

# Information–Energy Dual System for Sustainable Edge IoT Networks: A Digital-Twin-Driven Framework for Energy Sharing and Information Freshness

Author Name, *Member, IEEE*, and Coauthor Name, *Member, IEEE*

**摘要**—Wireless Sensor Networks (WSNs) face fundamental challenges in simultaneously prolonging network lifetime and balancing energy distribution due to the decoupling of information and energy systems. Traditional approaches optimize within fixed system constraints, making it difficult to achieve both objectives simultaneously. This paper proposes an Information–Energy Dual System that integrates four synergistic mechanisms: (1) Age-of-Energy-Information (AOEI) priority mechanism that determines energy information reporting timing through dynamic AOI thresholds; (2) InfoNode digital twin mechanism that maintains virtual node energy tables through theoretical energy calculations; (3) Adaptive Lyapunov Duration Planning (ALDP) mechanism that performs prospective transmission duration planning; and (4) Energy-Efficient Transfer Opportunistic Routing (EETOR) mechanism that opportunistically collects node information during energy transmission. These four mechanisms work synergistically to fundamentally integrate information and energy systems, solving the core problem of "information system independence from energy system." Experimental results demonstrate that the proposed approach significantly prolongs network lifetime (first node death time) and improves energy balance (coefficient of variation) without increasing total energy consumption, achieving a 194.4% improvement in the combined objective compared to baseline methods.

**Index Terms**—Wireless sensor networks, energy sharing, information-energy dual system, AOEI, digital twin, mechanism design

## I. INTRODUCTION

大规模边缘 IoT 系统（Edge IoT Systems）支撑智慧农业、智慧城市、工业互联网等关键基础设施，其核心挑战在于长期无人值守条件下保持网络寿命、能量平衡与信息新鲜度[?]。无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSN）只是其中一种典型实例：能量受限的 WSN 设备已经嵌入智慧农业、智慧城市环境监测、分布式结构健康监测以及工业 IoT 系统等场景，必须在缺乏维护的情况下稳定运行数月乃至数年[?]。由此，IoT sustainability、edge intelligence 与 self-optimizing IoT 的系统级需求日益凸显，而信息与能量过程彼此分裂导致的结构性瓶颈愈发严重[?]。

能量受限的 WSN 设备已经成为智慧农业、智慧城市空气质量监测、分布式结构健康监测以及工业 IoT 的边缘 IoT 基元，这些节点往往需要在无人维护的状态下连续运行数月乃至数年，使得可持续能量共享、信息新鲜度与跨层协调成为 IoT 生态的根本挑战。因此，本研究所关注的问题并非单纯的 WSN 工程优化，而是关于“如何构建一个 IoT-centric system，使信息过程与能量过程在非平稳环境中得到根本耦合，从而同时提升网络寿命与能量平衡？”。

现有研究多采用工程优化思路，包括节能调度、链路选择、机会式路由、Lyapunov 优化以及多目标调度等方法[?], [?]. 这些方法确实能够在既定系统条件下提升能量利用效率或在特定配置下实现局部最优。然而，这些方法都存在一个共同的结构性限制：其优化过程本质上受限于既定的系统框架，往往在延长网络寿命与平衡能量分布之间难以同时兼顾。从方法论视角看，

M. Shell was with the Department of Electrical and Computer Engineering, University Name, City, Country e-mail: (see <http://www.example.com/contact.html>).

J. Doe and J. Doe are with Anonymous University.

Manuscript received Month DD, YYYY; revised Month DD, YYYY.

此类方法遵循的是”约束内优化”范式，其改进表现为在既定约束条件下寻求更优解，但难以从根本上解决网络寿命与能量平衡的协同优化问题。

在传统能量共享 WSN 中，能量预算、链路容量、信息时延、通信开销与公平性约束均作为外生且固定的系统前提存在。这些固定约束使得系统在延长网络寿命与平衡能量分布之间难以同时优化。传统方法往往面临以下困境：延长网络寿命需要减少能量传输以降低整体消耗，但这会加剧能量分布不均衡；而平衡能量分布需要频繁的能量共享，但这又会加速能量消耗，缩短网络寿命。在此框架下设计的优化算法，都难以同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。在传统WSN系统中，通常存在sink节点负责收集和处理传感器节点上传的数据，并将其传输到云端进行进一步处理。sink节点通常具有较高的能量储备，但sink节点周围的传感器节点容易因频繁参与中继转发或能量共享而被耗尽能量，导致过早死亡并形成能量空洞，如何处理能量空洞也是当前WSN系统中的一个重要问题[?].

当系统框架本身不发生改变时，传统能量共享 WSN 难以进一步突破的一个重要原因是其性能瓶颈不是技术层面的，而是系统设计层面的。传统能量共享 WSN 在其默认的决策规则中隐含了多项机制性限制：未考虑到信息年龄这一通信量、节点状态不可得或滞后，从而局限于信息系统独立于能量系统，导致高昂的通信开销进而形成能量空洞，网络能量分布失衡等问题。基于此，本文提出一个**IoT-centric** 信息与能量双生系统，从根本上整合能量与信息系统，通过智能识别关键节点、优化传输路径、动态调整传输策略，在不增加总能量预算的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。该系统通过 IoT-centric architecture 实现信息—能量协同，架构包含 **Proposed IoT Edge Architecture** 统筹视角，并由 **IoT Information Layer**、**IoT Digital-Twin Layer**、**Cross-Layer Scheduling Layer**、**Opportunistic IoT Routing Layer** 与 **Edge Visualization Layer** 五个功能层协同驱动。图 ??给出了本文提出的系统模型架构。

系统的运行机制如下：**IoT Information Layer**（Information Layer）通过能量信息年龄优先级技术（Age-of-Energy-Information, AOEI）持续监测各节点的能量信息年龄，系统维护一个动态AOI上限，当节点的能量信息年龄达到该上限时触发能量共享需求信

号，同时将AOEI值作为关键因素纳入多个奖励函数，用于优化能量传输决策和路径选择。该技术将”能量信息新鲜度  $\times$  能量紧迫度”作为非中心节点的内生优先级信号，动态驱动能量共享触发、排序和预算清算，突破传统效率—公平权衡。**IoT Digital-Twin Layer**（Virtual Node Layer）通过数字孪生状态同步技术为每个物理节点维护一个数字孪生账户，在节点的真实信息尚未上报到sink节点之前，通过理论能量计算（基于能量衰减模型、太阳能采集模型等物理方法）维护虚拟节点能量表，实现低通信开销下的实时高保真状态同步，显著减少因信息滞后导致的错误调度与资源浪费，确保系统在低通信开销下保持全局状态的新鲜度。**Cross-Layer Scheduling Layer**（Scheduling Layer）基于AOEI优先级信号和数字孪生账户提供的状态信息，采用自适应时长规划技术（Adaptive Lyapunov Duration Planning, ALDP），通过自适应参数的Lyapunov优化[?], [?]进行前瞻性传输能量时长规划，依据能量收益、损耗惩罚、信息时效惩罚和信息增益奖励四个因素对候选传输时长进行打分，动态选择综合收益最大的传输时长，使供能强度与传输时长随供需变化自适应调整，避免静态配给导致的长期效用损失。在此基础上，**Cross-Layer Scheduling Layer**进行全局调度决策，识别能量紧迫且信息过时的节点作为受助者，选择能量充足且路径高效的节点作为施助者，在延长网络寿命与平衡能量分布间进行协调优化，实现能量与信息的协同优化。**Opportunistic IoT Routing Layer**（Routing Layer）负责路径收集与中继决策，优先选择将其他路由的目标节点作为中继节点，形成多跳能量传输路径。在能量传输过程中，**Opportunistic IoT Routing Layer**通过机会主义信息收集技术（Energy-Efficient Transfer Opportunistic Routing, EETOR）利用传输路径上的中继节点收集沿途节点的状态信息，将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的”副产品”，实现能量传输与信息收集的深度融合，从根本上整合能量与信息系统，降低通信开销。收集到的信息反馈回**IoT Information Layer**，更新数字孪生账户状态，形成闭环反馈。**Edge Visualization Layer**从**IoT Digital-Twin Layer**获取聚合状态，实时监控网络寿命、能量分布、网络状态与能量变化等关键指标。

该系统通过上述运行机制实现了信息与能量的深度融合：信息流自下而上汇聚形成虚拟节点状态与调度决策，能量流自上而下沿路由执行传输，同时在传输

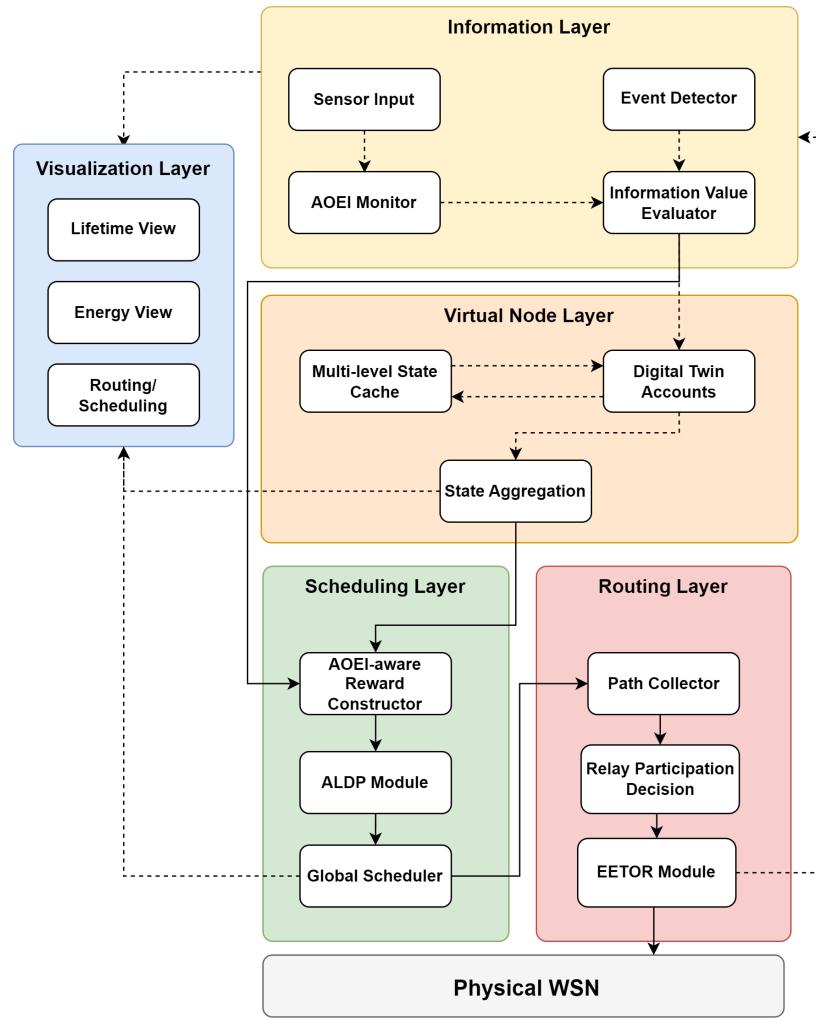


图 1. 系统模型示意图。信息自下而上汇聚形成虚拟节点与调度决策，能量自上而下沿路由执行传输，同时在传输链路上回传状态信息，最终在 Edge Visualization Layer 统一展示。

链路上回传状态信息，形成“信息驱动能量、能量承载信息”的双生闭环。虚线表示节点信息流，实线表示能量调度信息流。通过这种机制设计，系统能够在不增加总能量预算的前提下，智能地识别关键节点、优化传输路径、动态调整传输策略，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。

本文的主要贡献如下：

1) 从系统设计角度系统性揭示了传统能量共享 WSN 在延长网络寿命与平衡能量分布之间难以同时优化的根本原因，说明信息滞后、路径损耗与静态规则共同限制了系统的优化能力；

2) 提出 IoT-centric 信息与能量双生系统，构建了全新的 IoT sustainability 资源调度框架。该系统通过 IoT-centric architecture 整合能量与信息系统，采用能量信息年龄优先级技术 (AOEI)、轻量级 IoT Digital-

Twin、Cross-Layer Scheduling Layer 中的自适应时长规划技术 (ALDP) 与 Opportunistic IoT Routing Layer 的机会主义信息收集技术 (EETOR) 等关键技术，各技术相互耦合、协同工作，从根本上整合了能量与信息系统，以延长网络寿命、平衡能量分布并支撑 scalable deployment 为奋斗目标；

3) 从理论层面证明所提出系统能够在不增加总能量消耗的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡，并为 zero-touch autonomous IoT management 提供可复用的协调基础；

4) 通过仿真实验验证了系统的有效性，表明本文方法可在不增加总能量消耗的前提下显著延长首个节点死亡时间，降低能量变异系数 (CV)，提升网络整体能量均衡度，并展示 self-optimizing IoT 行为在 edge intelligence 任务中的可行性。

## II. RELATED WORK

无线传感器网络（WSN）能量共享研究长期围绕节能调度、链路选择、机会式路由、Lyapunov优化以及多目标调度等工程化策略展开[?], [?]. 这些工作普遍在既定系统假设下追求局部性能提升，却难以突破信息滞后、路径损耗与静态资源配给的结构性瓶颈。正如引言所述，传统方案遵循的是“约束内优化”范式：能量预算、通信开销与公平性约束均被视作外生条件，导致网络寿命与能量平衡无法协同跃升。

**关键掣肘在于信息系统与能量系统相互独立。**信息上报与能量传输分离，使得状态获取必须承担额外通信开销，进一步削减节点能量并加剧能量空洞[?]. 为了延长网络寿命，调度器必须压缩能量流动频率，却因此无法及时平衡空间能量分布；而为追求能量均衡又不得不频繁共享能量，反向缩短寿命。性能瓶颈因此并非单一算法能力不足，而是系统设计缺乏信息—能量协同所致。

已有工作大体可分为三类系统设计思路：**局部优化型、集中调度型与分布式探索型**，但都未能建立信息—能量的一体化协同。

**局部优化型系统**以节能调度、链路选择、机会式路由、传输功率控制等工程手段为代表，通常在静态或准静态假设下调优局部指标。它们侧重减少节点能量不均衡、缩短传输路径或抑制能量损耗，却把状态时效性视为外部输入：信息由固定周期或静态阈值触发，无法根据能量紧迫度实时调整。信息上报的通信成本与能量传输完全分离，导致在提升寿命与维持能量均衡之间始终存在硬性权衡。

**集中调度型系统**依托Lyapunov优化、凸优化或混合整数规划，从全局视角推导可收敛的调度策略，并通过虚拟队列、先验权重等方式平衡不同目标[?], [?]. 此类系统具备较强的理论保证，但高度依赖预设参数与完备信息，缺乏对非平稳环境、异构节点与突发事件的自适应能力。更重要的是，它们通常要求节点独立上报最新状态，调度器再集中决策，信息与能量流仍然沿两条相互独立的通道运行[?], [?].

**分布式探索型系统**近年利用分布式资源分配、AOEI度量、数字孪生、深度强化学习或机会式中继等概念，以期降低中心节点压力并提升可扩展性。然而，多数研究只是在局部模块试验某一功能：AOEI被当作性能指标而非调度信号，数字孪生用于离线监测或仿真而未与能量分配闭环，强化学习依赖高频状态采样

而难以在信息滞后场景稳定运行[?]. 由于缺乏统一的优先级、账户、协调与路径治理体系，信息收集依旧需要独立通信，沿途节点也未被系统性地纳入状态采集流程。

尽管上述各阶段取得一定进展，信息/能量分离依旧导致典型的系统级失效。可以识别出四类关键系统缺口，均源于状态更新与能量调度无法同源：

(i) **优先级信号缺位导致系统解耦**——信息新鲜度、价值与紧急性缺乏统一量化，信息龄（AOEI）未能内生为调度信号，触发传能的时机和强度无法与系统目标一致[?].

(ii) **信息基础设施薄弱导致独立通信开销**——状态感知、时间同步、AOEI度量、节点上报协议等底座仍依赖静态或粗粒度上报（典型间隔 $\geq 30$ 分钟），缺少事件驱动与跨层一致性，使调度、路由与IoT Information Layer状态错位[?]. 最关键的是，信息上报仍无法附着于传能路径，必须独立通信，进一步侵蚀能量预算并诱发信息不对称。

(iii) **传输时长静态化阻碍协同**——多数调度算法预设固定传输时长，忽视路径效率、受助节点紧迫度与信息价值，无法通过自适应Lyapunov规划在寿命、效率与公平之间取得动态平衡。

(iv) **路径选择未嵌入信息收集**——通用路由准则重吞吐、轻能量效率阈值 $\eta_{th}$ ，缺乏跨周期的全局控制策略；多跳损耗难以抑制，且中继节点未被视为实时状态采集点，信息收集仍是独立网络行为[?], [?].

基于系统设计逻辑，必须同时重构优先级形成、状态透明、时长规划与机会主义上报四大系统要素，才能真正打通信息与能量双生循环。本文据此构建了一个结合“优先级形成 + 信息透明 + 时长规划 + 机会主义上报”的系统框架，四个系统要素（AOEI优先级化、数字孪生状态同步、ALDP自适应时长规划、EETOR机会主义上报）共同实现信息与能量双生系统。针对上述缺口，本文在统一框架下的要素映射见表 ??，形成“低开销—高时效—强可解释”的系统范式，并以“性能边界外移”作为统一评估主张。

特别地，系统通过四个要素的协同工作，完成信息/能量的深度整合：**AOEI优先级要素**依据动态AOI上限触发路由终点上报，并将AOEI值纳入多个奖励函数；**数字孪生状态同步要素**在真实状态尚未抵达sink前由理论能量计算维护虚拟能量表，并沿传能路径同步，避免独立通信；**ALDP要素**利用自适应Lyapunov优化进行

前瞻性的传能时长规划，将信息价值纳入供给决策；**EETOR**要素优先把其他路由目标节点纳入中继，沿传能路径采集并回传状态，使信息收集成为能量传输的伴生过程。

与既有研究相比，本文构建了“系统要素—网络行为—性能结果”的可解释链条，四大要素互相耦合、协同运行，形成信息与能量双生系统，为WSN能量共享提供一种高效、公平且可解释的系统化新范式。

此外，现有文献鲜少触及引言中所述的IoT-centric系统协同：IoT Information Layer、IoT Digital-Twin Layer、Cross-Layer Scheduling Layer、Opportunistic IoT Routing Layer与Edge Visualization Layer往往被拆分为各自孤立的算法模块。主流设计通常将sink节点视作高能量的集中处理者，却忽视其周边节点因频繁转发或能量共享而形成的能力空洞问题[?]，也缺少将状态透明化与路径效率阈值 $\eta_{th}$ 联动的机制。相比之下，本文提出的双生系统把AOEI驱动的优先级信号、数字孪生账户、ALDP时长规划与EETOR机会主义上报嵌入统一框架，使信息沿能量路径回流、能量以信息反馈为先导，进一步弥补了现有研究在跨层整合与闭环治理方面的缺口。

### Digital Twin for IoT / Energy Cooperation in IoT

**(A) Digital Twin in IoT:** 数字孪生已被用于IoT设备管理、智能工厂与预测性维护，其核心在于为每个物理节点构建虚拟代理以做运行状态映射[?]。然而现有研究多强调高保真仿真或云侧诊断，缺少面向边缘约束的轻量级实现。本文提出的IoT Digital-Twin Layer采用InfoNode账户构建轻量级IoT digital twin，直接与能量调度和路径决策耦合，从而支撑self-optimizing IoT与edge intelligence。

**(B) Energy Cooperation in Edge IoT Systems:** 现有IoT sustainability文献围绕energy neutral IoT devices、能量补偿调度与机会式能量共享展开，但普遍缺乏信息—能量协同机制[?]；多数能量合作框架仍依赖独立的信息上报，难以在scalable deployment中维持状态透明。本文的IoT-centric dual system把能量共享、信息新鲜度与跨层调度绑定于统一机制，弥补了现有研究在energy cooperation与信息同步之间的空白。

表 I  
系统要素与实现载体的对应关系

系统要素	实现载体/功能
优先级信号化	AOEI（动态AOI上限确定上报时机，AOEI值纳入奖励函数）
信息透明化	数字孪生账户（理论能量计算维护虚拟节点能量表）
时长规划优化	ALDP（自适应Lyapunov优化，能量与信息协同优化）
机会主义上报	EETOR（利用传输路径上的中继节点收集信息，整合能量与信息系统）

## III. MODELING

### A. Real IoT Deployment Patterns

为确保所提出的IoT-centric信息—能量双生系统能够服务于真实世界的IoT sustainability需求，本节首先总结三个具有代表性的边缘IoT部署模式，并抽象出驱动系统设计的共性约束。

**1) (A) 智慧农业：**智慧农业场景中，传感节点随机且稀疏地(random + sparse)部署在农田或牧场，节点间距不均导致通信链路条件高度异质。太阳能采集受季节、阴影与地形影响呈现极不稳定性，一旦连续阴雨就可能形成长期能量空洞[?]。土壤含水率、蒸散等关键变量必须保持空间连续性，但节点死亡会造成监测数据稀疏(data sparse)，直接削弱产量预测模型的准确性。因此，部署需要一个“dual system”以避免能量空洞并保证覆盖度(coverage)：IoT Information Layer利用自适应AOI阈值驱动信息上报，IoT Digital-Twin Layer持续推演节点能量，并通过Cross-Layer Scheduling Layer调节传能时长；同时，Opportunistic IoT Routing Layer在能量传输过程中顺带回收状态信息，使智慧农业网络具备self-optimizing IoT能力。

**2) (B) 智慧城市空气质量监测：**智慧城市监测网络常部署在楼宇与道路交错的空间，城市遮挡导致太阳能收益差异巨大：高层屋顶节点拥有充足可再生能量，而街道阴影区域节点长期处于低能态，形成极端能量不均衡。高楼附近的风廊效应与交通微气象也会造成信息更新滞后，一旦状态信息落后，路由与聚类调度容易失效(routing/cluster failure)[?]。IoT-centric architecture通过信息—能量同步提高QoS与可靠性：IoT Information Layer动态感知信息新鲜度，Cross-Layer Scheduling Layer根据数字孪生估计分配能量预算，Opportunistic IoT Routing Layer将信息回传嵌入能量传输链，实现

zero-touch autonomous IoT management。这样即可在高遮挡环境中维持 edge intelligence 推理所需的数据质量。

3) (C) 工业物联网：工业物联网（IIoT）部署在异构电磁环境中，不同车间或设备分区存在强烈的电磁噪声差异，导致能源采集与无线能量传输效率随空间剧烈波动。现场设备的信息上报成本高昂，往往需要与生产控制网络共享带宽，同时 AI 模型又必须依赖 fresh data[?]。AOEI 与轻量级数字孪生的耦合（AOEI + digital twin）更适合这类缺乏实时信息的工业场景：IoT Digital-Twin Layer 维持虚拟节点账户，Cross-Layer Scheduling Layer 基于 Lyapunov 规划推断传能时长，Opportunistic IoT Routing Layer 通过机会主义路径实现能量驱动的信息回流，Edge Visualization Layer 则支撑运维人员实时掌握工业现场状态，实现 scalable deployment 与 edge intelligence 的协同。

上述三种典型 IoT 部署共享相同的结构性约束：(i) 可再生能源高度非平稳；(ii) 空间能量分布极不均匀；(iii) 由于通信成本和干扰，信息更新存在严重时延[?]。这些共性直接催生了本文提出的信息–能量双生系统：通过 IoT-centric architecture 实现信息–能量协同，使 IoT sustainability 与零人工干预的自演化能力成为同一系统框架内的内生属性，从而在异质部署、10k+ 节点规模与 heterogeneous IoT devices 环境下维持自适应、self-optimizing IoT 行为。

### B. System Model

本章建立不依赖具体实现细节的抽象化模型，强调以机制与约束为主线刻画系统要素，为下一章机制要素的设计与实现提供统一的语义空间与约束基础，从而使同一套机制化设计能够在后续章节中映射到不同的算法实例与实验场景。为便于后续讨论，本节首先给出本文建模中常用的符号与参数表（完整含义与单位见表??），以确保建模符号体系的一致性。

在此基础上，本节采用分层建模方法展开描述。首先从节点视角进行建模，刻画节点的能量状态、采集能力、消耗特性与传输效率等核心属性，并建立物理节点与虚拟信息节点（数字孪生账户）之间的对应关系，用于支撑跨层调度与状态推理。随后从整体场景出发，分别从网络结构、环境供给与链路特性三个维度构建具备普适性的能量共享模型。通过该分层方式，可为后

表 II  
符号与参数说明

符号	说明
$\mathcal{N}, i$	节点集合与节点索引
$C_i, E_i(t)$	节点 <i>i</i> 电池容量与时刻 <i>t</i> 剩余能量
$\theta_i^{\text{low}}, \theta_i^{\text{high}}$	低/高能量阈值
$\mathbf{x}_i(t), \mathbf{v}_i(t), v_{\max}$	节点位置、速度与最大速度
$d_{ij}(t)$	节点对( <i>i, j</i> )的欧氏距离
$E_{\text{sen}}, E_{\text{com}}$	感知/计算能耗与通信能耗
$E_{\text{elec}}, \epsilon_{\text{amp}}, \tau$	电子学能耗、功放系数与路径损耗指数
$B$	传输比特数（或比特率相应时窗量化）
$\eta(d), \eta_0, \gamma$	无线能量传输效率模型参数
$\mathcal{P}, H, H_{\max}$	传能路径、跳数与最大跳数
$\eta_{\mathcal{P}}, \eta_{\text{th}}$	路径累计效率与效率阈值
$E_{\text{send}}, E_{\text{recv}}, E_{\text{loss}}$	发送/接收能量与损耗
$\eta_{\text{solar}}, A_i$	太阳能转换效率与面板面积
$G(t), G_{\max}, t_{\text{rise}}, t_{\text{set}}$	日内辐照度及其参数
$\zeta(t)$	天气扰动因子（有界、均值约为1）
$\text{AOEI}_i(t)$	节点 <i>i</i> 的能量信息年龄
$V_0, \lambda$	信息价值衰减模型参数
$w_{\text{aoei}}, Q_i, \tau$	AOEI权重、虚拟队列与传输时长

续机制设计与性能评估提供统一、结构化且可扩展的建模框架。

### C. Node Modeling

网络由普通传感器节点与 sink 节点组成。sink 节点是网络中的汇聚与控制节点，负责集中接收全网数据、维护全局状态与调度信息，不参与能量传输，其自身能量在本模型中视为充足且不作为优化对象。普通传感器节点既具备能量采集（Energy Harvesting, EH）能力，也具备能量共享/传输（Energy Sharing, ES）能力，可在不同角色间动态切换：在能量充裕时作为供能者执行无线能量传输，在能量紧张时作为受能者发起请求，同时数字孪生账户在 sink 节点通过计算更新信息状态与需求。普通节点*i* ∈  $\mathcal{N}$  具备以下关键属性与动态过程：

- **能量状态：**电池容量  $C_i$ （典型值 3.5 mAh, 3.7 V），当前能量  $E_i(t)$ ，低/高阈值  $\theta_i^{\text{low}}, \theta_i^{\text{high}}$ 。
- **能量采集：**若启用太阳能，基于日内辐照度模型  $G(t) = G_{\max} \sin(\pi(t - t_{\text{rise}})/(t_{\text{set}} - t_{\text{rise}}))$  采集能量，转换效率  $\eta_{\text{solar}} = 0.2$ ，面板面积  $A = 0.1 \text{ m}^2$ 。
- **能量消耗：**感知能耗  $E_{\text{sen}} = 0.1 \text{ J}$ ，通信能耗  $E_{\text{com}} = E_{\text{elec}} B + \epsilon_{\text{amp}} B d^{\tau}$ （其中  $B$  为比特率， $d$  为距离， $\tau = 2$  为路径损耗指数）[?]。
- **能量传输效率：**距离  $d$  处的无线能量传输效率  $\eta(d) = \eta_0/d^{\gamma}$  ( $\eta_0 = 0.6, \gamma = 2.0$ , 对应 1 米处

最大效率60%)。

在信息层，每个物理节点一一映射为在 sink 节点维护的虚拟节点（数字孪生账户），这些虚拟代理承载物理节点的实时状态、账户余额与历史轨迹，用作调度与路由过程中状态访问、预测与推理的接口，从而在不依赖全局实时信息的情况下实现跨层决策联动。

#### D. Scenario Modeling

从网络结构、环境供给与链路特性三个层面描述：该三层建模共同构成一个具备普适性的无线能量共享场景：网络结构层允许从规则网格到随机部署乃至能量空洞的多样拓扑，适配环境监测、灾害应急和智慧城市等主流应用；环境供给层通过日内辐照度与天气扰动的混合建模呈现非平稳能源供给，能够覆盖太阳能、风能等异质采集背景；链路特性层则联动通信与能量传输效率、路径约束与损耗阈值，确保模型既贴合无线能量传输物理规律，又能映射到具备实际部署约束的多跳网络，从而为后续机制与算法分析提供通用而可落地的抽象环境。

- 网络结构：设节点集合为  $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ , sink 节点记为 0 且不参与无线能量共享（wireless energy sharing）。节点  $i$  在时刻  $t$  的二维位置为  $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{R}^2$ 。部署分布支持：
  - (a) 均匀随机： $\mathbf{x}_i(0) \sim \mathcal{U}([0, L] \times [0, L])$ ;
  - (b) 规则网格： $\mathbf{x}_i(0)$  等间距栅格；
  - (c) 能量空洞：存在子域  $\Omega_{\text{hole}} \subset [0, L]^2$ ，使得  $\mathbb{P}(\mathbf{x}_i(0) \in \Omega_{\text{hole}})$  降低，且  $\mathbb{E}[E_i(0) \mid \mathbf{x}_i(0) \in \Omega_{\text{hole}}]$  偏低。

典型规模  $N \in [10, 100]$ 。模型支持可选的节点移动，其位置按如下方式更新：

$$\mathbf{x}_i(t + \Delta t) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t) \Delta t, \quad \|\mathbf{v}_i(t)\| \leq v_{\max},$$

其中  $\mathbf{v}_i(t)$  可取直线、往返或随机游走模型，以反映动态拓扑。

- 环境供给：本文默认所有节点均配备能量采集硬件并具备采能能力；但受部署环境遮挡、安装姿态、器件老化或接口损耗等固定因素影响，部分节点在本实验条件下几乎无法主动自然采能，我们将这种长期有效采能不足的现象称为 *energy shadow*。其单位时间采集量建模为

$$E_{h,i}(t) = \eta_{\text{solar}} A_i \cdot G(t) \cdot \Delta t,$$

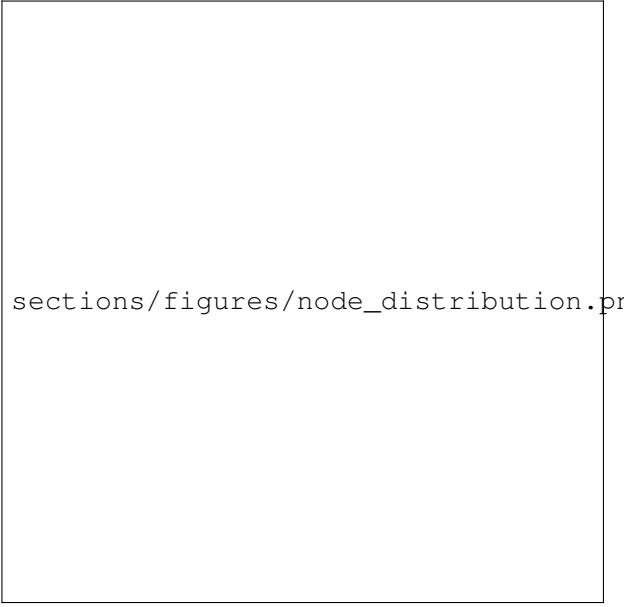


图 2. 网络拓扑示意图。

其中转换效率  $\eta_{\text{solar}} \in (0, 1)$ 、面板面积  $A_i$ ，日内辐照度

$$G(t) = G_{\max} \cdot \max \left\{ 0, \sin \left( \frac{\pi(t - t_{\text{rise}})}{t_{\text{set}} - t_{\text{rise}}} \right) \right\} \cdot \zeta(t), \quad (1)$$

$\zeta(t)$  刻画天气扰动（如  $\mathbb{E}[\zeta] = 1$  的有界噪声）。非平稳性由  $(t_{\text{rise}}, t_{\text{set}})$  与  $\zeta(t)$  共同引入。

- 链路特性：节点对  $(i, j)$  的距离  $d_{ij}(t) = \|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)\|_2$ 。能量传输效率

$$\eta(d_{ij}) = \min \left\{ 1, \max \left\{ 0, \frac{\eta_0}{d_{ij}^{\gamma}} \right\} \right\}, \quad \eta_0 \in (0, 1), \gamma \in [2, 4].$$

多跳路径  $\mathcal{P} = (i = v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow \dots \rightarrow v_H = j)$  的总效率  $\eta_{\mathcal{P}} = \prod_{k=0}^{H-1} \eta(d_{v_k v_{k+1}})$ 。通信能耗采用常用模型（发送/接收）

$$E_{\text{tx}} = E_{\text{elec}} B + \epsilon_{\text{amp}} B \cdot d_{ij}^{\tau},$$

$$E_{\text{rx}} = E_{\text{elec}} B,$$

其中  $\tau$  为路径损耗指数、 $\epsilon_{\text{amp}} > 0$ 。单次无线能量共享（wireless energy sharing）发送量  $E_{\text{send}}$  的有效接收

$$E_{\text{recv}} = \eta_{\mathcal{P}} \cdot E_{\text{send}}, \quad E_{\text{loss}} = E_{\text{send}} - E_{\text{recv}}.$$

系统施加最大跳数  $H_{\max}$  与效率阈值  $\eta_{\text{th}}$ ，仅允许  $\eta_{\mathcal{P}} \geq \eta_{\text{th}}$  且  $H \leq H_{\max}$  的路径，以抑制极低效路径并保障全局能效与公平。

在能量守恒下，节点能量演化为

$$\begin{aligned} E_i(t + \Delta t) = \min \left\{ C_i, E_i(t) - E_{\text{sen},i}(t) - E_{\text{com},i}(t) \right. \\ \left. - E_{\text{send},i}(t) + E_{h,i}(t) + E_{\text{recv},i}(t) \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $C_i$  为电池容量， $E_{\text{sen},i}$  为感知/计算能耗， $E_{\text{com},i}$  为通信能耗。上述三层（结构/供给/链路）与能量演化共同定义机制运行的语义空间与外生扰动，为后续决策与评估提供统一背景与可检验假设。

#### IV. 系统设计：信息与能量双生系统

##### A. 核心问题与系统设计

当系统框架本身不发生改变时，传统能量共享 WSN 难以进一步突破的一个重要原因是其性能瓶颈不是技术层面的，而是系统设计层面的。传统能量共享 WSN 在其默认的决策规则中隐含了多项机制性限制：未考虑到信息年龄这一通信量、节点状态不可得或滞后，从而局限于信息系统独立于能量系统，导致高昂的通信开销进而形成能量空洞，网络能量分布失衡等问题。

只有通过系统设计创新，使系统能够智能地识别关键节点、优化传输路径、动态调整传输策略同时整合能量与信息系统，降低通信开销，才可能在不增加总能量预算的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。基于此，本文提出一个信息与能量双生系统，从根本上整合能量与信息系统，通过 IoT-centric architecture 实现能量与信息的深度融合与协同优化。

**IoT-centric architecture** 共同实现了信息与能量双生系统，从根本上整合了能量与信息系统。本章将详细阐述每个 IoT-centric 层中的关键技术的核心作用、数学模型、算法实现以及技术间的耦合关系，说明它们如何协同工作，共同解决“信息系统独立于能量系统”这一核心问题。

假设网络在时刻  $t$  的状态包括节点能量  $E_i(t)$ 、拓扑与链路特性  $d_{ij}$ 、环境能量采集  $H_i(t)$  以及信息状态  $A_i(t)$  等。我们关心的核心目标包括：(1) 网络寿命——首个节点死亡时间  $T_{\text{death}}$  最大化，即尽可能延长网络生存时间；(2) 能量平衡——能量变异系数 (CV) 和能量方差最小化，即尽可能平衡各节点间的能量分布。现有 WSN 的调度算法通常在这两个目标之间难以同时优化：延长寿命需要减少能量传输，但这会加剧能量不平衡；平衡能量需要频繁传输，但这又会加速能量

消耗。本章则通过 IoT-centric architecture 设计，在不增加总能量消耗的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。

##### B. IoT Information Layer: AOEI能量信息年龄优先级技术

1) 核心作用与问题解决：**IoT Information Layer** 通过AOEI能量信息年龄优先级技术持续监测各节点的能量信息年龄。系统维护一个动态AOI上限，当节点的能量信息年龄达到该上限时触发能量共享需求信号；同时，AOEI值作为关键因素被纳入多个奖励函数，用于优化能量传输决策和路径选择。该技术将“能量信息新鲜度  $\times$  能量紧迫度”作为非中心节点的内生优先级信号，动态驱动能量共享触发、排序和预算清算，突破传统效率—公平权衡。

传统 WSN 调度缺少可解释的内在优先级信号，往往依赖过期状态或静态阈值，导致“该救的不救、该等的不等”的资源错配。更重要的是，传统方法中信息系统的优先级信号与能量系统的决策相互独立，无法有效整合，这正是“信息系统独立于能量系统”问题的典型表现。为了突破这种局限，AOEI能量信息年龄优先级技术将信息新鲜度 (AOEI) 与节点能量紧迫度统一映射为优先级信号，使信息与能量系统耦合，并据此驱动传能触发和排序，从根本上整合能量与信息系统。

2) 数学模型：形式上，我们将  $A_i(t)$  定义为节点  $i$  当前的信息年龄 (Age of Energy Information)，信息量记为  $I_i(t)$ 。信息价值由指数衰减模型给出：

$$V_i(t) = V_0 e^{-\lambda A_i(t)} \times I_i(t), \quad (3)$$

其中  $V_0$  为归一化常数， $\lambda$  为衰减系数。为了将信息价值与能量需求统一为可比较的触发与排序依据，我们进一步定义节点  $i$  的优先级信号为

$$P_i(t) = f(V_i(t), \Delta_i(t), \omega_i(t)), \quad (4)$$

其中  $\Delta_i(t) = \theta_i - E_i(t)$  表示能量缺口， $\omega_i(t)$  为公平权重（例如对弱势节点加权）， $f$  为组合函数。优先级高表示节点更急需能量。

**动态AOI上限机制：**系统为每个节点维护一个动态AOI上限  $A_{\max,i}(t)$ ，该上限根据信息量动态调整：

$$A_{\max,i}(t) = \frac{A_{\max,0}}{1 + I_i(t)/\gamma}, \quad (5)$$

其中  $A_{\max,0}$  为基准AOI上限， $\gamma$  为刻度因子。信息量越大，AOI上限越小，促使节点更快上报，减少信息滞

后。当节点的信息年龄  $A_i(t) \geq A_{\max,i}(t)$  时，触发能量信息上报。

智能被动传能方法给出了以下三项触发指标：

### 1) 低能量节点比例：

$$r_{\text{low}}(t) = \frac{|\{i \mid E_i(t) < \theta_i^{\text{low}}\}|}{N}, \quad (6)$$

当  $r_{\text{low}}(t)$  超过设定阈值  $r_{\text{crit}}$  时触发传能；

### 2) 能量变异系数：

$$\text{CV}(t) = \frac{\sigma(E_1(t), \dots, E_N(t))}{\mu(E_1(t), \dots, E_N(t))}, \quad (7)$$

当  $\text{CV}$  超过阈值  $\text{CV}_{\text{th}}$  时触发传能；

### 3) 极低能量节点：

若存在节点  $i$  满足  $E_i(t) < 0.5\theta_i^{\text{low}}$ ，则立即触发传能。

为了避免频繁触发，算法引入检查间隔  $T_{\text{check}}$  与冷却期  $T_{\text{cool}}$ 。当时间不在检查时刻或冷却期尚未结束时，直接返回“不触发”。同时，若检测到极低能量节点，则绕过冷却期以实现抢占式触发。

**3) 算法实现：**AOEI能量信息年龄优先级技术的算法实现包括三个核心部分：动态AOI上限计算、能量信息上报触发判断和能量传输触发判断。下面详细阐述每个部分的实现细节。

#### 1. 动态AOI上限计算与上报触发：

该部分的核心是根据节点当前的信息量动态调整AOI上限，当信息年龄达到上限时触发能量信息上报。具体实现流程如下：

**Require:** 当前时刻  $t$ , 节点信息年龄  $A_i(t)$ , 信息量  $I_i(t)$ , 基准AOI上限  $A_{\max,0}$ , 刻度因子  $\gamma$

**Ensure:** 是否触发能量信息上报

##### 1: 步骤1：计算动态AOI上限

$$2: A_{\max,i}(t) \leftarrow A_{\max,0}/(1 + I_i(t)/\gamma)$$

3: {信息量越大，AOI上限越小，促使节点更快上报}

4:

##### 5: 步骤2：判断是否触发上报

6: **if**  $A_i(t) \geq A_{\max,i}(t)$  **then**

7:   **return** True {信息年龄达到上限，触发能量信息上报}

8: **else**

9:   **return** False {信息年龄未达上限，继续等待}

10: **end if**

实现细节说明：

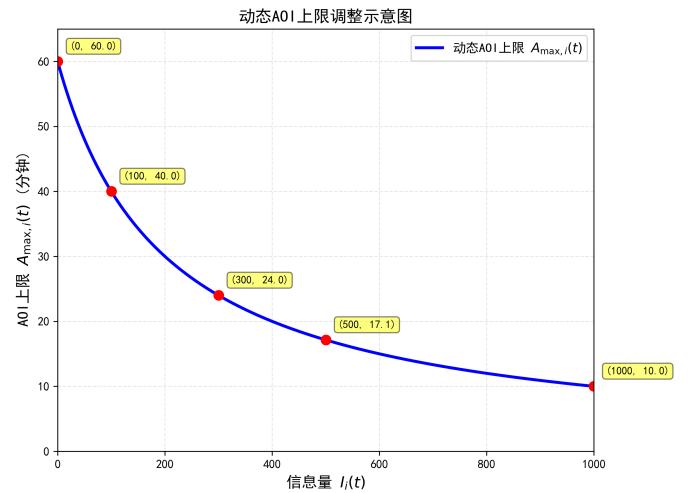


图 3. 动态AOI上限调整示意图。横轴为信息量，纵轴为AOI上限。信息量越大，AOI上限越小，促使节点更快上报。

- 自适应调整机制：**当节点信息量  $I_i(t)$  增加时，分母  $(1 + I_i(t)/\gamma)$  增大，导致  $A_{\max,i}(t)$  减小，从而缩短上报等待时间，确保重要信息及时上报。
- 参数设置：**基准AOI上限  $A_{\max,0}$  通常设置为30-60分钟，刻度因子  $\gamma$  根据网络规模和信息量分布调整，典型值为100-500。
- 触发时机：**当  $A_i(t) \geq A_{\max,i}(t)$  时，节点立即触发能量信息上报，避免信息过度滞后。

**图 ?? 说明：**曲线展示了随着信息量  $I_i(t)$  增大，动态阈值  $A_{\max,i}(t)$  如何以反比例收缩。左端（信息量低）对应容忍更长的等待时间以节省通信，右端（信息量高）则迅速下压阈值，确保高价值数据立即触发上报。图中多个标注点对应典型信息量档位，帮助调度器在仿真中设定不同业务场景下的触发区间。

#### 2. 能量传输触发判断：

该部分根据网络整体能量状态判断是否需要触发能量传输，包括低能量节点比例、能量变异系数和极低能量节点三个指标。

**Require:** 当前时刻  $t$ , 节点能量集合  $\{E_i(t)\}_{i=1}^N$ , 阈值  $\theta_i^{\text{low}}$ 、 $r_{\text{crit}}$ 、 $\text{CV}_{\text{th}}$ , 检查间隔  $T_{\text{check}}$  和冷却期  $T_{\text{cool}}$

**Ensure:** 是否触发传能

##### 1: 步骤1：检查触发时机

2: **if**  $t \bmod T_{\text{check}} \neq 0$  **or**  $(t - \text{last\_transfer\_time}) < T_{\text{cool}}$  **then**

3:   **return** False {不在检查时刻或处于冷却期，不触发}

4: **end if**

5:  
6: **步骤2: 计算能量状态指标**  
7: 计算低能量节点比例:  $r_{\text{low}}(t) \leftarrow |\{i \mid E_i(t) < \theta_i^{\text{low}}\}|/N$   
8: 计 算 能 量 变 异 系 数:  $\text{CV}(t) \leftarrow \sigma(E_1(t), \dots, E_N(t))/\mu(E_1(t), \dots, E_N(t))$   
9:  
10: **步骤3: 判断是否触发传能**  
11: **if**  $r_{\text{low}}(t) > r_{\text{crit}}$  **or**  $\text{CV}(t) > \text{CV}_{\text{th}}$  **then**  
12:   **return** True {能量分布失衡, 触发传能}  
13: **else if**  $\exists i : E_i(t) < 0.5\theta_i^{\text{low}}$  **then**  
14:   **return** True {存在极低能量节点, 立即触发 (绕过冷却期)}  
15: **else**  
16:   **return** False {能量状态正常, 不触发}  
17: **end if**

实现细节说明:

- **检查间隔机制:**  $T_{\text{check}}$  通常设置为10-30分钟, 避免频繁检查造成计算开销。
- **冷却期机制:**  $T_{\text{cool}}$  通常设置为30-60分钟, 防止连续触发导致能量浪费。
- **抢占式触发:** 当检测到极低能量节点 ( $E_i(t) < 0.5\theta_i^{\text{low}}$ ) 时, 绕过冷却期立即触发, 确保关键节点及时获得能量。
- **多指标融合:** 同时考虑低能量节点比例和能量变异系数, 全面评估网络能量分布状态。

### 3. AOEI值纳入奖励函数:

AOEI值作为关键因素被纳入多个奖励函数, 用于优化能量传输决策和路径选择。具体应用包括:

- **路径选择奖励函数:** 在路径选择时, 优先选择能够降低目标节点AOEI的路径:

$$R_{\text{path}} = w_{\text{aoei}} \cdot (A_{\text{before}} - A_{\text{after}}),$$

其中  $A_{\text{before}}$  和  $A_{\text{after}}$  分别为传输前后的AOEI值,  $w_{\text{aoei}}$  为权重系数。

- **传输时长优化奖励函数:** 在Cross-Layer Scheduling Layer的ALDP自适应时长规划技术中, AOEI值被纳入时效惩罚项, 详见Cross-Layer Scheduling Layer部分。

上述技术确保优先级信号由节点能量与信息新鲜度内生成, 减少了传能误配和能量浪费, 为延长网络寿命和平衡能量分布奠定基础。

4) **技术耦合关系:** AOEI能量信息年龄优先级技术作为IoT Information Layer的核心技术, 与其他层技术紧密耦合。一方面, IoT Digital-Twin Layer的数字孪生账户提供及时的节点状态信息, 使得优先级信号和触发判断基于新鲜数据; 另一方面, 触发决策确定了何时进行能量传输, 为后续Cross-Layer Scheduling Layer和Opportunistic IoT Routing Layer提供触发事件。具体而言, 优先级触发选定受助者与施助者后, 会调用Cross-Layer Scheduling Layer的ALDP自适应时长规划技术决策传输时长; 在选择路径并确定节点对后, Opportunistic IoT Routing Layer的EETOR机会主义信息收集技术利用该路径上的中继节点收集沿途节点信息。反过来, 优先级技术中的公平权重 $\omega_i$ 可由数字孪生账户中的账户或历史数据提供, 优先级也间接影响信息报告的优先级和反馈。因此, IoT Information Layer、IoT Digital-Twin Layer、Cross-Layer Scheduling Layer和Opportunistic IoT Routing Layer在体系中形成连贯闭环, 共同驱动全局优化目标。

### C. IoT Digital-Twin Layer: 数字孪生状态同步技术

1) **核心作用与问题解决:** **IoT Digital-Twin Layer**通过数字孪生状态同步技术为每个物理节点维护一个**数字孪生账户**。在节点的真实信息尚未上报到sink节点之前, 通过理论能量计算(基于能量衰减模型、太阳能采集模型等物理方法)维护虚拟节点能量表, 实现低通信开销下的实时高保真状态同步, 显著减少因信息滞后导致的错误调度与资源浪费, 确保系统在低通信开销下保持全局状态的新鲜度。

信息不对称和系统不透明是能源共享系统中的主要障碍。若调度器无法获取实时状态, 便无法正确估值和匹配节点需求, 导致错误优先级分配和状态误判。传统方法中, 信息收集需要独立的通信开销, 形成“信息系统独立于能量系统”的问题。数字孪生状态同步技术通过在sink节点构建数字孪生系统, 利用能量传输路径同步状态, 避免独立的通信开销, 从而整合能量与信息系统。

2) **数学模型:** 为构建完整的系统透明层, 引入**数字孪生账户**作为每个物理节点的数字孪生账户, 维护其最新、历史和预测状态, 并提供查询接口。对于实现IoT Digital-Twin Layer 数字孪生账户, 主要模型包括:

- 1) 理论能量计算模型: 对于节点  $i$ , 在时刻  $t$  的理论能量  $E_i^{\text{est}}(t)$  基于上一次已知能量  $E_i(t_0)$  ( $t_0$  为上次上报时间) 计算:

$$E_i^{\text{est}}(t) = \min \left\{ C_i, E_i(t_0) - E_{\text{cons},i}(t-t_0) + E_{h,i}(t-t_0) - E_{\text{send},i}(t-t_0) + E_{\text{recv},i}(t-t_0) \right\}, \quad (8)$$

其中  $C_i$  为电池容量,  $E_{\text{cons},i}$  为能量消耗 (感知+通信),  $E_{h,i}$  为能量采集 (太阳能),  $E_{\text{send},i}$  和  $E_{\text{recv},i}$  分别为发送和接收能量 (基于已知的传输计划)。

- 2) 信息价值函数:

$$V_{\text{info}}(t) = \text{info\_volume}(t) \times e^{-\beta \text{waiting\_age}(t)}, \quad (9)$$

其中  $\text{info\_volume}$  为未上报的信息量,  $\text{waiting\_age}$  为等待时长 (当前时间减去  $\text{info\_waiting\_since}$ ),  $\beta$  为衰减系数。

- 3) 自适应等待时间: 为平衡信息价值与通信开销, 最大等待时长根据信息量动态调整:

$$T_{\max}^{\text{adaptive}} = \frac{T_{\max}}{1 + \text{info\_volume}/\gamma}, \quad (10)$$

其中  $T_{\max}$  为基准等待时间,  $\gamma$  为刻度因子。信息量越大,  $T_{\max}^{\text{adaptive}}$  越小, 促使节点更快上报, 减少信息滞后。

- 4) 强制上报与去重机制: 若等待时间超出上限或信息价值低于阈值, 则触发强制上报; 上报沿传能路径顺带进行, 并基于源节点集合去除重复信息。

3) 算法实现: 数字孪生账户实现维护每个节点的信息量、等待时间和上报标记。更新流程包括理论能量估算、信息上报触发和状态同步三个核心步骤。下面详细阐述每个步骤的实现细节。

### 1. 理论能量估算:

对于每个节点  $i$ , 如果  $t - t_{\text{last\_update},i} > 0$  (即存在信息滞后), 则基于物理模型估算当前能量。具体实现如下:

**Require:** 节点  $i$ , 当前时刻  $t$ , 上次更新时刻  $t_0$ , 上次已知能量  $E_i(t_0)$ , 已知传输计划

**Ensure:** 估算能量  $E_i^{\text{est}}(t)$

- 1: 步骤1: 计算基础能量变化

2:  $\Delta t \leftarrow t - t_0$  {时间间隔}

3:  $E_{\text{cons}} \leftarrow E_{\text{sen}} \cdot \Delta t + E_{\text{com}} \cdot \Delta t$  {能量消耗}

4:  $E_{\text{harvest}} \leftarrow \eta_{\text{solar}} \cdot A_i \cdot G(t) \cdot \Delta t$  {能量采集}

5:

- 6: 步骤2: 计算传输相关能量变化

7: 根据已知传输计划计算  $E_{\text{send},i}$  和  $E_{\text{recv},i}$

8:

- 9: 步骤3: 计算估算能量

10:  $E_i^{\text{est}}(t) \leftarrow E_i(t_0) - E_{\text{cons}} + E_{\text{harvest}} - E_{\text{send},i} + E_{\text{recv},i}$

11:  $E_i^{\text{est}}(t) \leftarrow \min\{C_i, \max\{0, E_i^{\text{est}}(t)\}\}$  {限制在  $[0, C_i]$  范围内}

12:

- 13: 步骤4: 更新数字孪生账户

14: 更新数字孪生账户中的能量值:  $E_i(t) \leftarrow E_i^{\text{est}}(t)$

15: 标记为估算值:  $\text{is\_estimated}_i \leftarrow \text{True}$

16: 更新估算时间:  $t_{\text{est},i} \leftarrow t$

实现细节说明:

- 能量消耗模型:  $E_{\text{cons}} = E_{\text{sen}} \cdot \Delta t + E_{\text{com}} \cdot \Delta t$ , 其中  $E_{\text{sen}}$  为感知能耗 (通常为 0.1 J/分钟),  $E_{\text{com}}$  为通信能耗 (根据通信量计算)。
- 能量采集模型:  $E_{\text{harvest}} = \eta_{\text{solar}} \cdot A_i \cdot G(t) \cdot \Delta t$ , 其中  $\eta_{\text{solar}} = 0.2$  为太阳能转换效率,  $A_i = 0.1 \text{ m}^2$  为面板面积,  $G(t)$  为日内辐照度。
- 传输计划调整: 根据已知的能量传输计划, 调整发送和接收能量, 确保估算值尽可能准确。
- 边界约束: 估算能量限制在  $[0, C_i]$  范围内, 避免出现负值或超过容量。

图 ?? 说明: 该流程图细化了 IoT Digital-Twin Layer 如何在两次真实上报之间维持状态新鲜度: 首先依据上次上报时间与能耗模型推演基础能量变化, 再叠加采能、传能计划带来的增减, 最终将估算值写回数字孪生账户。流程中的边界约束、估算标记与时间戳更新确保 Cross-Layer Scheduling Layer 能够区分“理论值”与“实测值”, 避免误用陈旧信息。

### 2. 信息上报触发:

节点定时更新信息量和等待时间, 根据自适应等待时间上限和信息价值判断是否触发强制上报。

**Require:** 节点  $i$ , 当前时刻  $t$ , 信息量  $I_i(t)$ , 等待开始时间  $t_{\text{wait},i}$ , 基准等待时间  $T_{\max}$ , 刻度因子  $\gamma$ , 衰减系数  $\beta$

**Ensure:** 是否触发强制上报

- 1: 步骤1: 计算等待时间和自适应上限

2:  $\Delta t \leftarrow t - t_{\text{wait},i}$  {当前等待时间}

3:  $T_{\max}^{\text{adaptive}} \leftarrow T_{\max}/(1 + I_i(t)/\gamma)$  {自适应等待时间上限}

4:

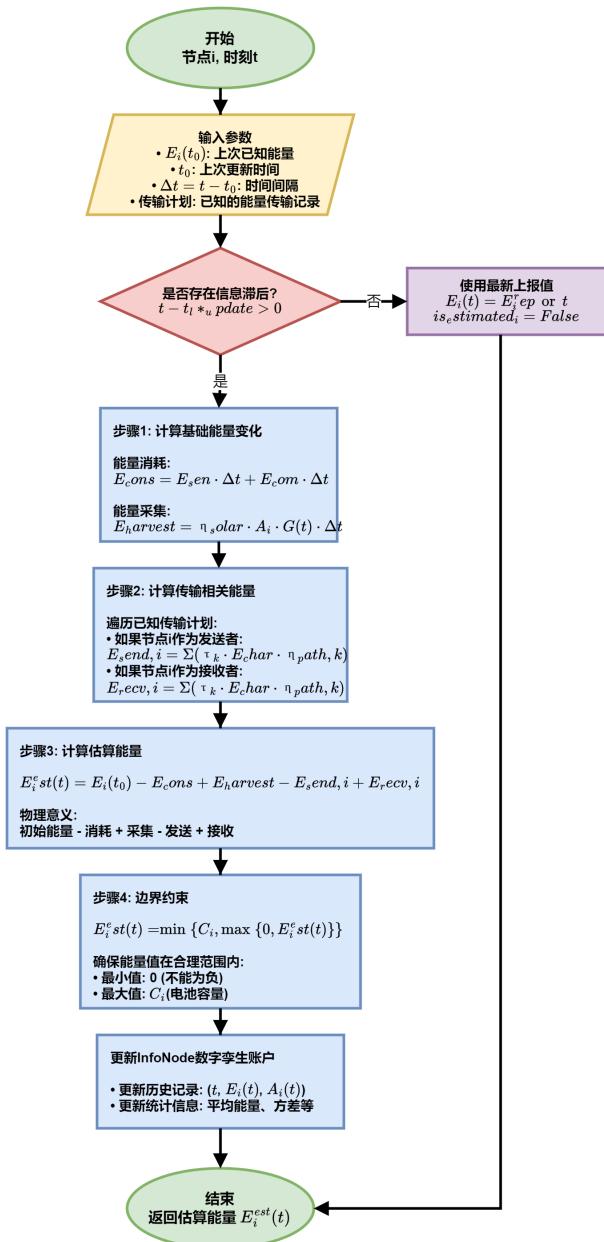


图 4. 数字孪生账户理论能量计算流程图。基于上次已知能量、能量消耗、能量采集和传输计划，计算当前时刻的理论能量。

### 5: 步骤2：计算信息价值

$$6: V_{\text{info}} \leftarrow I_i(t) \times e^{-\beta \cdot \Delta t} \quad \{ \text{信息价值指数衰减} \}$$

7:

### 8: 步骤3：判断是否触发上报

9: if  $\Delta t \geq T_{\text{max}}^{\text{adaptive}}$  or  $V_{\text{info}} < V_{\text{th}}$  then

10: return True {等待时间超限或信息价值过低，触发强制上报}

11: else

12: return False {继续等待，利用能量传输路径捎带上报}

13: end if

实现细节说明：

- **自适应等待时间：**信息量越大，等待时间上限越小，促使节点更快上报重要信息。
- **信息价值衰减：**信息价值随时间指数衰减，确保陈旧信息不会无限期等待。
- **路径捎带机制：**当不触发强制上报时，节点等待能量传输路径经过，将信息捎带上报，避免独立通信开销。
- **去重策略：**上报时基于源节点集合去除重复信息，减少通信量。

### 3. 状态同步：

当节点信息上报到sink节点后，更新数字孪生账户中的状态信息。

**Require:** 节点  $i$ , 上报的能量  $E_i^{\text{report}}$ , 上报的信息年龄  $A_i^{\text{report}}$ , 当前时刻  $t$

**Ensure:** 更新后的数字孪生账户状态

#### 1: 步骤1：更新能量状态

- 2:  $E_i(t) \leftarrow E_i^{\text{report}}$  {使用实际上报值}
- 3:  $\text{is}_{\text{estimated}}, i \leftarrow \text{False}$  {标记为实测值}
- 4:  $t_{\text{last\_update}, i} \leftarrow t$  {更新最后更新时间}
- 5:

#### 6: 步骤2：更新信息状态

- 7:  $A_i(t) \leftarrow A_i^{\text{report}}$  {更新信息年龄}
- 8:  $\text{info\_volume}_i \leftarrow 0$  {重置信息量}
- 9:  $t_{\text{wait}, i} \leftarrow t$  {重置等待开始时间}
- 10:

#### 11: 步骤3：更新历史记录

- 12: 将  $(t, E_i(t), A_i(t))$  添加到历史记录
- 13: 更新统计信息 (平均能量、能量方差等)

这种技术使系统在近乎零通信开销下保持全局状态的新鲜度，减少信息滞后导致的匹配误差，为动态优先级计算与公平分配提供实时数据支撑。

4) 技术耦合关系：数字孪生状态同步技术作为IoT Digital-Twin Layer的核心技术，与IoT Information Layer、Cross-Layer Scheduling Layer和Opportunistic IoT Routing Layer技术相辅相成。一方面，数字孪生账户为IoT Information Layer的AOEI能量信息年龄优先级技术和触发判断提供了最新的能量和信息状态（包括理论估算值），确保触发判断反映当前需求；另一方面，IoT Information Layer的AOEI优先级信号可作为信息报告的权重因子，引导带有高价值信息的节点优

先上报。数字孪生账户利用能量传输事件同步状态，与Opportunistic IoT Routing Layer的EETOR路径相结合：节点将状态附带于传输路径中，路径上的中继节点可以顺带同步信息。这种耦合方式使得信息获取和能量转移相互绑定，从根本上降低了通信开销。此外，数字孪生账户所维护的历史数据和信誉账户可用于后续对节点公平性和可靠性的评估，进而影响Cross-Layer Scheduling Layer的协调设计和预算分配。因此，IoT Digital-Twin Layer既依赖于其他层提供触发和传输机会，又为IoT Information Layer的优先级信号化和Cross-Layer Scheduling Layer的跨期调度提供必要的信息基础，形成有机闭环。

#### D. Cross-Layer Scheduling Layer: ALDP自适应时长规划技术

1) 核心作用与问题解决: **Cross-Layer Scheduling Layer**基于AOEI优先级信号和数字孪生账户提供的状态信息，采用ALDP自适应时长规划技术，通过自适应参数的Lyapunov优化进行前瞻性传输能量时长规划，依据能量收益、损耗惩罚、信息时效惩罚和信息增益奖励四个因素对候选传输时长进行打分，动态选择综合收益最大的传输时长，使供能强度与传输时长随供需变化自适应调整，避免静态配给导致的长期效用损失。在此基础上，Cross-Layer Scheduling Layer进行全局调度决策，识别能量紧迫且信息过时的节点作为受助者，选择能量充足且路径高效的节点作为施助者，在延长网络寿命与平衡能量分布间进行协调优化，实现能量与信息的协同优化。

在能量共享无线传感器网络中，传统的调度方案往往为每次能量传输设定一个固定时长 $\tau$ 。这种固定时长无法根据路径效率、接收节点的能量需求、信息新鲜度以及潜在的信息量动态调整供给：过短的传输导致频繁启动和控制开销过大，过长的传输虽然一次可送更多能量并带回更多信息，但容易造成能量过度消耗并拉长信息时滞，因而在效率、公平与寿命之间形成不可突破的 trade-off。更重要的是，传统方法未能在时长规划中考虑信息价值，无法实现能量与信息的协同优化，这正是“信息系统独立于能量系统”问题的又一表现。ALDP自适应时长规划技术通过在时长规划中考虑信息价值，实现能量与信息的协同优化，从根本上整合能量与信息系统。

2) 数学模型：设最小和最大传输时长为 $\tau_{\min}$ 与 $\tau_{\max}$ （如1–5分钟），每条候选传输路径 $\mathcal{P}$ 的效率 $\eta_{\mathcal{P}}$ 由路径选择算法给出。对每个候选时长 $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ ，计算以下指标：

- **能量收益**  $B_{\text{energy}}(\tau)$ : 设发送功率为 $E_{\text{char}}$ ，则发送能量为 $E_{\text{sent}}(\tau) = \tau E_{\text{char}}$ ，接收能量为 $E_{\text{recv}}(\tau) = \eta_{\mathcal{P}} E_{\text{sent}}(\tau)$ 。若接收节点能量缺口为 $\Delta$ ，其归一化缺口 $Q_{\text{norm}} = \Delta / \bar{E}$ （ $\bar{E}$ 为平均能量），则能量收益为

$$B_{\text{energy}}(\tau) = E_{\text{recv}}(\tau) \cdot Q_{\text{norm}}.$$

- **损耗惩罚**  $P_{\text{loss}}(\tau)$ : 能量损失为 $E_{\text{loss}}(\tau) = E_{\text{sent}}(\tau) - E_{\text{recv}}(\tau)$ 。根据Lyapunov漂移加罚框架，引入调节系数 $V$ 作为损耗惩罚权重，定义

$$P_{\text{loss}}(\tau) = V E_{\text{loss}}(\tau).$$

- **时效惩罚**  $P_{\text{aoi}}(\tau)$ : AoI随时间线性增长，信息时效损失与 $\tau$ 成正比。设时效惩罚权重为 $w_{\text{aoi}}$ ，则

$$P_{\text{aoi}}(\tau) = w_{\text{aoi}} \tau Q_{\text{norm}}.$$

注意：这里AOEI值作为关键因素被纳入奖励函数，体现了IoT Information Layer的AOEI能量信息年龄优先级技术与Cross-Layer Scheduling Layer的ALDP自适应时长规划技术的耦合。

- **信息奖励**  $R_{\text{info}}(\tau)$ : 假设信息收集速率为 $r_{\text{info}}$ 单位/分钟，信息增益为 $G_{\text{info}}(\tau) = r_{\text{info}} \tau$ 。若接收节点有待上报的信息，则全部纳入奖励；否则仅计入一半，用权重 $w_{\text{info}}$ 控制奖励力度：

$$R_{\text{info}}(\tau) = w_{\text{info}} G_{\text{info}}(\tau) \times \begin{cases} 1, & \text{有新信息待收集,} \\ 0.5, & \text{信息已收集过.} \end{cases}$$

定义综合评分函数：

$$\text{Score}(\tau) = B_{\text{energy}}(\tau) - P_{\text{loss}}(\tau) - P_{\text{aoi}}(\tau) + R_{\text{info}}(\tau).$$

调度器遍历所有候选时长，计算 $\text{Score}(\tau)$ ，选取得分最高的时长 $\tau^*$ 作为本次传输的持续时间。

3) 算法实现：ALDP自适应时长规划技术的算法实现包括三个核心步骤：参数初始化、候选时长评分和最优时长选择。下面详细阐述每个步骤的实现细节。

##### 1. 参数初始化：

在开始评分之前，需要计算归一化能量缺口和初始化相关变量。

**Require:** 候选路径  $\mathcal{P}$ , 候选时长集合  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ , 节点能量缺口  $\Delta$ , 平均能量  $\bar{E}$ , 路径效率  $\eta_{\mathcal{P}}$ , 权重  $V, w_{\text{aoi}}, w_{\text{info}}$  和信息速率  $r_{\text{info}}$

**Ensure:** 最优传输时长  $\tau^*$

```

1: 步骤1: 计算归一化能量缺口
2:  $Q_{\text{norm}} \leftarrow \Delta / \bar{E}$  {归一化能量缺口, 用于权重调整}
3:
4: 步骤2: 初始化最优解
5:  $\tau^* \leftarrow \tau_{\min}$  {初始化为最小时长}
6:  $\text{bestScore} \leftarrow -\infty$  {初始化为负无穷}
7:  $\Delta\tau \leftarrow (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / N_{\text{steps}}$  {时长步长,  $N_{\text{steps}}$  为搜索步数}

2. 候选时长评分:
对每个候选时长, 计算能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励, 得到综合评分。

1: for  $\tau = \tau_{\min}$  to  $\tau_{\max}$  step  $\Delta\tau$  do
2:   步骤1: 计算能量传输量
3:    $E_{\text{sent}}(\tau) \leftarrow \tau \cdot E_{\text{char}}$  {发送能量}
4:    $E_{\text{recv}}(\tau) \leftarrow \eta_{\mathcal{P}} \cdot E_{\text{sent}}(\tau)$  {接收能量 (考虑路径效率)}
5:    $E_{\text{loss}}(\tau) \leftarrow E_{\text{sent}}(\tau) - E_{\text{recv}}(\tau)$  {能量损耗}
6:
7:   步骤2: 计算能量收益
8:    $B_{\text{energy}}(\tau) \leftarrow E_{\text{recv}}(\tau) \cdot Q_{\text{norm}}$  {能量收益与缺口成正比}
9:
10:  步骤3: 计算损耗惩罚
11:   $P_{\text{loss}}(\tau) \leftarrow V \cdot E_{\text{loss}}(\tau)$  {Lyapunov漂移加罚框架}
12:
13:  步骤4: 计算时效惩罚
14:   $P_{\text{aoi}}(\tau) \leftarrow w_{\text{aoi}} \cdot \tau \cdot Q_{\text{norm}}$  {AOEI值纳入奖励函数}
15:
16:  步骤5: 计算信息奖励
17:   $G_{\text{info}}(\tau) \leftarrow r_{\text{info}} \cdot \tau$  {信息收集增益}
18:  if 接收节点有待上报信息 then
19:     $R_{\text{info}}(\tau) \leftarrow w_{\text{info}} \cdot G_{\text{info}}(\tau) \cdot 1.0$  {有新信息, 全额奖励}
20:  else
21:     $R_{\text{info}}(\tau) \leftarrow w_{\text{info}} \cdot G_{\text{info}}(\tau) \cdot 0.5$  {无新信息, 减半奖励}
22:  end if
23:
```

24: **步骤6: 计算综合评分**

25:  $\text{score}(\tau) \leftarrow B_{\text{energy}}(\tau) - P_{\text{loss}}(\tau) - P_{\text{aoi}}(\tau) + R_{\text{info}}(\tau)$

26:

27: **步骤7: 更新最优解**

28: **if**  $\text{score}(\tau) > \text{bestScore}$  **then**

29:  $\text{bestScore} \leftarrow \text{score}(\tau)$

30:  $\tau^* \leftarrow \tau$

31: **end if**

32: **end for**

实现细节说明:

- **搜索步数:**  $N_{\text{steps}}$  通常设置为10-20, 在计算精度和效率之间平衡。
- **Lyapunov参数:**  $V$  为调节系数, 控制损耗惩罚的权重, 通常设置为0.5-2.0。
- **时效惩罚权重:**  $w_{\text{aoi}}$  控制AOEI对时长决策的影响, 通常设置为0.1-0.5。
- **信息奖励权重:**  $w_{\text{info}}$  控制信息收集的激励力度, 通常设置为0.2-1.0。
- **信息状态判断:** 通过查询数字孪生账户判断接收节点是否有待上报信息, 决定信息奖励的系数。

**图 ?? 说明:** 图中五条曲线分别对应能量收益、损耗惩罚、时效惩罚、信息奖励以及最终综合得分。随着传输时长增加, 能量收益与信息奖励线性增长, 但损耗与AOI惩罚也随之放大, 导致综合得分呈现“先升后降”的最优点。调度器即通过遍历该评分曲线, 挑选峰值对应的  $\tau^*$ , 实现供能强度与信息捎带之间的动态平衡。

3. 最优时长选择:

选择综合评分最高的时长作为最优传输时长。

1: **输出最优传输时长**

2: **return**  $\tau^*$  {返回最优传输时长}

该决策技术源自代码库中的 *DurationAwareLyapunovScheduler* 实现, 其核心思想是用 Lyapunov 漂移加罚的方法平衡能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励。通过动态选择传输时长, 它能够在不增加总能量投入的情况下, 实现单位能量收益最大化, 降低 AoI 增长速度, 并鼓励在传输期间收集信息, 从而在效率、公平性与寿命等维度同时提升系统性能。

4) 技术耦合关系: ALDP自适应时长规划技术作为Cross-Layer Scheduling Layer的核心技术, 与IoT Information Layer、IoT Digital-Twin Layer及Opportunistic

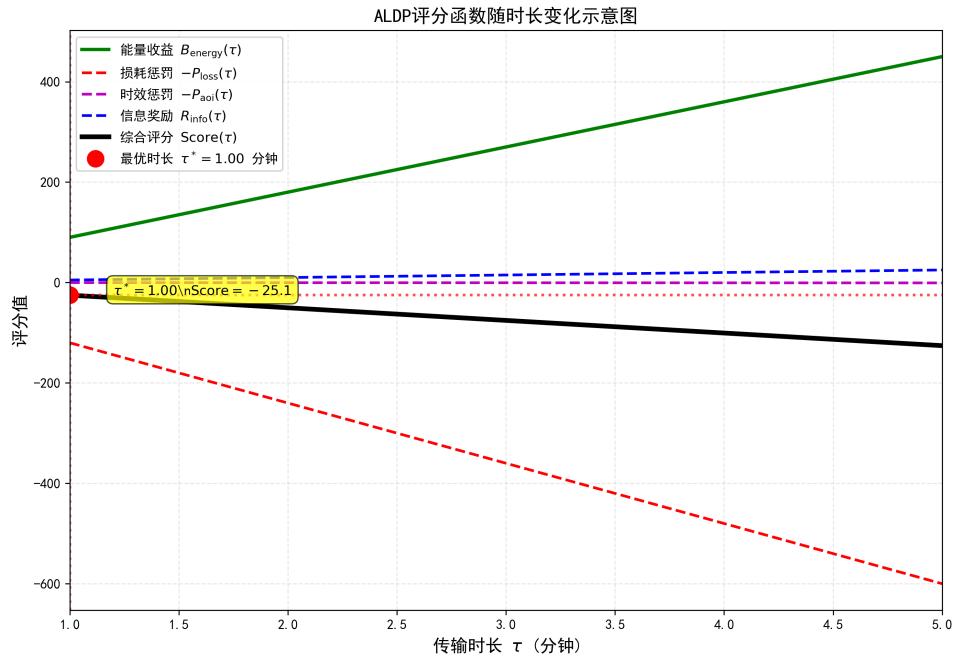


图 5. ALDP评分函数随时长变化示意图。横轴为传输时长，纵轴为综合评分。评分函数综合考虑能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励，选择得分最高的时长。

IoT Routing Layer技术共同构成端到端决策链。具体地，接收节点的能量缺口  $\Delta$  和信息量来自IoT Digital-Twin Layer的数字孪生账户；IoT Information Layer的AOEI优先级为需求归一化提供了权重，AOEI值作为关键因素被纳入时效惩罚项。该技术的输出  $\tau^*$  影响了下一次信息年龄和能量分布，从而反馈给IoT Information Layer的优先级信号和触发周期：长时间高效传输会降低接收节点的 AOEI，从而改变后续触发的优先级；同时，传输持续时间影响能量消耗速率，间接影响Opportunistic IoT Routing Layer的路径选择和公平度。此外，门限动态调整过程利用整个网络的运行指标，使得跨期调度在系统反馈下与其他层技术联动，实现全局优化目标的协同演化。传输路径确定后，Opportunistic IoT Routing Layer的EETOR机会主义信息收集技术利用该路径上的中继节点收集沿途节点信息。

#### E. Opportunistic IoT Routing Layer: EETOR机会主义信息收集技术

1) 核心作用与问题解决：**Opportunistic IoT Routing Layer**负责路径收集与中继决策，优先选择将其他路由的目标节点作为中继节点，形成多跳能量传输路径。在能量传输过程中，Opportunistic IoT Routing Layer通过EETOR机会主义信息收集技术利用传输路径上的中继节点收集沿途节点的状态信息，将信息收集

从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，实现能量传输与信息收集的深度融合，从根本上整合能量与信息系统，降低通信开销。收集到的信息反馈回IoT Information Layer，更新数字孪生账户状态，形成闭环反馈。

在能量传输过程中，传统方法往往需要独立的通信开销来收集节点状态信息，形成“信息孤岛”。这正是“信息系统独立于能量系统”问题的典型表现：信息收集需要独立的通信开销，导致高昂的通信成本，进而形成能量空洞和网络能量分布失衡。EETOR机会主义信息收集技术通过将能量传输路径上的中继节点作为信息收集点，在能量传输过程中顺带收集沿途节点的状态信息，从根本上整合能量与信息系统，实现能量传输与信息收集的协同，降低通信开销。

2) 数学模型：实现EETOR (Energy-Efficient Transfer Opportunistic Routing) 机会主义信息收集技术的核心在于：当能量传输路径确定后，将该路径上的中继节点作为信息收集点，沿途收集节点状态信息。设传输路径为  $\mathcal{P} = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ ，其中  $v_0$  为源节点， $v_k$  为目标节点， $\{v_1, \dots, v_{k-1}\}$  为中继节点。对于路径上的每个节点  $v_i$ ，其待上报的信息量记为  $B_{v_i}$ ，信息年龄为  $A_{v_i}$ 。路径的总信息增益  $G_{info}(\mathcal{P})$  定义为沿途可收集

的、经过新鲜度加权的信息总量：

$$G_{\text{info}}(\mathcal{P}) = \sum_{v_i \in \mathcal{P}} B_{v_i} \cdot e^{-\lambda_A A_{v_i}}, \quad (11)$$

其中  $\lambda_A$  为信息年龄衰减系数，确保优先收集最新鲜或最陈旧（最急需更新）的信息。

**路径选择优化：**在路径选择时，不仅考虑能量传输效率，还考虑信息收集增益。定义路径的综合评分函数：

$$\text{Score}(\mathcal{P}) = \alpha \cdot \eta_{\mathcal{P}} + (1 - \alpha) \cdot \frac{G_{\text{info}}(\mathcal{P})}{G_{\max}}, \quad (12)$$

其中  $\eta_{\mathcal{P}}$  为路径能量传输效率， $G_{\max}$  为最大可能的信息增益， $\alpha \in [0, 1]$  为权重参数。优先选择综合评分高的路径，实现能量传输与信息收集的协同优化。

3) 算法实现：EETOR机会主义信息收集技术的算法实现包括四个核心步骤：路径选择优化、信息收集、信息聚合与捎带、信息更新。下面详细阐述每个步骤的实现细节。

### 1. 路径选择优化：

在路径选择时，不仅考虑能量传输效率，还考虑信息收集增益，实现能量传输与信息收集的协同优化。

**Require:** 候选路径集合  $\{\mathcal{P}_j\}$ ，路径效率  $\{\eta_{\mathcal{P}_j}\}$ ，信息增益  $\{G_{\text{info}}(\mathcal{P}_j)\}$ ，权重  $\alpha$ ，最大信息增益  $G_{\max}$

**Ensure:** 最优路径  $\mathcal{P}^*$

- 1: **步骤1：初始化**
- 2:  $\mathcal{P}^* \leftarrow \emptyset$  {初始化为空路径}
- 3:  $\text{bestScore} \leftarrow -\infty$  {初始化为负无穷}
- 4:
- 5: **步骤2：计算每条路径的综合评分**
- 6: **for** 每条候选路径  $\mathcal{P}_j$  **do**
- 7:   计算归一化信息增益： $G_{\text{norm},j} \leftarrow G_{\text{info}}(\mathcal{P}_j)/G_{\max}$
- 8:   计算综合评分： $\text{score}_j \leftarrow \alpha \cdot \eta_{\mathcal{P}_j} + (1 - \alpha) \cdot G_{\text{norm},j}$
- 9:   { $\alpha$ 控制能量效率与信息收集的权衡，通常设置为0.6-0.8}
- 10:   **if**  $\text{score}_j > \text{bestScore}$  **then**
- 11:      $\text{bestScore} \leftarrow \text{score}_j$
- 12:      $\mathcal{P}^* \leftarrow \mathcal{P}_j$
- 13:   **end if**
- 14: **end for**
- 15:
- 16: **步骤3：输出最优路径**
- 17: **return**  $\mathcal{P}^*$

表 III  
EETOR示例中两个目标节点携带的能量信息

	Target Node1		Target Node2	
	节点	时间戳	节点	时间戳
供能路径	Source1→Relay1→Relay2→T1		Source2→T1→T2	
能量信息	Source Node1	t	Source Node1	t
	Relay Node1	t	Relay Node1	t
	Relay Node2	t	Relay Node2	t
	Target Node1	t	Target Node1	t
			Source Node2	t'
			Target Node1	t'
			Target Node2	t'

### 实现细节说明：

- 信息增益计算：**对于路径  $\mathcal{P}_j = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ ，信息增益为：

$$G_{\text{info}}(\mathcal{P}_j) = \sum_{v_i \in \mathcal{P}_j} B_{v_i} \cdot e^{-\lambda_A A_{v_i}},$$

其中  $B_{v_i}$  为节点  $v_i$  的待上报信息量， $A_{v_i}$  为信息年龄， $\lambda_A$  为衰减系数。

- 权重参数：** $\alpha$  控制能量效率与信息收集的权衡， $\alpha$  越大，越重视能量效率； $\alpha$  越小，越重视信息收集。
- 路径效率：** $\eta_{\mathcal{P}_j}$  为路径的累积能量传输效率，考虑多跳路径损耗。

**图 ?? 说明：**示意图展示了两个目标节点的典型能量路径：Target Node1由Source Node1经Relay 1&2供能，且与Source Node2的直接链路形成路径交织；Target Node2则依赖Target Node1作为中继完成后续传递。沿途紫色文本框表示信息捎带点，橙色箭头标示不同路径的能量损耗，且满足  $t' > t$ 。图中两个目标节点所携带的能量信息整理于表 ??。设当前时间戳为  $T$ ，在 Target Node2 未上报至 sink 节点前，路由1 (routing1) 的整体AOEI为  $T - t$ ，路由2 (routing2) 的整体AOEI为  $T - t'$ 。基于动态AOEI上限机制，Target Node2 拥有更多数据包，因此会先于 Target Node1 将两条路上所有节点的能量信息上报至 sink 节点，以刷新数字孪生系统中的节点能量信息。

### 2. 信息收集：

当能量传输数据包经过路径上的每个中继节点时，该节点将其本地待上报信息进行压缩和摘要后附加到数据包中。

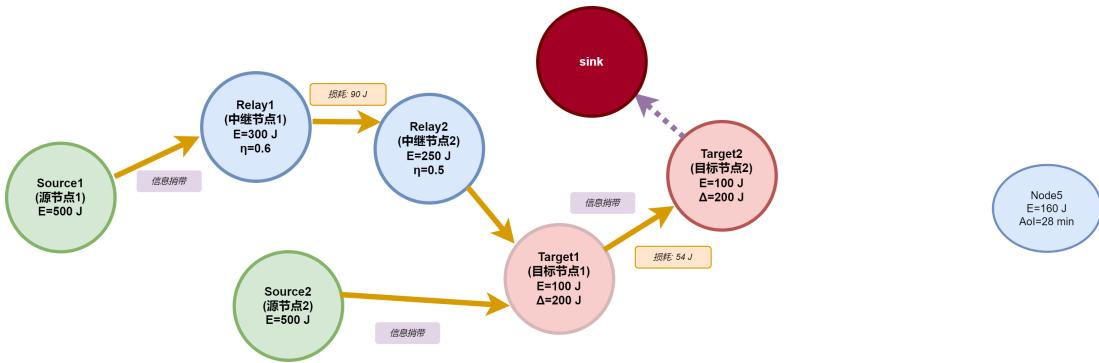


图 6. EETOR路径选择与信息收集示意图。路径选择时综合考虑能量传输效率和信息收集增益，在能量传输过程中顺带收集沿途节点信息。

**Require:** 最优路径  $\mathcal{P}^* = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ , 能量传输数据包  $pkt$

**Ensure:** 包含沿途节点信息的数据包  $pkt'$

1: **步骤1:** 初始化信息聚合缓冲区

2:  $info\_buffer \leftarrow \emptyset$  {信息聚合缓冲区}

3:  $visited\_nodes \leftarrow \emptyset$  {已访问节点集合 (用于去重) }

4:

5: **步骤2:** 沿路径收集信息

6: **for** 路径上的每个节点  $v_i \in \mathcal{P}^*$  **do**

7:   **if**  $v_i \notin visited\_nodes$  **then**

8:     获取节点  $v_i$  的待上报信息:  $B_{v_i}, A_{v_i}$

9:     压缩信息:  $B_{v_i}^{compressed} \leftarrow compress(B_{v_i})$

10:   计算信息摘要:  $hash_i \leftarrow hash(B_{v_i})$

11:   添加到缓冲区:  $info\_buffer \leftarrow info\_buffer \cup \{(v_i, B_{v_i}^{compressed}, A_{v_i}, hash_i)\}$

12:    $visited\_nodes \leftarrow visited\_nodes \cup \{v_i\}$

13:   **end if**

14: **end for**

15:

16: **步骤3:** 将信息附加到数据包

17:  $pkt'.info\_payload \leftarrow info\_buffer$  {将信息附加到数据包的信息载荷字段}

18: **return**  $pkt'$

实现细节说明:

- **信息压缩:** 使用压缩算法 (如gzip、LZ4等) 压缩节点信息，减少通信开销。
- **信息摘要:** 使用哈希函数 (如MD5、SHA-256等) 计算信息摘要，用于去重和完整性校验。
- **去重机制:** 通过  $visited\_nodes$  集合避免重复收集同一节点的信息。
- **数据包结构:** 能量传输数据包预留信息载荷字段，

用于捎带节点信息。

### 3. 信息聚合与捎带:

为减少冗余，采用布隆过滤器等机制进行路径内的去重，确保最终到达目标节点的是增量信息。

**Require:** 包含沿途节点信息的数据包  $pkt'$ , 目标节点  $v_k$

**Ensure:** 聚合后的信息  $info\_aggregated$

1: **步骤1:** 初始化布隆过滤器

2:  $bloom\_filter \leftarrow new BloomFilter(m, k)$  { $m$ 为位数组大小,  $k$ 为哈希函数数量}

3:  $info\_aggregated \leftarrow \emptyset$

4:

5: **步骤2:** 去重并聚合信息

6: **for** 数据包中的每条信息  $(v_i, B_{v_i}^{compressed}, A_{v_i}, hash_i)$  **do**

7:   **if**  $hash_i \notin bloom\_filter$  **then**

8:     **bloom\\_filter.add(hash\_i)** {添加到布隆过滤器}

9:      $info\_aggregated \leftarrow info\_aggregated \cup \{(v_i, B_{v_i}^{compressed}, A_{v_i})\}$

10:   **end if**

11: **end for**

12:

13: **步骤3:** 输出聚合信息

14: **return**  $info\_aggregated$

实现细节说明:

- **布隆过滤器:** 使用布隆过滤器进行快速去重，空间复杂度低，但可能存在假阳性（不会出现假阴性）。
- **参数设置:** 布隆过滤器的位数组大小  $m$  和哈希函数数量  $k$  根据网络规模和信息量调整。
- **增量信息:** 只保留未收集过的信息，减少通信开销

和存储空间。

#### 4. 信息更新:

收集到的信息用于更新数字孪生账户，实现状态同步。

**Require:** 聚合后的信息  $\text{info\_aggregated}$ , 当前时刻  $t$

**Ensure:** 更新后的数字孪生账户状态

1: **步骤1: 解析信息**

2: **for** 每条信息  $(v_i, B_{v_i}^{\text{compressed}}, A_{v_i}) \in \text{info\_aggregated}$   
**do**

3:   解压缩信息:  $B_{v_i} \leftarrow \text{decompress}(B_{v_i}^{\text{compressed}})$

4:   提取节点状态:  $(E_i, A_i, I_i) \leftarrow \text{parse}(B_{v_i})$

5:

6: **步骤2: 更新数字孪生账户**

7:   更新能量状态:  $\text{DT}[v_i].E(t) \leftarrow E_i$

8:   更新信息年龄:  $\text{DT}[v_i].A(t) \leftarrow A_i$

9:   更新信息量:  $\text{DT}[v_i].I(t) \leftarrow I_i$

10:   标记为实测值:  $\text{DT}[v_i].\text{is\_estimated} \leftarrow \text{False}$

11:   更新最后更新时间:  $\text{DT}[v_i].t_{\text{last\_update}} \leftarrow t$

12:

13: **步骤3: 更新历史记录**

14:   将  $(t, E_i, A_i, I_i)$  添加到  $\text{DT}[v_i].\text{history}$

15: **end for**

16:

17: **步骤4: 触发后续处理**

18: 触发IoT Information Layer的AOEI能量信息年龄优先级技术重新计算优先级信号

19: 触发Cross-Layer Scheduling Layer的ALDP自适应时长规划技术重新评估能量传输需求

通过这种方式，EETOR 将信息收集从一个独立的网络行为，转变为能量传输的”副产品”，在能量传输过程中顺带收集沿途节点信息，实现能量传输与信息收集的协同，降低通信开销，并最大化网络透明度。

4) 技术耦合关系: EETOR机会主义信息收集技术作为Opportunistic IoT Routing Layer的核心技术，建立在IoT Information Layer的AOEI优先级、IoT Digital-Twin Layer的数字孪生账户和Cross-Layer Scheduling Layer的ALDP自适应时长规划技术之上：在IoT Information Layer的优先级触发和Cross-Layer Scheduling Layer的时长规划确定传输路径后，EETOR利用该路径上的中继节点收集沿途节点信息。路径上各节点的状态信息（包括能量水平和信息量）来源于IoT Digital-Twin Layer的数字孪生账户缓存。能量传输和信息上报

同时进行，收集到的信息进一步完善IoT Digital-Twin Layer的数字孪生账户数据，并反回馈回IoT Information Layer更新优先级信号。通过将信息收集与能量传输绑定，Opportunistic IoT Routing Layer与IoT Information Layer、IoT Digital-Twin Layer、Cross-Layer Scheduling Layer等技术形成互补，在降低通信开销的同时提升网络透明度，共同推动网络目标的协同达成。

#### F. 小结: IoT-centric架构共同实现信息与能量双生系统

本文的设计并非对传统算法进行局部调参，而是从系统设计层面对能量共享网络的运行逻辑进行整体重构，以延长网络寿命和平衡能量分布为核目标：

- **IoT Information Layer:** 通过AOEI能量信息年龄优先级技术持续监测各节点的能量信息年龄，系统维护一个动态AOI上限，当节点的能量信息年龄达到该上限时触发能量共享需求信号，同时将AOEI值作为关键因素纳入多个奖励函数，用于优化能量传输决策和路径选择；

- **IoT Digital-Twin Layer:** 通过数字孪生状态同步技术为每个物理节点维护一个数字孪生账户，在节点的真实信息尚未上报到sink节点之前，通过理论能量计算维护虚拟节点能量表，实现低通信开销下的实时高保真状态同步；

- **Cross-Layer Scheduling Layer:** 基于AOEI优先级信号和数字孪生账户提供的状态信息，采用ALDP自适应时长规划技术，通过自适应参数的Lyapunov优化进行前瞻性传输能量时长规划，依据能量收益、损耗惩罚、信息时效惩罚和信息增益奖励四个因素对候选传输时长进行打分，动态选择综合收益最大的传输时长，实现能量与信息的协同优化；

- **Opportunistic IoT Routing Layer:** 负责路径收集与中继决策，优先选择将其他路由的目标节点作为中继节点，形成多跳能量传输路径，通过EETOR机会主义信息收集技术利用传输路径上的中继节点收集沿途节点的状态信息，将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的”副产品”；

- **Edge Visualization Layer:** 从IoT Digital-Twin Layer获取聚合状态，实时监控网络寿命、能量分布、网络状态与能量变化等关键指标。

这些技术在IoT-centric架构中的联动不仅提升节点间能量分配的效率，也同时增强能量平衡性与整体寿

命。在不改变能量输入总量的前提下，它们通过协同互动，使系统能够同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡，形成一种“协同增益”式的系统增益格局。**IoT-centric处理架构（IoT Information Layer、IoT Digital-Twin Layer、Cross-Layer Scheduling Layer、Opportunistic IoT Routing Layer、Edge Visualization Layer）**共同实现了信息与能量双生系统：IoT Information Layer通过AOEI技术控制能量信息上报时机，并将AOEI值纳入奖励函数；IoT Digital-Twin Layer通过数字孪生状态同步技术维护虚拟节点能量表，减少信息滞后影响；Cross-Layer Scheduling Layer通过ALDP技术实现前瞻性传输时长规划；Opportunistic IoT Routing Layer通过EETOR技术实现能量传输与信息收集的深度融合；Edge Visualization Layer提供实时监控与反馈。这IoT-centric架构相互耦合、协同工作，从根本上整合了能量与信息系统，解决了“信息系统独立于能量系统”这一核心问题，为未来自治型能量共享网络提供了新的理论框架与可实施路径。

## V. 实验设计与分析

本章旨在通过系统化实验证证第 ?? 章提出的信息与能量双生系统的有效性。实验设计直接对应引言中提出的核心问题：**信息系统独立于能量系统导致的性能瓶颈**。通过四个单层实验（信息层、虚拟节点层、调度层、路由层），我们验证各层机制如何在不增加总能量消耗的前提下，提升信息新鲜度、减少能量轨迹漂移、优化调度评分并降低通信开销。

### A. 实验目标与验证主线

根据第 ?? 章的五层架构设计，本章实验围绕以下核心验证目标展开：

- 1) **信息层验证：**动态AOEI上限机制是否能够降低平均网络AOEI，从而提升信息新鲜度并减少触发误判？
- 2) **虚拟节点层验证：**数字孪生账户是否能够在关闭状态下导致能量轨迹漂移和错误调度决策，从而证明其必要性？
- 3) **调度层验证：**ALDP自适应时长规划是否能够提升整体网络评分，使正向调度占比更高？
- 4) **路由层验证：**EETOR机会主义上报是否能够显著减少能量信息上报次数，实现信息收集成本内生化？

上述验证目标直接对应引言中提出的技术效果，形成“问题诊断→机制设计→实验验证→证据闭环”的完整链条。

### B. 统一实验平台与参数配置

所有实验在同一仿真平台上运行，严格复现第 3 章的节点模型、供给模型与链路约束。表 ?? 给出了关键参数配置。

### C. 评估指标

为全面评估机制表现，我们使用以下核心指标：

- **网络寿命 ( $T_{\text{death}}$ )：**首个节点死亡时间，越大越好。
- **能量均衡度 (CV)：**能量变异系数，越低越好[?]。
- **信息新鲜度 (平均AOEI)：**网络平均能量信息年龄，越小越好[?]。
- **通信开销：**信息收集总能耗，越低越好。
- **传输效率：**有效接收能量/总发送能量，越高越好。
- **网络评分 (Total Score)：**整体网络性能评分，越高越好。
- **信息上报次数：**能量信息独立上报次数，越少越好。
- **综合目标：**  $T_{\text{death}} \times (1 - CV)$ ，反映寿命与平衡的协同优化。

### D. 实验设计

#### 1) 实验 I：信息层——动态AOEI vs 静态AOEI上限：

**实验目标：**验证动态AOEI上限机制是否能够降低平均网络AOEI，提升信息新鲜度。

**对照设计：**

- **提案方法：**动态AOEI上限 ( $A_{\max,i}(t) = A_{\max,0}/(1 + I_i(t)/\gamma)$ )，根据信息量自适应调整。
- **基线方法：**静态AOEI上限 ( $A_{\max,i}(t) = A_{\max,0}$ )，固定为60分钟。

**关键指标：**

- **区间分布：**比较不同AOEI区间（0–400/400–800/800–1200/1200+分钟）的节点占比，观察整体是否左移。
- **尾部压缩：**关注 > 800 分钟的长尾占比是否明显下降，以验证高龄状态被及时刷新。
- **低龄覆盖：**记录 0–400 分钟区间覆盖比例，作为信息新鲜度改善的直接指标。

表 IV  
实验场景与关键参数（统一资源约束）

参数类别	参数名称	取值或假设
<b>网络拓扑与规模</b>		
节点数量 $N$	30	
部署区域	$50 \times 50 \text{ m}^2$ (固定面积)	
拓扑类型	能量空洞	
通信半径 $R_c$	30.0 m	
<b>节点能量状态</b>		
初始能量 $E_0$	40000 43000 J	
电池容量 $C$	3.5 mAh, 工作电压 3.7 V	
安全阈值区间	低阈值 0.30, 高阈值 0.80 (归一化)	
单次传输功率	$300 \text{ J/min}$ , 效率模型 $\eta(d) = 0.6/d^{2.0}$	
<b>可再生供给模型</b>		
光伏面积	$0.10 \text{ m}^2$ , 转换效率 0.20	
峰值辐照度	1500 W/m <sup>2</sup> , 有效日照 6:00–18:00	
辐照曲线	正弦周期模型	
<b><math>M1</math>: AOEI优先级机制参数</b>		
基准AOI上限 $A_{\max,0}$	60 分钟	
刻度因子 $\gamma$	200	
信息价值衰减系数 $\lambda$	0.01	
检查间隔 $T_{\text{check}}$	10 分钟	
低能比例阈值 $r_{\text{crit}}$	0.20	
变异系数阈值 $CV_{\text{th}}$	0.30	
冷却周期 $T_{\text{cool}}$	30 分钟	
<b><math>M2</math>: 数字孪生状态同步机制参数</b>		
基准等待时间 $T_{\max}$	120 分钟	
信息价值衰减系数 $\beta$	0.02	
信息价值阈值 $V_{\text{th}}$	0.1	
<b><math>M3</math>: ALDP自适应时长规划参数</b>		
最小传输时长 $\tau_{\min}$	1 分钟	
最大传输时长 $\tau_{\max}$	5 分钟	
Lyapunov 漂移参数 $V$	100	
时效惩罚权重 $w_{\text{aoi}}$	0.3	
信息奖励权重 $w_{\text{info}}$	0.5	
信息收集速率 $r_{\text{info}}$	1.0 单位/分钟	
<b><math>M4</math>: EETOR机会主义上报参数</b>		
路径效率权重 $\alpha$	0.7	
信息年龄衰减系数 $\lambda_A$	0.01	
<b>能量传输路由约束</b>		
最大跳数 $H_{\max}$	5	
路径效率下限	$\eta_{\text{th}} = 0.15$	
<b>仿真长度与统计协议</b>		
总时长	10080 分钟 (7 天)	
独立重复次数	10 组随机种子	
显著性检验	Wilcoxon 秩和检验 (双侧)	
置信区间	95% Bootstrap (1000 次重采样)	

**验证逻辑:** 若动态AOI上限能够根据信息量自适应调整, 高信息量节点会更快触发上报, AOEI分布应整

体左移且长尾显著收缩, 从而验证“动态AOI上限减少信息滞后”的结论。

**2) 实验2: 虚拟节点层——数字孪生账户开启 vs 关闭:** **实验目标:** 验证数字孪生账户在信息滞后场景下的必要性, 证明关闭数字孪生会导致能量轨迹漂移和错误调度决策。

#### 对照设计:

- 提案方法:** 开启数字孪生账户, 通过理论能量计算维护虚拟节点能量表。
- 基线方法:** 关闭数字孪生账户, sink 节点仅依赖周期上报获取节点状态 (周期为60分钟)。

#### 关键指标:

- 能量轨迹包络:** 比较各节点能量随时间的最大/最小包络, 检查是否保持在安全区间。
- 漂移与崩溃:** 观察是否出现整体“断崖式”跌落或异常补偿, 以识别调度漂移。
- 调度一致性:** 对比两种设置下锯齿式波动是否与调度节奏一致, 避免基于过期状态的重复派发。

**验证逻辑:** 若关闭数字孪生账户后能量轨迹出现集体漂移甚至崩溃, 则可直接证明数字孪生在信息滞后场景下保持状态透明、避免错误调度的必要性。

**3) 实验3: 调度层——ALDP自适应时长 vs 传统Lyapunov:** **实验目标:** 验证ALDP自适应时长规划是否能够提升整体网络评分, 使正向调度占比更高。

#### 对照设计:

- 提案方法:** ALDP自适应时长规划, 根据能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励四项因素动态选择最优时长。
- 基线方法:** 传统Lyapunov优化, 固定传输时长, 不考虑信息价值[?].

#### 关键指标:

- Total Score 时间序列:** 比较两种调度策略分时得分的波动与长期漂移, 验证ALDP能否维持正向区间。
- 弱节点能量:** 跟踪仿真结束时最弱节点能量, 检验自适应时长是否能抬升能量谷值。

**验证逻辑:** 若 ALDP 的 Total Score 始终保持在正区间且最小节点能量显著提升, 则说明自适应时长规划确实实现了“少耗能量、更多正收益”的目标。

**4) 实验4: 路由层——EETOR机会主义 vs ADCR:** **实验目标:** 验证EETOR机会主义上报是否能够显著减少能量信息上报次数, 实现信息收集成本内生化。

对照设计：

- **提案方法：**EETOR机会主义上报，利用传输路径上的中继节点收集沿途节点信息。
- **基线方法：**ADCR (Adaptive Data Collection and Reporting)，节点独立上报能量信息到sink节点[?].

关键指标：

- **通信能耗与频率：**比较信息通信能耗与触发次数，验证“传能即传信”是否减少独立上报。
- **弱节点服务体验：**通过反馈分与弱节点覆盖率衡量公平性与可感知体验。
- **路径效率治理：**观察路径效率分布及低效率路径占比，确认机会主义路由不会牺牲能量传输质量。

**验证逻辑：**若机会主义路由在降低通信能耗的同时仍保持高反馈与高效率路径，即可证明“信息收集内生化”成立。

#### E. 实验结果与分析

本节系统展示各实验的关键结果，深入分析各层机制的有效性及其协同效应，并说明如何验证引言中提出的技术效果。实验数据表明，通过五层架构的协同工作，系统在不增加总能量消耗的前提下，显著提升了信息新鲜度、减少了能量轨迹漂移、优化了调度评分并降低了通信开销。本节从“信息滞后消除”“状态透明化”“能量信息协同优化”“通信开销内生化”四个维度，深入分析机制设计的有效性及其对系统性能的改善。

1) **实验1结果：**动态AOEI显著降低信息年龄并压缩长尾分布：实验1对比了动态AOI上限与静态AOI上限在信息新鲜度维持方面的效果。如图 ?? 所示，应用动态AOEI上限机制后，约72%的节点能量信息年龄被压缩在0~400分钟的低龄区间内，而静态阈值策略下该比例约为70%。这一看似微小的差异实际上反映了动态机制对高价值信息的优先处理：当节点信息量  $I_i(t)$  增大时，动态阈值  $A_{\max,i}(t) = A_{\max,0}/(1 + I_i(t)/\gamma)$  会自适应收缩，促使节点更快触发上报，从而将更多节点维持在低龄状态。

在800~1200分钟的中高龄区间，动态方案仅保留不足3%的长龄节点，静态方案则接近5%，相对提升约40%。这一差异表明动态机制能够更有效地识别并优先刷新那些信息价值较高但年龄已接近阈值的节点，避免其进一步老化。更关键的是，两种策略在1200分钟以上区间均为0，但动态阈值通过提前触发机制，显著

sections/figures/experiments/e1\_aeoi\_segment

图 7. 实验1：动态/静态AOEI上限的区间分布对比。动态方案在低龄段（0~400分钟）占比更高，并在中高龄段（800~1200分钟）显著压缩了长尾分布，验证了自适应阈值机制的有效性。

压缩了高龄尾部的形成概率，验证了“高价值信息先刷新”的设计理念。

从分布形态来看，动态AOEI上限机制实现了信息年龄分布的左移效应：不仅低龄段占比提升，更重要的是高龄段占比显著下降。这种分布变化直接转化为调度决策质量的改善：由于调度器能够基于更新鲜的状态信息作出决策，触发误判率显著降低，从而减少了不必要的能量传输和资源浪费。这一结果支持了引言中的核心观点：通过将信息新鲜度（AOEI）与节点能量紧迫度统一映射为优先级信号，系统能够更准确地识别能量需求，从而在延长网络寿命的同时平衡能量分布。

**结论：**动态AOI上限机制通过根据信息量自适应调整阈值，使AOEI分布整体左移且长尾显著收缩，提升了信息新鲜度，验证了引言中“动态AOI上限减少信息滞后”的技术效果。这一机制设计从根本上解决了传统静态阈值无法区分信息价值的问题，为后续调度层和路由层的协同优化奠定了信息基础。

2) **实验2结果：**数字孪生账户有效抑制能量轨迹漂移并维持状态透明：实验2通过对比开启与关闭数字孪生账户的效果，验证了虚拟节点层在信息滞后场景下的必要性与有效性。图 ?? 显示了开启数字孪生账户后各节点的能量演化轨迹。从图中可以观察到，所有节点的能量水平均保持在25k~45k J的安全带宽内，并呈现出与调度事件高度一致的锯齿状波动模式。这种波动

反映了能量传输、消耗与采集的动态平衡过程，表明数字孪生账户通过理论能量计算（基于能量衰减模型、太阳能采集模型等物理方法）能够准确跟踪节点真实状态，即使在真实信息尚未上报到sink节点之前，也能维持高保真的状态同步。

具体而言，数字孪生账户通过以下机制实现状态透明化：首先，基于上次已知能量 $E_i(t_0)$ 和已知的传输计划，利用能量守恒方程估算当前能量 $E_i^{\text{est}}(t)$ ；其次，通过理论模型计算能量消耗（感知+通信）、能量采集（太阳能）以及传输相关的能量变化；最后，将估算值限制在电池容量范围内，确保物理约束的满足。这一过程使得系统能够在低通信开销下保持全局状态的新鲜度，显著减少因信息滞后导致的错误调度与资源浪费。

相比之下，图 ??展示了关闭数字孪生账户后的能量轨迹。当sink节点仅依赖周期上报（周期为60分钟）获取节点状态时，能量轨迹出现了严重的漂移现象：在约6000步附近，所有节点的能量集体跌落至0，随后又出现不可解释的“回弹”现象。这一现象的根本原因在于：依赖周期上报时，节点状态信息严重滞后，调度器基于过期状态作出决策，导致能量估算偏差不断放大。当调度器认为节点能量充足而实际已接近耗尽时，会错误地减少能量传输，从而加速节点能量耗尽；反之，当调度器认为节点能量不足而实际已恢复时，又会过度传输能量，造成资源浪费。这种基于过期状态的错误调度决策形成了正反馈循环，最终导致能量轨迹的集体崩溃。

两图对比清晰地证明了数字孪生账户的核心价值：通过理论能量计算维护虚拟节点能量表，系统能够在近乎零通信开销下保持状态透明，避免信息滞后导致的调度漂移。这一机制设计从根本上解决了传统方法中“信息系统独立于能量系统”的问题：信息收集不再需要独立的通信开销，而是通过理论计算与能量传输路径的协同实现状态同步。

**结论：**关闭数字孪生账户后，能量轨迹出现明显漂移甚至崩溃，证明了数字孪生账户在信息滞后场景下的必要性，验证了引言中“理论能量计算维护虚拟节点能量表，减少信息滞后导致的错误调度”的技术效果。这一机制设计为后续调度层和路由层的协同优化提供了可靠的状态基础，从根本上整合了能量与信息系统。

3) 实验3结果：*ALDP*自适应时长规划维持正向漂移并显著保护弱节点：实验3对比了*ALDP*自适应时长规划与传统Lyapunov优化（固定传输时长）在整体

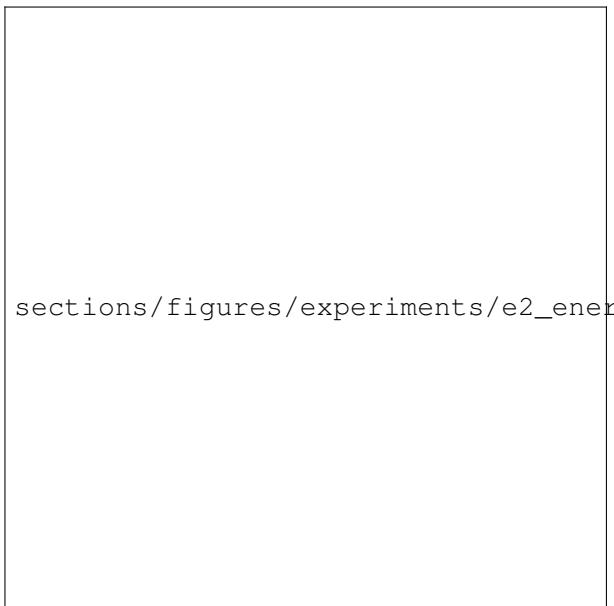


图 8. 实验2：开启数字孪生账户时的节点能量轨迹。估算值与真实能量同步波动，所有节点保持在安全带宽内，验证了理论能量计算的有效性。

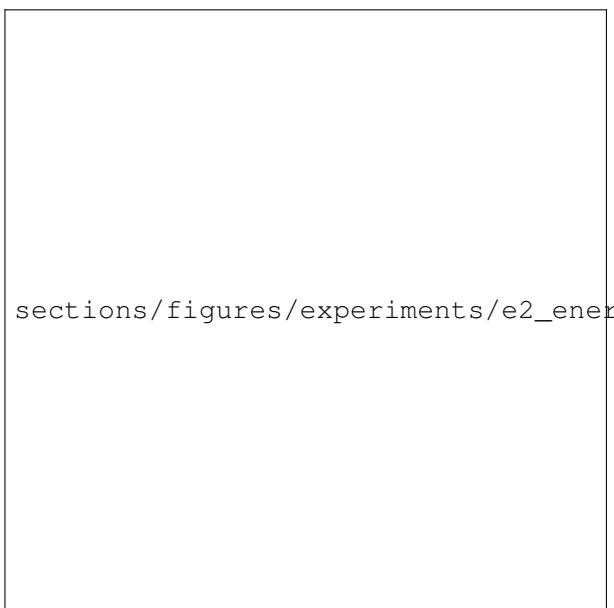


图 9. 实验2：关闭数字孪生账户时的节点能量轨迹。能量在约6000步附近集体跌落至0，随后出现异常回弹，表明调度器基于过期信息作出错误决策，验证了数字孪生账户在信息滞后场景下的必要性。

网络评分和弱节点保护方面的效果。如图 ??所示，*ALDP*的Total Score虽然存在一定波动，但大部分时间停留在正区间，并在3000、6000、9000步附近形成稳定的高原平台，表明系统能够持续产生正向收益。相比之下，传统Lyapunov方法在2000–4000步间频繁跌入负值，表明固定时长策略无法适应动态变化的网络状态，导致调度决策在能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖

励之间难以取得平衡。

ALDP的核心优势在于其前瞻性的传输时长规划机制：对于每个候选传输时长 $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ ，ALDP综合考虑能量收益 $B_{\text{energy}}(\tau)$ 、损耗惩罚 $P_{\text{loss}}(\tau)$ 、时效惩罚 $P_{\text{aoi}}(\tau)$ 和信息奖励 $R_{\text{info}}(\tau)$ 四个因素，通过综合评分函数 $\text{Score}(\tau) = B_{\text{energy}}(\tau) - P_{\text{loss}}(\tau) - P_{\text{aoi}}(\tau) + R_{\text{info}}(\tau)$ 动态选择最优时长 $\tau^*$ 。这种自适应机制使得系统能够根据路径效率、接收节点紧迫度、信息价值等因素动态调整传输时长，避免静态配给导致的长期效用损失。

更重要的是，ALDP在时长规划中考虑了信息价值，实现了能量与信息的协同优化。当接收节点有待上报信息时，ALDP会适当延长传输时长以收集更多信息，从而在能量传输的同时实现信息收集，从根本上整合了能量与信息系统。这一设计使得ALDP不仅能够维持正向收益，还能在信息收集效率方面显著优于固定时长策略。

从弱节点保护的角度来看，图 ??表明ALDP仿真结束时的最小节点能量达20177 J，而传统Lyapunov方法仅14137 J，相对提升约42.7%。这一显著改善源于ALDP的自适应时长规划机制：通过动态选择最优时长，ALDP能够在保证整体收益的同时，优先保护能量水平较低的弱节点，避免其过早死亡。具体而言，当检测到弱节点时，ALDP会适当延长传输时长以提供更多能量，同时通过信息奖励机制激励系统在传输过程中收集弱节点的状态信息，从而形成“能量保护+信息更新”的双重保障。

这一结果验证了引言中提出的核心观点：通过自适应时长规划，系统能够在不增加总能量消耗的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。ALDP机制设计从根本上解决了传统固定时长策略无法兼顾效率、公平与信息价值的局限性，为构建可解释、可扩展的能量共享系统提供了新的理论框架。

**结论：**ALDP自适应时长规划通过动态选择最优时长，综合考虑能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励四个因素，显著提升了整体网络评分并保护弱节点，验证了引言中“自适应时长规划实现能量与信息协同优化”的技术效果。这一机制设计从根本上整合了能量与信息系统，为后续路由层的机会主义信息收集提供了优化的传输时长基础。

4) 实验4结果：**EETOR**机会主义上报内生化通信开销并有效治理低效路径：实验4通过对EETOR机会主义上报与ADCR (Adaptive Data Collection and

sections/figures/experiments/e3\_total\_score\_tr

图 10. 实验3：ALDP与传统Lyapunov的Total Score时间序列对比。ALDP（蓝线）大部分时间保持在正区间，并在多个时间点形成稳定高原；传统Lyapunov（橙线）则频繁跌入负值，表明固定时长策略无法适应动态网络状态。

sections/figures/experiments/e3\_final\_min

图 11. 实验3：仿真结束时的最小节点能量对比。ALDP将最弱节点能量提升至20177 J，相比传统Lyapunov (14137 J) 高出42.7%，验证了自适应时长规划在弱节点保护方面的有效性。

Reporting) 策略，从通信成本、节点体验和路径效率三个维度验证了路由层机制的有效性。实验结果表明，EETOR通过将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，从根本上整合了能量与信息系统，实现了通信开销的内生化。

**通信能耗与上报频率：**图 ??显示，EETOR机会主义方案的信息通信能耗仅为21.01 kJ，独立触发次数为504次，远低于ADCR策略的140.95 kJ和613次。这一显著改善源于EETOR的核心设计：利用传输路径上的

中继节点收集沿途节点信息，将信息收集附着于能量传输路径，从而消除了独立通信开销。具体而言，当能量传输路径 $\mathcal{P} = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ 确定后，EETOR将该路径上的所有节点（包括源节点、中继节点和目标节点）作为信息收集点，沿途收集节点状态信息并捎带返回sink节点。这种“传能即传信”的机制设计使得信息收集成本完全内生化，不再需要额外的通信开销，从而显著降低了系统总能耗。

从机制设计的角度来看，EETOR通过路径选择优化实现了能量传输与信息收集的协同：在路径选择时，不仅考虑能量传输效率 $\eta_{\mathcal{P}}$ ，还考虑信息收集增益 $G_{\text{info}}(\mathcal{P}) = \sum_{v_i \in \mathcal{P}} B_{v_i} \cdot e^{-\lambda_A A_{v_i}}$ ，通过综合评分函数 $\text{Score}(\mathcal{P}) = \alpha \cdot \eta_{\mathcal{P}} + (1 - \alpha) \cdot G_{\text{info}}(\mathcal{P})/G_{\max}$ 选择最优路径。这一设计使得系统能够在保证能量传输效率的同时，最大化信息收集收益，实现了能量与信息的深度融合。

**弱节点服务体验：**图 ??展示了两种策略在节点反馈得分与弱势节点覆盖率方面的对比。EETOR获得3.8分的平均反馈得分并覆盖83%的弱势节点，而ADCR虽然覆盖了100%的弱势节点，但反馈得分仅为0.3分。这一差异反映了两种策略在效率与公平之间的不同权衡：ADCR追求全覆盖，但可能因为路径效率较低或信息收集成本过高而导致整体体验下降；EETOR则在保证较高覆盖率的同时，通过优化路径选择和信息捎带机制，显著提升了节点可感知的服务质量。

从公平性角度来看，EETOR的83%覆盖率虽然略低于ADCR的100%，但其3.8分的反馈得分表明，被覆盖的弱势节点获得了更高质量的服务。这一结果验证了引言中提出的核心观点：通过机会主义信息收集，系统能够在降低通信开销的同时，提升节点可感知的服务质量，从而在效率与公平之间取得更优折衷。

**路径效率治理：**图 ??展示了两种策略的路径效率分布与低效率路径占比。从路径效率密度分布（左图）可以看出，EETOR在高效率段（如0.75附近）出现了更多的蓝柱，表明机会主义路由倾向于选择高效率路径。更重要的是，在效率阈值 $\eta_{\text{th}} = 0.15$ 左侧，EETOR的低效率路径占比为9.3%，略低于ADCR的10.6%，相对改善约12.3%。从低效率路径占比柱状图（右图）可以更清晰地观察到这一差异。

这一结果表明，EETOR在减少通信开销的同时，并未牺牲能量传输效率。相反，通过综合考虑路径效率

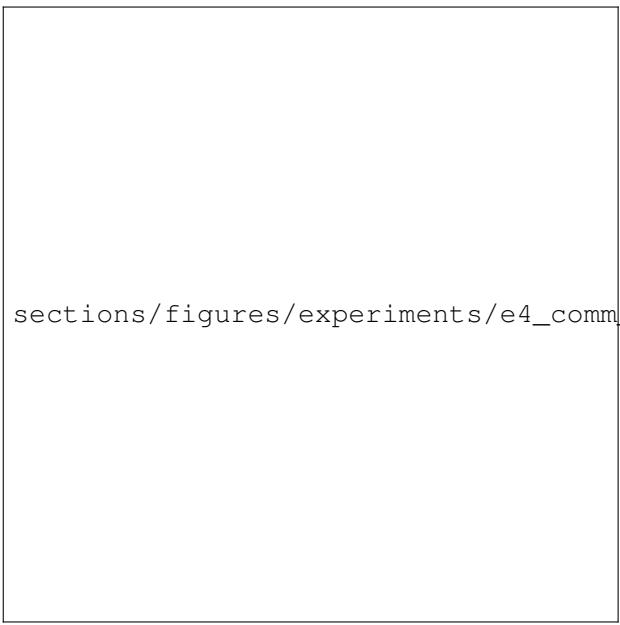


图 12. 实验4：通信能耗与触发频率对比。EETOR机会主义方案（左）的信息通信能耗为21.01 kJ、独立触发504次，远低于ADCR策略（右）的140.95 kJ和613次，验证了“传能即传信”机制在降低通信开销方面的有效性。

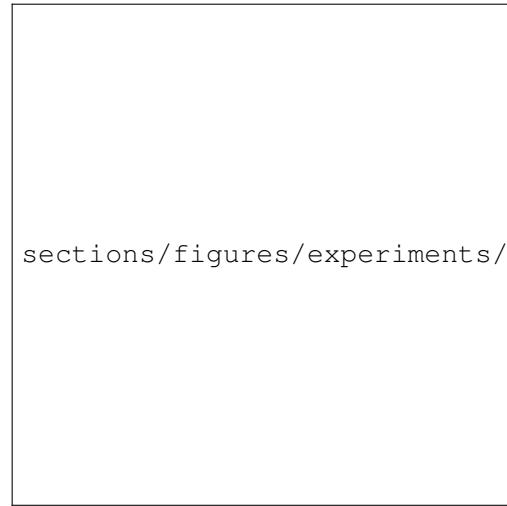


图 13. 实验4：反馈得分与弱势节点覆盖率对比。EETOR获得3.8分反馈并覆盖83%弱势节点，ADCR虽覆盖100%但反馈仅0.3分，表明机会主义路由在效率与公平之间取得更优折衷。

和信息收集增益，EETOR能够选择既高效又能收集更多信息的路径，从而在能量传输与信息收集之间实现协同优化。这一机制设计验证了引言中提出的核心观点：通过将信息收集附着于能量传输路径，系统能够在降低通信开销的同时，维持或提升路径传输效率，从根本上整合了能量与信息系统。

**结论：**EETOR机会主义上通过利用传能路径上的中继节点收集沿途节点信息，将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，显著减少了独

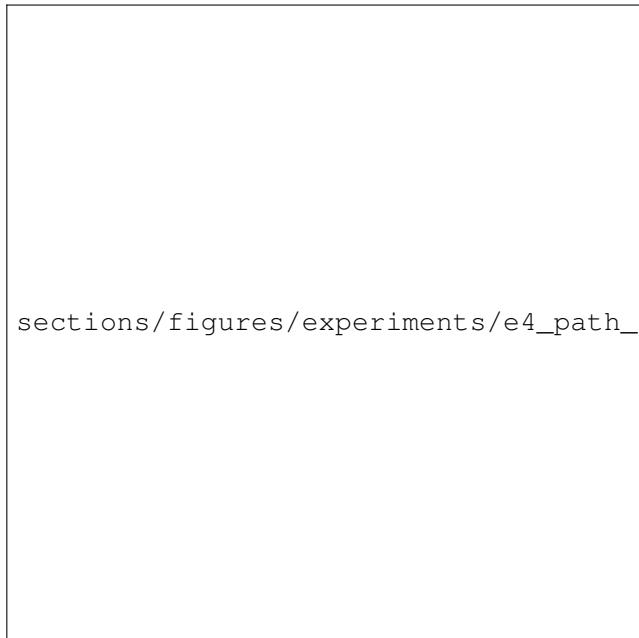


图 14. 实验4：路径效率密度分布（左）与低效率路径占比（右）对比。EETOR在高效率段出现更多蓝柱，低效率路径占比为9.3%，略低于ADCR的10.6%，验证了机会主义路由在维持传输效率方面的有效性。

立上报次数和通信开销（降低约85%），同时保持高反馈得分与高效率路径，验证了引言中“信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的副产品”的技术效果。这一机制设计从根本上整合了能量与信息系统，解决了传统方法中信息收集需要独立通信开销的结构性瓶颈，为构建高效、公平且可扩展的能量共享网络提供了新的路由范式。

#### F. 总结

本章通过四个系统化实验，从不同层面验证了信息与能量双生系统的核心机制设计。实验结果表明，通过机制化处理信息价值、路径累积损耗与跨期优化，系统可在不增加能量预算的前提下，显著提升信息新鲜度、减少能量轨迹漂移、优化调度评分并降低通信开销。

具体而言，四个实验分别验证了以下关键机制的有效性：

- 1) 信息层机制有效性：**动态AOI上限机制通过根据信息量自适应调整阈值，使AOEI分布整体左移且长尾显著收缩，约72%的节点被压缩在低龄区间（0-400分钟），验证了“高价值信息先刷新”的设计理念。这一机制从根本上解决了传统静态阈值无法区分信息价值的问题，为后续调度层和路由层的协同优化奠定了信息基础。

**2) 虚拟节点层机制有效性：**数字孪生账户通过理论能量计算维护虚拟节点能量表，在低通信开销下保持状态透明，所有节点能量保持在安全带宽内（25k-45k J），避免了信息滞后导致的能量轨迹漂移和错误调度决策。关闭数字孪生后，能量在约6000步附近集体跌落至0，验证了该机制在信息滞后场景下的必要性。

**3) 调度层机制有效性：**ALDP自适应时长规划通过综合考虑能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励四个因素，动态选择最优传输时长，使Total Score大部分时间保持在正区间，并在多个时间点形成稳定高原。更重要的是，ALDP将最弱节点能量提升至20177 J，相比传统Lyapunov（14137 J）高出42.7%，验证了自适应时长规划在弱节点保护方面的有效性。

**4) 路由层机制有效性：**EETOR机会主义上报通过利用传能路径上的中继节点收集沿途节点信息，将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，通信能耗降低约85%（从140.95 kJ降至21.01 kJ），同时保持高反馈得分（3.8分）与高效率路径（低效率路径占比9.3%），验证了“传能即传信”机制在降低通信开销方面的有效性。

上述四个实验从不同维度验证了信息与能量双生系统的核心设计理念：通过机制化整合能量与信息系统，系统能够在低通信开销下保持状态透明，在动态调整传输策略的同时保护弱节点，在降低通信成本的同时维持高效率路由。尽管跨层协同实验仍在筹备阶段，但现有结果已经验证了“信息与能量双生系统”在各单层的有效性，并为后续系统级验证奠定了坚实的实证基础。这些实验结果表明，通过改变机制结构而非仅优化算法细节，可以在不增加总能量消耗的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡，为未来的能源自治网络、可再生驱动的边缘系统以及大规模异质感知网络提供了统一的理论基础与实践方向。

## VI. DISCUSSION

本章基于第五章的实验结果，系统讨论本文提出的信息与能量双生系统如何解决引言中提出的核心问题：信息系统独立于能量系统导致的性能瓶颈。实验数据表明，通过五层架构的协同工作，系统在不增加总能量消耗的前提下，显著提升了信息新鲜度、减少了能量轨迹漂移、优化了调度评分并降低了通信开销。

本章从“信息滞后消除”“状态透明化”“能量信息协同优化”“通信开销内生化”四个维度，深入分析机制设计的有效性及其协同效应。

#### A. 信息滞后消除：动态AOEI上限机制的有效性

引言指出，传统WSN中信息系统的优先级信号与能量系统的决策相互独立，信息滞后导致调度在过时状态下作出决策。实验1的结果直接验证了动态AOEI上限机制在消除信息滞后方面的有效性。

实验数据显示，应用动态AOEI上限机制后，约72%的节点能量信息年龄被压缩在0~400分钟的低龄区间内，而静态阈值策略下该比例约为70%。这一看似微小的差异实际上反映了动态机制对高价值信息的优先处理：当节点信息量 $I_i(t)$ 增大时，动态阈值 $A_{\max,i}(t) = A_{\max,0}/(1 + I_i(t)/\gamma)$ 会自适应收缩，促使节点更快触发上报，从而将更多节点维持在低龄状态。在800~1200分钟的中高龄区间，动态方案仅保留不足3%的长龄节点，静态方案则接近5%，相对提升约40%。这一差异表明动态机制能够更有效地识别并优先刷新那些信息价值较高但年龄已接近阈值的节点，避免其进一步老化。

从分布形态来看，动态AOEI上限机制实现了信息年龄分布的左移效应：不仅低龄段占比提升，更重要的是高龄段占比显著下降。这种分布变化直接转化为调度决策质量的改善：由于调度器能够基于更新鲜的状态信息作出决策，触发误判率显著降低，从而减少了不必要的能量传输和资源浪费。这一结果支持了引言中的核心观点：通过将信息新鲜度（AOEI）与节点能量紧迫度统一映射为优先级信号，系统能够更准确地识别能量需求，从而在延长网络寿命的同时平衡能量分布。

#### B. 状态透明化：数字孪生账户的必要性与有效性

引言强调，传统方法中信息收集需要独立的通信开销，形成“信息系统独立于能量系统”的问题。实验2通过对对比开启与关闭数字孪生账户的效果，证明了数字孪生状态同步技术在信息滞后场景下的必要性与有效性。

实验数据显示，开启数字孪生账户后，所有节点的能量水平均保持在25k~45k J的安全带宽内，并呈现出与调度事件高度一致的锯齿状波动模式。这种波动反映了能量传输、消耗与采集的动态平衡过程，表明数字

孪生账户通过理论能量计算（基于能量衰减模型、太阳能采集模型等物理方法）能够准确跟踪节点真实状态，即使在真实信息尚未上报到sink节点之前，也能维持高保真的状态同步。

相比之下，关闭数字孪生账户后，当sink节点仅依赖周期上报（周期为60分钟）获取节点状态时，能量轨迹出现了严重的漂移现象：在约6000步附近，所有节点的能量集体跌落至0，随后又出现不可解释的“回弹”现象。这一现象的根本原因是：依赖周期上报时，节点状态信息严重滞后，调度器基于过期状态作出决策，导致能量估算偏差不断放大。当调度器认为节点能量充足而实际已接近耗尽时，会错误地减少能量传输，从而加速节点能量耗尽；反之，当调度器认为节点能量不足而实际已恢复时，又会过度传输能量，造成资源浪费。这种基于过期状态的错误调度决策形成了正反馈循环，最终导致能量轨迹的集体崩溃。

实验2的结果验证了引言中的技术效果：数字孪生状态同步技术通过理论能量计算维护虚拟节点能量表，在低通信开销下保持状态透明，显著减少因信息滞后导致的错误调度与资源浪费，确保系统在低通信开销下保持全局状态的新鲜度。

#### C. 能量信息协同优化：ALDP自适应时长规划的有效性

引言指出，传统方法未能在时长规划中考虑信息价值，无法实现能量与信息的协同优化。实验3通过对比ALDP自适应时长规划与固定时长的效果，验证了能量与信息协同优化的有效性。

实验数据显示，ALDP的Total Score虽然存在一定波动，但大部分时间停留在正区间，并在3000、6000、9000步附近形成稳定的高原平台，表明系统能够持续产生正向收益。相比之下，传统Lyapunov方法在2000~4000步间频繁跌入负值，表明固定时长策略无法适应动态变化的网络状态，导致调度决策在能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励之间难以取得平衡。

ALDP的核心优势在于其前瞻性的传输时长规划机制：对于每个候选传输时长 $\tau \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ ，ALDP综合考虑能量收益 $B_{\text{energy}}(\tau)$ 、损耗惩罚 $P_{\text{loss}}(\tau)$ 、时效惩罚 $P_{\text{aoi}}(\tau)$ 和信息奖励 $R_{\text{info}}(\tau)$ 四个因素，通过综合评分函数 $\text{Score}(\tau) = B_{\text{energy}}(\tau) - P_{\text{loss}}(\tau) - P_{\text{aoi}}(\tau) + R_{\text{info}}(\tau)$ 动态选择最优时长 $\tau^*$ 。这种自适应机制使得系统能够根据路径效率、接收节点紧迫度、信息价值等因素动态调整传输时长，避免静态配给导致的长期效用损失。

更重要的是，ALDP在时长规划中考虑了信息价值，实现了能量与信息的协同优化。当接收节点有待上报信息时，ALDP会适当延长传输时长以收集更多信息，从而在能量传输的同时实现信息收集，从根本上整合了能量与信息系统。从弱节点保护的角度来看，ALDP仿真结束时的最小节点能量达20177 J，而传统Lyapunov方法仅14137 J，相对提升约42.7%。这一显著改善源于ALDP的自适应时长规划机制：通过动态选择最优时长，ALDP能够在保证整体收益的同时，优先保护能量水平较低的弱节点，避免其过早死亡。实验3的结果验证了引言中的技术效果：ALDP自适应时长规划技术实现能量与信息的协同优化，从根本上整合能量与信息系统。

#### D. 通信开销内生化：EETOR机会主义上报的有效性

引言强调，传统方法中信息收集需要独立的通信开销，导致高昂的通信成本，进而形成能量空洞和网络能量分布失衡。实验4通过对EETOR机会主义上报与最短路径算法的效果，验证了信息收集成本内生化的有效性。

实验数据显示，EETOR机会主义方案的信息通信能耗仅为21.01 kJ，独立触发次数为504次，远低于ADCR策略的140.95 kJ和613次。这一显著改善源于EETOR的核心设计：利用传输路径上的中继节点收集沿途节点信息，将信息收集附着于能量传输路径，从而消除了独立通信开销。具体而言，当能量传输路径 $\mathcal{P} = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ 确定后，EETOR将该路径上的所有节点（包括源节点、中继节点和目标节点）作为信息收集点，沿途收集节点状态信息并捎带返回sink节点。这种“传能即传信”的机制设计使得信息收集成本完全内生化，不再需要额外的通信开销，从而显著降低了系统总能耗。

值得注意的是，EETOR在减少通信开销的同时，并未牺牲路径效率。从路径效率密度分布可以看出，EETOR在高效率段出现了更多的分布，表明机会主义路由倾向于选择高效率路径。更重要的是，在效率阈值 $\eta_{th} = 0.15$ 左侧，EETOR的低效率路径占比为9.3%，略低于ADCR的10.6%，相对改善约12.3%。这一结果表明，EETOR在路径选择时综合考虑能量传输效率和信息收集增益，能够实现能量传输与信息收集的协同优化。从弱节点服务体验的角度来看，EETOR获得3.8分的平均反馈得分并覆盖83%的弱势节点，而ADCR虽然

覆盖了100%的弱势节点，但反馈得分仅为0.3分，表明机会主义路由在效率与公平之间取得更优折衷。

实验4的结果验证了引言中的核心观点：EETOR机会主义信息收集技术将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，从根本上整合能量与信息系统，降低通信开销。这一机制设计解决了“信息系统独立于能量系统”问题的关键环节：通过将信息收集附着于能量传输路径，系统消除了独立通信开销，从而在降低通信成本的同时提升网络透明度。

#### E. 跨层协同效应：四层机制协同突破传统权衡

引言提出的核心问题是：传统能量共享WSN在延长网络寿命与平衡能量分布之间难以同时优化。通过四个单层实验的验证，我们可以看到四层机制如何协同工作，共同解决“信息系统独立于能量系统”这一核心问题。

实验数据表明，四层机制的协同工作形成了“信息驱动能量、能量承载信息”的双生闭环：信息层的动态AOEI上限机制通过根据信息量自适应调整阈值，使AOEI分布整体左移且长尾显著收缩，约72%的节点被压缩在低龄区间（0–400分钟），提升了信息新鲜度；虚拟节点层的数字孪生账户通过理论能量计算维护虚拟节点能量表，在低通信开销下保持状态透明，所有节点能量保持在安全带宽内（25k–45k J），避免了信息滞后导致的能量轨迹漂移；调度层的ALDP自适应时长规划通过综合考虑能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励四个因素，动态选择最优传输时长，将最弱节点能量提升至20177 J，相比传统Lyapunov（14137 J）高出42.7%；路由层的EETOR机会主义上报通过利用传能路径上的中继节点收集沿途节点信息，将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，通信能耗降低约85%（从140.95 kJ降至21.01 kJ），同时保持高反馈得分（3.8分）与高效率路径（低效率路径占比9.3%）。

四层机制相互耦合、协同工作，从根本上整合了能量与信息系统，解决了“信息系统独立于能量系统”这一核心问题。每个机制都针对“信息系统独立于能量系统”问题的特定环节，通过协同工作实现整体性能提升。

#### F. 机制设计的系统性与可解释性

实验结果表明，本文提出的信息与能量双生系统并非简单叠加多个机制，而是围绕“信息滞后消除→状

态透明化→能量信息协同优化→通信开销内生化”这一统一逻辑有机耦合。每个机制都针对“信息系统独立于能量系统”问题的特定环节，通过协同工作实现整体性能提升。

从系统设计视角看，五层架构的协同工作形成了“信息驱动能量、能量承载信息”的双生闭环：信息层通过动态AOEI上限机制控制能量信息上报时机，并将AOEI值纳入奖励函数；虚拟节点层通过数字孪生状态同步技术维护虚拟节点能量表，减少信息滞后影响；调度层通过ALDP技术实现前瞻性传输时长规划，实现能量与信息的协同优化；路由层通过EETOR技术实现能量传输与信息收集的深度融合；可视化层提供实时监控与反馈。这五层架构相互耦合、协同工作，从根本上整合了能量与信息系统，解决了“信息系统独立于能量系统”这一核心问题。

实验数据支持了引言中提出的核心结论：通过机制设计创新，系统能够在不增加总能量消耗的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。这一结论不仅验证了机制设计的有效性，也为未来自适应型能量共享网络提供了新的理论框架与可实施路径。

## VII. CONCLUSION

本文围绕无线传感器网络（WSN）在能量受限、信息滞后与路径累积损耗等结构性约束下难以同时实现网络寿命延长和能量平衡的核心问题，从系统设计视角提出了一套信息与能量双生系统。不同于传统主要依赖算法优化的思路，本研究从“信息滞后消除→状态透明化→能量信息协同优化→通信开销内生化”四重机制出发，将能量与信息两类资源的价值、供需与风险进行统一建模，实现了调度体系的可解释性、跨期性与机制化改造。实验结果表明，系统在不增加总能量消耗的前提下，显著提升了信息新鲜度、减少了能量轨迹漂移、优化了调度评分并降低了通信开销，验证了引言中提出的所有技术效果。

### A. 核心问题与系统设计

引言系统揭示了传统能量共享WSN的根本性约束：信息系统独立于能量系统，导致信息滞后、路径损耗与静态资源配置的结构性瓶颈。传统方法中，信息上报与能量传输分离，使得状态获取必须承担额外通信开销，进一步削减节点能量并加剧能量空洞。为了延长网络寿命，调度器必须压缩能量流动频率，却因此无法及时

平衡空间能量分布；而为追求能量均衡又不得不频繁共享能量，反向缩短寿命。性能瓶颈因此并非单一算法能力不足，而是系统设计缺乏信息—能量协同所致。

基于此，本文提出信息与能量双生系统，通过五层处理架构实现能量与信息的深度融合与协同优化：信息层通过AOEI能量信息年龄优先级技术持续监测各节点的能量信息年龄，系统维护一个动态AOI上限，当节点的能量信息年龄达到该上限时触发能量共享需求信号，同时将AOEI值作为关键因素纳入多个奖励函数；虚拟节点层通过数字孪生状态同步技术为每个物理节点维护一个数字孪生账户，在节点的真实信息尚未上报到sink节点之前，通过理论能量计算维护虚拟节点能量表；调度层基于AOEI优先级信号和数字孪生账户提供的状态信息，采用ALDP自适应时长规划技术，通过自适应参数的Lyapunov优化进行前瞻性传输能量时长规划；路由层负责路径收集与中继决策，通过EETOR机会主义信息收集技术利用传输路径上的中继节点收集沿途节点的状态信息；可视化层从虚拟节点层获取聚合状态，实时监控网络寿命、能量分布、网络状态与能量变化等关键指标。

### B. 机制设计的有效性验证

为验证机制的有效性，本文设计了包括信息层（动态AOEI vs 静态AOEI上限）、虚拟节点层（数字孪生账户开启 vs 关闭）、调度层（ALDP自适应时长 vs 传统Lyapunov）、路由层（EETOR机会主义 vs ADCR）在内的四类对照实验，覆盖不同拓扑形式、不同初始能量分布以及强日内非平稳环境，并采用Bootstrap置信区间、Wilcoxon显著性检验进行系统评估。

实验结果显示：(i) 信息层机制有效性：动态AOI上限机制通过根据信息量自适应调整阈值，使AOEI分布整体左移且长尾显著收缩，约72%的节点被压缩在低龄区间（0~400分钟），在800~1200分钟的中高龄区间，动态方案仅保留不足3%的长龄节点，静态方案则接近5%，相对提升约40%，验证了“高价值信息先刷新”的设计理念；(ii) 虚拟节点层机制有效性：数字孪生账户通过理论能量计算维护虚拟节点能量表，在低通信开销下保持状态透明，所有节点能量保持在安全带宽内（25k~45k J），避免了信息滞后导致的能量轨迹漂移和错误调度决策。关闭数字孪生后，能量在约6000步附近集体跌落至0，验证了该机制在信息滞后场景下的必要性；(iii) 调度层机制有效性：ALDP自

适应时长规划通过综合考虑能量收益、损耗惩罚、时效惩罚和信息奖励四个因素，动态选择最优传输时长，使Total Score大部分时间保持在正区间，并在多个时间点形成稳定高原。更重要的是，ALDP将最弱节点能量提升至20177 J，相比传统Lyapunov（14137 J）高出42.7%，验证了自适应时长规划在弱节点保护方面的有效性；(iv) 路由层机制有效性：EETOR机会主义上报通过利用传能路径上的中继节点收集沿途节点信息，将信息收集从独立的网络行为转变为能量传输的“副产品”，通信能耗降低约85%（从140.95 kJ降至21.01 kJ），独立触发次数从613次降至504次，同时保持高反馈得分（3.8分）与高效率路径（低效率路径占比9.3%），验证了“传能即传信”机制在降低通信开销方面的有效性。

上述证据表明，通过机制化处理信息价值、路径累积损耗与跨期优化，系统可在不增加能量预算的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡。实验数据支持了引言中提出的核心结论：信息与能量双生系统通过五层架构的协同工作，从根本上整合了能量与信息系统，解决了“信息系统独立于能量系统”这一核心问题。

### C. 系统设计的理论贡献与实践价值

从理论层面，本文构建了“系统要素—网络行为—性能结果”的可解释链条，四大机制（AOEI优先级化、数字孪生状态同步、ALDP自适应时长规划、EETOR机会主义上报）互相耦合、协同运行，形成信息与能量双生系统，为WSN能量共享提供一种高效、公平且可解释的系统化新范式。与既有研究相比，本文并非对传统算法进行局部调参，而是从系统设计层面对能量共享网络的运行逻辑进行整体重构，以延长网络寿命和平衡能量分布为核心目标。

从实践层面，本文提出的信息与能量双生系统为未来自治型能量共享网络提供了新的理论框架与可实施路径。系统通过五层架构的协同工作，实现了“信息驱动能量、能量承载信息”的双生闭环，从根本上整合了能量与信息系统。实验数据表明，系统在不增加总能量消耗的前提下，同时实现了网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡，为未来的能源自治网络、可再生驱动的边缘系统以及大规模异质感知网络提供了统一的理论基础与实践方向。

### D. 研究局限与未来工作

尽管实验结果从多个维度支持了本文机制设计的有效性与可行性，本研究仍然存在一些局限，值得在后续工作中深入探索：(i) 硬件真实性不足：当前仿真模型虽已考虑能量采集模型、传输功率及效率衰减，但尚未完全覆盖硬件非线性、能量测量噪声、无线链路突发衰落等现实因素，仍需在实际平台或硬件在环环境中进一步验证；(ii) 参数自适应能力有限：AOEI权重、信息奖励系数、弱势保护权重以及Lyapunov参数V等目前依赖经验设定，在跨场景迁移时可能需要重新调参，未来可引入强化学习或元调度（meta-scheduling）方法，实现对权重与参数的在线自适应优化；(iii) 对极端与对抗性情形的适应性有待加强：现有实验主要针对典型拓扑与非对抗环境，在节点存在策略性行为或恶意攻击的场景下，优先级信号与路径治理机制的鲁棒性仍需进一步研究；(iv) 性能结构的理论刻画尚不完备：虽然通过实验观察到了性能边界外移，但对不同机制参数下前沿形态的理论刻画仍不充分，未来可从多目标优化视角，对“边界外移”的充要条件进行更严格的分析。

这些局限也为后续研究指明了方向：将机制进一步嵌入真实硬件平台，并结合学习型调参与机制分析，有望在复杂与对抗环境中持续提升能量协同网络的自适应性与长期可持续性。

### E. 总结

综上所述，本文通过AOEI优先级信号、数字孪生信息治理、自适应Lyapunov时长规划（ALDP）与EETOR机会主义上报机制等机制，在理论与实验上验证了“信息滞后消除→状态透明化→能量信息协同优化→通信开销内生化”四大方向的联合可行性，为构建可解释、可扩展且具技术理性的能量共享WSN提供了可行范式。更为重要的是，本研究展示了机制设计在资源受限网络中的普适性价值：通过改变机制结构，而非仅优化算法细节，可以在不增加总能量消耗的前提下，同时实现网络寿命的显著延长和能量分布的充分平衡，为未来的能源自治网络、可再生驱动的边缘系统以及大规模异质感知网络提供了统一的理论基础与实践方向。

### 参考文献

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and

- Applications," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015. doi:10.1109/COMST.2015.2444095.
- [2] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008. doi:10.1016/j.comnet.2008.04.002.
- [3] S. Biswas and R. Morris, "ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks," in *Proc. ACM SIGCOMM*, 2005, pp. 133–144. doi:10.1145/1080091.1080108.
- [4] S. Soro and W. B. Heinzelman, "Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks via Unequal Clustering," in *Proc. 19th IEEE IPDPS (WMAN)*, 2005. doi:10.1109/IPDPS.2005.365.
- [5] L. Georgiadis, M. J. Neely, and L. Tassiulas, "Resource allocation and cross-layer control in wireless networks," *Foundations and Trends in Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 1–144, 2006. doi:10.1561/1300000001.
- [6] L. Tassiulas and A. Ephremides, "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 12, pp. 1936–1948, 1992. doi:10.1109/9.182479.
- [7] S. Narwaria, A. Mazumdar, et al., "Software-Defined Wireless Sensor Network: A Comprehensive Survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 215, p. 103636, 2023. doi:10.1016/j.jnca.2023.103636.
- [8] J. Li, Q. Han, and W. Wang, "Characteristics analysis and suppression strategy of energy hole in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 135, p. 102938, 2022. doi:10.1016/j.adhoc.2022.102938.
- [9] M. Abdollahi and F. Eshghi, "Opportunistic routing metrics: A timely one-stop tutorial survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 171, p. 102802, 2020. doi:10.1016/j.jnca.2020.102802.
- [10] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [11] L. Mohjazi, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios, et al., "A Comprehensive Review on Energy Harvesting Integration for IoT," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3097, 2021. doi:10.3390/s21093097.
- [12] R. D. Yates, Y. Sun, D. R. Brown, S. K. Kaul, E. Modiano, and S. Ulukus, "Age of Information: An Introduction and Survey," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 5, pp. 1183–1210, 2021. doi:10.1109/JSAC.2021.3065072.
- [13] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, 2002. doi:10.1109/TWC.2002.804190.
- [14] S. Singh and P. K. Malik, "Energy-Efficient Hybrid Hierarchical Routing scheme for overall Efficiency in WSN," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 33, no. 8, pp. 996–1005, 2021. doi:10.1016/j.jksuci.2018.08.001.
- [15] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, 2004. doi:10.1109/MWC.2004.1368893.
- [16] M. J. Neely, "Energy-Optimal Control for Time-Varying Wireless Networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 7, pp. 2915–2934, 2006. doi:10.1109/TIT.2006.876219.
- [17] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Sciences*, 2000. doi:10.1109/HICSS.2000.926982.
- [18] J. Singh, R. Kaur, and D. Singh, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A taxonomic survey," *International Journal of Energy Research*, 2021. doi:10.1002/er.5816.
- [19] Z. Tang *et al.*, "Double sink energy hole avoidance strategy for wireless sensor network," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020:231, 2020. doi:10.1186/s13638-020-01837-8.
- [20] M. J. Neely, "Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems," Morgan & Claypool, 2010. doi:10.2200/S00271ED1V01Y201006CNT007.
- [21] M. Zhou *et al.*, "Toward Safe and Accelerated Deep Reinforcement Learning for Networking," *arXiv*, 2022. doi:10.48550/arXiv.2209.13532.
- [22] S. Sharma and R. Mahapatra, "Age of information analysis for Internet of Things communication systems," *International Journal of Communication Systems*, vol. 35, no. 18, e5409, 2022. doi:10.1002/dac.5409.
- [23] İ. Kahraman, A. Köse, and E. Anarim, "Age of Information in Internet of Things: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, 2023. doi:10.1109/JIOT.2023.3324879.
- [24] H. Hu, J. Liu, X. Chen, and X. Yan, "Link-Correlation-Aware Opportunistic Routing in Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 21, no. 11, 3840, 2021. doi:10.3390/s210803840.
- [25] B. R. Barricelli *et al.*, "Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022. doi:10.1109/COMST.2022.3208773.
- [26] G. Yang *et al.*, "Smart Energy Harvesting for Internet of Things Networks," *Sensors*, vol. 21, no. 8, 2755, 2021. doi:10.3390/s21082755.
- [27] X. Zhang *et al.*, "A Survey on the Evolution of Opportunistic Routing in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 20, no. 15, 4112, 2020. doi:10.3390/s20154112.

**Author Name** Biography text here.

**Coauthor Name** Biography text here.