

# 开展综合能源系统仿真平台与示范工程建设

## 推动3060双碳目标实现

曾 鸣

华北电力大学能源互联网研究中心  
中国能源研究会能源互联网专委会



# 目录

- 1/ **综合能源系统助力双碳目标**
- 2/ **综合能源系统建模与仿真研究**
- 3/ **综合能源系统示范建设**

# 1 综合能源系统助力双碳目标

**实现3060双碳目标、建设新型电力系统，旨在控制和缩减化石能源消费量、增加可再生能源发电比例、提升整体能效水平。**

**围绕“两高三低”目标<sup>1</sup>（用能效率提高、供能可靠性提高、用能成本降低、碳排放降低和其他污染物排放降低），遵循“横向多能互补、纵向源网荷储协调”<sup>2</sup>，建设综合能源系统，发展综合能源服务，推动电力系统的“清洁化”“综合化”“智能化”与“准中心化”发展<sup>3</sup>，是助力破解能源“不可能三角”问题、保障新型电力系统建设及3060双碳目标实现的关键所在。**

## 专题深思

35074\_350741 题图

习近平主席指出：“十四五”时期，我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动降碳协同增效、促进经济社会全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。如期实现碳达峰、碳中和目标，需要着力构建综合能源系统，改变传统能源系统建设路径和发展模式，大力推动能源生产和消费革命，奋力打好实现碳达峰碳中和这场硬仗。

推动能源行业高质量发展。习近平主席强调：“能源安全是国家经济社会发展的重要基础，必须立足我国能源禀赋，坚持先立后破、有序替代，对国家能源发展、人民生活改善、社会治理久安至关重要。”构建综合能源系

## 构建综合能源系统 打好实现碳达峰碳中和这场硬仗

制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。构建综合能源系统，是在坚持综合化的发展思路，创新智能化的发展手段，发挥以新能源为主体的新型电力系统优势，实现能源系统内部各环节综合化发展思路，致力于打破能源子系统之间以及子系统内部源、网、荷、储多环节的技术、管理和市场壁垒，实现煤电、气电等传统电源与风电、太阳能发电等新能源互补利用，支撑新型电力系统中大规模新能源的顺利消纳。综合能源系统通过创新智能化的发展手段，深化云计算、大数据、物联网、移动通信、人工智能、区块链和边缘计算等现代信息技术在能源领域的融合应用，充分挖掘海量数据作为重要生产要素的潜在价值，打造新型电力系统发展新模式。综合能源系统通过建设去中心化的体制机制，能够有效优化能源资源配置，实现能源系统优化运行、分散决策、促进大网与分布式能源双向互动以及分布式节点协同自治，支撑新型电力系统中分布式新能源的规模化发展。

辅助绿色低碳发展高水平实践。习近平总书记指出：“实现碳达峰、碳中和是我国向世界作出的庄严承诺，也是我国广泛深厚的经济社会共识，必须轻轻松松就能实现的。”实现碳达峰、碳中和是一项复杂的系统工程，需要综合考虑区域的资源禀赋、产业结构以及各行各业的能源消费特点，互补短板，在统筹谋划中不断优化各环节、各行业的碳达峰、碳中和行动方案。综合能源系统能够推动不同能源环节、主体间的协同互动，通过清洁能源发电设备、多能耦合转换设备、能量存储设备以及泵、阀、储冷调温技术的规模化应用，增强能源生产、传输、存储、消费等各环节的灵活性，有效统筹不同区域、不同行业发展情况，辅助相关部门在推动绿色低碳发展方面提升决策水平，有力促进经济社会发展全面绿色转型。

（作者为华北电力大学经济与管理学院教授）



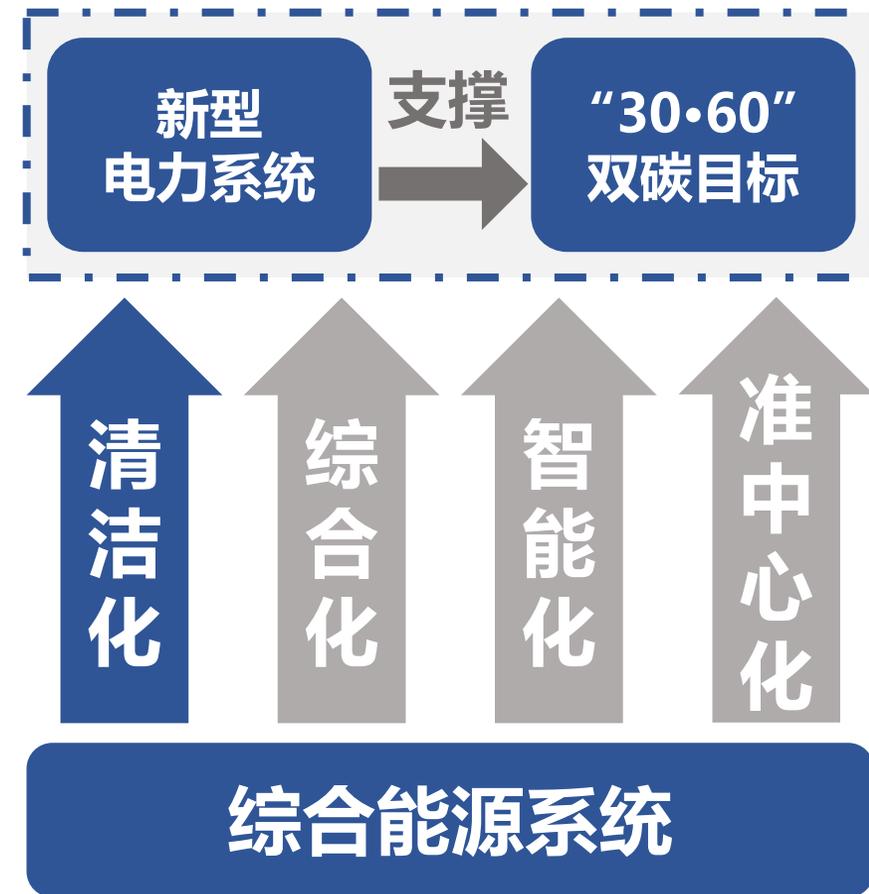
1. 构建综合能源系统[N]。人民日报，理论版（第九版）， 2018-4-9
2. 利用能源互联网推动能源革命[N]。人民日报，理论版（第九版）， 2016-12-5
3. 构建综合能源系统 打好实现碳达峰碳中和这场硬仗 [N]。人民日报，理论版（第九版）， 2021-7-28

# 1 综合能源系统助力双碳目标

## 清洁化

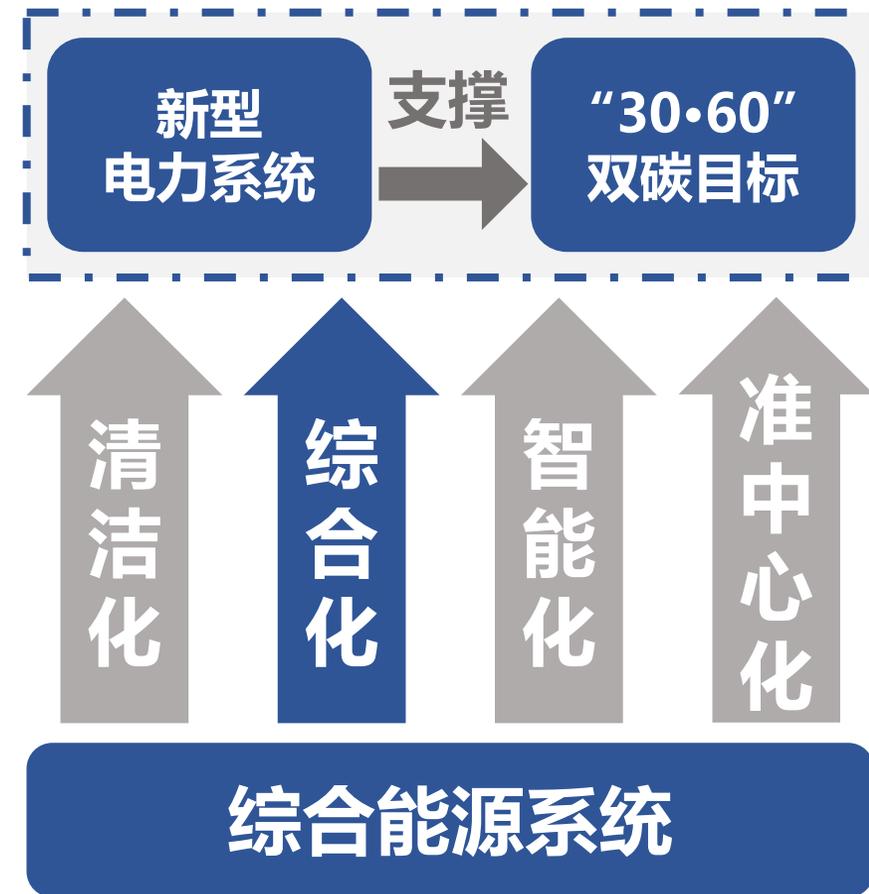
**在供给侧**，建设不同规模的综合能源系统，推动大网、微能网及分布式等各级能源网络协调互联互通，优化能源系统网络格局，**支撑可再生能源大规模跨省跨区消纳以及分布式可再生能源的规模化经济利用**，改善能源生产和供应模式，**提升可再生能源在生产端的结构占比**；

**在需求侧**，拓展综合能源服务，发掘需求侧消纳绿色电力、节能增效管理以及购买绿色证书等多样化需求，**充分发挥和调动需求侧消纳可再生能源的潜力与积极性**，提升可再生能源在消费端的结构占比。



## 综合化

在**供给侧**有效整合风、光、水、天然气、煤炭等多类型能源资源，在**需求侧**整合电、热、冷、气等多类型能源需求，破除不同能源品类之间的壁垒，围绕“两高三低”目标规划、建设及运营综合能源系统，探索多类型电源协同运行、多类型能源需求转换替代等技术，**为可再生能源的消纳提供充足的灵活性资源与辅助服务，有效解决可再生能源出力波动平抑和出力追踪等难题。**

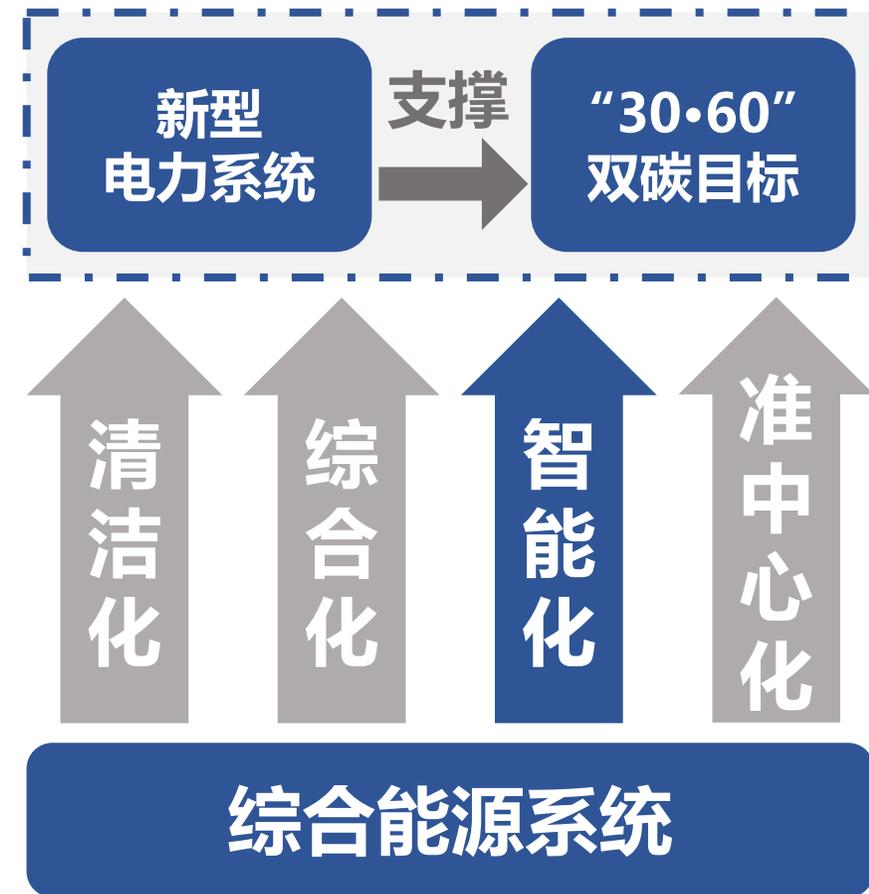


# 1 综合能源系统助力双碳目标



## 智能化

顺应数字革命潮流，推广“云大物移智链”等数字信息技术在能源电力系统各环节的应用，建设以能源物联网为基础的综合能源系统，在实现对能源生产、传输、交易、消费多环节即时化感知与监测的基础上，**加速能源信息的流动与共享，充分发掘能源大数据作为新时期重要生产要素的潜在价值**，支撑能源电力系统的源-网-荷-储运行及动态优化。

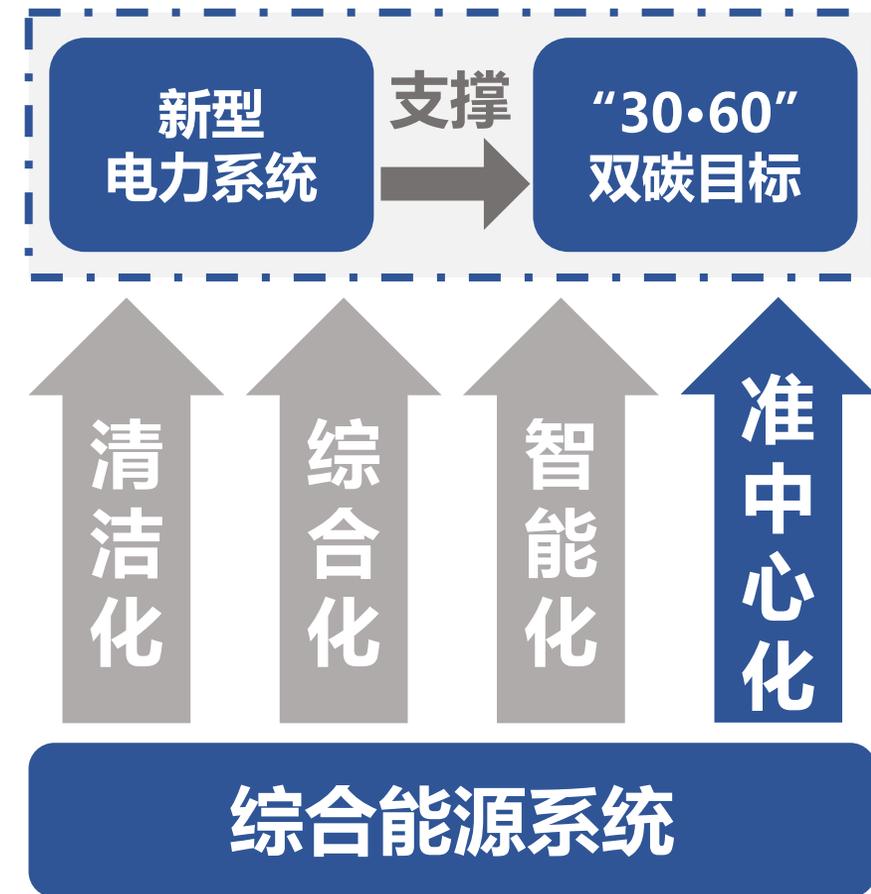


# 1 综合能源系统助力双碳目标

## 准中心化

**在规划运行层面推行能源电力系统准中心化调度**，推动实现集中式新能源的广域调度优化决策、大电网与分布式微能网的双向互动以及分布式节点的协同自治，提升跨区跨省能源调配和就近能源资源配置消纳的综合效率；

**在体制机制层面推动能源行业准中心化发展**，围绕电力系统核心枢纽建设互惠共赢能源生态圈，通过数字手段和共享机制打通系统中各节点、各主体间的服务流、信息流、资金流，实现生态共荣与产业共建。





目录

- 1/ 综合能源系统助力双碳目标
- 2/ 综合能源系统建模与仿真研究
- 3/ 综合能源系统示范建设

# 2 综合能源系统建模与仿真研究

## 2.1 综合能源系统建模与仿真框架

综合能源系统规划、运行优化的核心目标是实现“**两高三低**”，即系统综合能效的提高、系统运行可靠性的提高、用户用能成本的降低、系统碳排放的降低和系统其它污染物排放的降低。鉴此，综合能源系统仿真平台的研究和搭建主要涵盖以下5方面功能：



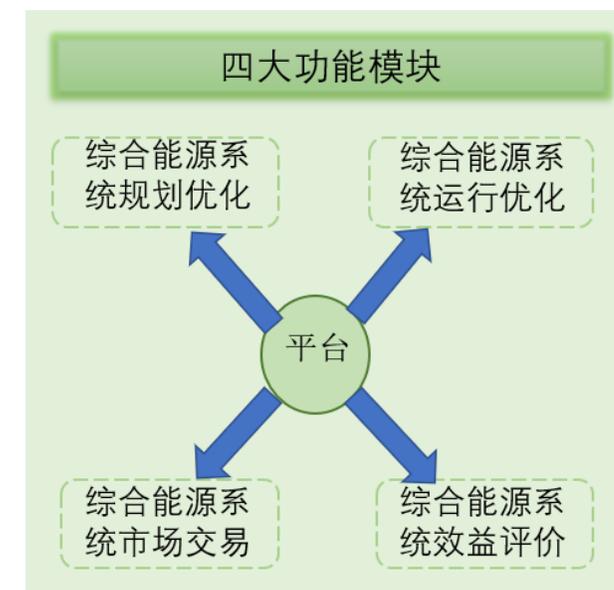
综合能源系统耦合建模

综合能源市场交易仿真建模

综合能源系统规划优化建模

综合能源系统运行优化建模

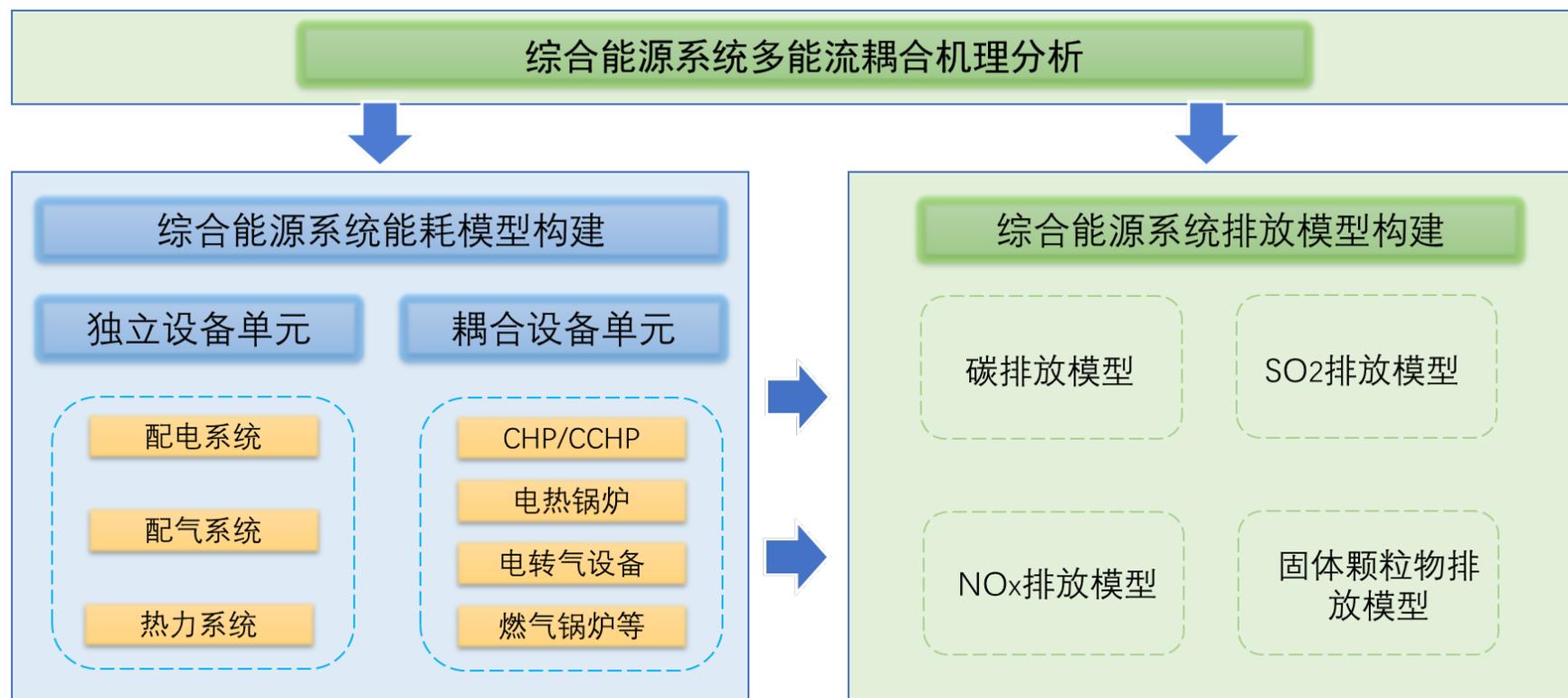
综合能源系统综合效益评价建模



# 2 综合能源系统建模与仿真研究

## 2.2 综合能源系统耦合建模

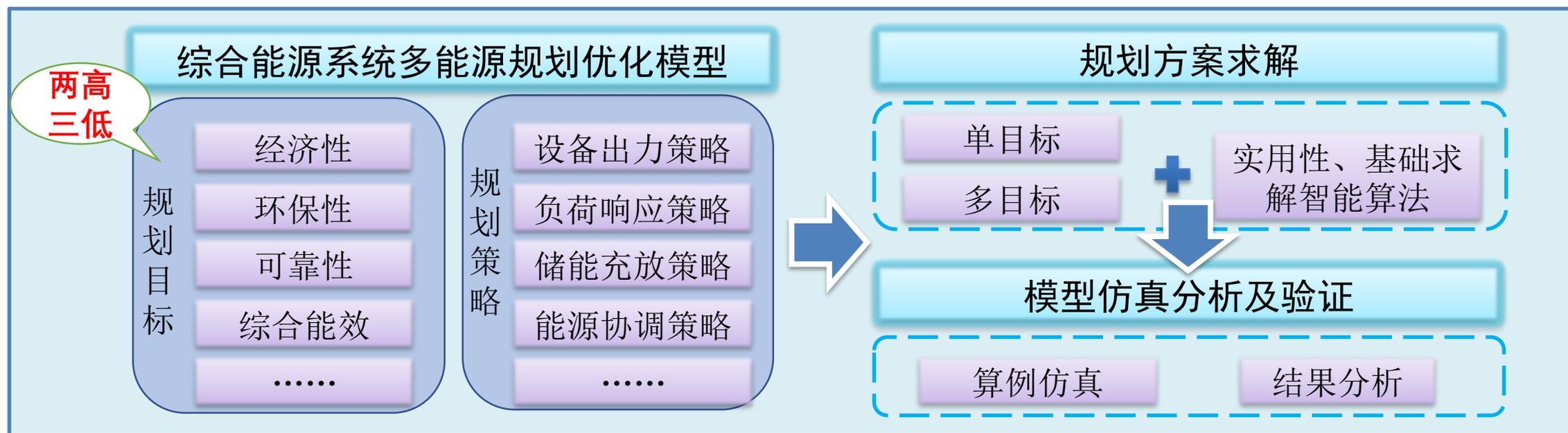
深入到设备组件层级，明确综合能源系统主要产能、传输、用能设备的能耗、排放模型。以设备内含工质的能质属性和耦合特性为建模边界，构建各独立、耦合设备的物理特性模型、经济性模型及碳排放模型，**建立综合能源系统规划、运行仿真及效益评价的基础模型库。**



## 2 综合能源系统建模与仿真研究

### 2.3 综合能源系统规划优化

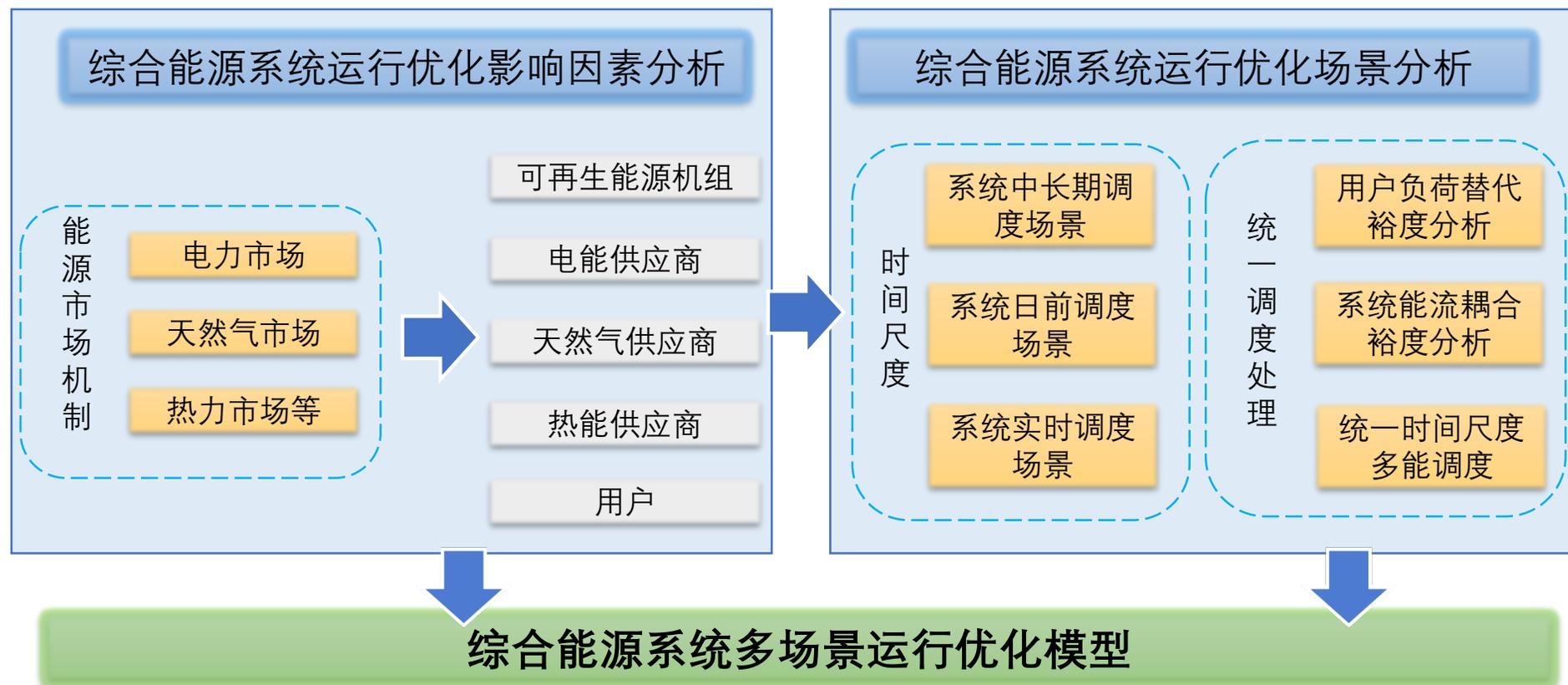
考虑系统平衡约束、容量约束、机组爬坡约束等基础约束条件，**建立基于“源-网-荷-储”协调的综合能源系统规划优化模型**，实现对规划方案的综合优选、决策，解决在多种能源互补、多能源耦合传输、多元负荷响应及转化和多种储能技术条件下综合能源系统规划优化问题。



# 2 综合能源系统建模与仿真研究

## 2.4 综合能源系统运行优化

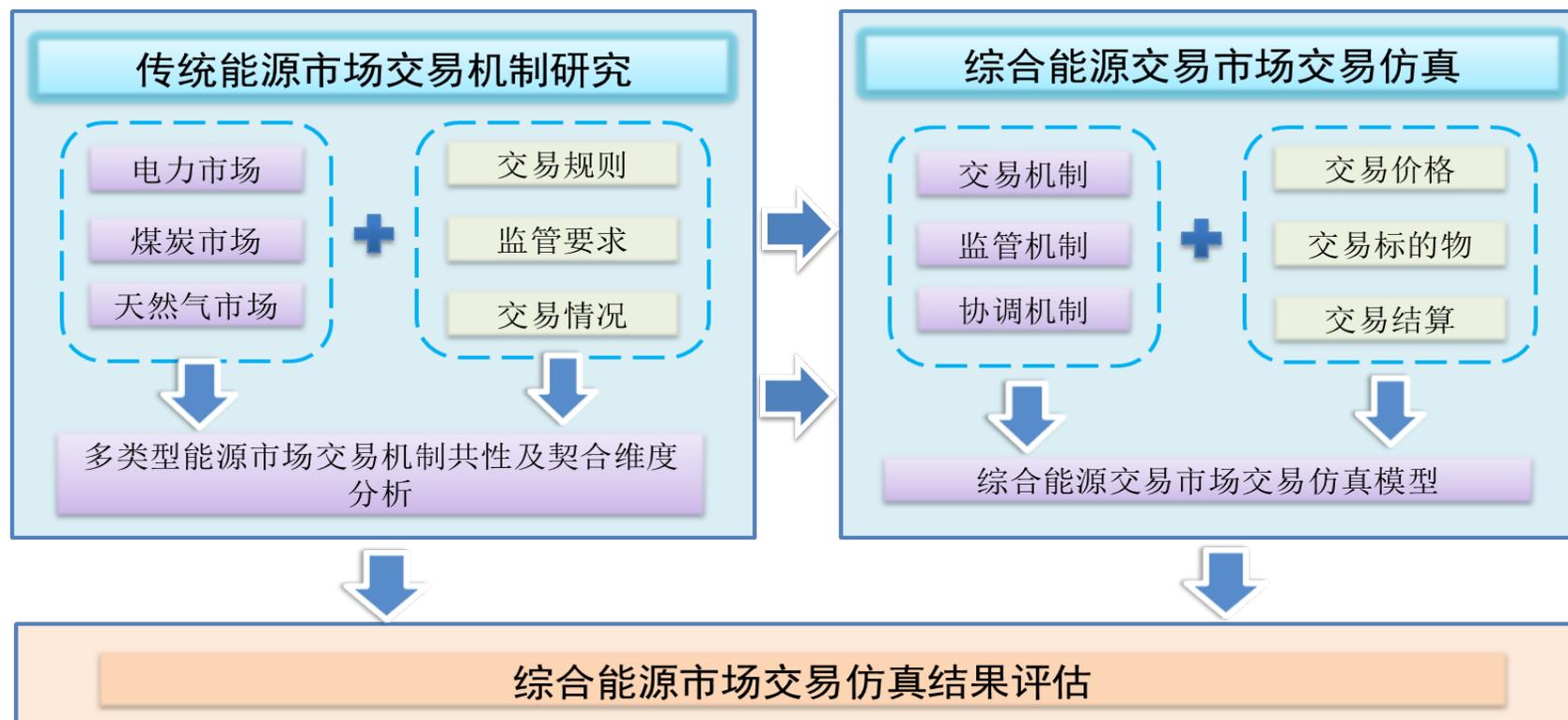
考虑电、气、热不同能量调度的时间尺度和物理特性差异，构建基于**源侧多能互补**、“**源-网-荷**”**协调互动**的综合能源系统单目标或多目标运行优化模型，**解决综合能源系统多场景运行优化问题。**



# 2 综合能源系统建模与仿真研究

## 2.5 综合能源系统市场交易

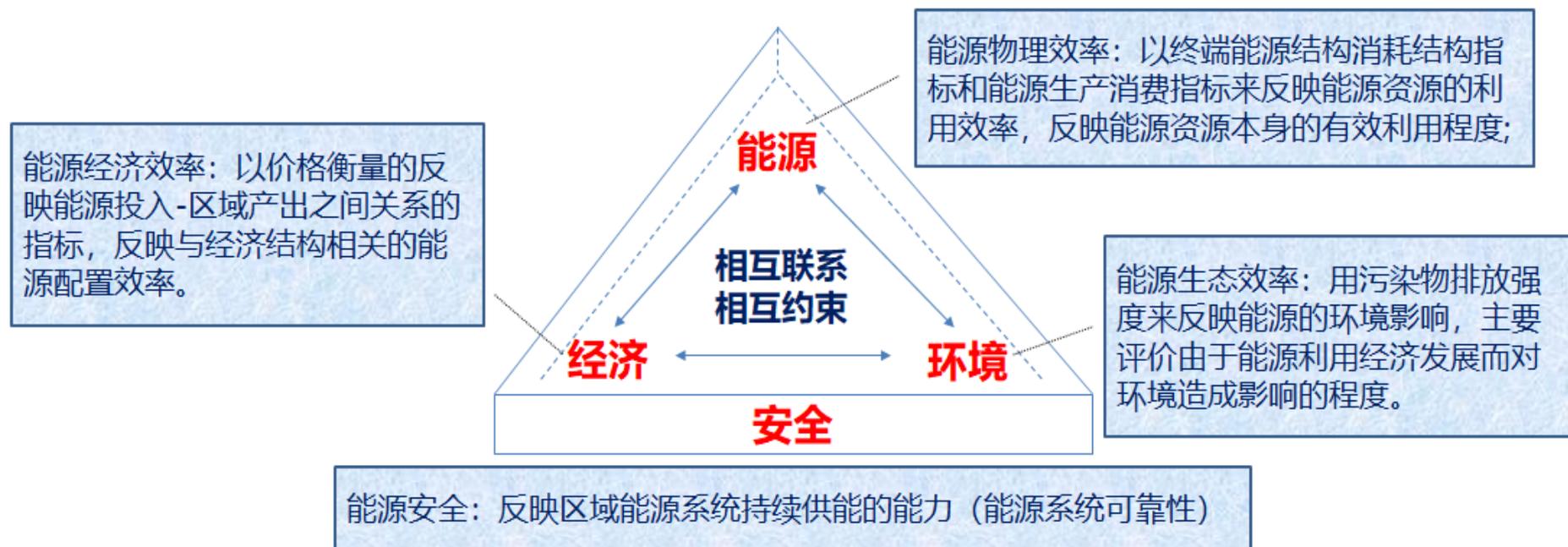
考虑我国传统能源市场的交易机制和监管要求，分析各类型能源在统一能源市场下交易的可能性，提出面向区域综合能源系统的中长期、日前、现货等市场交易框架机制，**构建统一市场下的综合能源系统交易机制及仿真模型**，实现交易场景的仿真与评估。



## 2 综合能源系统建模与仿真研究

### 2.6 综合能源系统效益评价

综合考虑综合能源系统的物理效益、经济效益、环境效益及安全效益，涵盖分布式能源、中低压配电网、天然气网络、供热系统、供冷系统、储能等系统，结合社会用能对环境的影响和用户用能体验，**建立“3E+S”的综合能源系统综合效益评价模型**。其中，“3E”指的是能源子系统(Energy)、经济子系统(Economy)、环境子系统(Environment)，“S”指的是能源系统的安全性(Safety)。能源系统、经济系统、环境系统相互作用、相互关联，而安全性是能源系统的基石。





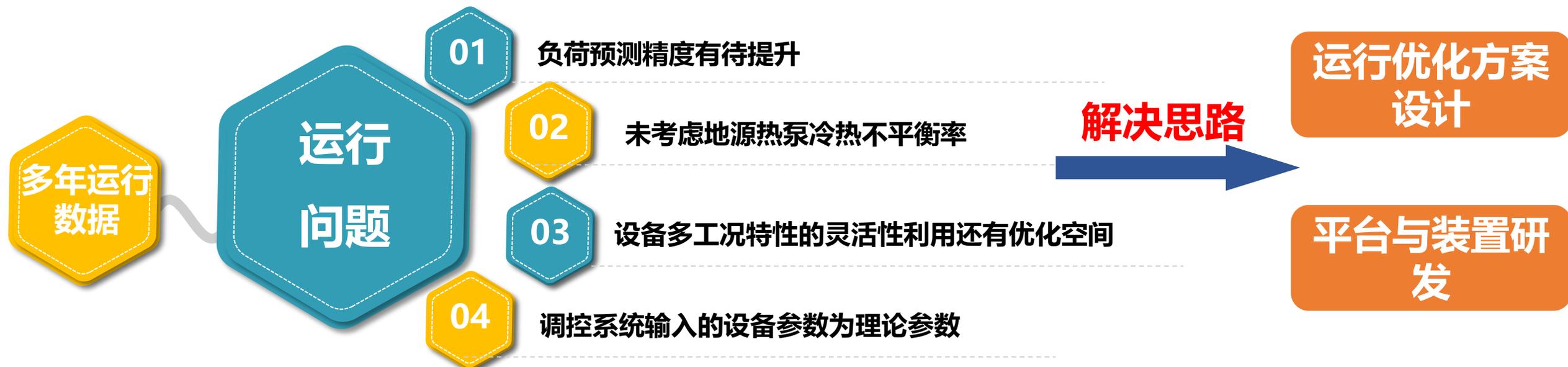
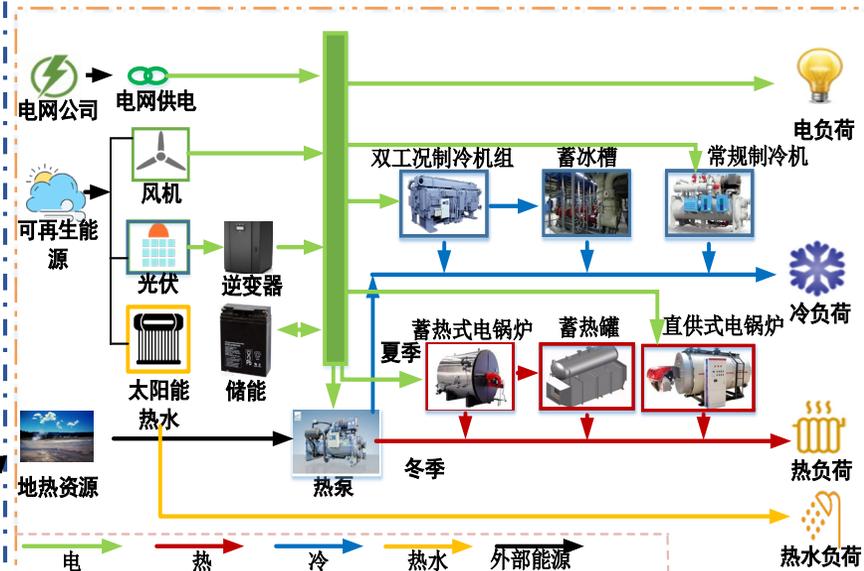
# 目录

- 1/ 综合能源系统助力双碳目标
- 2/ 综合能源系统建模与仿真研究
- 3/ 综合能源系统示范建设

### 3 综合能源系统建设案例

依托综合能源系统仿真平台，在**国网客服中心南方园区开展落地示范应用**。南方园区配有“八大系统+一个平台”，包括地源热泵系统、冰蓄冷系统、等系统以及能源互联网调控平台。

示范工程针对园区存在的**调度方法与运行参数不完善、不准确等问题**，在满足用户负荷的前提下，以符合实际运行为标准，**优化升级能源系统供应调度方案**，有效提高能源利用效率和降低污染物排放水平。



# 3 综合能源系统建设案例

## 3.1 运行优化方案设计

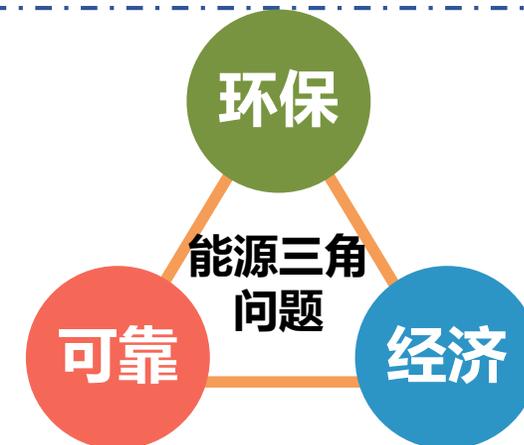
南方园区综合能源系统优化方案设计主要包括**优化模式、优化目标、优化流程和优化算法**四部分。

### 优化模式设计

南方园区优化模式设计主要包括**日前优化、循环优化、监测优化**三个部分。其中，**日前优化**基于日前负荷预测数据优化园区次日各设备供能策略，输出各设备24小时的运行状态；**循环优化**是建立在日前优化基础上，根据实际负荷情况，每小时滚动校正日前优化结果；**监测优化**是对园区供能系统状态开展实时监测，当负荷波动或设备运行异常时有效保障供能系统稳定运行。

### 优化目标设计

南方园区综合能源系统运行优化目标设计充分发挥了综合能源系统“横向多能互补，纵向源网荷储协调”的特性，有效兼顾系统环保性、可靠性、经济性三大目标，为能源不可能三角的破解提供了重要参考。



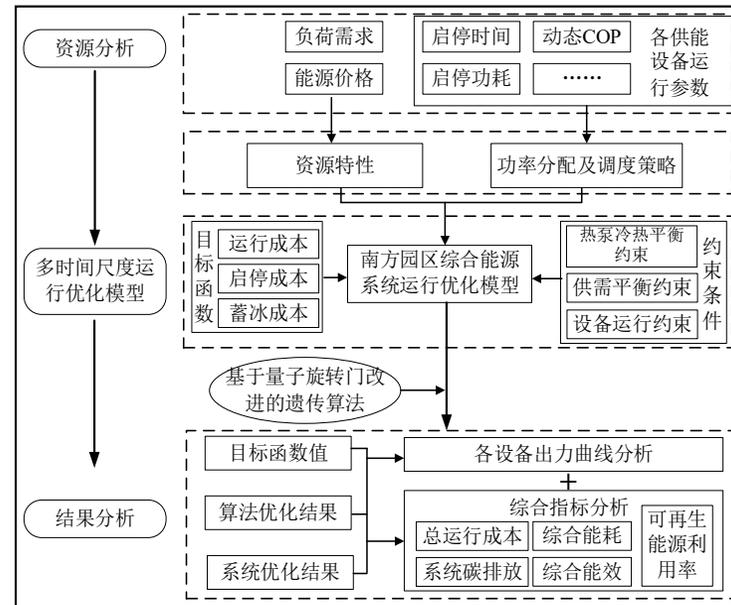
# 3 综合能源系统建设案例

## 3.1 运行优化方案设计

### 优化流程设计

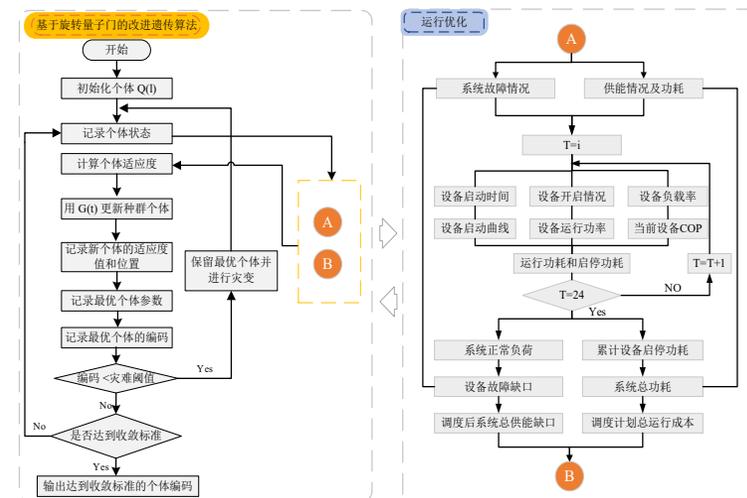
南方园区综合能源系统运行优化总体流程主要包括**资源分析**、**运行优化**以及**优化结果分析**三个部分。

其中，**资源分析**主要是通过建模和数据挖掘，掌握南方园区中设备与负荷的特性；**运行优化**是以安全、环保、经济为多目标，建立南方园区综合能源系统运行优化模型；**结果分析**将从经济效益、环境效益、综合能效等维度，分析评价系统优化结果。



### 优化算法设计

南方园区优化方案中主要采用了基于量子旋转门的改进遗传算法，该方法结合量子计算与进化算法优势，以量子态特性为基础，不断更新量子旋转门来更新和优化种群，达到对多目标的平衡与函数的寻优。



# 3 综合能源系统建设案例

## 3.2 平台与装置研发

南方园区综合能源系统优化控制平台与装置研发主要包括**系统优化及服务**平台研发和**分散控制装置**研发两部分。

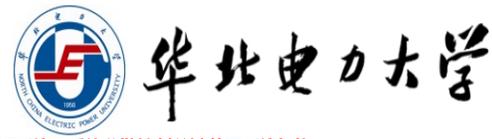
### 系统优化及服务平台研发

以“运行优化”为核心，以“前期准备→功能部署→效果评估”为三维保障，将调度优化技术与实际需求充分结合，设计研发了包含**负荷预测模块、调度优化方案模块、调度方案分析模块和基础参数设置模块**4大功能的**国网客服中心南方园区综合能源系统异质能流联动优化平台**，实现南方园区能源系统的“**智能管理、综合调控、经济低碳运行**”的目标。



# 3 综合能源系统建设案例

## 3.2 平台与装置研发



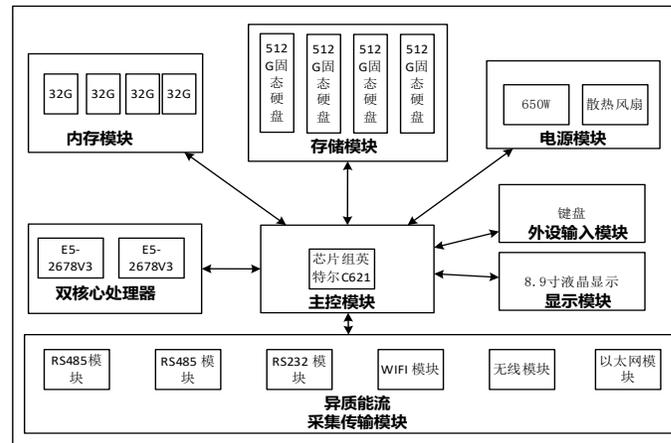
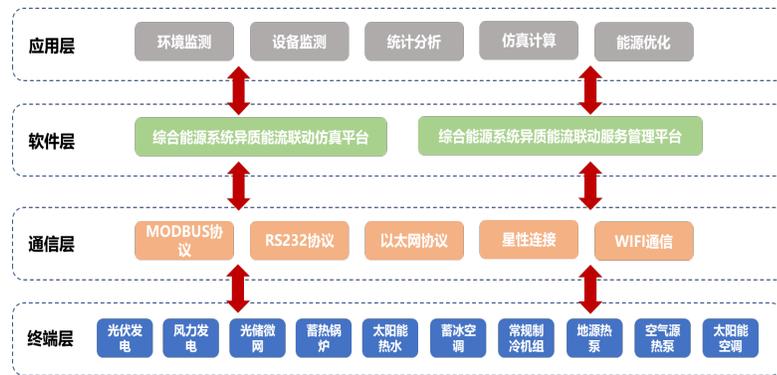
### 分散控制装置研发

南方园区综合能源系统控制装置采用了**基于CPS技术的终端、通信、软件和应用四层次体系架构**。

**终端层**包括用能、供能设备（分布式设备）和装置通信设备等；**通信层**包括各类常见通信协议；**软件层**包括综合能源系统异质能流联动仿真平台和综合能源系统异质能流联动服务管理平台；**应用层**面向客服不同服务主体提供各项服务。

另外，分散控制装置还具备运行环境监测和外部数据接口状态监测功能，所有的监测信息均可以实时显示在装置的显示屏上。

基于CPS技术的综合能源系统异质能分散控制关键装置系统架构



综合能源系统异质能流分散控制关键装置硬件结构



# 3 综合能源系统建设案例



华北电力大学

## 3.3 案例建设成效

### 实际应用运行效果

2020年10月21日起正式调控，选取历年10月21日至次年9月30日的运行效果进行同比分析，结果分别如表所示。发现经过综合能源系统运行优化及调控后，与历史同期相比，**2021年全年实现降碳1131吨，节约经济成本22.6万元，综合能效提升10.58%。**

能源系统	2018年	2019年	2020年	2021年	2021年较2018年	2021年较2019年	2021年较2020年
总用电量 (kWh)	4301671	4007845	3942510.273	3565431	-17.12%	-11.04%	-9.56%
总供冷热量 (kWh)	17298814	17092163	14544962	16813673	-2.80%	-1.63%	15.60%
总碳排放 (t)	4289	3996	3931	3555	-17.12%	-11.04%	-9.56%
总成本 (元)	2326256	2231654	1983913	2053456	-11.73%	-7.99%	3.51%
综合能效	4.02	4.26	3.69	4.72	17.27%	10.58%	27.82%
单位供冷热量成本 (元/kWh)	0.1345	0.1306	0.1364	0.1221	-9.18%	-6.46%	-10.46%
单位供冷热量碳排放 (kg/kWh)	0.2479	0.2338	0.2702	0.2114	-14.72%	-9.57%	-21.77%

供热季 (10月至次年4月)	2017年	2018年	2019年	2020年	2020年较2017年	2020年较2018年	2020年较2019年
地源热泵用电量 (kWh)	1347115	1461709	956546	1460297	8.40%	-0.10%	52.66%
电锅炉用电量 (kWh)	915270	593956	1071210	88385	-90.34%	-85.12%	-91.75%
总用电量 (kWh)	2262385	2055665	2027756	1548682	-31.55%	-24.66%	-23.63%
供热量 (GJ)	26408	27289	20192	25536	-3.30%	-6.43%	26.46%
碳排放 (t)	2256	2049	2022	1544	-31.55%	-24.66%	-23.63%
综合能效	3.24	3.69	2.77	4.58	41.26%	24.21%	65.58%
总成本 (元)	1159678	1132388	956374	971967	-16.19%	-14.17%	1.63%
单位供热量成本 (元/GJ)	43.91	41.50	47.36	38.06	-13.32%	-8.27%	-19.64%
单位供热量碳排放 (kg/GJ)	85.41	75.10	100.12	60.47	-29.21%	-19.49%	-39.61%

供冷季 (5月至9月)	2018年	2019年	2020年	2021年	2021年较2018年	2021年较2019年	2021年较2020年
地源热泵用电量 (kWh)	1560917	1444034	457892	1207016	-22.67%	-16.41%	163.60%
冰蓄冷用电量 (kWh)	458669	491899	1155025	671722	46.45%	36.56%	-41.84%
基载机组用电量 (kWh)	19700	16247	301837	138011	600.56%	749.46%	-54.28%
总用电量 (kWh)	2039286	1952180	1914754	2016749	-1.11%	3.31%	5.33%
供冷量 (Rth)	2832856	2704493	2540771	2763799	-2.44%	2.19%	8.78%
碳排放 (t)	2033	1946	1909	2011	-1.11%	3.31%	5.33%
综合能效	4.89	4.87	4.67	4.82	-1.35%	-1.08%	3.28%
总成本 (元)	1166579	1099266	1027540	1081488	-7.29%	-1.62%	5.25%
单位供冷量成本 (元/Rth)	0.41	0.41	0.40	0.39	-4.98%	-3.73%	-3.24%
单位供冷碳排放 (kg/Rth)	0.7177	0.7197	0.7514	0.7275	1.37%	1.09%	-3.17%

---

谢 谢

---