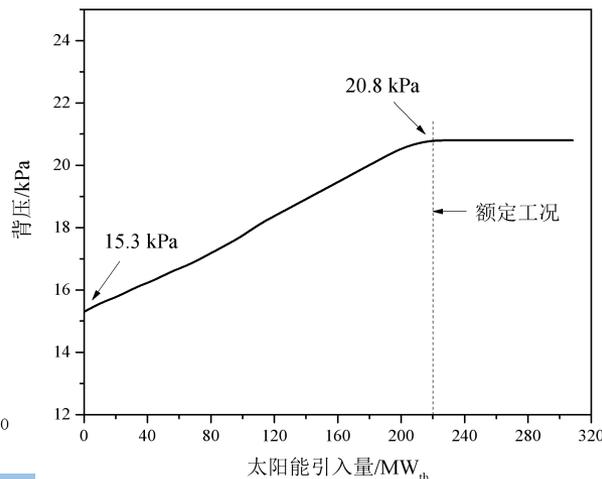


# 太阳能引入对空冷机组的影响研究——背压

## 经济背压



主蒸汽、再热蒸汽、排汽流量



机组背压

## 经济背压:

凝汽器压力降低, 整体发电功率  $W_e$  增大, 但风机耗功  $W_f$  增大。因此, 存在一个经济背压使得互补系统的净发电功率  $W_{net}$  最大化。

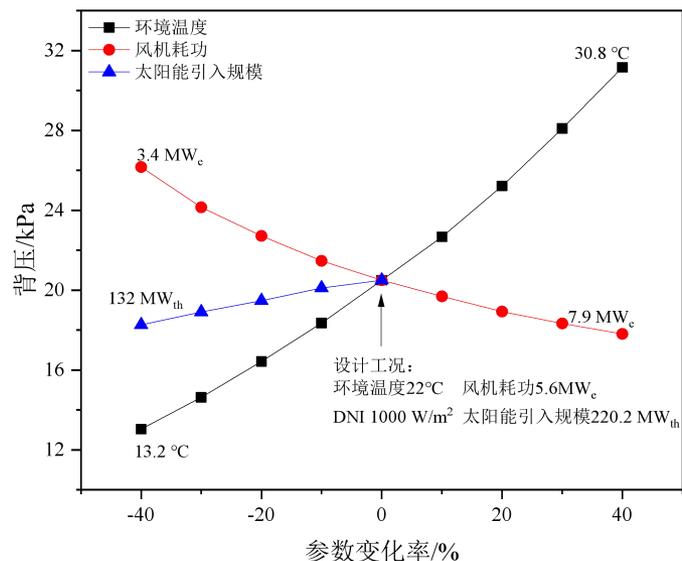
## 排汽流量与机组背压:

随着太阳能引入规模增大, 汽轮机排汽流量逐渐增大, 从原燃煤机组的1200 t/h增大至设计工况时的1450 t/h, 增幅21%; 在气象条件、风机功耗不变的情况下, 汽轮机背压从15.3 kPa增大至20.8 kPa。

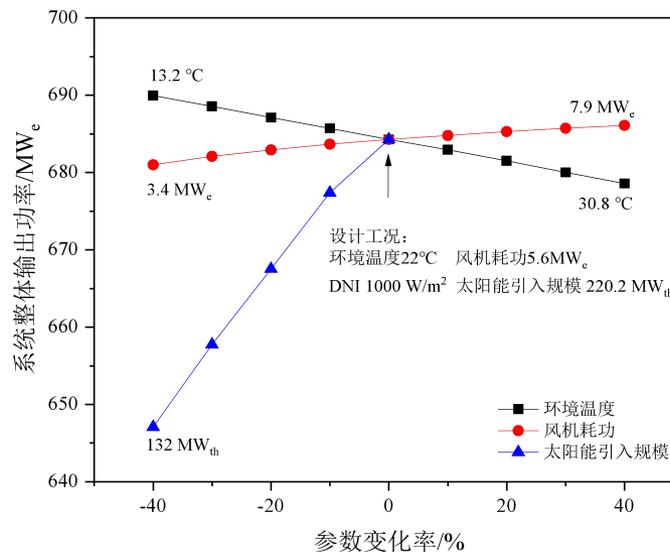


## 环境温度、风机功耗、太阳能引入规模对背压、发电功率的影响规律

以设计工况：环境温度**22°C**、风机功耗**5.6MW<sub>e</sub>**，DNI**1000W/m<sup>2</sup>**，太阳能引入规模**220.2MW<sub>th</sub>**为基点，单一改变环境温度、风机功耗、太阳能引入规模，获得三个因素对背压、发电功率的影响规律。



对背压的影响规律



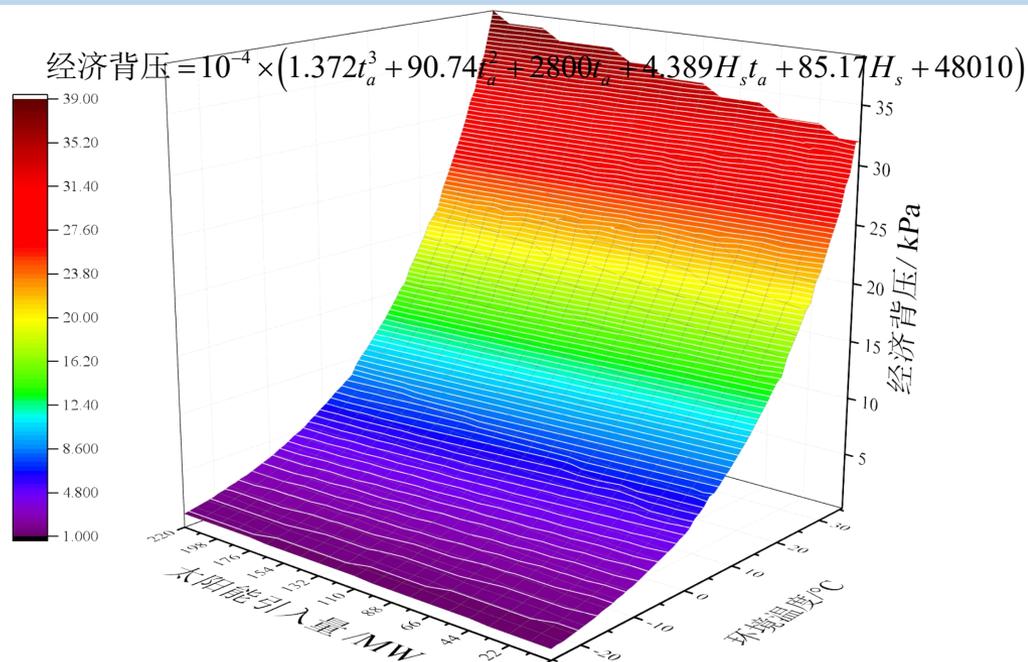
对发电功率的影响规律

**结论：**在环境温度、风机功耗和太阳能引入规模三个影响因素中，环境温度对系统背压的影响程度最大；而太阳能引入规模的变化，对系统的功率输出影响程度最大。



## 全工况经济背压数据库

基于空冷型互补机组经济背压与太阳能引入规模、环境温度、风机功耗之间的关系，以净发电功率最大为目标，形成全工况经济背压数据库。



### 应用情况：

在已知**环境温度**、**DNI**情况下，即可根据全工况经济背压数据库获取**经济背压值**，从而调节**风机功耗**使系统运行在经济背压下，实现经济运行

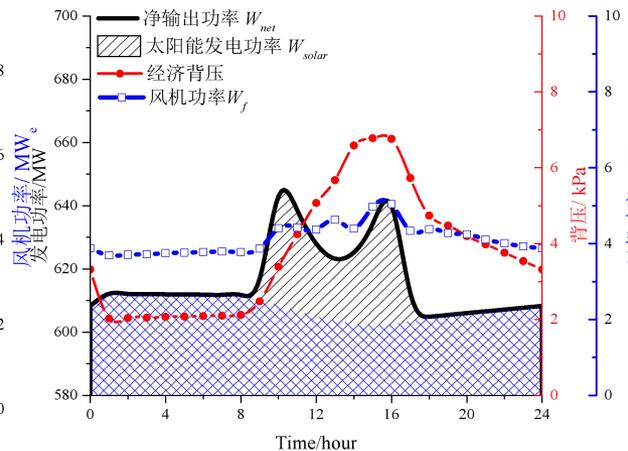
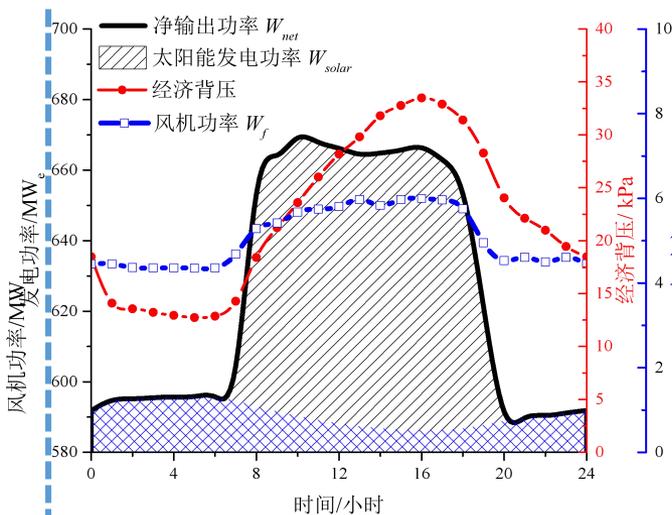
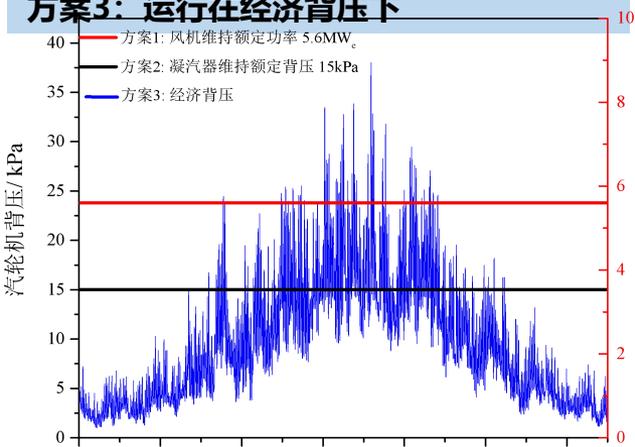


## 性能分析

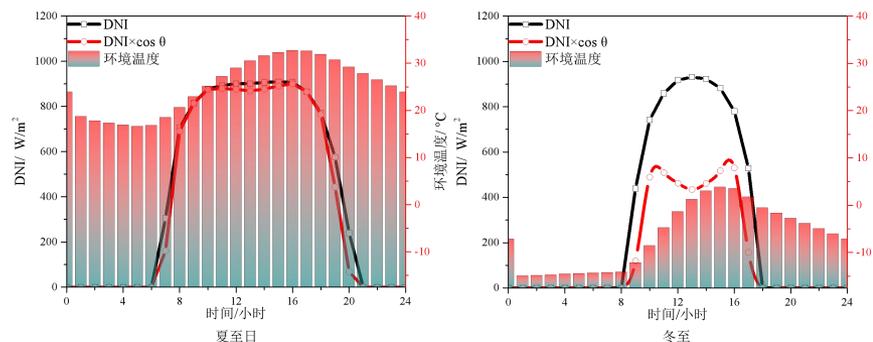
方案1: 风机维持额定功耗5.6MW

方案2: 机组背压维持额定背压15kPa

方案3: 运行在经济背压下



参数	单位	方案1	方案2	方案3
集热场面积	m <sup>2</sup>	332 005	332 005	332 005
汽轮机背压	kPa	--	15	--
风机耗电量	MWh	49 056	28 558	38 163
净输出电量	×10 <sup>3</sup> MWh	5 349	5 311	5 363
太阳能发电量	MWh	85 402	46 824	98 600
年光电效率	%	15.44	8.47	17.82
LCOE	元/kWh	0.67	1.2	0.6



## 结论:

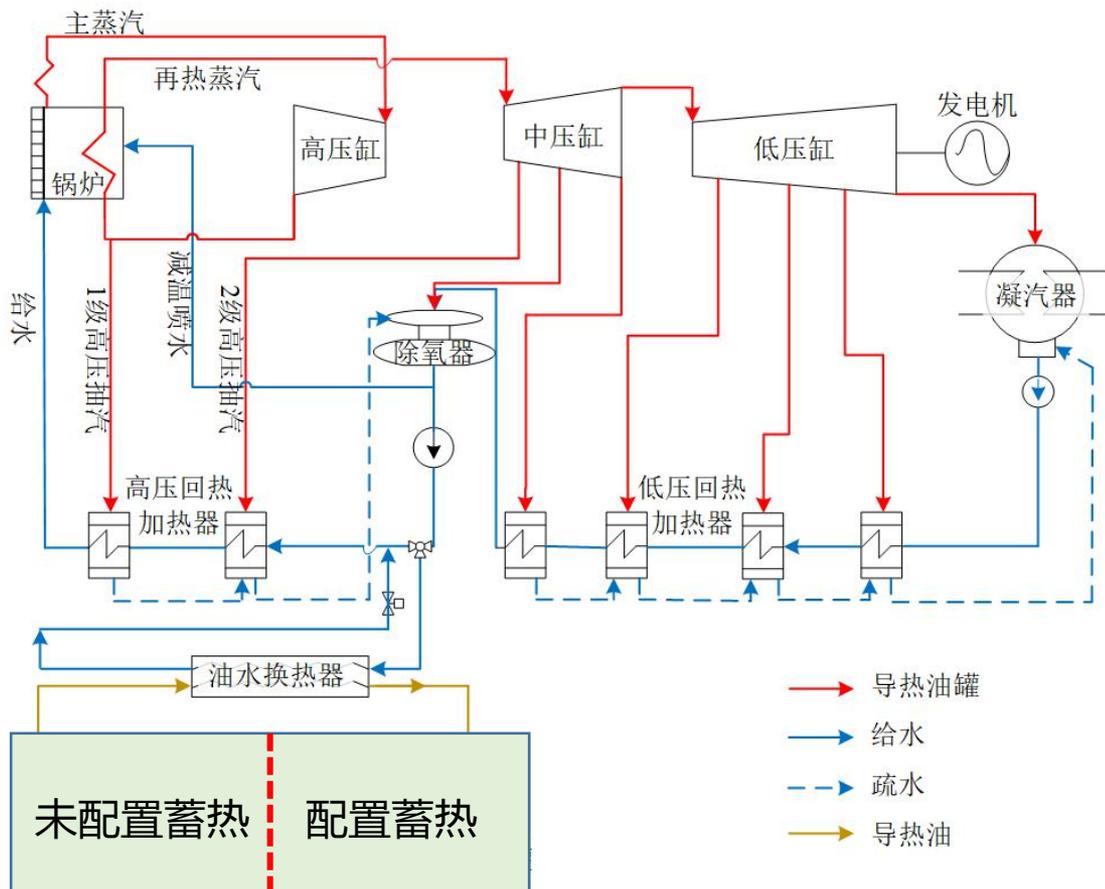
采用全工况经济背压数据库, 使空冷机组运行在经济背压下, 可显著提高互补系统性能, 相比于固定机组背压、固定风机功耗: LCOE从1.2元和0.67元**减小至0.6元/kWh**, 年光电效率从8.5%和15.4%**提高至17.8%**。



## 集热场启动工况、云遮工况仿真研究

### 案例分析

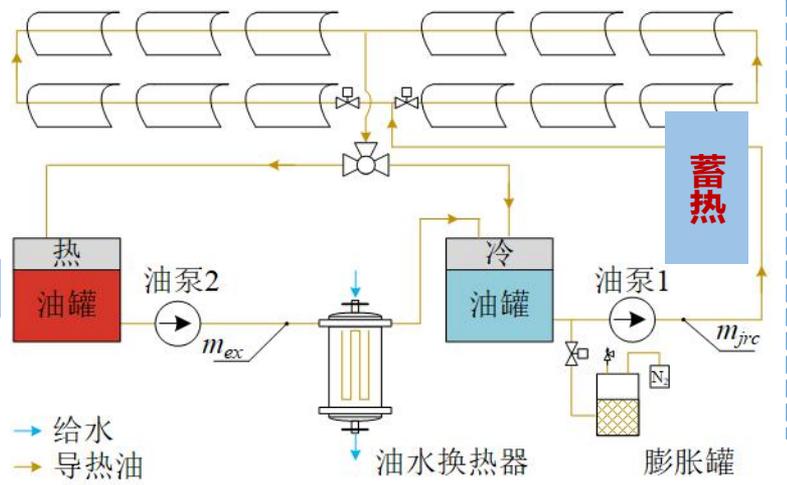
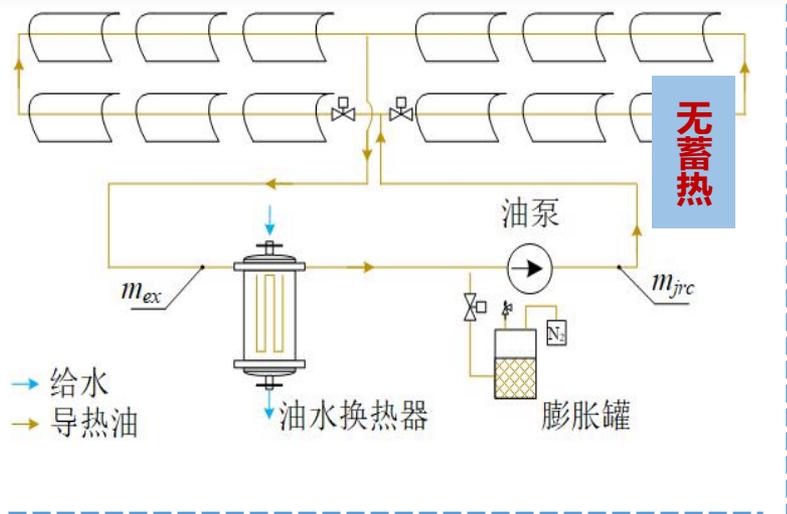
机组容量：330MW  
 回热：2高4低1除氧  
 集成方案：  
 取代1、2高加抽汽  
 设计工况：  
 恰好完全取代高抽  
 运行模式：  
 功率增大型(PB)



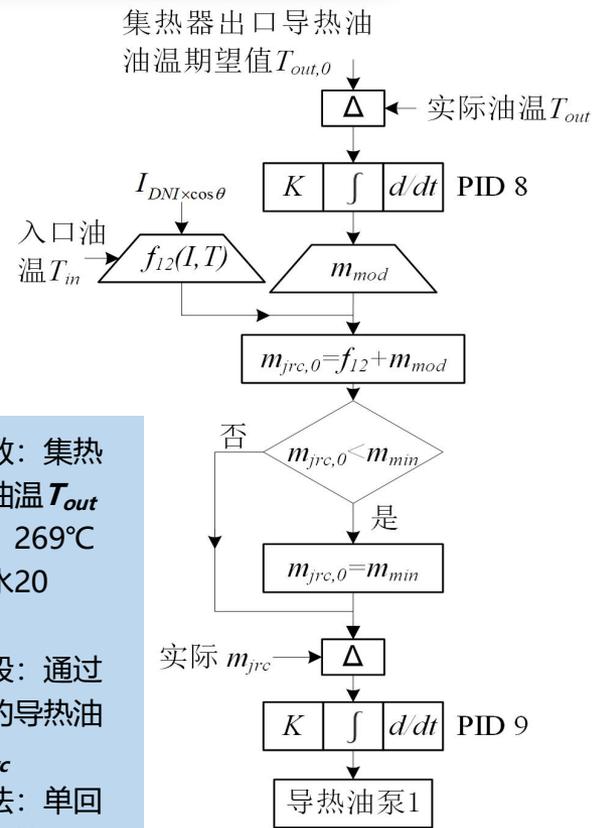


# 集热场启动工况、云遮工况仿真研究——油流量控制

**主要区别**  
**未配置蓄热:**  
 $m_{ex} = m_{jrc}$   
**配置蓄热:**  
 $m_{jrc}$ 、 $m_{ex}$  分  
 别由油泵1和  
 油泵2单独控  
 制



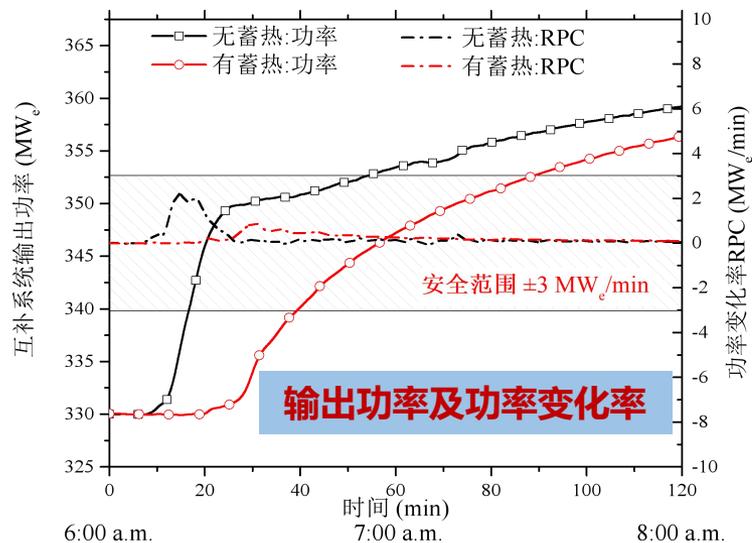
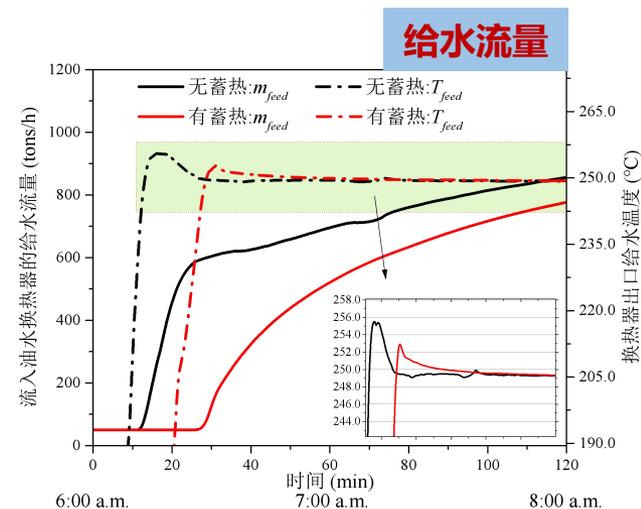
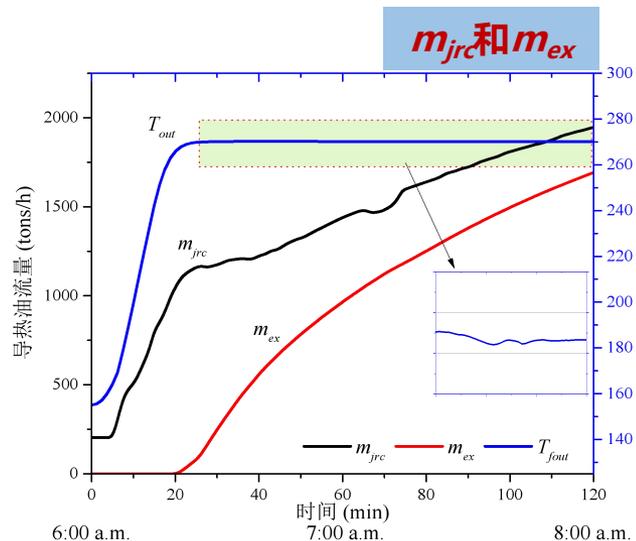
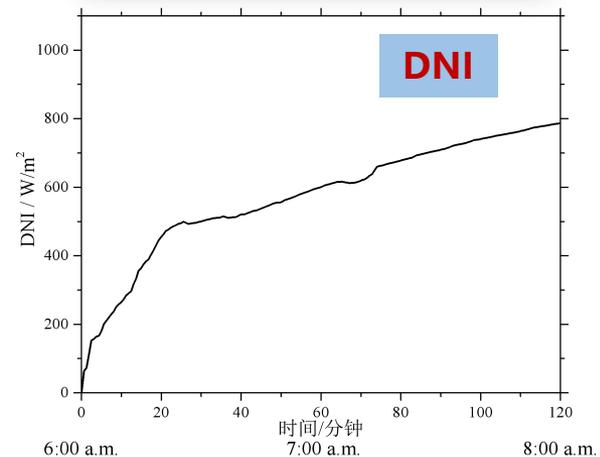
## 集热场出口油温稳定: $m_{jrc}$



- 控制参数: 集热器出口油温  $T_{out}$
- 期望值: 269°C (与给水 20°C)。
- 控制手段: 通过集热器的导热油流量  $m_{jrc}$
- 控制方法: 单回路双极调控



## 集热场启动工况



**结论:** 在集热场启动工况下, 配置或未配置蓄热时, 互补系统均能正常运行。



## 集热场云遮工况

多云时太阳辐照可能会产生阶跃性变化：  
设定4个场景模拟云遮工况：

**场景1，对照组：**

DNI从 $900\text{W/m}^2$ 阶跃减小至 $200\text{W/m}^2$

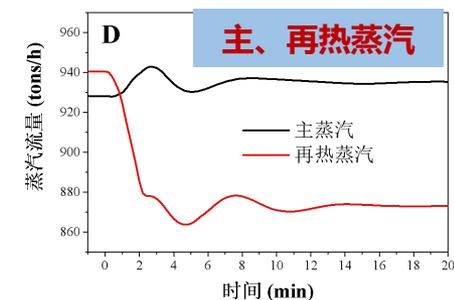
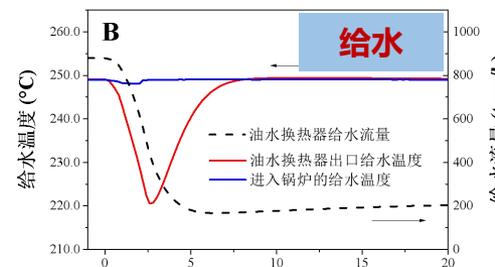
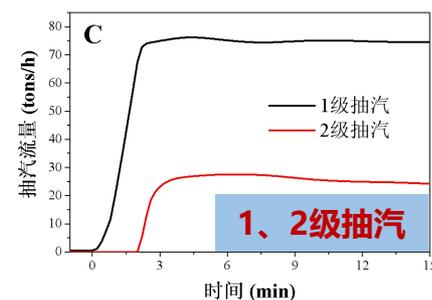
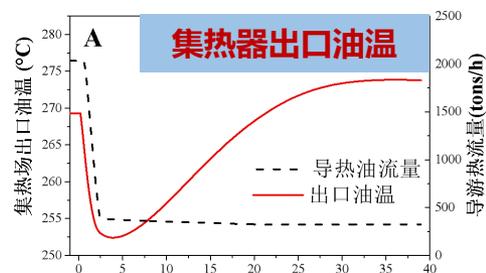
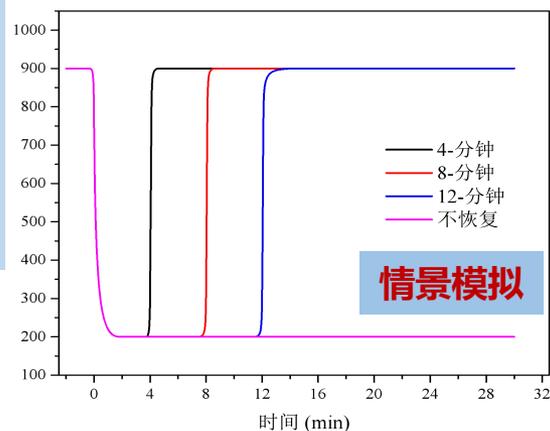
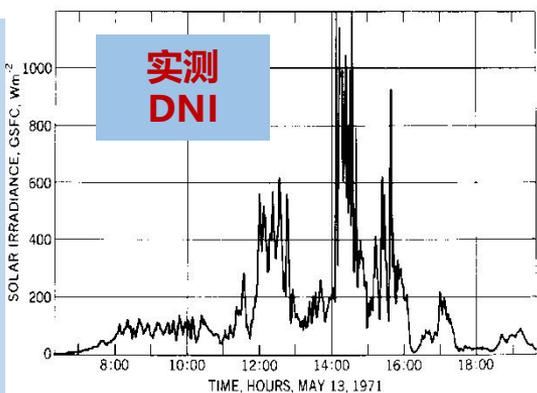
场景2、3、4：

第4分钟 (场景2)、

第8分钟 (场景3)、

第12分钟 (场景4)，

DNI从 $200\text{W/m}^2$ 恢复至 $900\text{W/m}^2$



未配置蓄热时，系统参数响应

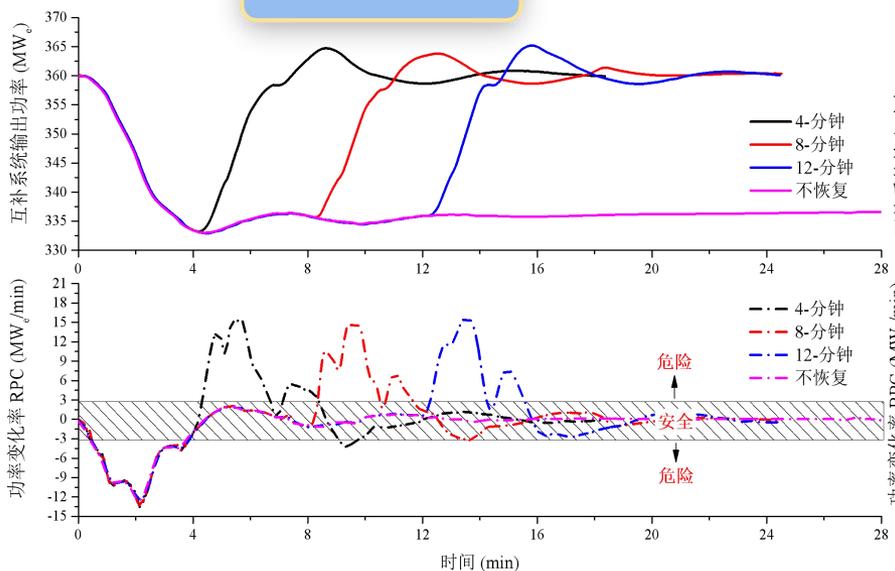


## 集热场云遮工况

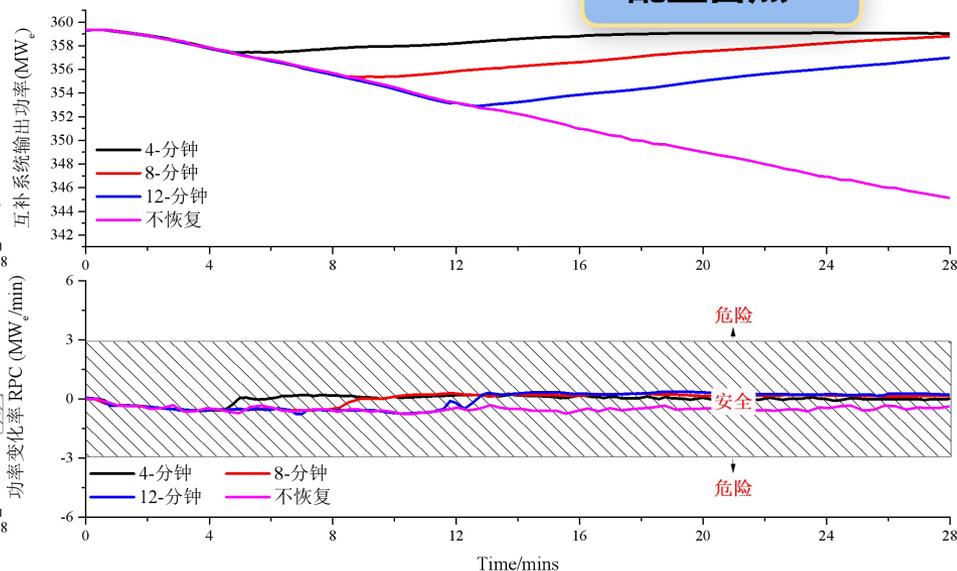
未配置蓄热

功率变化率的安全允许范围为  $\pm 3 \text{ MWe/分钟}$

配置蓄热



未配置蓄热时，下降阶段，变化率最高可达  $-13.8 \text{ MWe/分钟}$ ；功率上升阶段，变化率最高可达  $15.8 \text{ MWe/分钟}$   
严重威胁安全运行！



功率变化率均小于在  $1 \text{ MWe/分钟}$   
有效抑制太阳能瞬变特性给互补系统关键参数带来的波动，有力保障互补系统在该工况下的安全运行。

**配置蓄热是非常有必要的！**

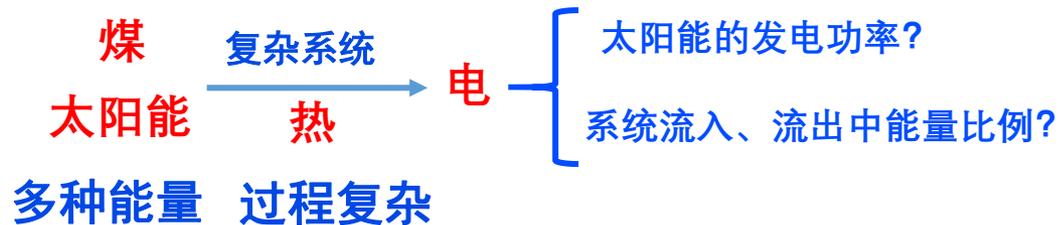
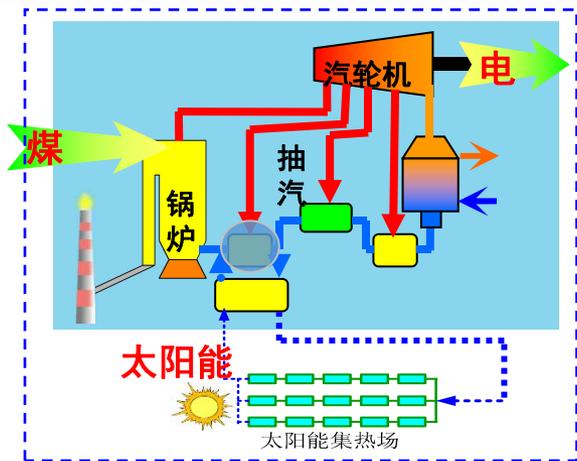


# 目录

- 1 背景及研究现状
- 2 系统集成优化设计
- 3 系统运行特性研究
- 4 太阳能贡献度评价



# 太阳能贡献度解析解



## 1. 参考燃煤电站发电效率法

$$\alpha = 1 - \frac{Q_{in,SAPG}}{3.6 \times 10^6 \times W_e} \times \eta_{ori}$$

未考虑

1. 能量品位

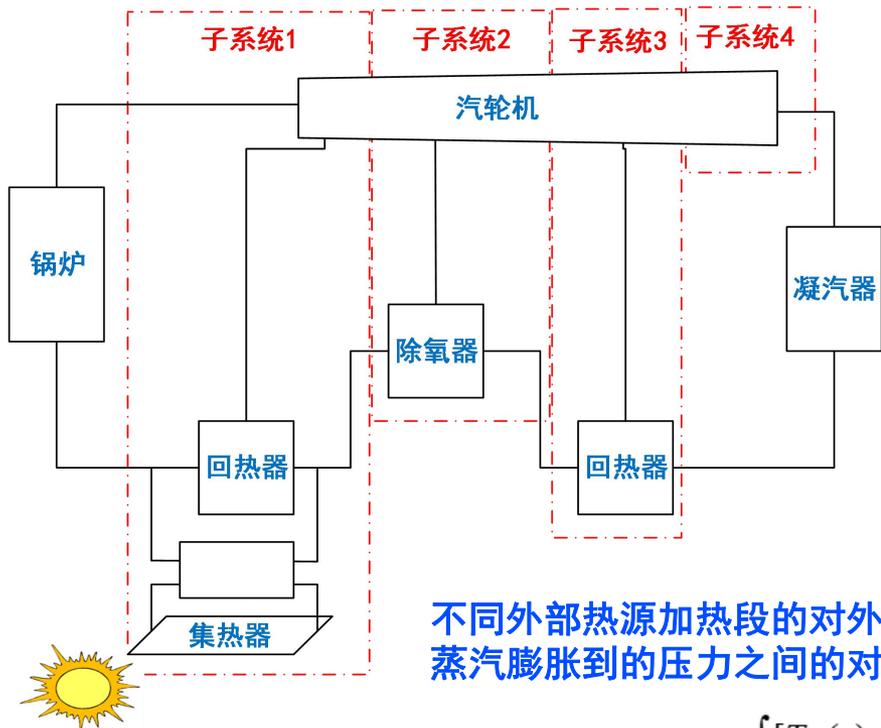
2. 引入太阳能对参数的影响

## 2. 热量比例分配法

$$\alpha = \frac{Q_{in,solar}}{Q_{in,SAPG}}$$



# 太阳能贡献度解析解

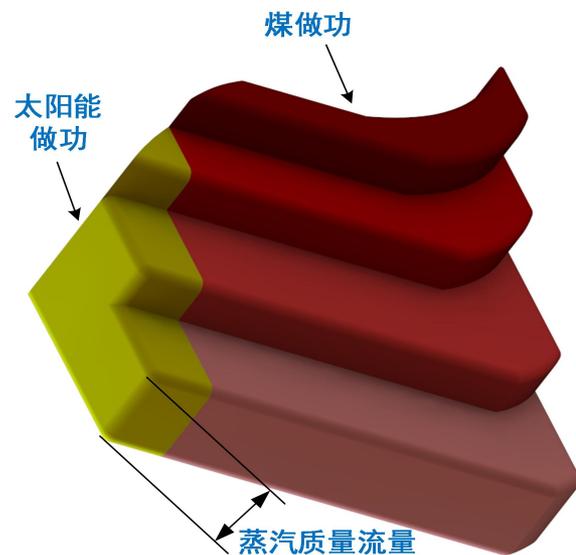
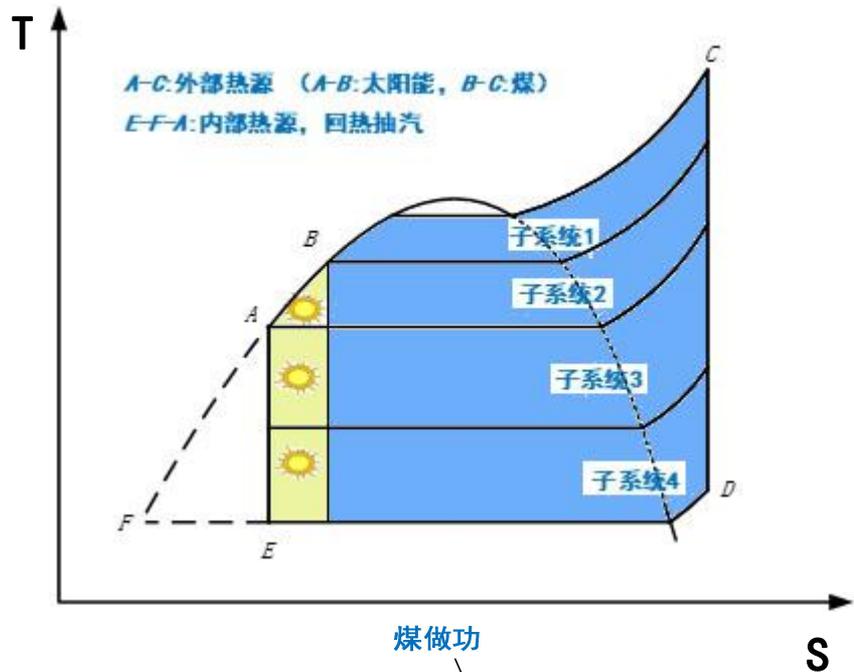


不同外部热源加热段的对外做功能力与蒸汽膨胀到的压力之间的对应关系

$$w_{(i-1)-i,j} = w_{0-i,j} - w_{0-(i-1),j} = \int_j [T_{i-1}(s) - T_i(s)] ds$$

太阳能净发电功率:

$$\dot{W}_s = \frac{1}{1000} \dot{m}_0 \left( e_s - \sum_{i=1}^9 e_D^i \alpha_s^i \right) \eta_m \eta_g$$



衷心感谢大家!!!

