

模型智能

朱豫才

浙江大学控制学院

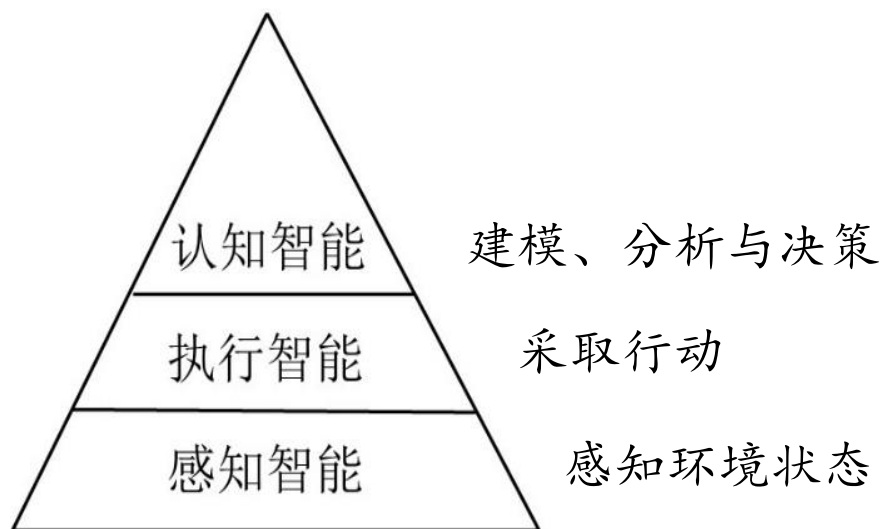
目录:

1. 什么是智能?
2. 基于智能建模的智能制造技术
3. 工业应用实例（化工、石化、发电、水泥）
4. 结论和展望

1. 什么是智能？

定义智能：动物和人的智能，是他们进化的在地球上的生存能力。

智能有三个层次（某IBM科学家）：感知智能，执行智能，认知智能



1. 什么是智能？

认知智能: 认知智能是动物和人建立/改进环境模型（规律的表述），使用模型处理信息并做出预测和决策的能力。

定理1. 认知智能是最高级智能

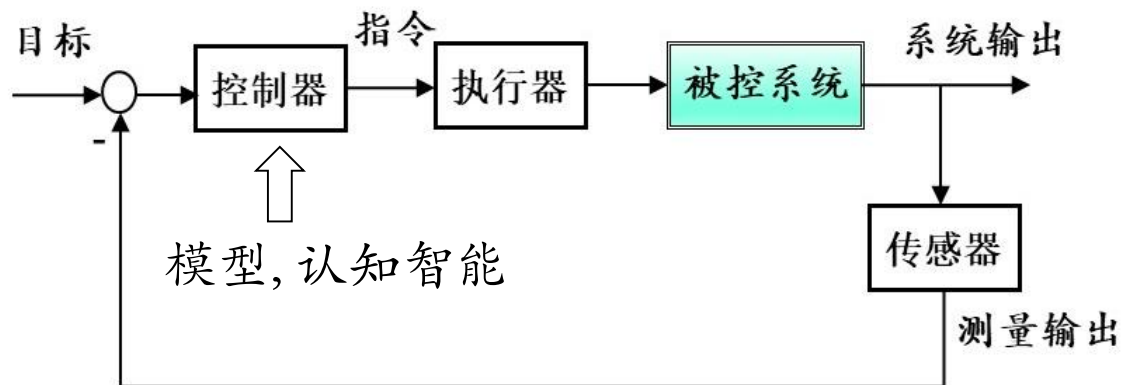
证明: 因为人是动物之王。

理想人工智能: 人工智能是研究模拟和扩展动物和人的智能的理论和方法，包含感知智能、执行智能和认知智能。

当前人工智能: 现在的所谓人工智能大都是开发基于图像和声音的感知技术。所以当前的人工智能还在感知智能的层次。

1. 什么是智能？

自动控制与理想人工智能



科学定理：

一个系统的最优控制器一定是该系统的数学模型！

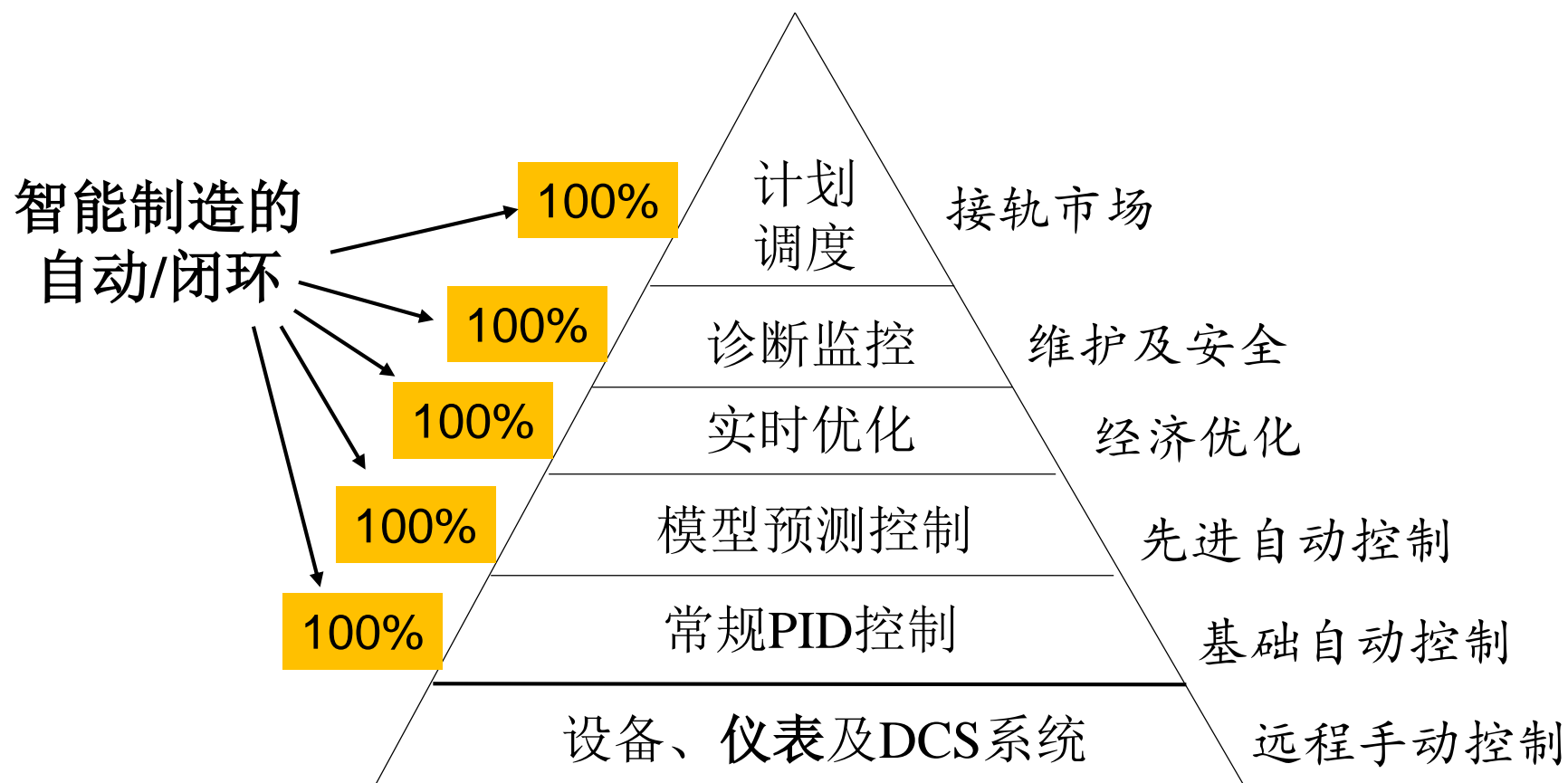
Every good regulator of a system must be a model of that system.

R. C. Conant & Ashy (1970), *Int. J. System Science*, Vol. 1, pp.89-97

2. 基于智能建模的智能制造技术

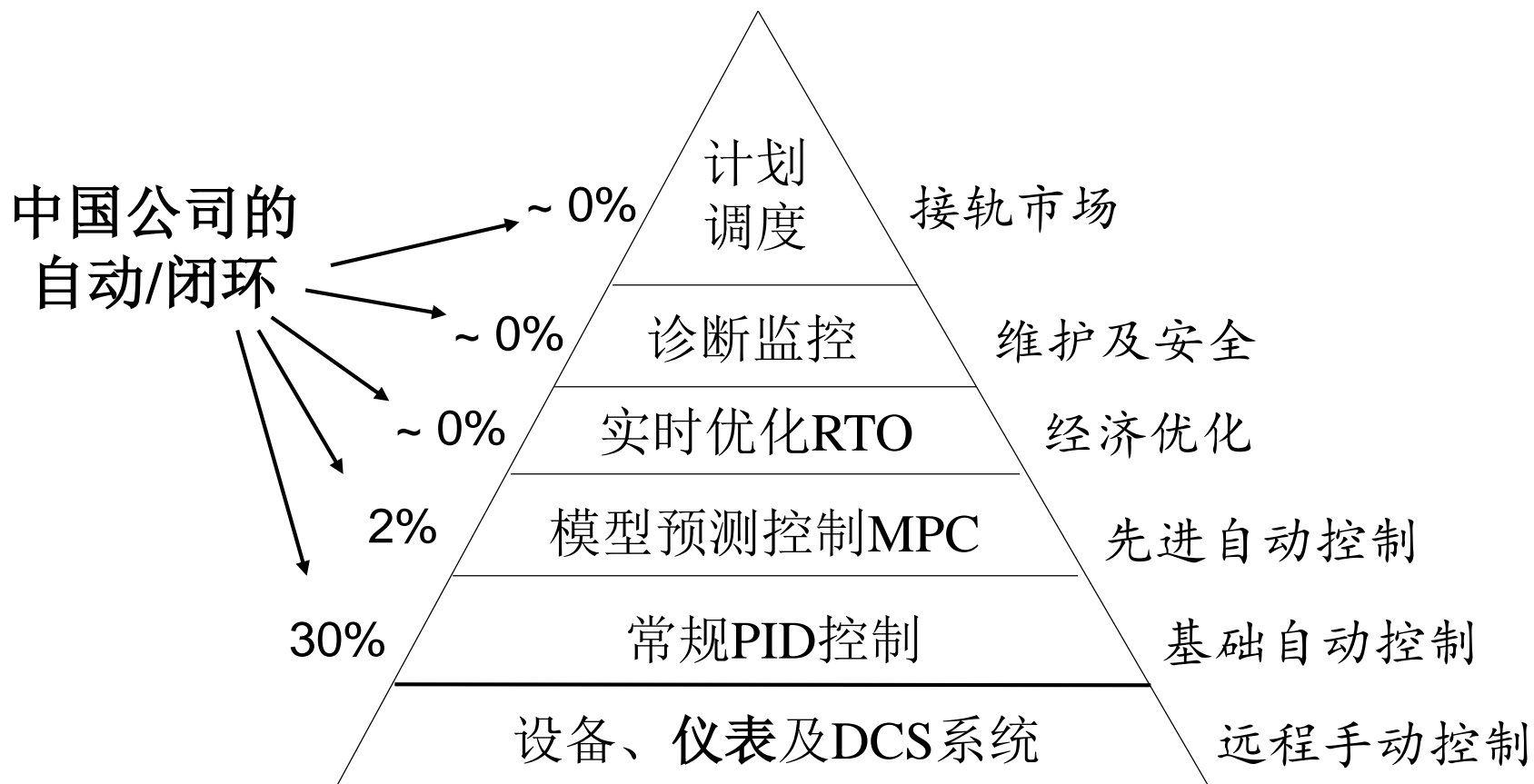
- 流程工业包括石化、化工、发电、钢铁、水泥、造纸、采矿等，是国民经济的基础，同时是经济体中耗能最大(>70%)、污染最多(>70%)的行业
- 经济新常态形势下，流程工业产能过剩，面临很大挑战，从靠产能赚钱，变为靠质量和效率赚钱，环保压力巨大
- 催生一个巨大的流程工业智能制造市场
- 在流程工业实现全面自动化生产，即智能制造，可以节能1% - 10%，提高收益0.1% - 2%，减少污染物生成5% - 50%

2. 基于智能建模的智能制造技术



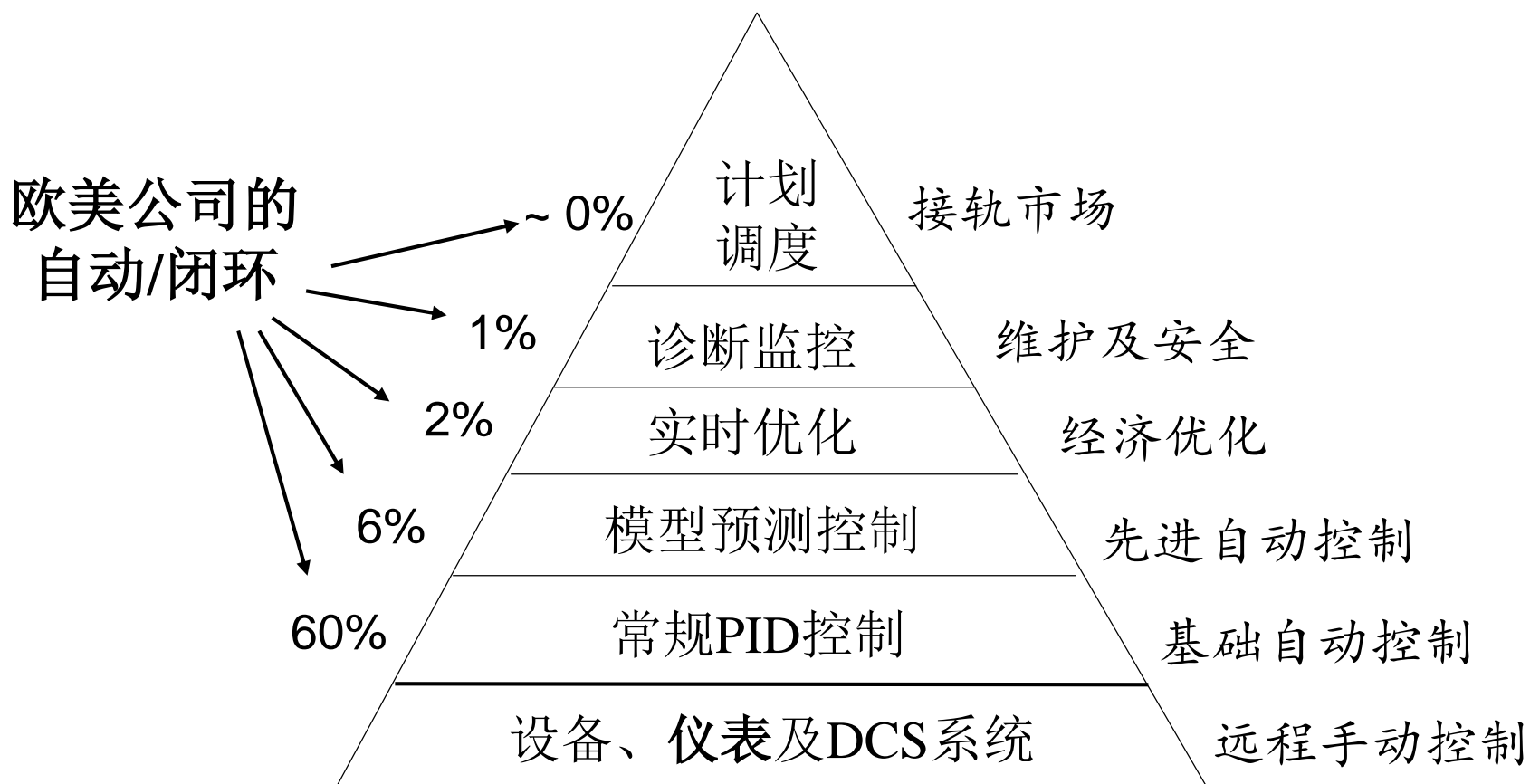
中国有2000亿市场，每年4000亿经济效益！

2. 基于智能建模的智能制造技术



动态模型的建立/维护，是实现每一层自动/闭环的关键

2. 基于智能建模的智能制造技术



困难：(1) 建模成本高；(2) 在线分析仪缺乏

2 基于智能建模的智能制造技术

关键技术 – 智能建模

科学定理：

一个系统的最优控制器一定是该系统的数学模型！

Every good regulator of a system must be a model of that system.

R. C. Conant & Ashy (1970), *Int. J. System Science*, Vol. 1, pp.89-97

模型智能

(Zhu, IFAC SYSID2006)

模型智能是一个计算机算法（软件），对于一类给定过程，可以对其自动建模、自动维护模型、并自动使用模型进行预测、控制、优化及诊断

2 基于智能建模的智能制造技术

系统辨识的渐近法

多变量、闭环、自动系统辨识（建模）技术

- 自动最优激励信号设计，多变量、闭环、自动测试
- 自动确定模型阶次
- 自动模型参数估计（计算）
- 自动模型检验，给出每个模型A, B, C, D评级

建模效率提高3-10倍！

3.1 Asymptotic Method

The asymptotic theory (Ljung 1985, Zhu 1989)

Frequency responses of the process and of the model

$$T^o(e^{i\omega}) := \text{col}[G^o(e^{i\omega}), H^o(e^{i\omega})]$$

$$\hat{T}^n(e^{i\omega}) := \text{col}[\hat{G}^n(e^{i\omega}), \hat{H}^n(e^{i\omega})]$$

Asymptotic property of high order models

- $\hat{T}^n(e^{i\omega}) \rightarrow T^o(e^{i\omega}) \text{ as } N \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty$
- $\text{cov}[\hat{T}^n(e^{i\omega})] \approx \frac{n}{N} \Phi^{-T}(\omega) \otimes \Phi_v(\omega)$

where $\Phi_v(\omega)$ is the power spectrum matrix of disturbances and $\Phi(\omega)$ is the spectrum matrix of inputs and prediction error residuals.

1) ASYM Identification Test

- Signals: GBN or very slow PRBS
- Closed-loop test with optimal test signal design (SISO)

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

- Test design only needs process settling time.
- Test time: For crude units, FCCUs or cokers with 30 to 40 MVs, test time is between 4 to 6 days.

2) ASYM parameter estimation

A) Estimate a high order ARX model

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

B) Frequency domain ML model reduction by minimizing

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

3) ASYM order selection using ASYC

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

4) ASYM model validation

Upper error bound

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

Grading the models

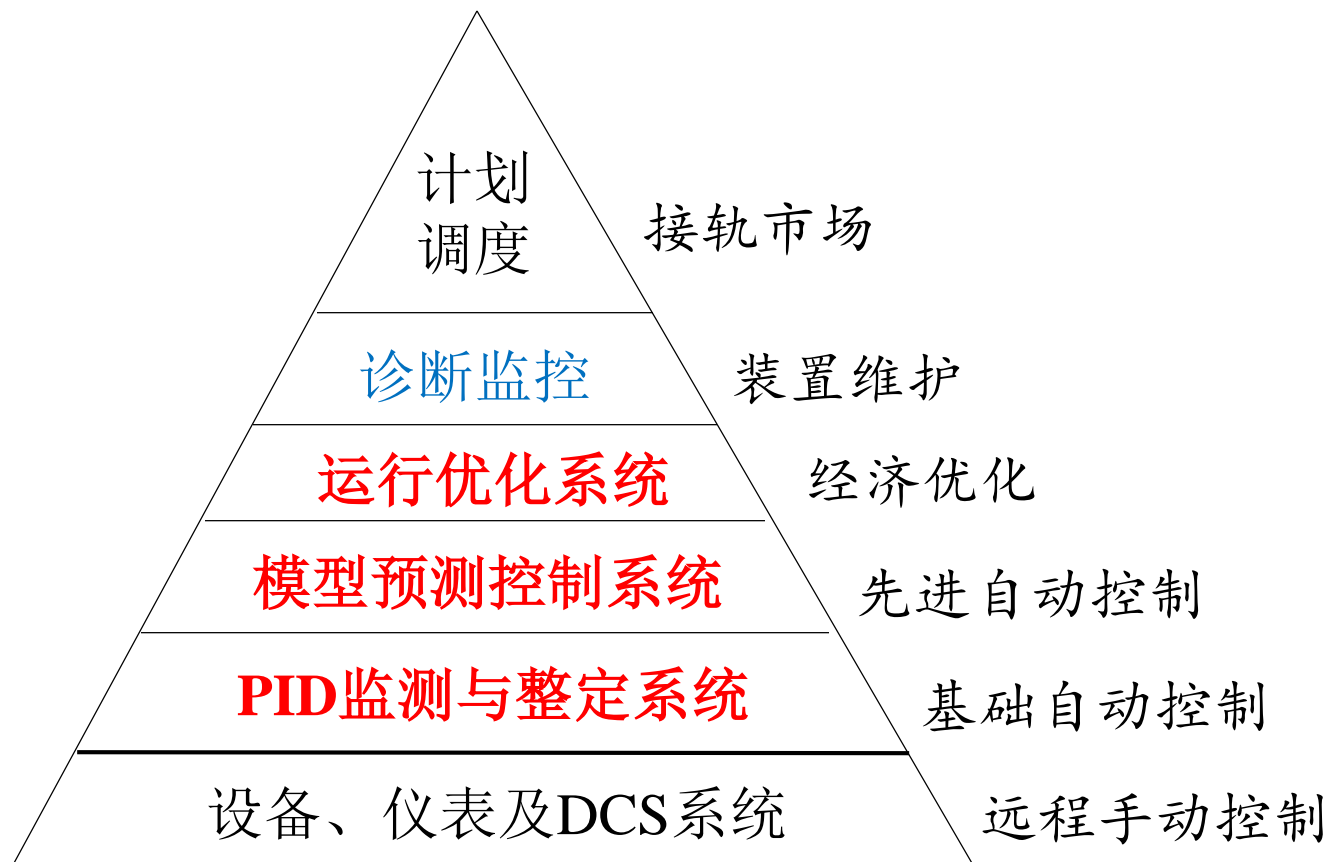
A, very good; B, good; C, marginal; D, poor or no model

Rules for test adjustment/redesign

- Doubling amplitude will halve the error
- Doubling test time will make the error 1.414 times smaller
- Doubling GBN switch time will halve the error at the low frequencies and double it in high frequencies

2 基于智能建模的智能制造技术

已开发基于智能建模关键技术



2 基于智能建模的智能制造技术

2.1 基于动态模型的PID监测与整定技术

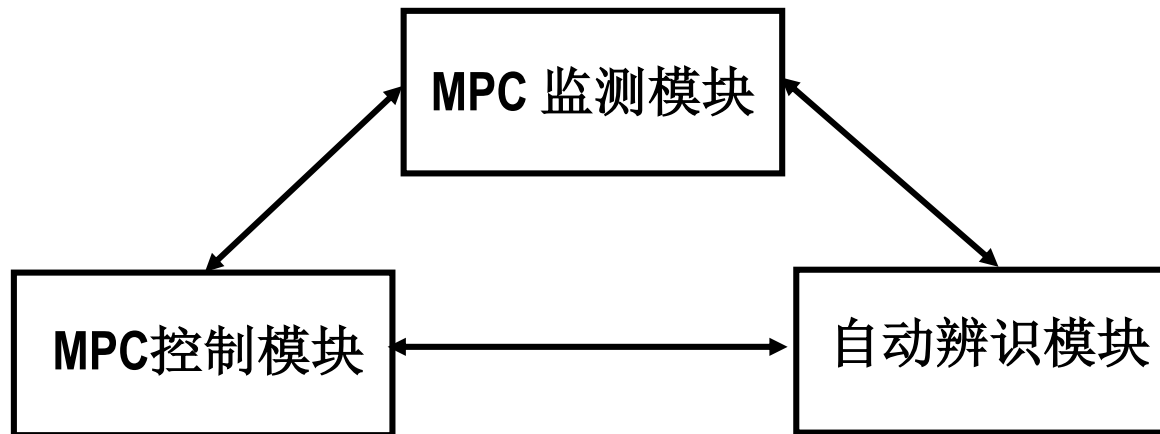


Tai-Ji PID是基于自动建模的PID整定软件，用户包括：Exxon-Mobil、Saudi Aramco、Bayer、BASF等公司，几百家工厂

2 基于智能建模的智能制造技术

2.2 模型预测控制：集成化建模、控制、优化

- MPC技术的核心技术核心是三个模块的整合。



- 辨识模块系统解决四个基本问题: (1) 实验设计, (2) 参数估计, (3) 阶次确定, (4) 模型验证
- 自动建模、多变量控制

2 基于智能建模的智能制造技术

2.3 基于系统辨识的运行优化方法

步骤0：确定目标函数，如发电机组发电量

步骤1：选择优化变量，发电机组如氧量、一次风压、煤粉细度

步骤2：使用运行数据，辨识优化变量及其他相关变量与发电负荷的动态模型

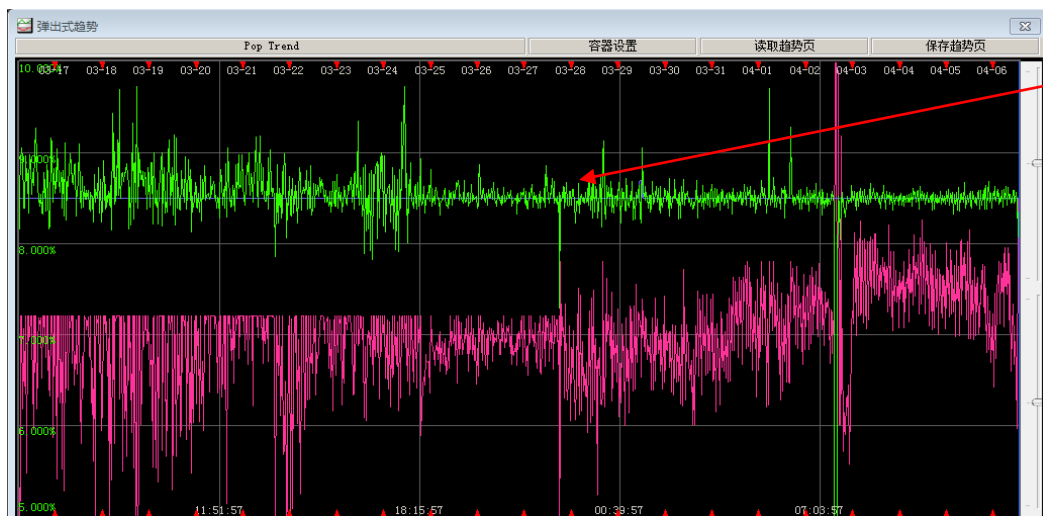
步骤3：基于梯度（模型增益），进行爬山优化法

优点：高精度、低成本，不需要机理模型，不需要特殊测试

3.1 化工厂应用PID回路整定



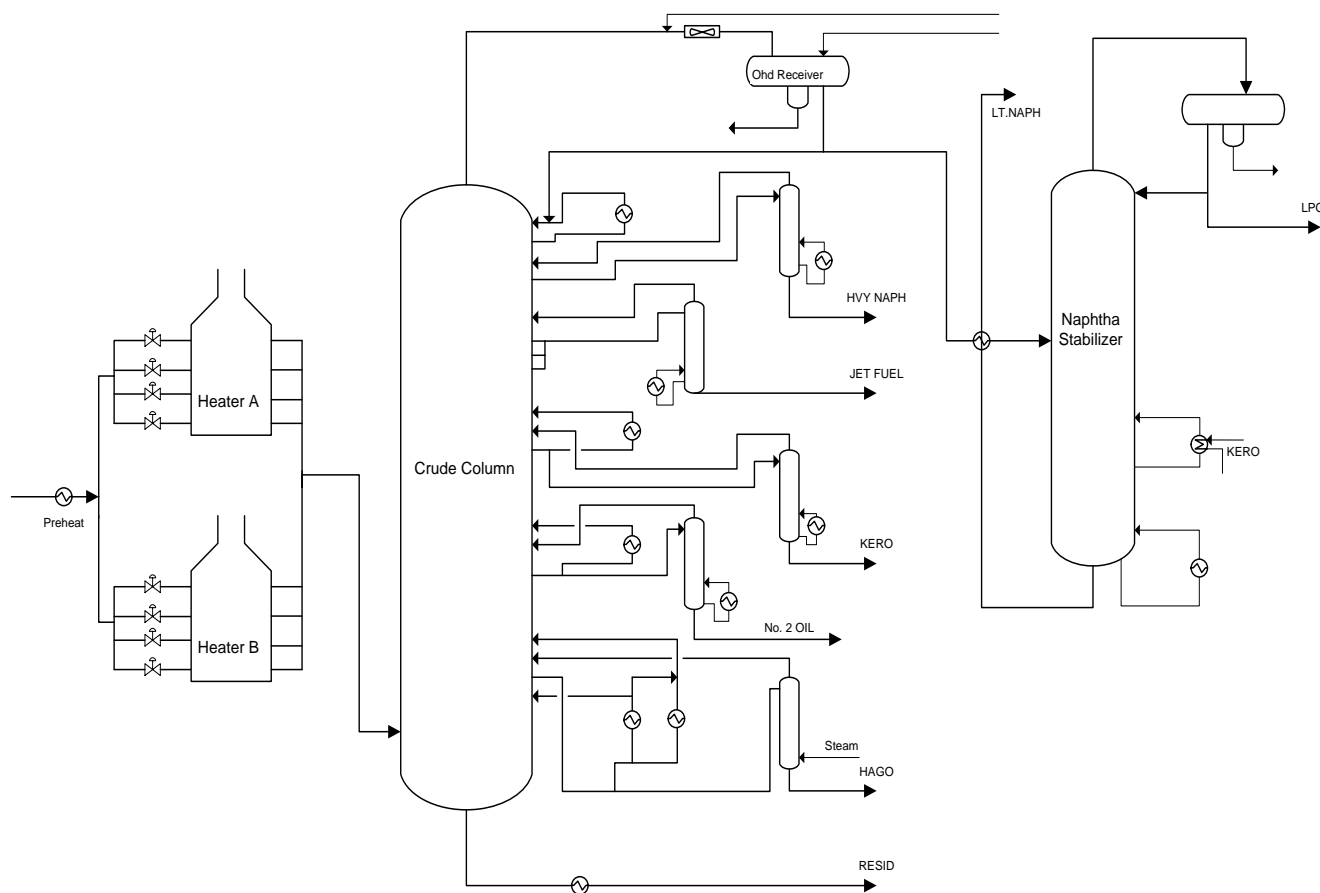
消除震荡



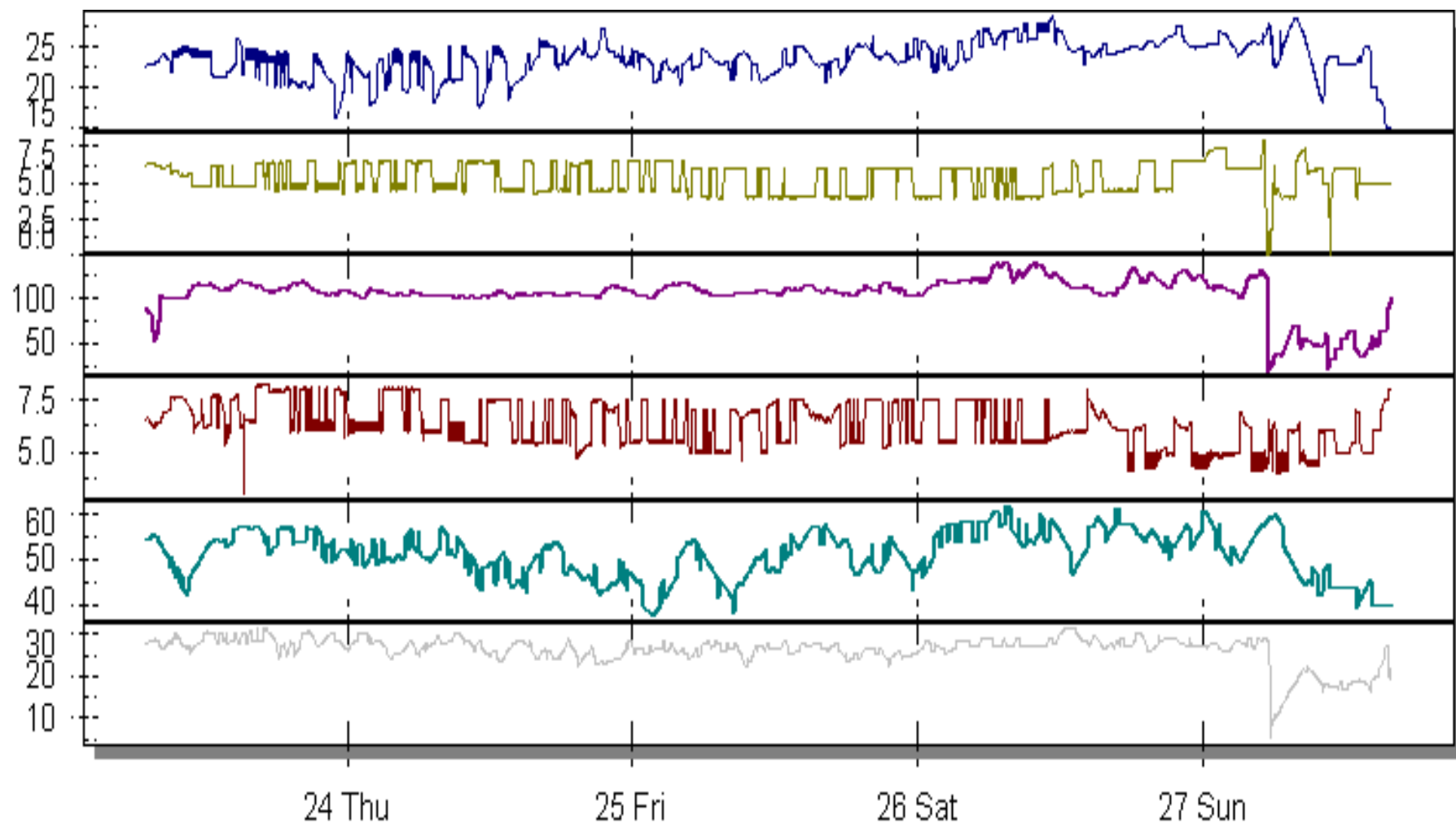
降低控制误差

3.2 炼油厂应用：常减压装置MPC控制器维护

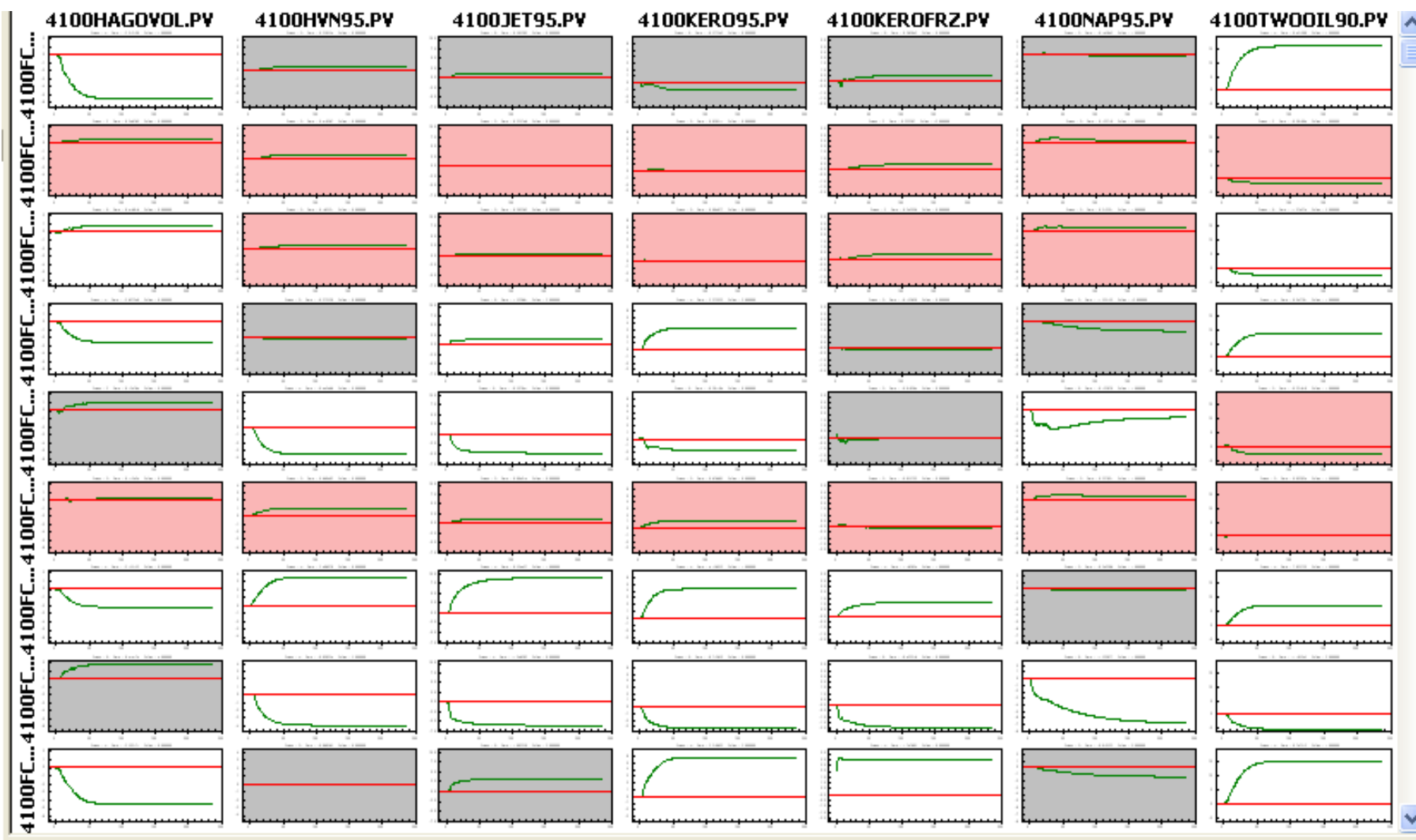
该MPC控制器有33个控制变量（MV），90个被控变量



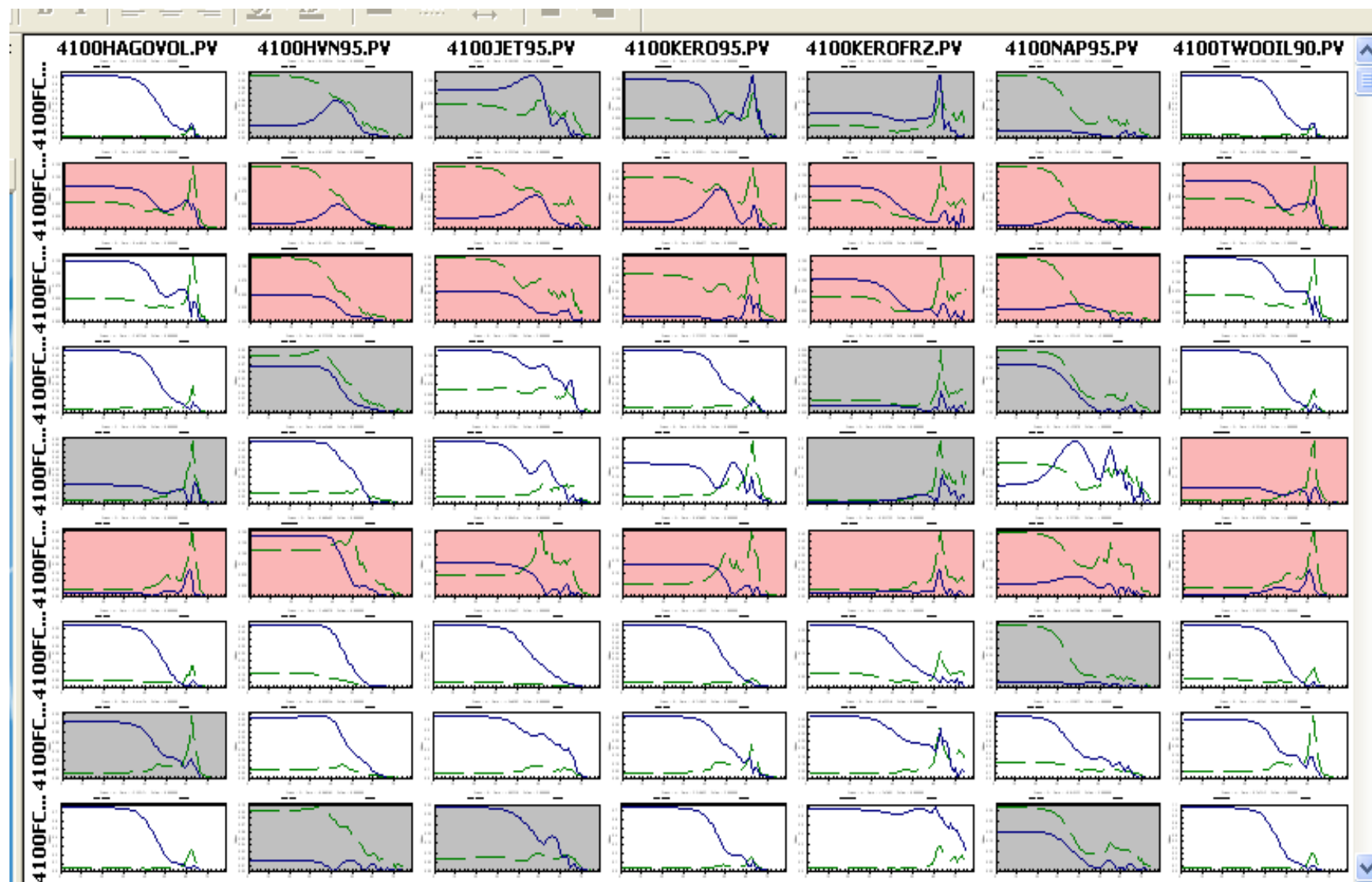
测试时间从33天减为4.5天，建模时间从30天减为1天



模型阶跃响应矩阵（部分）

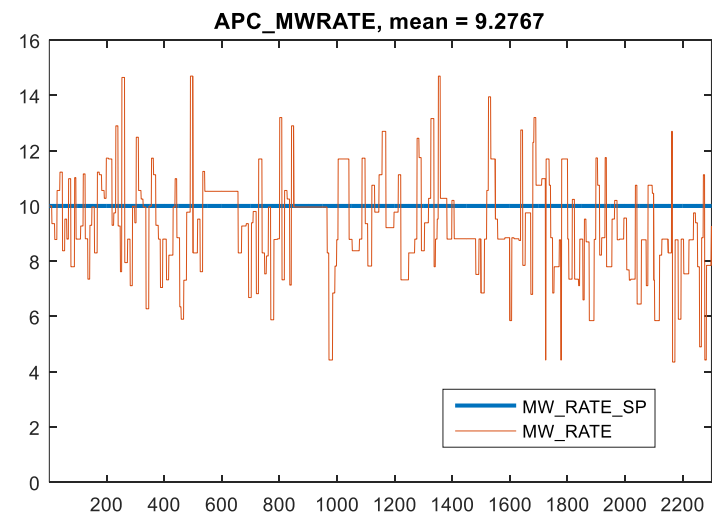
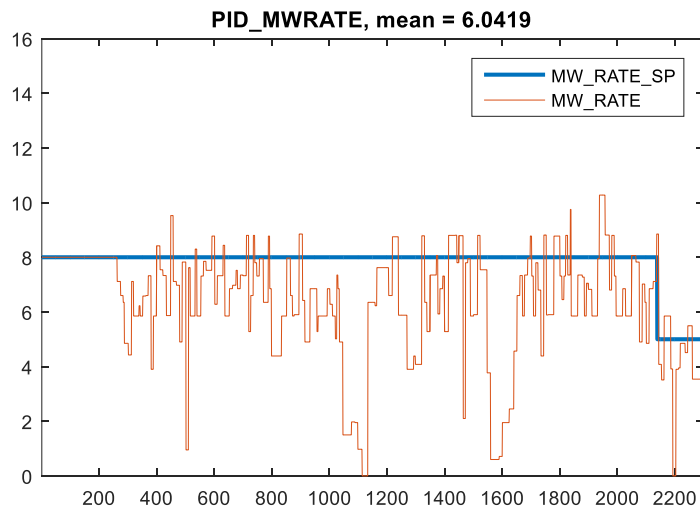
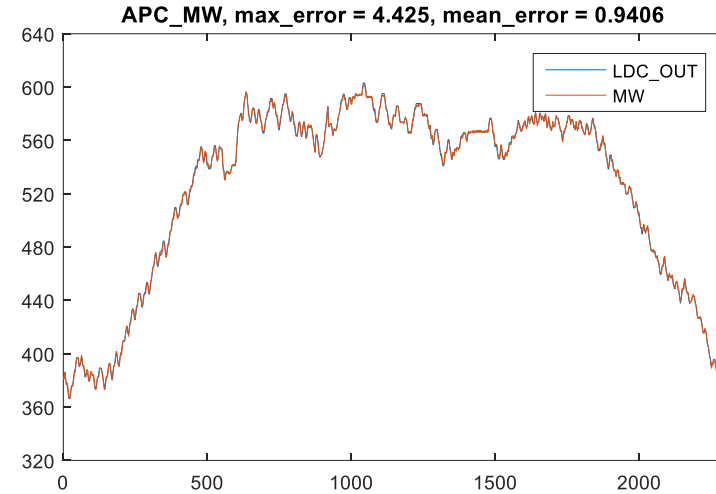
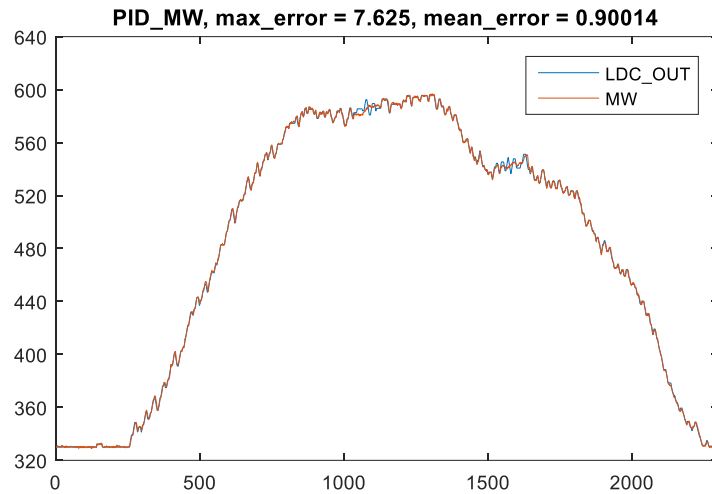


模型频率响应及其误差上界矩阵（部分）



3.3 电厂应用2：内蒙古某电厂两台660MW机组预测控制

#1机组AGC协调控制负荷跟踪对比 (6.5小时 加减负荷)



1号机组AGC负荷跟踪对比

常规投运情况		APC投运情况	
变负荷区间	330 MW --- 596 MW	变负荷区间	366 MW --- 603 MW
变负荷速率	设定 8 MW/min; 实际 6.04 MW/min	变负荷速率	设定 10 MW/min; 实际 9.27 MW/min (升53%)
最大负荷偏差	7.63 MW	最大负荷偏差	4.43 MW
平均负荷偏差	0.90 MW	平均负荷偏差	0.94 MW

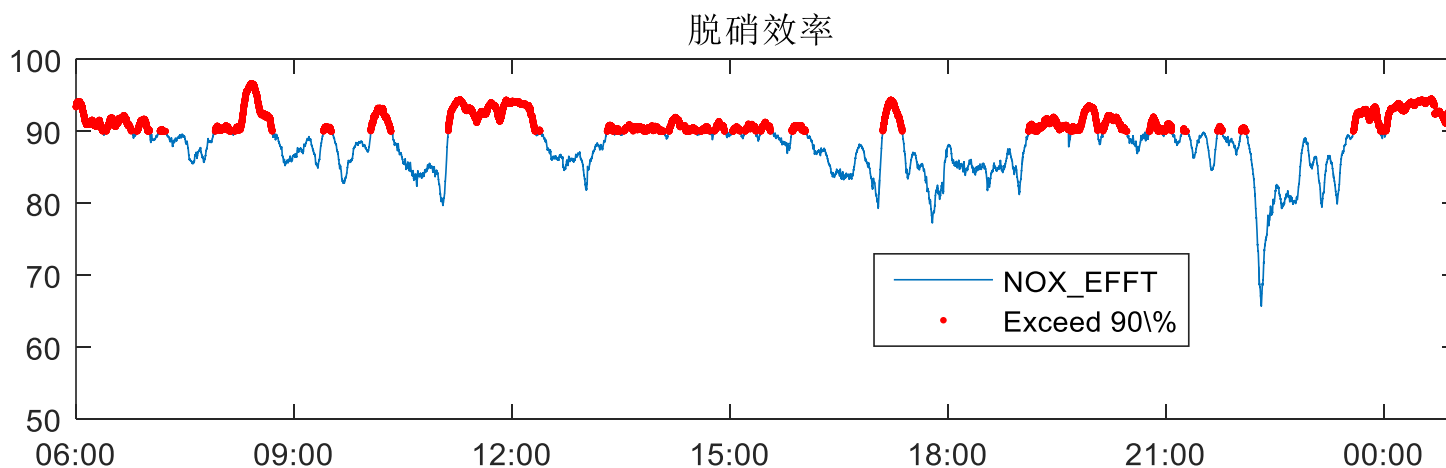
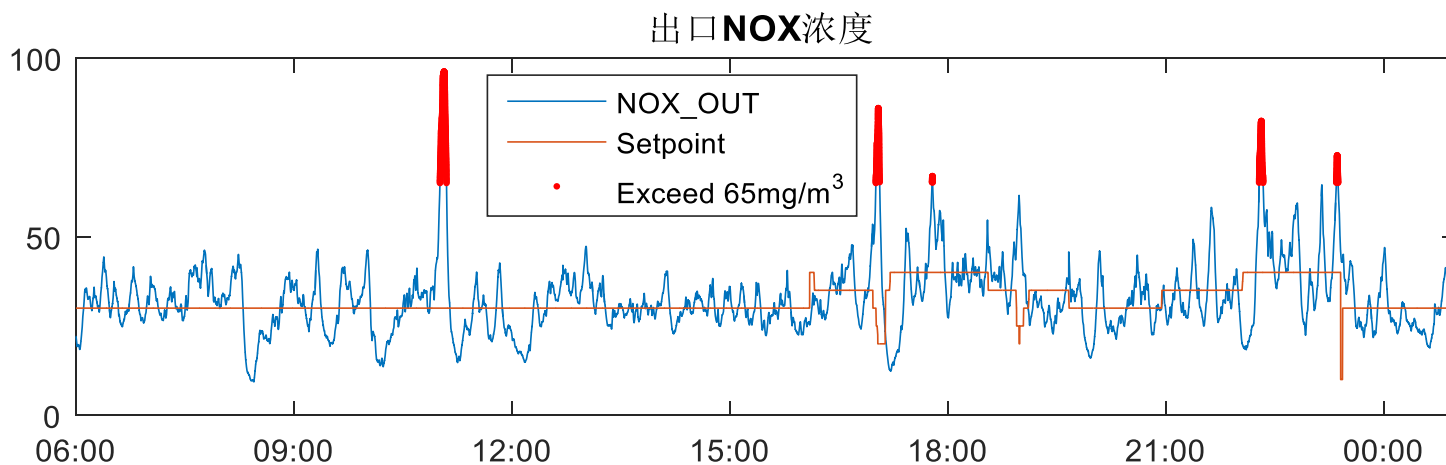
2号机组AGC负荷跟踪对比

常规投运情况		APC投运情况	
变负荷速率	设定 12 MW/min; 实际 9.81 MW/min	变负荷速率	设定 12 MW/min; 实际 11.37 MW/min (升16%)
最大负荷偏差	21.1 MW	最大负荷偏差	3.7 MW (降 82.5%)
平均负荷偏差	1.82 MW	平均负荷偏差	0.98 MW (降 46.2%)

投运后，该厂在内蒙电网并网净收入排名从2月的第23名上升为12个月平均排名第二，一年创造4000万元经济效益

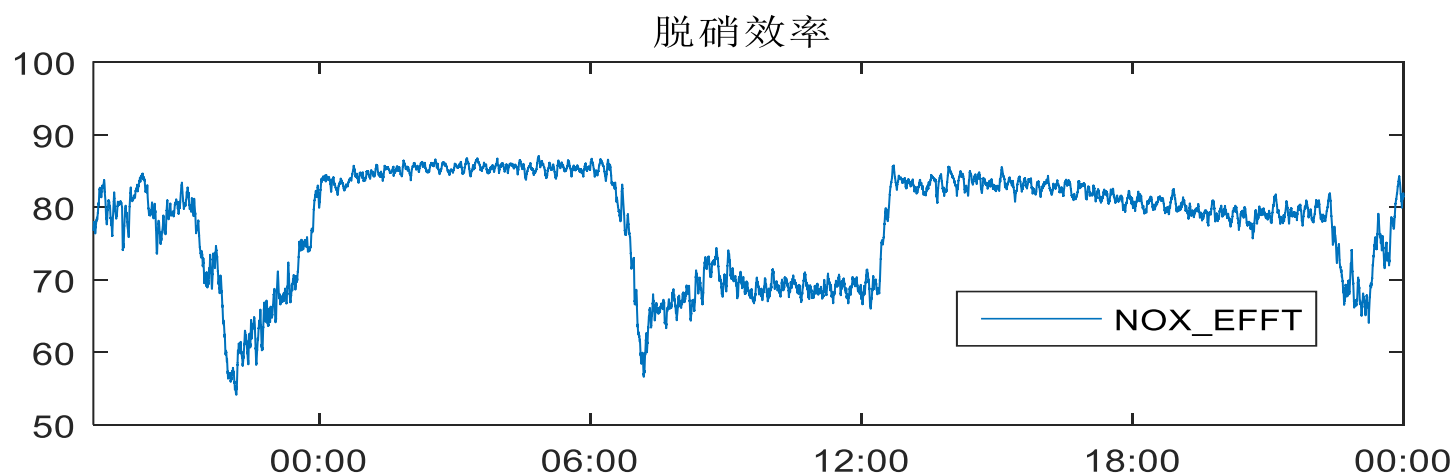
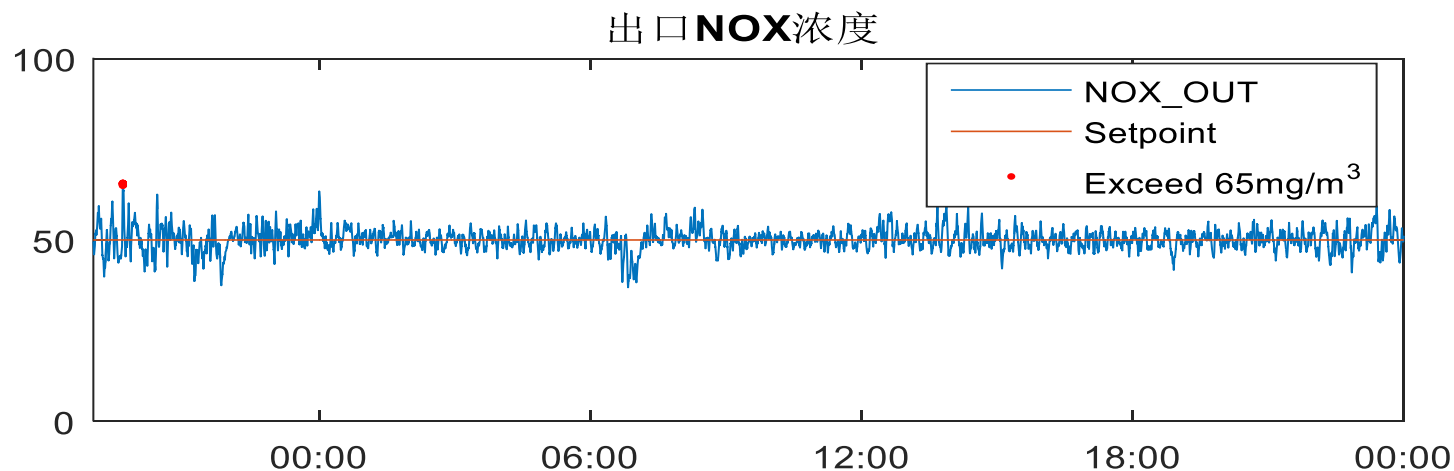
3.3 电厂应用3： 国华舟山电厂300MW亚临界机组SCR控制

比较：PID 控制，19 小时，负荷范围 153 ~ 236 MW

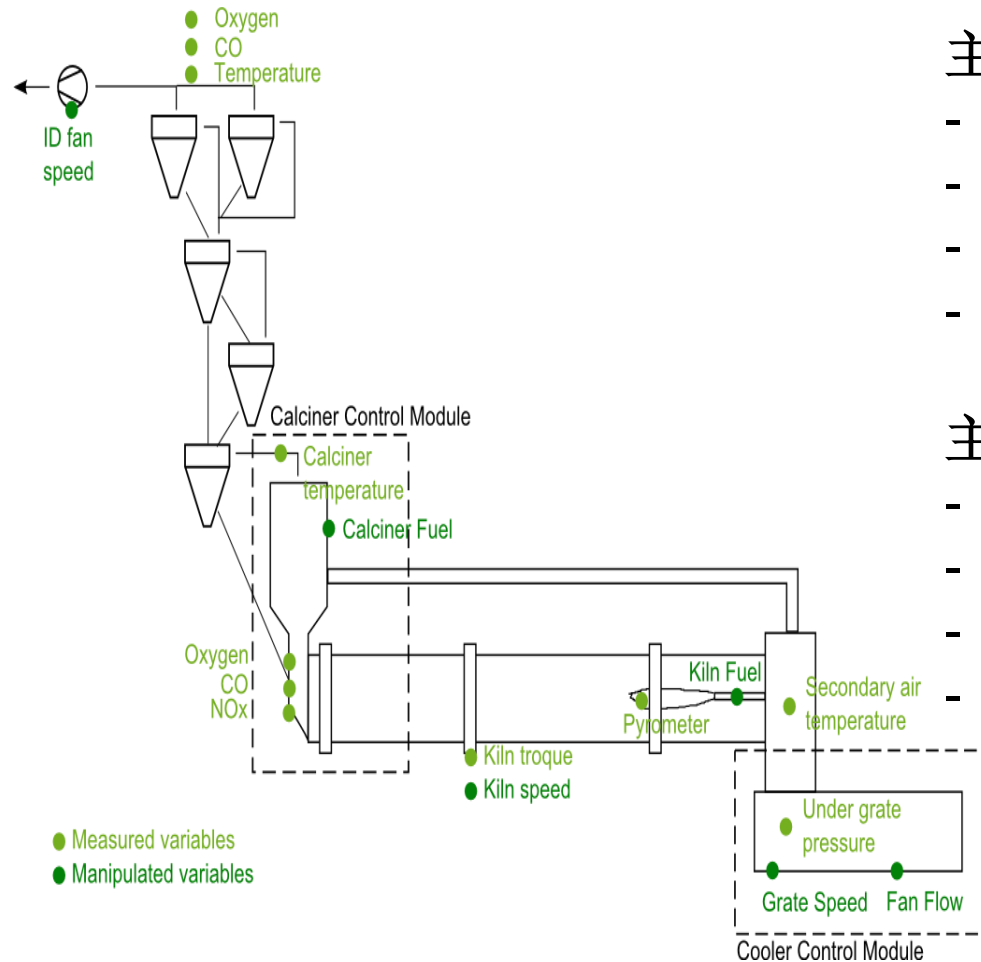


3.3 电厂应用3： 浙江某电厂300MW亚临界机组SCR控制

比较：MPC控制，29小时，负荷范围152~225 MW



3.4 水泥工业：山东泉兴水泥厂#3窑线预测控制, 已运行2年



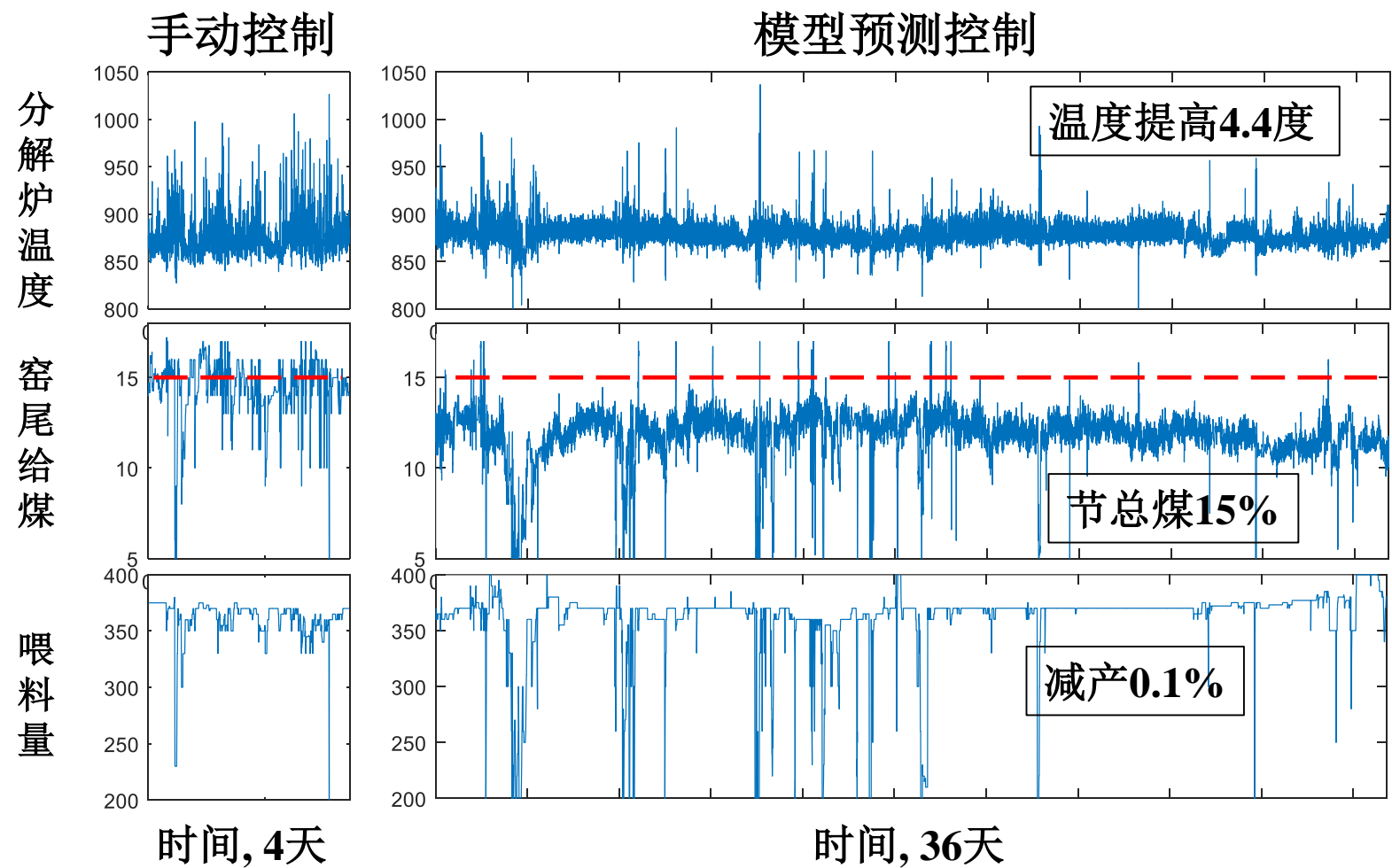
主要被控变量 (CV)

- 分解炉温度
- 窑头负压
- 篦冷机一段压力
- 磨煤机出口温度

主要控制（操纵）变量 (MV)

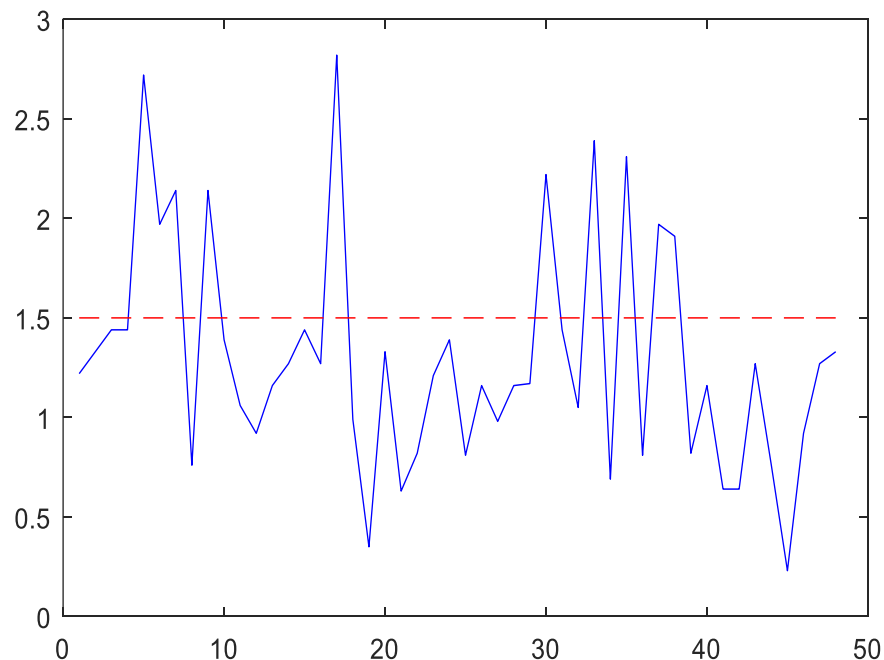
- 窑尾给煤量
- 窑头排风机频率
- 风机一段转速
- 小高温风机频率

3.3 山东泉兴水泥厂#3窑线预测控制，分解炉温度比较



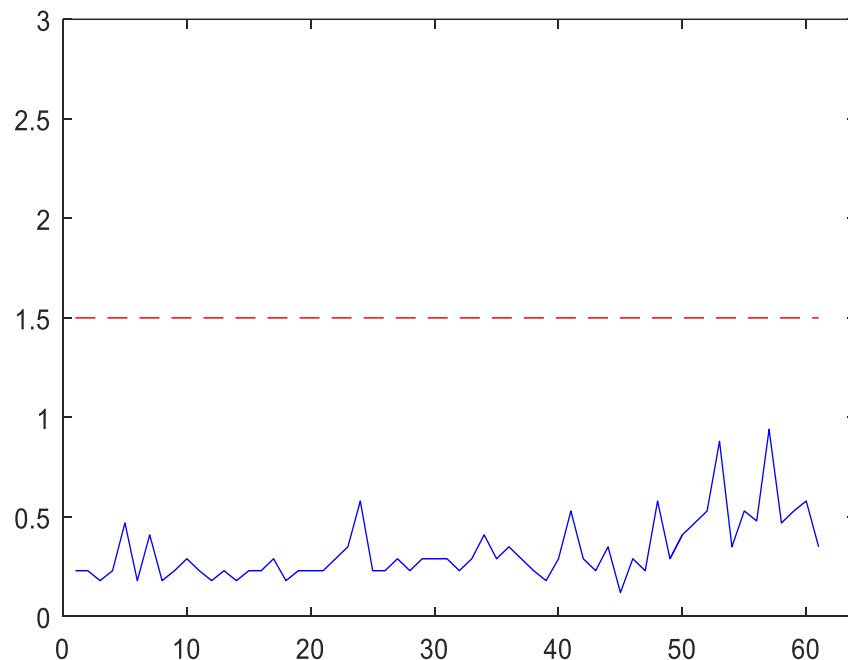
3.3 山东泉兴水泥#3窑线预测控制，f-CaO最新数据

#1线手动，f-CaO合格率 79%



时间（4天）

#3线自动，f-CaO合格率 100%



时间（5天）

5. 结论和展望

- 基于30年研发应用经历，提出**智能制造/工业4.0**的具体阐述
- **动态模型**是智能制造的关键，**模型才是智能**
- 团队经过30年研发，流程工业系统的智能建模、控制及优化技术已成熟，包括: (1) 基础控制层; (2) 先进控制层; (3) 经济优化层
- 可在各流程工业普及应用，节能减排、提高收益
- 未来技术开发:
 - 第2层，实现自适应预测控制
 - 第4层，基于智能建模的故障诊断与预测性维护技术

模型最性感!



模型 → 模特

模型辨识 → 模特辨识

模型预测控制 → 模特预测控制

