

# 融合AOEI驱动与数字孪生技术的能量共享经济机制研究

Author Name  
Department/School  
University Name  
City, Country  
email@university.edu

## Abstract—

**Index Terms**—无线传感器网络, 能量共享, **AOEI**, 数字孪生, 经济机制

## I. INTRODUCTION

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN) 作为典型的边缘感知基础设施, 已广泛服务于环境监测、智慧城市、工业物联网与农业生产等关键场景。然则, 节点普遍受限于电池容量与能量采集不稳定性, 系统长期运行面临两类根本性挑战: (i) 能量约束与空间—时间不均衡导致网络寿命缩短与功能退化; (ii) 信息时效性不足使得调度、路由与资源配置决策滞后, 诱发系统性低效。既有方法大多在工程优化框架内对能量方差、传输损耗或吞吐延迟进行单目标或多目标权衡, 即便可以在给定约束下达成较优折中, 其本质仍受限于既定的静态帕累托边界, 难以通过制度性与机制性设计实现可行解空间的外延扩张。

本文采取“经济学先导—技术落地”的研究范式, 核心主张是: 将信息新鲜度与价值显式内生到能量共享决策之中, 以“能量信息年龄 (Age of Energy Information, AOEI)”充当价格信号, 刻画“何时/对谁/以何强度”触发能量传输的优先级; 同时以数字孪生化信息账户 (InfoNode) 提升市场透明度与可观测性, 借助机会主义上报、信息去重与动态等待实现低开销的状态更新; 并辅以面向能量传输的专用路由策略与传输时长的自适应调节。该机制意在在不改变物理资源总量的前提下, 通过价格信号与制度设计的耦合, 使系统从“静态可达的折中集合”推移到“动态可达的扩展边界”, 在效率与公平之间获得整体改进。

为支撑上述主张, 本文构建一套“价格信号—数字孪生—交易规则—路径治理”的一体化机制: (1) AOEI 作为内生化的价格信号, 与信息的新鲜度、情境价值与紧急性同频变化, 驱动能量共享触发的时机与强度;

(2) InfoNode 作为节点在信息市场中的数字孪生账户, 维护多层状态 (当前/历史/预测), 并提供统一查询接口以提升市场透明度和可得性; (3) 机会主义信息上报结合信息去重与动态等待, 实现“传能即上报、低冗余、保新鲜”的状态更新范式; (4) 能量传输专用路由 (如 EETOR) 以效率阈值与多跳抑制为原则, 减少低效路径并保护脆弱节点; (5) 从帕累托边界视角评估机制外推效应, 给出效率—公平权衡改善的证据与讨论。

本文的主要贡献如下:

- 提出以 AOEI 为核心价格信号的能量共享触发机制, 将信息新鲜度—价值—紧急性从外生变量转化为内生决策因子, 统一于资源配置过程;
- 设计 InfoNode 数字孪生与机会主义信息上报的组合机制, 配置信息去重与动态等待, 实现高可得性、低通信开销与较强时效性的“透明市场”;
- 融合能量传输专用路由的效率阈值与多跳抑制策略, 在全局可解释的框架下减少低效能量路径并提升系统鲁棒性;
- 基于帕累托边界的分析视角, 论证机制性改造对可行解空间的外推效应, 并从效率与公平两维度展示动态边界外移。

## II. RELATED WORK

现有研究可大致分为四条主线。其一, 面向效率或方差的能量共享优化方法, 典型目标在于降低能量不均衡、减少传输损耗或提高能量利用率; 这类方法通常建立在确定性或近似静态的约束集合之上, 强调工程可实现性, 但往往将信息时效性与价值视为外部条件。其二, 以 Lyapunov 或凸优化为代表的均衡框架, 能够在理论上给出收敛性与稳定性保证, 具有较强的分析可解释性; 然而, 这类方法的触发与强度决策依赖预先设定的权衡参数, 对于非平稳环境与异质场景的自适应能力受限。其三, 基于深度强化学习 (如 DQN、DDPG) 的自适应调度在高维与非线性场景中显示出策略学习优势, 能够端到端地近似最优策略; 但其政策可解释性相对不足, 且对状态可得性与信息时效性较为敏感。其四, 围绕市场机制、信息价值、AoI/AoEI 与数字孪生的资源分配思想, 提出以价格信号与制度设计提升系统可达解集的设置, 强调“机制—行为—结果”的因果链条与可解释性。

综合观之, 尚存三方面关键缺口: (i) “信息新鲜度—价值—紧急性”缺乏统一的价格化建模, 触发传能的时机与强度难以与系统目标同构; (ii) 状态可得性与透明度不足, 常见的静态或周期上报机制在时效性与通信开销之间难以兼顾; (iii) 路径治理多沿用通用通信路由原则, 未充分体现能量传输的效率阈值与多跳抑制规律, 进而导致全局能量效率受损。与此相对, 本文以 AOEI 为价格信号、以 InfoNode 数字孪生为可得性基座, 辅以机会主义上报与专用路由, 面向“低开销—高时效—强可解释”的系统目标构造一体化机制。为凸显机制贡献并控制篇幅, 本文仅

与“无共享、Lyapunov、DurationAware、DQN、DDPG”五类基线进行对标，不展开冗长综述。

### III. MODELING

#### A. Node and Scenario Modeling

本章建立不依赖具体实现细节的抽象化模型。

节点建模：网络由普通传感器节点与物理中心节点组成。物理中心节点（ID=0）不参与能量传输，其职责在于信息汇聚与全网状态维护。普通节点具备能量存储、采集与消耗过程：能量消耗来源于感知、计算与通信；能量采集（若启用）主要来自太阳能。节点可为静止或移动实体，其空间位置决定可行邻居、链路代价与潜在路径集合。每个物理节点在信息空间一一映射为 InfoNode，用于维护与暴露该节点的多层状态。

场景建模：从网络结构、环境供给与链路特性三个层面描述：

- 网络结构：考虑均匀、随机与含能量空洞的多种空间分布，网络规模典型取值为 10–100 节点；可选启用节点移动以反映动态拓扑。
- 环境供给：太阳能采集呈显著的日内周期性变化，白天富余、夜间紧缺；可通过时变参数刻画非平稳能量供给。
- 链路特性：能量传输效率随距离衰减，多跳累积损耗显著；系统设置最大跳数与效率阈值以抑制极低效路径，保障全局能量效率与公平。

该三层刻画共同定义了机制运行的语义空间与外生扰动来源，为后续决策与评估提供统一背景。

#### B. Economic Interpretation and AOEI

经济学解释围绕“价格信号—数字账户—交易规则”的结构展开。首先，AOEI 作为价格信号：当某一节点承担关键任务而其信息状态陈旧（新鲜度不足）且影响系统目标（寿命、效率与公平）时，应通过提高价格信号反映“更强支付意愿”，优先获得能量支持；AOEI 的时变性使其能够对不同时段、不同节点的重要性差异进行精细表达。其次，InfoNode 作为数字账户：其维护当前、历史与预测层次的信息状态，并统一对外提供可查询的“透明市场视图”，弱化了自治决策之间的信息不对称。再次，交易规则以机会主义信息上报为核心，结合信息去重与动态等待：在传能路径上“搭载”状态更新，在信息量较小时延迟聚合、在信息量较大时提前上报，以兼顾通信开销与信息新鲜度。

上述三者相互耦合：价格信号决定分配优先级与强度，数字账户保障状态可得，交易规则降低获取状态的边际成本；辅以面向能量传输的专用路由原则（效率阈值与多跳抑制），可在局部理性前提下导出全局可解释的资源再配置结果。

#### C. Objectives and Constraints

系统目标与约束定义如下：

- 寿命目标：最大化首个节点死亡时间，体现系统持续服务能力；
- 均衡与公平：降低能量方差或变异系数（CV），对低能节点实施优先保护；
- 效率目标：提升有效接收能量占比，减少路径与链路的无效损耗；

- 时效目标：提升关键状态的新鲜度，降低决策滞后带来的系统性低效；
- 约束条件：效率阈值、最大跳数、预算与调度频率等策略层与系统层限制。

从帕累托视角看，静态边界对应于在既定约束集合下的最优效率—公平权衡；通过将 AOEI 价格信号与数字账户、交易规则制度化内生引入，可对可行解空间实现外推，即在相同资源与约束条件下获得更优的目标组合（动态边界外移）。本文在实验部分将以多指标对标与消融试验展示该外推效应。

### IV. PROBLEMS AND MECHANISM DESIGN

#### V. EXPERIMENTS

##### A. Setup

##### B. Metrics

##### C. Baselines

##### D. Ablation Studies

##### E. Visualization

### VI. CONCLUSION

#### A. Future Work

#### REFERENCES

- [1] T. B. Decided, “Placeholder Reference for Compilation,” 2025.