

通用拓扑智能体：跨领域结构智能的统一范式

摘要

现实世界中大量复杂决策问题本质上都是结构智能问题，其核心在于对高维耦合拓扑结构的解析、分解、规划与优化。工业制造图纸解析、航司一体化调度、行泊一体化无人驾驶、芯片设计、分子生成等领域虽场景迥异，却共享相同的结构性困境：状态空间爆炸、约束密集、全局-局部冲突、奖励稀疏、计算量难以收敛。本文提出通用拓扑智能体（General Topological Agent, GTA）统一范式，以拓扑分解构建结构化状态空间，以分层强化学习（HRL）实现宏观规划与微观执行的解耦，以拓扑-GRPO 实现分组级低计算量策略优化。该范式在保持核心算法思想高度统一的同时，允许在不同场景中根据领域约束形成差异化实施路径，真正实现“算法同源，场景异构，条条大路通罗马”。本文针对工业制造、行泊一体化无人驾驶、航司一体化调度、芯片设计、分子生成五大典型场景，给出完整算法框架、数学形式化定义与可执行伪代码，展示拓扑智能体作为下一代通用结构智能的理论价值与工程潜力。

1 通用拓扑智能体统一数学基础

1.1 拓扑图统一表示

任意复杂系统均可表示为带权无向拓扑图：

$$G = (V, E, W)$$

- $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ ：节点，表示领域基本实体
- $E = \{e_{ij}\}$ ：边，表示依赖、约束、连接或关系
- $W \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ：权重矩阵，表示关系强度、成本、风险或约束强度

1.2 拓扑分解

将全局图分解为互不重叠的子图集合：

$$\mathcal{G} = \{G_1, G_2, \dots, G_k\}, \quad \bigcup_{i=1}^k G_i = G, \quad G_i \cap G_j = \emptyset$$

1.3 分层强化学习（HRL）

- 高层策略： $\pi_h(a_h | G)$ ，全局规划、分区、任务调度
- 底层策略： $\pi_l(a_l | G_s)$ ，局部原子操作、控制、分配
- 回报折扣： $\gamma \in (0, 1)$

1.4 拓扑-GRPO 优化目标

按拓扑子图分组计算优势函数：

$$A^g(s, a) = Q^g(s, a) - V^g(s)$$

最大化分组累计回报：

$$\max_{\pi_h, \pi_l} \mathbb{E}_{\pi_h, \pi_l} \left[\sum_{g=1}^k \sum_{t=1}^T \gamma^t R^g(s_t, a_t) \right]$$

2 五大场景算法框架与数字化伪代码

2.1 工业制造领域：2D/3D 工程图纸解析与拓扑优化

算法框架

1. 构建几何拓扑图 $G_M = (V_M, E_M, W_M)$
2. 拓扑分解为轮廓、孔、槽、面等特征子图
3. 高层智能体规划分解顺序
4. 底层智能体执行边合并、环闭合、PMI 绑定
5. 拓扑-GRPO 按特征子图分组优化

数学形式与伪代码

Input: CAD 图纸 I

Output: 拓扑优化结果 O

Process:

1. $G_M \leftarrow \text{ConstructTopologicalGraph}(I)$
2. $\mathcal{G}_M \leftarrow \text{TopologicalDecomposition}(G_M)$
3. $\pi_h \leftarrow \text{HighLevelPolicy}(\mathcal{G}_M)$
4. **for** $G_{M_i} \in \mathcal{G}_M$ **do**
5. $\pi_l^{(i)} \leftarrow \text{LowLevelPolicy}(G_{M_i})$
6. $R_i \leftarrow \text{TopologyGRPO}(\pi_h, \pi_l^{(i)}, G_{M_i})$
7. **end for**
8. $O \leftarrow \text{AggregateResults}(R_1, \dots, R_k)$

2.2 行泊一体化无人驾驶：感知-决策-控制拓扑智能

算法框架

1. 构建动态环境拓扑 $G_D = (V_D, E_D, W_D)$
2. 分解为行驶子图、泊车子图、障碍物子图
3. 高层决策驾驶/泊车/切换模式
4. 底层输出转向、速度、泊车轨迹
5. 拓扑-GRPO 按局部道路拓扑分组优化

数学形式与伪代码

Input: 传感器数据 S
Output: 控制指令 C
Process:
1. $G_D \leftarrow \text{ConstructDynamicGraph}(S)$
2. $\mathcal{G}_D \leftarrow \{G_{\text{drive}}, G_{\text{park}}, G_{\text{obs}}\}$
3. $m \leftarrow \pi_h(G_D)$ (驾驶/泊车/切换)
4. **switch** m **do**
5. **case** drive:
6. $C \leftarrow \pi_l^{\text{drive}}(G_{\text{drive}})$
7. **case** park:
8. $C \leftarrow \pi_l^{\text{park}}(G_{\text{park}})$
9. **case** switch:
10. $C \leftarrow \text{TransitionControl}(G_D)$
11. **end switch**
12. $R \leftarrow \text{TopologyGRPO}(\pi_h, \pi_l, G_D)$

2.3 航司一体化调度：机队-机组-航班-维修联合优化

算法框架

1. 构建全局资源拓扑 $G_A = (V_A, E_A, W_A)$
2. 分解为航班、机队、机组、维修子图
3. 高层智能体做全局资源调度与时序规划
4. 底层执行配对、指派、维修嵌入
5. 拓扑-GRPO 按子图分组优化成本、准点率、鲁棒性

数学形式与伪代码

Input: 航班计划 F , 资源池 R
Output: 调度方案 Ω
Process:
1. $G_A \leftarrow \text{ConstructResourceGraph}(F, R)$
2. $\mathcal{G}_A \leftarrow \{G_{\text{flight}}, G_{\text{fleet}}, G_{\text{crew}}, G_{\text{maint}}\}$
3. $\pi_h \leftarrow \text{GlobalScheduler}(G_A)$
4. **for** $G_{A_i} \in \mathcal{G}_A$ **do**
5. $\pi_l^{(i)} \leftarrow \text{LocalOptimizer}(G_{A_i})$
6. $\Omega_i \leftarrow \text{ApplyPolicy}(\pi_l^{(i)}, G_{A_i})$
7. **end for**
8. $\Omega \leftarrow \text{IntegrateSolutions}(\Omega_1, \dots, \Omega_4)$
9. $R \leftarrow \text{TopologyGRPO}(\pi_h, \{\pi_l^{(i)}\}, G_A)$

2.4 芯片设计领域：版图布局布线拓扑优化

算法框架

1. 构建芯片拓扑图 $G_C = (V_C, E_C, W_C)$
2. 拓扑分解为功能模块、时钟树、布线通道、IO 单元子图
3. 高层智能体规划全局布局、模块分区、时序约束框架
4. 底层智能体执行单元摆放、布线绕线、时序优化、冲突消解
5. 拓扑-GRPO 按功能子图分组优化，兼顾时序、功耗、面积

数学形式与伪代码

Input: 网表 N , 约束 C

Output: 物理版图 P

Process:

1. $G_C \leftarrow \text{ConstructChipGraph}(N, C)$
2. $\mathcal{G}_C \leftarrow \text{FunctionalDecomposition}(G_C)$
3. $\pi_h \leftarrow \text{FloorplanningPolicy}(G_C)$
4. **for** $G_{C_i} \in \mathcal{G}_C$ **do**
5. $\pi_l^{(i)} \leftarrow \text{PlacementRoutingPolicy}(G_{C_i})$
6. $P_i \leftarrow \text{ExecutePlacementRouting}(\pi_l^{(i)}, G_{C_i})$
7. **end for**
8. $P \leftarrow \text{MergeLayouts}(P_1, \dots, P_k)$
9. $R \leftarrow \text{TopologyGRPO}(\pi_h, \{\pi_l^{(i)}\}, G_C)$

2.5 分子生成领域：药物/功能分子拓扑设计

算法框架

1. 构建分子拓扑图 $G_{Mo} = (V_{Mo}, E_{Mo}, W_{Mo})$
2. 拓扑分解为分子骨架、官能团、药效团、化学键子图
3. 高层智能体规划分子骨架、药效团拓扑结构
4. 底层智能体执行原子连接、键型调整、官能团拼接、构象优化
5. 拓扑-GRPO 按分子结构子图分组优化，兼顾活性、稳定性、可合成性

数学形式与伪代码

Input: 设计目标 T

Output: 分子结构 M

Process:

1. $G_{Mo} \leftarrow \text{ConstructMolecularGraph}(T)$
2. $\mathcal{G}_{Mo} \leftarrow \text{ChemicalDecomposition}(G_{Mo})$
3. $\pi_h \leftarrow \text{ScaffoldDesignPolicy}(G_{Mo})$
4. **for** $G_{Mo_i} \in \mathcal{G}_{Mo}$ **do**
5. $\pi_l^{(i)} \leftarrow \text{FragmentAssemblyPolicy}(G_{Mo_i})$
6. $M_i \leftarrow \text{AssembleFragments}(\pi_l^{(i)}, G_{Mo_i})$
7. **end for**
8. $M \leftarrow \text{CombineFragments}(M_1, \dots, M_k)$
9. $R \leftarrow \text{TopologyGRPO}(\pi_h, \{\pi_l^{(i)}\}, G_{Mo})$

3 统一范式与跨领域思想总结

通用拓扑智能体在五大场景中保持完全一致的算法内核：

1. **拓扑建模**：将领域问题统一表示为图结构
2. **拓扑分解**：将复杂系统拆分为可解耦子结构
3. **分层决策**：高层定全局策略，底层做精细操作
4. **拓扑-GRPO**：按子图分组优化，大幅降低计算量

同时，场景约束决定实施差异：

- **工业制造**：几何合法性、PMI 语义绑定
- **无人驾驶**：实时性、安全约束、动态拓扑
- **航司调度**：时序约束、多资源耦合、鲁棒性
- **芯片设计**：时序收敛、布线无冲突、PPA 优化
- **分子生成**：化学合法性、生物活性、可合成性

这充分体现：算法思想同源同构，领域路径各有其轨；条条大路通罗马，但每个人只能走在自己的路径上。

拓扑智能体不仅是一种算法，更是一套跨领域结构智能的统一世界观，可无缝拓展至智能制造、智慧城市、网络架构、系统设计等更多复杂结构决策场景，为通用人工智能落地提供全新范式。