



EPTCHINA.CN
中国电力科技网



中国华电
CHD

第三届热电联产远距离低能耗集中供热技术研讨会



时伟

浙江大学常州工业技术研究院智慧能源系统研究中心副主任，毕业于浙江大学能源工程学院动力工程专业。曾任职国电科学技术研究院从事电站锅炉运行优化研究，授权发明专利8项。从事供热系统建模仿真和优化决策研究，成功实施多项智慧供热应用案例。

基于“数字孪生”的供热系统仿真分析与决策优化平台研究

主办单位：中国电力科技网

协办单位：华电宁夏灵武发电有限公司 宁夏华电供热有限公司

2020年1月8-10日 中国·银川





浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

基于“数字孪生”的供热系统 仿真分析与决策优化平台研究



浙江大学常州工业技术研究院 时伟





提纲 Outline

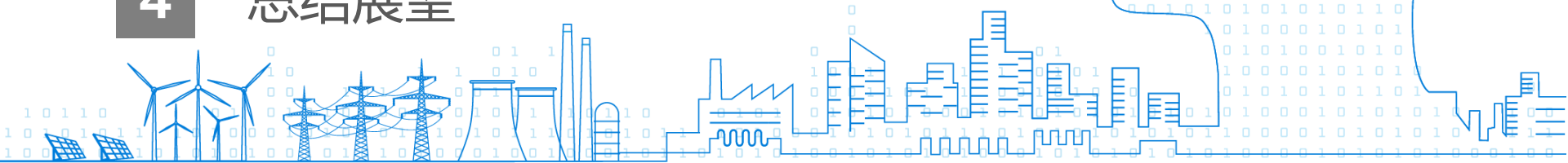
1 研究背景

2 研究内容

3 应用案例

4 总结展望

EPTCHINA
中国电力科技





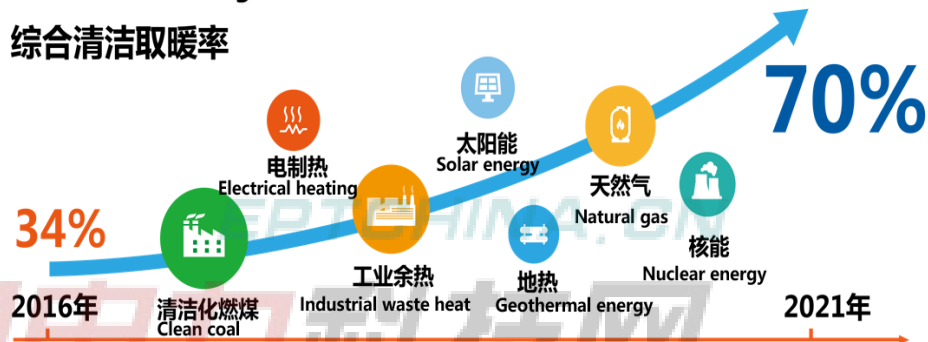
十部委：《北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021年）》

因地制宜的综合利用**清洁化燃煤**、天然气、电、地热、生物质等多种形式的清洁能源。

2021年，综合**清洁取暖率**从2016年底的**34%**提升到**70%**。

Overall clean heating rate

综合清洁取暖率



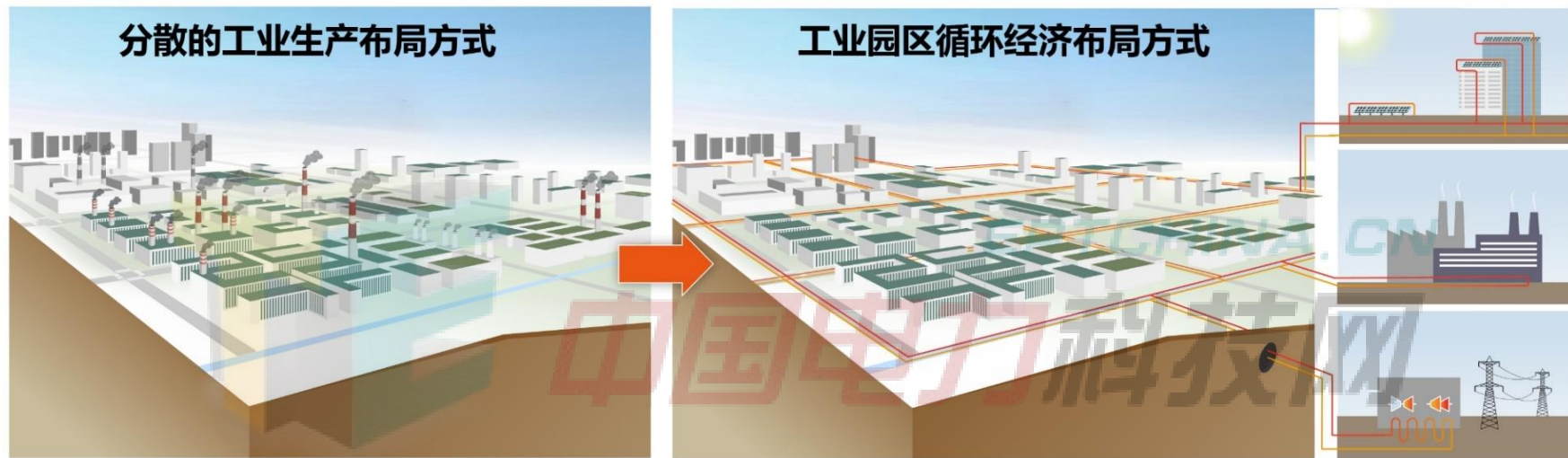
推动智能供热研究及应用示范，研究先进传感、信息通讯、大数据等新技术，促进供热设备和运行方式升级。

在先进相变储热和化学储热等各类储热技术、智能供热技术、大气污染物排放控制技术、多能互补技术等专项技术上取得突破。

加强在线水力优化和基于负荷预测的动态调控，推进供热企业管理的规范化、供热系统运行的高效化和用户服务多样化，提升供热的现代化水平。



工业转型：从传统分散式工业生产到集约式生态工业园区

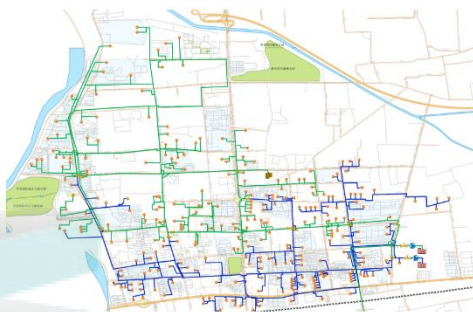


- 《工业绿色发展规划（2016-2020年）》指出：“要优化工业结构和区域布局，加快形成以工业园区为载体的绿色集约化生产方式，提升工业能源效率” 省级工业园区**1100**个；
- **工业园区和集中供热是中国体制优越性的体现**，显著提升能源利用的综合效率，降低单位GDP能耗，推动基于**系统优化集成、能源梯级利用**的循环经济发展。



发展趋势：实现更大地域范围内资源整合及互联互通

源：因地制宜的运用多元化方案，用足热电联产能力，推进**工业余热**、生活垃圾及生物质能供热，并积极探索风能、太阳能、地热、核电供热等新技术，**通过多源互补实现供需总量平衡、集成优化**



网：长距离输热技术扩大了资源整合的空间半径，热网趋向互联互通以提升供热可靠性，增加**调度灵活性**，**包容波动性低碳清洁热源**接入，高度重视管网安全

荷：热计量提升了负荷侧的自动化水平，**室温测量**等物联网技术为按需精准供热提供了条件，**需求侧响应**技术正在探索，**分布式能源、虚拟能源工厂**带来了更多灵活选择



储：积极探索大规模储热技术，以实现热负荷的“**削峰填谷**”并支撑**热电解耦、热电协同**





供热系统运行中的诸多**因时择优**问题.....

- 如何在采暖季不同阶段，优化组合系统运行方式和参数，**实现按需供热**，减少能源消耗；
- 如何将波动性的工业余热、可再生能源**供热优先**用于城市供暖？其他**热源如何互补**？
- 如何依据**气象预报**应对短期寒流？何时升温？
- 如何尽量**降低管网运行压力**，保障老旧管网运行安全？
- 热电联产机组出力突然下降时，应如何**保障供热**？
- **应急故障**条件下，如何切换运行方式？
- 如何实现**节能环保**的运行调度？
-



储热装置工作策略



基于热-电协同的调度



面向环保效益最优的热源调度



跨区域长距离输热调度决策



不同热源间能源价格差



工业集中供热系统安全性、可靠性与经济性要求提高

- 热用户用热负荷波动大，蒸汽热网流动状态组合多变，环状管网存在**水击风险**；
- **网损**直接关系供热企业运行效益；
- 热网不断发展变化，热网**扩建、改建**缺少科学规划决策支持；



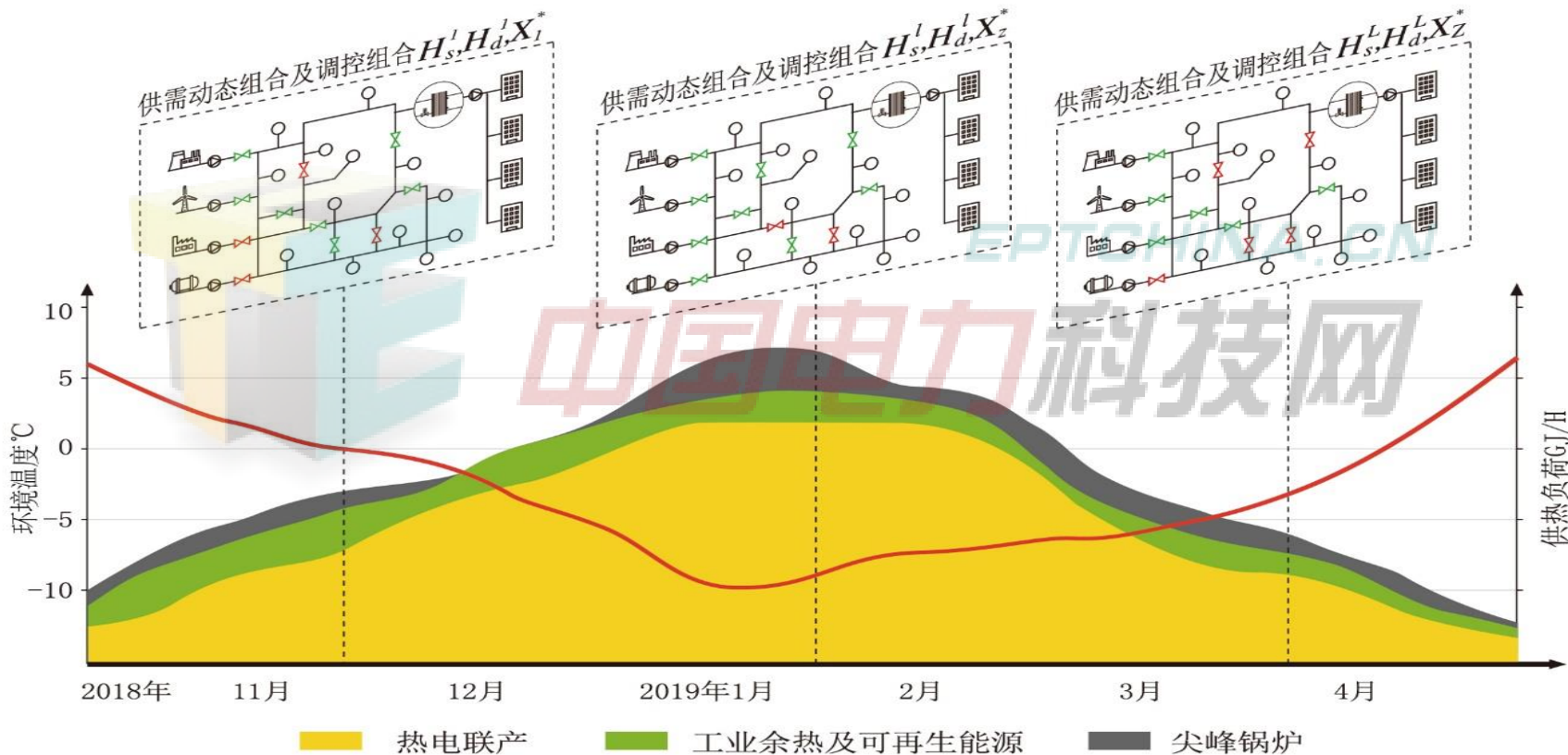


集中供热系统的运行问题：多能互补-灵活调控-因时择优





集中供热系统的运行问题：多能互补-灵活调控-因时择优





大规模复杂热网难以掌握全网运行状态，人工经验难以调控



- **现状：**调度人员的人脑完成“数据分析+全局优化”；
- **目标：**信息系统协助人脑执行“数据分析+全局优化”；
- **远期：**“无人驾驶”（自动调控）？



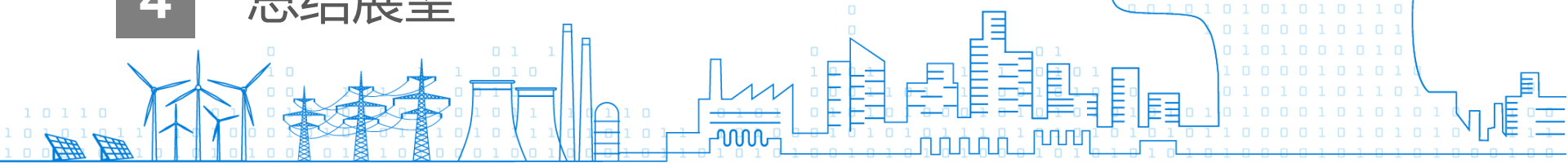
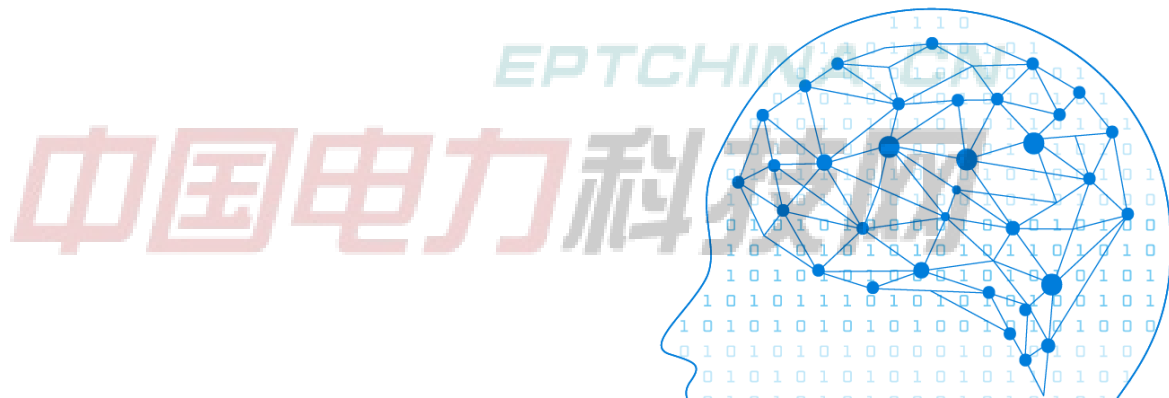
提纲 Outline

1 研究背景

2 研究内容

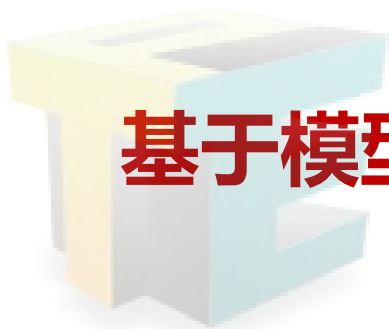
3 应用案例

4 总结展望





研究目标：智慧供热改变系统调控决策方式

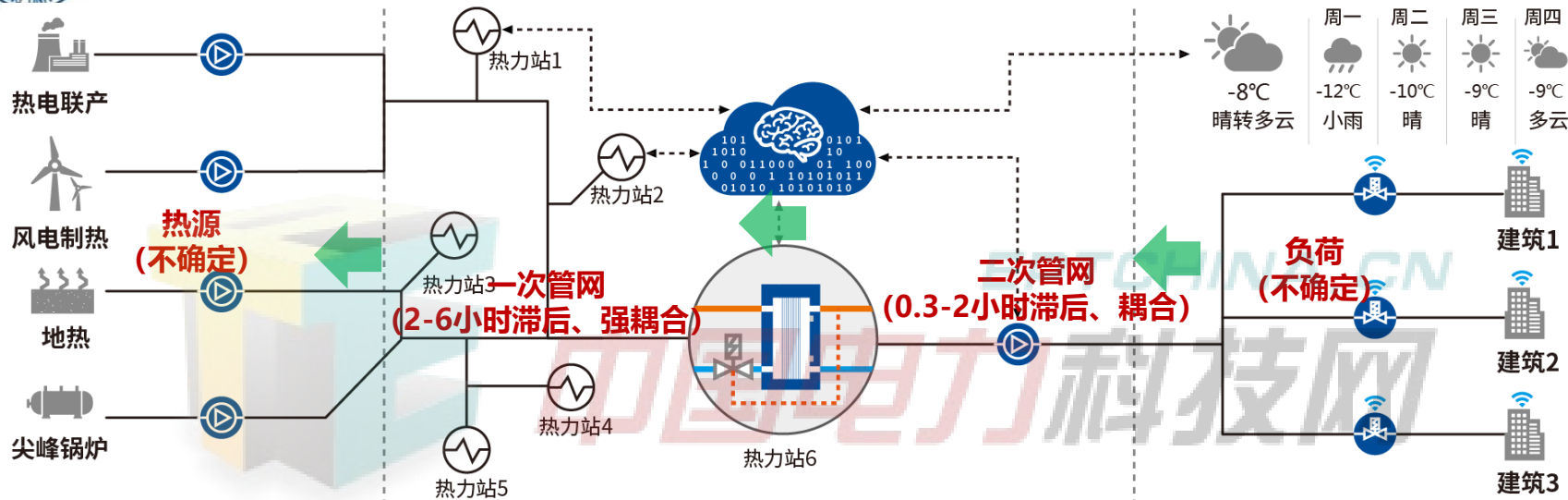


基于模型做预测，基于预测做决策

EPTCHINA.CN
中国电力科技网



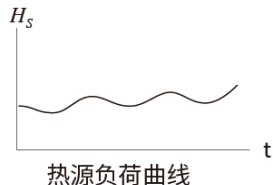
智慧的本质：主体对外部环境变化的响应能力



热源(工况组合)不
 $H_s^l = [H_{s,1}^l, H_{s,2}^l, \dots, H_{s,n}^l]^T$

智慧 $\approx$ 全局要素连接 + 全局统筹优化

气象和用户行为)不确定
 $= [H_{d,1}^l, H_{d,2}^l, \dots, H_{d,n}^l]^T$



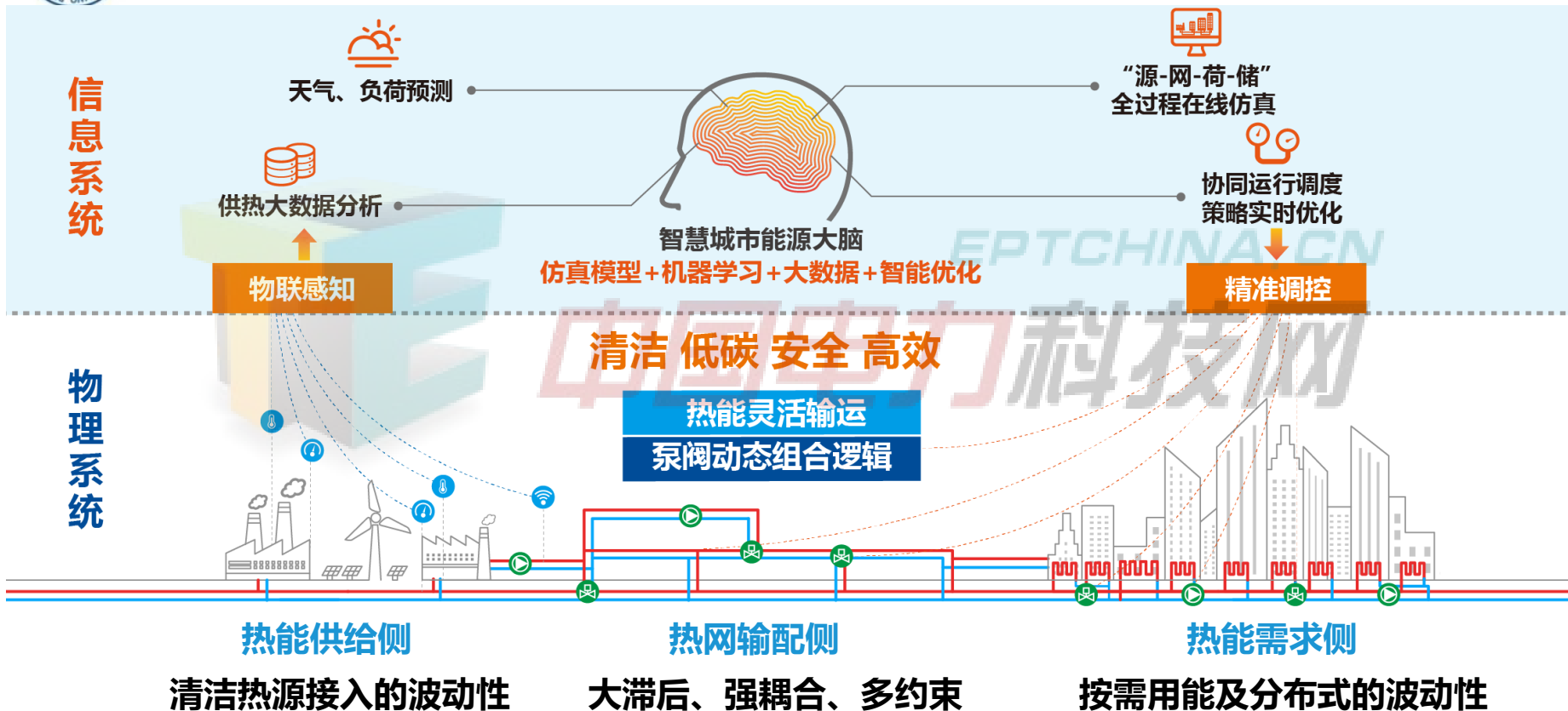
阀门 J00262	$a_{00262}=0.2$	小泵03	$\beta_{03}=49\text{Hz}$
阀门00275	$a_{00275}=1.0$	水泵06	$\beta_{06}=46\text{Hz}$

泵阀组合逻辑





智慧供热：基于工业互联网实现热能供应链的数字化整合





总体技术路线: 基于“数字孪生”的智慧供热



“数字孪生”是通过先进的感知、通信、计算与控制技术，构建物理系统的映射模型，通过信息空间的在线分析与统筹优化，实现物理空间内复杂系统资源要素的优化配置，按需响应、动态优化、广域协调。

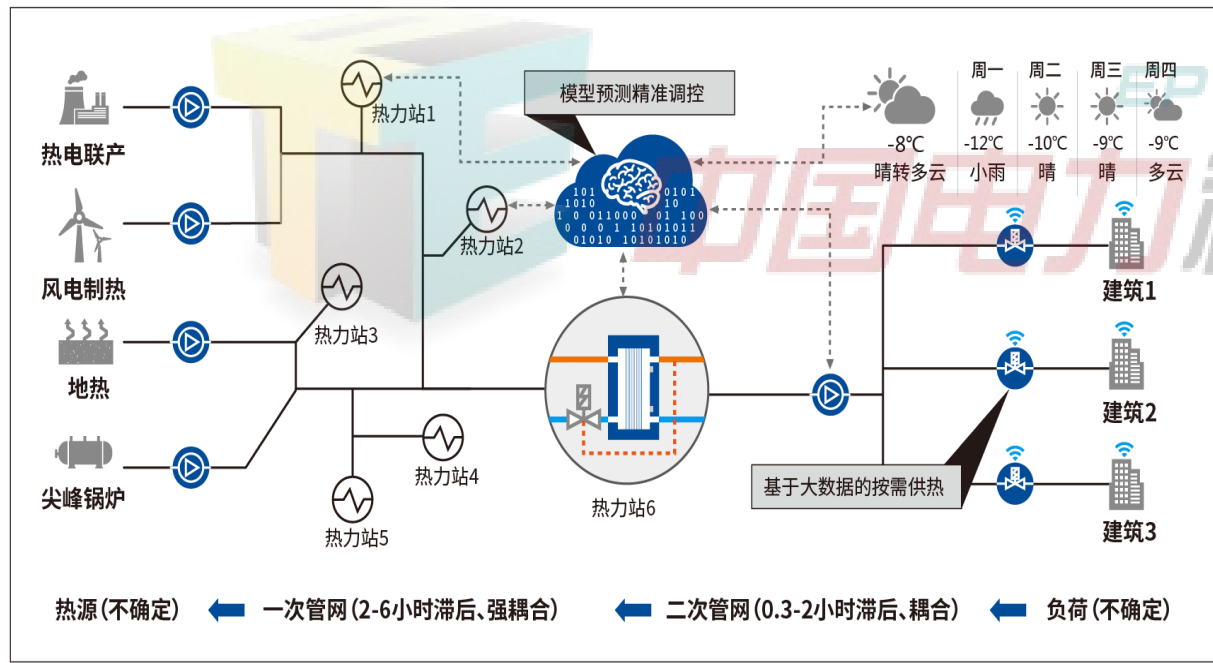
- **状态感知**：基于物联网、SCADA等系统随时获取物理系统的运行状态。
- **实时分析**：采用大数据、系统仿真等方法将显性数据加工为可理解的信息，解释数据背后的逻辑。
- **科学决策**：基于对当前工况的实时分析结果，产生系统科学优化运行的决策。
- **精准执行**：运用科学决策，实现物理系统的调控，实现自适应优化运行。

“数字孪生” = “数字化双胞胎” ≈ 信息物理系统



总体技术路线：基于模型预测的供热过程控制

针对大滞后、强耦合的供热系统，通过**建模仿真**、**状态分析与预测控制**得到热源侧负荷实时分析优化分配运行控制策略、热网侧节能安全输配的运行调控策略等，实现基于模型预测的供热生产全过程协调优化运行。



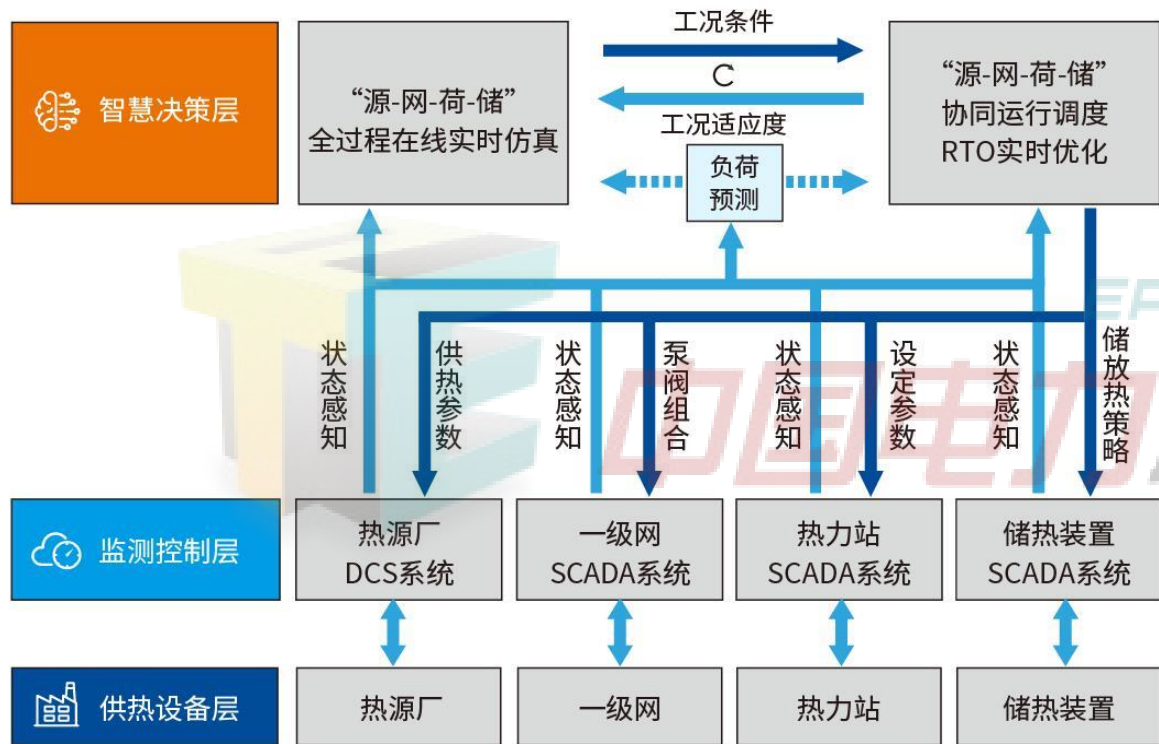
建模仿真：机理建模和数据建模协同方法建立供热系统多尺度耦合模型；

状态分析：在供热系统多时间、多空间、多环节特性条件下，估计供热各环节的实时状态，进行故障预警，分析供需态势；

预测控制：将用户侧需求反溯至源侧、网侧的运行调控方案。



总体技术路线：基于模型预测的供热过程控制



源侧：多热源机组的模拟仿真、负荷优化分配及供热参数优化；

网侧：管网在线水力优化与优化，质量并调提升灵活性；

荷侧：结合气象条件对建筑物及热力站负荷进行预测；

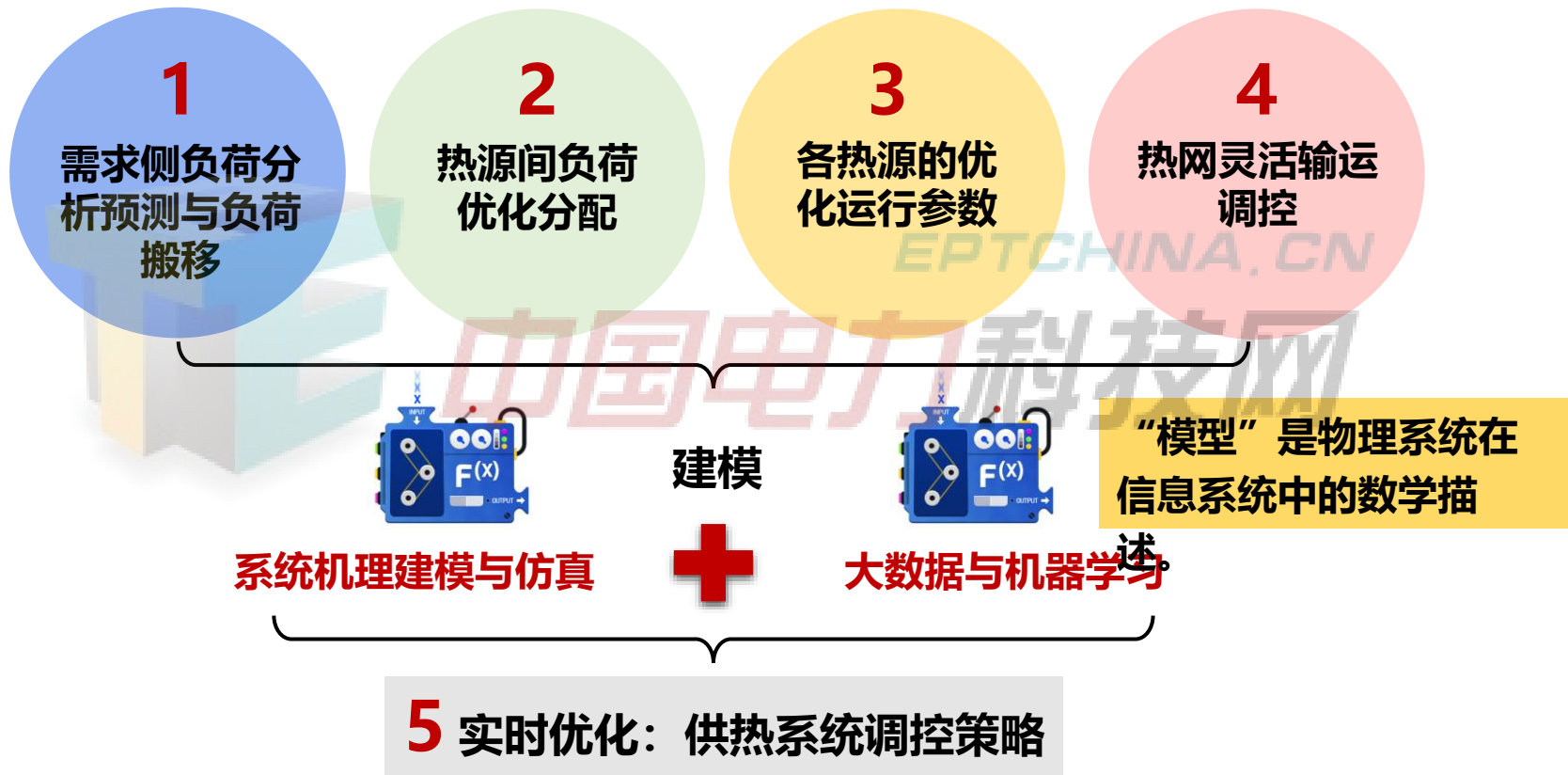
储侧：对储热系统储放热策略进行优化。

机理模型 + 数据驱动

建立供热系统全过程“数字孪生”模型，采用在线优化技术为运行调度人员提供决策依据。



智慧供热系统运行调度的关键问题

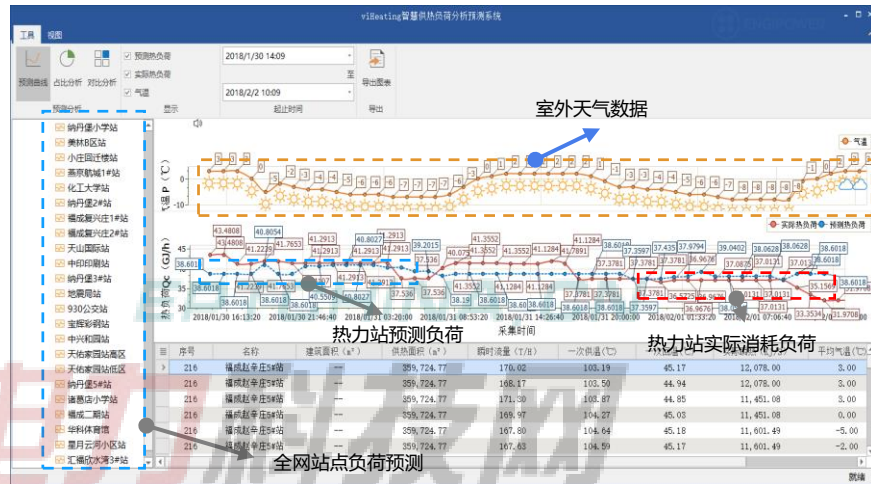




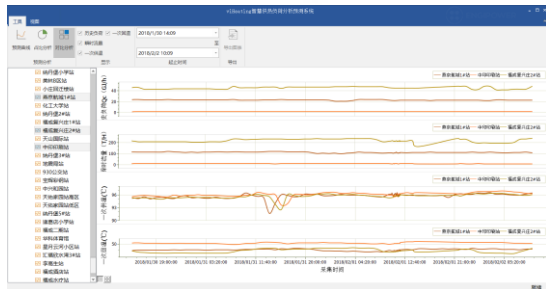
基于物联网和大数据的负荷侧

“数字孪生”模型

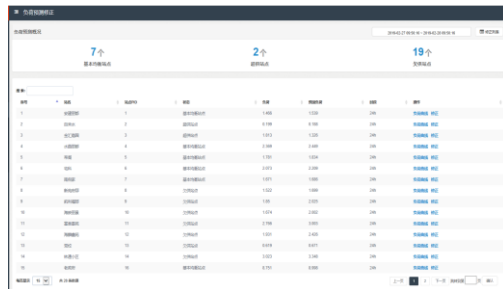
- 基于**历史运行数据**，采用**机器学习算法**对**站点及热源侧负荷**进行**小时级预测**。
- 基于**室温、楼口测温**等物联感知条件，结合**人工经验修正**，实现**站点负荷的按需精准供热**，指导**热源侧负荷的按需生产**。
- **热力站动态热惰性响应特征建模**。



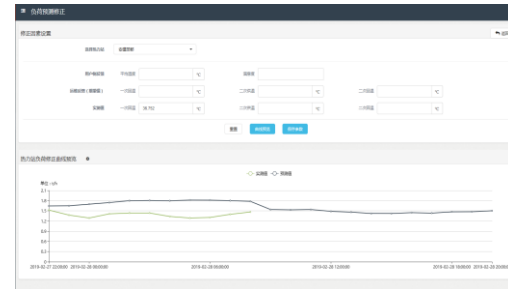
分站负荷预测



站点供需匹配



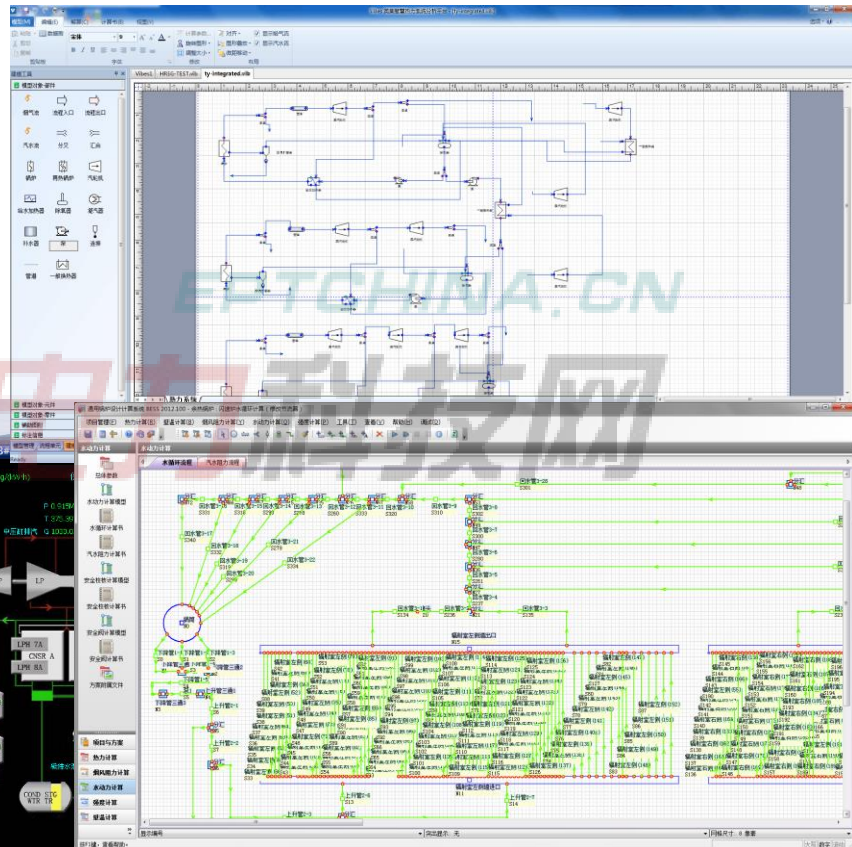
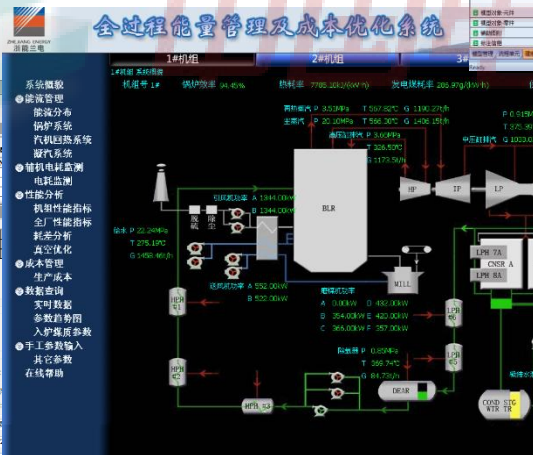
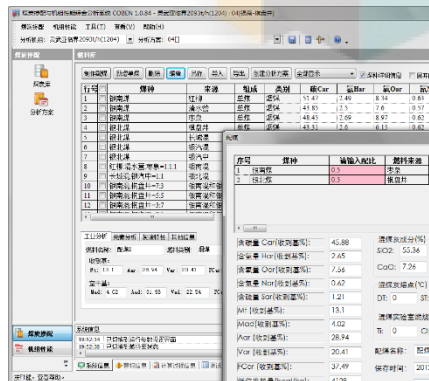
站点参数修正





热源侧锅炉及电厂热力系统的“数字孪生”模型

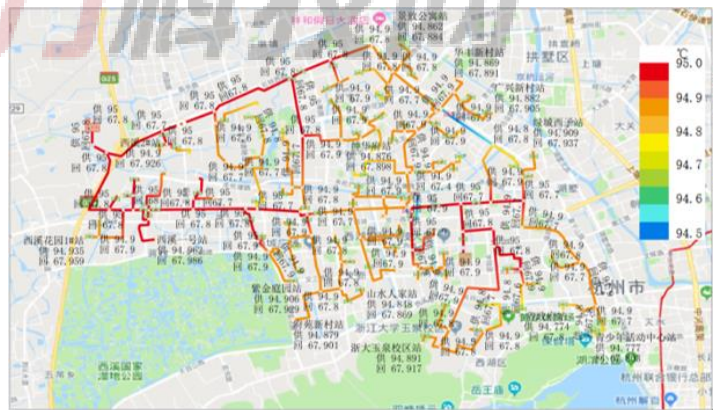
- 锅炉、汽机、热力系统机理及数据建模，建立“热电负荷-机组性能”的关联关系模型。
- 基于燃料价格、燃料掺配条件、环保控制条件、发电指标、热网约束条件的热源侧机组优化运行分析。





热网侧一维热工水力系统“数字孪生”模型

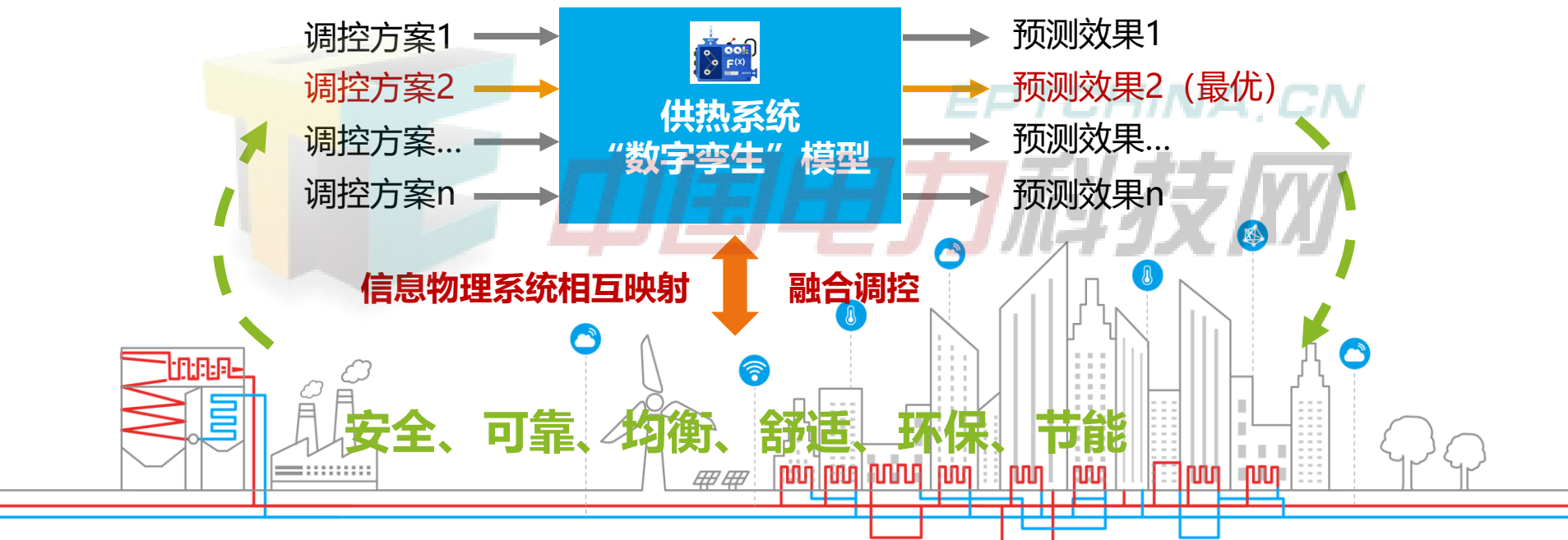
- 自主核心的高精度一维热工水力系统仿真算法；
- 基于GIS地图的可视化建模；
- 动态流动传输延迟计算；
- 与热源侧仿真的耦合；
- 支持基于运行数据的模型特征参数辨识；





基于“数字孪生”模型预测的供热系统运行调度决策

建设“数字孪生”模型，通过**智能优化算法**对**负荷分配**、**热网解列**、**节能运行**、**应急抢险**等运行调控方案进行寻优，实现供热系统的**调度决策支持**和**预测控制调节**。



从有代价的“物理系统试错”到无代价的“信息系统实时仿真择优”的转变



提纲 Outline

1 研究背景

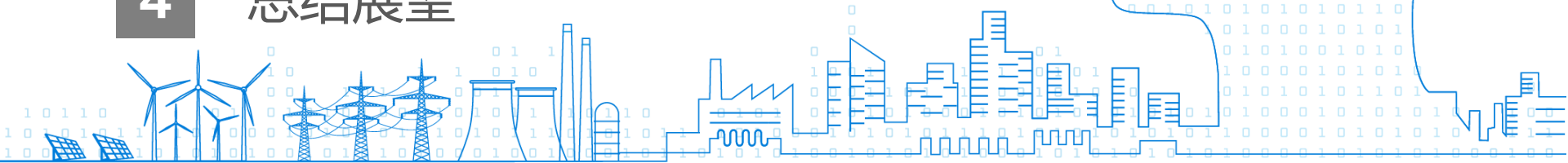
2 研究内容

3 应用案例

4 总结展望



EPTCHINA
中国电力科技

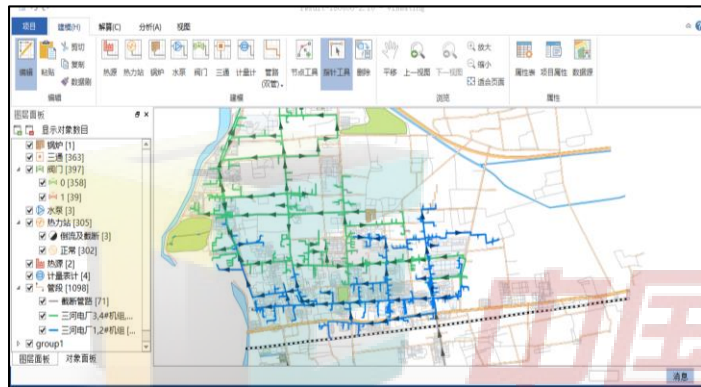




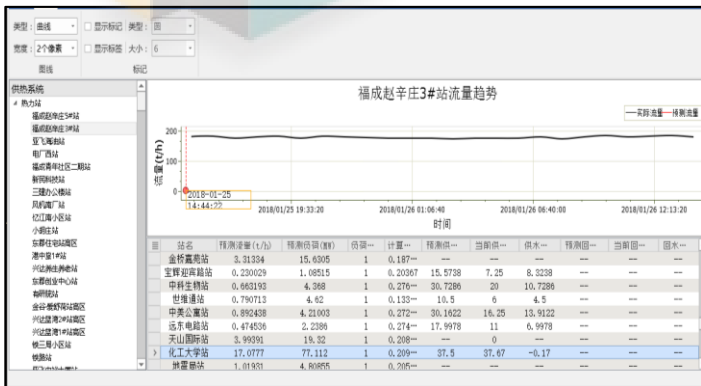
北京热力 智慧供热多源互补优化运行调度决策支持平台

北京市科委“蓝天工程”重点项目 北京市热力集团科研项目，示范区：北京燕郊

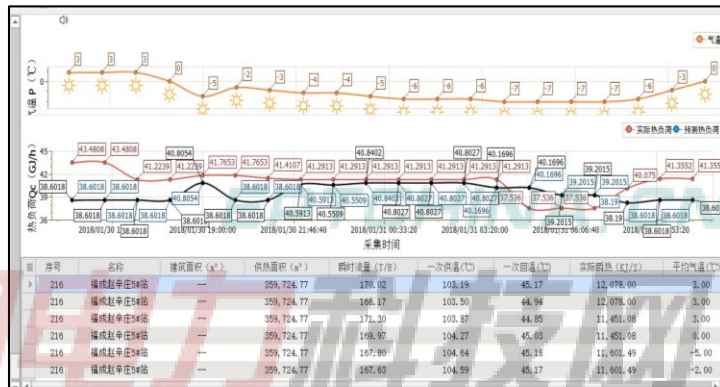
热网仿真



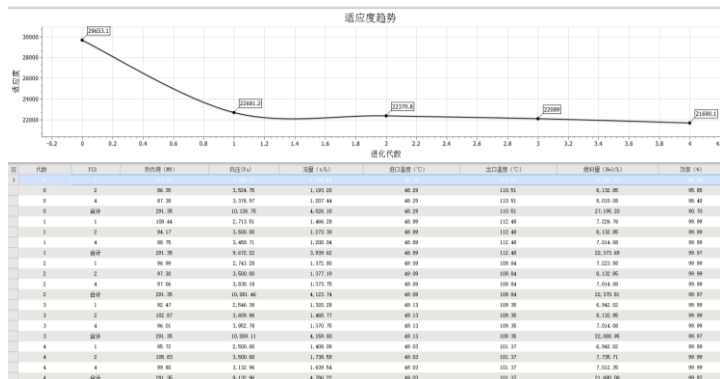
预测控制



负荷预测



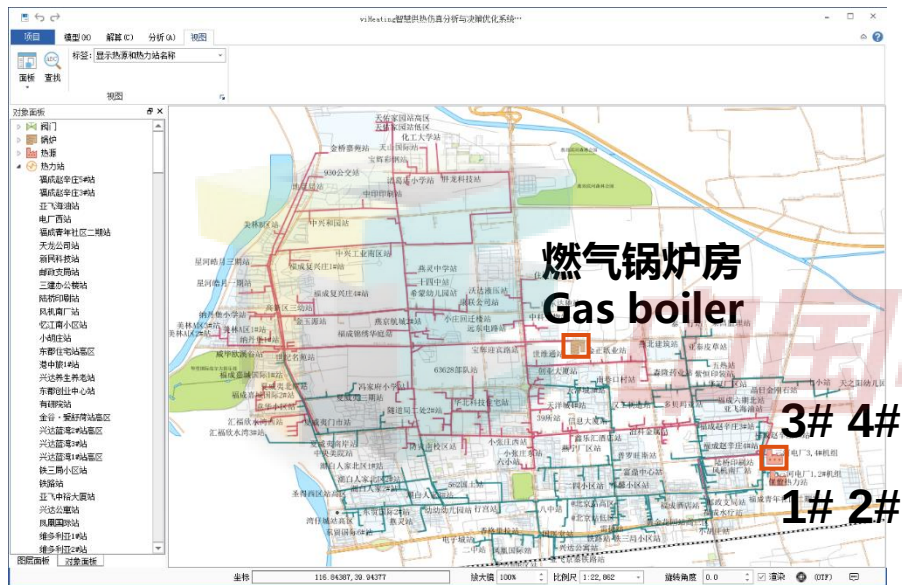
优化调度





北京热力 智慧供热多源互补优化运行调度决策支持平台

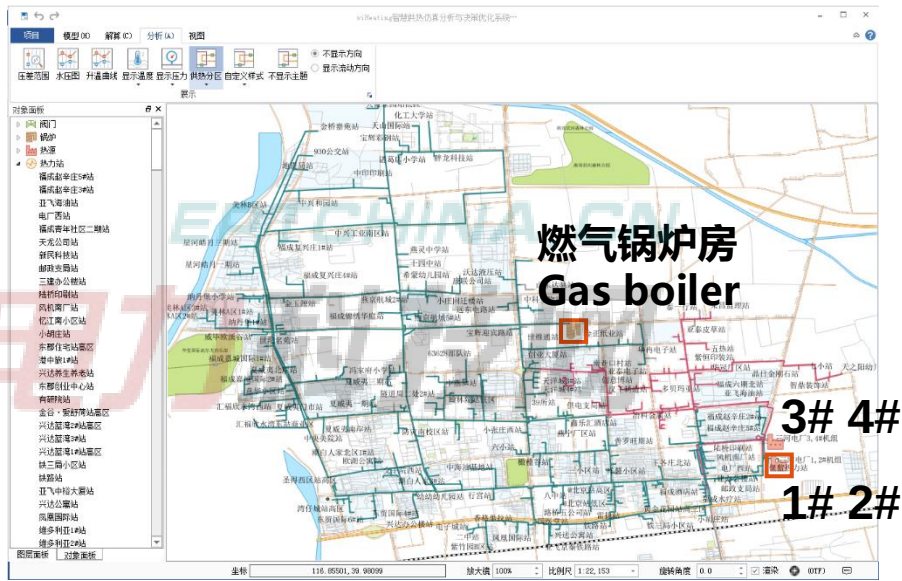
原解列方案



原解列方案：热电厂3、4#机组（兼外部供热）与锅炉房联网供热，热电厂1、2#机组单独供热

新解列方案：热电厂3、4#机组（兼外部供热）单独供热，热电厂1、2#机组与锅炉房联网供热

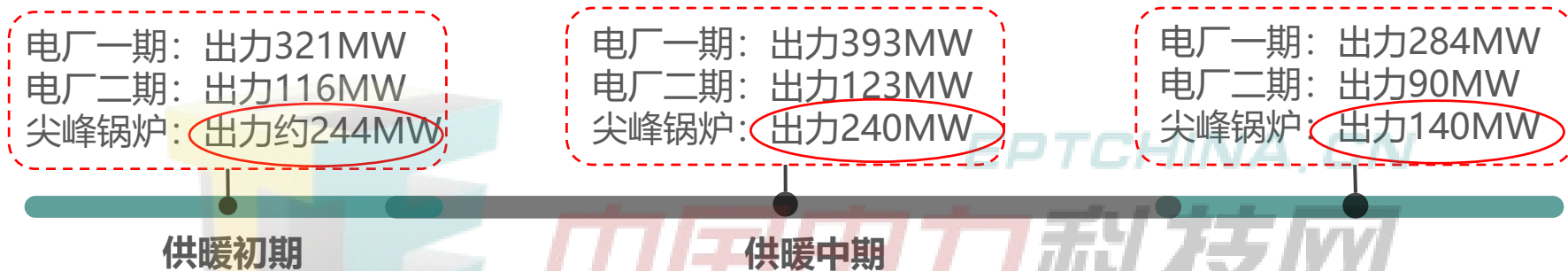
新解列方案



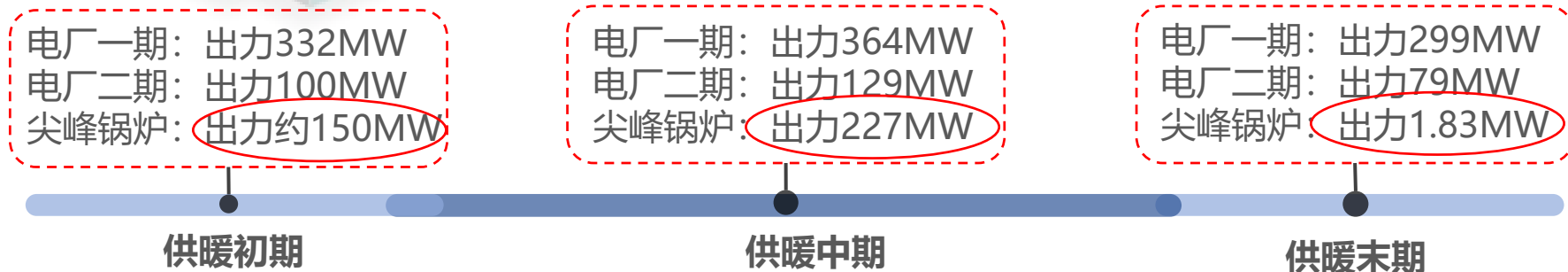


北京热力 智慧供热多源互补优化运行调度决策支持平台

原解列方案：热电厂3、4#机组与锅炉房联网供热，热电厂1、2#机组单独供热。



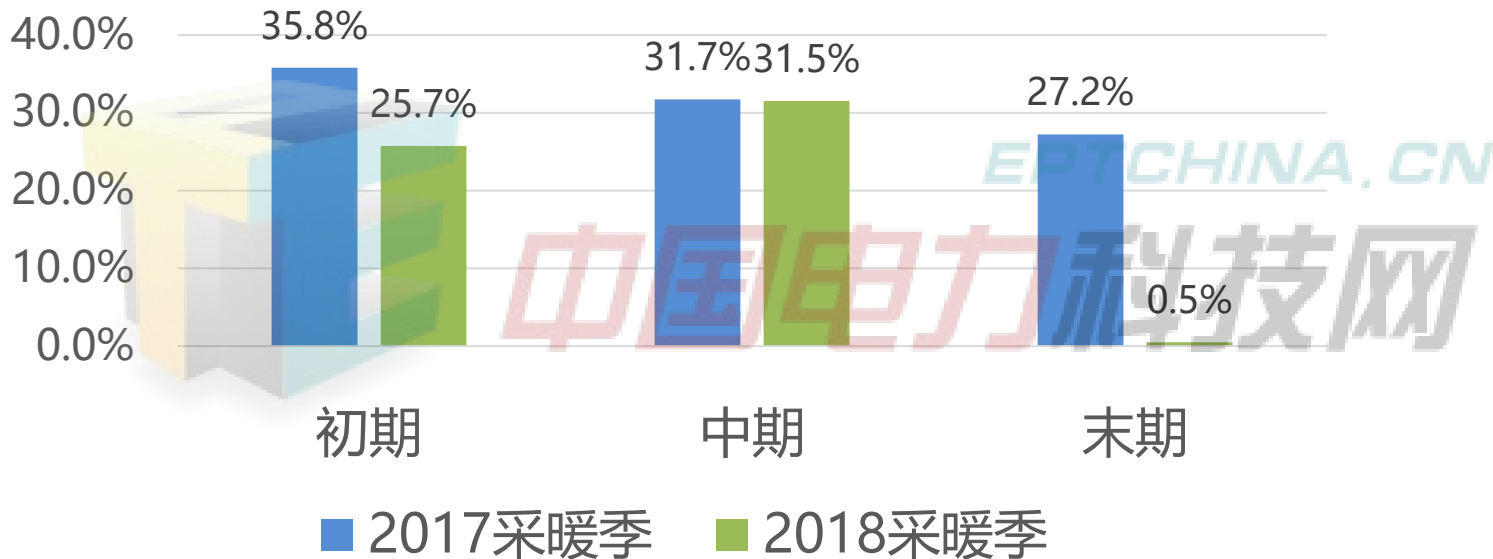
新解列方案：热电厂3、4#机组单独供热，热电厂1、2#机组与锅炉房联网供热。





北京热力 智慧供热多源互补优化运行调度决策支持平台

2017、2018采暖季燃气锅炉房投入占比



用户满意度提升：平均测温合格率同比**提升**；客服电话呼入量**下降**



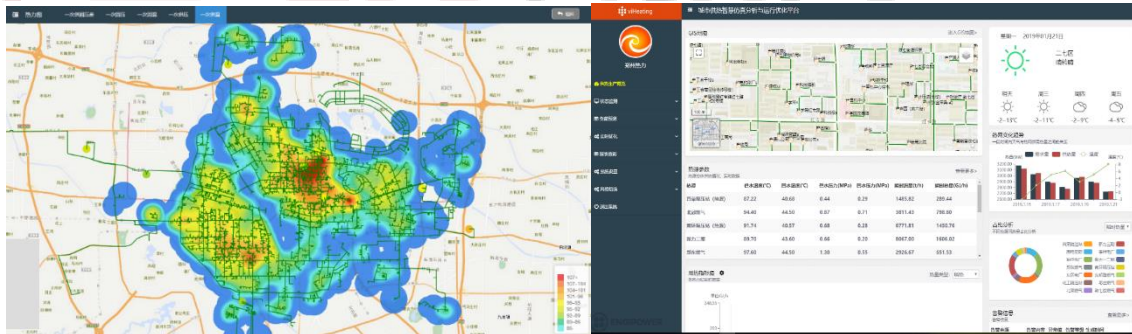
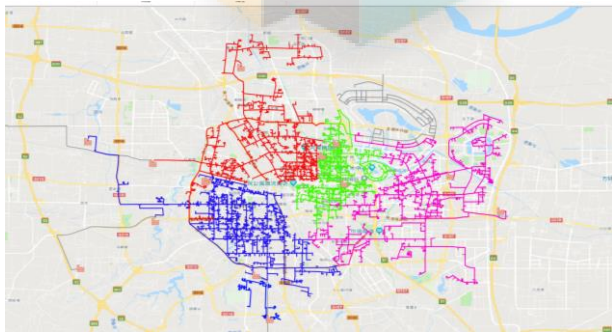
郑州热力-智慧供热系统

项目名称：智慧城市供热系统仿真分析与调度控制平台

客户单位：郑州市热力总公司

项目目标：给出低压力运行策略，降低运行**安全**风险；

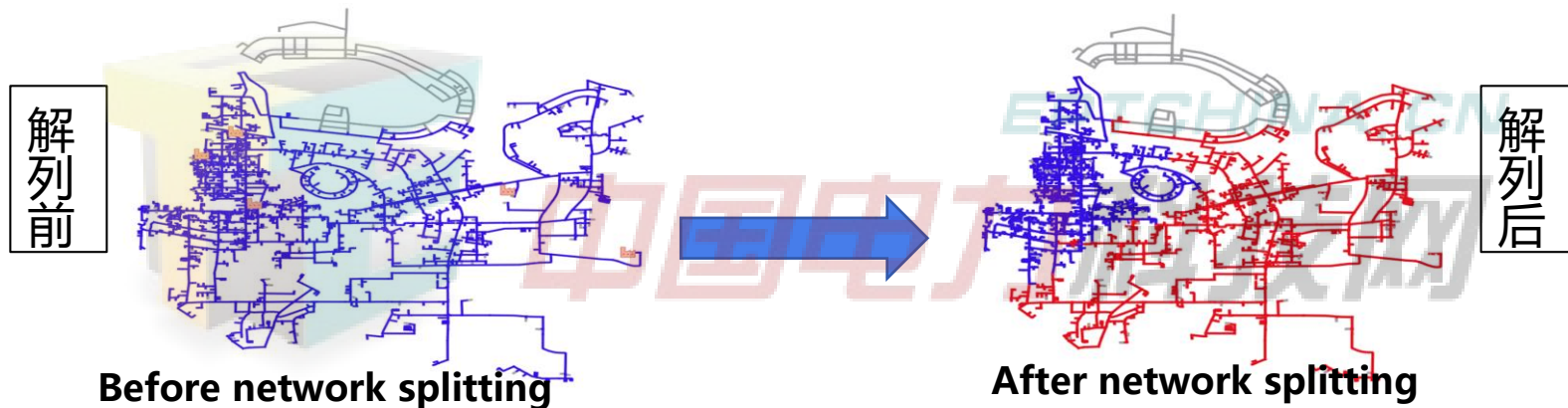
项目实施内容： **全过程仿真**，实时需求**预测**，实时优化源-网**调度**策略





郑州热力：运行中的多热源调度方案决策能力

- 基于“数字孪生”模型自动计算合理热网切换方案，预测切换后水力工况，确保安全投运；
- 2019年1月初，利用多热源自动解列技术对东区热网进行区域解列，降低运行风险。



名称	计算供水压力 (MPa)	计算回水压力 (MPa)
郑东燃气	1.1240	0.6180
东区电厂	1.5490	0.2500
枣庄燃气	0.9550	0.7690
政七街燃气	0.9600	0.7440
东明路燃气	0.9270	0.7390

Water supply/return pressure

名称	计算供水压力 (MPa)	计算回水压力 (MPa)
郑东燃气	1.1870	0.6160
东区电厂	1.6100	0.2500
枣庄燃气	0.6540	0.3130
政七街燃气	0.6610	0.2870
东明路燃气	0.6300	0.2800

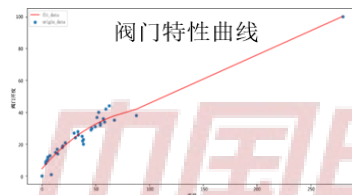
Water supply/return pressure



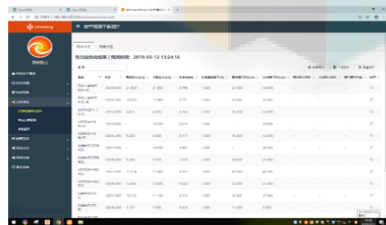
郑州热力：基于负荷预测制定优化调度方案

- 采用预测性控制技术，基于未来天气工况条件，建筑物类型，进行负荷预测
- 根据当前热网、源侧条件、实时进行全网平衡计算，快速给出热网阀门调节参数；

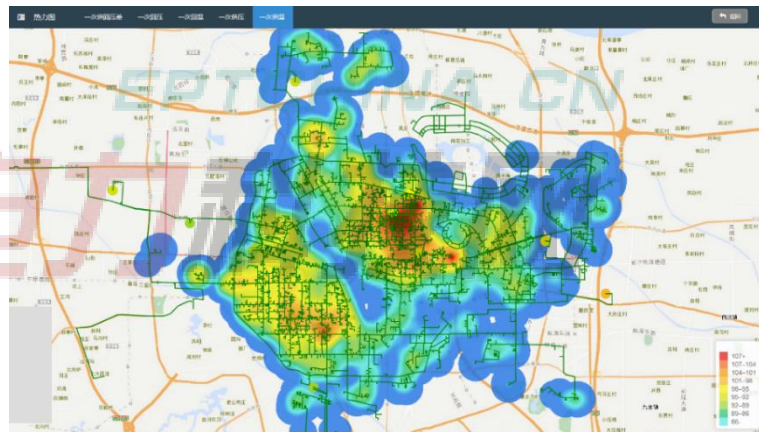
根据阀门的品牌和型号选择多个站点进行数据拟合，获得该品牌和型号阀门的特性曲线。



预测该热力站在未来时刻所需的负荷、流量。



计算出每站阀门开度





郑州热力：定制化开发智慧供热大屏展示系统



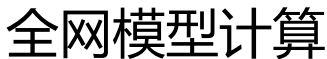


无锡国联多源联网蒸汽供热系统调度决策

项目名称：多源联网蒸汽供热系统调度决策平台

客户单位：无锡国联下属4个热源及热网（管道总长超**600公里**，其中最大热源供汽管道长度超过**35公里**，是国内长距离管道供热的典范。）

项目目标： 建立机理仿真模型，实现重要用户负荷**需求预测**；
开发负荷**分配决策系统**；
通过动态仿真，缓解**长距离供热参数严重滞后**问题；
定制开发智慧热网监控调度管理中心**大屏可视化**展示系统





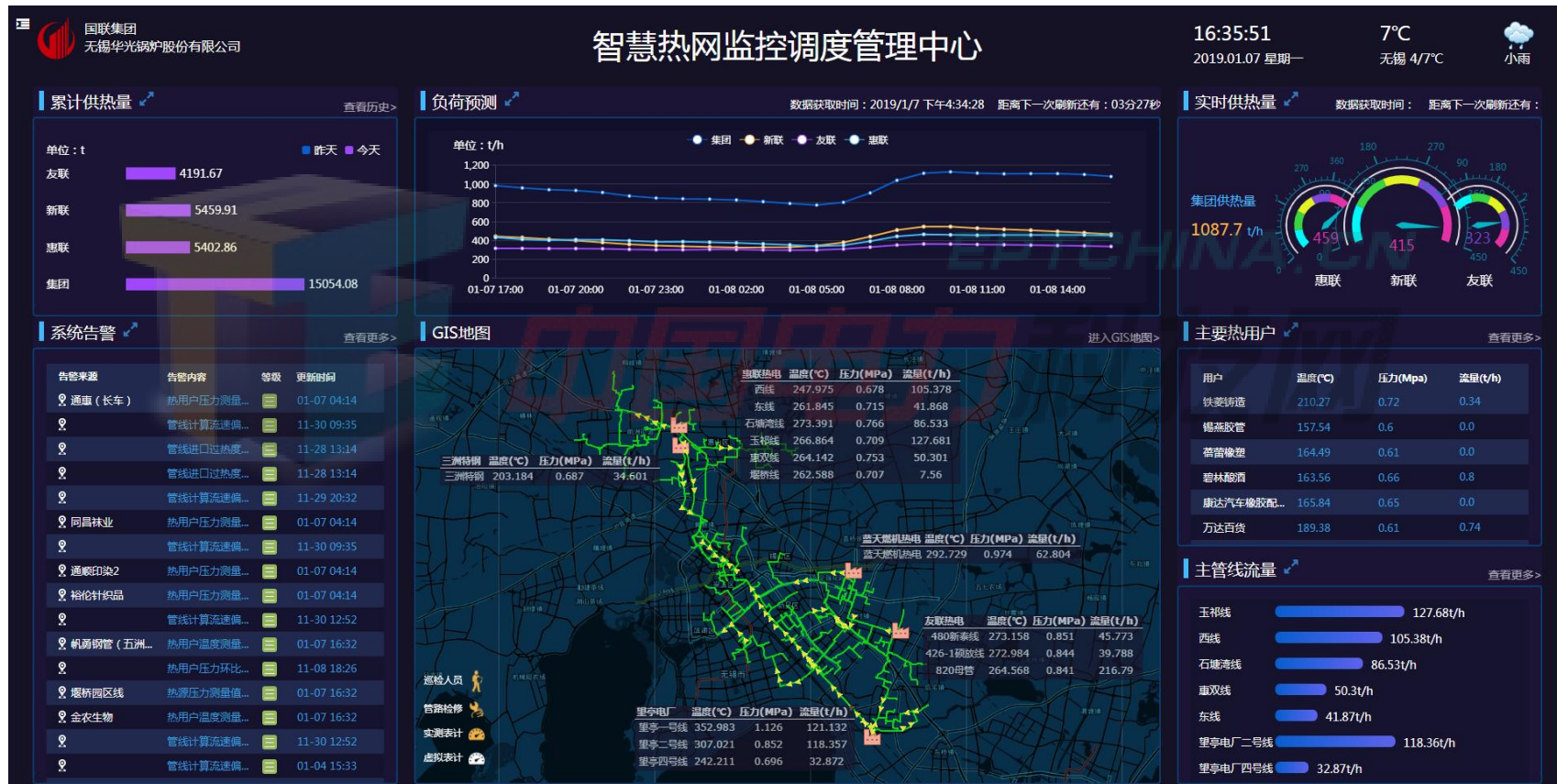
无锡国联多源联网蒸汽供热系统调度决策

基于预测性调控缓解长距离供热参数严重滞后问题





无锡国联多源联网蒸汽供热系统调度决策

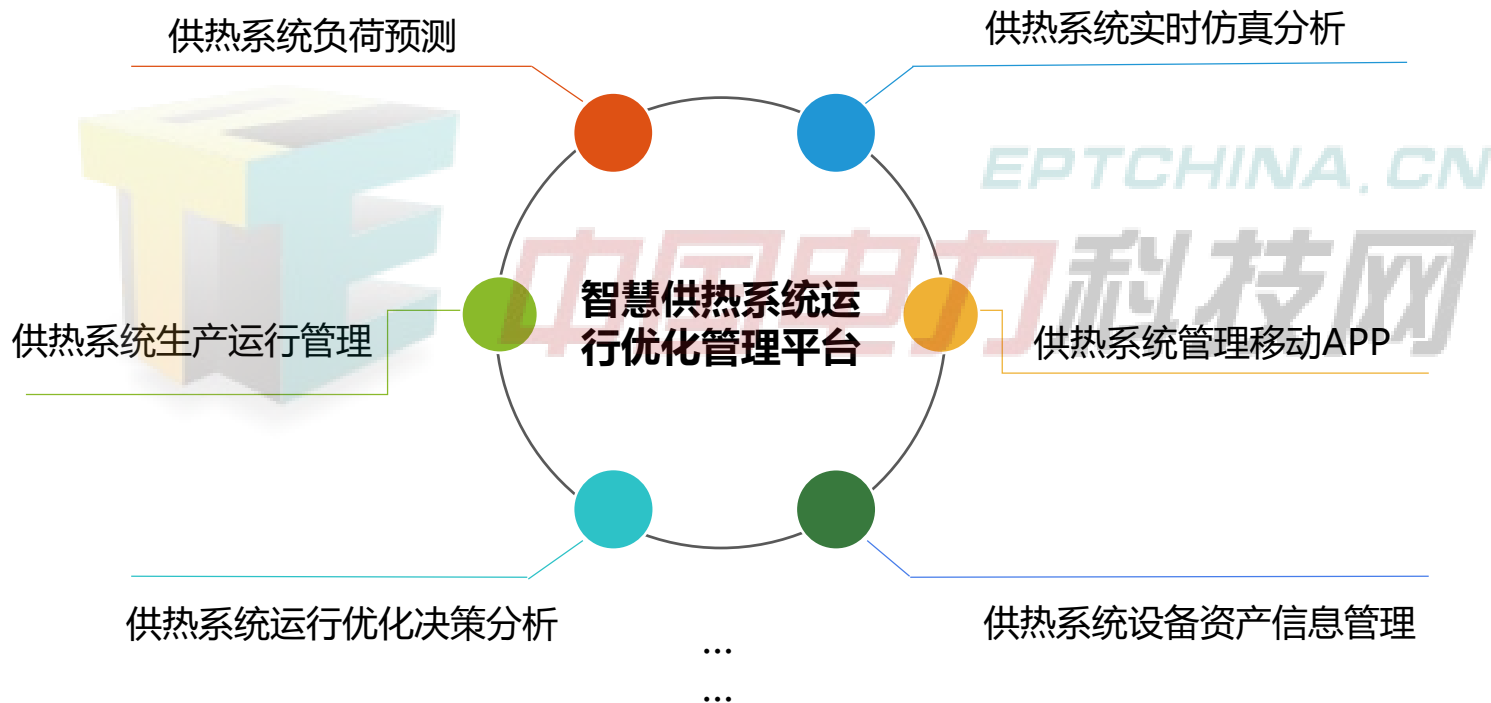


96



无锡国联多源联网蒸汽供热系统调度决策

平台包含**物联感知、离线仿真、实时仿真、负荷预测、运行优化决策分析**等功能





上海市信息化发展专项资金项目

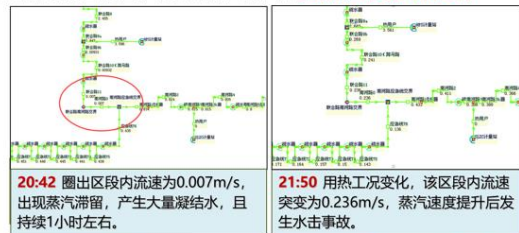
客户单位：上海漕泾热电（为亚洲最大上海化工区供热）

经济效益：供热生产全过程能耗**降低1.06%**

保障安全：有效防范**水击事故**，保障化工区**安全稳定**运行

实施内容：上线智慧供热优化调度决策支持平台

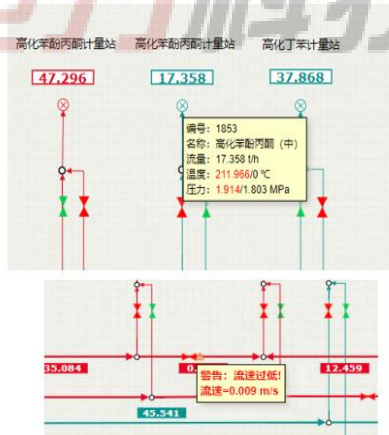
◆ 基于管网结构机理模型，实现蒸汽管网**事故工况分析诊断**



南河路管段内蒸汽流速示意图



◆ 基于管网结构机理模型和实时数据分析，实现蒸汽管网的**安全及经济参数诊断预警**



系统报警

按时间顺序展示报警

查看更多>

告警来源	告警内容	告警等级	更新时间
工业气...	压力过低	低	2018-10-24 0...
东线中...	流速过高	高	2018-08-31 1...
天华路...	流速过高	高	2018-08-31 1...
州工路...	流速过高	高	2018-08-31 1...
州工路...	流速过高	高	2018-08-31 1...
州工路...	流速过高	高	2018-08-31 1...



提纲 Outline

1 研究背景

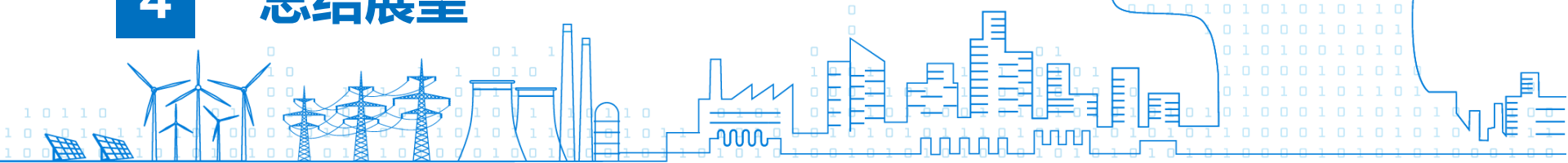
2 研究内容

3 应用案例

4 总结展望



EPTCHINA
中国电力科技





城市供热系统的智慧化运行：清洁低碳、安全高效



人工经验决策



机器模型辅助决策

城市供热系统供需在时间和空间上的双重匹配



安全



管网压力降低、不发生爆管、水击等事故

清洁



燃料消耗减少，雾霾减少

高效



科学调度决策，给出最经济的运行方案

舒适



提供舒适的温度，稳定的蒸汽



在应用中发展智慧供热技术价值

1. 将供热系统中人、机、物，**“源-网-荷-储”** 全过程要素连接起来，实现系统全局综合分析和统筹优化调控；
2. 基于工业互联网的**供热系统泛在感知与精细化治理能力**，综合运用多源数据，全面提升供热系统管控能力，解决规模大与精度细之间的矛盾；
3. 实现供热专业知识与生产经验的软件化与自动化，借助信息系统承载知识和经验，辅助和提升人的思考和决策水平，实现**系统状态分析、故障诊断、优化调控等人工智能功能**。





谢谢大家！
欢迎各位专家交流指导！



EPTCHINA

中国电力科技网