

# 烟气脱硝节能降耗 整体解决方案

2021年1月

# 主要内容

- 一、**技术背景**
- 二、**解决方案及关键技术**
- 三、**效益分析**
- 四、**工程业绩**

# 一、技术背景

GB13223-2011 《火电厂大气污染物排放标准》			
mg/Nm <sup>3</sup>	GB13223-2011	特别排放限值	超低排放标准
粉尘	30	20	10 (5)
SO <sub>2</sub>	100	50	35
NO <sub>x</sub>	100	100	50
Hg	0.03	0.03	0.005

日趋收严



污染物	建材-玻璃			钢铁-烧结		
	GB 29495-2013		特别排放	GB25464-2010	2014修订单	特别排放
颗粒物	50	30	10	50	40	10
SO <sub>2</sub>	400	100	50	200	180	35
NO <sub>x</sub>	700	400	100	300	300	50

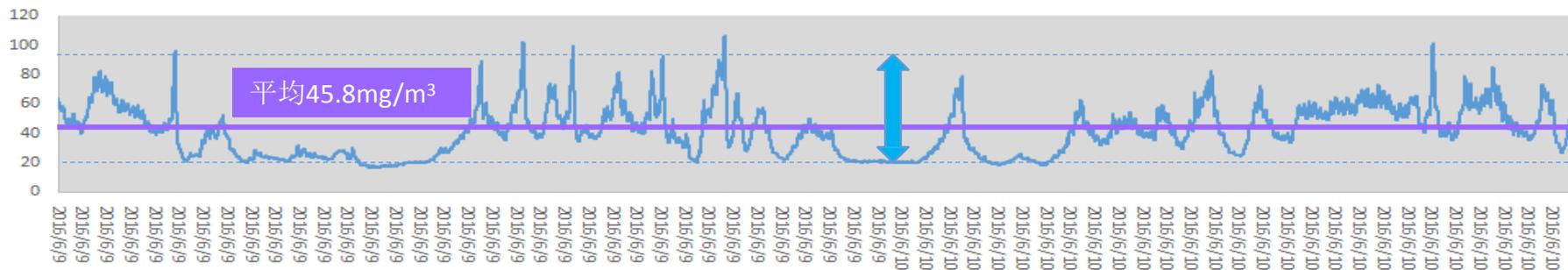
NO<sub>x</sub> 排放标准逐年提高

# 一、技术背景

## □ 脱硝存在的问题（以电厂为例）

### ✓ 出口NO<sub>x</sub>波动大，使得NO<sub>x</sub>平均值低

某电厂所在地NO<sub>x</sub>排放标准是100mg/Nm<sup>3</sup>，实际运行数据显示，脱硝出口NO<sub>x</sub>波动非常大，其出口NO<sub>x</sub>平均值为45.8mg/Nm<sup>3</sup>左右，远低于环保限定值。造成了NH<sub>3</sub>的大量过喷，即增大了用氨费用，又对下游设备的安全性造成重大隐患。



某机组连续48小时的出口NO<sub>x</sub>数据（mg/m<sup>3</sup>）

# 一、技术背景

## □ 目前电厂脱硝存在的问题

### ✓ 出口NO<sub>x</sub>分布不均，局部氨逃逸大

对某电厂的SCR进行实际测量，于2016年4月和6月进行了两侧测量试验。数据显示，A侧脱硝出口 NO<sub>x</sub> 的 $\sigma$ 均衡度为56%和46%；B侧脱硝出口 NO<sub>x</sub> 的 $\sigma$ 均衡度为30%和51%。一般认为 $\sigma$ 均衡度超过15%，即表明存在 $\sigma$ 不均。所以，该电厂的SCR出口NO<sub>x</sub>分布严重 $\sigma$ 不均，会进一步使得氨逃逸增加。

A侧 不均匀度：56%				B侧 不均匀度：30%			
51	41	159	79	92	78	71	100
53	47	157	102	65	126	98	40
60	40	157	51	113	103	120	44
57	43	160	67	80	126	124	70

2016-4-19

A侧 不均匀度：46%				B侧 不均匀度：51%			
74	82	74	113	33	21	18	16
111	70	45	29	29	27	18	23
85	78	57	12	27	29	23	53
121	51	74	16	21	33	27	78

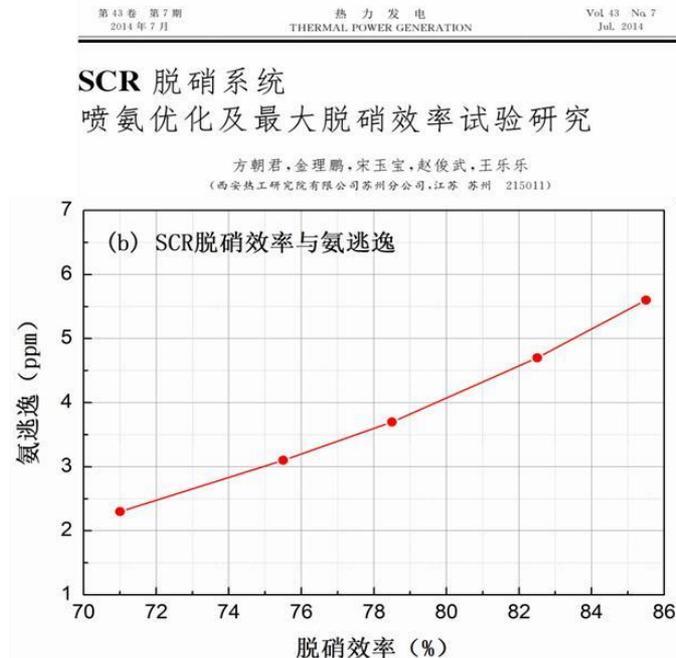
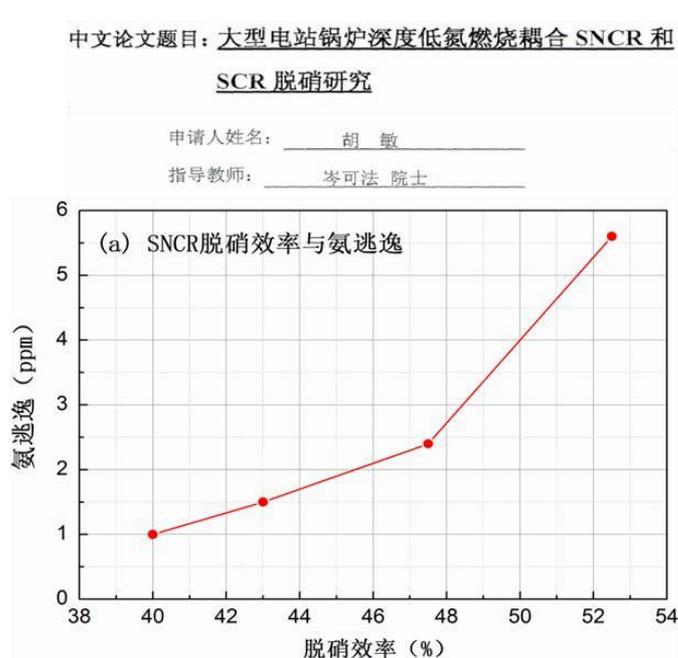
2016-6-17

某机组两侧烟道SCR出口截面的NO<sub>x</sub>分区测量数据 (mg/m<sup>3</sup>)

# 一、技术背景

□ 随着脱硝效率的提高，氨逃逸率将会而呈急剧增长

- 《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）》氨氧化物排放浓度不高于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，脱硝效率需要由目前的70~80%提高到85~90%以上；
- 随着脱硝效率的提高，氨逃逸率将会而呈急剧增长趋势；另外，氨逃逸也会随着脱硝系统的老化而不断增加；



- 对于燃气锅炉、CFB锅炉、工业炉窑、钢铁烧结等没有湿法脱硫的烟气，逃逸氨气直接排到大气；
- 沉积或吸附在飞灰中的氨经过一系列的物理、化学过程逃逸到大气中，造成环境污染。

# 一、技术背景

## 氨逃逸的危害

### ✓ 空预器堵塞

排烟温度升高；引风机功耗增加；在线冲洗频繁、影响

机组运行安全。

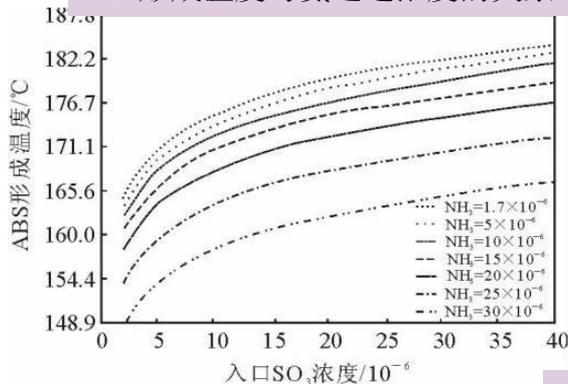
### ✓ 环境污染

氨气逃逸到大气、吸附到飞灰中

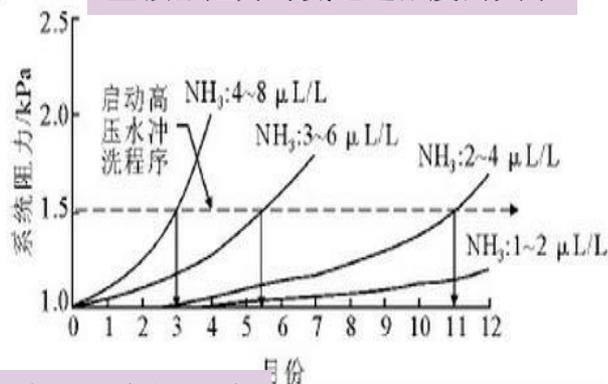
### ✓ 资源浪费

氨气资源的浪费；增大煤耗。

ABS形成温度与氨逃逸浓度的关系



空预器阻力与氨逃逸浓度的关系



ABS转化率与温度的关系

烟气温度	150℃	180℃	200℃	220℃	250℃	300℃	350℃	400℃
ΔH(kJ/mol)	-169.03	-167.27	-166.09	-164.91	-163.14	-160.20	-157.25	-154.30
ΔS(J/K/mol)	-268.21	-264.14	-261.61	-259.20	-255.72	-250.30	-245.28	-240.81
ΔG(kJ/mol)	-55.58	-47.61	-42.35	-37.13	-29.40	-16.78	-4.443	7.762
K	7306870	308965	47495	8585	864	33.83	2.358	0.2498
α	0.9948	0.9749	0.9373	0.8589	0.6213	0.1285	0.0115	0.0012

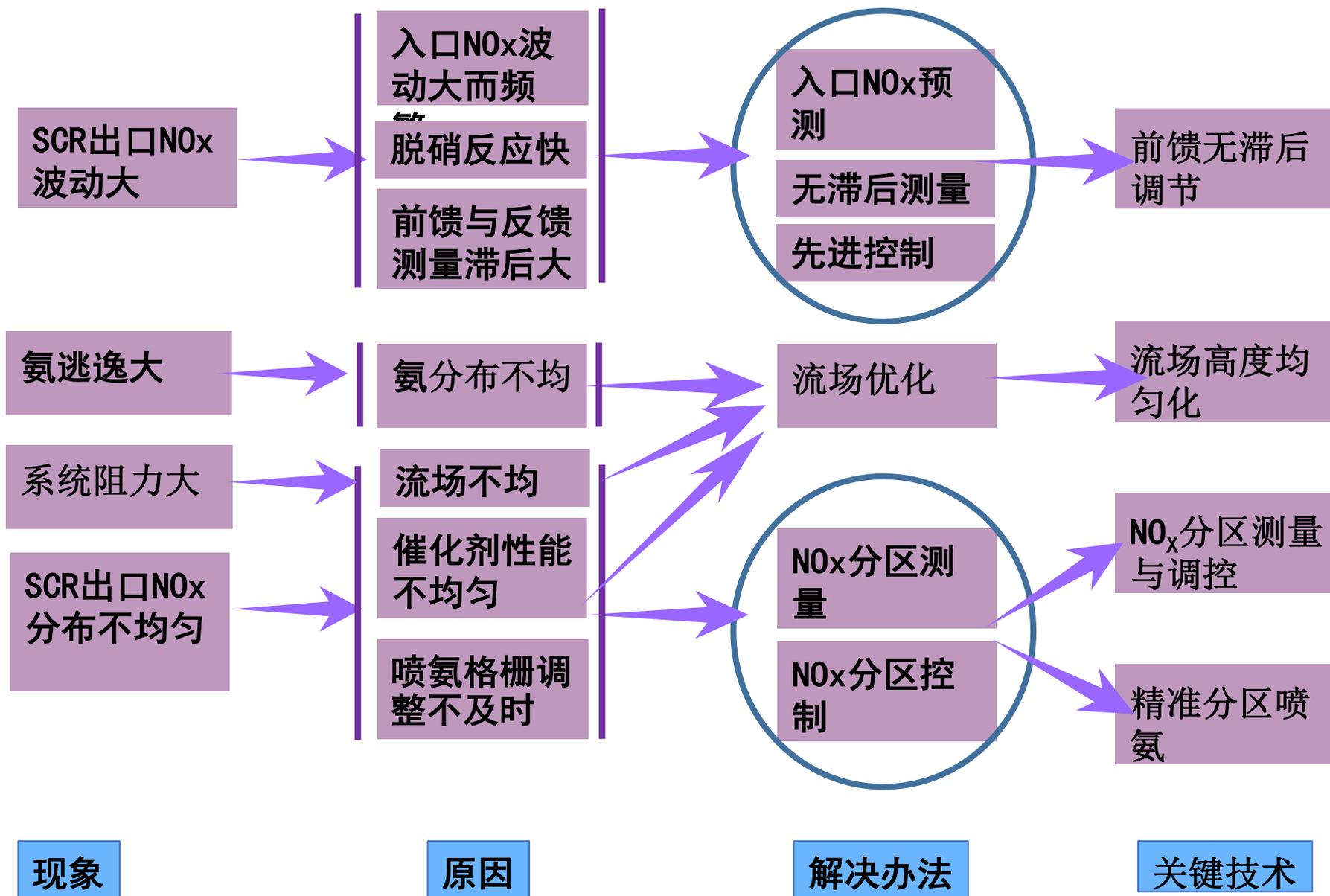
ABS造成的空预器堵塞



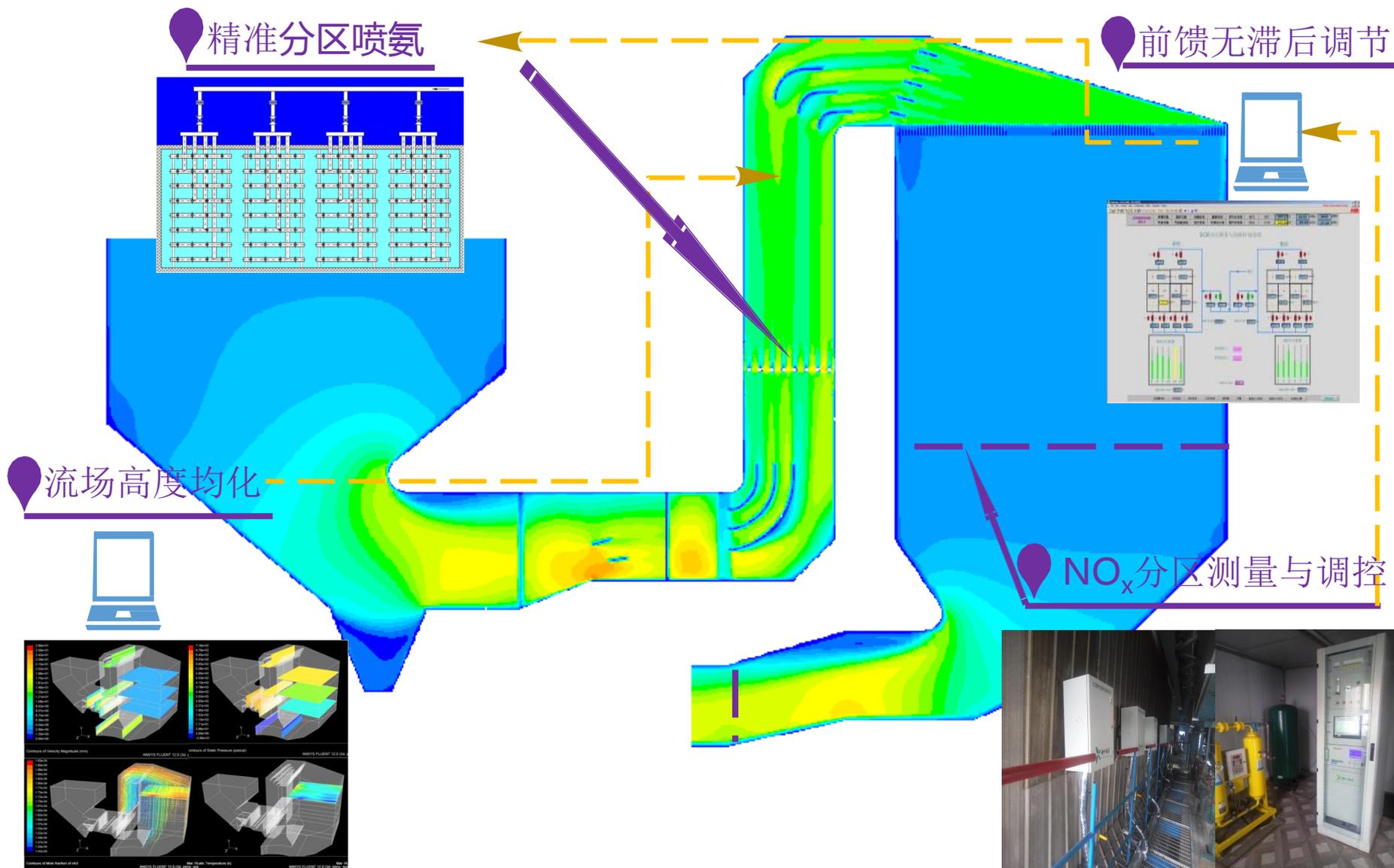
NH<sub>3</sub>过喷造成氨逃逸率增加，成为目前电厂急需解决的关键技术问题之一！



## 二、解决方案及关键技术

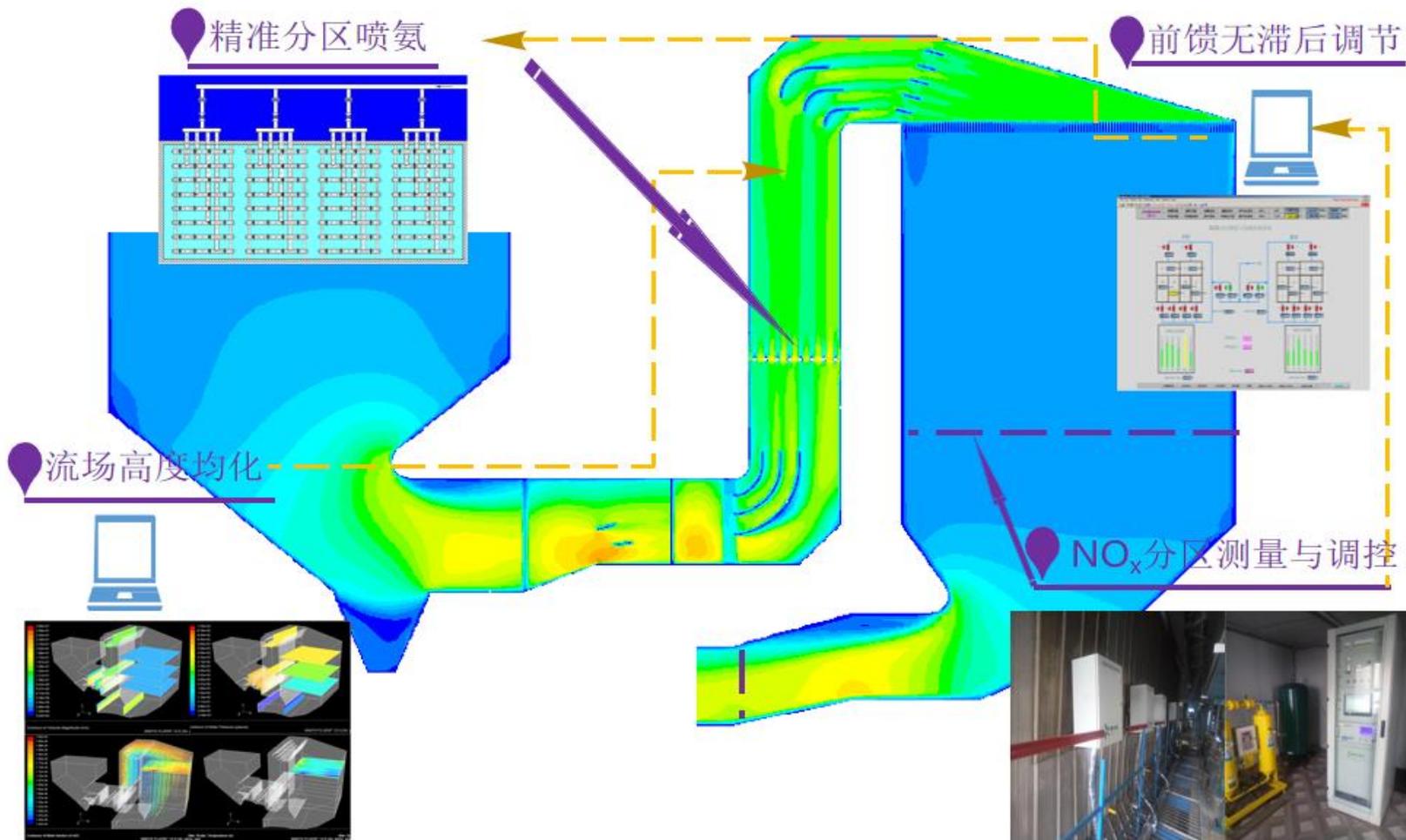


# 二、解决方案及关键技术



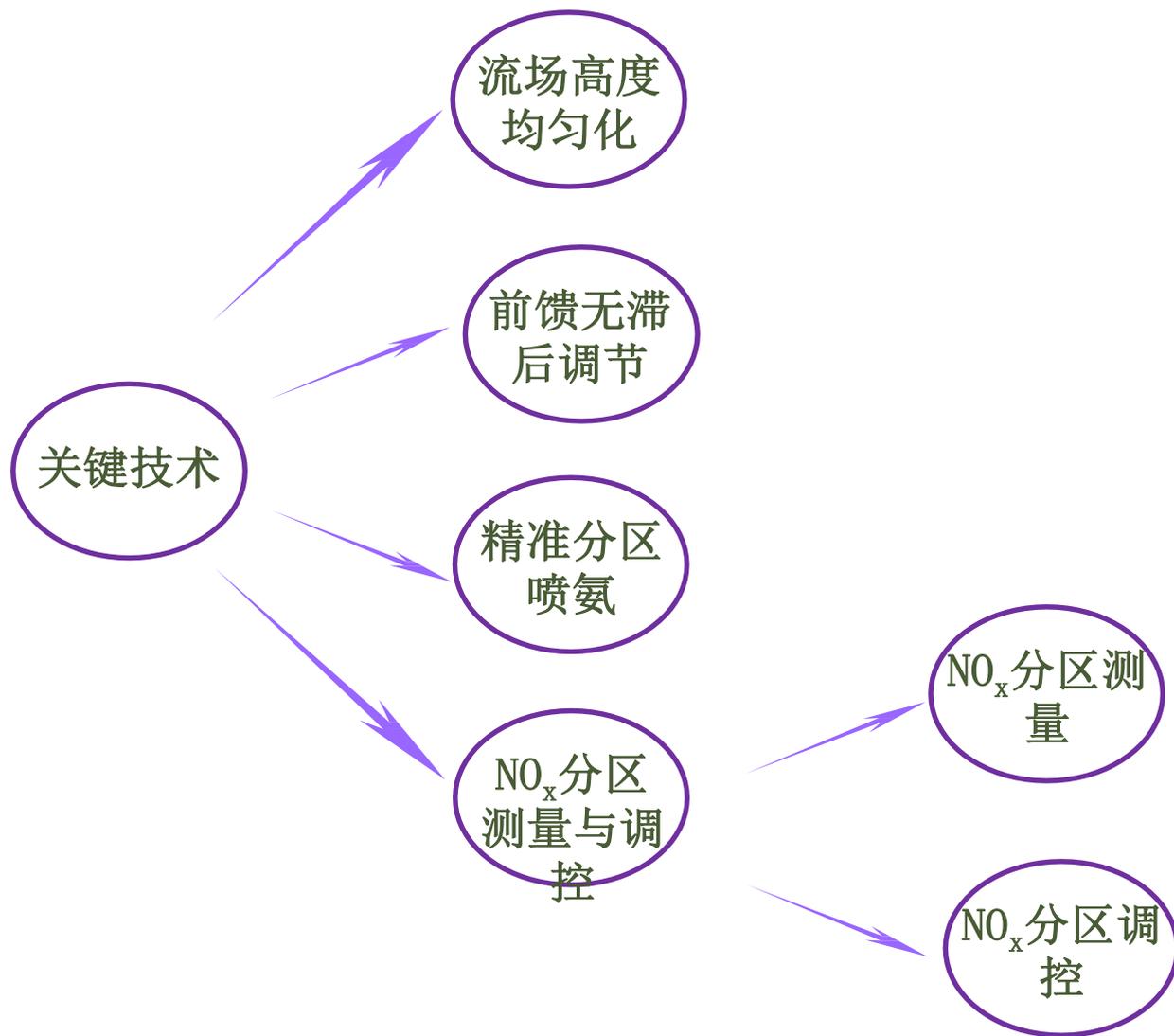
# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案



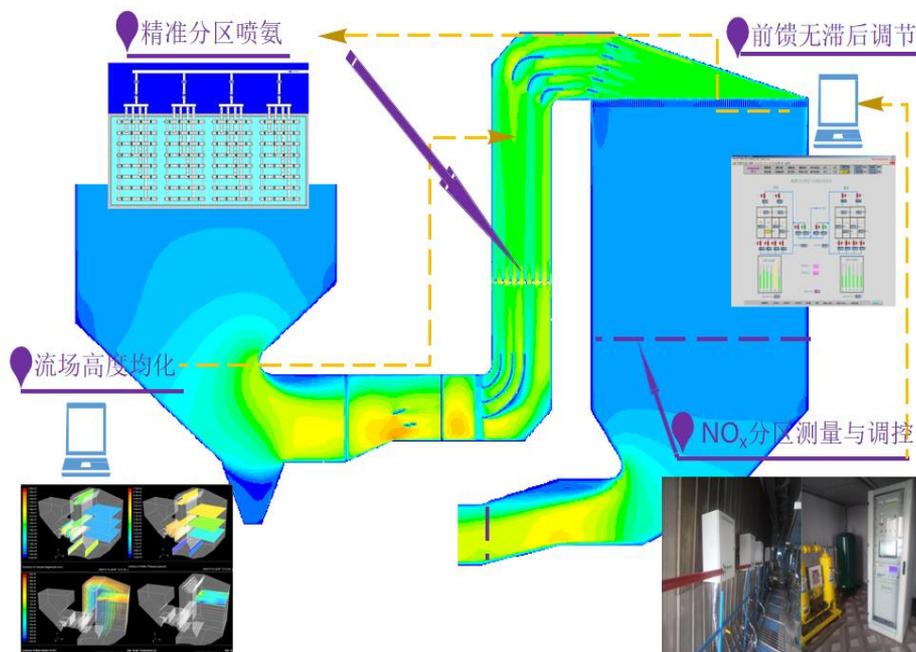
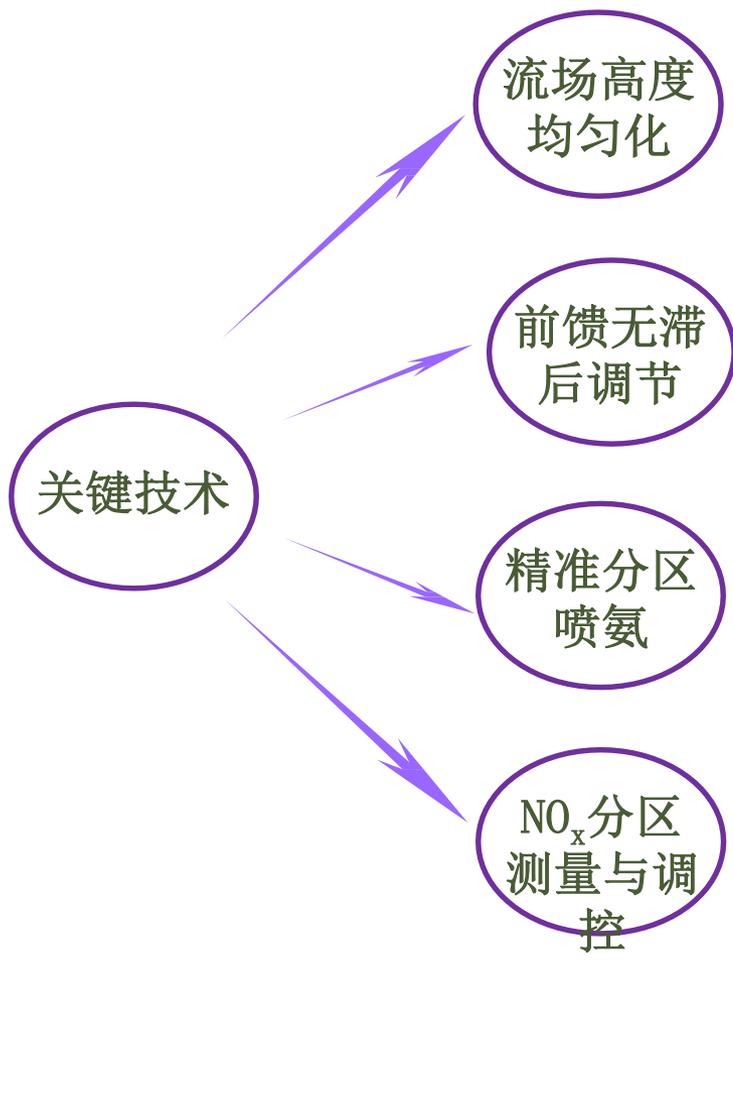
## 二、解决方案及关键技术

### □ 解决方案



# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案



# 二、解决方案及关键技术

## □ 脱硝系统性能评估

### 标准与依据

GB/T 16157—1996

《固定污染源中颗粒物测定与气态污染物采样方法》

DL/T 260—2012

《燃煤电厂烟气脱硝装置性能验收试验规范》

HJ 562—2010

《火电厂烟气脱硝技术规范选择性催化还原技术法》

DL/T 998—2006

《石灰石—石膏湿法烟气脱硫装置性能验收试验规范》

### 测试与评估

脱硝效率

流场分布 氨逃

逸及  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率

脱硝系统阻力

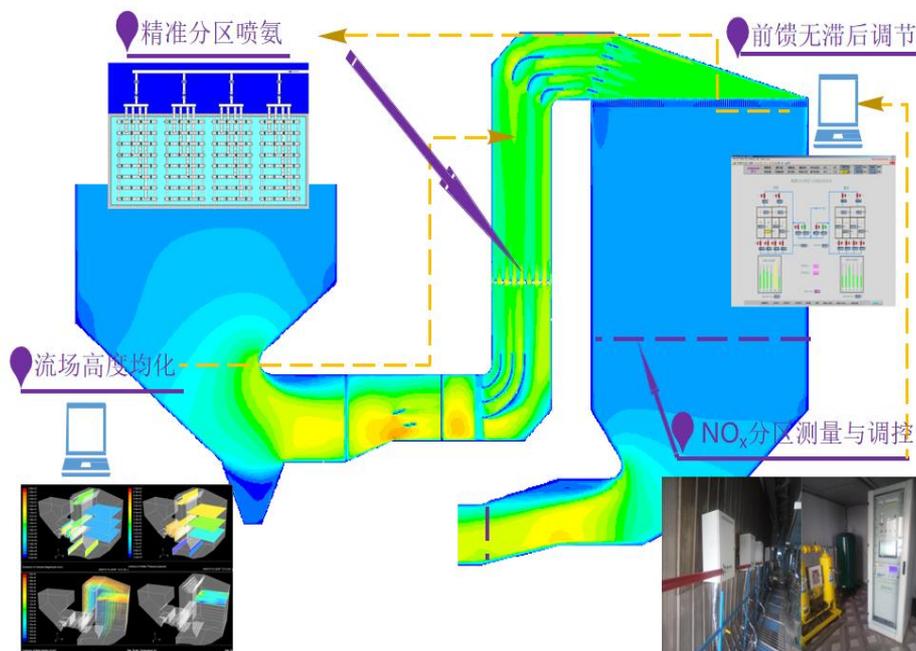
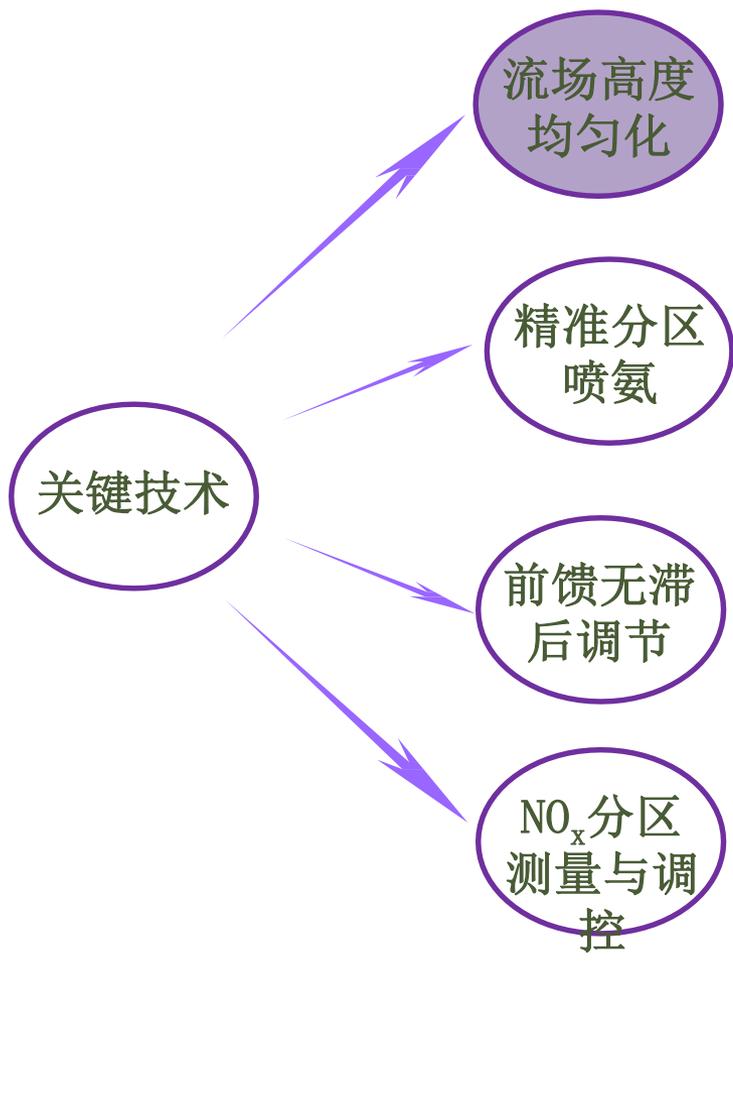
### 结论

技术改造可行性报告

提供合理配置方案建议

# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案



NO<sub>x</sub>分区测量

NO<sub>x</sub>分区调控

## 二、解决方案及关键技术

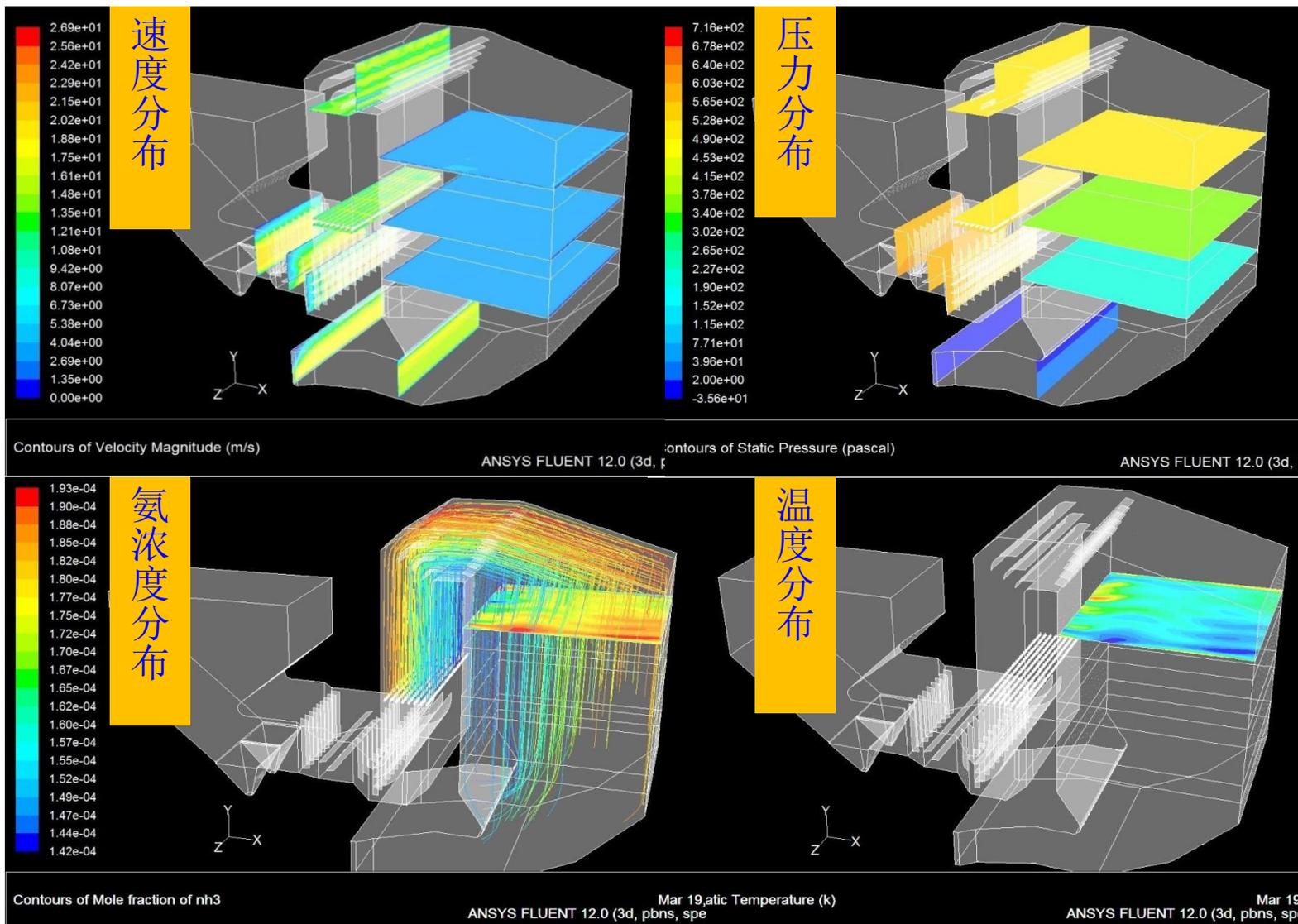
### □ 采用物理模化和数值模拟（CFD）结合

- 确保NO<sub>x</sub>/NH<sub>3</sub> 分布均匀
- 确保烟气速度均匀
- 减小烟气温度偏差
- 获得最小的烟气压降

#### ❖ 流场设计达到如下指标：

- ❖ 1、速度最大偏差：平均值的±15%
- ❖ 2、温度最大偏差：平均值的±10℃
- ❖ 3、氨氮摩尔比的最大偏差：平均值的±5%
- ❖ 4、烟气入射催化剂角度（与垂直方向的夹角）±10°

# 二、解决方案及关键技术

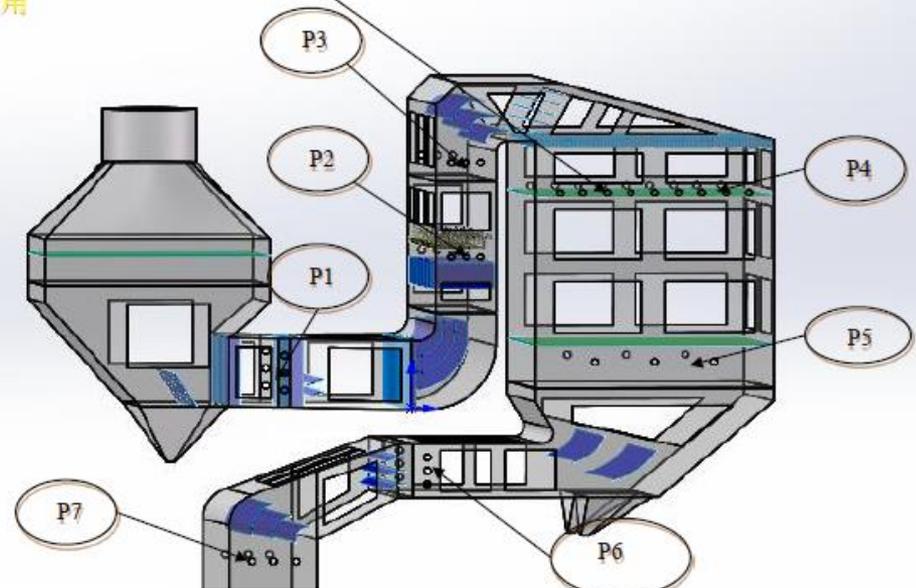




前→后

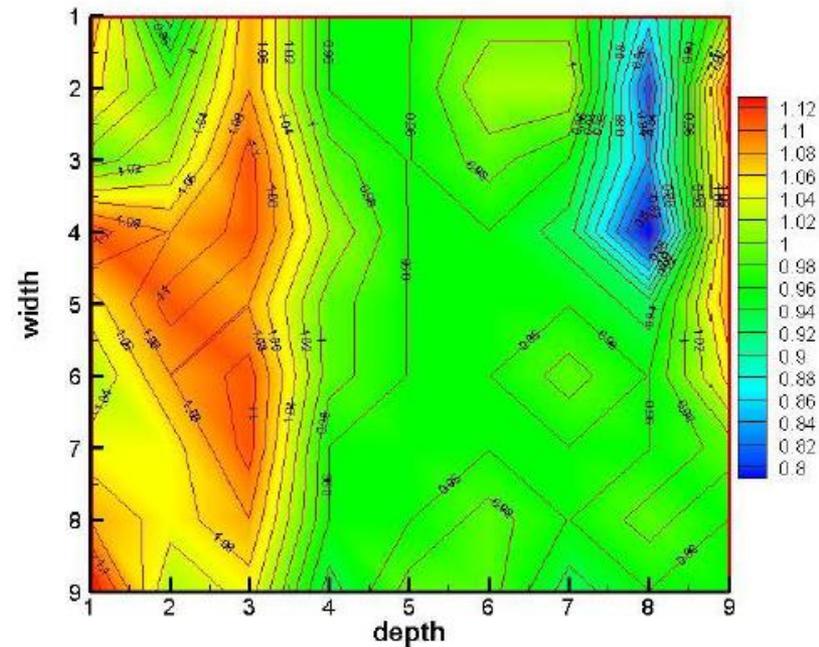
1.首层催化剂上游截面测孔：  
速度分布、还原剂浓度分布、  
烟气入射角

2.沿程压力测孔P1~P7： 系统分段阻力



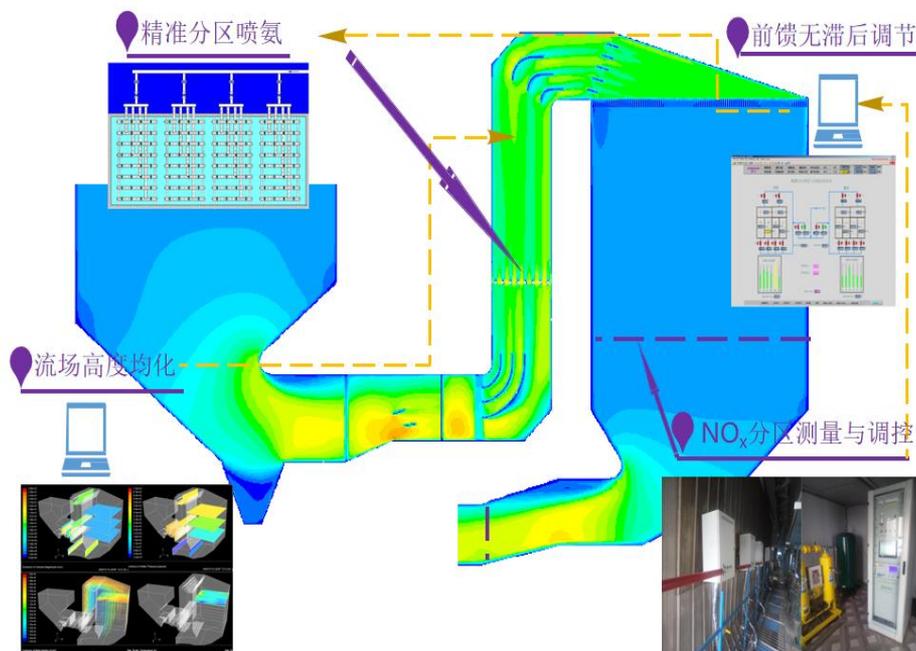
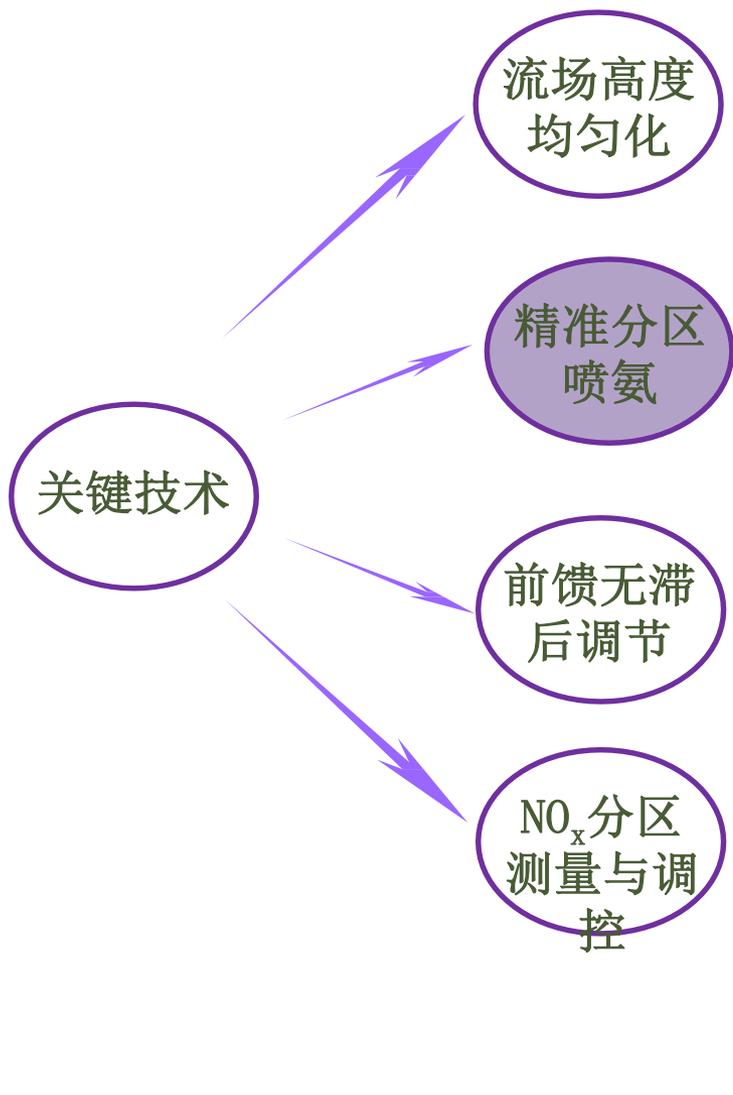
左  
↓  
右

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.08	0.93	1.08	0.96	0.96	0.99	0.99	0.87	0.99
2	1.05	0.99	1.08	0.96	0.96	1.02	1.02	0.81	1.11
3	0.99	1.02	1.11	0.99	0.96	0.99	0.96	0.84	1.08
4	1.11	1.08	1.11	1.02	0.96	0.96	0.93	0.78	1.08
5	1.05	1.11	1.08	0.99	0.96	0.96	0.96	0.93	1.08
6	1.02	1.08	1.11	0.99	0.96	0.96	0.99	0.96	1.05
7	1.05	1.05	1.11	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.99
8	1.08	1.05	1.08	0.96	0.96	0.99	0.96	0.99	0.96
9	1.14	1.02	1.05	0.93	0.99	0.99	0.93	0.96	0.96



# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案

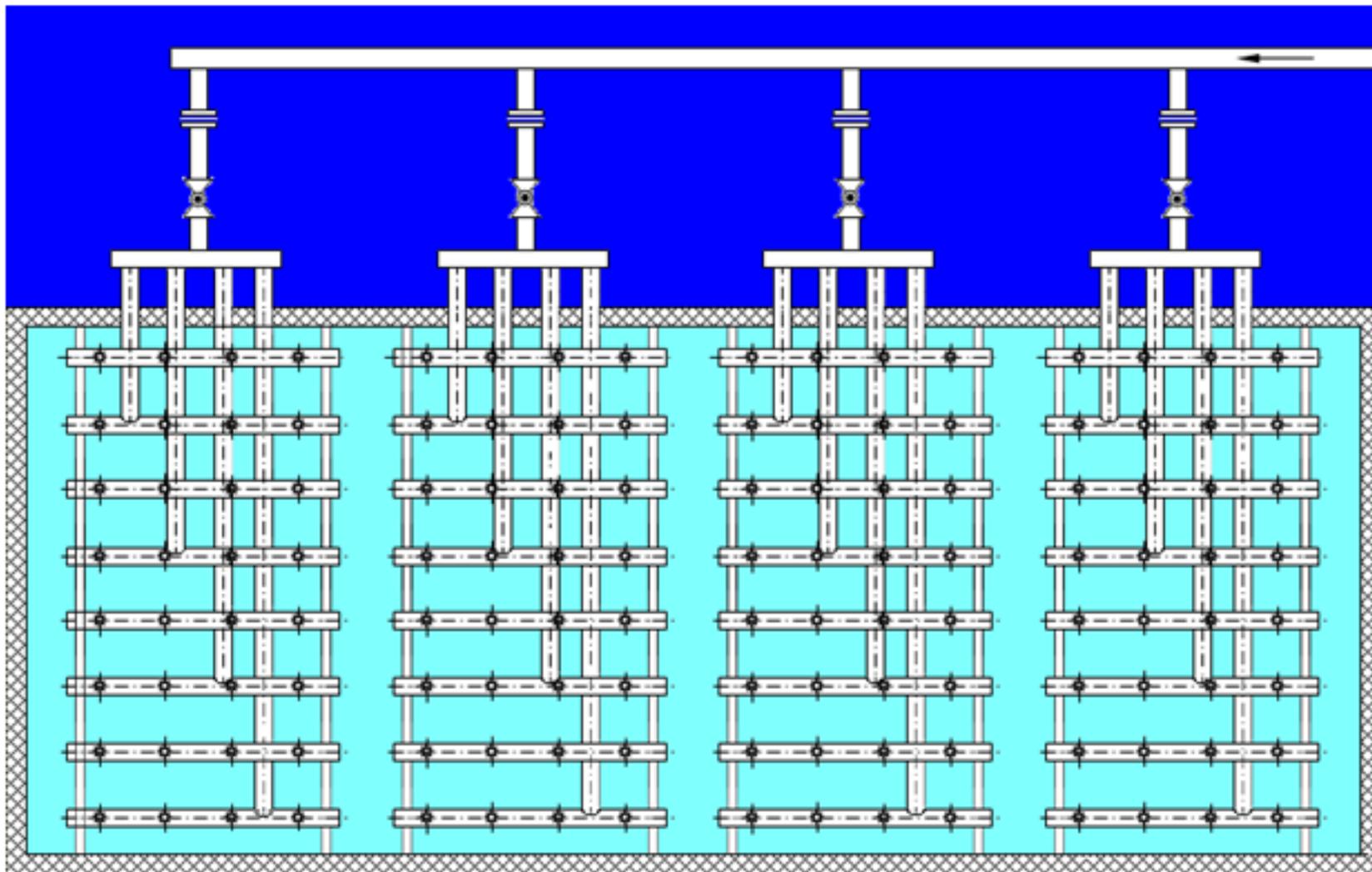


NO<sub>x</sub>分区测量

NO<sub>x</sub>分区调控

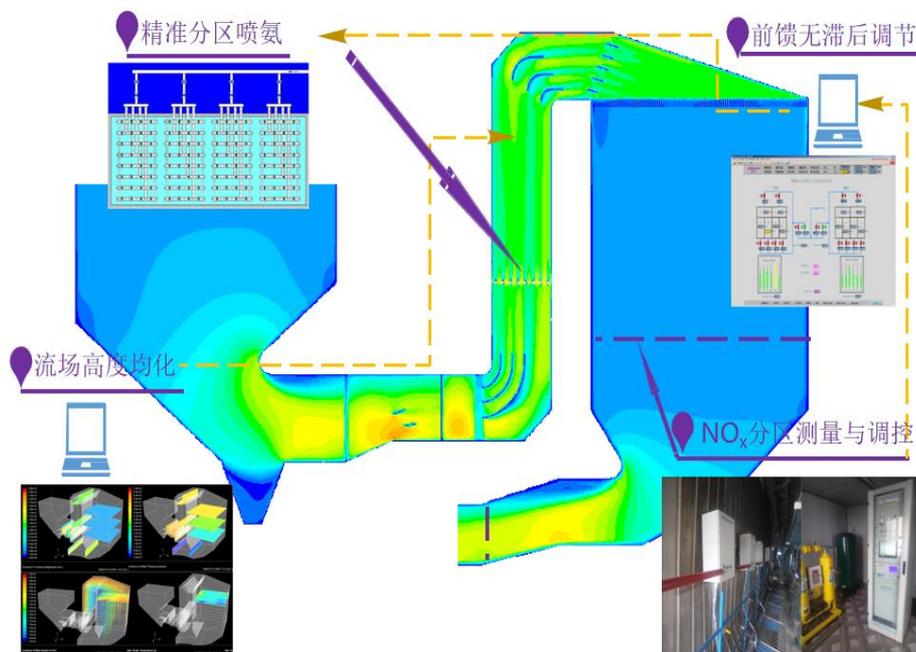
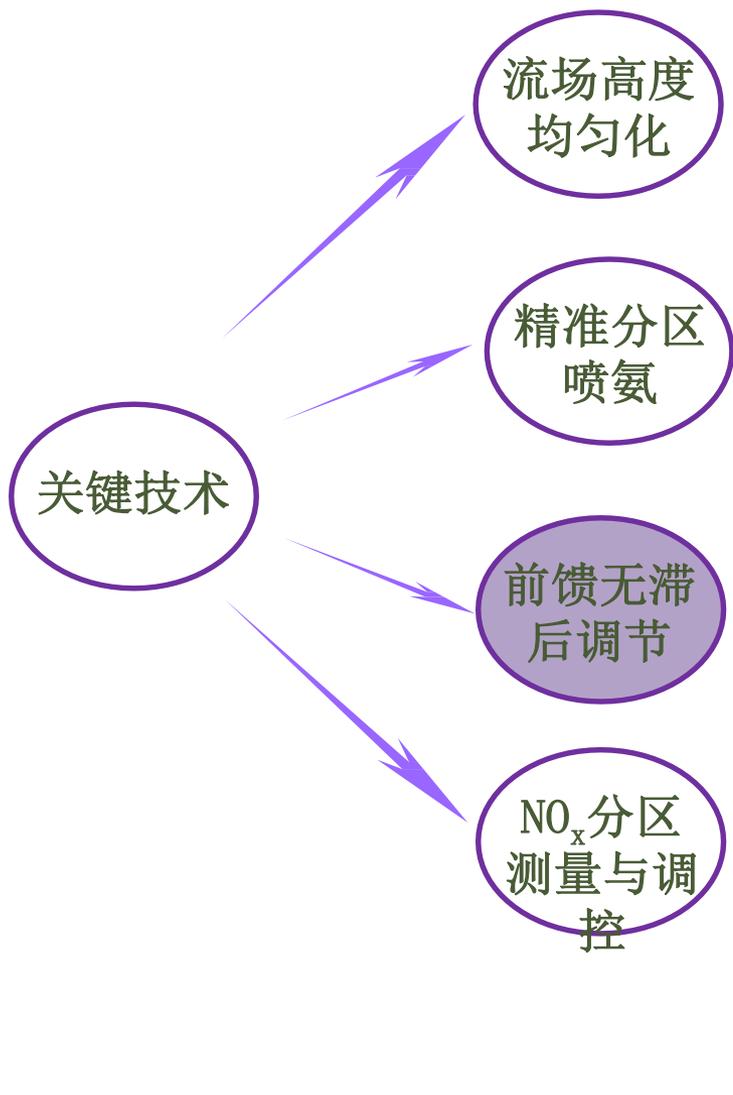
## 二、解决方案及关键技术

### 多区控制氨喷射格栅(AIG)



# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案



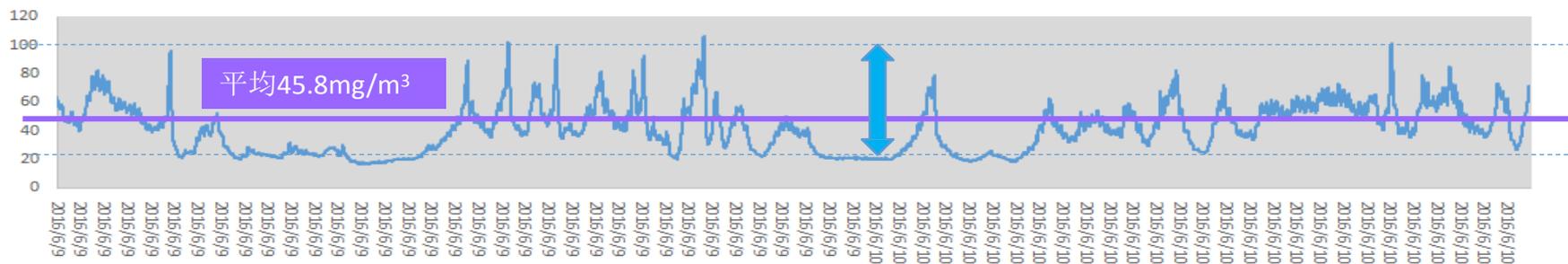
NO<sub>x</sub>分区测量

NO<sub>x</sub>分区调控

## 二、解决方案及关键技术

### ✓ 出口NO<sub>x</sub>波动大，平均值低

NO<sub>x</sub>排放标准100mg/Nm<sup>3</sup>，由于脱硝出口NO<sub>x</sub>波动大，出口NO<sub>x</sub>平均值为45.8mg/Nm<sup>3</sup>左右。造成了NH<sub>3</sub>的大量过喷。



某机组连续48小时的出口NO<sub>x</sub>数据 (mg/m<sup>3</sup>)

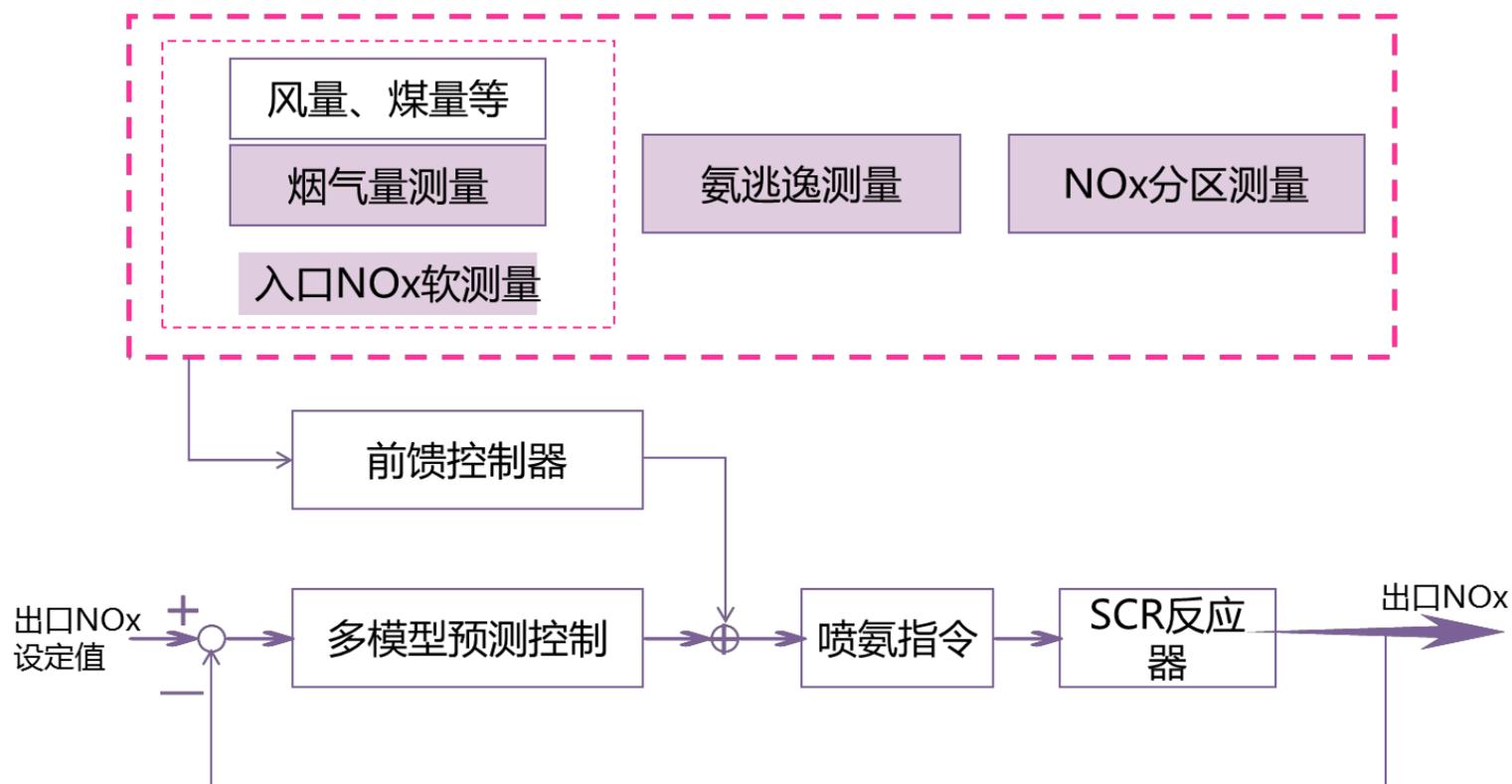
**原因：**

**入口NO<sub>x</sub>波动大而且频繁**  
**NO<sub>x</sub>喷氨反应快 NO<sub>x</sub>反馈、**  
**前馈测量滞后太大**

**常规PID控制无能为力！**

## 二、解决方案及关键技术

### □ 喷氨总量先进控制

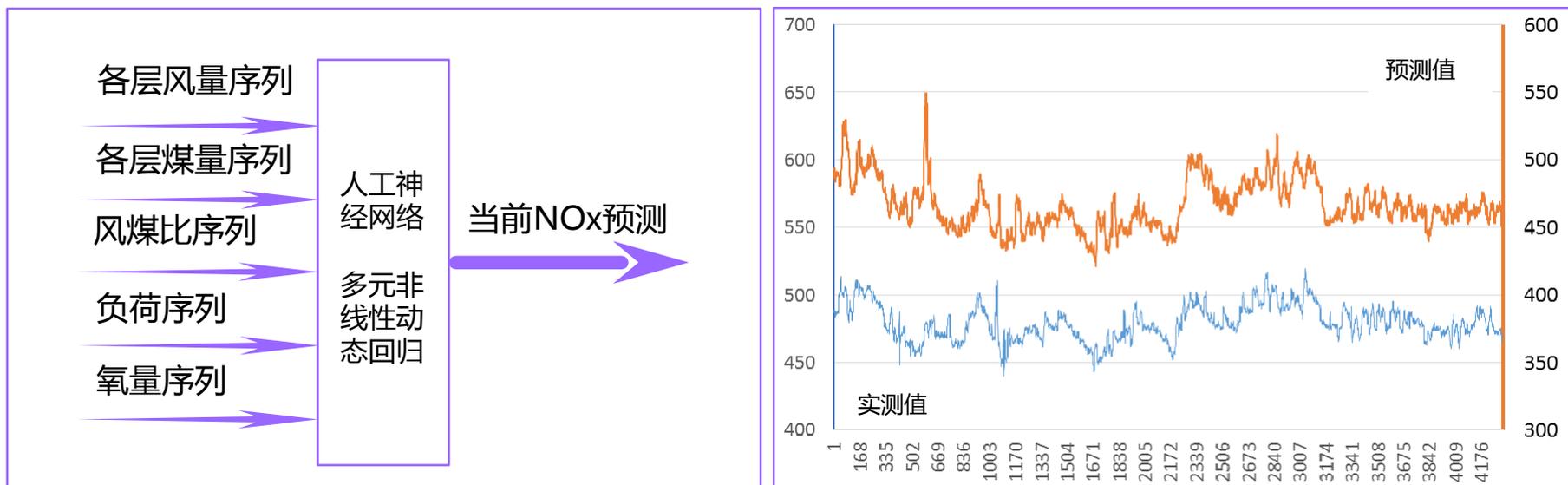


## 二、解决方案及关键技术

### ✓ 入口NO<sub>x</sub>的软测量

软测量是通过大量的实测数据间接得到，克服NO<sub>x</sub>测量仪表取样测量反应迟缓的问题。首先，依据入口NO<sub>x</sub>产生的工艺流程，分析其不锅炉中输入的燃料量、风量以及各种燃烧工呀等之间的因果关系，采取较易泛化的多元线性回归模型进行预测。

入口NO<sub>x</sub>的测量结果对软测量的修正拟合是长期的，需要连续24h采样的硬测量结果进行印证和修正，以递归出一个较准确和及时的软测量结果，-熊健。



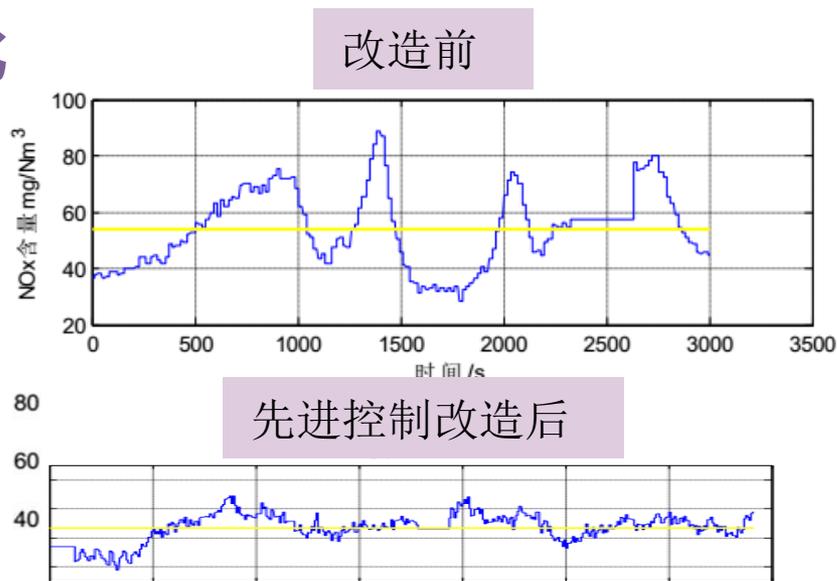
## 二、解决方案及关键技术

### □ 内蒙某电厂：稳定工况的对比

负荷400MW，出口NO<sub>x</sub>设定值均为54mg/m<sup>3</sup>。

✓ 改造前 **最大值为89.9mg/m<sup>3</sup>；最小值为28.8mg/m<sup>3</sup>；**

✓ 先进控制改造后 **最大值为64.39mg/m<sup>3</sup>；最小值为39mg/m<sup>3</sup>；**



400MW负荷时脱硝性能数据表

	出口NO <sub>x</sub> 设定值 mg/Nm <sup>3</sup>	Omax	Omin	RMSO	RRMSO /%
改造前	54	34.90	-25.47	13.73	29.53
改造后	54	10.83	-14.54	4.73	9.73

相同稳定工况下，先进控制技术实施后，出口NO<sub>x</sub>波动明显减少

## 二、解决方案及关键技术

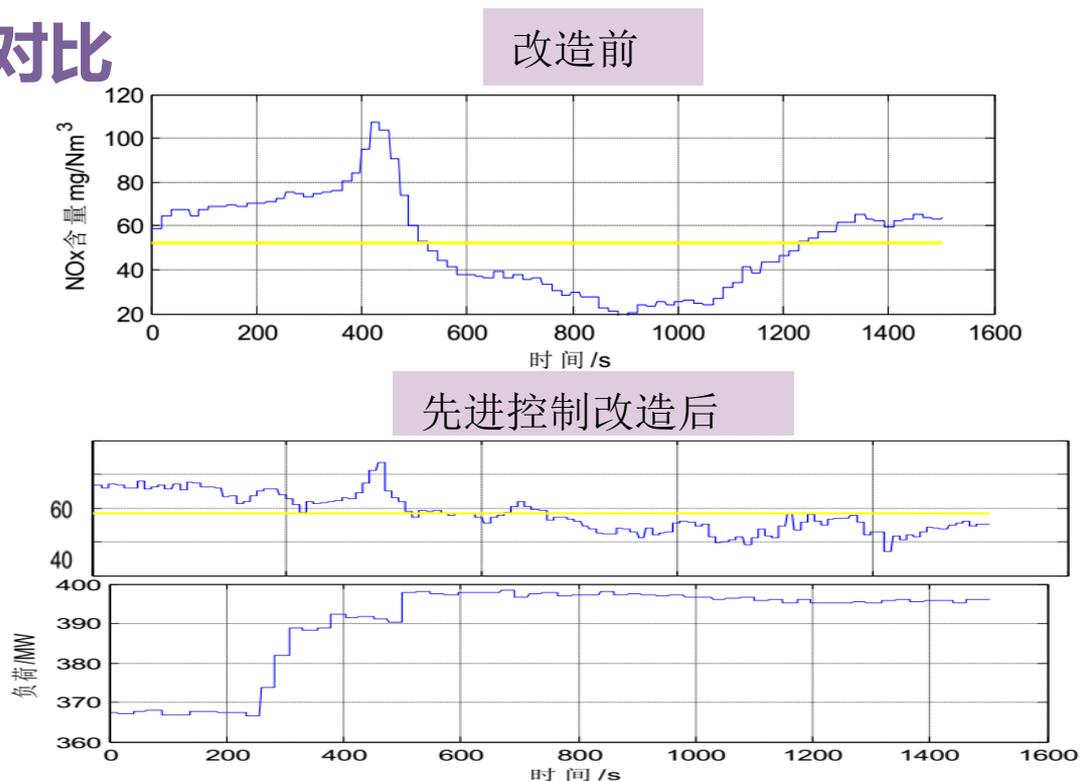
### □ 内蒙某电厂：动态工况对比

升负荷过程

✓ 改造前 **最大值为**  
**107.12mg/m<sup>3</sup>；最小值**  
**为18.63mg/m<sup>3</sup>；**

✓ 先进控制改造后 **最大**  
**值为63.4mg/m<sup>3</sup>；最**  
**小值为37.18mg/m<sup>3</sup>；**

动态工况下，先进控制  
技术实施后，出口NO<sub>x</sub>  
波动明显减少



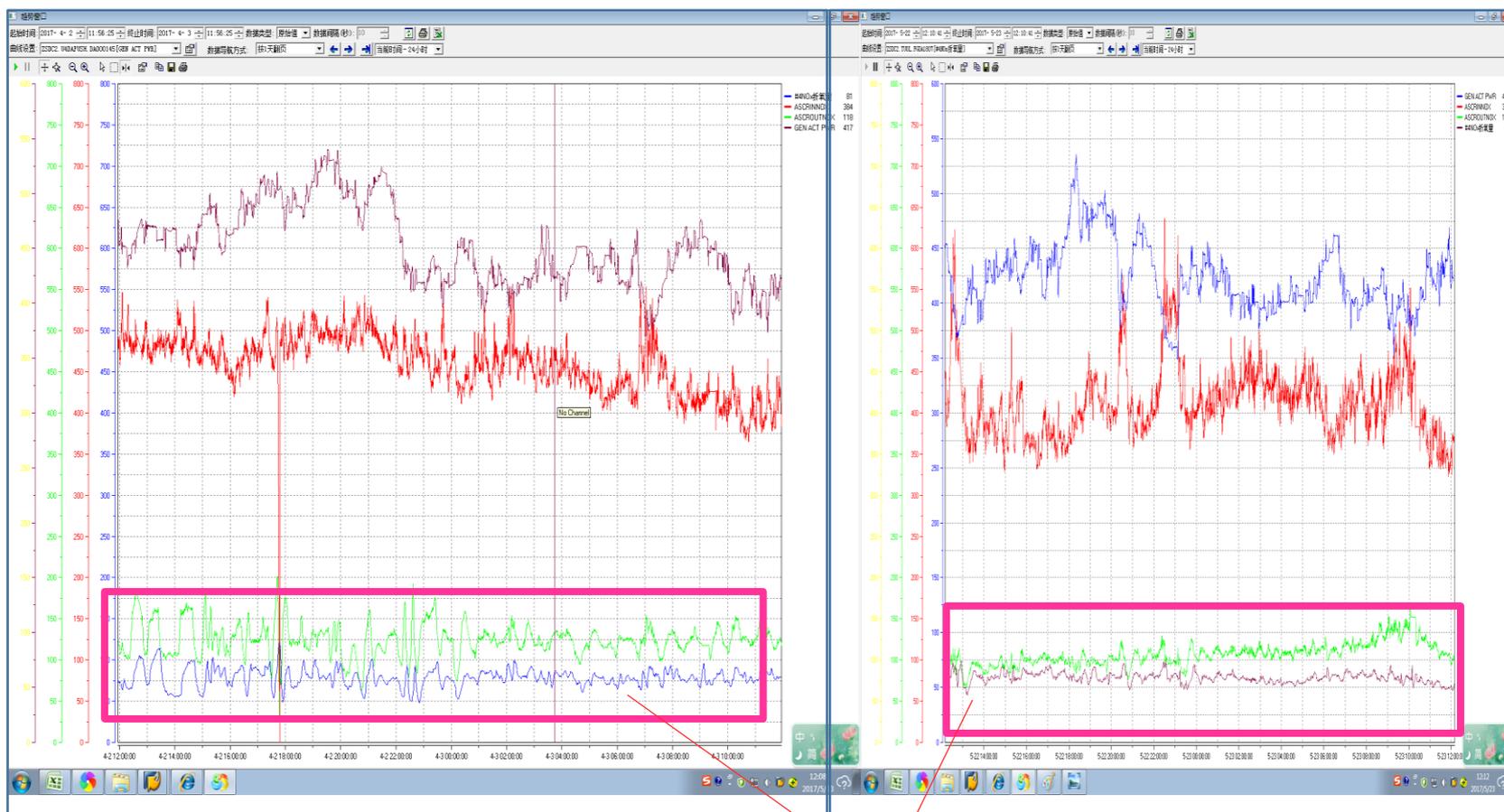
典型负荷上升阶段，脱硝性能数据表

	出口NO <sub>x</sub> 设	RRMS			O/%
	定值 mg/Nm <sup>3</sup>	Omax	Omin	RMSO	
改造前	52	54.79	-33.69	21.04	60.12
改造后	48.5	14.9	-11.32	5.53	11.45

# 二、解决方案及关键技术

## 山西某电厂

喷氨总量控制系统投运后，SCR出口NO<sub>x</sub>与总排口NO<sub>x</sub>的波动大幅减少。



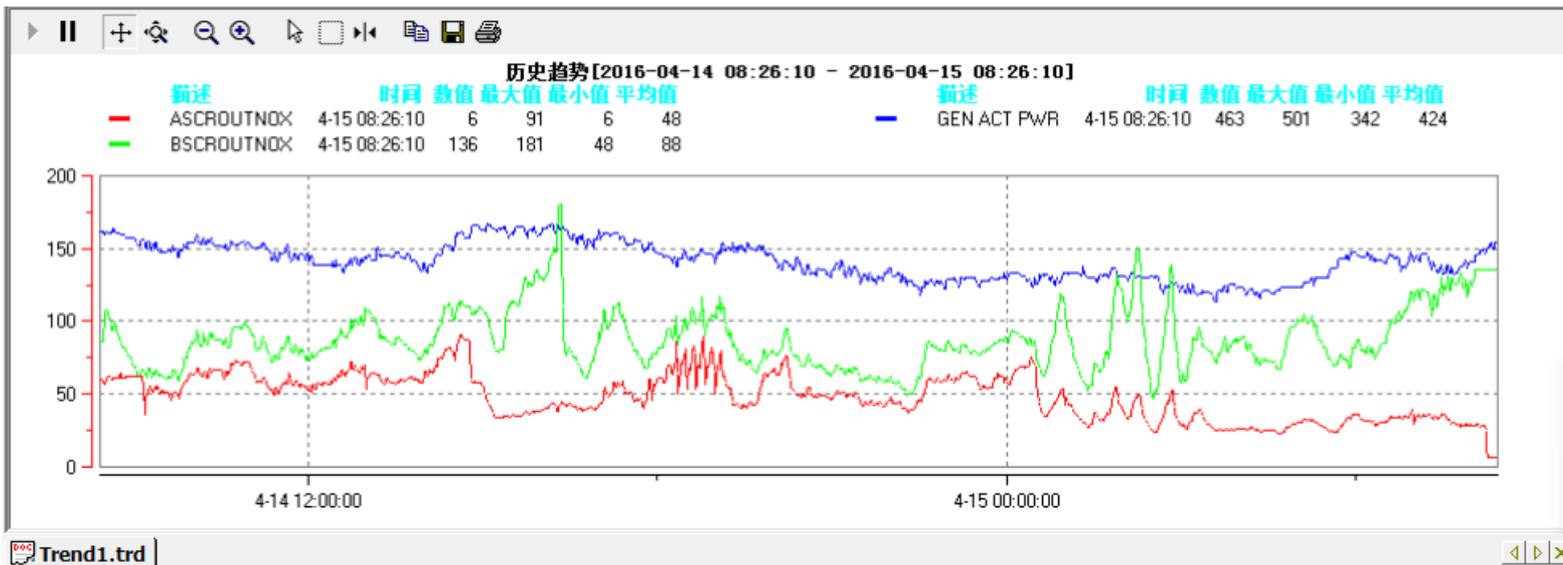
喷氨总量控制系统投运前

出口NO<sub>x</sub>喷氨总量控制系统投运后

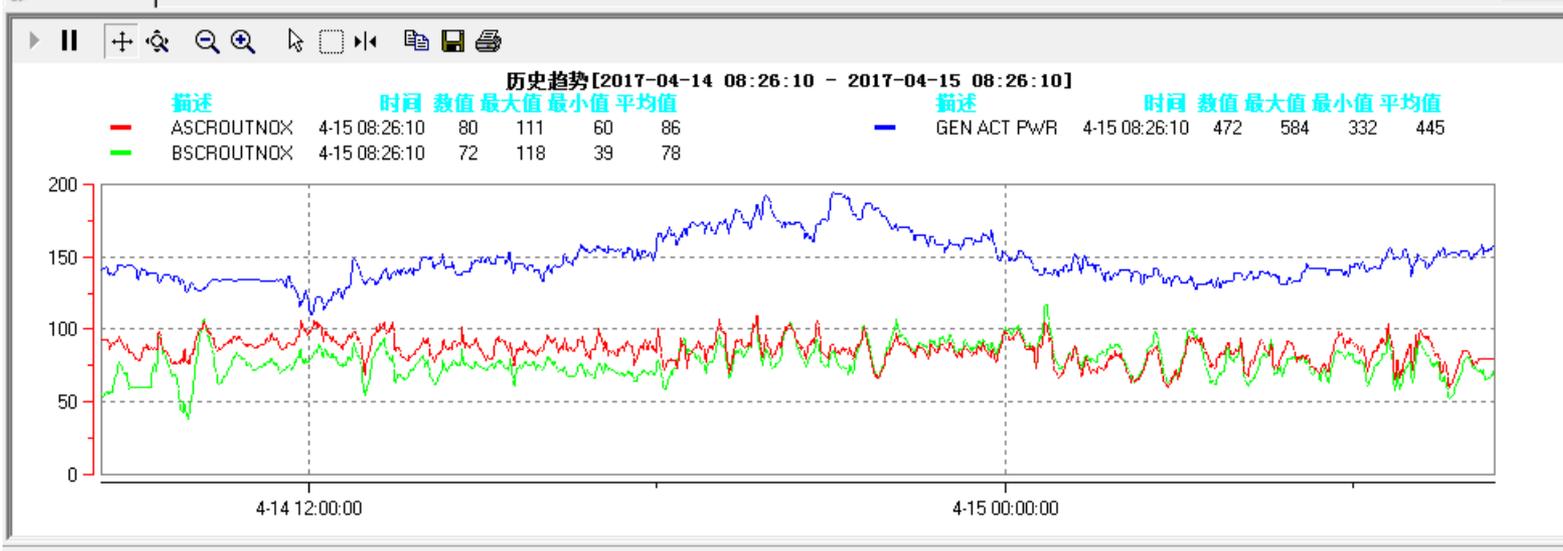
# 二、解决方案及关键技术

喷氨总量控制系统投运后，SCR出口NO<sub>x</sub>与总排口NO<sub>x</sub>的波动大幅减少。

喷氨总量控制系统投运前

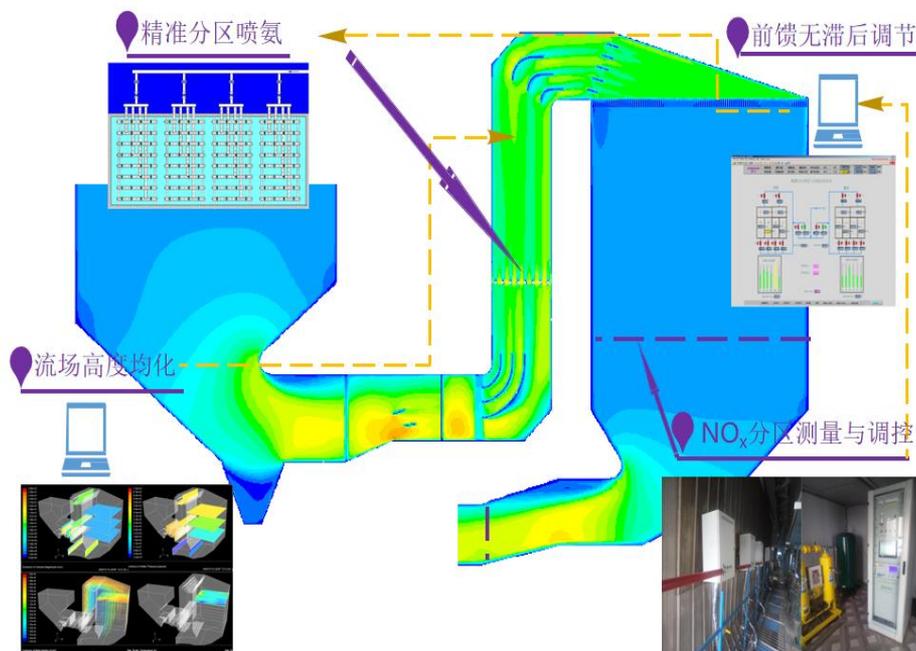
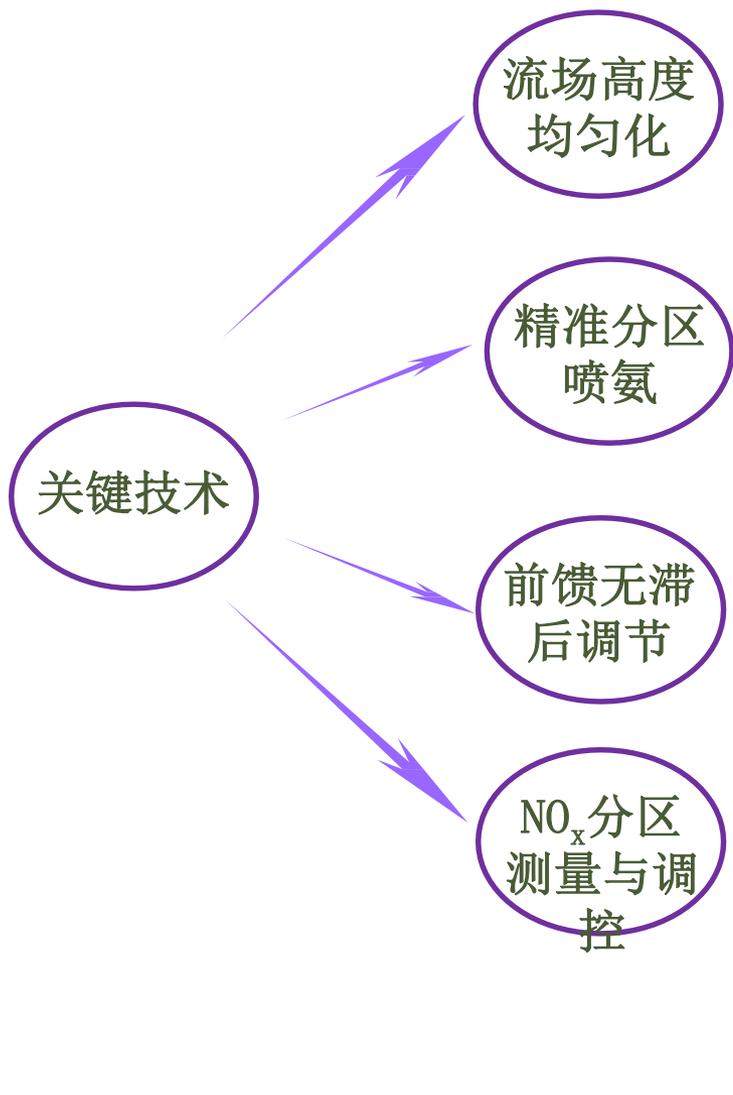


喷氨总量控制系统投运后



# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案



NO<sub>x</sub>分区测量

NO<sub>x</sub>分区调控

# 二、解决方案及关键技术

## 1 现有喷氨格栅布局

网格区域划分

## 2

流场模拟与整定  
—— — — — —  
边界条件 实际结构

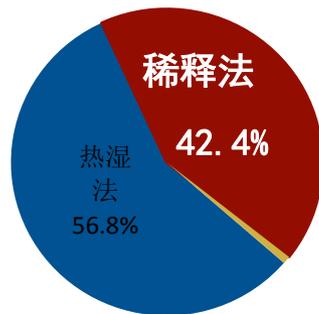
测量准确性

方案可行性

分区规划方案

NOx  
分区测量

烟气预处理



传统热湿法

伴热至150°C



ABS在220°C堵塞管路

烟气冷凝

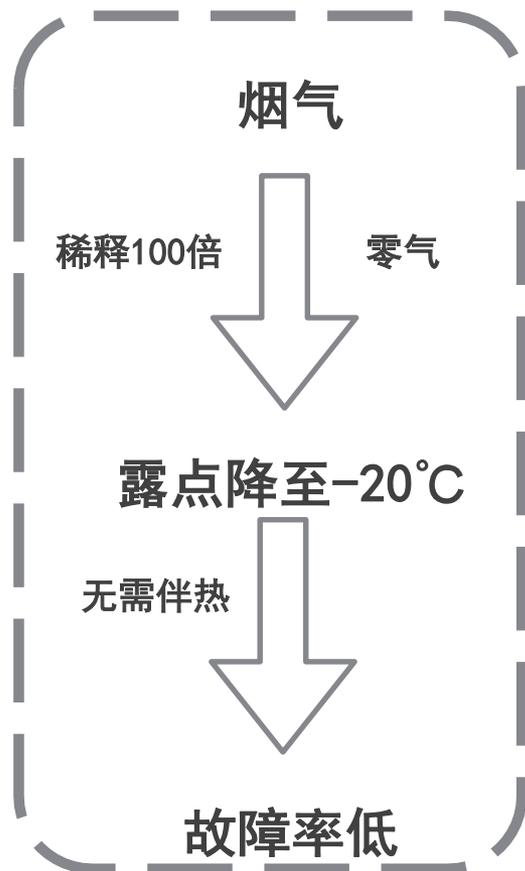


核心部件故障率高

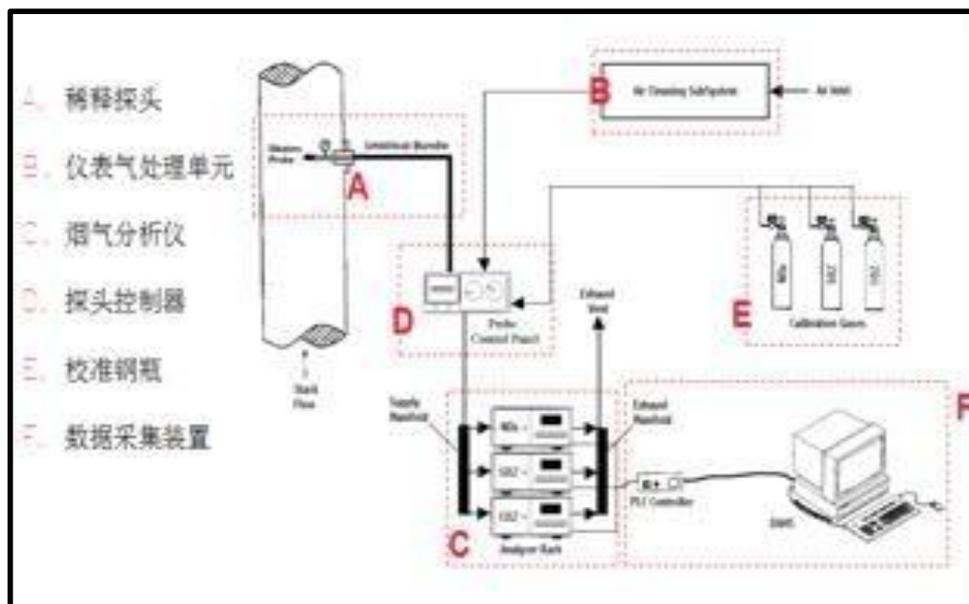
## 二、解决方案及关键技术

NO<sub>x</sub>  
分区测量

烟气预处理



### 稀释法



美国 CEMS 中广泛使用该方法\*

\*此图为美国热电 Thermo Scientific™ 产品原理图，本方案中采用了该烟气分析仪

## 二、解决方案及关键技术

浓度

精度

50 mg/m<sup>3</sup>

5~10 mg/m<sup>3</sup>

NO<sub>x</sub>  
分区测量

超低排放 NO<sub>x</sub> 限值

红外原理和紫外差分原理

工程精度

~30

1.0 mg/m<sup>3</sup> 本方案

mg/m<sup>3</sup>  
脱硝出口NO<sub>x</sub>

化学发光法原理稀释100倍后

# 二、解决方案及关键技术

A侧 不均匀度: 56%				B侧 不均匀度: 30%			
51	41	159	79	92	78	71	100
53	47	157	102	65	126	98	40
60	40	157	51	113	103	120	44
57	43	160	67	80	126	124	70

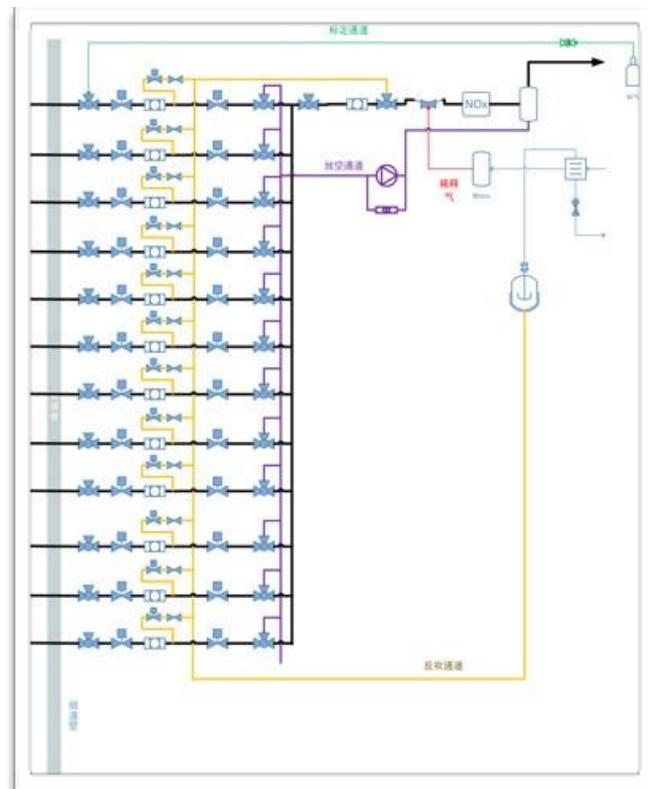
NOx  
分区测量

同步测量原理

轮测切换  
连续抽气 按  
需送入仪表  
系统无死体积

抽气管路根据管径与管阻进行计算 采用音速小孔保证  
每一路进 气量相同 正压  
送样气, 泄漏无影响

同时采样, 分时轮测



智能采样系统

## 二、解决方案及关键技术

NOx  
分区测量

特点优势

同时取样

稀释法

化学发光法

正压送样

同步可比

维护量小

精度高

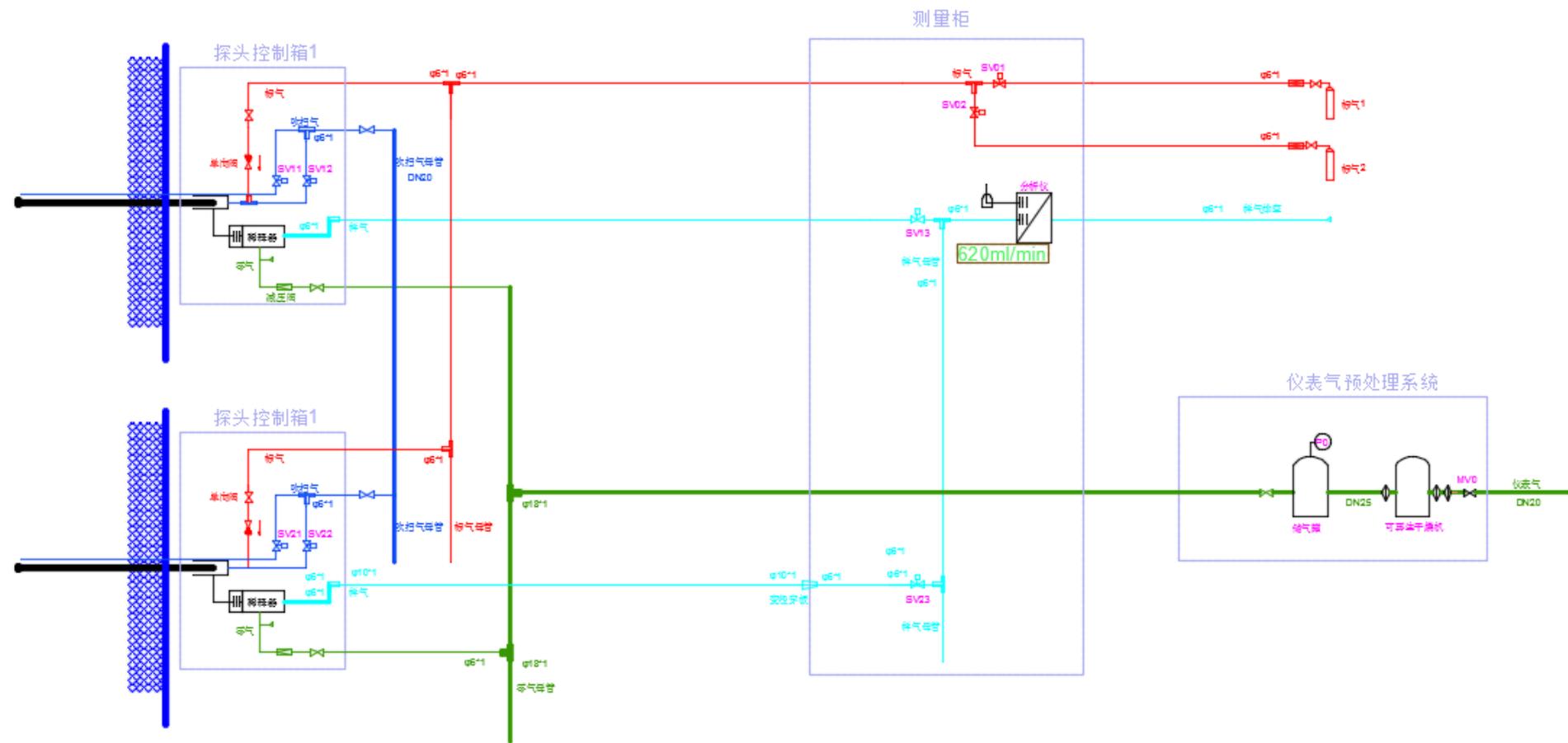
无空气泄漏

# NO<sub>x</sub>分区测量和分区喷氨 应用

## 二、解决方案及关键技术

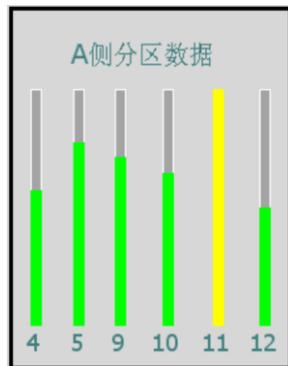
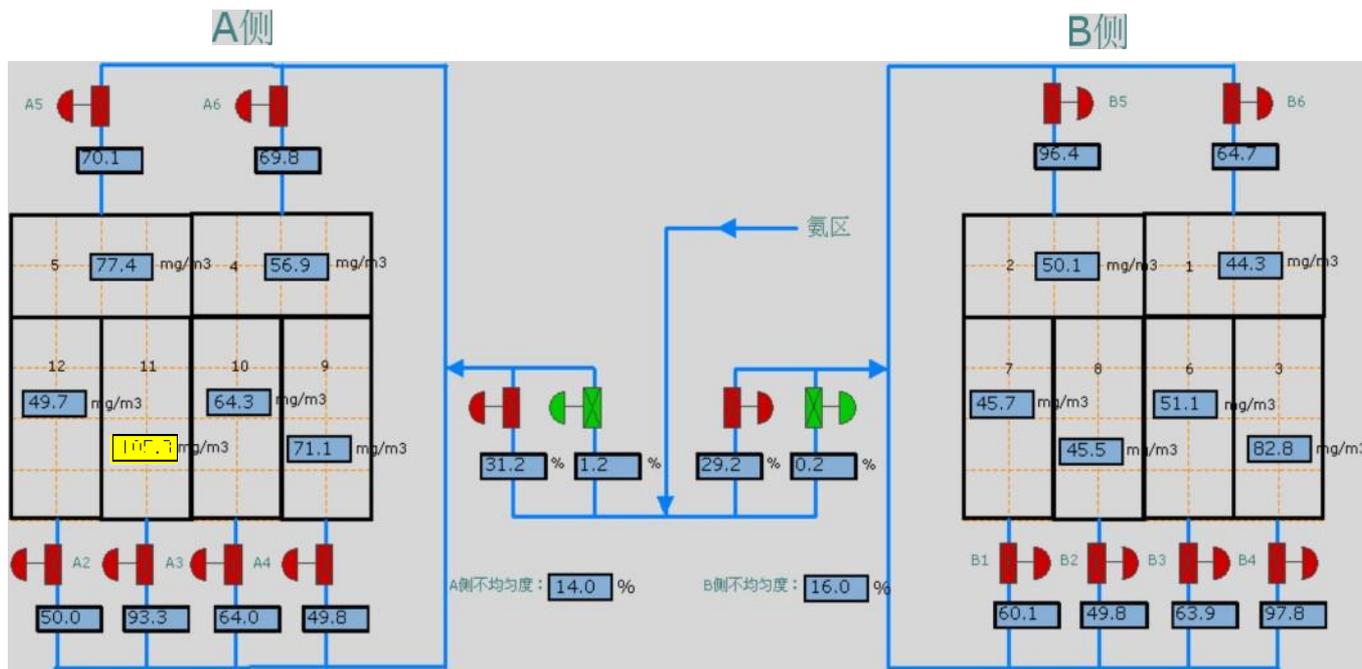


# 二、解决方案及关键技术



ZHANGSHAN NO.4	协调控制	锅炉总貌	风烟系统	燃烧系统	炉汽水系统	电气	MFT	557.12 <sup>1</sup>	16.63 MPa	3000 RPM
	汽机总貌	汽机油系统	真空系统	冷却及公用	机汽水系统	DEH	ETS	543.89 °C	-63.22 mm	17.10 KPa

### SCR分区测与均衡控制系统



A侧出口原NO: 41.6%

系统投入:

系统退出:

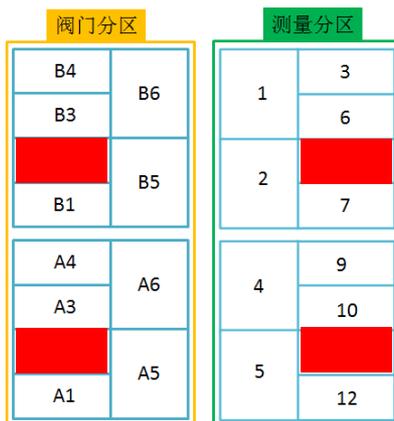
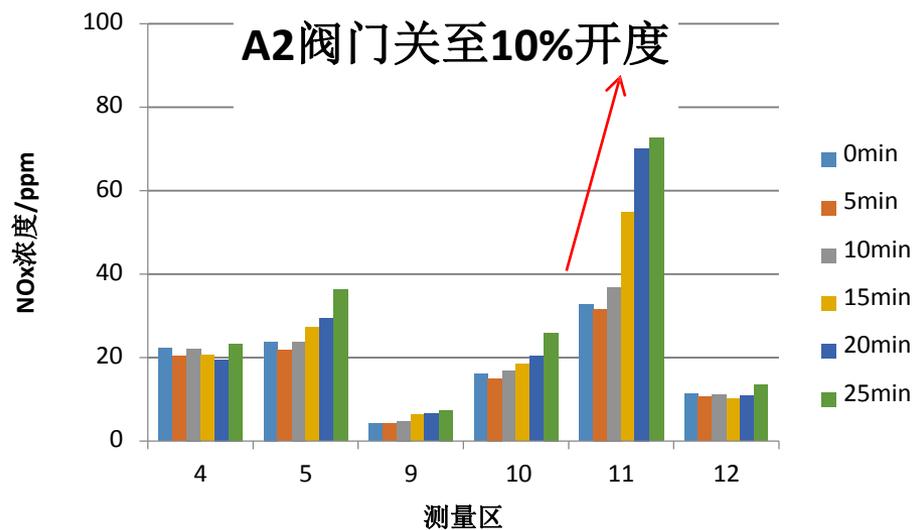
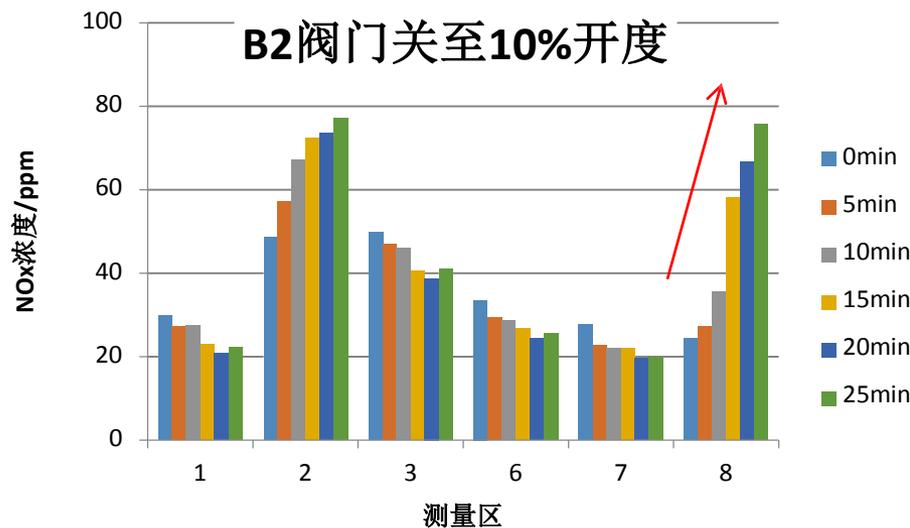
总排口NOx表计: 0.0



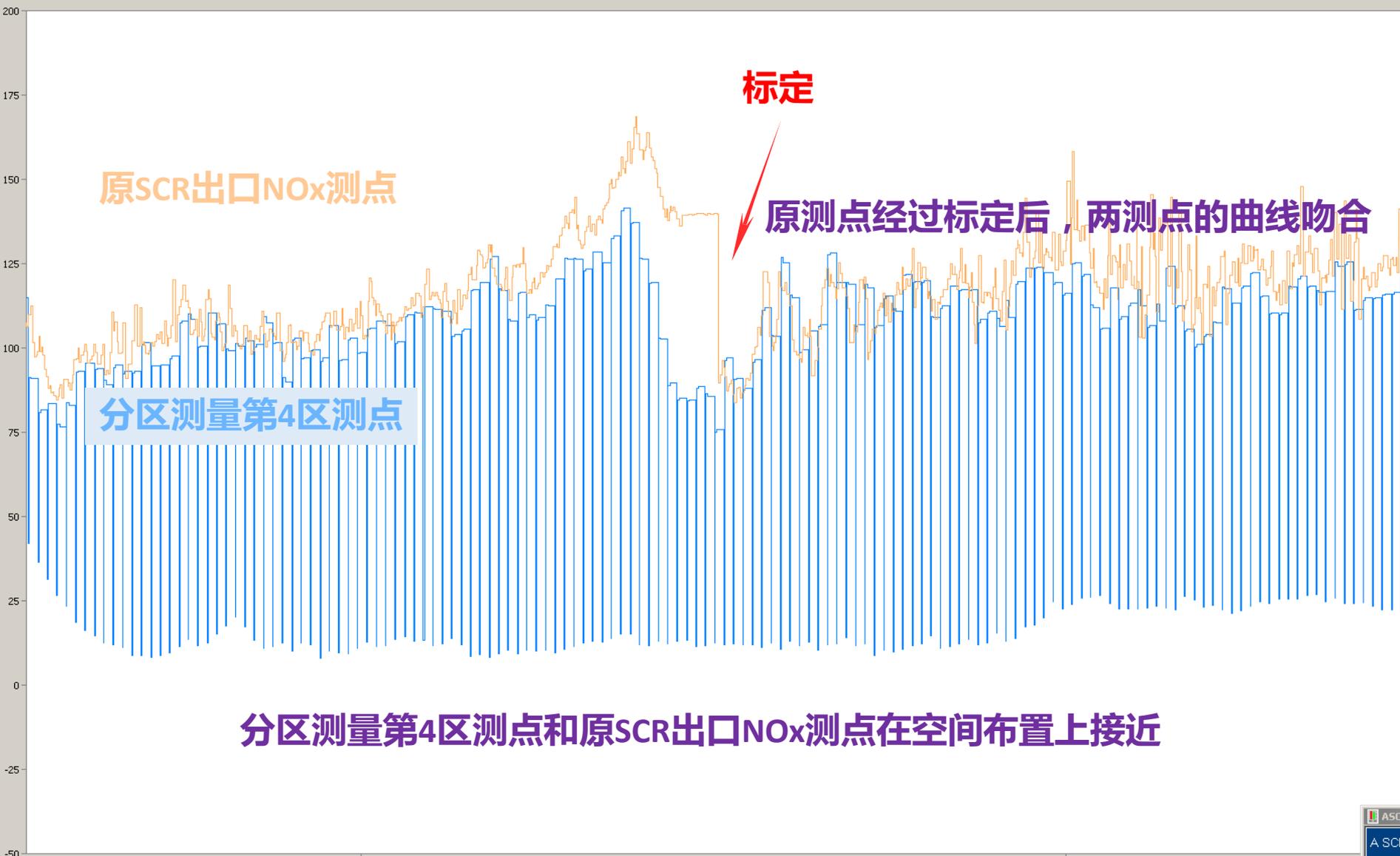
1 2 3 6 7 S

# 二、解决方案及关键技术

分区阀门和分区测量数据对应关系良好

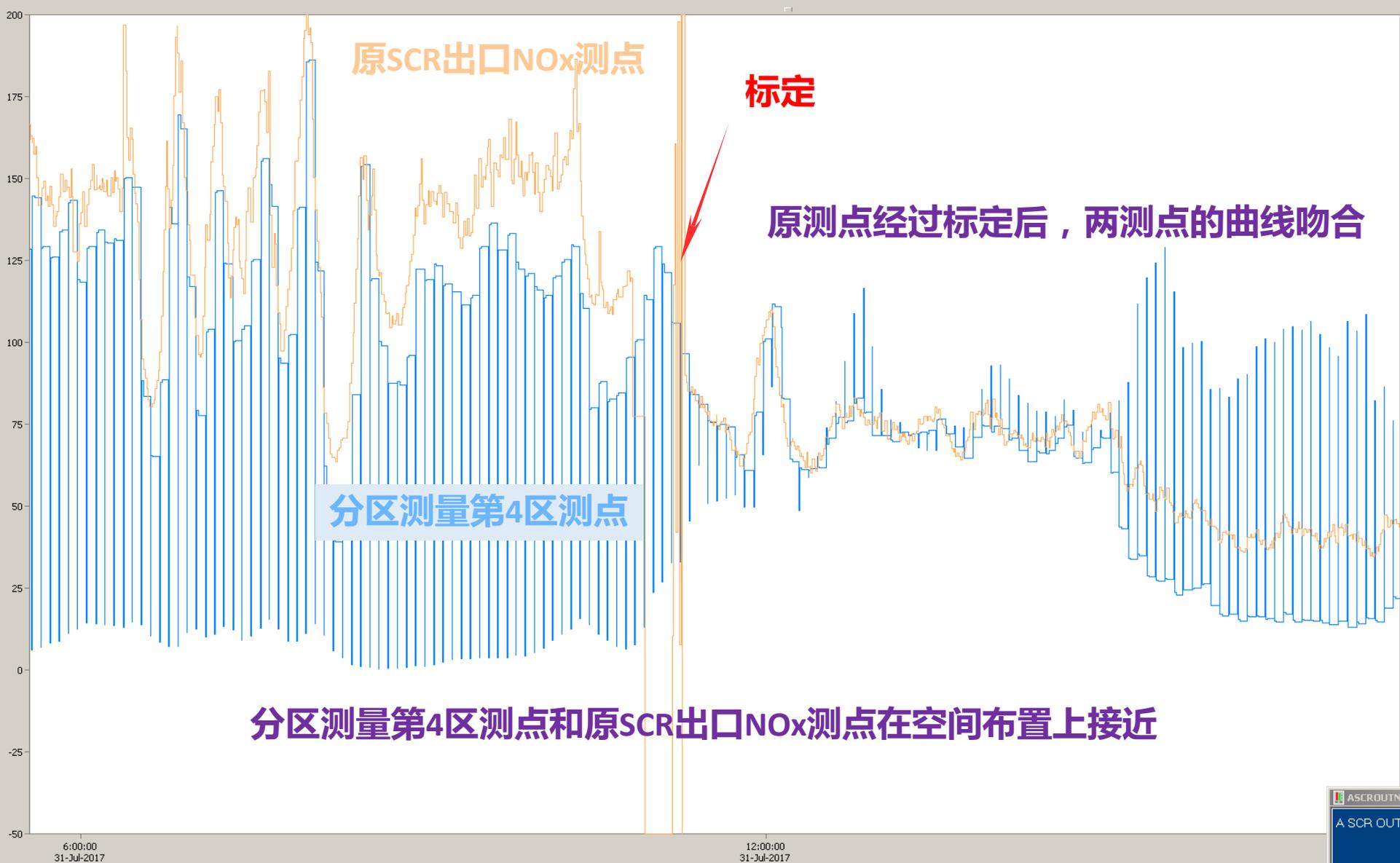


26508 SCT4NOx #4 SCT NOx  
03-Aug-2017 10:19:33.567 0.84



分区测量第4区测点和原SCR出口NOx测点在空间布置上接近

26508 SCT4NOX #4 SCT NOX  
03-Aug-2017 10:19:33.567 0.84



原SCR出口NOx测点

标定

原测点经过标定后，两测点的曲线吻合

分区测量第4区测点

分区测量第4区测点和原SCR出口NOx测点在空间布置上接近



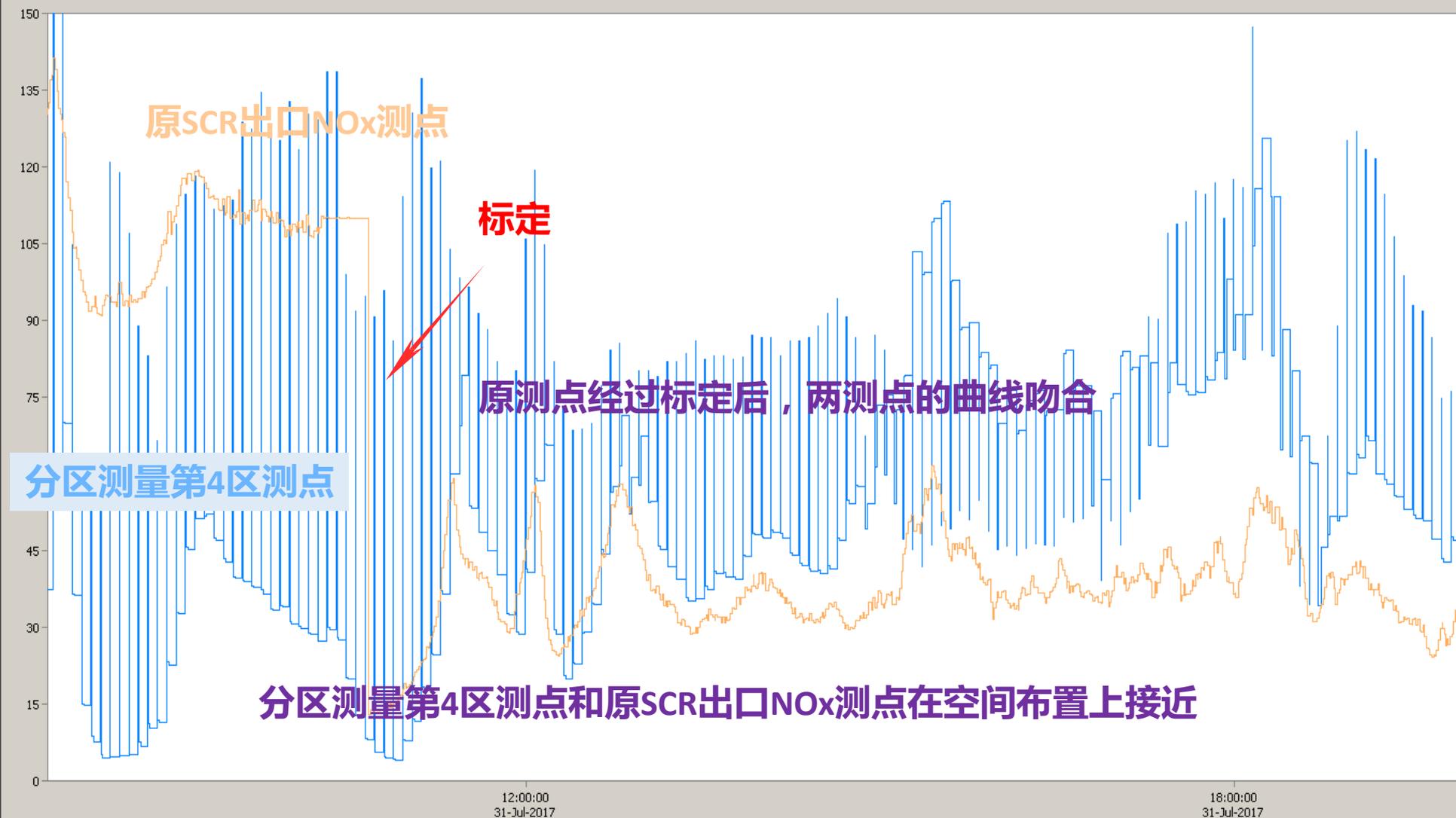
26508

SCT4NOX

#4 SCT NOX

03-Aug-2017 10:19:33.567

0.84

12:00:00  
31-Jul-201718:00:00  
31-Jul-2017

Ready

4ZS11S

ABB

工 顶 研

工 顶 研

空预器本体

引风系统

送风系统

一次风系统

暖风器

炉膛

脱硝SCR系统

SCR GRID优化系统

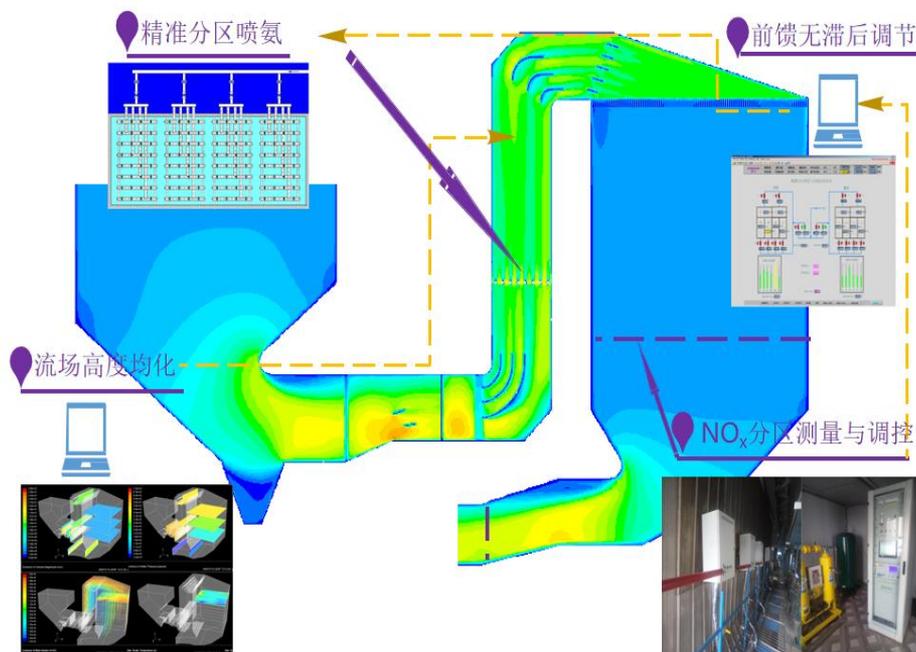
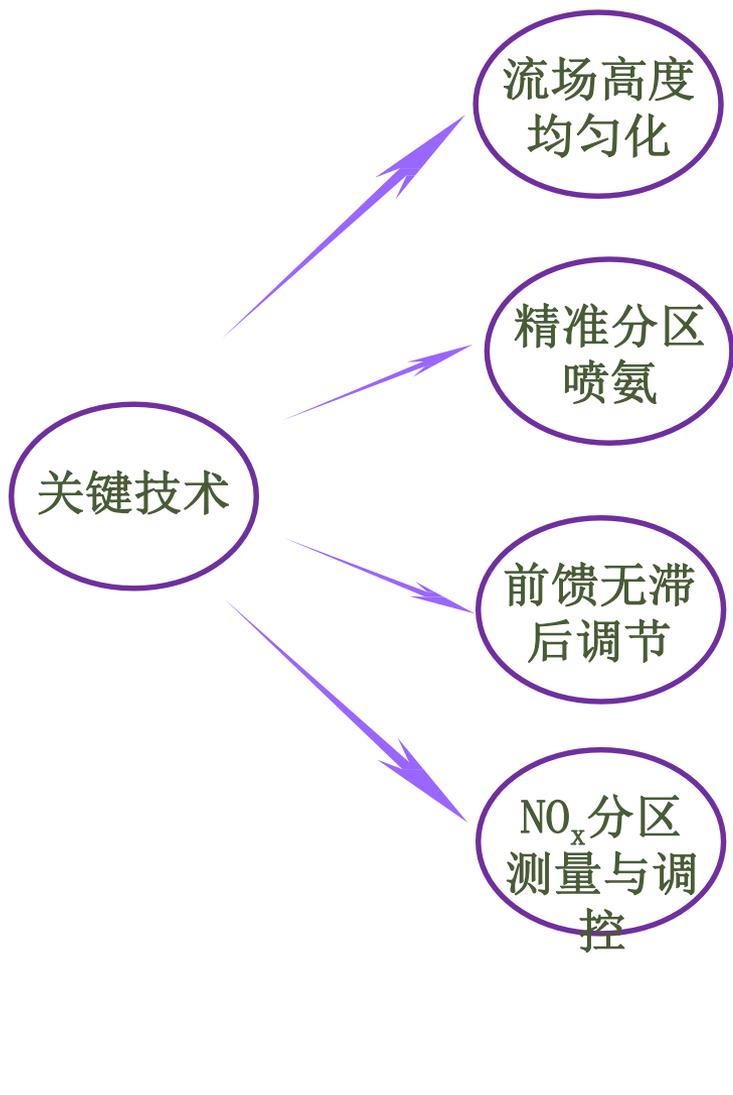
脱硝SCR吹灰

布袋除尘器

报警确认

# 二、解决方案及关键技术

## □ 解决方案



NO<sub>x</sub>分区测量

NO<sub>x</sub>分区调控

## 二、解决方案及关键技术

确定最佳分区

安装自动调节阀门

均衡  
喷氨控制

实现方案

模拟计算

流场特性

最佳分区方式

均衡控制算法

分调门开度指令

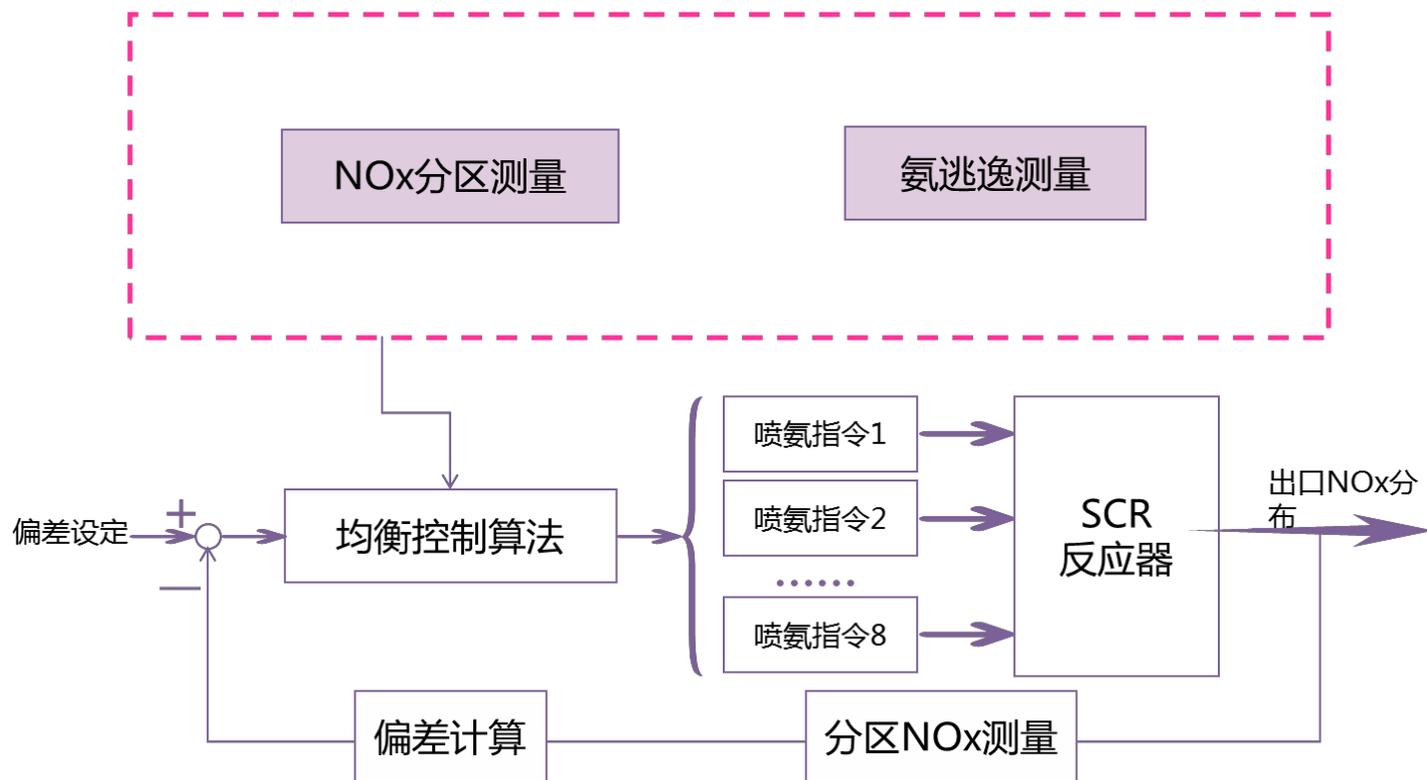
改善混合均匀度

# 二、解决方案及关键技术

## □ 喷氨格栅均衡控制技术

均衡  
喷氨控制

控制技术



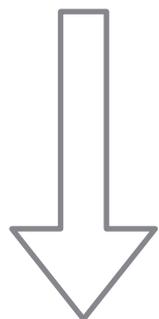
## 二、解决方案及关键技术

均衡控制算法

均衡  
喷氨控制

算法原理

分区喷氨调门开度  $K_i$



耦合关系

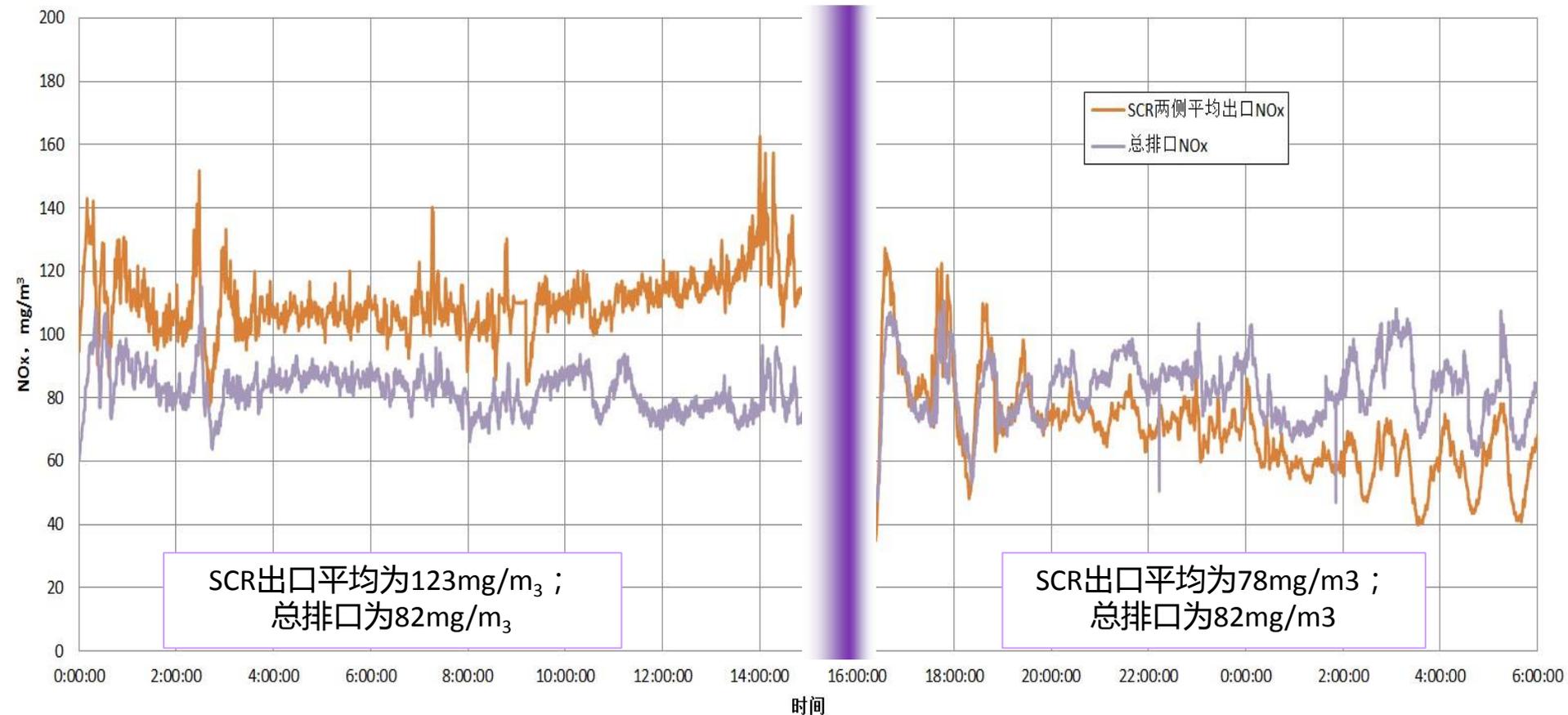
$$\bar{N} = \{C_i\}\bar{K}$$

$$C_1 K_1 + C_2 K_2 + \dots + C_n$$

出口 NOx 分布  $N_i$

# 二、解决方案及关键技术

## 山西某电厂

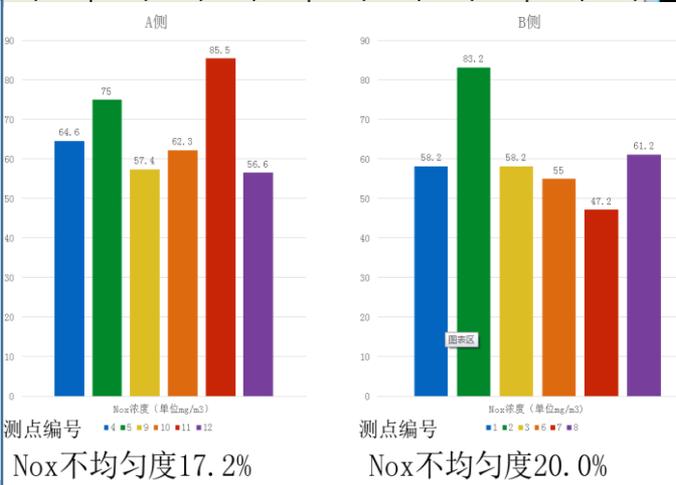
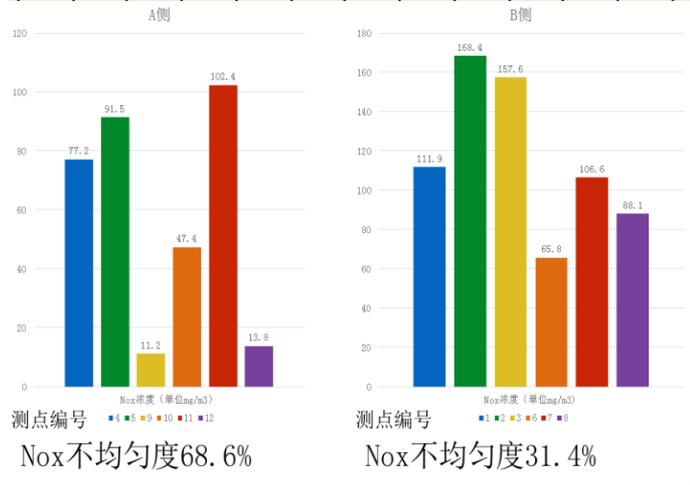
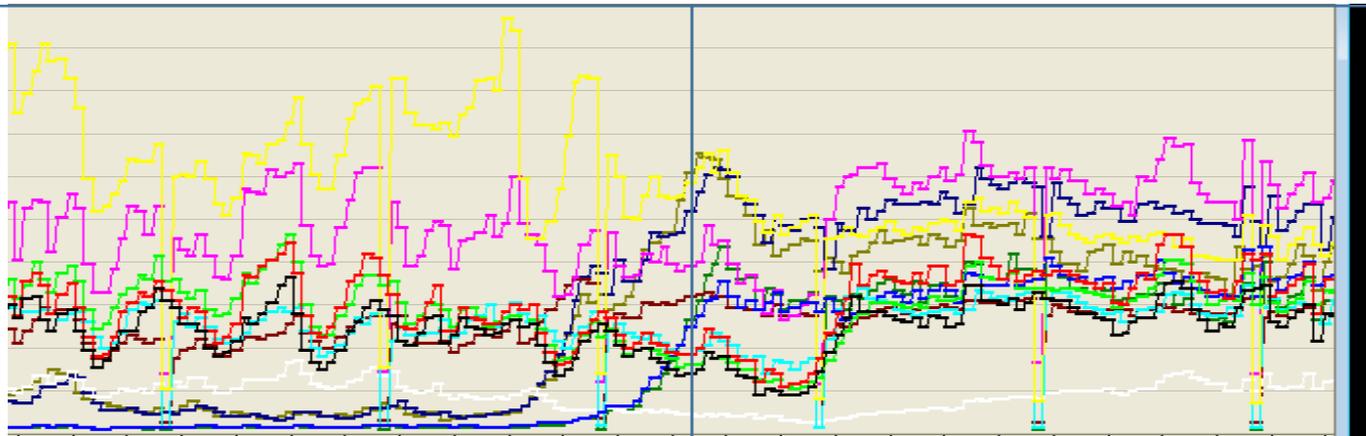


喷氨均衡控制系统投运前

喷氨均衡控制系统投运后

# 二、解决方案及关键技术

喷氨均衡控制系统投运后，SCR出口NOX分布均匀性大幅提高。不均匀度两侧综合降低31.4%。



A\B侧偏差分别为：  
17.2%和  
20%

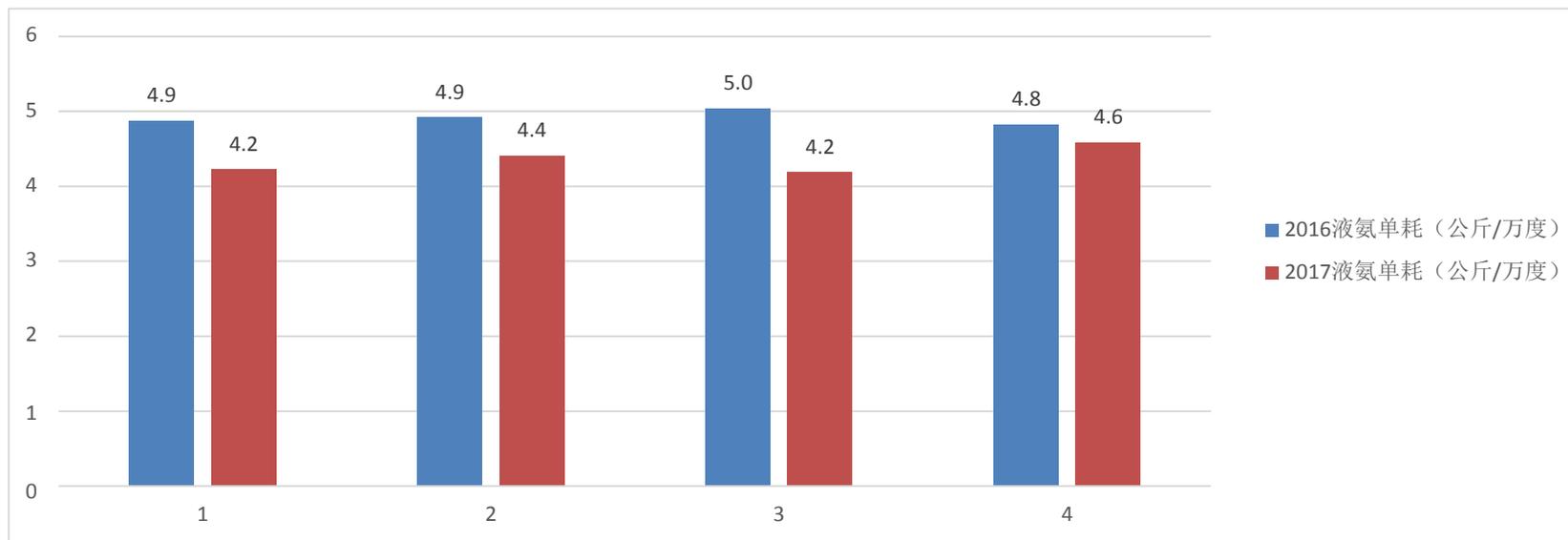
喷氨总量控制系统投运前

喷氨总量控制系统投运后

A \ B 侧偏差分别

## 二、解决方案及关键技术

总体优化控制系统投运后，**喷氨量大幅降低，相对降低11.5%。节能环保效果明显。**



某600MW机组2016、2017年连续4个月（4月~7月）的液氨单耗

蓝色，2016，平均4.91公斤/万度；

棕色，2017，平均4.35公斤/万度。

耗氨量相对减少： $(4.91-4.35)/4.19=11.5\%$ ，

既节省了用氨费用，又能有效降低氨逃逸。

# 三、效益分析

## □ 技术指标

在保证烟气NO<sub>x</sub>排放达标的前提下，基于理论计算和工程经验结果，确定如下技术指标

- ✓ 出口NO<sub>x</sub>浓度分布不均匀度： $\leq 20\%$
- ✓ 出口NO<sub>x</sub>浓度最大动态波动： $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$

以**600MW**机组（相当于**550m<sup>2</sup>**烧结）为例

# 三、效益分析

## □减少氨用量

### ✓ 减少出口NOx波动而减少的用氨量

假设机组所在地NOx排放标准是50mg/Nm<sup>3</sup>，锅炉NOx排放为300mg/Nm<sup>3</sup>，原控制系统NOx控制平均值为40mg/Nm<sup>3</sup>，采用先进控制后NOx控制平均值为45mg/Nm<sup>3</sup>，根据理论计算，当SCR的脱硝效率在80%时，能减少用氨量：

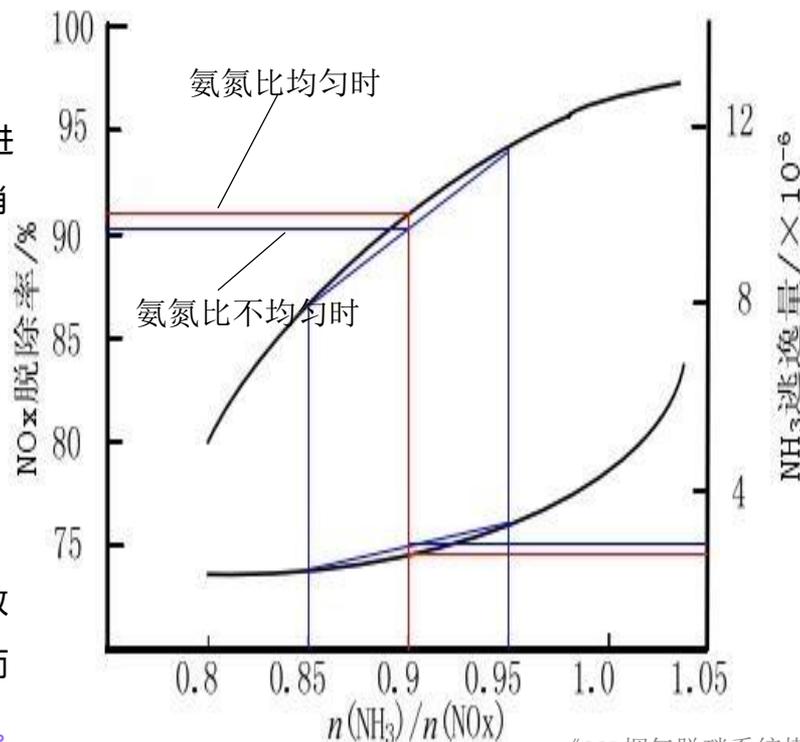
$$\left( (300-40) - (300-45) \right) / (300-40) = 8.3\%$$

### ✓ 提高入口氨分布均匀性而减少的用氨量

氨分布偏差从5%降低为2%，能减少用氨量~3%。

### ✓ 提高出口NOx均匀性而减少的用氨量

脱硝效率不氨氮比开非线性关系。实际上氨氮比高的区域脱硝效率增加很少，而在氨氮比低的区域，脱硝效率大幅降低。所以总体而言，理论计算表明，出口NOx偏差减少10%，平均脱硝率降低约1%。



氨氮比均匀时，平均脱硝效率提高，氨逃逸降低

《SCR烟气脱硝系统模拟优化及喷氨量最优控制》，赵乾，《重庆大学》，2012

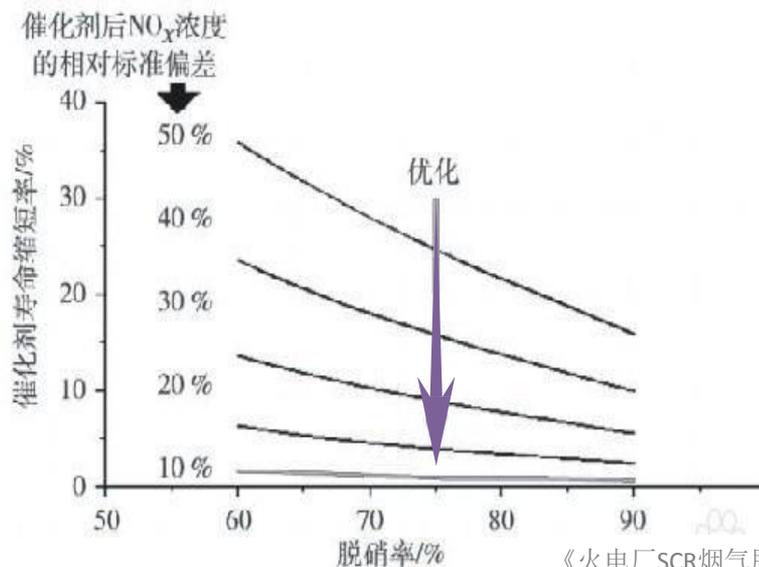
对于600MW机组的用氨量为350kg/h，按年均利用小时数8000小时计算，每年的用氨量2800吨。每吨2000元，即每年可节省约 $2800 \times 2000 \times 12.3\% = 68.88$ 万元。按技术指标10%计算，则每年可节省约 $2800 \times 2000 \times 10\% = 52$ 万元。

# 三、效益分析

## 提高催化剂的使用寿命

根据国外相关机构的研究数据表明，实现喷氨格栅均衡控制后，预计可降低出口NO<sub>x</sub>的均匀度10%。例如出口NO<sub>x</sub>相对偏差从50%降至40%，则催化剂寿命能相对提高约12%。按600MW机组三层催化剂费用合计大约3000万元（包含拆装人工费）、催化剂寿命6年计算。

NO<sub>x</sub>分布均匀性对催化剂寿命的影响



《火电厂SCR烟气脱硝装置的运行优化研究》，廖永进等，《锅炉技术》，2008，39(5):60-63

则每年因为催化剂使用寿命延长而节省催化剂费用为：

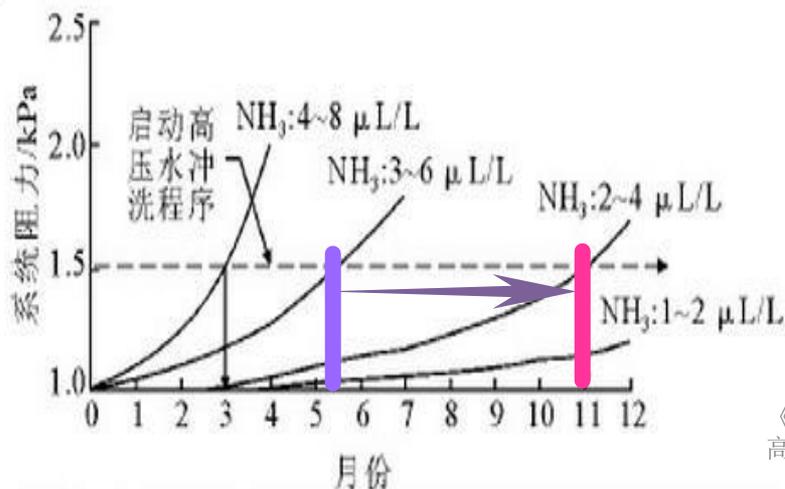
$$3000 \times 12\% / 6 = 60 \text{ 万元。}$$

# 三、效益分析

## 减少氨逃逸，降低风机阻力，减少空预器检修成本

通过喷氨调门的优化控制，真正实现NO<sub>x</sub>不氨的等摩尔比喷射，在理论上杜绝了为达到国家环保排放标准，而造成的“氨”过喷现象，从而确保氨逃逸维持在较低水平。大大降低了空预器堵塞的可能性，提高空预器效率。空预器的高压水吹扫成本大约为10万元/次。本项目实施后，氨逃逸预期从4.5ppm降至3ppm，空预器的吹扫周期大约从5.5月提高到11月。相当于减少费用： $10 * (12/5.5 - 12/11) = 11$ 万元/年。

引风机的轴功率不风压成正比，可以得到600MW机组大约能减少引风机电耗： $7000 * (0.15/4) = 700$ KW，相当于减少节约费用： $700 * 4000 * 0.3 = 25.2$ 万元/年。



# 三、效益分析

## □经济效益分析

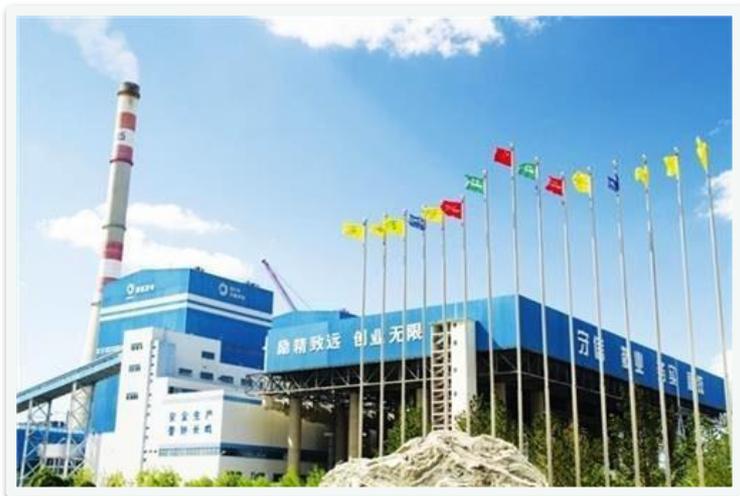
### 600MW机组（550m<sup>2</sup>烧结）

减少氨用量	$2800 \times 2000 \times 10\% = 56$ 万元/年	
延长催化剂寿命	相对延长12% 60万元/年	总计 152.2万元/年
减少空预器吹扫	周期从5.5月延长到11月 11万元/年	
引风机节能	节省电耗700KW 25.2万元/年	
其他隐性效益	减少设备损耗，安全稳定运行，降低运行工作强度。	

新增投资**600万元**，4年时间能收回成本

# 四、实施业绩

## 业绩



新疆某电厂  
#1、#2机组（2018年）



山东某热电厂  
#3机组（2019年）

# 四、实施业绩

## 业绩

序号	应用项目	时间
1	新疆合盛电力480t/h锅炉SCR脱硝工程	2018
2	山东泰钢75t/h循环流化床锅炉SCR脱硝	2018
3	山东金博3×130t/h循环流化床锅炉SNCR+SCR脱硝	2018
4	河北金隅水泥窑尾烟气SCR脱硝	2019
5	亿立洁能科技2×35t/h煤粉锅炉SNCR+SCR改造	2020
6	天津荣程210t/h煤气锅炉SNCR+SCR脱硝改造	2021

谢谢!