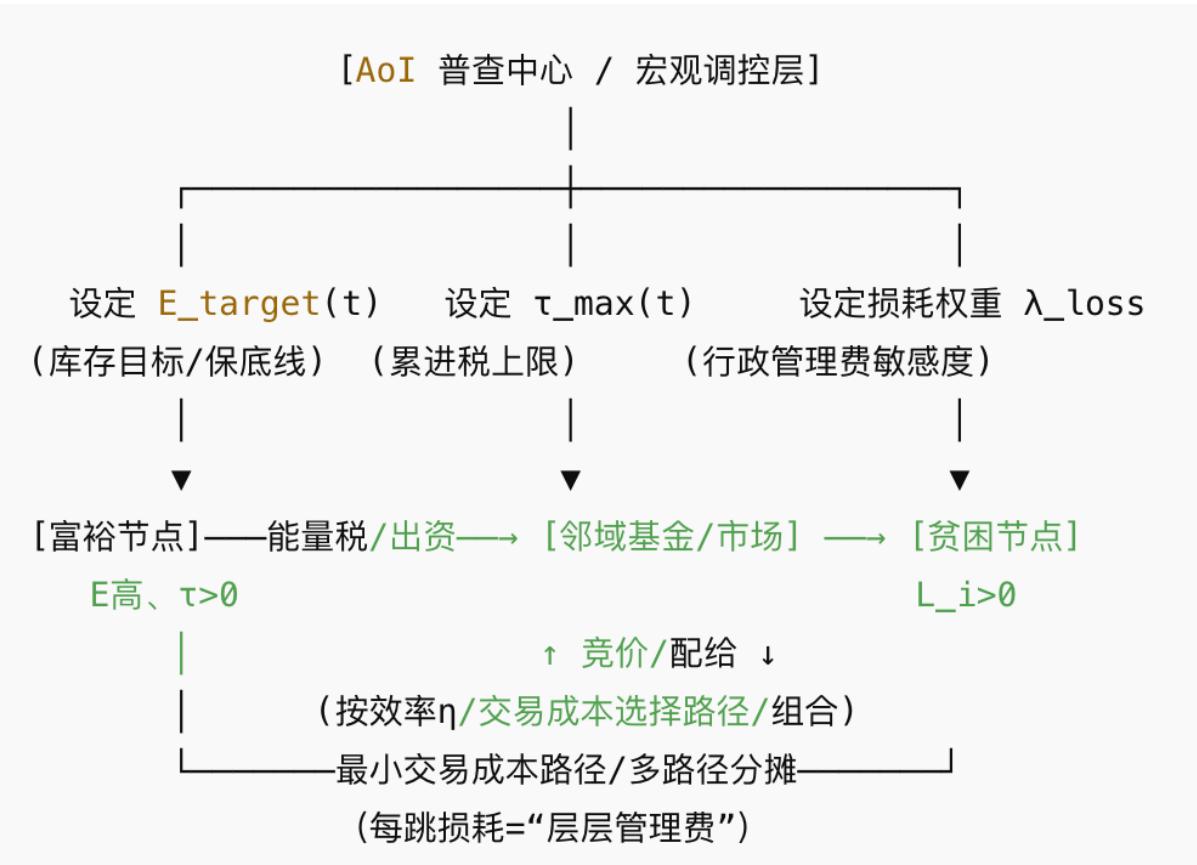


我们提出一套 AoI 驱动的能量共享—经济一体化框架：以 AoI 作为宏观‘经济普查’指标自适应设定保底库存与累进税率，通过把链路损耗建模为交易成本，联合最小费用流/比例公平与稳健多路径分摊，**形成低通信、可解释、可分布式实现的市场化配给机制**，能在效率—公平—稳定之间取得可证的权衡并避免能量空洞。

一、经济学—WSN 概念映射（核心对照表）

WSN 要素	经济概念	解释
节点能量 E	资金/资本存量	结余越多=越富裕
能量需求节点	资金短缺主体	需要“财政转移/再分配”
能量富裕节点	纳税主体/投资者	可对外“出资/纳税”
传能链路/路径	金融流通渠道/资金链	每一跳有“手续费/交易成本”
传输效率 η	手续费/交易成本的互补	有效到达=收益；损耗=管理费
$AoI \Delta$	经济普查/信息透明度	指导宏观调控强度
累进“税率” τ	财政再分配制度	抑制两极、反“破产”
路径选择	最小交易成本的资金路由	选“费率最低、效率最高”的通道
多源配给	投资组合/供给分散化	风险-收益折中（方差/稳健）
调度窗口	预算期/财政周期	周期性调整政策与配给



三、宏观层：AoI 驱动的“财政政策”

AoI 指标（“经济景气/风险度量”）

- 全网景气: $\mathcal{G}(t) = \sum_i w_i \phi(\Delta_i(t))$ (ϕ 可取线性/凸)
- 风险集中: $\mathcal{R}(t) = \frac{\sum_i w_i \mathbf{1}\{\Delta_i > \Delta_{\text{thr}}\}}{\sum_i w_i}$
- 差异度: $\mathcal{V}(t) = \text{Var}(\{\Delta_i\})$ 或基尼系数

政策更新（慢时标，每窗口滚动一次）

$$\begin{aligned} E_{\text{target}}(t+1) &= E_{\text{floor}} + \kappa_1 \mathbb{E}[C(H)] + \kappa_2 \text{Std}[\hat{H}(H)] + \kappa_3 \mathcal{G}(t), \\ \tau_{\max}(t+1) &= \text{clip}\left(\tau_0 + \alpha_1 \mathcal{G}(t) + \alpha_2 \mathcal{R}(t) + \alpha_3 \mathcal{V}(t), 0, \bar{\tau}\right). \end{aligned}$$

含义：AoI 变差/风险集中/差异扩大 \Rightarrow 提高目标库存/税率上限，强化再分配，压制“能量贫困”。

四、微观层：额度、税基与损耗敏感的最优配给

缺口/借能额度（受赠方）

$$L_i = \max \left\{ 0, (E_{\text{floor}} + E_{\text{buf}}) - (E_i + \hat{H}_i - C_i) \right\} \cdot \beta_i, \quad \beta_i = \text{clip}(1 + \lambda \cdot \text{norm}(\Delta_i), \beta_{\min}, \beta_{\max}).$$

盈余/税基（捐赠方）

$$S_j = \max \{ 0, (E_j + \hat{H}_j - C_j) - E_{\text{target}} \}, \quad \tau_j = \min \left\{ \tau_{\max}, k \frac{S_j}{E_{\text{target}}} \right\}, \quad T_j^{\max} = \tau_j S_j.$$

单/多跳路径成本（交易成本视角）

每条边 e 的“单位行政费”：

$$\ell_e = -\log(\eta_e) + \kappa_{\text{delay}} d_e + \kappa_{\text{cont}} q_e \quad (\text{效率、时延、拥塞/并发})$$

路径成本： $\ell_{\text{path}} = \sum_{e \in \text{path}} \ell_e$ ；到达效率 $\prod_e \eta_e = e^{-\sum \ell_e}$ 。

损耗敏感的比例公平目标（推荐默认）

$$\max_{x \geq 0} \sum_i w_i \log \left(\epsilon + \sum_j \sum_{p \in \mathcal{P}_{j \rightarrow i}} \eta_p x_{j \rightarrow i}^{(p)} \right) - \lambda_{\text{loss}} \sum_{j,i} \sum_p (1 - \eta_p) x_{j \rightarrow i}^{(p)}$$

s.t.

$$\sum_{i,p} x_{j \rightarrow i}^{(p)} \leq T_j^{\max}, \quad 0 \leq \sum_{j,p} \eta_p x_{j \rightarrow i}^{(p)} \leq L_i, \quad x_{j \rightarrow i}^{(p)} \geq 0.$$

| 第一项=比例公平（不让任何人“破产”）；第二项=把损耗当行政费进行“节流”。

可替代目标：

- 最小损耗流：在满足 L_i 的前提下最小化 $\sum (1 - \eta_p) x_{j \rightarrow i}^{(p)}$ 。
- 稳健/方差惩罚（组合投资思想）：额外减去 $\gamma \cdot \text{Var}[\eta_p]$ 或 CVaR。

五、路径选择：最小交易成本与多路径分摊

(A) 最短路（单对）

对给定 $j \rightarrow i$ ，取 ℓ_e 为边权，求最短路径 $\text{SP}(j, i)$ ，则单位到达能量成本最小。

- 复杂度：Dijkstra $O(E \log V)$ 。

(B) 最小费用多源多汇流（多对、可分流）

把每个 j 的供给上限设为 T_j^{\max} ，每个 i 的需求上限设为 L_i ，边成本用 ℓ_e 或 $(1 - \eta_e)$ ，跑 Min-Cost Flow。

- 复杂度：成功商用，有高效实现；可分布式近似（见下）。

(C) 稳健多路径（投资组合）

对同一对 $j \rightarrow i$ 允许多条路径分摊： $\sum_p x_{j \rightarrow i}^{(p)} = x_{j \rightarrow i}$ ，
优化“收益 $\sum_p \eta_p x_{j \rightarrow i}^{(p)}$ – 风险 $\gamma \cdot \text{Var}[\eta_p]$ – 成本 $\sum_p \ell_p x_{j \rightarrow i}^{(p)}$ ”。

六、分布式近似实现（一次广播 + 一次竞价）

消息与本地量

- 受赠方 i : 广播 $\text{NEED}(i, L_i, w_i, \beta_i)$ 。
- 捐赠方 j : 本地有 T_j^{\max} , 并能对邻域内路径估计 $\ell_{j \rightarrow i}^*$ (最短路代价) 或几条候选路的 η_p 。

捐赠方出价 (向低成本、高价值优先)

定义优先指数 (可选其一或混合) :

$$\pi_{j \rightarrow i} = \frac{w_i \beta_i}{\ell_{j \rightarrow i}^*} \quad \text{或} \quad \tilde{\pi}_{j \rightarrow i} = \frac{w_i \beta_i \eta_{j \rightarrow i}^*}{1 + \ell_{j \rightarrow i}^*}$$

按 π 归一化后分配预算:

$$b_{j \rightarrow i} = \min \left\{ T_j^{\text{rem}} \cdot \frac{\pi_{j \rightarrow i}}{\sum_{i'} \pi_{j \rightarrow i'}}, \text{cap}_{j \rightarrow i} \right\}.$$

受赠方择优与确认

- 收到 $\{b_{j \rightarrow i}\}$ 后, 按单位到达能量成本 (ℓ 小/ η 大) 排序, 贪心接受直到满足 L_i 或无可用出价;
- 发送 CONFIRM 给入选捐赠者; 未入选的出价自动回收预算。

执行与记账

- 执行相应的单/多跳充电 (可时分/频分) ;
- 维护历史账本 A_i (净得/净捐), 在下一轮将 $g(A)$ 乘到 π 做长期公平。

通信复杂度低: 每窗口两轮轻量消息; 计算本地化: 最短路/候选路可用局部拓扑或定期邻域发现维护。

七、稳定性与可行性 (不出“能量空洞”)

可行性 (直觉)

若邻域层面

$$\sum_j T_j^{\max} \bar{\eta}_j \geq \sum_i L_i,$$

则存在可行解 ($\bar{\eta}_j$ 为平均到达效率)。

Lyapunov 漂移+惩罚

定义“贫困势能”

$$\Phi(t) = \sum_i \max\{0, E_{\text{floor}} - (E_i + \hat{H}_i - C_i)\}.$$

在策略使得期望漂移 $\mathbb{E}[\Phi(t+1) - \Phi(t)]$ 为负, 且宏观层对 $\tau_{\max}, E_{\text{target}}$ 的反馈随 AoI 增大而强化时, Φ 以概率 1 收敛到小邻域: 系统长期不出现系统性“破产”。

八、工程默认值与落地建议

- 窗口 H : EH 平稳取大 (如 10–20 个时隙) , 波动大取小 (3–5) 。
- λ_{loss} : 从 0.1–1 试探; IRS/波束整形启用时适当减小 (因 $\eta \uparrow$) 。
- 候选路: 每对保留 1–3 条 (最短/备选稳健路) ; 过多会增开销。
- τ_{\max} : 0.2–0.5 起步; 由 $\mathcal{G}, \mathcal{R}, \mathcal{V}$ 自适应。
- 记账 A_i : 半衰记忆, 避免长期路径依赖。
- 安全缓冲 E_{buf} : 按负载峰值与 $\text{Std}[\hat{H}]$ 的线性组合设置。