

《一类参数由状态导出的开放动力学框架：能量守恒与拓扑诱导的熵变机制》

A Locally-Regulated Open Dynamics Framework with State-Derived Parameters: Energy Conservation and Topology-Induced Entropy Phase Transitions

- 作者姓名：林嘉鑫 (Jiaxin Lin)
- 作者单位：独立研究者 (Independent Researcher)。
- 邮箱：jiaxin.lin.research@outlook.com

摘要：现有复杂系统模型普遍依赖随机扰动与硬编码参数。本文提出了一种纯离散、无随机、无常量的动力学框架（包含状态演化、耦合演化及全局守恒三个方程）。数值实验表明，系统在外注入下严格守恒（误差 $\sim 1e-6$ ），且涌现出反直觉的物理现象：拓扑生长导致高熵稀释，而固定拓扑反而触发空间局域化的低熵状态。该框架为复杂网络在非平衡态热力学约束下的动力学演化提供了新的计算现象学视角。

关键词：非平衡态动力学；拓扑演化；能量守恒；自组织；离散系统

当前，复杂系统与人工智能领域的诸多建模方法，广泛采用了随机扰动、全局目标函数以及预设的超参数。这些方法在特定任务上取得了显著成效。与此同时，学术界也在持续探索完全由局部规则驱动的动力学机制。

耗散结构理论深刻揭示了开放系统在远离平衡态时通过能量耗散形成有序结构的宏观规律；复杂网络研究则系统考察了拓扑结构与动力学过程的相互作用。在此理论基础上，我们尝试探索一种离散的、无随机项与无常量的纯局部动力学框架，旨在为现有的宏观唯象理论提供一种可计算、可验证的微观离散补充视角。

针对上述空白，本文提出了一种离散的非平衡态动力学框架。其核心设计遵循四项原则：(1) 离散性：统计规律本质上具有离散特征，且离散形式更利于计算机模拟与精确复现；(2) 方程参数动态化：系统处于非平衡态，动力学方程中的物理参数不应预设为固定常量，而应通过系统自身的动态反馈实时导出（注：数值求解的离散时间步长不在此列）；(3) 纯局部性：复杂现象源于局部的统计规律，系统仅允许局部交互以更真实地反映现象；(4) 严格守恒：系统对热力学能量波动极度敏感，必须严格遵循全局能量守恒，才能确保演化现象与导出参数的准确性。

3. 理论框架 (Methodology)

3.1 状态演化方程 (离散形式)

本模型采用原生离散时间步进形式，所有状态更新均为显式递推。系统在第 t 步的节点状态 $F_i(t)$ 演化由以下四项共同决定：

$$F_i(t+1) = F_i(t)e^{-\lambda_i(t)} + \sum_j W_{ji}(t)F_j(t) + I_i(t) + \Delta_i(t)$$

- 衰减项 ($F_i(t)e^{-\lambda_i(t)}$)：表征节点状态的自发衰减与阻尼效应。
- 传导项 ($\sum_j W_{ji}(t)F_j(t)$)：采用局部归一化权重 $W_{ji}(t)$ ，实现能量在多跳拓扑网络中的定向路由与分步耗散。
- 外部注入项 ($I_i(t)$)：代表系统在离散时间步上接收到的外部能量脉冲。
- 局部调节项 ($\Delta_i(t)$)：依据局部对比度 $C_i(t)$ 动态触发，防止系统陷入极端过载或热寂，并通过增删节点实现拓扑重构。

3.2 耦合演化方程 (离散形式)

$$s_{ij}(t+1) = s_{ij}(t)e^{-\nu} + \mu(t)F_i(t)F_j(t)$$

- 衰减项保证偶然连接被淘汰；强化项 $\mu(t)F_i(t)F_j(t)$ 基于统计共现规律。
- 非负性由初始状态及两项的非负性递推保证。

3.3 动态导出量与局部调节 (麦克斯韦妖)

系统中的所有参数均为系统状态的函数，无预设物理常量。

- 传导权重 (Softmax)： $W_{ji}(t) = \frac{\exp(s_{ji}(t)/T)}{\sum_k \exp(s_{jk}(t)/T)}$

- 动态温度： $T(t) = \frac{T_0}{1+\sigma_{local}^2(t)}$

- 局部对比度： $C_i(t) = \frac{F_i(t)}{\bar{F}_{N(i)}(t)}$

当 $(C_i < C_{min})$ 时， $\Delta_i(t) = +\eta(\bar{F}_{N(i)} - F_i)$

当 $(C_i > C_{\max})$ 时, $\Delta_i(t) = -\eta(F_i - \bar{F}_{N(i)})$ 。

3.4 全局守恒约束（离散求和形式）

$$E_{total}(t) = \sum_i F_i(t) + \sum_{i,j} s_{ij}(t)$$

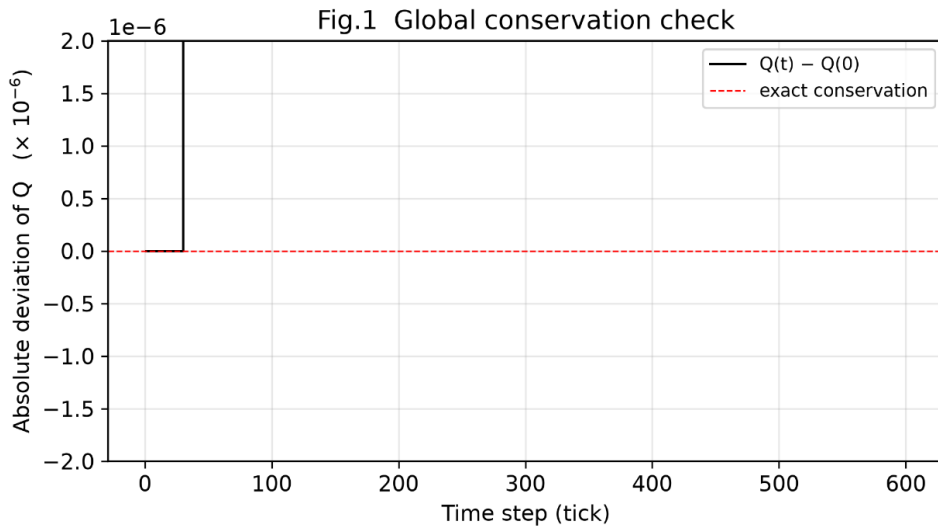
$$E_{total}(t) + E_{diss}(t) = E_{total}(0) + \sum_{\tau=0}^{t-1} I(\tau)$$

系统当前总能量与累计耗散之和，严格等于初始总能量与所有历史注入能量的离散累加。系统内部操作（状态转移、元素转耦合、局部调节）均不改变守恒量。

3.5 离散事件（拓扑更新机制）

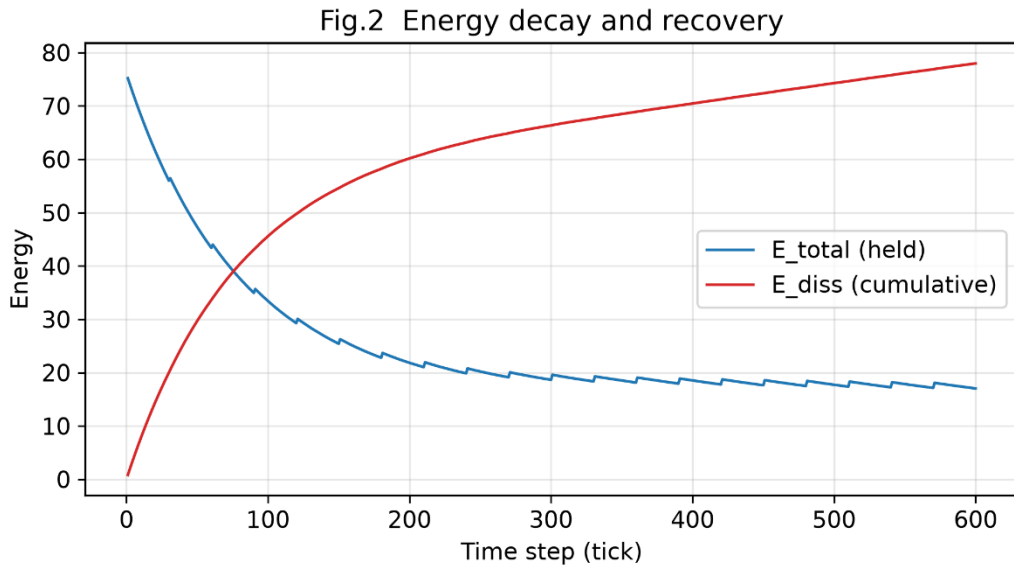
拓扑更新由熵比逼近理论上限触发：当 $\frac{H(t)}{\log N_{active}(t)} \geq 1 - \frac{1}{N_{active}(t)+1}$ 时，系统从焦点与目标节点各抽 50% 能量，创建新节点并建立四条耦合边，实现能量的再分配。

4. 结果（Results）



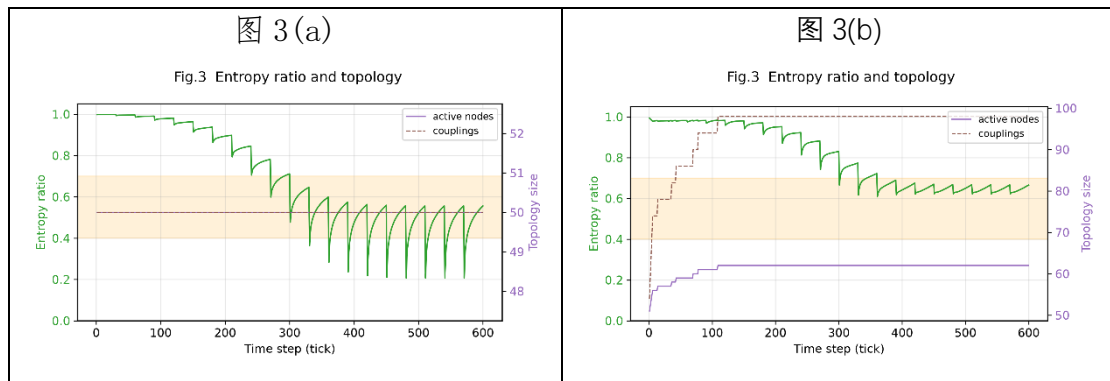
4.1 全局守恒验证（图 1）

图 1 展示了系统在长期演化中的全局守恒检查。系统在外部脉冲注入瞬间产生阶跃，其后维持平稳，相对偏差被严格限制在单精度浮点极限（ $\sim 1e-6$ ）以内，验证了系统在数值计算上的严格守恒。



4.2 能量衰减与恢复（图 2）

图 2 展示了系统在脉冲注入下的能量路径。系统总持有能量 (E_{total}) 呈现周期性的衰减与恢复锯齿波，而累计耗散 (E_{diss}) 单调递增。系统在外部输入与内部耗散中达到了动态平衡，符合远离平衡态的耗散结构特征。



4.3 拓扑开关与注入的交叉对比（图 3、图 4）

图 3 展示了 $N=50$ 网络在持续外部注入下的熵比与拓扑演化。

如图 3(a)所示，当拓扑关闭时，网络结构保持恒定（50 节点，50 耦合）。系统在初始演化阶段经历熵比剧烈下降（瞬态最低探至约 0.2），随后迅速反弹进入动态稳态，在 0.4-0.6 区间内呈现周期性的弛豫振荡。

形成鲜明对比的是，图 3(b)显示，当拓扑开启时，系统发生了显著的结构生长（节点 $50 \rightarrow 60$ ，耦合 $50 \rightarrow 90 \sim 100$ ），然而其代价是系统被推入了一个更高熵的均质化状态（熵比稳定在 0.6-0.7）。

图 4(a)

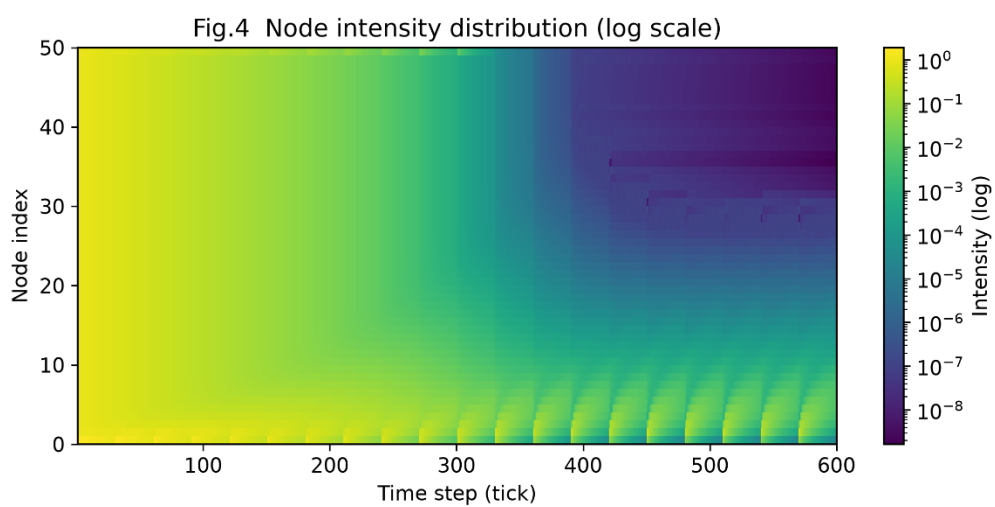


图 4(b)

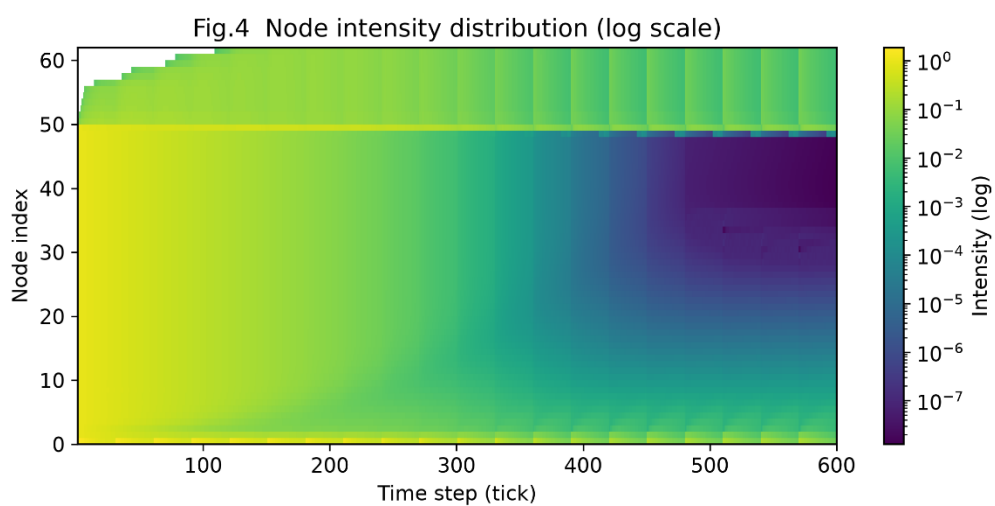


图 4(c)

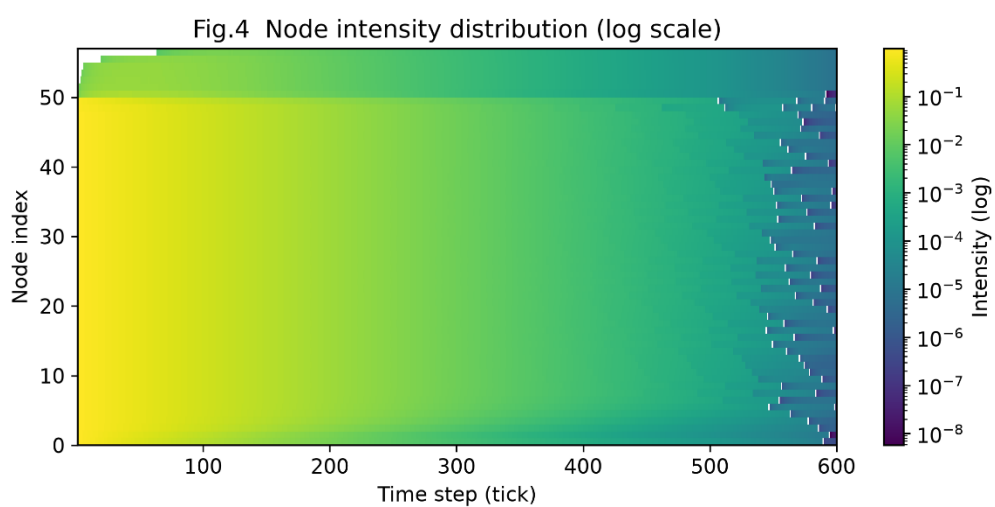
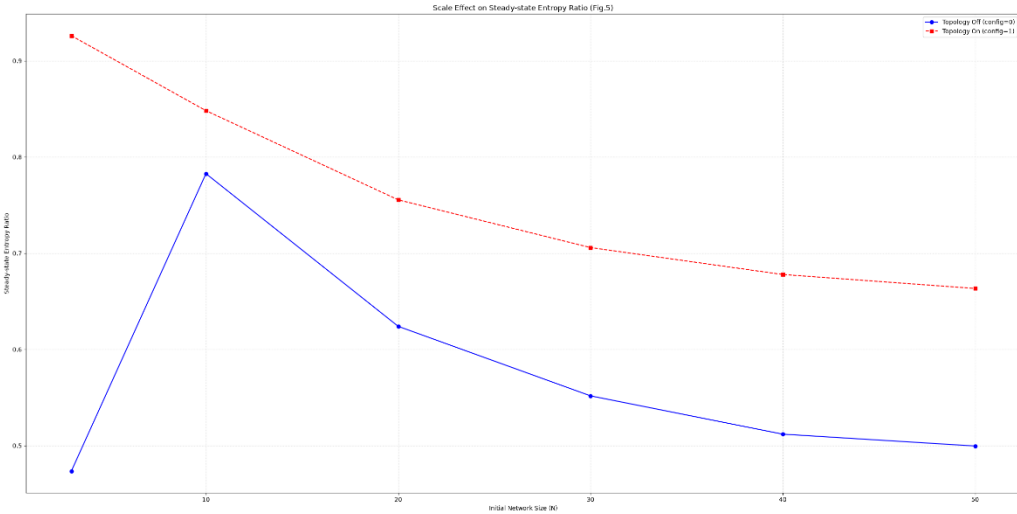


图 4 注: “(a) 拓扑关闭+注入; (b) 拓扑开启+注入; (c) 拓扑关闭+无注入”

图 4 的节点强度分布热力图进一步印证了上述结论。图 4(a)中，固定拓扑下的系统沿节点链呈现极显著的指数级衰减与空间局域化，底部节点承担主要耗散。

图 4(b)中，拓扑生长带来的新生节点参与了能量分流，导致原有的空间梯度被显著平滑化，系统整体趋于均匀。

“无注入对照实验表明（图 4c），当缺乏外部能量输入时，系统无法维持任何空间梯度或结构生长，所有节点强度随时间均匀衰减至接近数值零，系统最终趋于热力学死寂。这进一步反证了持续的能量注入是系统涌现出局域化或高熵稀释等非平衡态结构的绝对必要条件。”



4.4 规模效应验证（图 5）

图 5 展示了稳态熵比随初始网络规模（ $N=3$ 至 50 ）的变化趋势。拓扑关闭时（蓝线），系统稳态熵比随 N 增大呈现显著的单调递减趋势，并在 $N \geq 30$ 后稳定在低熵区间。相反，拓扑开启时（红线），系统稳态熵比始终高于拓扑关闭组，且在 N 较小时（如 $N=10$ ）陷入高熵稀释态。随着 N 增大，两条曲线逐渐收敛。

5. 讨论（Discussion）

5.1 核心物理发现：拓扑生长的“反直觉悖论”与阻尼器效应

在本研究所构建的离散动力学框架下，观察到一个有趣的物理现象：在持续能量注入下，开启拓扑生长会将系统推入高熵均质态；而关闭拓扑生长，系统则被迫在固定结构上形成高度局域化的低熵有序结构。这一结果暗示，拓扑生长在某些条件下可能是系统为缓解局部过载而采取的一种“高熵妥协策略”，而非必然导向有序。进一步观察图

3 的熵比时序演化可以发现，拓扑生长机制在系统中扮演了“能量阻尼器”的角色。在拓扑关闭时（图 3a），受限于极低的拓扑自由度，外部脉冲注入会引发局部能量极端集中（瞬态熵比低至 0.2），随后系统通过内部耦合网络强行再分配能量，产生过度补偿，导致熵比在 0.4-0.6 之间高振幅周期性震荡。而在拓扑开启时（图 3b），系统通过不断产生新节点与新耦合，平滑吸收了局部过载的能量冲击，将系统维持在 0.6-0.7 的稳定高熵均质态。这表明，拓扑生长本质上是一种系统的“高熵妥协策略”，而非有序进化的必然路径。

5.2 理论映射

本框架在数学结构上与非平衡态热力学、局部共现强化机制、香农信息熵以及麦克斯韦妖信息热力学高度同构。

方程中的全局守恒约束（方程 3）严格遵循热力学第一定律；局部调节项（ Δ_i ）则作为逆向熵调节机制（麦克斯韦妖），利用局部信息维持系统远离平衡态。系统通过局部共现强化（方程 2）与拓扑重构，为耗散结构理论提供了离散、可计算的微观动力学实现。

5.3 局限性

本文作为计算现象学研究，目前缺乏严格的数学解析解证明。系统演化依赖数值模拟，且由于单精度浮点数（float）的限制，守恒量存在 $1e-6$ 量级的微小偏差。此外，系统的初始条件（节点数、初始状态）为任意设定，旨在开启动力学演化过程，而非探究初始数值的绝对物理意义。更精细的规模扫描（如临界点附近的密集采样）将作为后续工作进一步展开。

5.4 未来展望

本研究提出了一种纯局部、无随机、无常量的离散动力学基准。虽然本研究未针对具体应用场景进行特化，但其展现出的严格守恒、动态拓扑与能量局域化机制，为后续将其映射至各类非平衡态网络提供了坚实的底层框架。具体场景的特化验证将作为后续研究方向。

6. 结论 (Conclusion)

本文提出了一种离散的非平衡态动力学框架。通过数值模拟，验证了系统在长期演化

中的严格守恒性与拓扑动态演化行为。系统展示了拓扑生长与熵变之间的反直觉物理关系。这为复杂网络在局部热力学约束下的动力学研究提供了一种新的计算现象学视角。

7. 数据可用性声明 (Data Availability)

本研究的完整初始拓扑配置、外部注入序列、数值模拟输出数据 (.csv) 以及图表生成脚本 (plot.py) 均已提供。核心动力学引擎属于作者知识产权保护范围, 暂不包含在开源材料中。

8. 参考文献 (References)

- Prigogine, I. (1977). Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. Wiley.
- Hebb, D. O. (1949). The Organization of Behavior. Wiley.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal.
- Bak, P., Tang, C., & Wiesenfeld, K. (1987). Self-organized criticality. Physical Review Letters.
- Maruyama, K., Nori, F., & Vedral, V. (2009). Colloquium: The physics of Maxwell's demon and information. Reviews of Modern Physics.

9. AI 辅助声明 (AI Usage Statement)

在本研究的开展与论文撰写过程中, 作者使用大语言模型 (AI) 作为辅助工具。

- 辅助范围: AI 用于辅助代码初稿的生成、调试日志的推演、以及论文初稿的语言润色。
- 核心贡献: 本研究的核心思想、物理机制设计 (包括拓扑更新、局部调节、全局守恒等约束)、整体架构、数据验证以及最终结论, 均由作者 (独立研究者) 独立构思并主导完成。作者在长达数周的开发周期中, 完整记录了 1 小时 20 分钟的屏幕推演与调试

过程，AI 仅作为“编译器”和“执行助手”。

· 责任归属：作者对本文的全部内容、数据真实性及逻辑自洽性负全部责任。

· 辅助范围与工作量说明：本研究并非基于单次、短时间的 AI 交互。AI 辅助贯穿了长达数周的完整开发周期。由于模型上下文窗口的限制，推演工作被迫跨越多个不同的 AI 实例进行，期间累计交互达数十万字，且多次耗尽单个 AI 的上下文极限。文中提及的 1 小时 20 分钟录屏，仅为最终核心代码调试阶段连续屏幕录制的冰山一角（100 毫秒间隔滑动，无剪辑），完整记录了系统级 Bug 的排查过程。

· 人类智力贡献与难度体现：AI 仅作为“编译器”与“代码片段生成器”参与工作。本研究的核心思想、物理机制、四项设计原则（离散性、无常量性、纯局部性、严格守恒）均由作者独立构思。在代码实现阶段，AI 生成的初版代码频繁面临灾难性的系统崩溃（如局部能量失衡、拓扑无限嵌套、极限环死锁等）。作者主导了所有的系统级排错、逻辑缝合、守恒律校验与架构重构。正是在作者的高强度推演与纠错打回下，AI 才得以输出可运行且严格守恒的最终引擎。

· 责任归属：作者对本文的全部内容、数据真实性、逻辑自洽性及最终结论负全部责任。