



# 虚拟电厂可信交易研究

上海交通大学 艾芊 教授

2023年5月30日



上海交通大学  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 团队负责人介绍



### 艾芊 教授

上海交通大学电气工程系长聘教授，博士生导师，担任电网技术、电力系统自动化等国内电力领域重点杂志的编委；中国电机工程学会能源互联网专委会委员，中国自动化学会能源互联网专委会委员，IEEE Senior Member。

#### 【研究方向】

电力系统元件建模, 电能质量, 分布式发电, 人工智能以及在电力系统中的应用等.

#### 【项目合作】

国家自然科学基金、重点研发计划、863项目等纵向项目和多项横向课题.

#### 【科研成果】

- 编著与专著：形成编著和专著8部
- 论文：发表学术论文百余篇，其中SCI 36篇，EI 33篇（近三年）
- 科研项目：承担和完成纵向课题5个，横向课题15个（近三年）
- 合作单位：国家电网、南方电网、中国电科院、南网科学研究院、广州供电局、上海电力公司、华东电力设计院、山东电科院、湖北电科院、许继集团……

**1 虚拟电厂及其交易模式**

**2 区块链与可信交易技术**

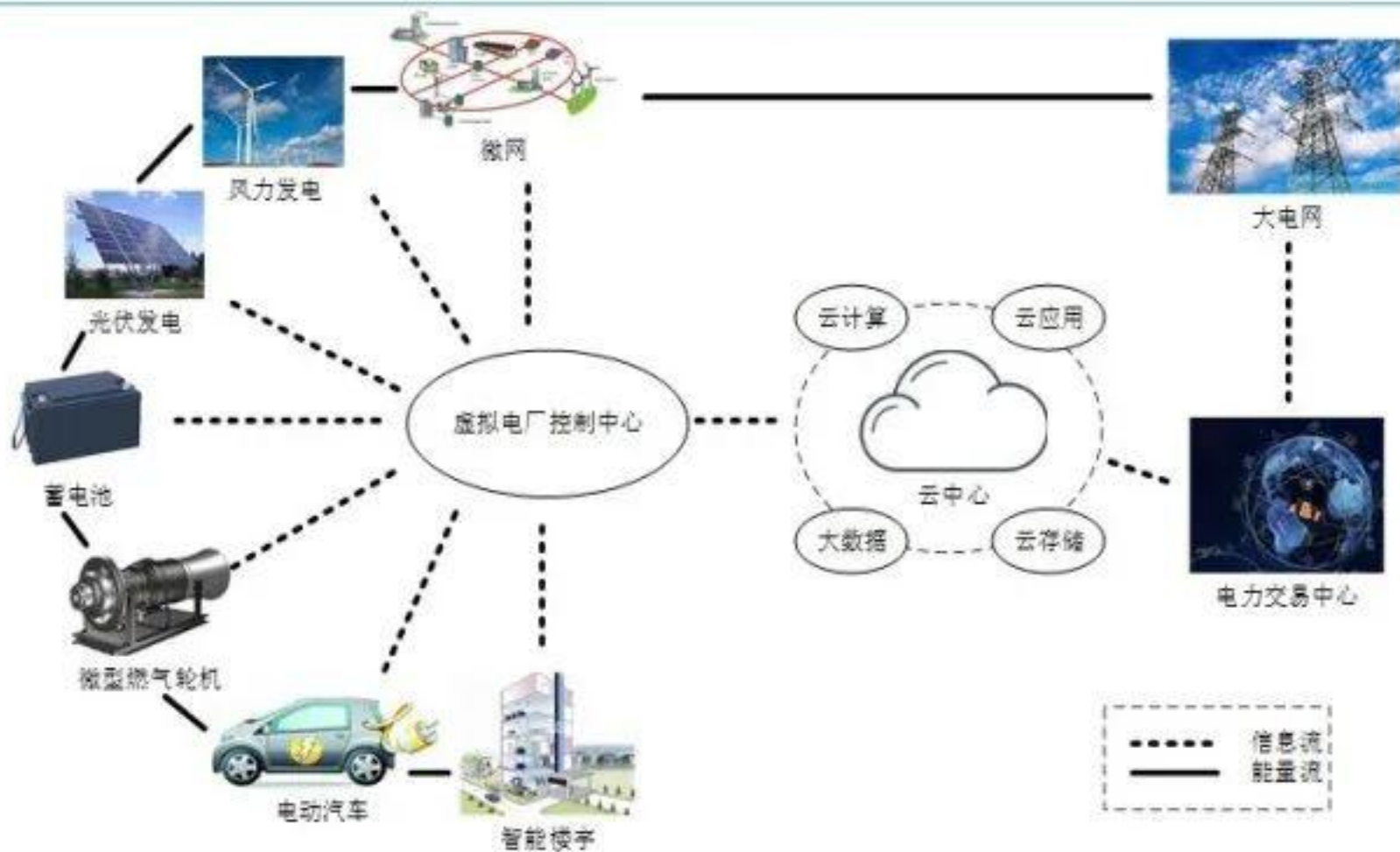
**3 适用于虚拟电厂的可信交易技术**

**4 总结与展望**



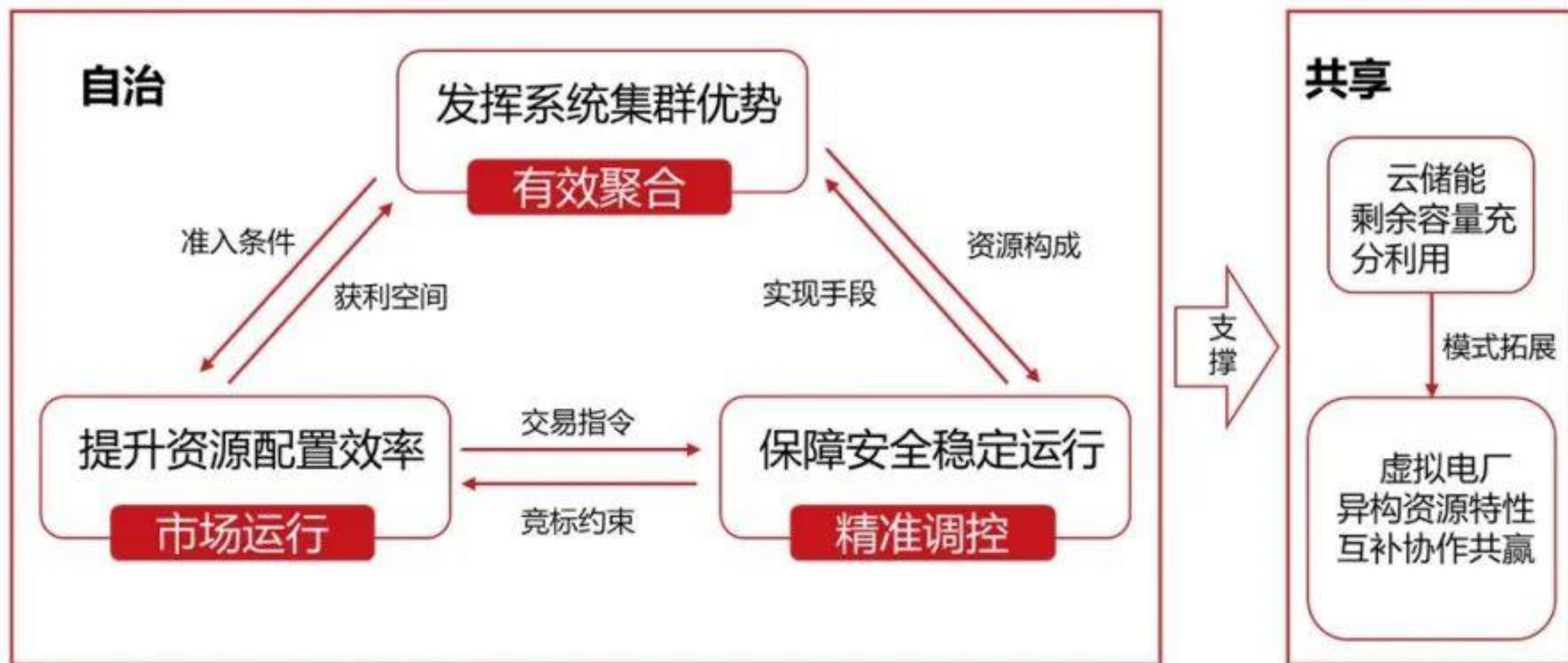
## 虚拟电厂：

虚拟电厂可定义为：由可控机组、不可控机组（风、光等分布式能源）、储能设备、负荷、电动汽车、通信设备等聚合而成，并进一步考虑需求响应、不确定性等要素，通过与控制中心、云中心、电力交易中心等进行信息通信，实现与大电网的能量交互。



## “自治”与“共享”是虚拟电厂的两大关键特征

- 虚拟电厂的“自治”即通过对内运营管理实现有效聚合、市场运行与精准调控的有机统一。
- 虚拟电厂的“共享”即通过不同利益主体间的协调互动和随机互补特性实现多种异构分布式资源的协作共享与利益共赢。



## 虚拟电厂组织分布式交易：

P2P交易：虚拟电厂为内部电源运营商和用户等多利益主体提供内部交易平台。任意发用电主体按照约定好的内容进行交易，无需第三方参加



## 虚拟电厂参与统一电力市场交易：

虚拟电厂作为独立个体，可以以整体参与电力市场交易。

- 从**市场功能**来看，虚拟电厂可参与的市场模式有**能量市场**、**辅助服务市场**等。
- 从**时间尺度**上来看，虚拟电厂可参与的市场模式有**中长期合同市场**、**日前市场**、**日内市场**和**实时市场**。

能量  
市场

常用的模型考虑电网安全约束，经济效益最优。

辅助  
服务  
市场

常用的模型考虑备用容量约束、调峰容量约束等，社会支付服务成本最小。

时间尺度

日前市场

- 目标函数：运行成本最小或经济效益最大
- 约束条件：系统功率平衡约束、机组出力约束、机组爬坡约束、系统旋转备用约束、弃风量、弃光量约束、网络潮流约束、网络节点电压约束、传统机组启停时间约束。

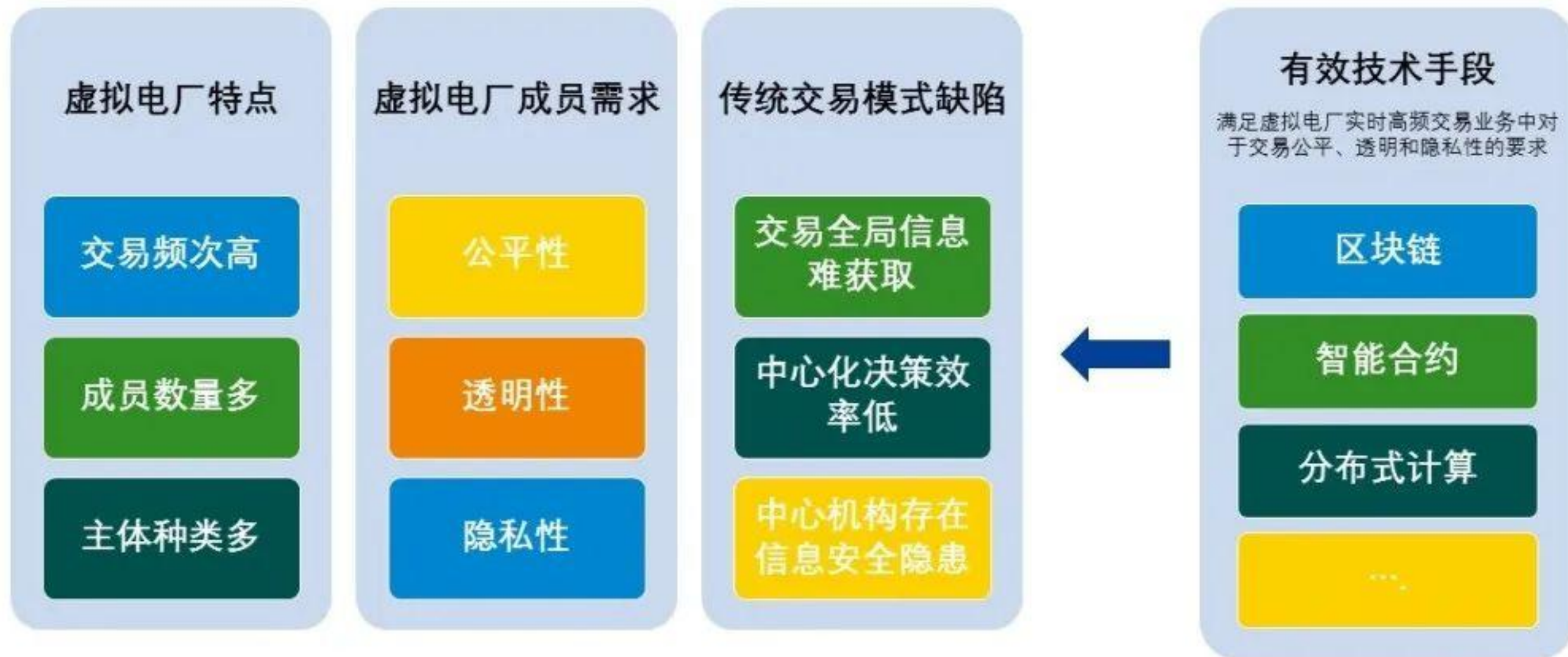
日内市场

- 目标函数：运行成本最小或经济效益最大
- 约束条件：系统功率平衡约束；机组出力约束；机组爬坡约束；系统旋转备用约束；弃风量、弃光量约束；网络潮流约束；网络节点电压约束

实时市场

- 目标函数：最小化调整成本
- 系统功率平衡约束；出力调整量约束；系统旋转备用约束；弃风量、弃光量约束；网络潮流约束；网络节点电压约束

## 传统中心化交易模式缺陷：



## 虚拟电厂可信交易内涵：

交易主客体信息真实

交易过程安全可信

交易可信度评价透明

业务服务符合监管要求和安全规范

1 虚拟电厂及其交易模式

2 区块链与可信交易技术

3 适用于虚拟电厂的可信交易技术

4 总结与展望



## 区块链：

区块链的本质是使用现代密码学技术将共识机制确认的区块按时间顺序追加形成的分布式账本。区块链的应用前提是“去中心化”，目前存在两种主流的应用场景：其一是在信任薄弱或缺失的场景中建立数字信任机制；其二是作为数据共享手段，依靠已有的中心化机构简化烦琐流程，提高协作效率，降低运行成本。

应用

行业去中心化解决方案

解决问题

信任问题

记账问题

数据溯源问题

特点

公开透明

不可篡改

底层技术

共识机制

加密技术

分布式存储

智能合约

**分布式能源交易**是区块链在能源领域的主要应用场景

## 区块链平台：

区块链自身具有不可篡改、全程留痕、可以追溯的技术优势，目前已推广至资源共享、供应链、交通运输、智慧城市等多个应用场景。企业级以太坊(Enterprise Ethereum)和超级账本(Hyperledger)Fabric是两类最具吸引力的企业级区块链平台。

- 以太坊得益于其拥有世界上最大的区块链开发社区和较低的部署、配置及维护成本，应用更广泛。
- ✓ Power Ledger公司在以太坊运营的能源区块链平台致力于提供可持续能源的灵活交易和实时跟踪服务。但由于交易速度和吞吐量的限制，Power Ledger已经宣布将其区块链平台迁移到Solana。
- Fabric支持共识算法、成员管理服务等诸多“即插即用”功能，便于模块化和通用化设计。
- ✓ IBM公司基于Fabric开发了私有区块链平台，确保分布式光伏与电动汽车、家庭储能等小型灵活资源之间能源交互的有效性。

## 共识机制：

区块链通过共识机制，为众多主体获得公平的信息读取权限提供了保障，用户可以随时上线参与交易，对区块信息进行读写，同时也降低了信用成本和管理成本。

共识机制即分布式系统中达成一致的过程，保证各个节点之间协作管理链上信息，适用于VPP与其他机构的**交易、结算**以及**P2P场景**，有利于实时交易清算，避免款项拖欠。

典型的联盟链共识算法包括**拜占庭容错（BFT）、实用拜占庭容错（PBFT）**等拜占庭故障类共识算法

联盟链共识典型步骤：

1. 接受客户端（需求侧）发送的交易记录请求消息；
2. 选择主节点（VPP调控中心）。主节点接收到需求侧的消息后，将交易进行排序整理后转发给区块链的其他节点。
3. 各VPP资源节点根据算法步骤进行多阶段信息验证并反馈。
4. 主节点接收反馈记录上链。

## 智能合约：

智能合约是计算机程序的一种授权技术，可以保证VPP在交易时不引入第三方权威机构使得交易双方履行合约，只要满足交易条件就可以触发交易，并且交易代码不会被修改，减少了人为修改的可能，实现VPP分布式灵活交易与自动结算。

基本合约代码等用于交易过程中的计算。各种代码的触发都是基于“交易事件触发”，智能合约会经过所有代码，将运行的代码事件触发，同时执行。

典型的区块链智能合约部署平台有以太坊、Hyperledger Fabric、enterprise operation system (EOS) 等，其中，最流行的区块链开发平台是以太坊，因为它提供了内置成熟的图灵完备的Solidity编程语言，用于创建智能合约

1 虚拟电厂及其交易模式

2 区块链与可信交易技术

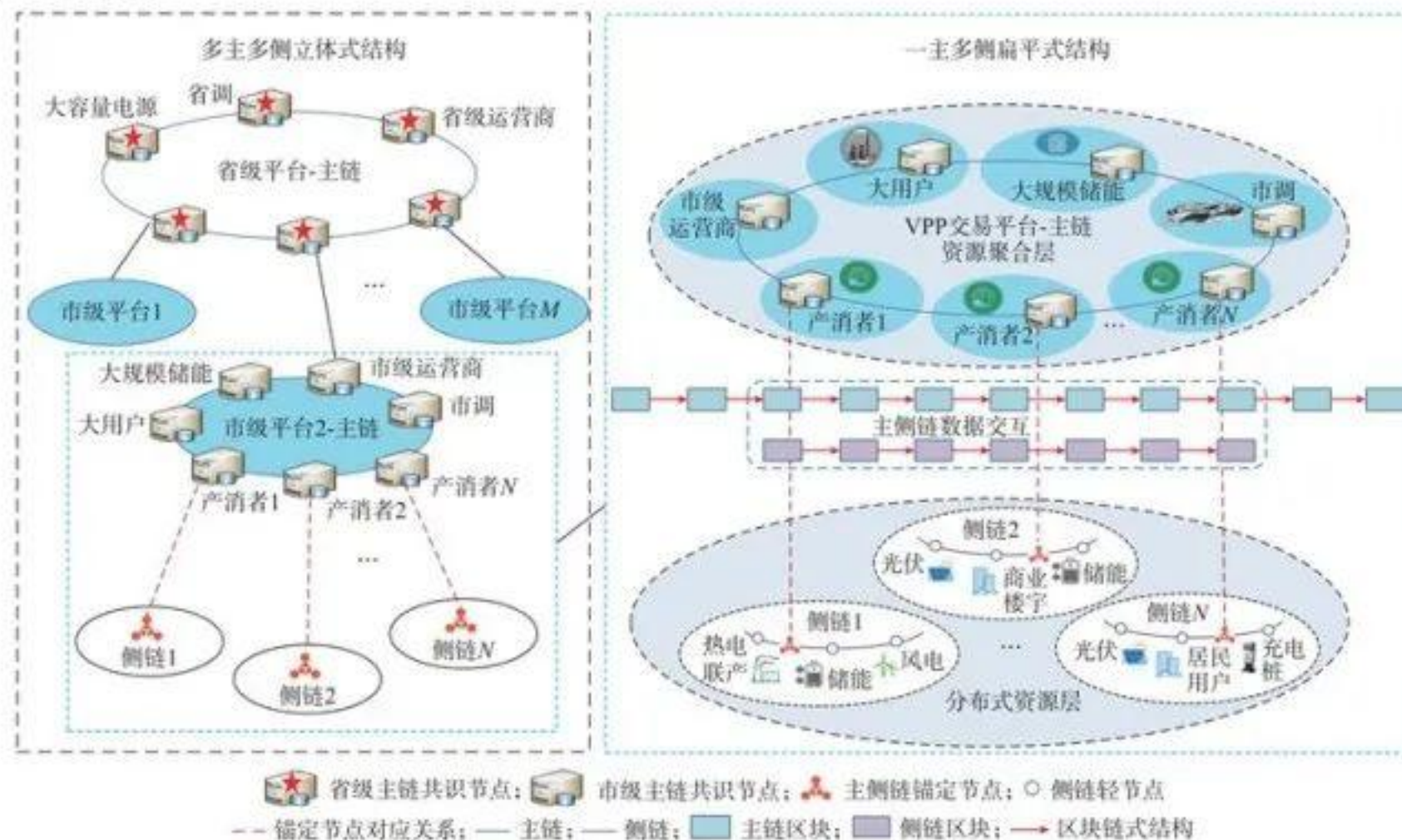
3 适用于虚拟电厂的可信交易技术

4 总结与展望



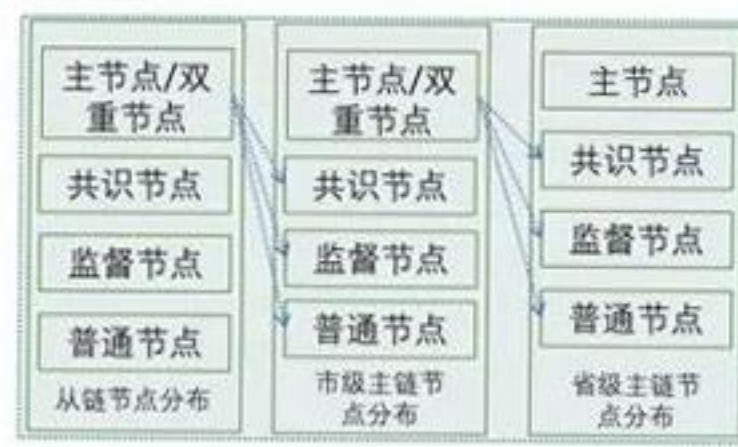
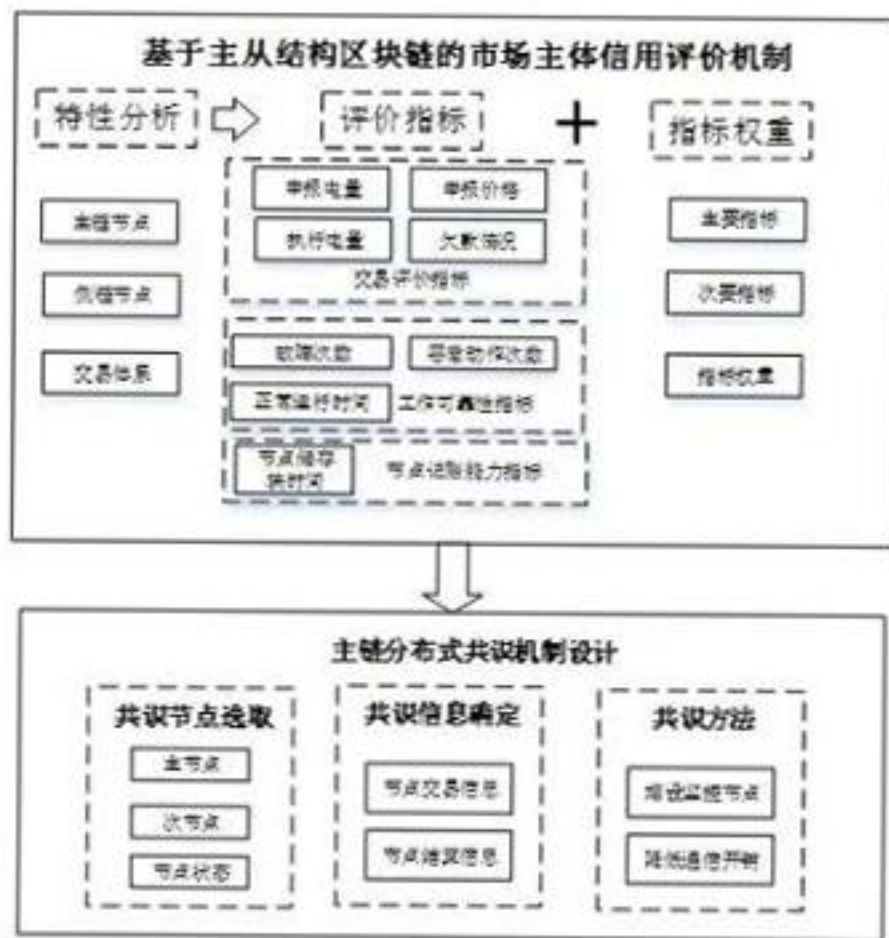
## 基于区块链的虚拟电厂总体架构：

利用区块链的技术优势，将虚拟电厂多层次多主体交易架构与区块链结合，弱化中间机构的市场主导权，简化交易流程，同时解决交易参与方之间的信任问题。部署基于主侧联盟链形式的一主多从扁平式和多主多从立体式的区块链治理结构。



## 信用评价指标体系：

考虑主侧链节点工作特性确定主侧链节点**多维度信用评价指标**，构建面向不同治理结构的差异化虚拟电厂信用评价指标体系；针对两种治理结构分别建立“底层侧链节点-上层主链节点”与“底层侧链节点-区域交易主链节点-广域交易主链节点”的信用评价体系架构



## 分布式共识算法：

针对联盟链吞吐量低，不能支撑大规模高并发电力交易业务场景的问题，设计适应于虚拟电厂不同利益主体的区块链节点部署方法，设计缩短交易共识和执行时间的**区块链共识算法**。

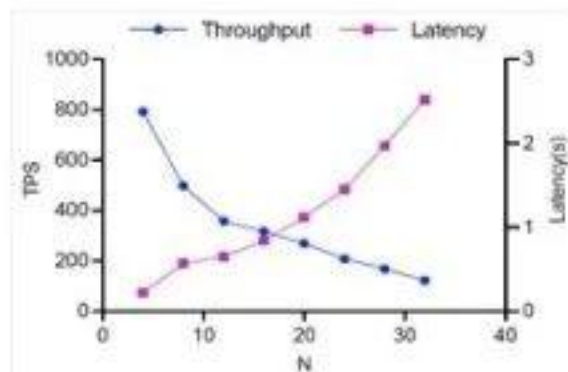
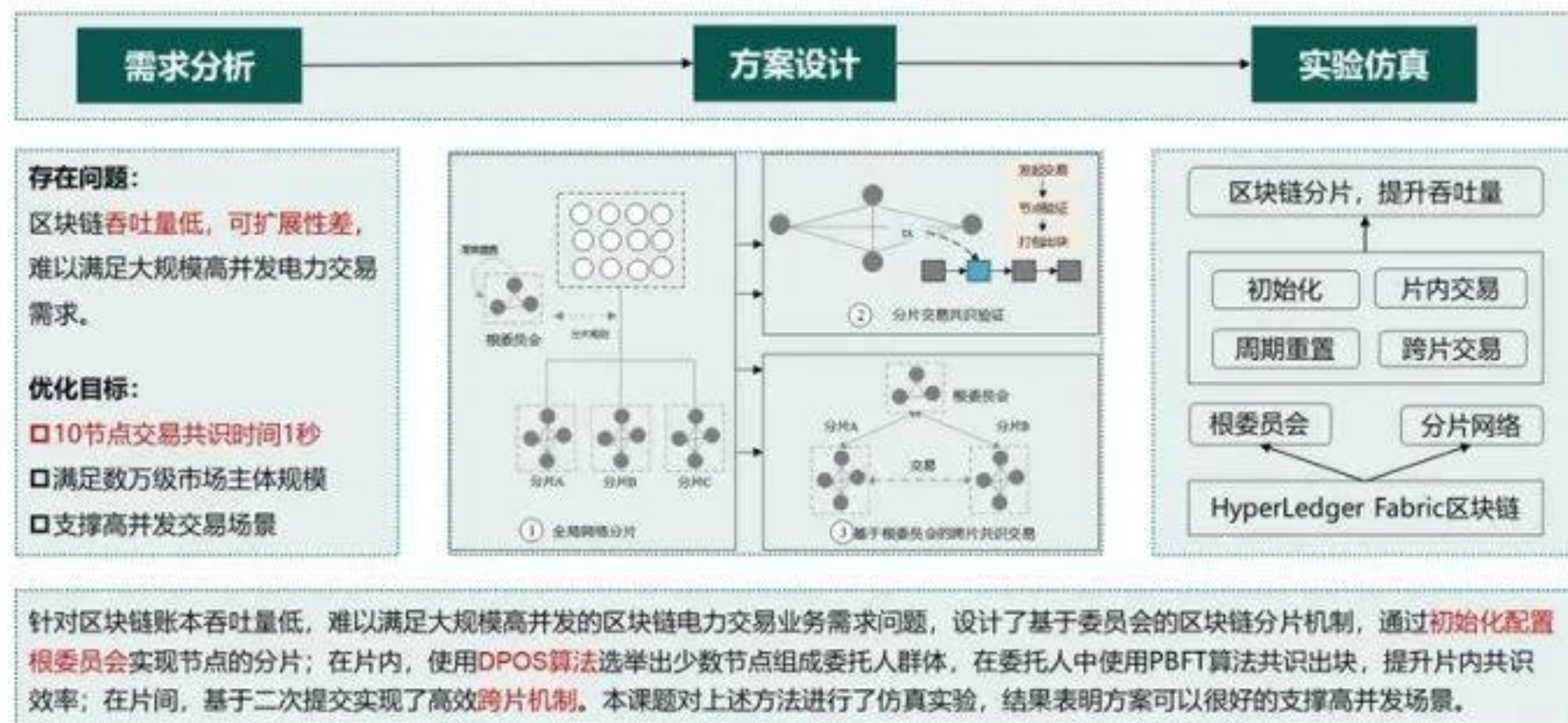


Figure 1: Throughput scalability and transaction latency

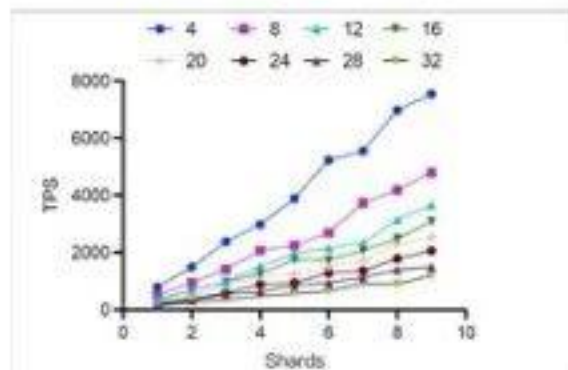
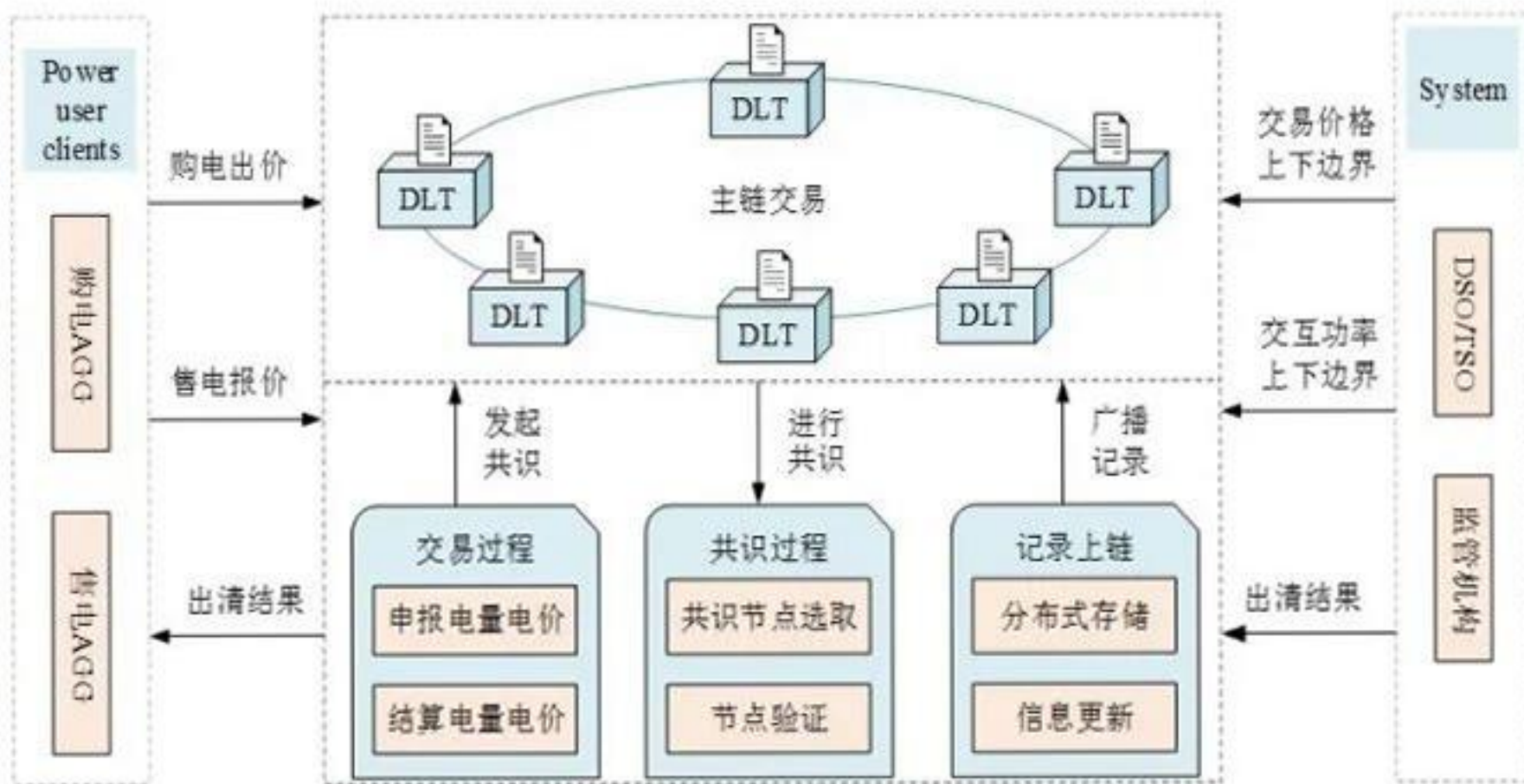


Figure 2: Throughput scalability of shard count and peer count

## 基于主侧链的虚拟电厂交易流程：

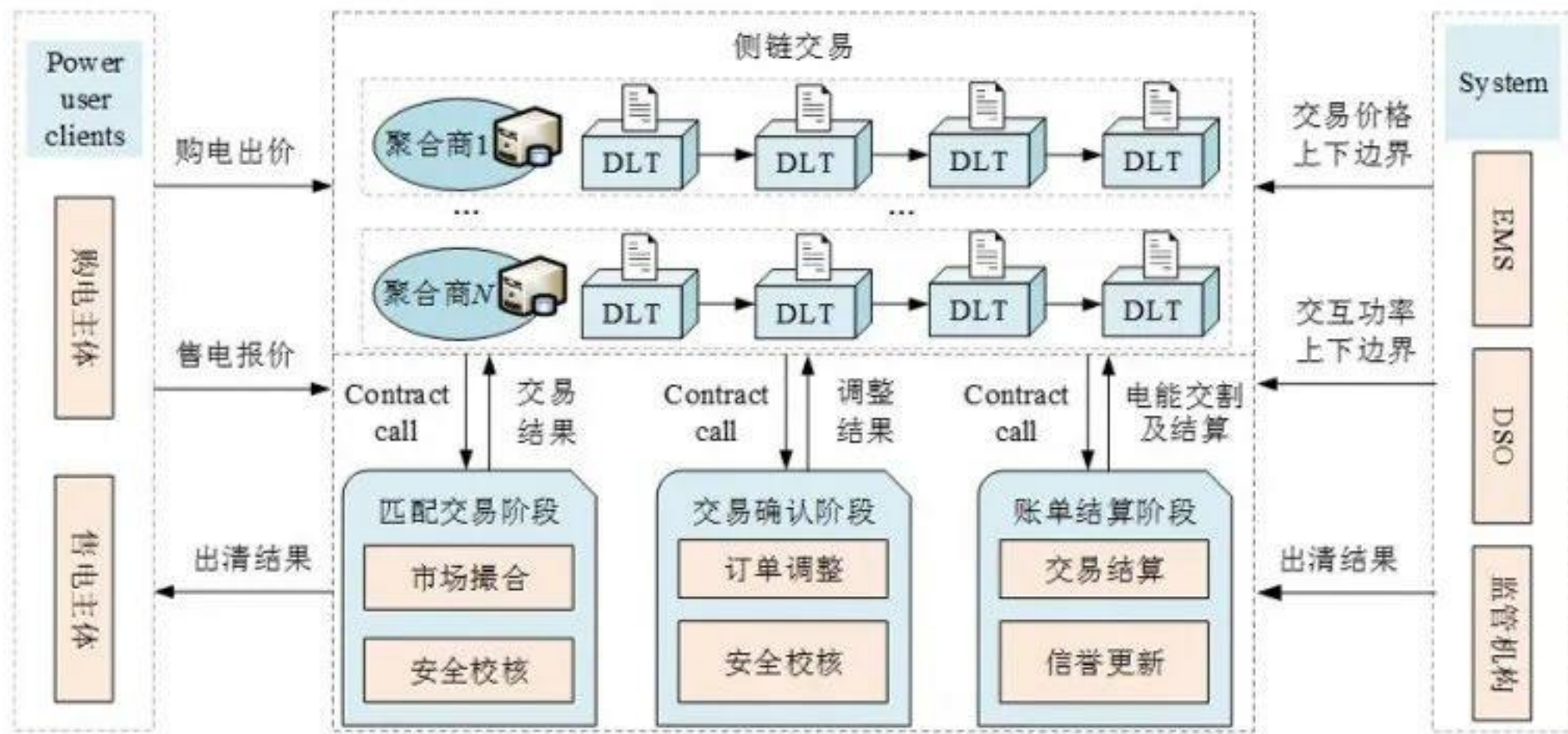
基于主侧链的虚拟电厂架构满足虚拟电厂参与能量及辅助服务市场交易的业务需求，既可支撑集中式电力市场交易，又可以支撑地区分布式电力市场交易。

✓ **主链**由各聚合商、TSO/DSO和监管机构运营，协调大范围内的电力市场交易



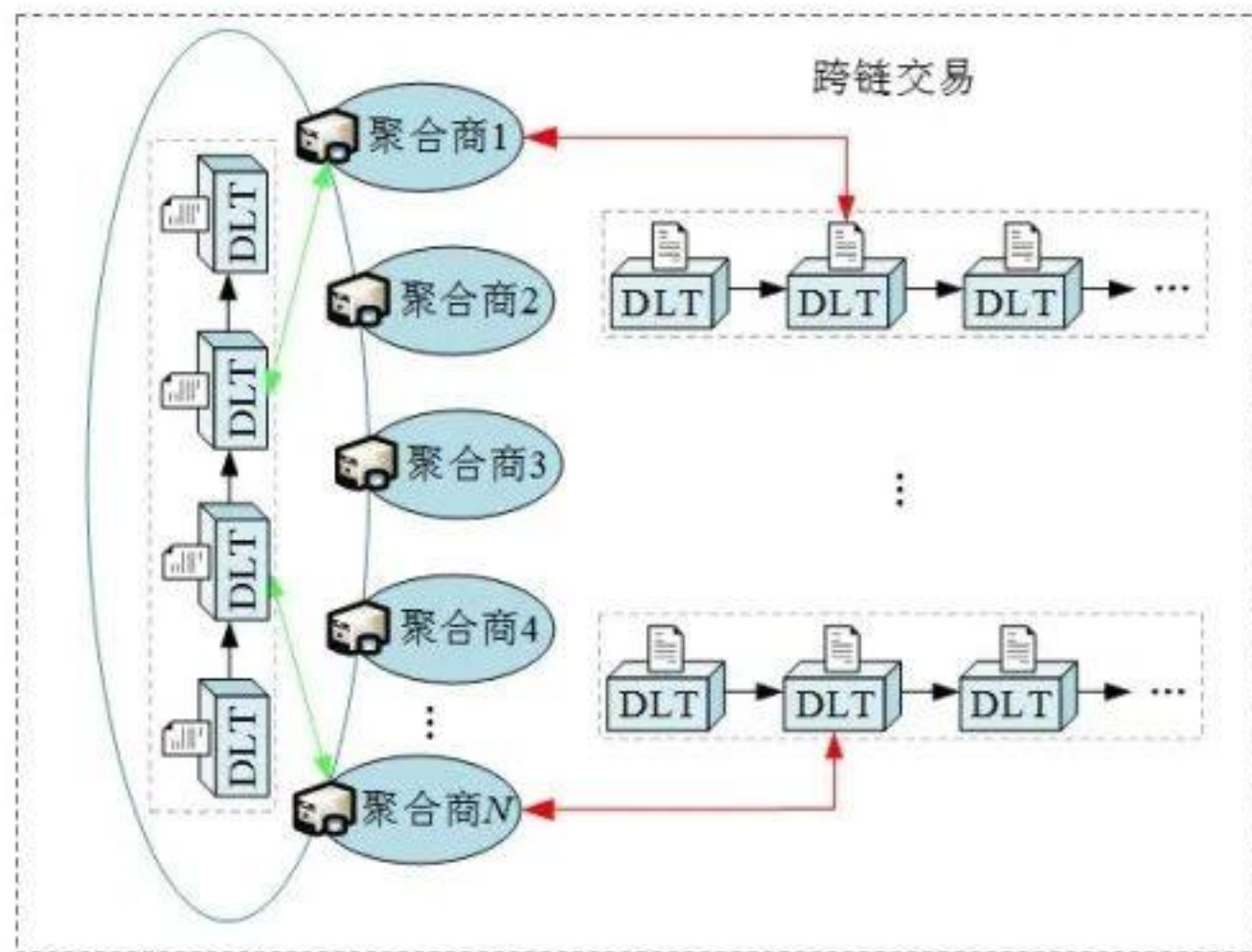
## 基于主侧链的虚拟电厂交易流程：

- ✓ 各条侧链由聚合商引导，聚合商内部各小规模市场主体共同运营，协调小范围内的电力市场交易



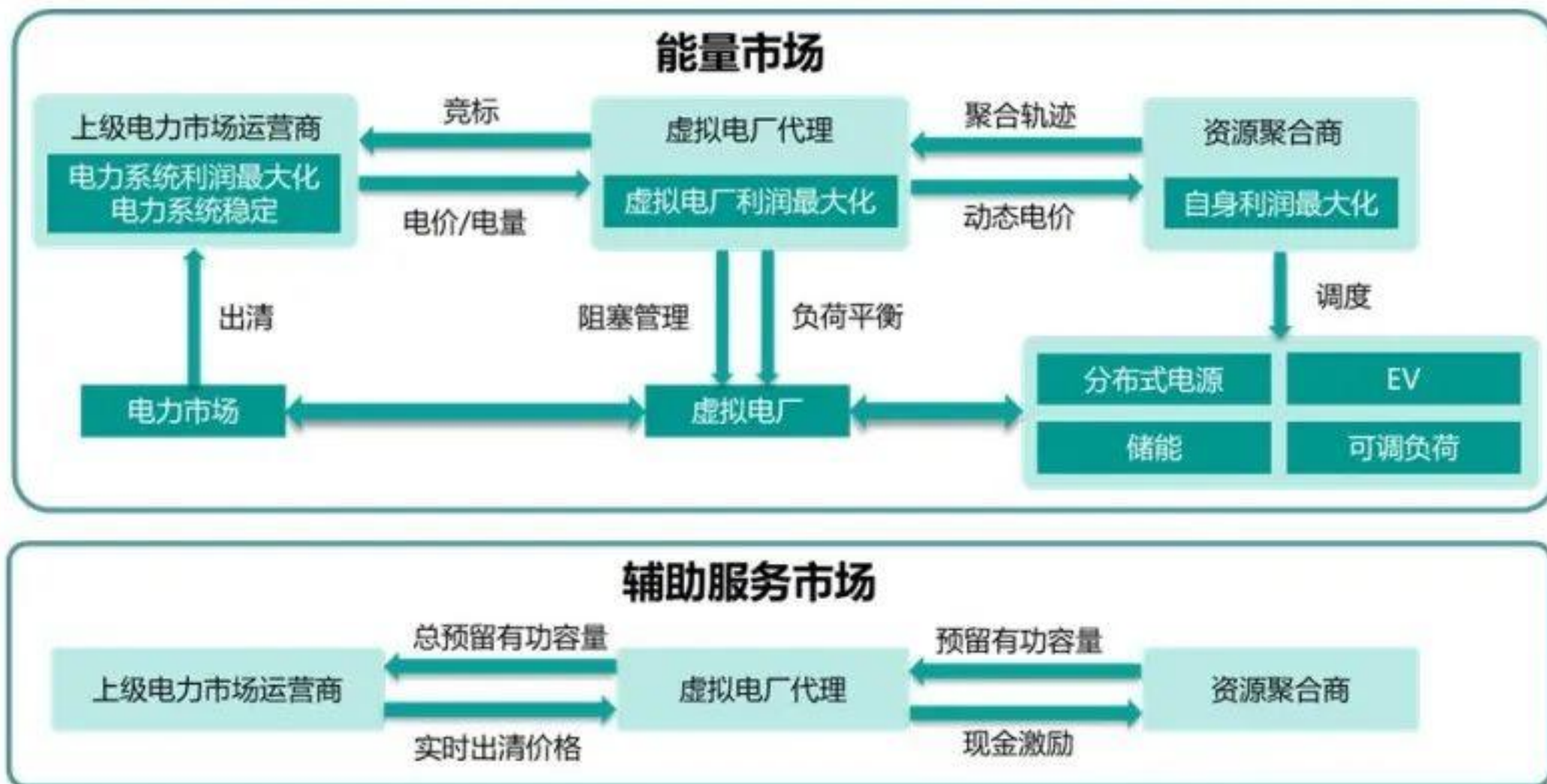
## 基于主侧链的虚拟电厂交易流程：

- ✓ 主侧链之间通过**跨链**技术实现全局交易信息同步。不同区块链节点能够跨不同区块链网络实现相互通信与交互，并实施跨链交易、跨链访问等功能。



## 虚拟电厂交易机制：

选取虚拟电厂参与能量和辅助服务市场为典型场景，根据虚拟电厂在不同电力市场的参与目标设计各利益主体交易模式，明确典型场景下虚拟电厂内部市场拍卖及出清规则、交易流程、结算方式等。





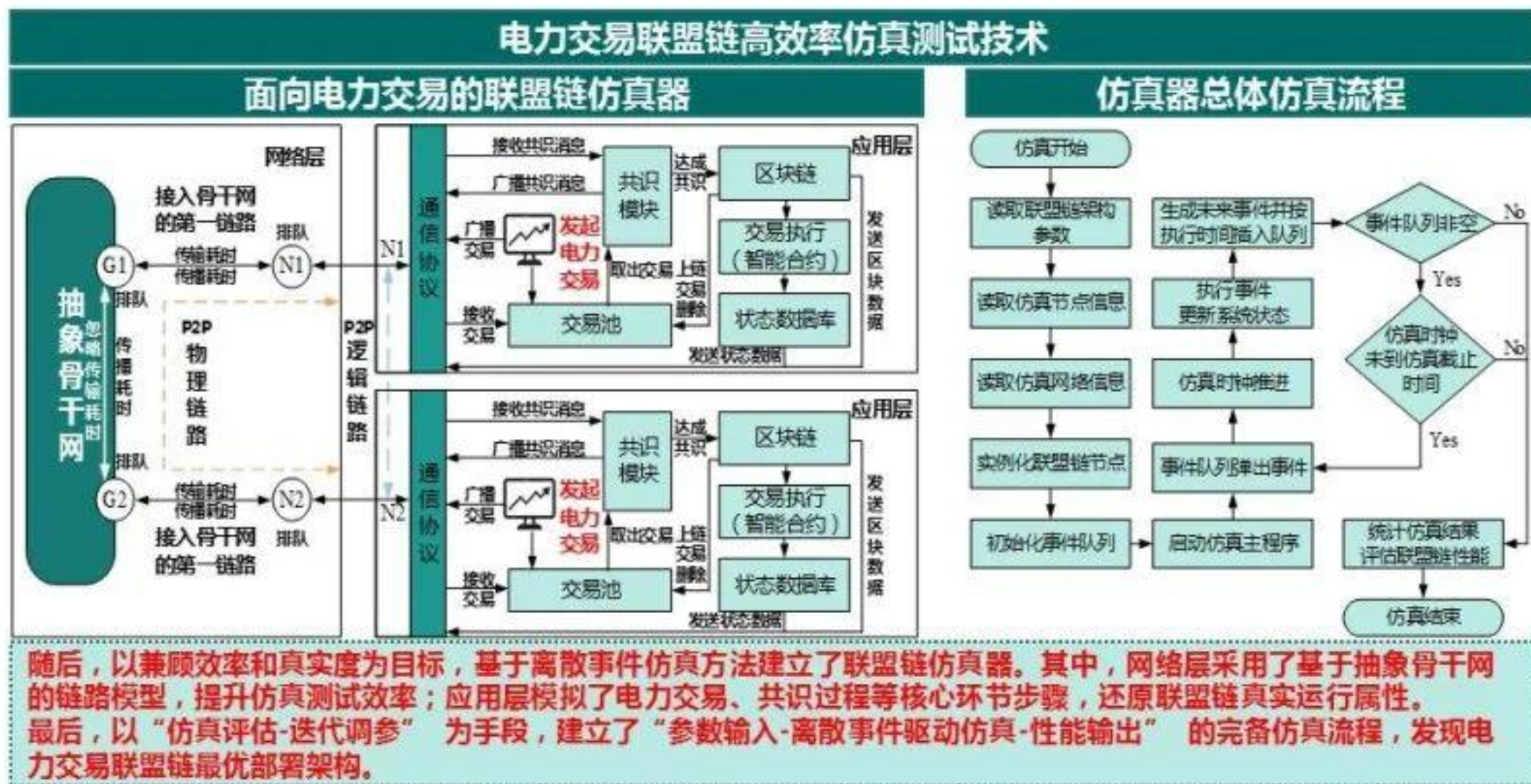
## 电力交易联盟链部署架构：



## 电力交易联盟链部署架构：



## 电力交易联盟链部署架构：



## 隐私保护技术：

大规模高并发的电力交易涉及大量交易数额、电价等敏感数据，区块链公开透明的特性使敏感数据泄露的风险增加，亟需进行隐私保护，实现敏感数据的可用不可见。

### 窗口电价隐私

Pedersen同态承诺加密交易窗口电价，实现隐私以及绑定特性。

### 月结电费计费

以电能消费者/电能企业为对象，聚合月内所有与其相关的交易承诺并揭示。

### 电力交易监管

设计可验证加密机制，实现链上交易数据的穿透式监管策略。

### 恶意行为投诉追责

对链上用户错误数据，结合零知识证明技术以智能合约为载体发起投诉惩罚。



1 虚拟电厂及其交易模式

2 区块链与可信交易技术

3 适用于虚拟电厂的可信交易技术

4 总结与展望

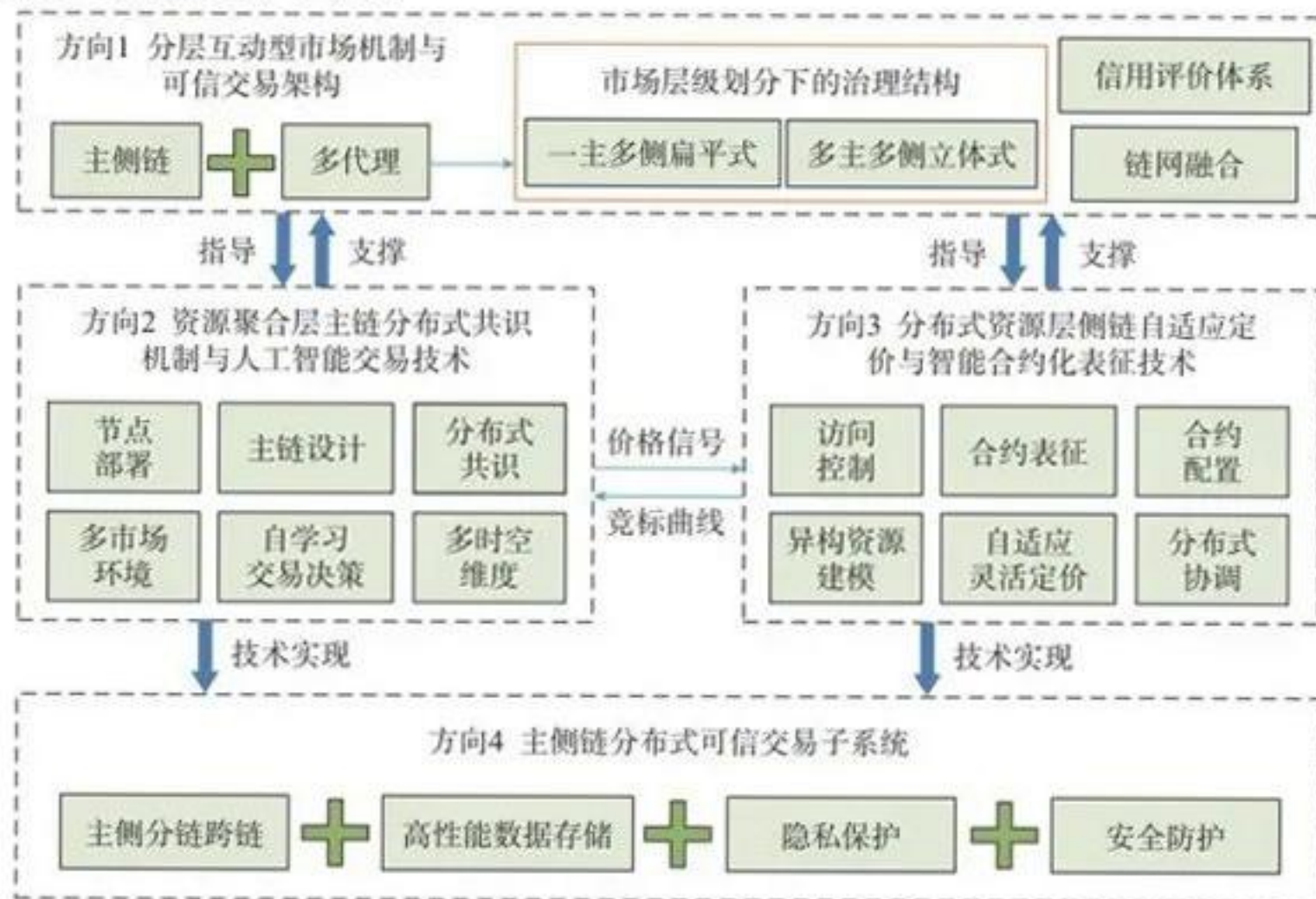


## 总结：

随着电力市场改革的不断深入，虚拟电厂逐渐成为分布式资源参与系统调度和市场交易的重要平台，而区块链技术去中心化、公开透明、可追溯和防篡改的技术特性可保证虚拟电厂内部交易环境公开透明且所有参与方的市场地位平等，为虚拟电厂可信交易提供解决方案。

## 展望：

虚拟电厂可信交易技术的未来研究方向可从市场机制及交易架构、主链共识机制与人工智能交易技术、侧链自适应定价与智能合约化表征技术、主侧链可信交易子系统研发 4 个层面展开，以促进“双碳”目标下虚拟电厂市场化发展和区块链技术应用。





# Thanks for listening !

上海交通大学 艾芊 教授

2023年5月30日



上海交通大學  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY