

融合 AOEI 驱动与数字孪生技术的能量共享经济机制研究

宏观经济逻辑视角的研究方案

一、研究背景

无线传感器网络（WSN）节点普遍面临能量受限、传输效率低以及状态感知滞后等挑战，导致网络寿命有限、能量与信息难以及时有效地发挥作用。传统的能量调度与管理策略往往缺乏根据节点状态和任务需求变化进行动态响应的能力。为突破这一瓶颈，本项目基于能量协同无线传感器网络（ECWSN）的体系架构，融合能量信息新鲜度指标——能量信息年龄（Age of Energy Information, AoEI）以及虚拟节点层（Virtual Node Layer）的数字孪生技术，提出一种全新的能量共享经济机制范式，在技术逻辑上保持对能量协同无线传感器网络（ECWSN）原有调度策略的继承与优化，同时从宏观经济学角度引入市场机制的解释框架。这一新范式旨在提升系统的自适应性、公平性与可解释性。也就是说，我们将能量共享的机制与经济学原理相结合，将网络视作一个类市场经济体，在其中实现资源的优化配置。通过引入经济学的一体化框架，能量在节点间的传输、调度与管理不再是孤立的技术过程，而被视为资源交换与市场调节的过程。这种类市场经济逻辑意味着节点间能量供需关系由“看不见的手”进行调控，利用价格信号和激励机制引导资源流动，从而在效率与公平之间取得平衡。效率方面，我们追求用最少的能量消耗获得全网信息效用的最大化；公平方面，则关注能量在节点间分配的均衡，避免出现“能源富者愈富、能源贫者愈贫”的失衡现象。综上，采用宏观经济学逻辑来统一解释 ECWSN 中的调度策略，不仅有助于凸显各机制设计的动机和作用，更能借鉴市场经济中的核心原则（如市场调节、资源配置、激励相容、效率与公平权衡等）来指导网络能量资源的优化管理。

二、研究内容

本研究从宏观经济体的类市场角度重新审视 ECWSN 的关键技术机制，将技术逻辑映射到经济学原理之下，形成系统的策略解释框架。主要研究内容包括以下几个方面：

1. AOEI 驱动的能量调度机制（类比信息市场中时效性与价格）：本机制以能量信息的新鲜度（AOEI）作为能量调度决策的核心驱动因素。具体而言，我们构建了一个信息价值量化评估模型，通过统一的优化函数综合权衡能量传输带来的收益、信息价值随时间衰减的成本以及能量传输过程中的损耗。调度算法据此优化三类决策：

- (1) 传输时机——何时开始能量传输；
- (2) 传输时长——能量传输持续多久；
- (3) 接收节点选择——选择哪个能量匮乏节点作为目标。

这种基于 AOEI 的决策犹如信息市场中依据消息时效性定价：及时、最新的信息往往更具价值和更高价格，而过期的信息价值快速贬值。类比之下，AOEI 在本系统中充当了类似价格信号的角色：当某节点的信息变得陈旧（AOEI 升高）时，相当于该节点对新信息（或能量）的“需求价格”在上升，意味着为其提供能量可以获得较高的“回报”（因为可使重要且滞后的信息及时更新）。反之，AOEI 较低（信息新鲜）的节点，其获得进一步能量供给的边际效用较低，如同市场中价格低廉的信息，不需要投入过多资源。通过这种机制，网络中能量富裕节点与能量匮乏节点之间的关系被类比为经济体中的资本盈余方（资金供给者）和资金短缺方（资金需求者），二者通过能量交换实现资源在全网的合理调配。同时，AOEI 指标的引入确保了调度决策充分考虑信息的时效性影响，相当于经济学中强调信息透明度对于市场有效调节的重要作用。总而言之，AOEI 驱动的能量调度机制使系统能够根据节点信息“新鲜度”这一市场式信号来动态调整资源分配，实现及时满足高需求节点的同时避免无效供给，在效率方面相当于利用价格机制优化了资源利用率，在公平方面也确保各节点能够根据各自需求获得与其信息价值相称的能量支持。

2. 虚拟节点层的孪生建模（类比经济体中的代理机制与市场透明度）：本研究为每个物理传感器节点构建了对应的数字代理（InfoNode），组成虚拟节点层，从而实现对物理节点的数字孪生建模。每个 InfoNode 维护多级状态缓存（包括最新状态、短期历史、长期归档），并支持与物理节点能量状态的虚拟同步。物理节点通过规则驱动的信息上报，将自身能量状态和数据状态上传至对应的 InfoNode；InfoNode 通过预先设定的模型自动计算和更新这些状态数据，从而保证数字代理与物理实体在关键信息数值上的一致性。这一数字孪生机制可被视为经济系统中的代理人机制：每个节点的 InfoNode 相当于该节点在市场中的“代理”，实时反映节点的供需状况。由于所有 InfoNode 的状态数据汇集在虚拟节点层，整个网络的资源供给和需求信息变得透明可见，类似于一个高度透明的市场，减少了信息不对称带来的低效。基于这些数字代理提供的全局信息，调度器就像市场的中央交易平台或“看不见的手”，能够根据需求优先级对能量和信息资源进行优化配置。当网络资源（如可用能量）有限时，虚拟节点层提供的全局视图确保稀缺资源能优先满足最紧迫的需求，正如市场调控机制会将有限资源配置给最需要的部门或参与者一样。同时，该机制有效避免了资源浪费：由于决策基于全面的信息，能量不会错误地分配给不需要的节点，从而提高整体效率。虚拟节点层的孪生建模通过引入节点代理和全局信息共享，实现了经济体中市场透明化和代理协作的效果，使系统内资源配置更为高效、公平和有序。

3. 信息价值与能量成本映射机制（引入边际效用和博弈论的资源配置解释）：本研究设计“信息价值—能量成本”映射函数，用于度量每个节点在调度决策中的优先级，以及参与能量交换的回报与成本结构。这个映射机制相当于为每个节点建立了一套效用函数：信息价值体现节点获得能量支持后产生的效用增益，能量成本则反映供能过程中资源消耗所带来的效用减损。为实现这一机制，我们将博弈论引入节点交互：在能量交换的市场中，各类节点被建模为理性的“经济人”，通过策略博弈争夺和分配资源。具体而言，接收节点（能量需求方）根据自身的能量缺口大小和未上报信息的价值，竞争获得来自供能节点的能量支持——这等同于多个买家在拍卖中出价竞争有限的商品，他们的“出价”由自身对能量的边际效用所决定；发送节点（能量富裕方）则根据一个综合得分来选择最优的目标接收节点，将能量“投资”在回报最高的地方。这一综合得分由效用增益和能量成本映射函数给出，相当于对各候选交易的收益/效用进行量化评价，从而帮助供能节点像投资人选择投资项目那样，选择可以产出最大“效用回报”

的能量传输交易。与此同时，**中继节点**（能量路由方）也加入博弈：它们会依据自身的剩余能量状态以及参与转发所能获取的**信息奖励**来决定是否加入传能链路。只有当转发带来的收益（例如通过合作能够获得一定信息更新或网络效用提升）足以弥补自身能量消耗时，**中继节点**才有动力参与转发。这一过程相当于经济活动中**中介或经纪人**衡量交易佣金与成本，选择性地促成交易的行为。通过上述博弈过程，节点间的能量交换形成了一个动态的**市场化能量共享机制**：每个节点都根据自身效用最大化原则行事，供需双方在竞争与选择中达到动态均衡。在这个均衡中，信息价值与能量成本的平衡与权衡过程，可类比为经济学中的资源分配问题。**系统力图实现帕累托优化的资源配置**，即**没有能量可以重新分配而不降低某节点效用的状态**。值得强调的是，我们在设计映射函数时特别考虑了**边际效用递减和公平约束**：随着节点获取能量增多，其额外获得的信息价值增量会减少（**边际效用递减**），因而映射函数在高能量状态时给予的优先级提升逐渐降低；同时引入能量均衡因子（如 Lyapunov 优化项）来防止能量过度集中于少数节点，以保证整体网络的公平性。通过这样的机制设计，我们在网络层面达成了效率与公平的兼顾，相当于宏观经济中通过政策或机制在提升总效用的同时维护分配公平的原则。

4. 调度闭环与反馈机制（对比宏观经济中的供需反馈调节）：我们在系统中引入完整的**感知-决策-反馈闭环**调度机制，通过虚拟节点层对网络状态进行监测和**趋势预测**，并结合系统内嵌调度器的即时反馈调整能力，实现调度策略的持续优化。具体来说，虚拟节点层相当于经济体系中的统计和监测部门，持续地“感知”网络中的各项供需指标（如节点能量分布、信息上报频度等）；调度器则充当“决策机构”，基于感知信息制定调度策略；而在执行调度后，系统会通过反馈环节获取实际效果数据（例如哪些节点的能量状况改善了、信息更新的滞后是否缓解了等），并将这些数据回馈给虚拟节点层，用于更新下一轮决策的依据。如此反复迭代，形成一个**宏观经济体供需反馈调节**的过程：正如经济系统中决策者会根据市场的供求反馈来调整政策（例如中央银行根据经济指标调整利率，或政府根据市场反应实施逆周期调控）一样，本研究的调度器会根据网络反馈不断调整“供给”与“需求”之间的匹配策略，确保系统始终朝着稳定、高效的方向演化。该闭环机制极大提高了系统的自稳定性与响应速度，当网络出现能量供需失衡时，反馈机制会及时“感知”并促使调度策略进行纠偏。例如，若某段时间许多节点出现高 AOEI（暗示信息更新供给不足），调度策略将做出类似于市场增产的反应，加大对这些节点的能量供给频率或力度；反之，如果发现某些区域出现能量过剩或信息冗余，系统将相应减少对那里的能量投入。这种动态调整过程确保了**能量资源与信息在时空上的合理、高效分配**，避免**能量空洞和信息空洞**，也使系统具备了宏观经济政策调节的适应性和稳健性。

5. 被动传能与路径复用机制（多边资源复用提高效率）：在传统方案中，为能量传输和信息传送往往需要两套独立路径，造成资源浪费。本研究创新性地整合了**被动能量传输与路径复用策略**，引入“**机会式**”能量共享方案，实现能量与信息在同一传输过程中同时交付。具体做法是：当某条路径正在执行能量传输任务时，我们在不影响主要能量输送的前提下，附带收集并转发信息数据（如节点的能量状态更新）。这种**信息搭载机制**使得一次能量传输的路径同时承担了信息传递的功能，无需为信息另行建立通信链路，因而**减少了独立信息传输带来的额外开销**。网络在获取信息方面的能量花费大幅降低，整体能量利用效率提升，同时网络通信负载也减轻。这一策略可类比为经济活动中的**多边资源复用或协同运输机制**：比如在物流领域，不同厂家或产品共享同一运输线路进行配送，以充分利用运输载荷；又如在能源领域，多种能源载荷共享

同一基础设施传输（电力线路同时传输数据、通讯网络复用电网架空线等）。这些经济中的协同利用方式都旨在**提高单位资源的产出**，降低总体成本和提高系统抗风险能力。同理，通过被动传能与路径复用，本研究提出的 ECWSN 系统实现了**资源“一程多用”**：每条能量传输路径的效用被挖掘到最大，不仅传递了能量，还带回了有价值的信息。这种“一举两得”的资源利用方式提高了系统效率，也使网络对于动态环境的适应性更强。因为在任何一次调度行动中，系统都获取了更多反馈信息，可进一步完善后续决策。被动传能与路径复用机制体现了共享经济中**资源复用、协同增效**的思想，使 ECWSN 在能量利用和信息获取两方面实现双赢。

6. 可视化与解释机制（作为经济监管与调节的数据公开机制）：为了使调度策略和系统状态更加透明、易于理解，本研究设计了完善的可视化与解释模块，对关键决策指标和网络状态进行实时呈现。这些指标包括但不限于：**能量信息鲜度指标（AOEI）**、平均能量传输效率、全网信息上报总次数、**网络能量变异系数**（衡量能量分布均衡程度）等。结合仿真过程，我们还能直观展示**路由轨迹图**（显示能量传输在网络中的路径走向）和**能量热力图**（显示各区域能量分布及变化）。通过这些可视化工具，系统的运行状态和调度决策背后的依据都能够被直观地解释和审视。我们借鉴“经济普查”和“财政周期”的概念，将定期收集并公开网络运行的统计数据视为一种对系统经济状态的“普查”，而将调度周期内的资源分配、消耗视为一个“财政周期”来进行分析。这一类比旨在强调数据公开和分析对于宏观调控的重要意义：正如国家会通过经济普查收集全面的数据，并据此在每个财政周期内调整宏观政策，我们的系统也通过关键指标的监测，帮助决策者（自动调度算法）了解各节点的资源分配状况。决策者可以据此判断当前调度策略在效率和公平上是否达到预期，如发现某些节点长期能量短缺或信息滞后，可视化的数据将及时揭示这一问题，从而触发相应的策略调整。同时，这种解释机制也提高了系统的可解释性和问责性：任何调度决策都有数据支撑和记录，方便研究人员和管理者审计算法行为，类似于经济监管部门依据公开数据评估市场健康状况并做出监管决策。综上，可视化与解释机制为系统提供了数据层面的“监管仪表板”，保障了以市场经济逻辑运行的能量共享机制能够被监控、分析并不断优化。

三、研究目标与创新点

围绕上述内容，本课题从经济学逻辑出发，在能量协同无线传感器网络中提出了一系列具有创新性的策略和模型设计。主要研究目标与创新点如下：

1. 建立基于 AOEI 的信息价值评估机制：通过将信息的时效性纳入价值评估体系，建立一套**时间敏感型信息优先传输策略**。该策略以 AOEI 为核心指标，对信息新鲜度进行经济学建模，为不同节点的信息赋予“价值标签”，从而使调度算法倾向于优先传输价值高（时效性强）的数据。这一创新将经济学中的**时间价值**思想引入 WSN 数据调度，在减少全网不必要通信的同时，有效降低能量消耗并提升能量共享效率。
2. 构建以虚拟节点层为核心的数字孪生系统：开发 ECWSN 的数字孪生体系，在虚拟节点层实现对物理节点状态的高精度**感知、预测**，并用于调度决策支持。这一创新将虚拟节点层与 AOEI 机制相结合，使信息的价值评估与能量共享的经济效益在数字空间中统一起来。结果是，一个自主协调的系统，其中调度器

基于数字孪生提供的实时全局信息做出决策，大幅提高了系统自治性和对复杂动态环境的适应能力。

3. 构造信息与能量双维度的共享经济模型：提出同时考虑能量维度和信息维度的共享经济模型。在能量维度，我们引入能量收益、传输损耗惩罚和能量均衡约束（例如通过 Lyapunov 优化实现能量在时空的平衡）；在信息维度，我们考虑 AOEI 惩罚（传输延迟带来的价值衰减）和信息量奖励（鼓励为有重要未上报信息的节点传输能量）。通过设计统一的综合得分函数，将上述两个维度的因素融合，实现调度决策的多目标协同优化。这一创新点体现了经济学中多因素效用最大化的问题，将效率和公平等目标转化为可量化的评分体系进行统一优化，在保障网络整体效用最大化的同时兼顾节点间资源分配的均衡。
4. 实现调度过程的全流程闭环与可解释输出：打造贯穿感知-决策-执行-反馈全过程的闭环调度框架，并附加决策可解释性输出。这一创新增强了系统的可观测性和调试便利性，使每一步调度决策都有据可循。通过将反馈机制融入调度循环，我们确保系统能够适应不断变化的网络环境，仿真和实际运行中均能根据反馈实时调整策略。同时，我们提供友好的可视化和数据解释，使调度结果和决策原因对研究人员和运维人员透明，可类比为经济体中的决策公布和效果评估，提高了系统运行的可解释性。
5. 引入 AOEI 驱动的动态资源分配决策机制：通过联合建模信息价值函数与时间衰减函数，使资源分配策略能够根据实时的 AOEI 变化进行动态调整。该创新使系统具备类似实时市场的属性——能够自发响应环境和任务需求的变化，动态优化资源配置。这可以视为将宏观经济中的实时市场响应机制嫁接到 WSN 调度中：当网络中出现新的信息需求或能量分布变化时，调度算法会即时重新计算节点的价值和成本映射，调整资源流向，保证系统始终运行在接近最优的状态。
6. 融合被动能与路径复用机制：将被动能量获取策略与路径复用思路相结合，提升整体能量共享效率。这一创新通过信息搭载的方式减少了独立调度的频率与通信开销，使一次调度服务于多重目的，极大提高了系统整体的能量利用效率。它体现了共享经济中“一资源多用途”的思想，以较小的改动换取了显著的效率增益，拓展了 WSN 能量调度的传统范畴。
7. 构建能量共享经济机制调度框架：基于市场化理念，设计一个包含供需调节和按需定价机制的整体调度框架。核心是在调度器中引入类似经济市场的调控模块：通过自适应的 Dynamic-k 机制，动态调整网络中并发参与传输的节点数量，相当于根据“市场”热度调节供给的规模；同时结合网络负载和需求状况，引入按需定价策略，为能量传输机会赋予“价格”，使稀缺的传输资源在高需求时“价高者得”，在需求低迷时降低“价格”鼓励利用。这种机制实现了调度策略的自我优化：网络会自动根据供需关系的变化调整自身的调度参数，犹如市场通过价格信号实现资源的自发优化配置。该框架的构建开创性地将宏观经济学中的市场调节原理应用于传感器网络领域，预期能够显著提升 ECWSN 在复杂场景下的资源利用效率和自适应能力。

四、可行性分析

本研究方案在技术上具有良好的可行性。一方面，前期研究所提出的 ECWSN 系统架构已经为实现能量共享经济机制提供了坚实支撑：系统中已实现了多个关键功能模块，

可直接为本课题所用。例如，ECWSN 已有完整的 **InfoNode** 虚拟代理管理机制，能够维护物理节点的数字孪生代理；内置了 **AOEI 计算模块**，可实时评估各节点信息的新鲜度；实现了**三级状态缓存结构**（最新、短期历史、长期归档），能够高效存储和检索节点状态信息；支持**路径信息搭载功能**，实现了基本的能量传输与信息收集同步；具备**节点状态估算和调度决策分离能力**等。这些现有能力表明，本研究完全可以在此基础上扩展出一个以信息价值驱动的经济调度模型。具体来说，项目当前架构中已经构建了**传输时机评估机制**，支持根据网络状态评估何时进行能量传输；具备**节点能量与信息状态批量同步接口**，可定期将大量节点状态上传至调度中心；实现了**基于路径的高频信息更新逻辑**，可以高效获取传输路径上的信息变化。这些功能的存在意味着我们的经济机制模型更多是在**软件层面**进行算法设计与参数优化，而无需对底层架构进行大规模变更，从而降低了实现难度。

另一方面，本课题早先的研究已经初步实现了若干与本课题密切相关的功能：例如，**基于 AOEI 的状态判定逻辑**，能够根据信息新鲜度动态识别需要关注的节点；**机会式信息收集器（PathCollector）及信息回传机制**已经部署，使系统具备了一定的以信息为中心的调度能力；在虚拟节点层，**本研究开发的 NodeInfoManager 模块**已经完成了多级状态缓存、节点能量估算与历史趋势分析，为数字孪生机制奠定了基础。更重要的是，我们的系统调度架构已基于**虚拟节点而非物理节点**进行规划，初步具备了“**认知—决策分离**”的体系结构。这意味着调度器能够利用虚拟节点层提供的抽象信息进行决策，而不直接依赖物理节点的低层反馈，从架构上验证了我们将**市场逻辑融入资源调度**的思路是行得通的。

同时，从更广的视角来看，将市场经济原理应用于 WSN 资源管理也具有一定的研究先例和理论支持。例如，有研究已经探讨了采用**基于市场的算法**来管理 WSN 中的任务分配，通过为不同应用计算**效用和成本**来优化资源协调 (*Market-Based Resource Allocation for Energy-Efficient Execution of Multiple Concurrent Applications in Wireless Sensor Networks*)。这些工作佐证了将**价格机制与效用函数**引入传感器网络能量调度的可行性和潜在价值。本项目正是顺应这一创新趋势，将 AOEI 等新型指标与成熟的经济学理论结合，预期能够在能量高效利用和网络性能提升方面取得突破。

综上所述，现有技术条件和前期工作为本研究的实施提供了充分的**可行性保障**。本课题将在成熟的 ECWSN 平台上，引入宏观经济学逻辑指导的调度机制，实现创新性的功能拓展。在理论与实践的双重支持下，本研究有望为无线传感器网络的资源调度开辟一条全新的“经济化”路径，也为未来其它网络资源管理问题提供可借鉴的范式。本课题目标是构建一个统一协调的调度策略框架，在经济学逻辑的指导下，使 ECWSN 内部的能量与信息流动达到优化配置，实现**效率与公平的统一**，展现出类市场经济体的自我调节和高效运行能力。