

基于工业互联网的热电智能调控技术

引言：热能作为化工、生物、医药、造纸、食品加工、纺织等工业生产过程中必备的基础能源之一，是与电能地位相当的工业基础能源。但热能由于无法远距离传输，所以热能的供给和消费都是区域化的。在有规模化热能需求产业存在的工业园区，基本上都需要有一个热源厂，而为了热能的高效梯次利用，国内目前的热源都以热电联产为主。热电厂作为区域能源唯一可大幅调控的能源主体，为了更好地实现新能源的利用，以及在动态电价政策下实现区域能源综合用能成本最低，热电厂的实时动态调控成为关键。

一、项目概况

1. 项目背景

我国的热电联产机组普遍应用了 DCS 来监控和运行生产系统，由于热电联产机组“非线性、强耦合、大延迟、多时变”的特性，目前基本上所有的热电联产机组均无法实现全厂常态化自动控制运行，而是采用人工调控运行的模式，DCS 仅作为集中控制的手段实现数据和控制的集中。

以 DCS 为代表的第三次工业革命产生的控制技术已经成熟了几十年，在煤电行业的应用也超过了 30 年，但母管制的热电联产小机组仍然以人工运行为主，自动范围覆盖和自动投用率均非常低。运行效果严重依赖运行人员的经验、责任心、精力等，运行人员招聘、培养、管理负担重；而且人工运行几乎无法实现长时间及时、准确地调控，这也会导致系统能效、环保控制、辅料消耗、蒸汽品质

等均存在较大提升空间。

2. 项目简介

本案例是一套面向热电生产企业进行智能化升级改造和智能化运行的完整产品和服务体系，重点面向热电机组的智能调控技术，实现热电机组全厂级的自动化运行。

3. 企业简介

全应科技于 2016 年成立，8 年以来专注于把高新技术应用于热电生产工艺优化，取得了显著的成效，于 2019 年获得高新技术企业认证。2020 年全应科技入选了上海市长宁区硕博基地单位、2022 年全应科技获得“专精特新”中小企业认定、2023 年全应入选上海市软件和信息技术服务业高成长百家企业。

二、项目实施概况

1. 总体方案

1. 智能调控体系

要实现电厂的常态化自动运行，仅依赖 DCS 是远远不够的。如下图所示为电厂的运行数字化体系：



DCS 在整个运行体系中的定位是最底层的生产系统，是生产运行的底座。它实现生产系统的数据集中和控制指令集中；实现在时效性和安全性要求较高的

单回路控制；实现基本的安全联锁保护等。所以，DCS 强调可靠性、健壮性、实时性，而反对复杂性、可能的延迟等。所以如前所述，DCS 不适合做复杂的计算。

所以在许多 DCS 不适合的控制场景，如多参数耦合控制、大延迟控制、自适应控制等场景下，就需要应用 APC 控制技术。

无论是 DCS 的控制还是 APC 的控制，有很多目标需要根据实时运行情况进行动态决定，RTO 就是基于历史运行数据，应用寻优算法对目标值进行计算和下发。

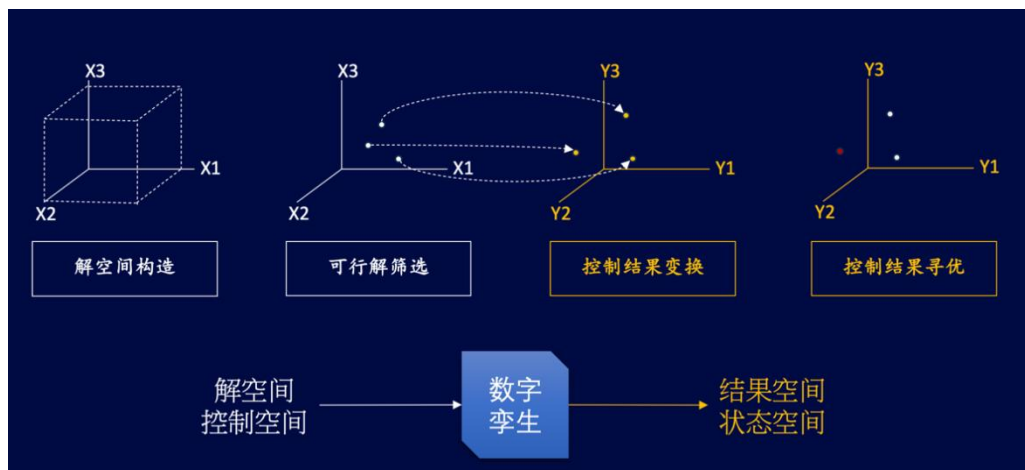
无论是控制层的 APC 和 DCS 以及优化层的 RTO 均解决的是局部问题，而无法考虑全局问题，RTS 用于解决系统性问题，通过在顶层进行全局统筹和优化决策对各子系统进行协调。

智能调控技术是在 DCS 之上，将 APC、RTO、RTS 融合在一起，弥补 DCS 的不足，从而实现热电机组的自动化运行。智能调控技术将调度、寻优、控制进行融合，调度解决宏观协调问题，以全局最优为出发点；寻优解决局部参数优化问题，实现实时工艺参数优化；控制解决自动执行问题，实现指令更精准更安全地执行。智能调控强调三方面的一体化决策，综合考虑、统一决策、全局最优、高效执行。

2. 智能决策算法

智能调控技术的核心是将 RTS、RTO 和 APC 三个层次的调度、优化和控制问题，模拟人工运行人员的思维过程，当作决策问题进行解决。智能决策算法是整个智能调控系统的核心。智能决策算法有通用的公共基础算法、也有面向特定工艺环节的场景决策算法。

智能决策算法的主体思想如下图所示：



智能决策算法将一个控制决策分为四个步骤：

解空间构造：面对一个控制问题，所有可能的决策结果构成一个解空间；每个控制量构成解空间的一个维度；每个控制量单次最大调节量构成该维度的上下限；每个控制量的单次最小调节量构成该维度的一个刻度；

可行解筛选：设备不可调区间所对应的解剔除掉，明显不符合逻辑的解剔除掉，与当前状态不匹配的解剔除掉，剩余所有的解称为可行解；

控制结果变换：针对每一个可行解，通过数字孪生模型预测，计算出按照这一组操作所产生的未来系统状态；结果可能包括压力、氧量、NO_x 等控制指标，也可能包括效率、热损失等经济性指标；

控制结果寻优：设计评价函数对所有结果进行对比，选出最优结果（Y）；再通过最优结果找到对应的可行解（X），确定最佳操作；评价函数可以按照影响程度进行设计，例如安全>环保>保供>能效；如果所有结果均不佳，则产生预警；

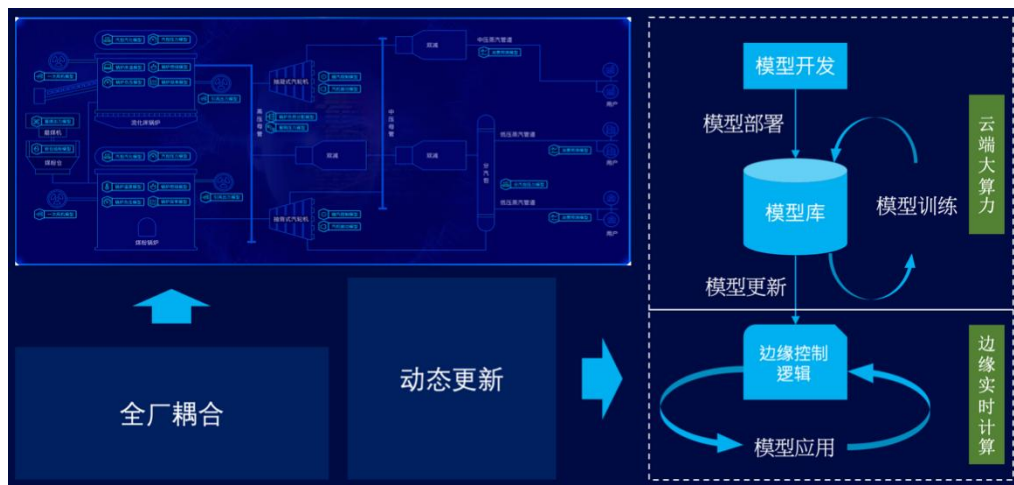
3. 数字孪生模型

此处用“数字孪生模型”重点是体现“在数字空间对物理世界进行模拟和预测”的概念，而非特指数字孪生仿真技术。热电生产系统由于其测量数据的精确度和稳定性不足，无法基于常规仿真建模技术进行系统仿真。此处“数字孪生模型”的本质是一整套相互关联面向全厂调度和控制的预测模型体系；这些模型是以机理和专家知识为框架，基于生产数据训练的一系列数据统计和机器学习模型。

在每个智能决策过程中非常重要的一个环节就是从解空间到状态空间的变换，这个变换的本质是对每一组运行控制指令利用各级数据模型对未来运行结果

进行预测，获得未来整个电厂的状态空间，作为寻优算法的评价基础。另外，热电厂由于其数据质量总体不高，这些预测模型需要在控制的精准性和鲁棒性之间取得平衡。

数字孪生模型的有效性是智能决策技术实现控制效果的关键。



数字孪生模型必须具备两个特性：

全厂耦合：对于强耦合的热电机组而言，任何一个设备的工作可能都会影响到全局的其它指标，所以数字孪生模型需要全厂耦合，能够将任何一个动作或一组动作的执行结果都能够反映到全厂的其它指标。

动态更新：为匹配热电机组的多时变特性，数字孪生模型需要能够动态实时更新，以及及时反映实体电厂的特性变化，从而适应最新的电厂运行情况。

4. 智能感知技术

对系统状态的准确感知是控制的基础，热电机组的生数据质量普遍不高。主要存在的问题有：

没有在线检测：燃煤热值、成分、量等由于缺乏在线检测手段或未安装相应检测设备而无法在线检测；

在线测量不准确：风量、蒸汽流量等由于流体不稳定容易测不准；

检测设备有盲区：流量计、称重等测量设备特性存在测量死区导致某些区间反馈量错误或偏差较大；

检测仪表易漂移：氧量、温度等传感器随着使用容易出现漂移；

智能感知技术是利用大数据和机器学习技术，基于热电系统机理，对数据进行软测量以提高数据感知的全面性和精度，主要的方法有：

统计平均法：对于瞬时波动不大的指标（如热值），利用一段时间的平均值来拟合顺时值；

机理建模法：建立设备/系统特性模型，用准确值（含离线值）训练模型，再进行预测；

系统测算法：基于系统不同指标之间的关联关系，利用相关指标进行测算；

相对偏移法：使用相对变化量，而非绝对量；相对变化量会极大缩小误差；

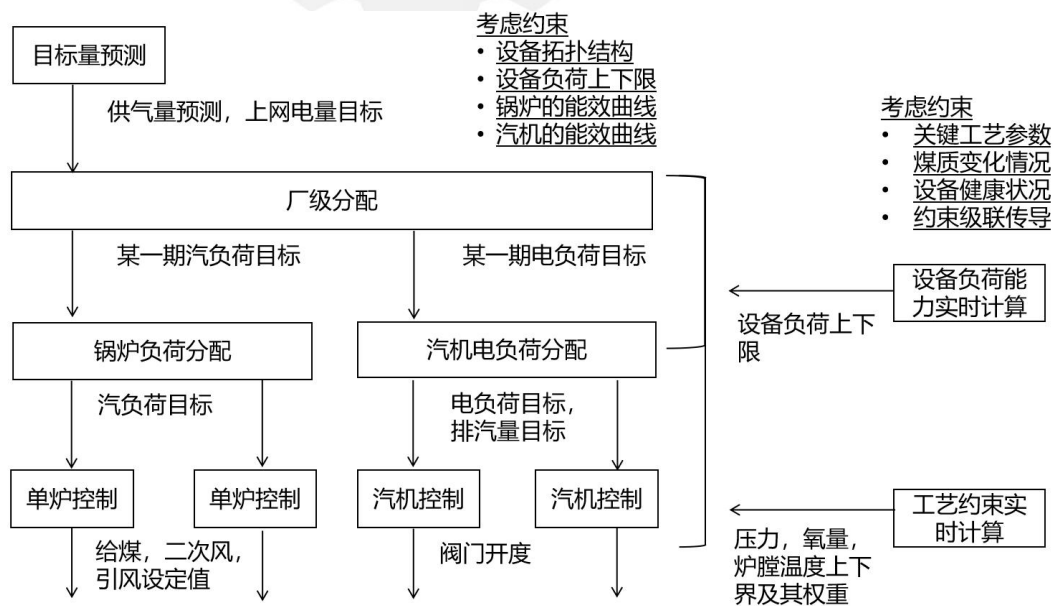
以上方法根据不同的应用场景进行综合使用。

2. 核心技术

1. 智能调控算法

1) 厂级调度算法

厂级调度算法解决不同工艺组合、不同热电负荷特性下的全厂调度决策。厂级调度算法是热电全厂自动运行的关键，也是现有其它自动控制技术无法解决的控制场景。厂级调度算法方案的总体框架设计如下图所示：



该算法框架解决整厂级别的综合决策，该决策的底层是一个基于约束的综合寻优问题，该寻优问题的关键要素如下：

约束：锅炉、汽机、发电机、除氧器、脱硫脱硝等子系统当下的负荷能力，这些负荷能力基于当前的子系统状态实时计算；

解空间：锅炉、汽机的目标负荷；

预测：未来主汽母管、供汽母管的压力水平；

优化评价函数：压力、环保排放、能效的综合最优；在安全、供需平衡、环保、能效的多因素中进行平衡；

该算法最终输出每台锅炉、汽机的目标汽电负荷，并结合滚动优化，给每台锅炉、汽机分配实时目标负荷。

2) 子系统协调控制算法

锅炉、汽机、除氧器、脱硝、脱硫等属于相对独立又相互耦合的子系统。在厂级调度分配好负荷后：

锅炉：根据目标产汽量需求，结合自身排烟氧量、床温、主蒸汽温度、料层等状态指标，利用锅炉相关预测模型进行决策，对一次风、二次风、给煤机频率、引风机、减温水阀、冷渣机的开度指令进行计算；

汽机：根据目标排汽量、抽汽量、发电量等需求，结合自身进汽压力、排汽压力、抽汽压力、发电机轴温、汽机震动等状态指标，对进汽阀、抽汽阀开度进行计算；

除氧器：根据当前给水温度、给水量和蒸汽温度等指标，结合自身除氧器压力和液位等指标，对每个进水阀和进汽阀开度进行计算；

脱硝：根据当前 NO_x 排放的指标，结合锅炉燃烧情况和自身氨水流量等指标，利用脱硝相关预测模型，对喷氨调整量进行计算；

脱硫：根据当前 SO₂ 排放的指标，结合当前循环泵的开度、反应塔的温度等指标，对循环泵开度调整量进行计算。

3) 设备级控制算法

电厂常规的控制量设备有：给煤机变频、风机变频、冷渣机变频、汽机调阀、减温水阀、减压器调阀、二次小风门等设备。厂级分配和子系统协调控制算法输出的指令许多不能直接将计算结果写入对应的执行机构，而是需要经过一些变换或逻辑处理，常见的问题有：

给煤机变频：通常上级控制算法不会直接计算到给煤机变频，而是计算出目标给煤量，给煤机控制算法需要实时将目标给煤量变换为各个给煤机的频率；给煤机控制算法需要解决给煤机分配的问题（通过调整不同给煤机的给煤分配来调整锅炉偏烧的问题）、某个给煤机断煤堵煤的问题等。

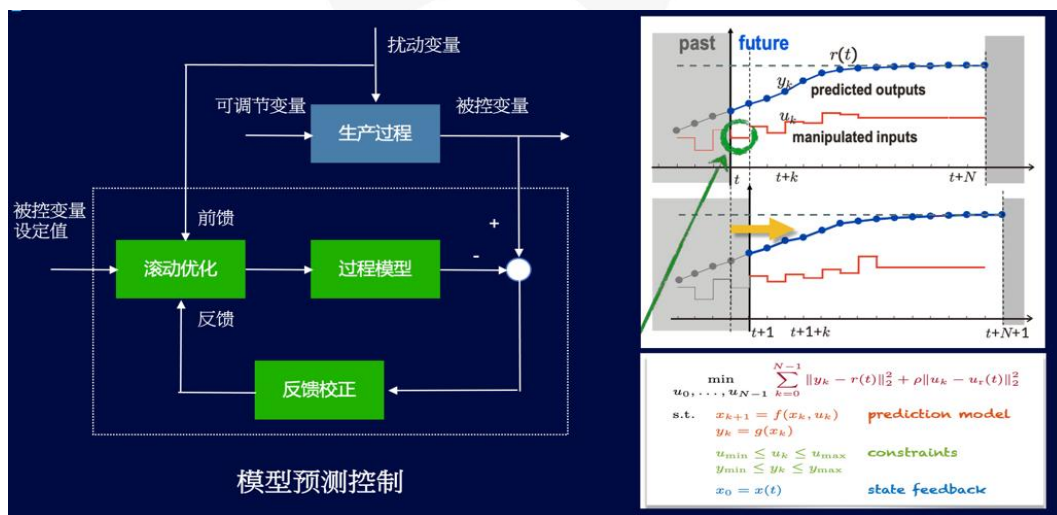
减压器、减温水调阀：这类调阀容易出现调节线性不好或者在某个区间内出

现卡顿的现象，调阀控制算法利用调阀的数字孪生模型计算出最佳的调阀下发指令以响应目标变化量。

二次小风门：锅炉的二次小风门有数十个，锅炉的调控指令不会计算到每一个风门的开度，而是通过一些层操来实现不同层风门的整体调整，以实现调整燃烧形态的目的；二次小风门控制算法就是将锅炉控制算法输出的指令计算获得每个二次小风门的具体开度。

4) 模型预测控制算法

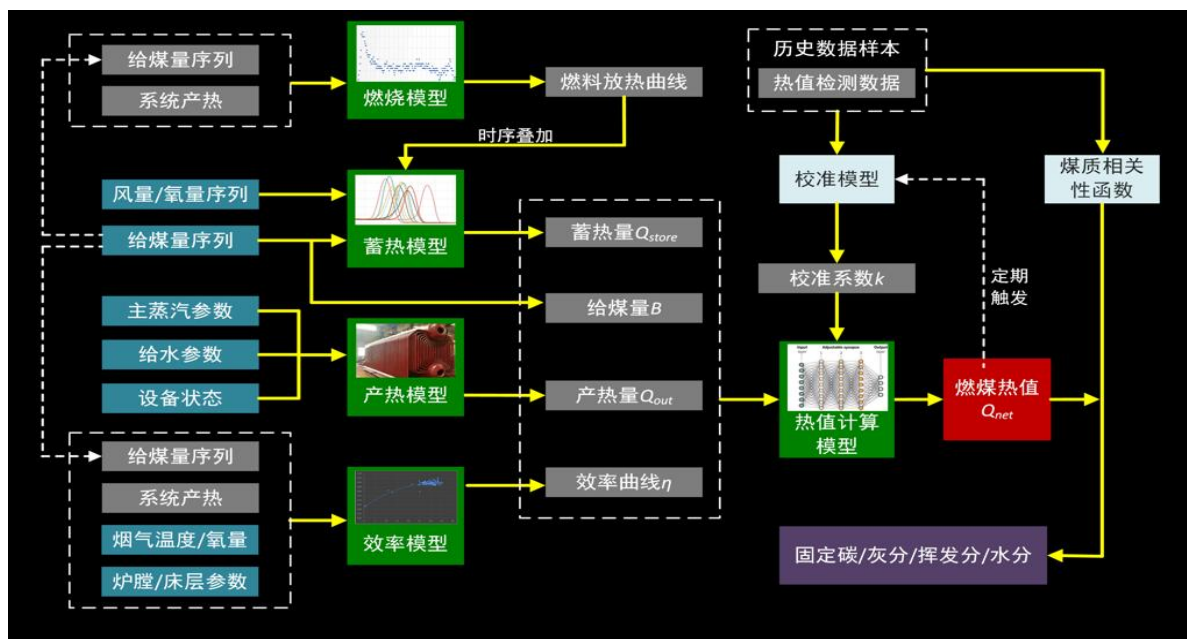
除了以上特有场景的控制算法外，系统还需要支持通用的预测控制算法以解决以上专有控制算法没有覆盖的场景。模型预测控制算法的原理图如下图所示：



2. 智能感知算法

1) 煤质软测量算法

燃煤作为热电厂最主要的原料，是影响热电厂控制的关键。燃煤作为天然矿物其成份是不均匀的，而且大多数热电厂都需要将多种来源的燃煤进行掺配使用，所以实时入炉的燃煤品质是波动的。目前还没有有效的技术对燃煤成份进行在线实时检测，所以燃煤成份都是通过抽样离线化验获得的。当煤质发生较大变化时，缺乏煤质的及时感知会导致控制不稳定的问题。如下是一套煤质软测量的原理图：



其主体思路如下：

- ✓ 以准实时锅炉吨煤产热为基础；
- ✓ 利用锅炉效率模型屏蔽锅炉效率的影响；
- ✓ 利用锅炉放热模型屏蔽锅炉延迟的影响；
- ✓ 利用锅炉蓄热模型屏蔽锅炉蓄热量的影响；
- ✓ 再通过离线化验数据对在线模型进行校准；
- ✓ 通过一系列计算获得实时燃煤热值曲线；

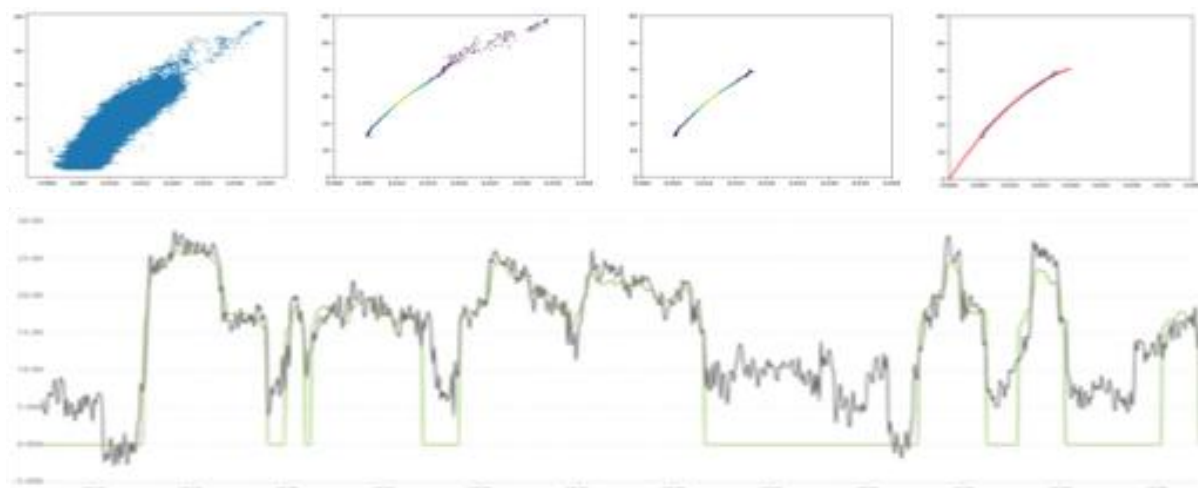
2) 流量软测量算法

蒸汽和水的流量在热电控制中也非常重要，但许多流量计在流量低于一定量后容易进入流量计的检测死区，出现测量值归零的现象，如下图所示，当流量低于 15 吨时测量值直接归零：



根据流体力学的伯努利方程，流量可以通过压差进行建模，所以可以利用死区外的流量数据对软测量模型进行训练，再泛化到死区内，即可获得较为准确的

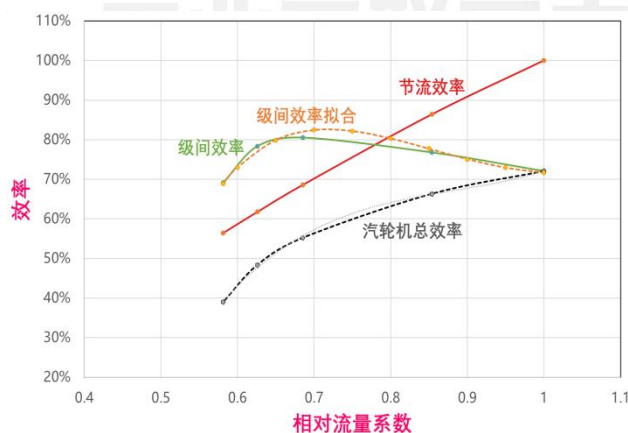
流量数据，如下图所示：



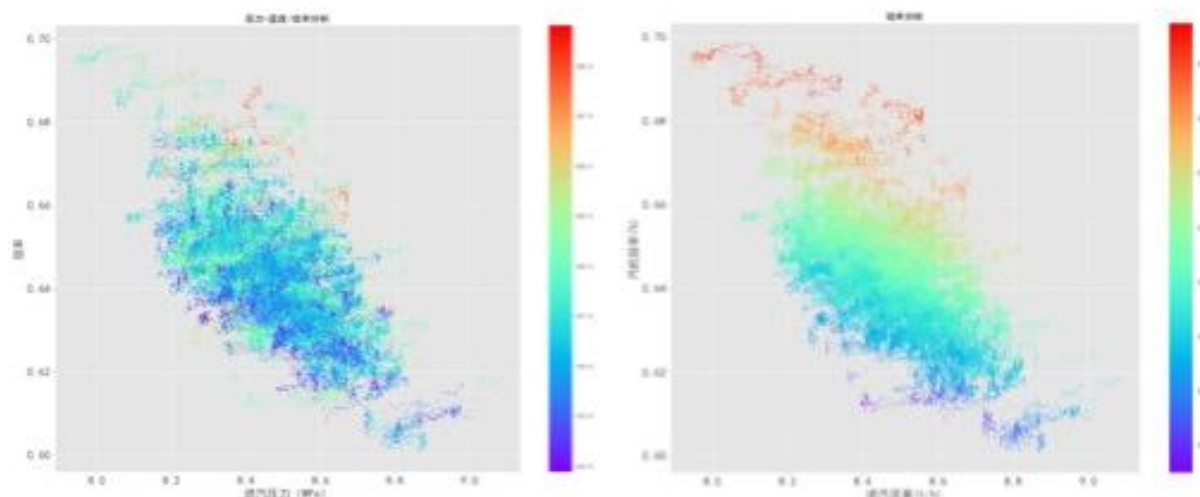
3. 智能优化算法

1) 汽机滑压优化算法

热电厂的汽机大多采用节流方式对汽机负荷进行调整，节流方式会导致蒸汽能量的损失。而热电由于蒸汽负荷波动大，所以汽机负荷会在较大范围内波动。如果主蒸汽压力不考虑汽机负荷的话，会导致低负荷段的汽机能效损失较大。如下图展示了汽机总效率的计算原理：



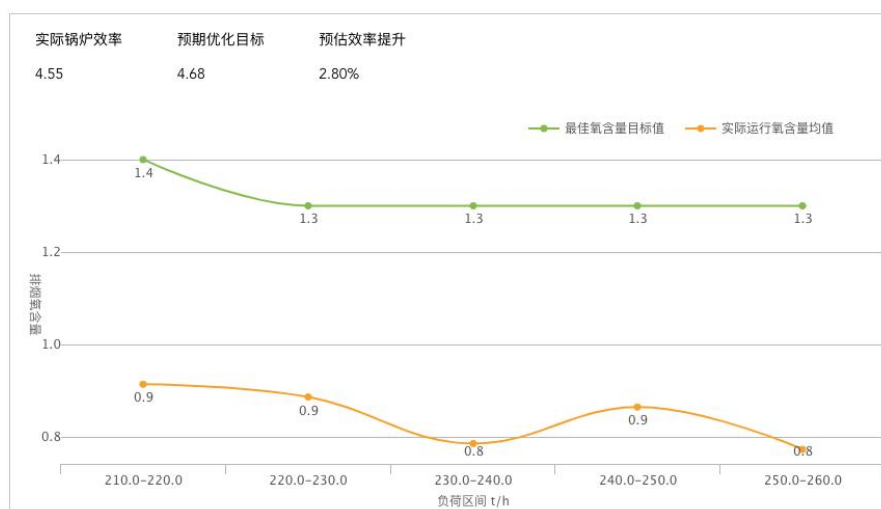
汽机滑压优化是指根据汽机的不同负荷，对主蒸汽压力在一定范围内进行更精准的调整和控制，以尽可能减少汽机的节流损失。最佳目标压力可基于下图展示的汽机特性模型进行寻优获得：



2) 排烟氧量优化算法

锅炉的燃烧效率是热电高效运行的重点，最佳的燃烧效率是锅炉排烟热损失和锅炉未燃烧热损失的实时平衡。锅炉的排烟氧量是体现这两个平衡的关键指标。锅炉在不同工况、不同煤种、不同负荷段下，最佳的排烟氧量均不同。

排烟氧量优化是指通过对数据进行寻优，找到当前每个负荷段下锅炉燃烧效率最高的目标排烟氧量，如下图所示：

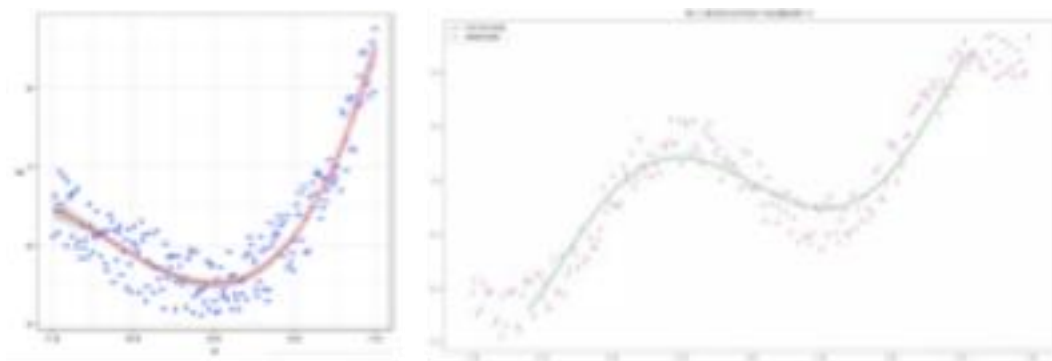


3) 通用优化算法

除了最关键的汽机滑压优化和排烟氧量优化外，在有些热电场景还存在一些特有的优化场景，系统需要提供通用的基础优化算法来覆盖这些情况。主要分为两类：

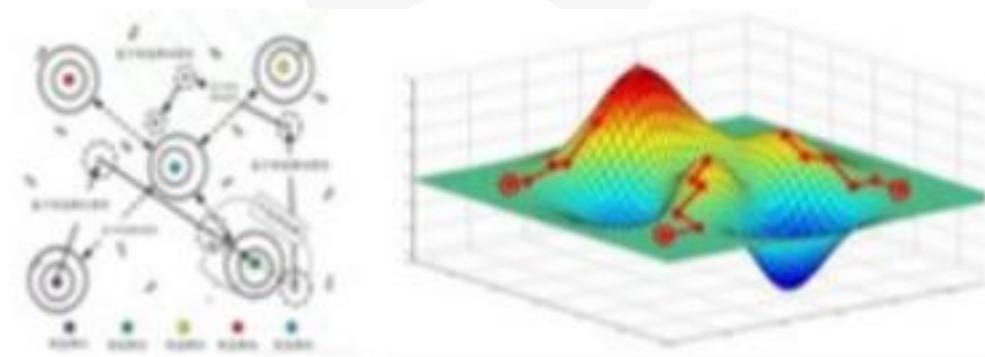
◆ 基于统计数据挖掘的寻优

这种方法通过将工艺运行数据构建统计数据模型，并对统计数据模型最优值进行计算获得最佳目标值：



◆ 基于模型最优化问题的寻优

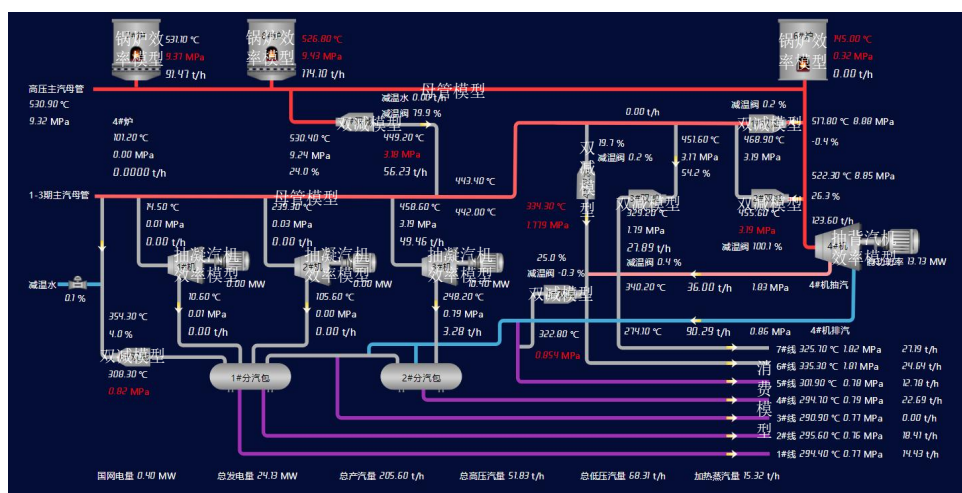
这种方法通过构建系统的机理模型，并建立一个最优化问题，通过解决最优化问题计算获得最佳目标值：



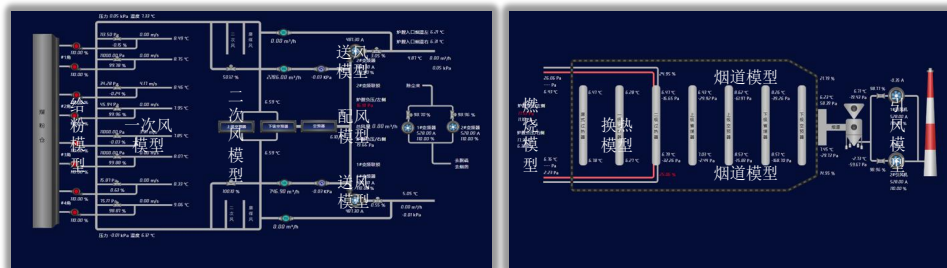
4. 数字孪生模型

热电数字孪生模型体系需要涵盖热电各工艺段、与生产控制相关的所有模型，如以下几张图列举了最主要的模型：

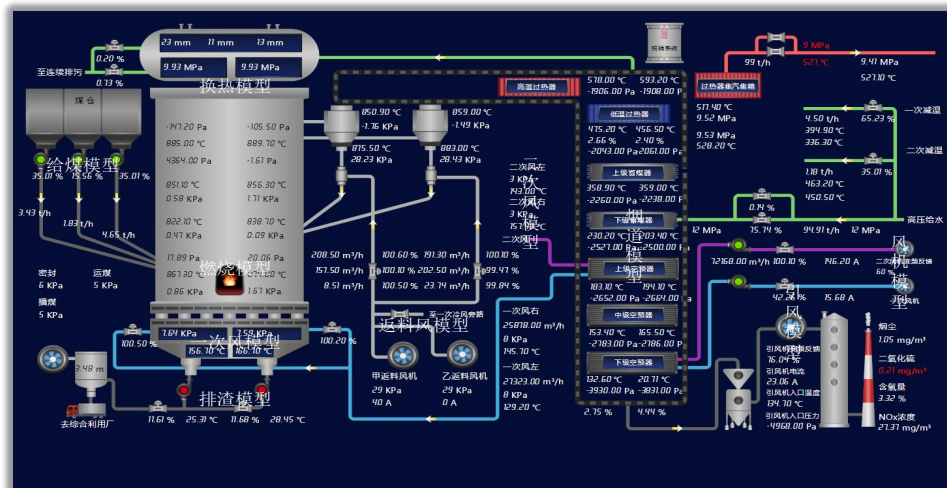
机组模型



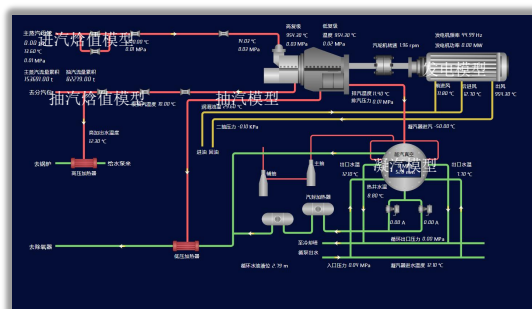
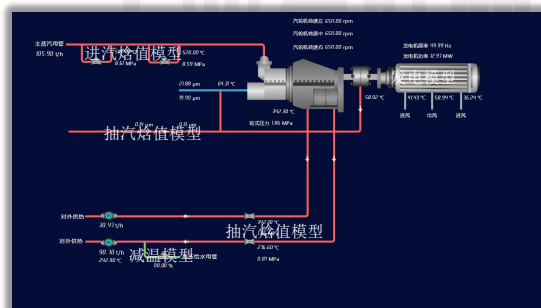
煤粉炉模型



循环流化床模型



汽机模型



5. 智能调控平台

由控制算法搭建而成的控制过程需要在一套实时闭环控制系统中执行才能完成智能调控的任务。为了能够满足热电全厂闭环自动控制的要求，全应科技需

要对原全应热电云平台进行升级实现一套面向智能调控的平台，该平台命名为ADMC（Adaptive Data-driven Model-based Control，自适应大数据模型预测控制）智能调控平台。

ADMC 平台的架构如下图所示：



平台由三大部分组成：

知数：解决数据接入、数据存储和数据计算的问题，包含图中的实时数据采集 IoTGateway 和大数据开发 DataForge。

智控：解决数字孪生构建、管理，智能调控算法构建、管理，以及实时调度控制框架，包含图中的智能实时控制 RTCL 和模型开发&训练 ModelForge。

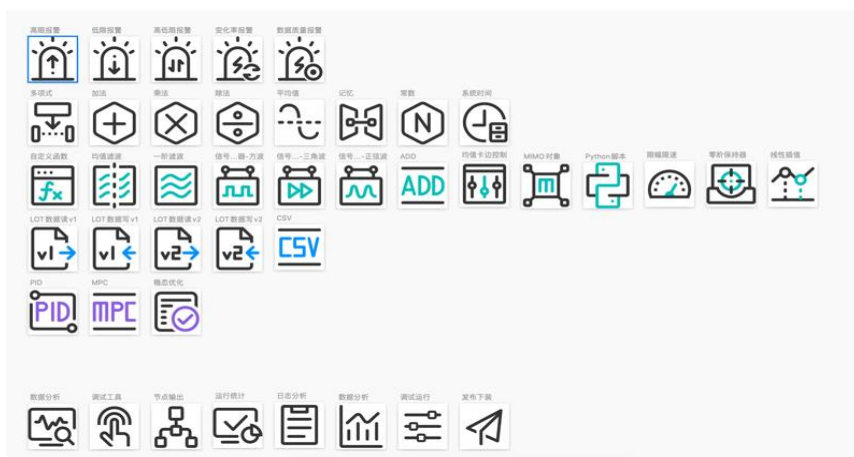
景图：解决智能调控结果的实时展示和人机协同交互，包含图中的看板工具 vizGraph 和报表工具 vizReport。

6. 集成开发环境

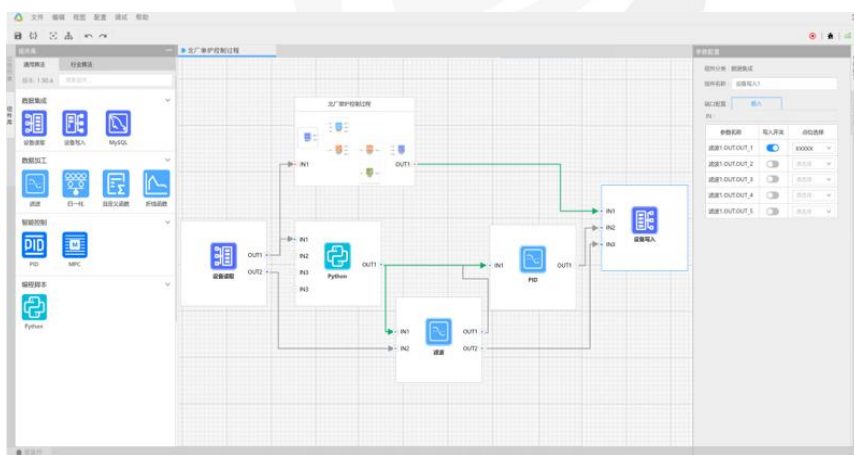
每个电厂的工艺结构、设备特性等均存在较大差异，所以要想实现全厂级的智能自动控制，每个电厂的智能调控逻辑一定是需要定制化的，不可能通过标准化产品进行简单覆盖。但如果每个电厂都从头开始开发，交付实施代价巨大，所以需要有一套智能控制搭建与调试工具，集成一系列热电智能调控的标准算法，实施时通过拖拽的方式搭建面向特定电厂的智能控制逻辑是最佳的方案。该集成开发环境需要具备：

算法组件的集中管理：对丰富的工业控制、行业研发、数据加工、逻辑处理等组件进行统一上架和版本管理；实施时可以基于工艺逻辑进行可视化拖拉拽和

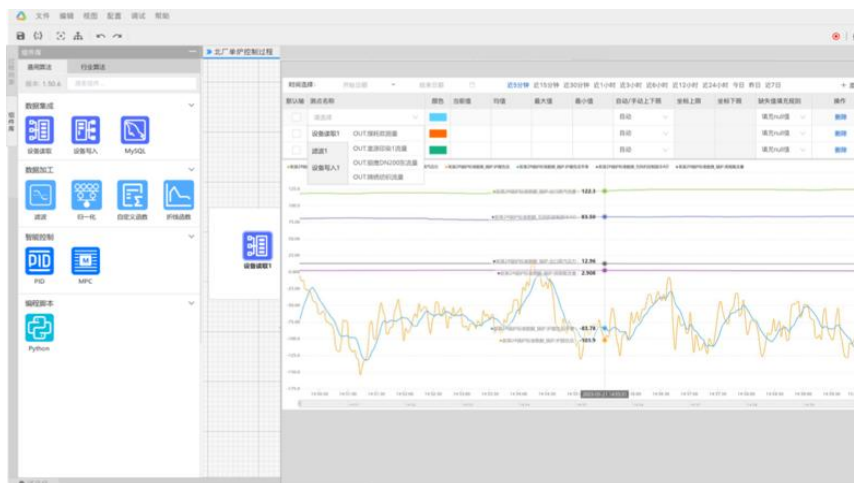
调参配置以实现客制化控制过程的搭建。



开放性强，低代码快速搭建：提供多语言异构和数据对接能力，用户根据自己的需要独立简单封装完成专属组件上架、数据对接，更容易拓展应用场景和能力。



控制分析一体化，便捷运维和预警分析：支持云、云+边、一体机等多形态输出方式，及动态在线分析控制过程、AI 算法输出、运行状态日志等能力，在云联动场景下可通过全应 APP 和钉钉进行实时预警和运行分析。



四、实施效果

该技术将热电运行从传统的以人工为主的模式升级为以智能自动运行的模式，大幅提升了热电生产的安全性、稳定性和经济性；降低了电厂生产管理的负担，降低了电厂对基层人员在数量和质量方面的要求；有效提升了电厂的调控能力，为建立新型能源体系贡献了重要力量。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet