



# 第十届超超临界机组技术交流2016年会



**陈世和**

广东电科院热工所所长，教授级高级工程师，东北电力大学客座教授。全国发电过程自动化学科首席科学传播专家，全国电力行业热工自动化技术委员会秘书长，中国自动化学会发电自动化专业委员会副秘书长，全国电站过程监控及信息标准化技术委员会委员。长期从事智能电站控制、超超临界机组自启停控制（APS）、远程监测与诊断等技术研究。共获省部级科学技术奖13项，发表学术论文40余篇，出版学术著作3部，33项发明专利已获授权。

## 超超临界机组智能控制技术展望

2017年2月28日-3月2日 中国·济南

主办单位：中国动力工程学会

协办单位：华能山东发电有限公司

承办单位：中国电力科技网

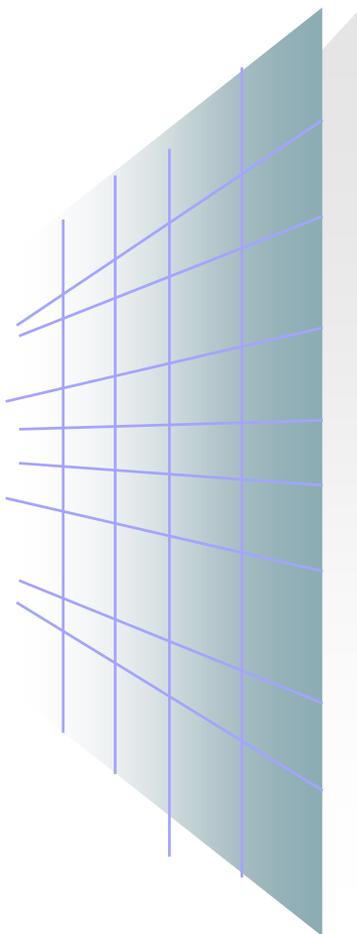
# 超超临界机组智能控制技术展望



报告人：陈世和 所长/教授级高工

广东电网有限责任公司电力科学研究院

2017年2月28日



1

背景

2

超超临界机组主要参数先进控制技术

3

超超临界机组深度调峰全程节能控制技术

4

超超临界机组超低排放协同优化控制技术

5

新一代电厂——智能电厂控制技术展望

6

结论

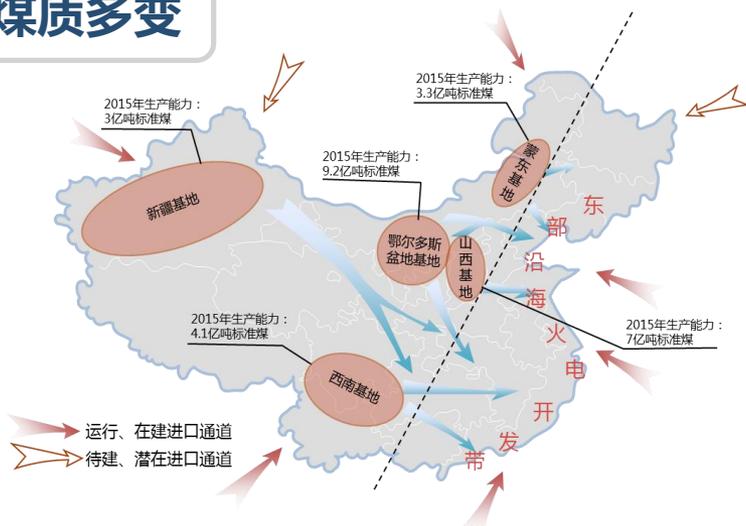
## 现代火电厂控制发展的三个阶段



# 一、背景

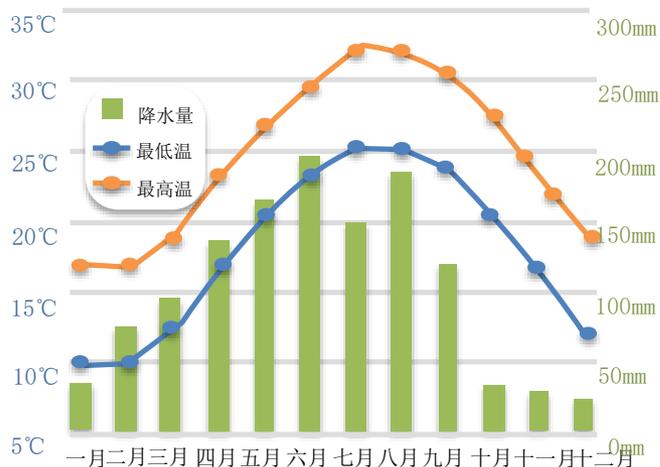
## 目前火电厂运行面临的问题：“四变”

### 煤质多变



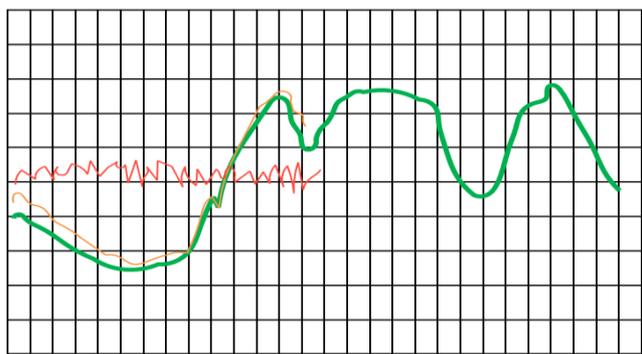
我国大陆煤炭分布和来源通道

### 气候多变



沿海某地气温和降水分布曲线

### 负荷多变



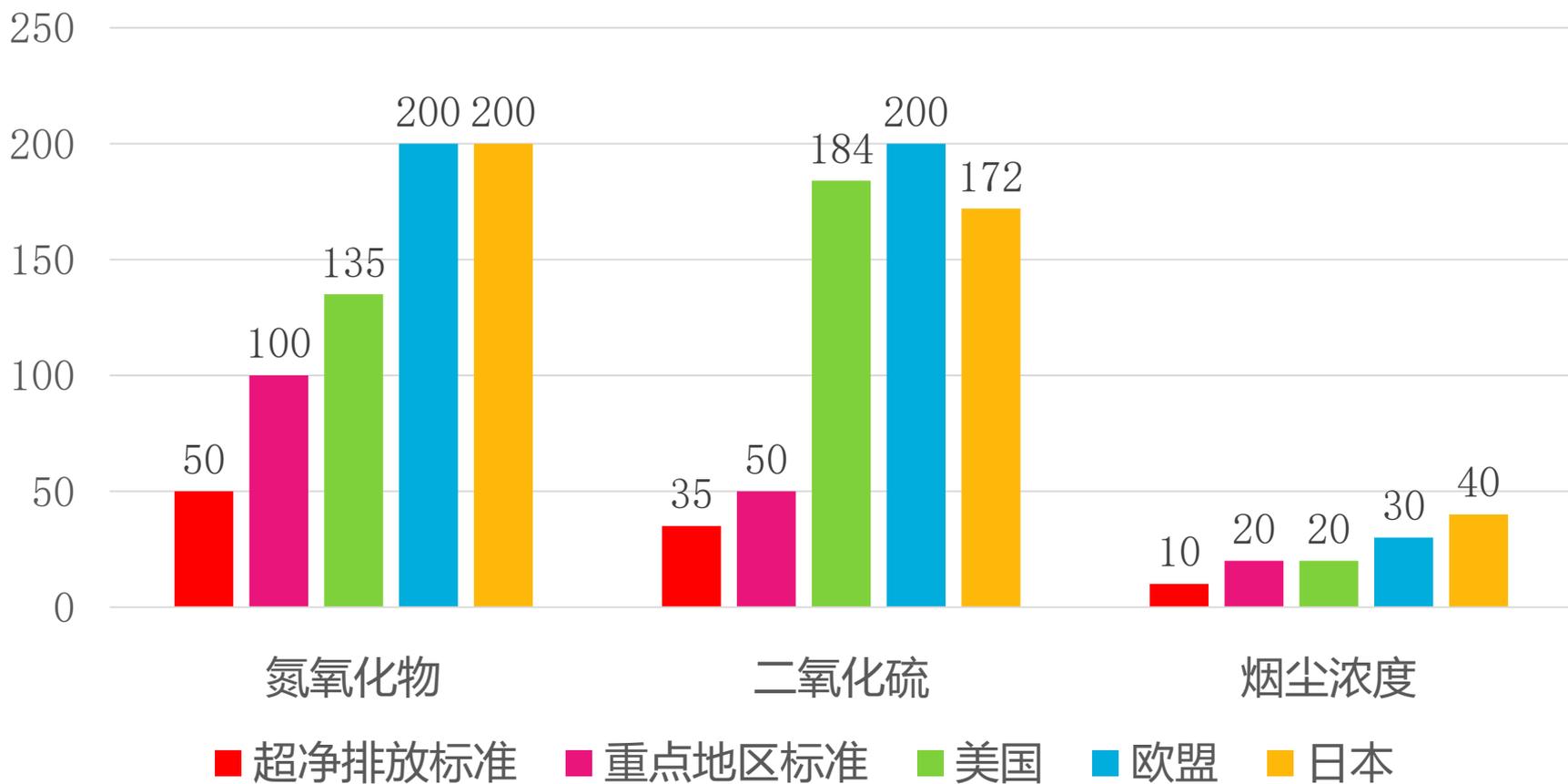
调度日负荷曲线，深度调峰

### 煤价多变



# 一、背景

## 超低排放标准全世界最严格

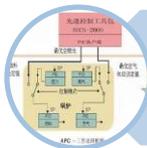


我国与发达国家排放标准对比

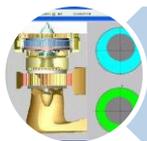
## 超超临界机组控制的新要求



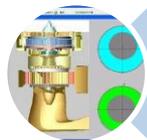
机组的主要参数如何能控制得更加准确、稳定



如何适应长期运行在中低负荷



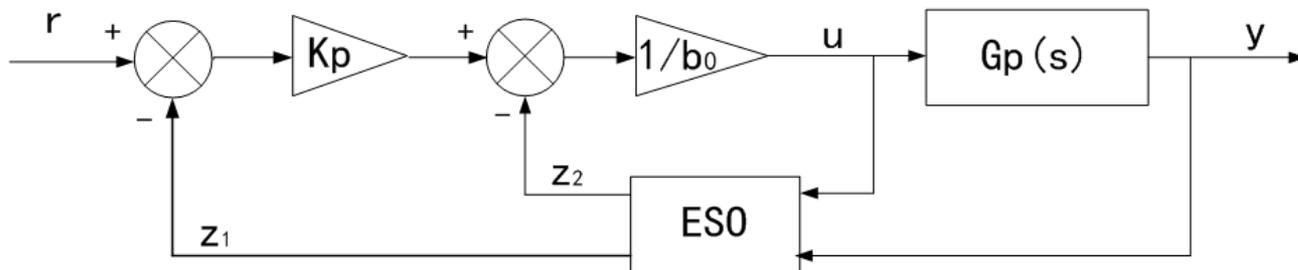
如何更好地满足超低排放的要求



如何实现智能在线优化技术

### 2.1 ADRC (自抗扰控制技术)

自抗扰控制技术是吸收非线性PID控制器基本思想，结合现代控制理论发展而来，能够对抗扰动和模型不确定部分进行实时估计和补偿，是一种可以解决大惯性、非线性、时变、不确定等复杂控制问题的有效技术



PI  $\longrightarrow$  1st ADRC

### 2.1 ADRC (自抗扰控制技术)

#### 研究典型回路的自抗扰控制系统的设计方法

汽包水位控制  
过热汽温控制  
炉膛负压控制  
协调控制  
.....

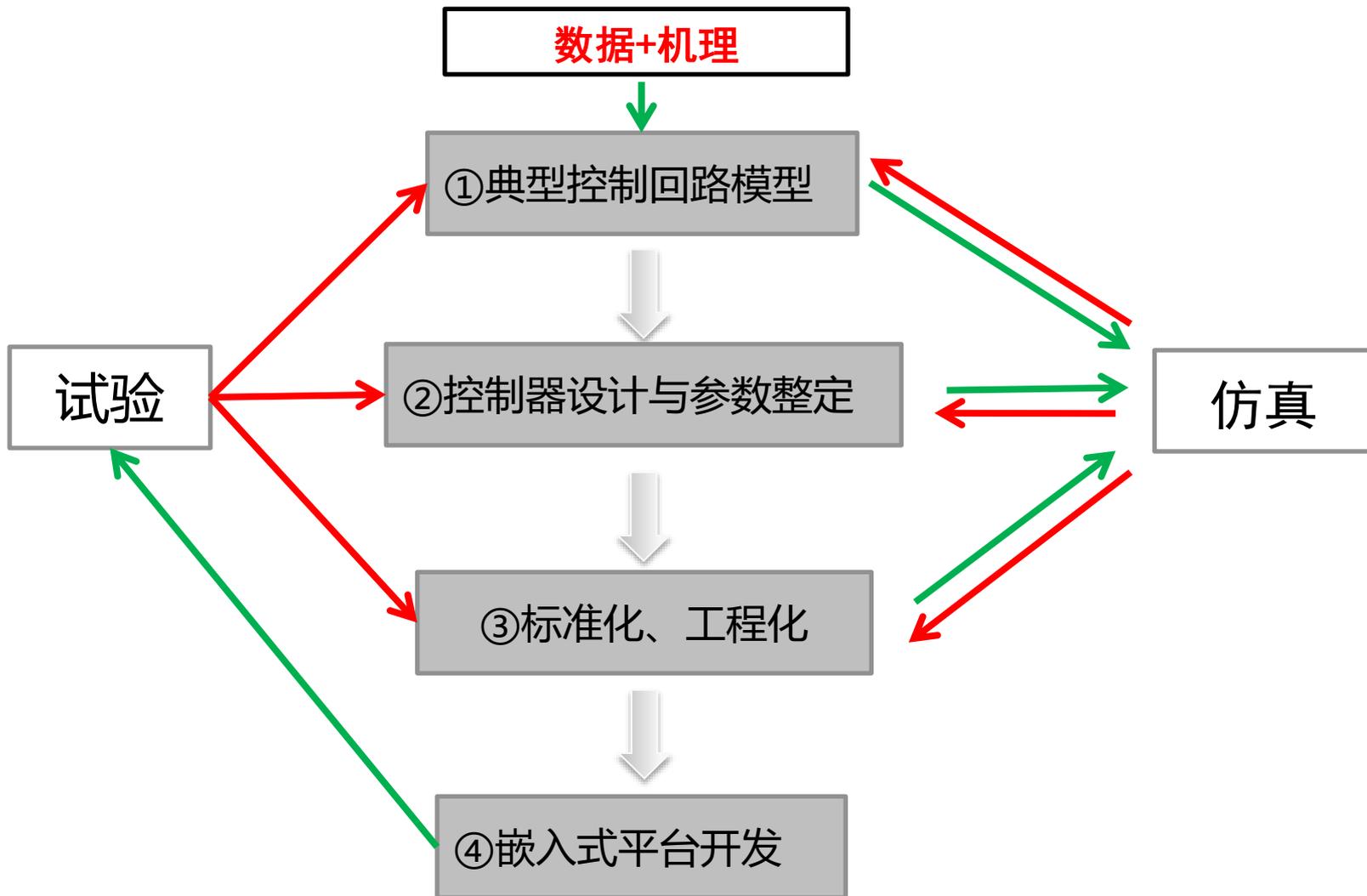
回路建模

模型简化与  
仿真验证

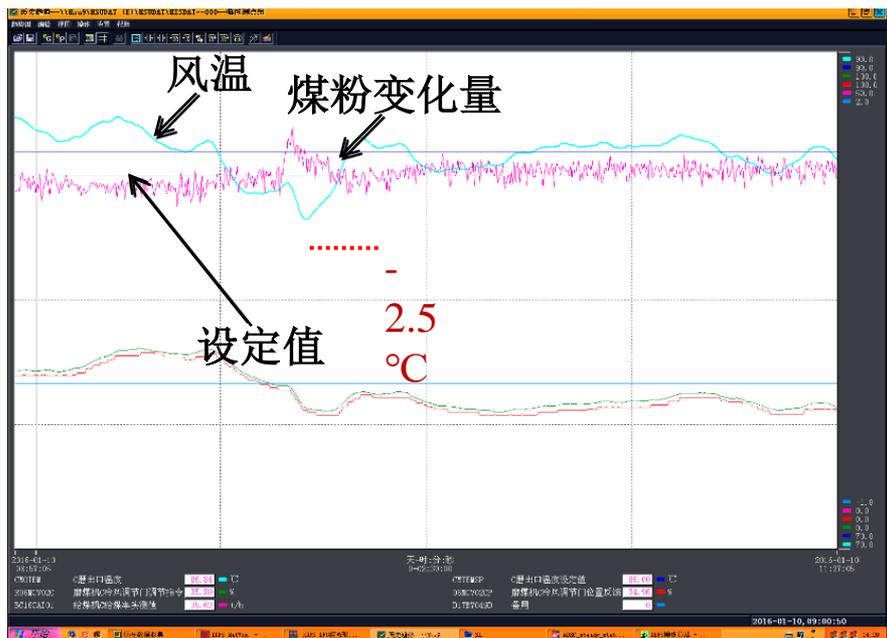
自抗扰控制  
系统设计

快回路、慢回路  
简单、串级、二入二出、三入三出

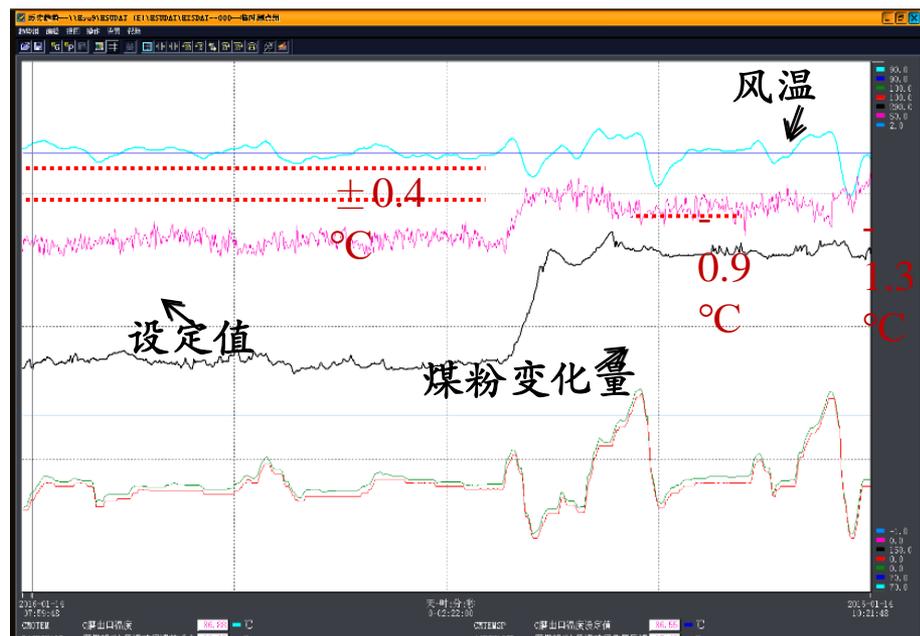
### 2.1 ADRC (自抗扰控制技术)



# 应用：磨煤机出口风温控制



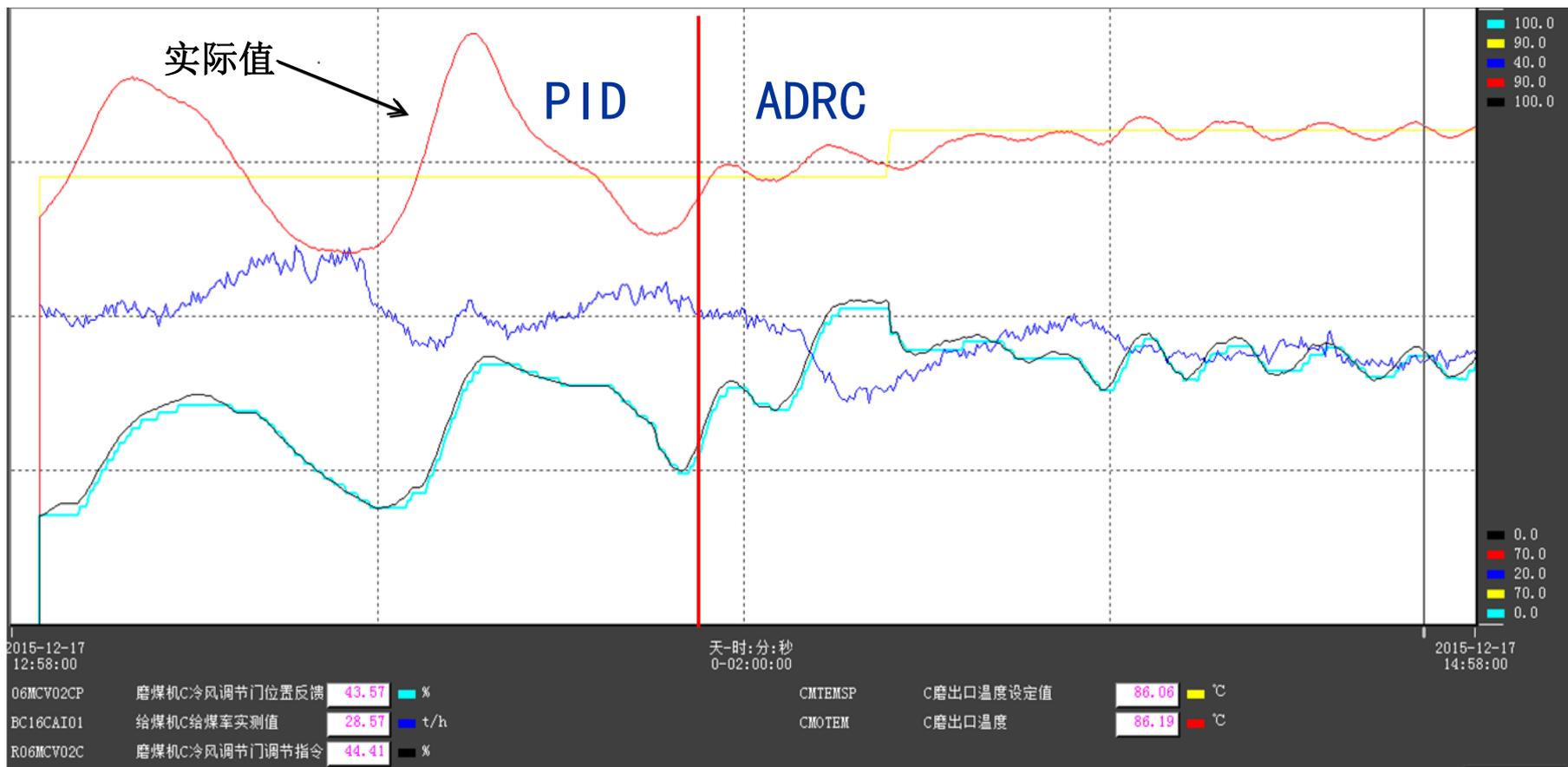
PID控制：煤量扰动



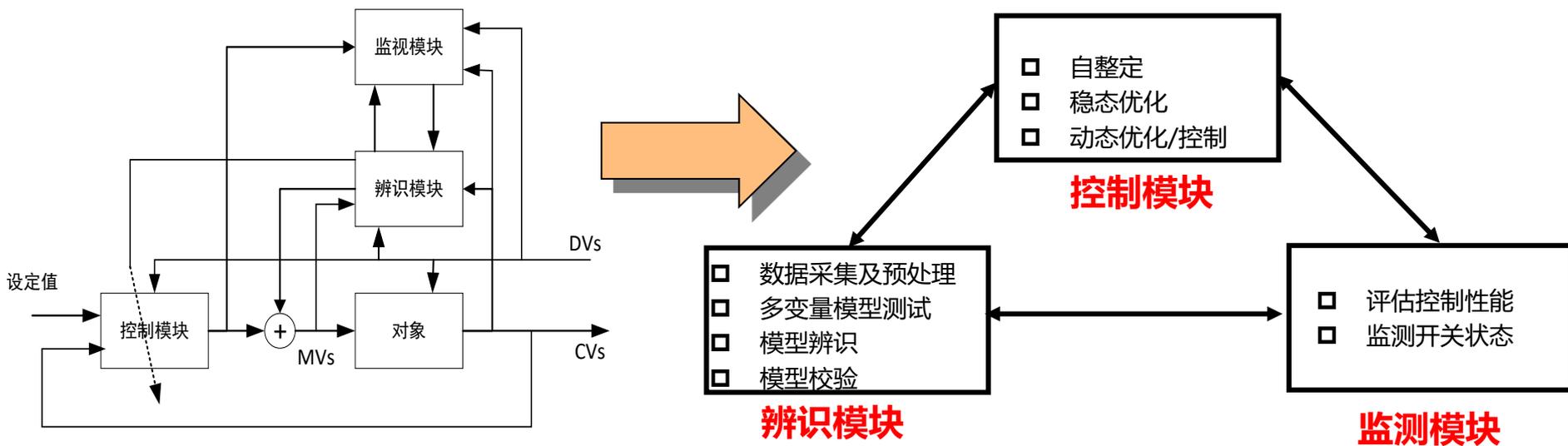
ADRC控制：煤量扰动

PID的稳态波动比ADRC的动态波动还大！

## 自抗扰控制技术应用—磨煤机出口风温控制

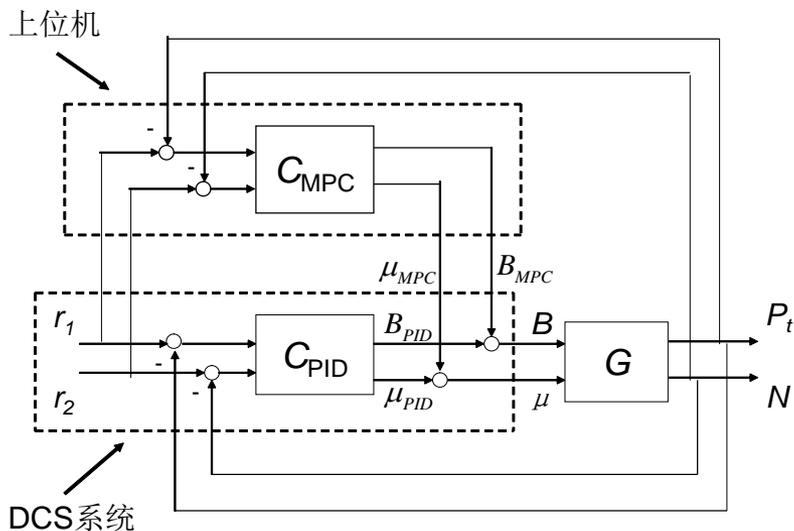


### 2.2 模型预测控制技术

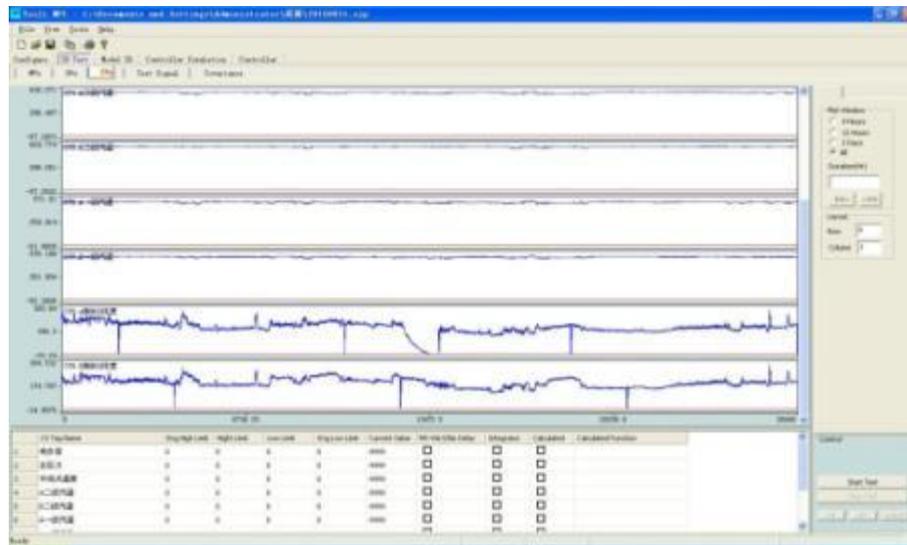


预测控制综合利用实时信息和模型信息，对目标函数不断进行滚动优化，并根据实际测得的对象输出修正或补偿预测模型。预测控制是目前可以较好应用到工业过程控制的先进控制算法。

### 2.2 模型预测控制技术



系统构架



先控软件平台

- 采用双层结构预测控制的参数整定,目标计算的参数包括目标函数中的各种权系数和约束边界。研究参数设置与最优解之间的关系。
- 系统采用OPC方式实现先控与DCS间的通讯,通过看门狗回路、偏差判断、故障工况等功能保证了预测控制与DCS常规控制的无扰切换。

### 2.2 模型预测控制技术

#### 全激励式仿真平台



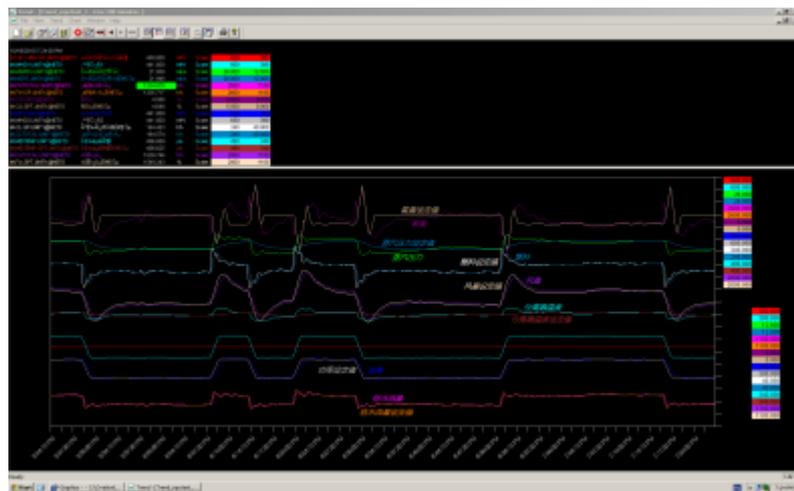
电站控制仿真实验室



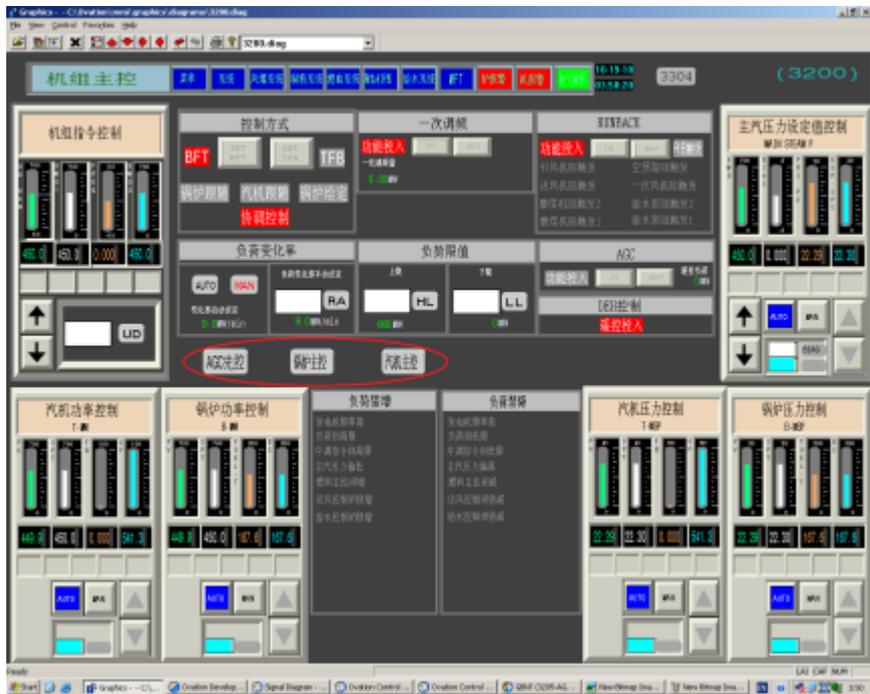
最小化DCS及优化控制试验平台

#### 仿真结果

内容	试验 I	试验 II	试验 III	试验 IV
负荷起点 (MW)	450	350	450	350
负荷终点 (MW)	350	450	350	450
速率 (%Pe/min)	2.5	2.5	1.5	1.5
最大负荷偏差 (MW)	3.0	2.5	2.5	3.0
最大蒸汽压力偏差 (MPa)	0.2	0.35	0.25	0.25
最大分离器温度偏差 (°C)	5.2	3.1	3.3	3



### 2.2 模型预测控制技术



采用模型线性变参数技术、控制参数渐进逼近法等工程化处理方法保证MPC在变负荷过程中的快速、精确控制。



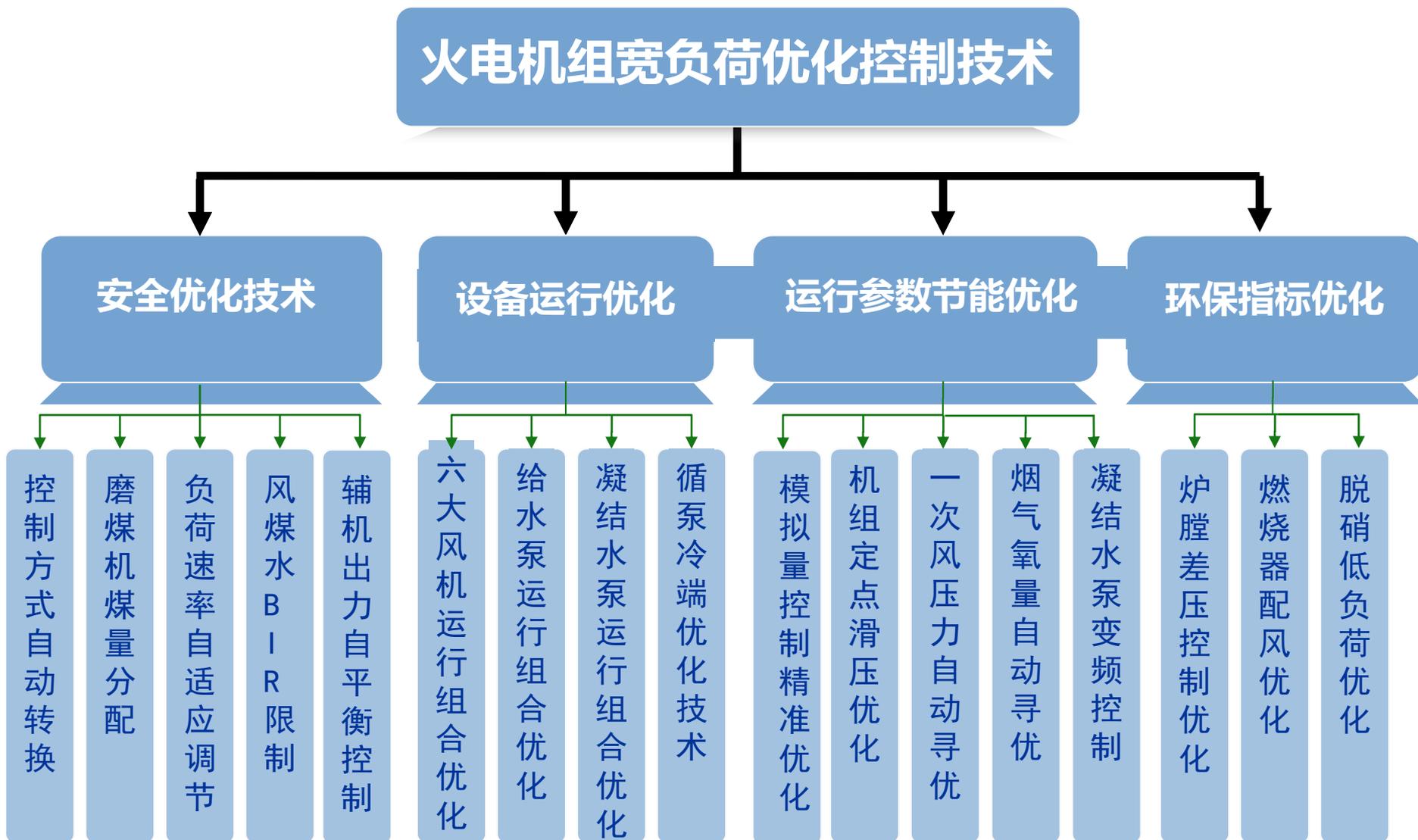
采用二级减温水控制联动一级汽温的设定值，使后级的减温水阀位远离全开或全关的位置，以保证后级汽温的调节能力。

### 2.2 模型预测控制技术

#### 应用效果—辨识模型

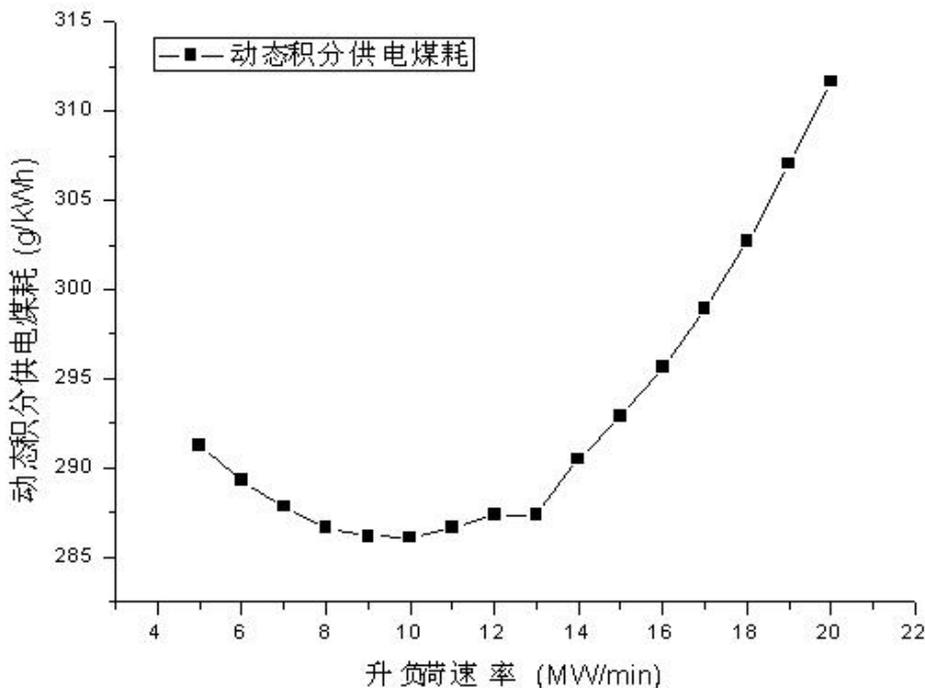
CV \ MV	锅炉主控	汽机主控	给水
负荷	$\frac{2.6}{342s+1}e^{-20s}$	$\frac{70s+0.05}{5810s^2+350s+1}$	$\frac{0.1}{80s+1}e^{-30s}$
压力	$\frac{0.11}{380s+1}e^{-10s}$	$-\frac{0.03}{330s+1}$	$\frac{0.006}{45s+1}e^{-20s}$
中间点温度	$\frac{0.32}{46s+1}e^{-20s}$	$-\frac{0.2}{70s+1}$	$-\frac{0.16}{600s+1}e^{-10s}$

协调控制系统模型



## 3.1 超超临界机组变负荷动态能耗分析及试验

### 模型建立及分析



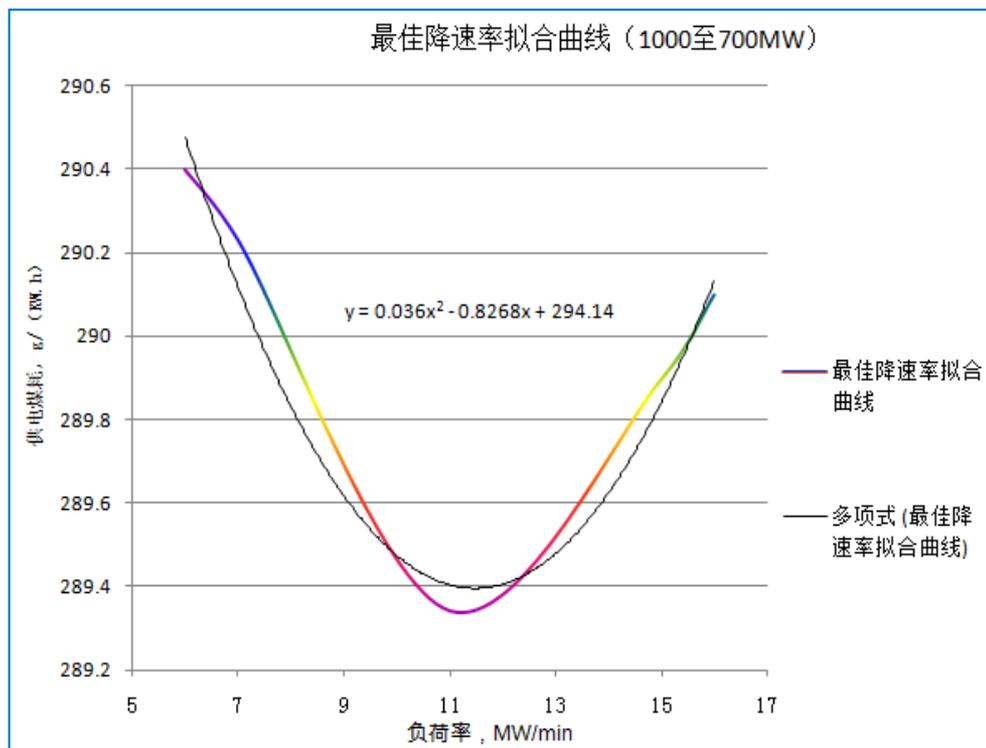
升负荷速率与动态积分供电煤耗关系

控制优化：

实时计算得到最佳负荷率，  
满足AGC前提下，自动调整  
CCS的负荷率

## 3.1 超超临界机组变负荷动态能耗分析及试验

### 动态能耗分析现场试验



最佳变负荷速率拟合曲线

现场控制优化:

11~12MW/min 负荷率较为经济, 动态过程还考虑汽压、汽温等控制偏差动态调整

。

### 3.2 基于智能优化算法的压力定值优化

#### 压力定值闭环优化

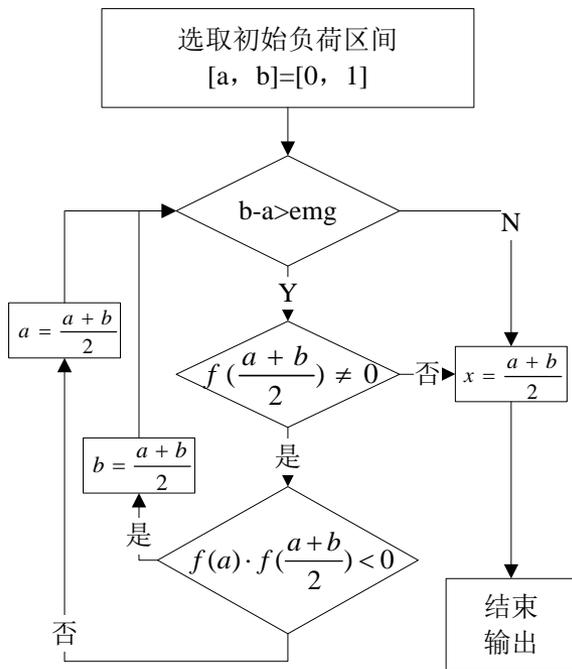
## 实施思路

- [1] 最优滑压曲线设置，是在特定约束条件下得到的，不单纯是负荷函数，还受汽耗率、真空、抽汽等变化影响，最终反映在阀点上。
- [2] 利用汽耗率、真空、抽汽量的变化来修正滑压曲线。
- [3] 以最佳滑压阀点为控制目标的闭环控制，实现发电机组在各种工况下的最佳主汽压力运行，使机组的进汽量与进汽压力匹配，达到较好的节能效果。
- [4] 降低压力改变对锅炉的影响、降低变负荷对阀点位置的影响

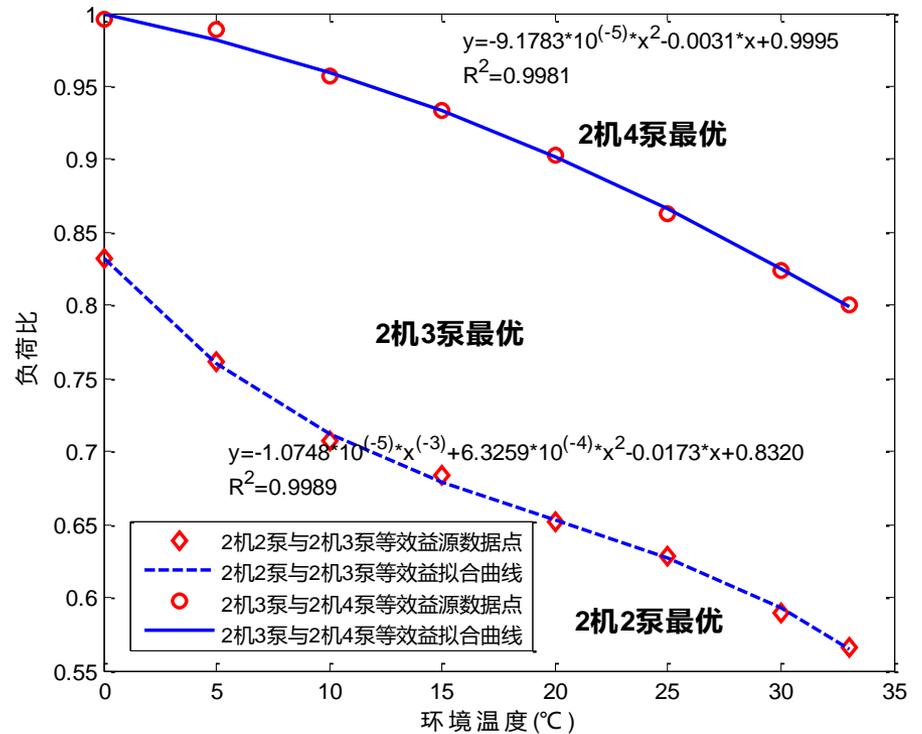
## 3.3 基于循泵优化运行的汽轮机冷端建模及节能控制

### 循环水泵优化运行

#### 等效益曲线法确定循泵运行方式



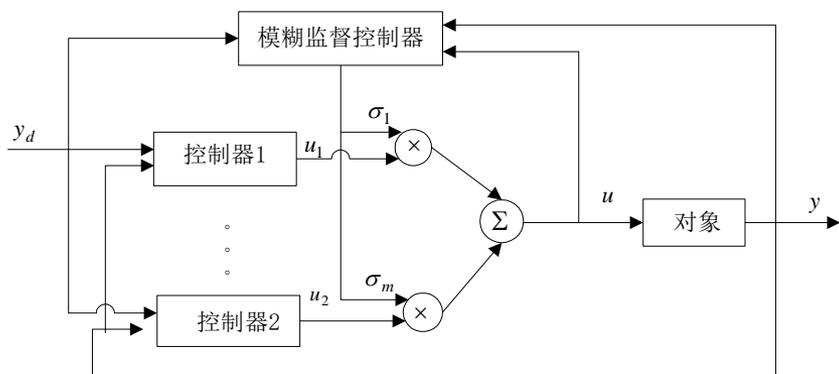
二分法求解等效益点程序流程图



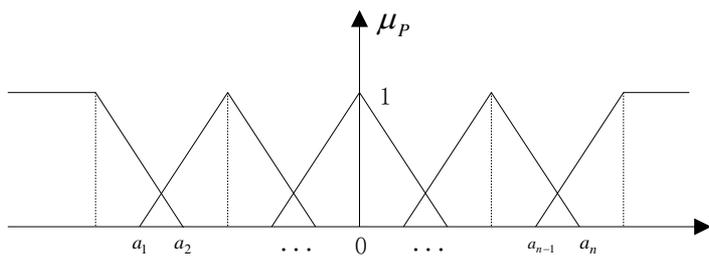
等效益曲线表示的循环水泵最优运行方式

## 3.4 基于模糊多模型自适应控制的综合协调优化

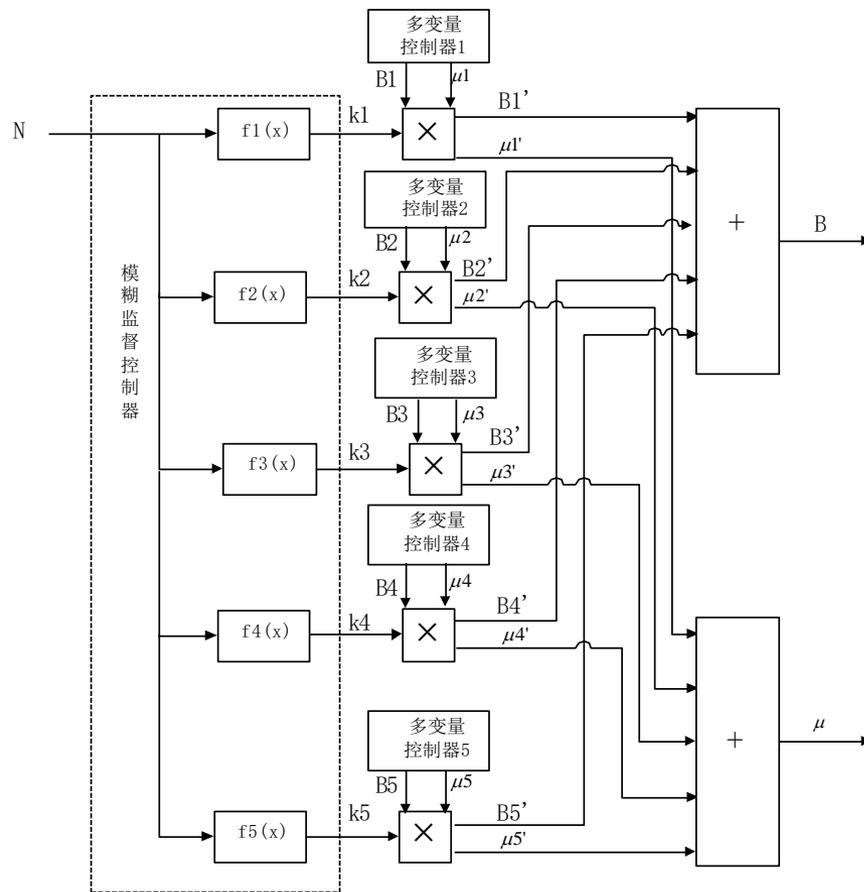
### 模糊多模型自适应控制技术



模糊监督控制器的一般结构简图



输入变量上的模糊集合

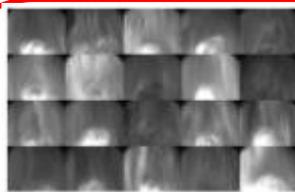


模糊监督控制系统设计

## 4.1 基于火焰图像的入炉煤质在线辨识系统



图像分析

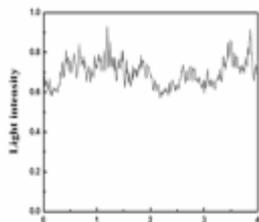


原始火焰图像 (20幅)



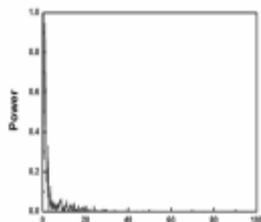
平均火焰图像

火焰空间分布特性



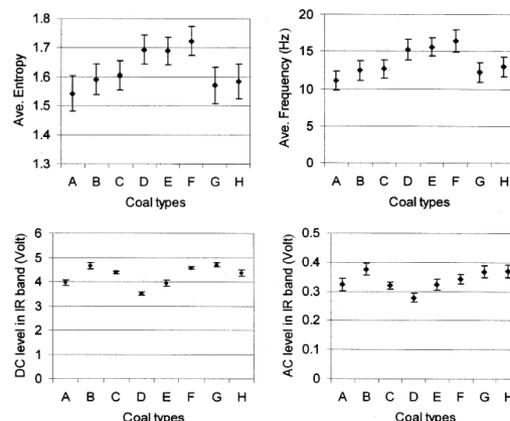
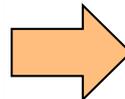
光强信号

火焰时间分布特性

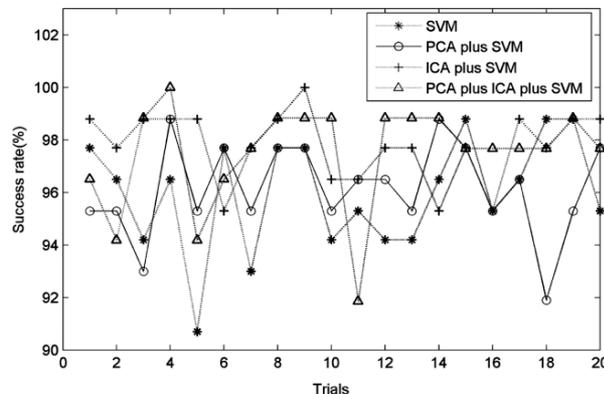


功率谱

数据建模

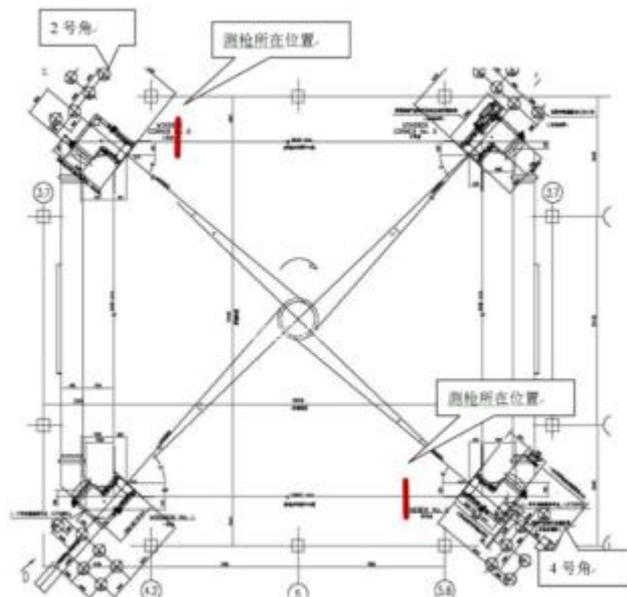
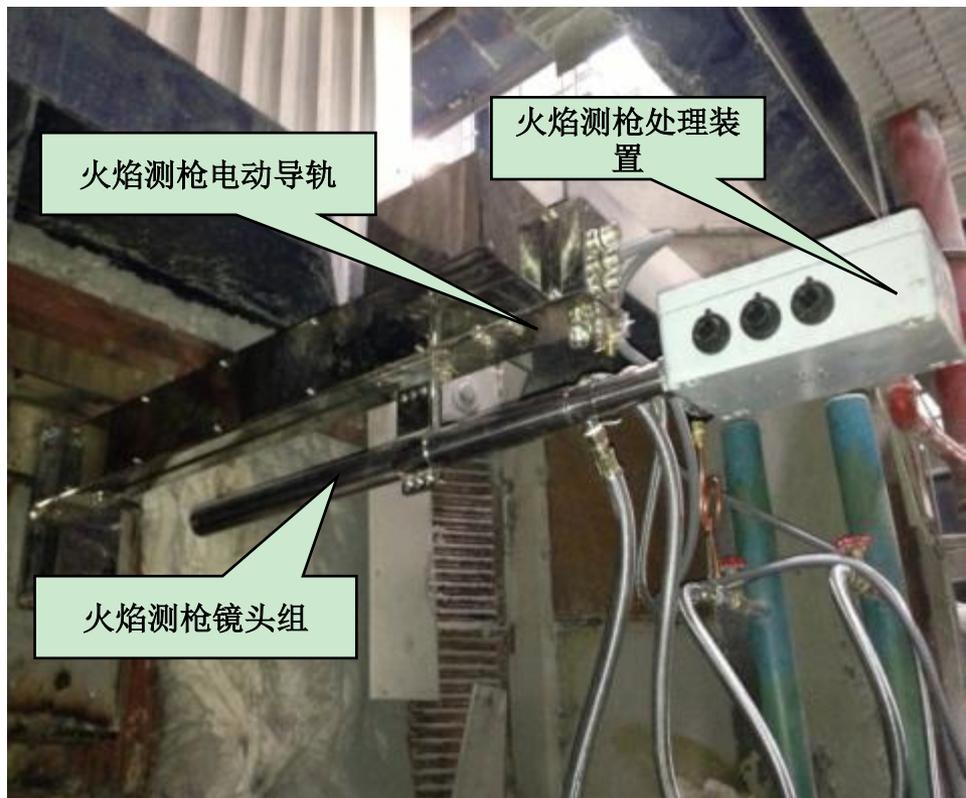


不同煤质部分特征参数的对比



基于SVM的不同建模方法的煤质辨识

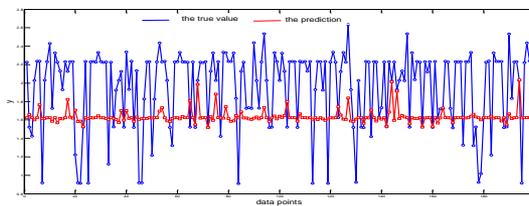
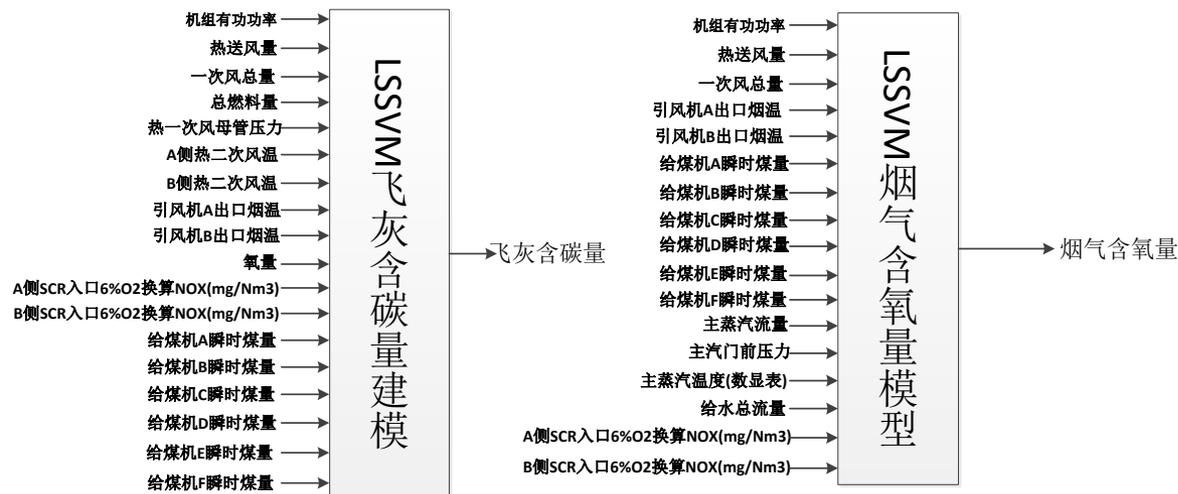
## 4.1 基于火焰图像入炉煤质在线辨识系统



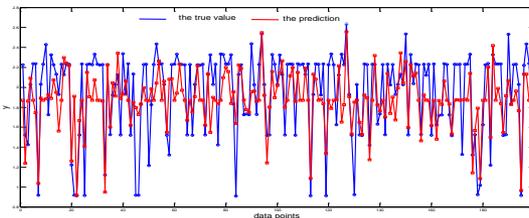
6套煤质辨识测枪分别安装在A~F层2号角或4号角的观火孔处

## 4.2 飞灰含碳量及氧量软测量技术

软测量即利用易于测量且与被测量密切相关的变量，通过建立数学模型来预测不可测量或者难于测量的变量。通过燃烧调整试验确定密切关联参数。



经典稀疏化算法泛化能力



PSO稀疏化算法泛化能力

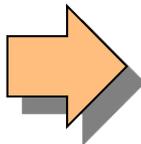
## 4.3 锅炉运行参数调整及效率排放建模研究

### 锅炉冷态试验研究

- 一次风和二次风总量标定
- 一次风的标定和调平试验
- 二次风挡板开度检查
- 二次风挡板特性试验
- SOFA风标定及比例测量
- 全开一、二次风时的动力场测量
- 低负荷时动力场测量

### 锅炉热态试验研究

- 消旋试验
- 变氧量试验
- 变一次风速试验
- 变二次风量试验
- 变高位燃尽风量试验
- 变磨组合方式试验
- 变煤粉细度试验
- 煤耗标定及比对试验



	分离器转速
600MW	500 r/min
450MW	650r/m
300MW	650r/min

	配风方式
600MW	下层二次风门开度到50%左右
450MW	保持低开度运行
300MW	保持低开度运行

	氧量值(%)
600MW	3.5-3.0
450MW	4.0-3.5
300MW	5.0-4.5

## 4.4 燃烧控制在线建模及参数寻优

### 基于渐进法的多变量辨识方法

#### 最优测试信号的设计和测试方法

开环测试  $\Phi_{u_j}^{opt}(\omega) = \mu_j \sqrt{\Phi_{u_j}^{sim}(\omega) \sum_{i=1}^p \Phi_{v_i}(\omega)}$

闭环测试  $\Phi_r^{opt}(\omega) \approx \mu \sqrt{\Phi_r(\omega) \Phi_v(\omega)}$

#### 参数估计

估计高阶ARX模型  $\hat{A}^n(z^{-1})y(t) = \hat{B}^n(z^{-1})u(t) + \hat{e}(t)$

基于频率加权的模型降阶  $\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \int_{\omega_1}^{\omega_2} \{ |\hat{G}_{ij}^n(\omega) - \hat{G}_{ij}(\omega)|^2 \frac{1}{[\Phi^{-1}(\omega)]_{jj} \Phi_{v_i}(\omega)} \} d\omega$

#### 阶次选择

渐近准则  $\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \int_{\omega_1}^{\omega_2} [ |\hat{G}_{ij}^n(\omega) - \hat{G}_{ij}(\omega)|^2 - \frac{n}{N} [\Phi^{-1}(\omega)]_{jj} \Phi_{v_i}(\omega) ] d\omega$

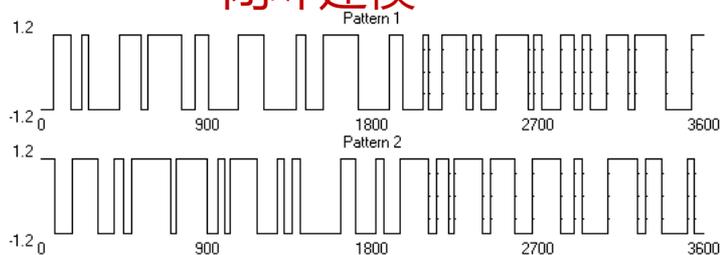
#### 模型校验

误差界  $|G_{ij}^o(e^{i\omega}) - \hat{G}_{ij}^n(e^{i\omega})| \leq 3 \sqrt{\frac{n}{N} [\Phi^{-1}(\omega)]_{jj} \Phi_{v_i}(\omega)} \text{ w.p. } 99.9\%$

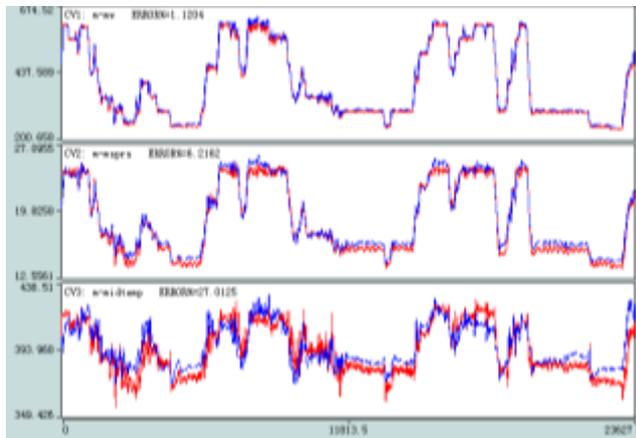
## 4.4 燃烧控制在线建模及参数寻优

### 系统辨识建模验证

#### 闭环建模



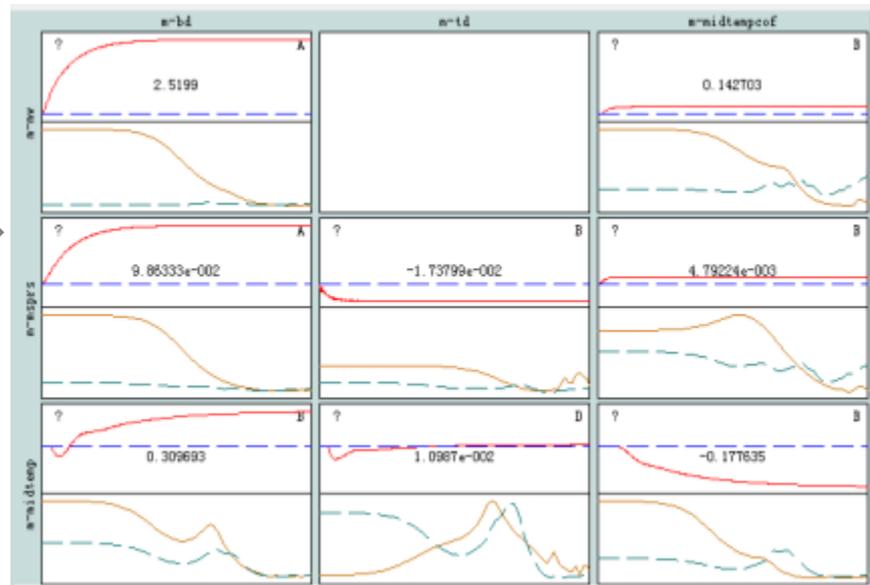
#### 模型校正



### 多变量模型解耦在线寻优

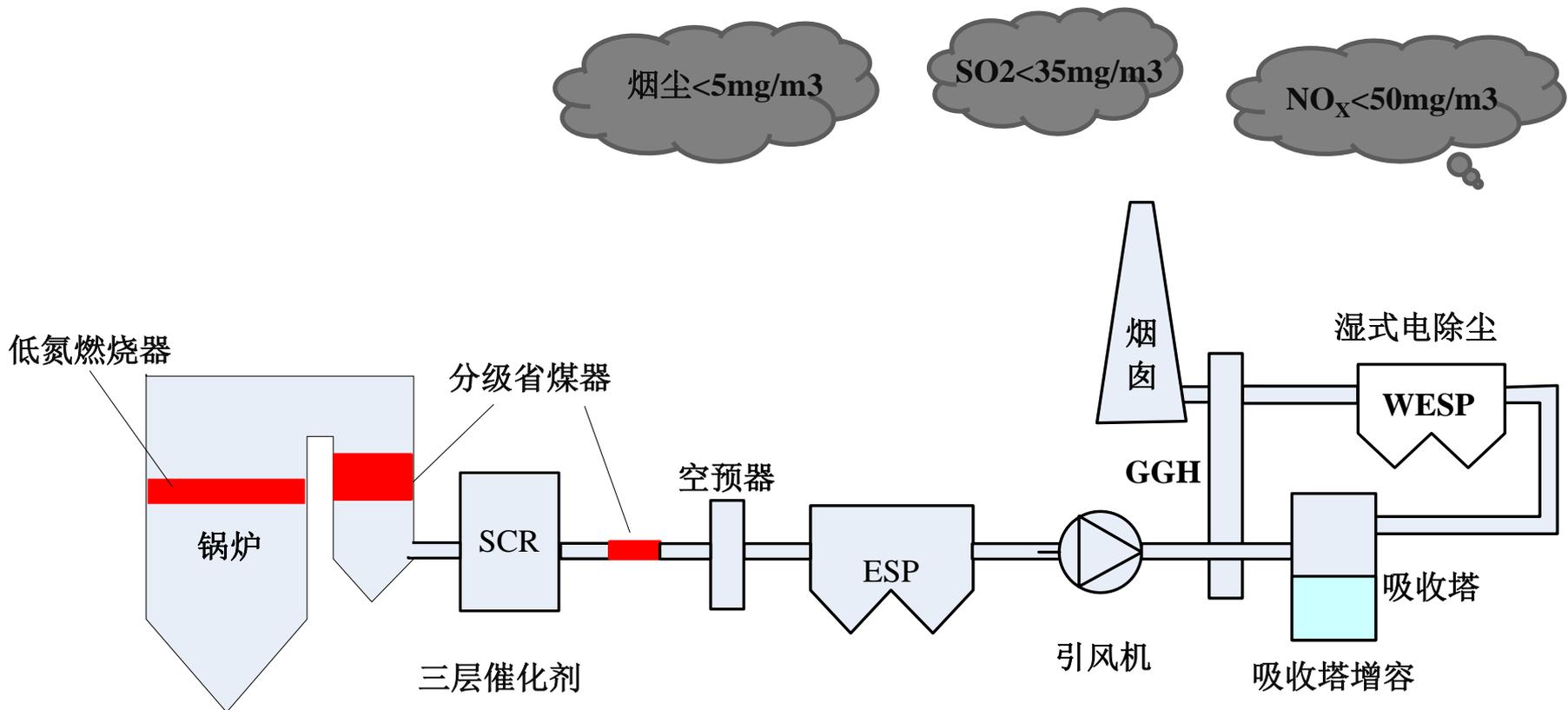
- 氧量
- 分离器转速

### 仿真建模试验结果



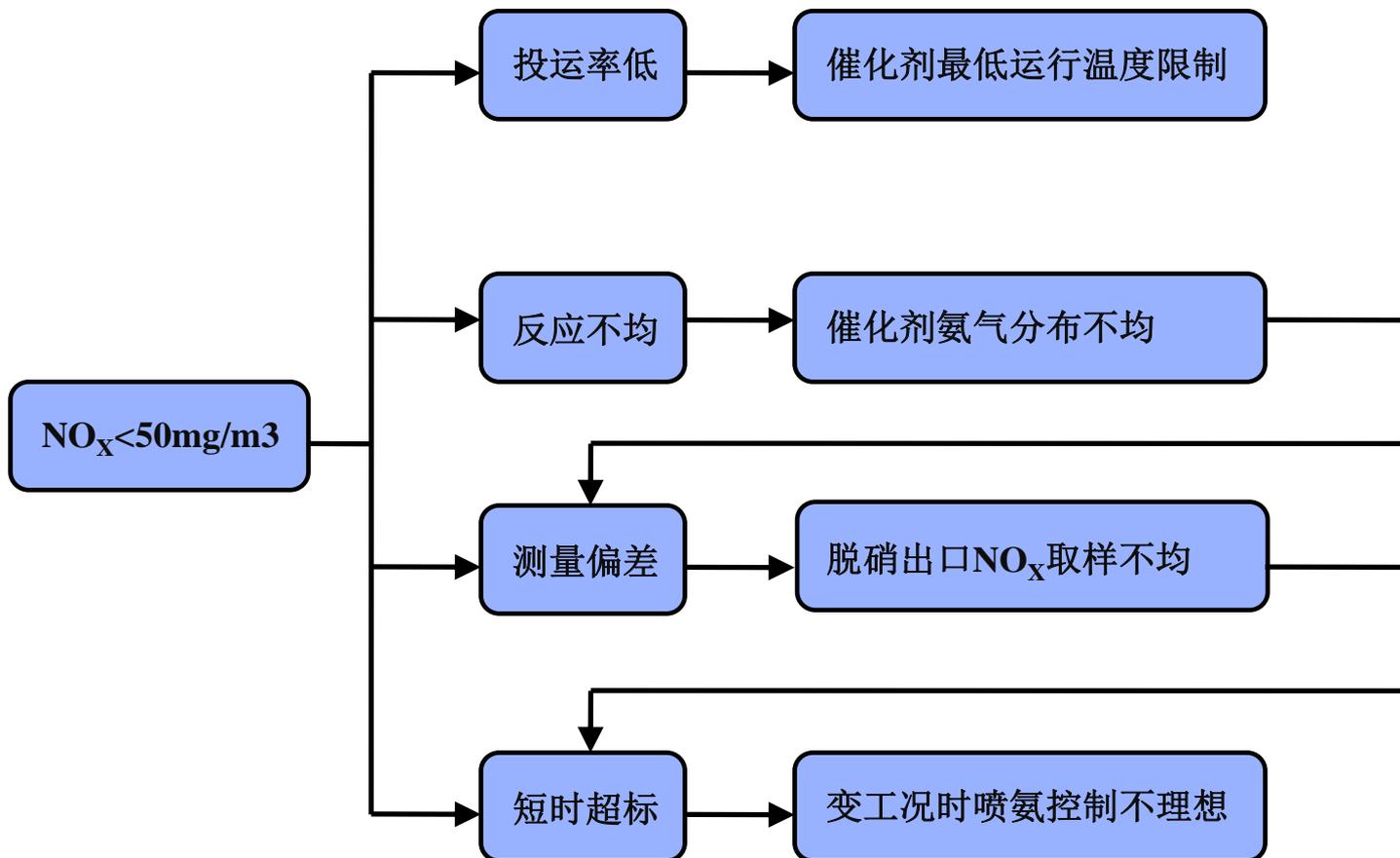
## 4.5 超低排放电厂脱硝系统优化控制

某电厂为2×600MW国产超临界燃煤机组，采用了目前比较常见的“超低排放”技术路线，即锅炉省煤器分级改造、脱硝系统新增一层催化剂、脱硫系统增扩容、新增湿式电除尘器等一系列环保设施改造。



## 4.5 超低排放电厂脱硝系统优化控制

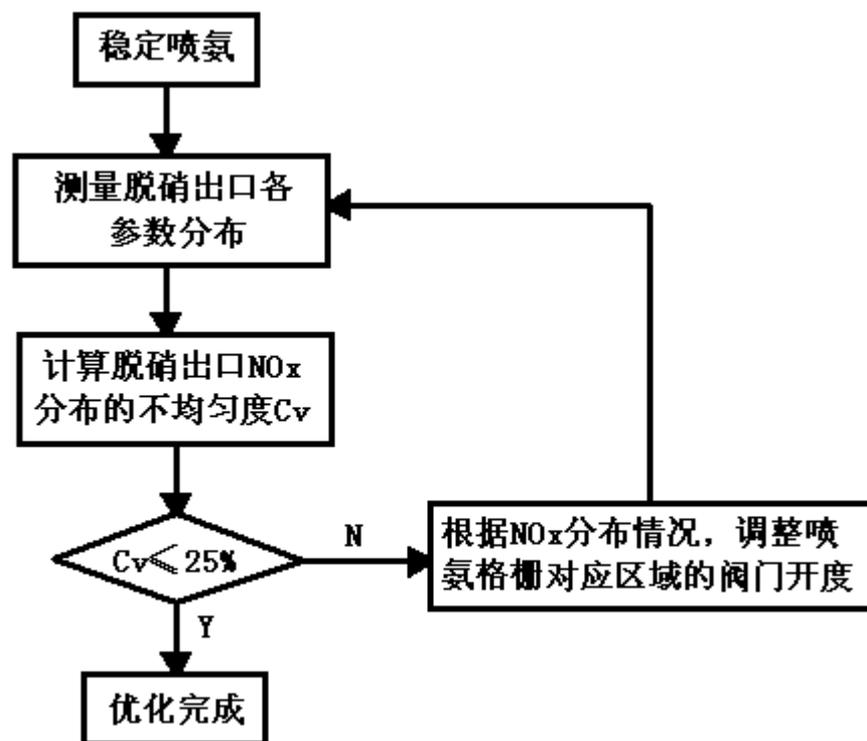
### 存在问题



## 4.5 超低排放电厂脱硝系统优化控制

改善反应不均

通过喷氨优化调整实验，改善脱硝出口氮氧化物分布

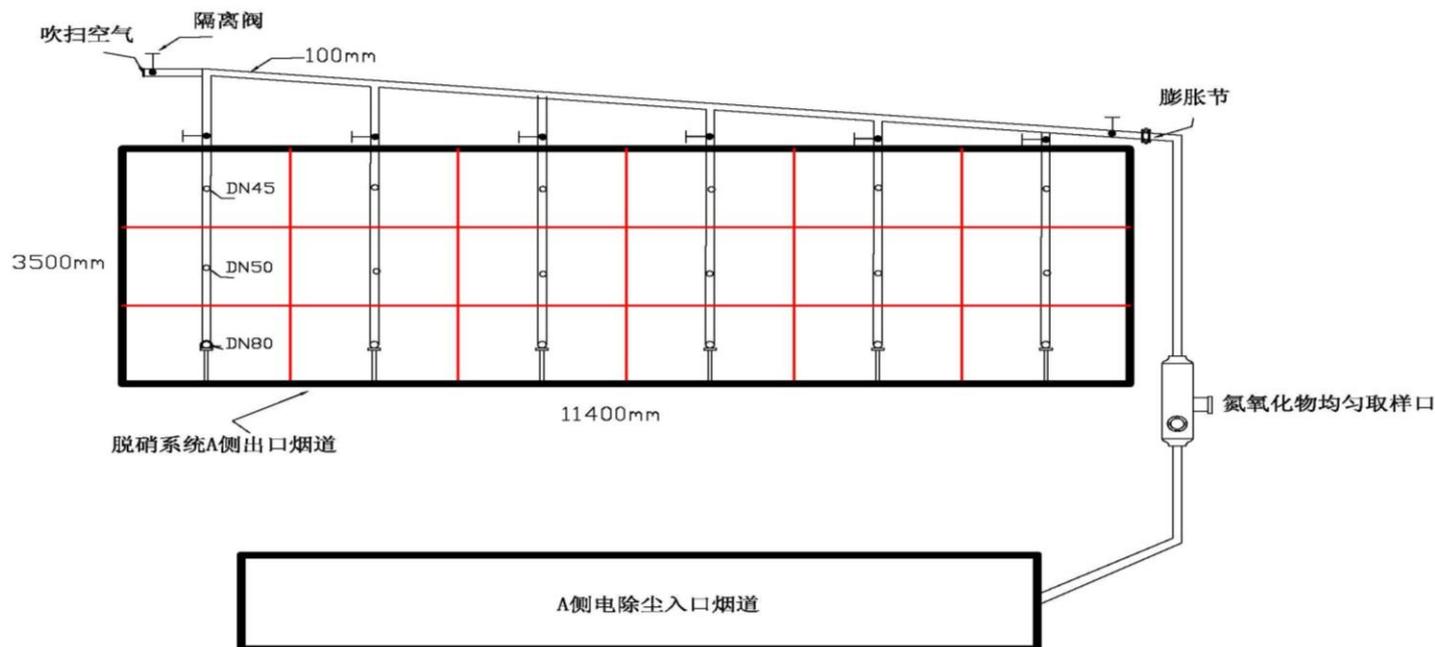


A、B反应器出口氮氧化物浓度分布 $C_v$ 值分别从调整前的34.47%、35.12%降低至16.67%、20.10%。使得脱硝系统反应区域催化反应均匀性得到较大的改善。同时也对测量取样的均匀，起到了一个粗调作用。

## 4.5 超低排放电厂脱硝系统优化控制

## 纠正测量误差

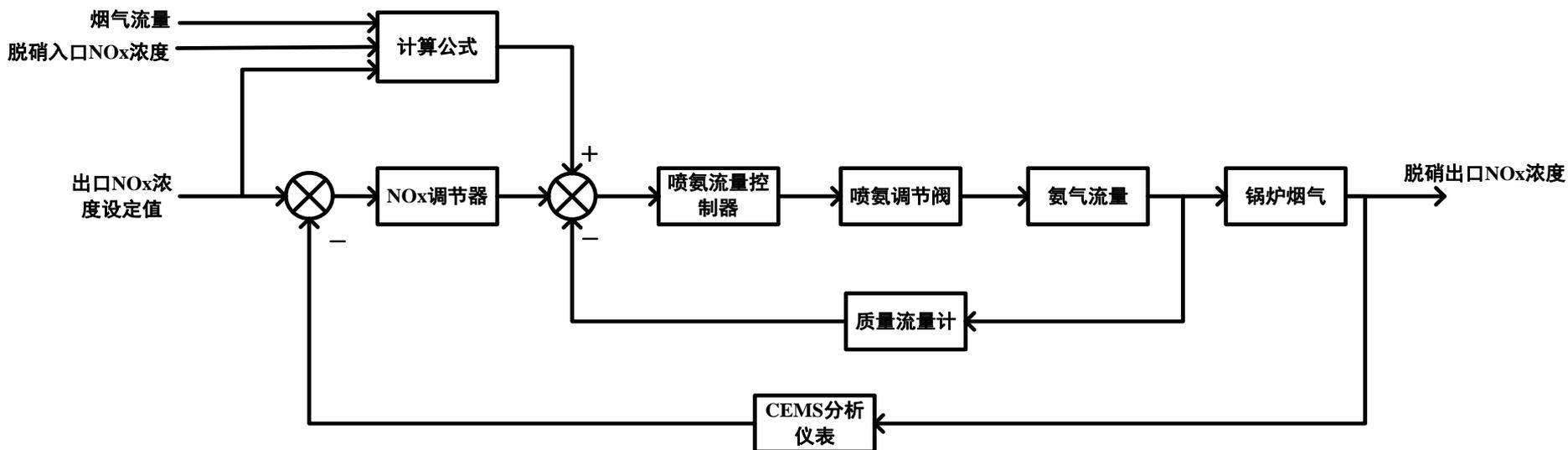
- 1、依据《GB/T 16157》确定18个小分区；
- 2、通过管道压力损失的计算，核算全负荷段取样流速  $> 10\text{m/s}$ ；
- 3、考虑烟气冲刷的影响，管材选用耐磨高锰钢；
- 4、按照除尘风管的选型要求，排送细小粉尘最小管径不小于80mm；
- 5、通过管道均匀抽风计算，采用变孔口面积，实现均匀抽风。



## 4.5 超低排放电厂脱硝系统优化控制

### 改善短时超标

原有脱硝喷氨控制采用前馈-反馈串级控制，由于测量及反应的滞后，该控制策略不能有效的应对因燃烧工况的变化而引起的入口NO<sub>x</sub>急剧变化的工况，存在较大的滞后和超调。当入口NO<sub>x</sub>分钟变化率超过20mg时，大概率会发生NO<sub>x</sub>超过50mg/m<sup>3</sup>。



### 4.5 超低排放电厂脱硝系统优化控制

### 综合措施

#### 1、改进控制手段：

引入预测控制思路，使用带前馈的PID控制只能根据入口NO<sub>x</sub>的变化来喷入所需的氨气

#### 2、改进测量手段：

CEMS分析仪表每隔4小时需进行一次吹扫校准，将两侧CEMS吹扫校准时间尽量错开。

#### 3、改进参数设定：

根据脱硝系统出口NO<sub>x</sub>控制波动情况（任何工况均<50mg/Nm<sup>3</sup>）倒推出设定值上限。

#### 4、改进效果：

极大的降低了烟囱出口NO<sub>x</sub>浓度，在变工况入口NO<sub>x</sub>发生较大波动的情况下下脱硝出口及排放口NO<sub>x</sub>均不超过**50mg/Nm<sup>3</sup>**，达到了“超低排放”的要求。

## 引领全国智能电厂技术发展

- 陈世和多次在全国专业技术论坛和各大发电集团作“智能电厂技术”专题报告
- 陈世和牵头编写出版全国首部《智能电厂技术发展纲要》



工业4.0

灵活、高效地满足用户的需求

智能化

大数据

云计算

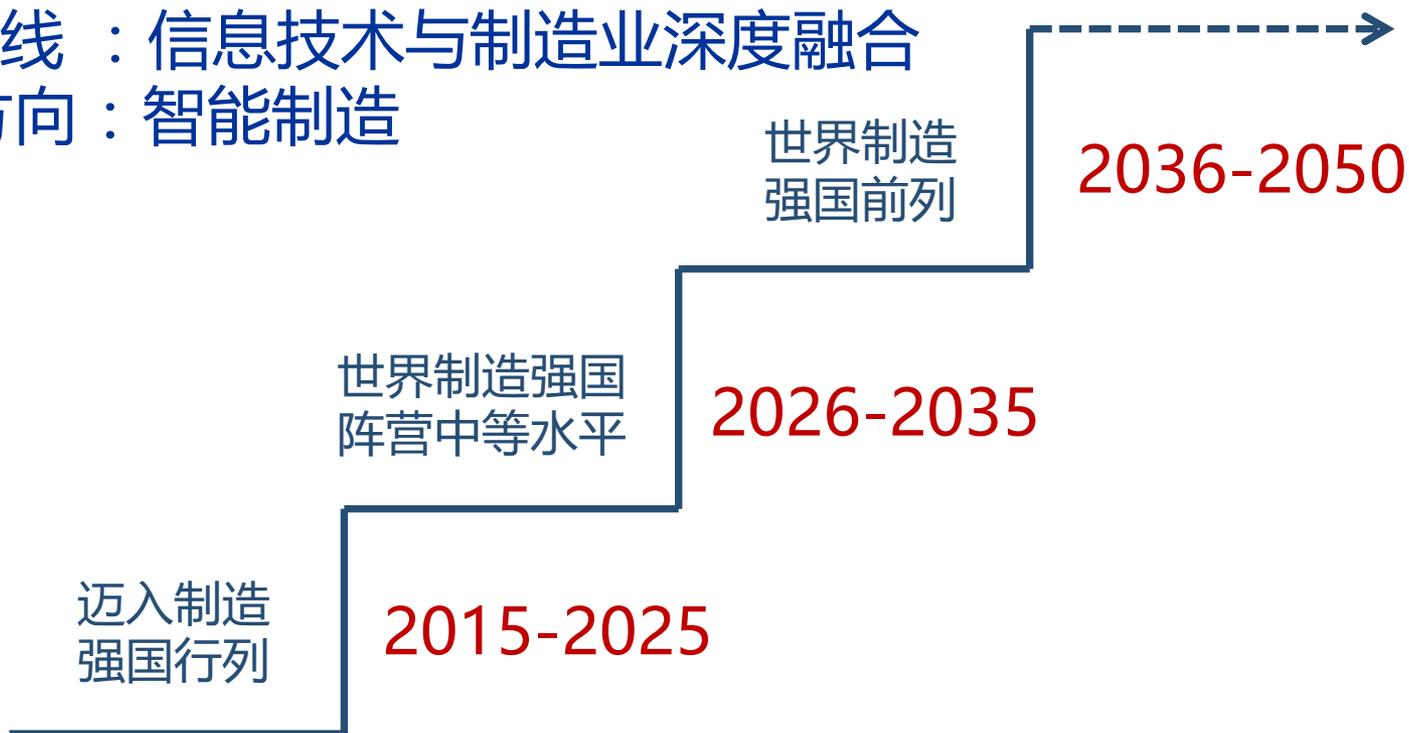
互联网

物联网

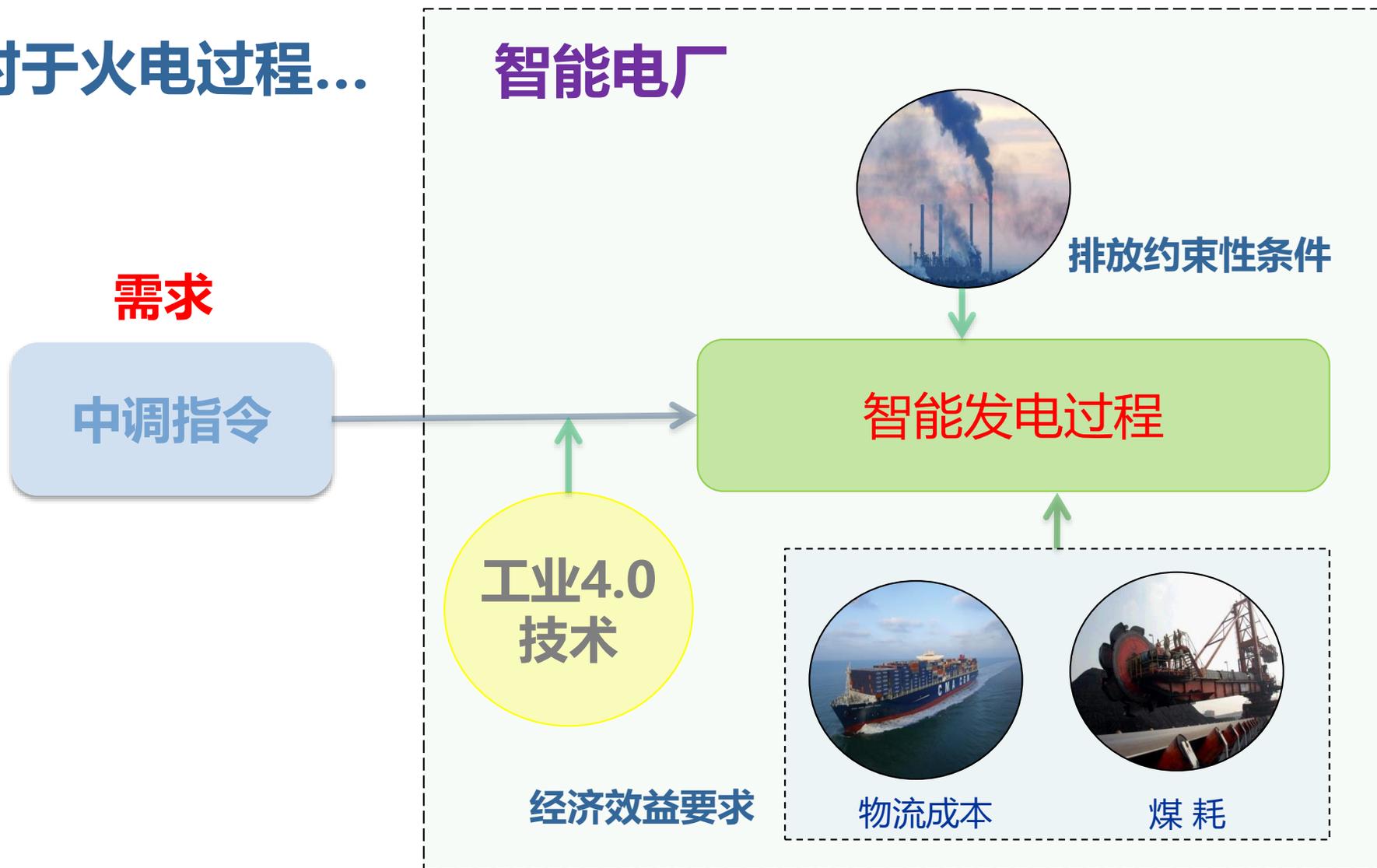


## 中国制造2025

主 线：信息技术与制造业深度融合  
主攻方向：智能制造

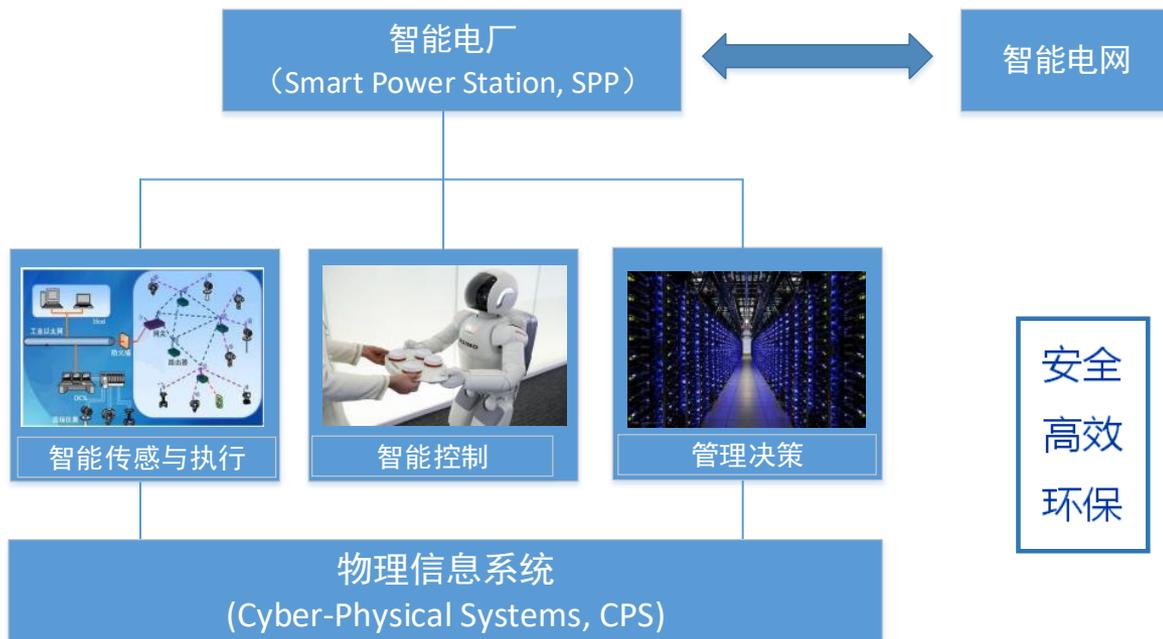


## 对于火电过程...

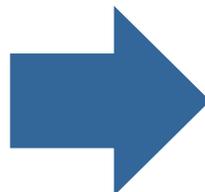


## 智能电厂定义

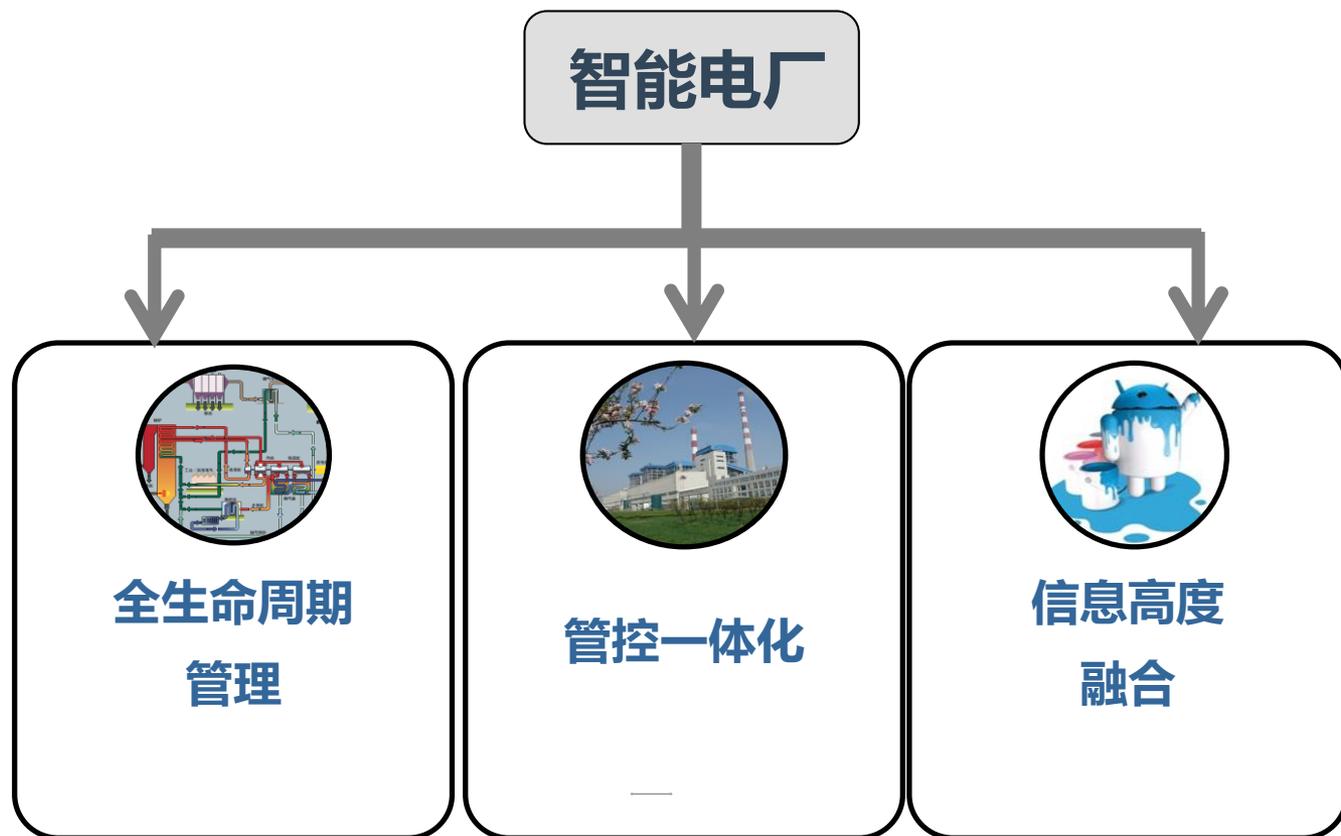
**智能电厂**（Smart Power Plant, SPP）是指在广泛采用现代数字信息处理和通信技术基础上，集成智能的传感与执行、控制和管理等技术，达到更安全、高效、环保运行，与智能电网相互协调的发电厂。



## 智能电厂特征



## 核心理念



**智能电厂是数字化电厂的延伸与发展**

## 全生命周期管理

设计

制造

基建

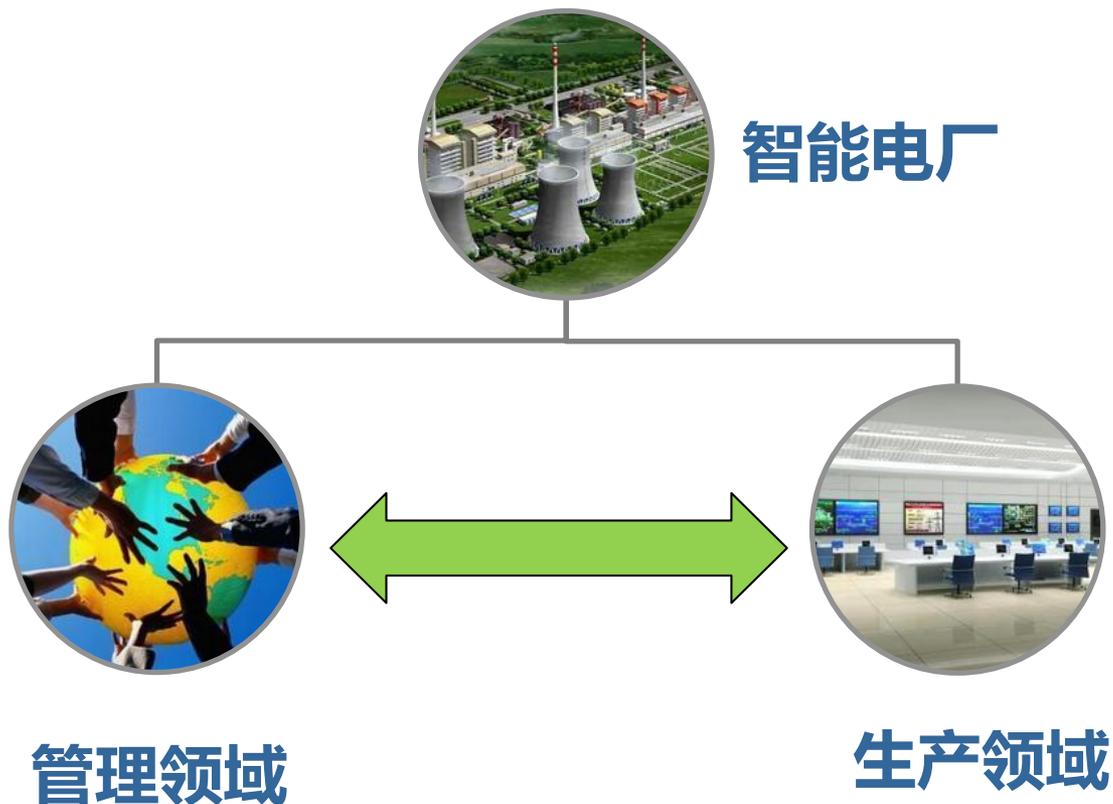
运营

退役

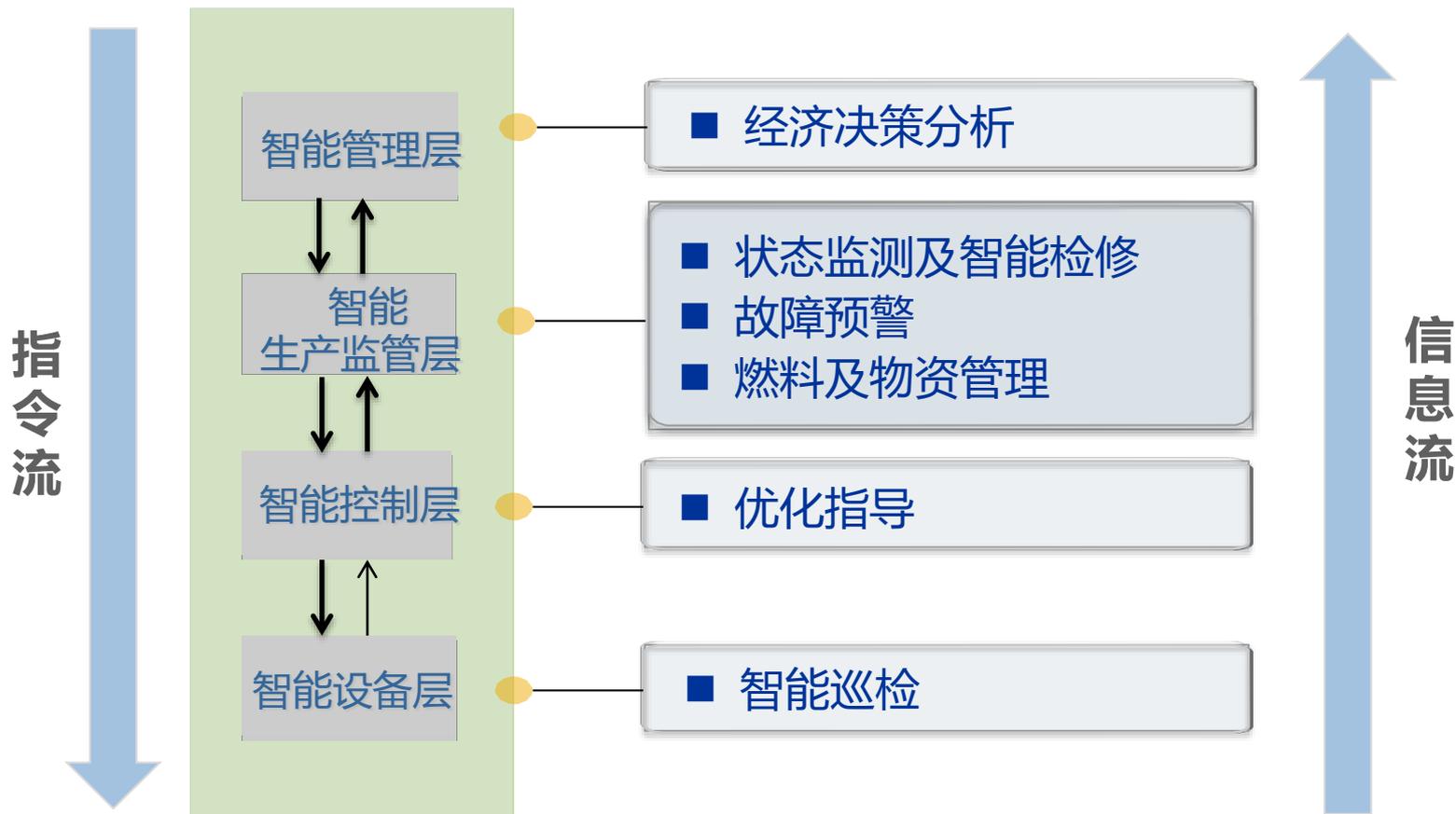
横向打通不同专业、不同区域、不同同时段的界限

管控一体化

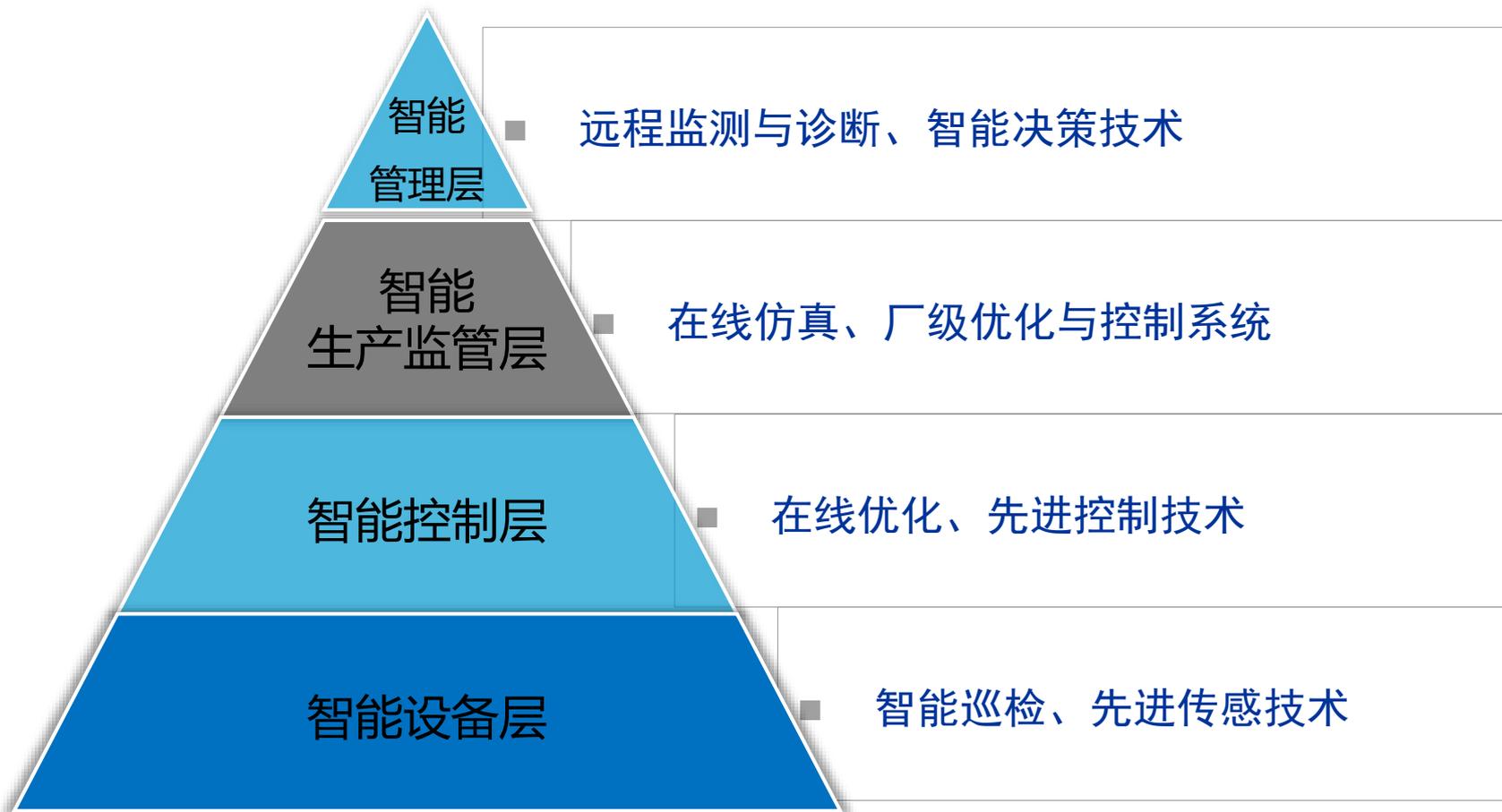
两大领域：生产与管理深度融合



## 信息高度融合



## 各层架构核心技术



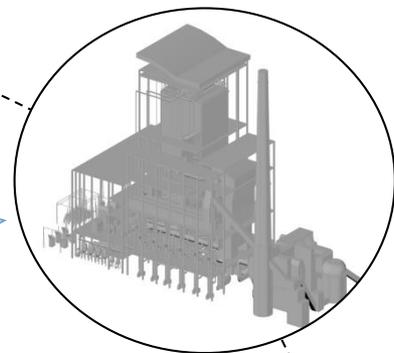
纵向打通各层级设备界限、控制与管理的界限

## 智能设备层关键技术

物联网



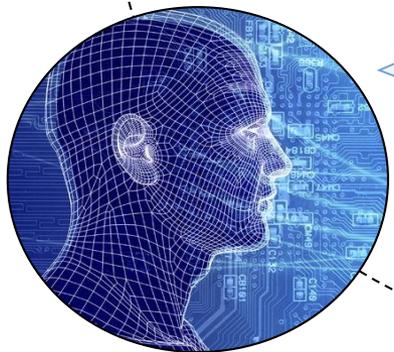
智能头盔



3D重现  
(RFID, WIFI, 定位)



智能电厂



多源数据融合

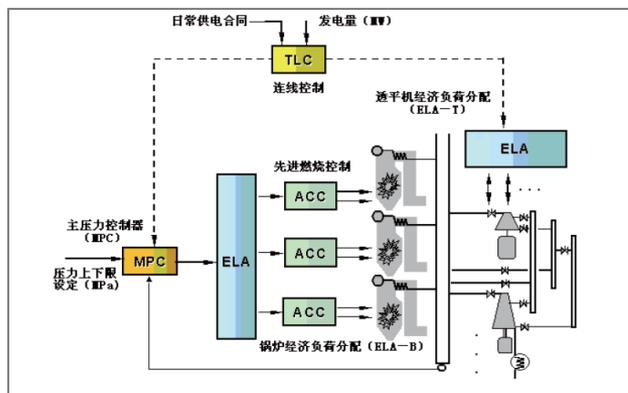
CPS物理信息系统



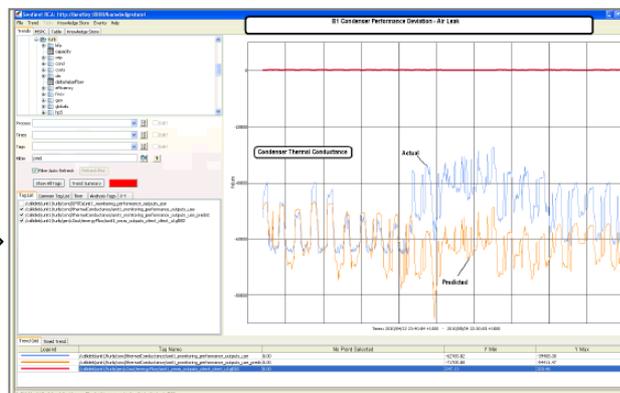
智能巡检技术

## 智能生产监管层关键技术

在线优化



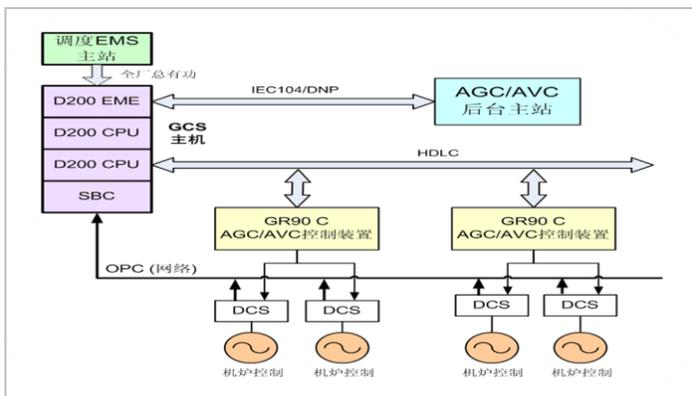
监测与诊断



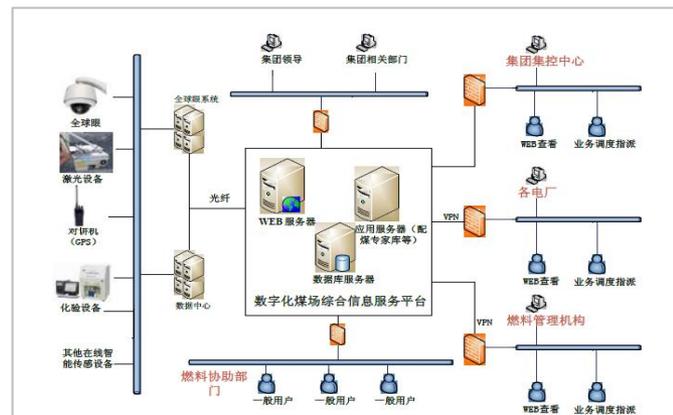
实时控制系统

# 三、体系结构

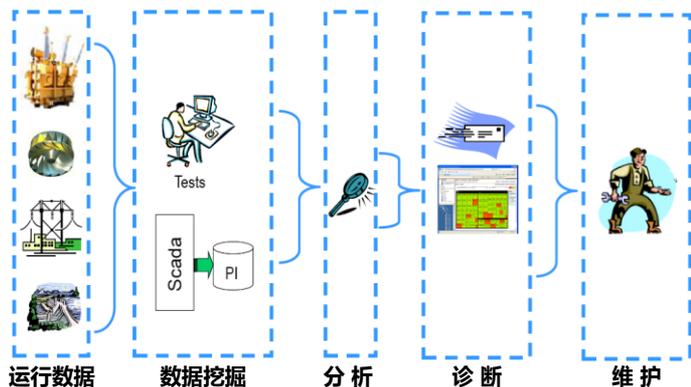
## 智能生产监管层关键技术



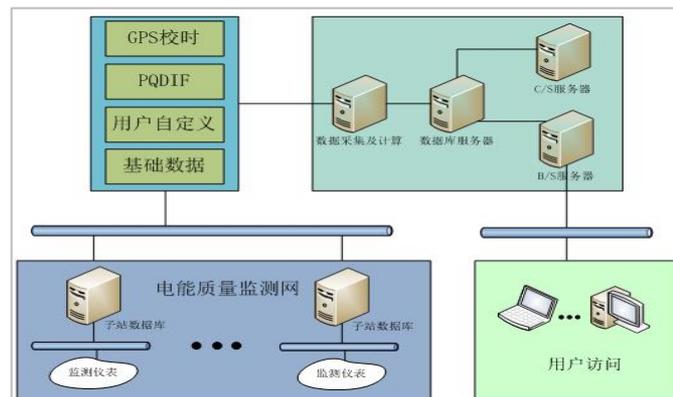
## 厂级负荷优化调度



## 数字化煤场



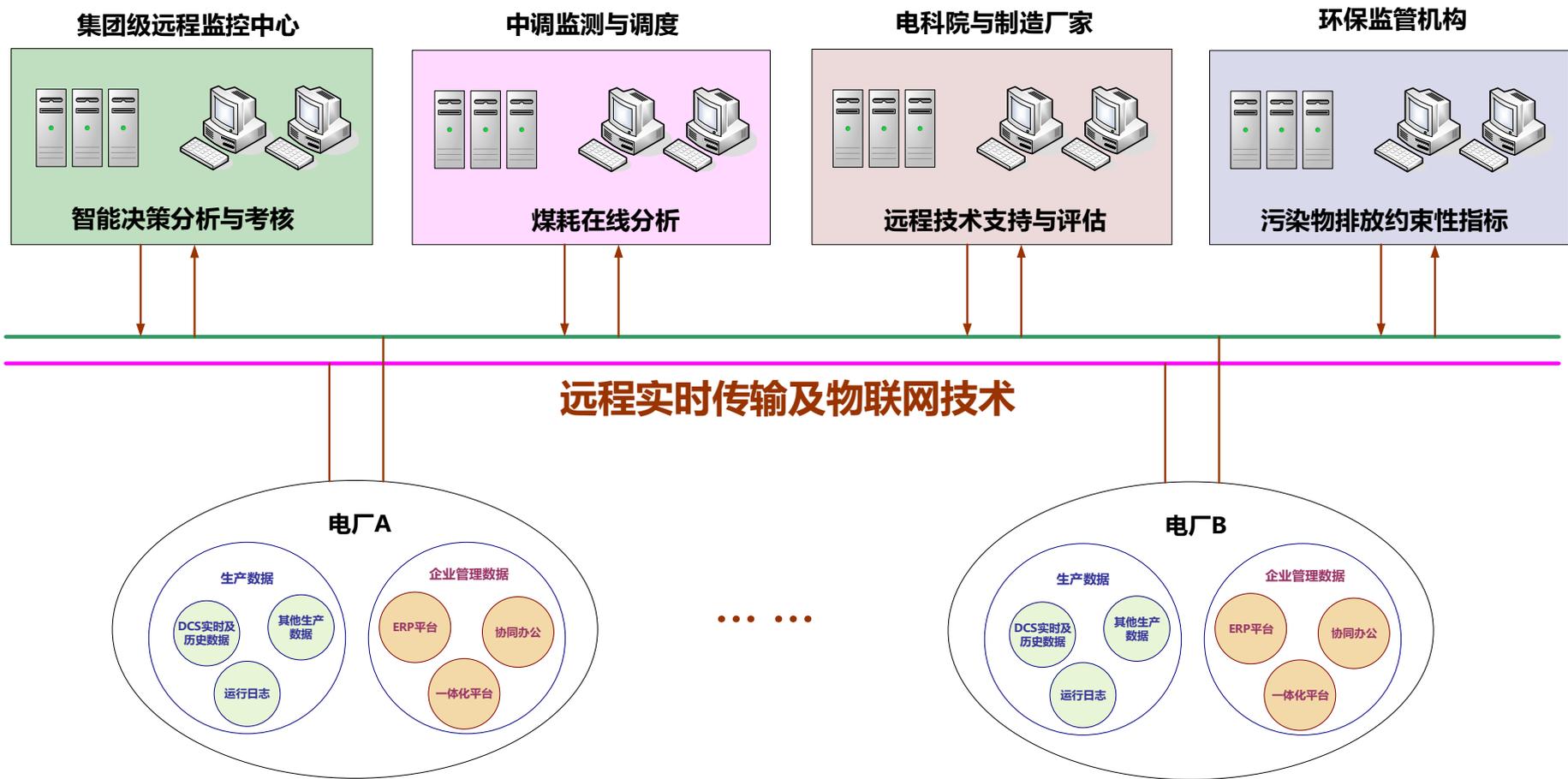
## 厂级性能监测及数据挖掘



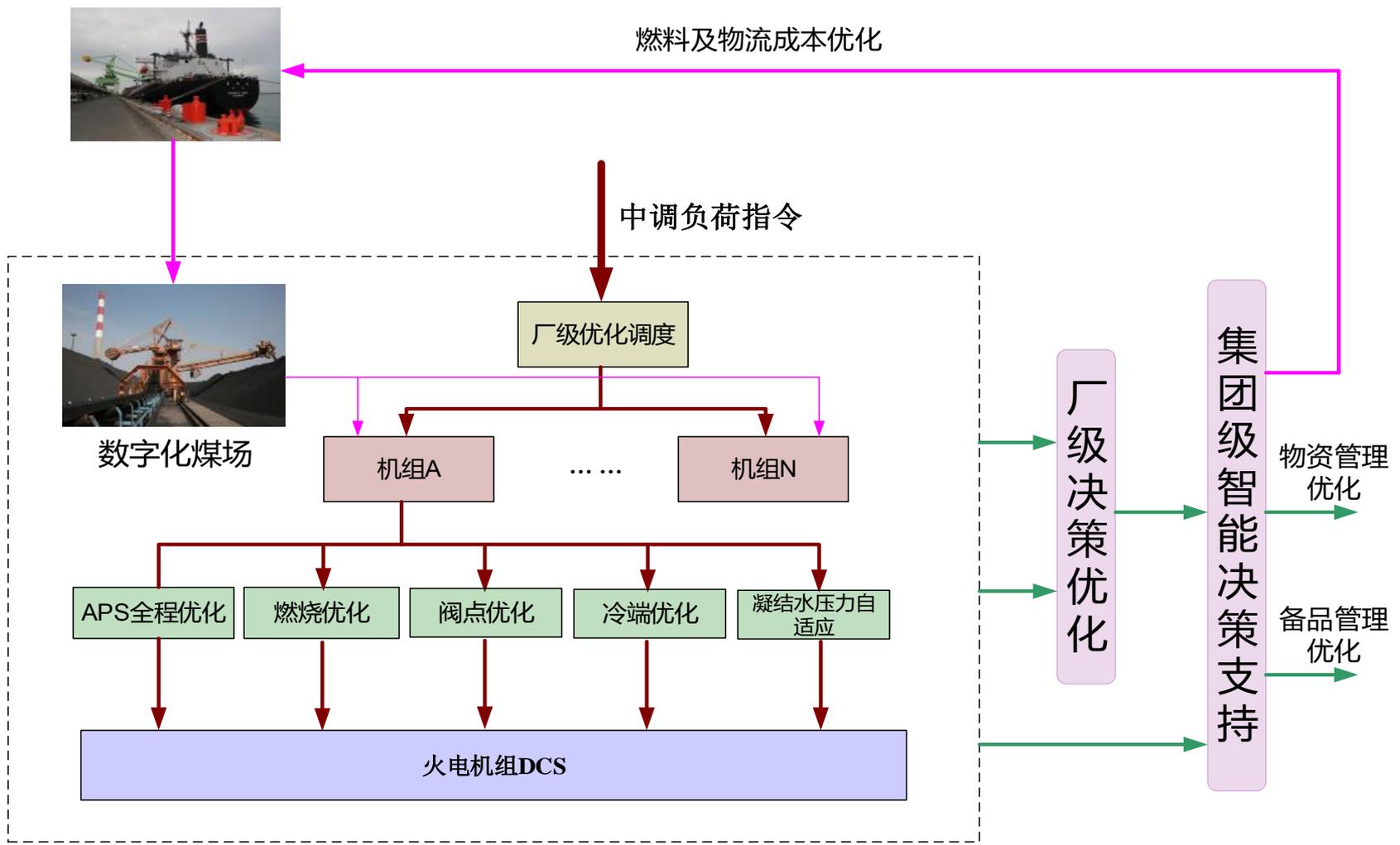
## 数字化视频监控系统

# 三、体系结构

## 智能管理层关键技术



# 五、新一代电厂——智能电厂控制技术展望



智能电厂具体实现方式示例

## 建设阶段目标

提高  
自动化水  
平

提高感  
知水平

设备全  
生命周期  
管理

燃烧在  
线优化

远程数  
据中心

高级监  
管平台

集团级  
智能管  
理

高效培训

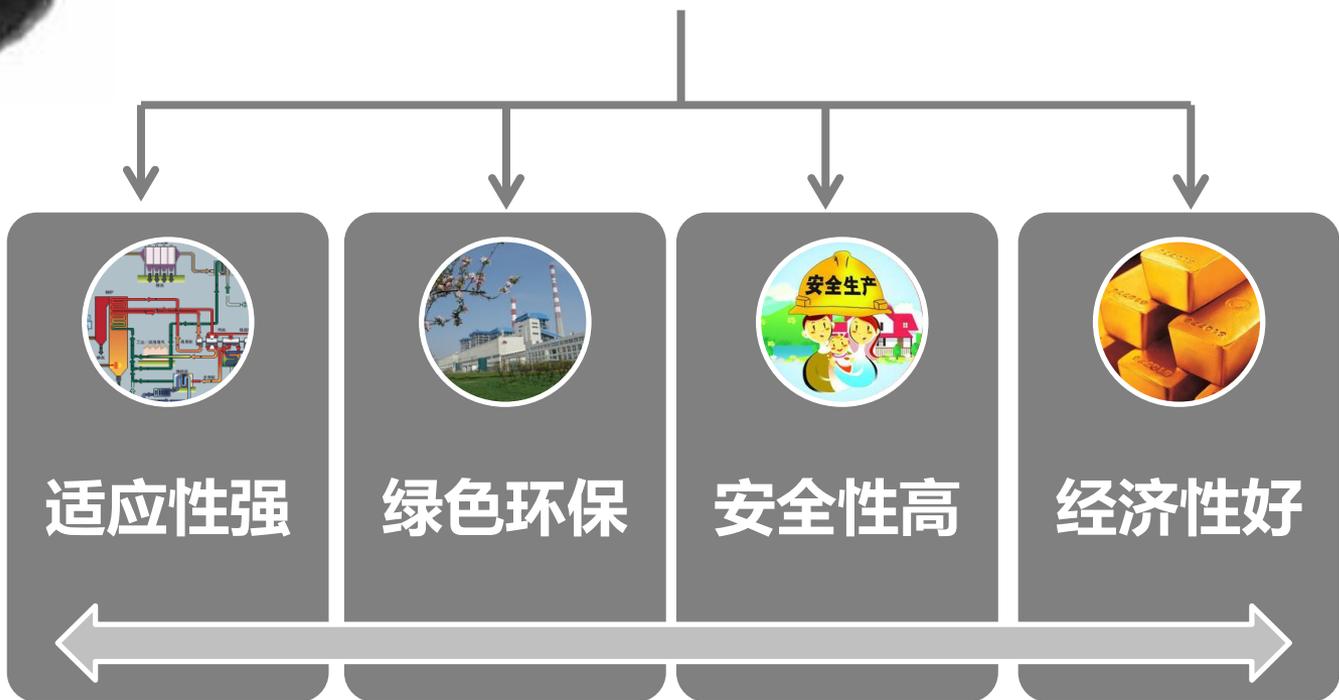
## 在役电厂实施步骤

智能化：由简单到复杂，由低级到高级





## 超超临界机组智能控制技术



### 结束语

- 智能电厂技术是未来十年火电厂发展方向
- 先进技术与管理有机融合
- 采用一体化的整体解决方案

汇报结束，谢谢各位专家！

