面向结构网格质量评价的几何感知多阶段专家网络

夏雨[1] 张浩轩[2] 滕晓强[1] 李海生[1]

[1]北京工商大学计算机与人工智能学院 [2]北京航空航天大学软件学院

问题描述

数据样本稀缺 → 真实工程领域中相同类型的网格数据往往十分稀少

网格感知不足 → 难以平衡不同感受野尺度带来对网格质量评估影响

网络通路固定 → 现有架构均为同一参数通路，缺陷被压入干扰空间

研究背景与动机

传统几何指标计算（宽高比 / 正交性 / 偏斜率）

- **优点**：物理意义明确、计算廉价、可解释，符合物理直观现象，易于工程师处理
- **缺点**：单一指标、阈值主观、多缺陷判断不一致，依赖于主观经验，准确性较差

端到端质量评价模型（CNN/GNN/Transformer）

- **优点**：自动学习分层表示、减少人工特征工程，支持大规模数据处理，准确性较高
- **缺点**：固定计算通路、缺陷模式混叠，导致泛化能力差、且在小样本量数据中精度低

通用混合专家网络（MoE）

- **优点**：支持条件计算、不同样本由不同子网络专精，门控机制自动控制通路激活
- **缺点**：网格具有各向异性，缺失结构网格 i/j 行列方向先验，路由与几何方向不对齐

亟需一种符合网格各异性、按缺陷类型动态稀疏路由的结构网格质量评价方法。

解决方案

多尺度共享特征编码提取

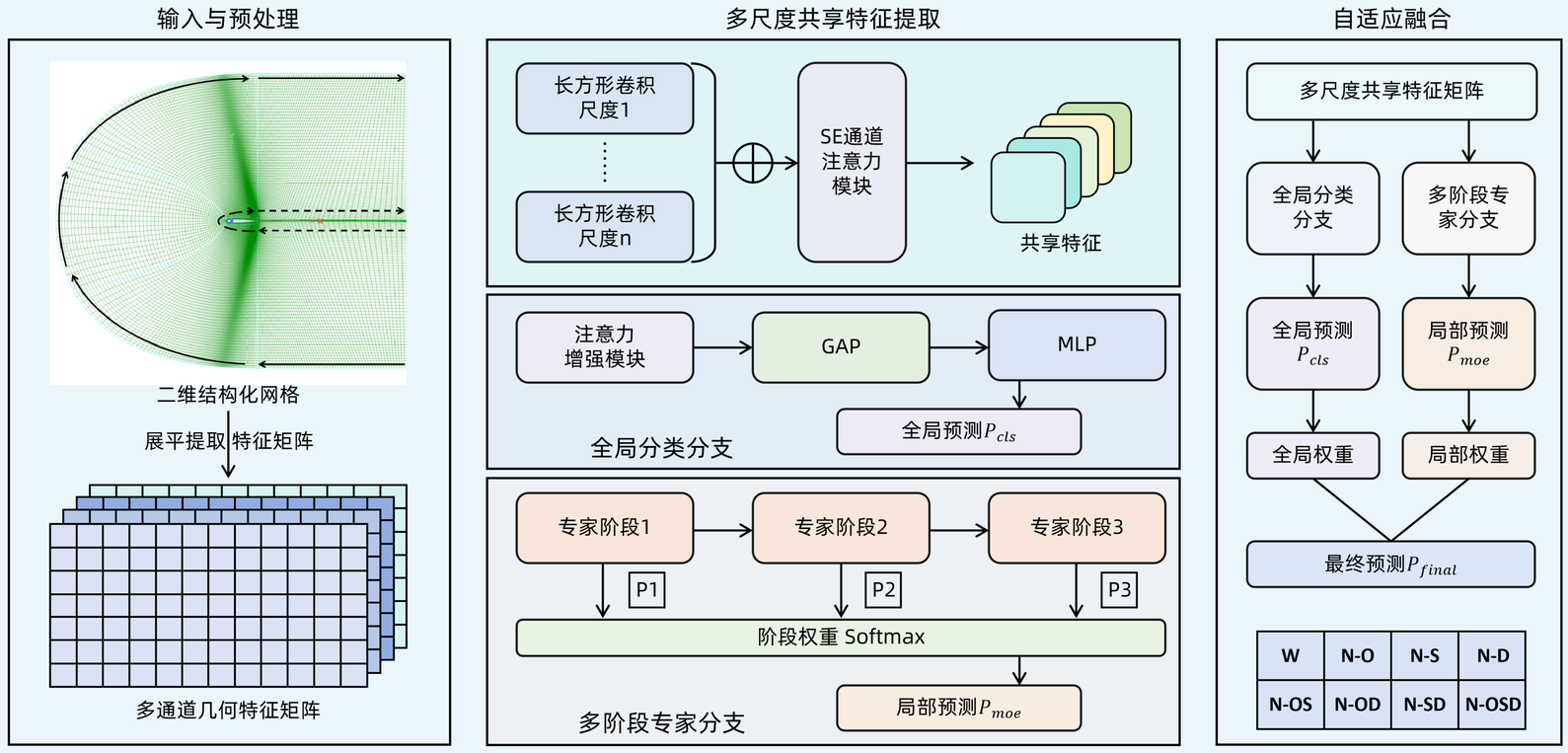
多阶段几何感知稀疏门控专家网络

全局 / 局部双分支网络融合

两阶段网络冻结训练策略

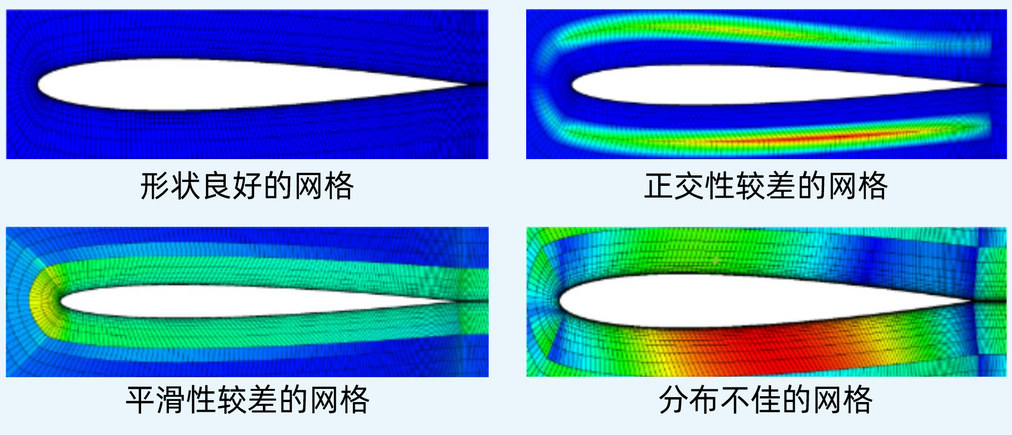
方法

该方法将**混合专家网络（MoE）**引入**2D结构化网格质量评估**任务，提出一种几何感知多阶段专家网络。打破原有固定网络参数通路的方法，对不同网格采用专家动态专精化评估。



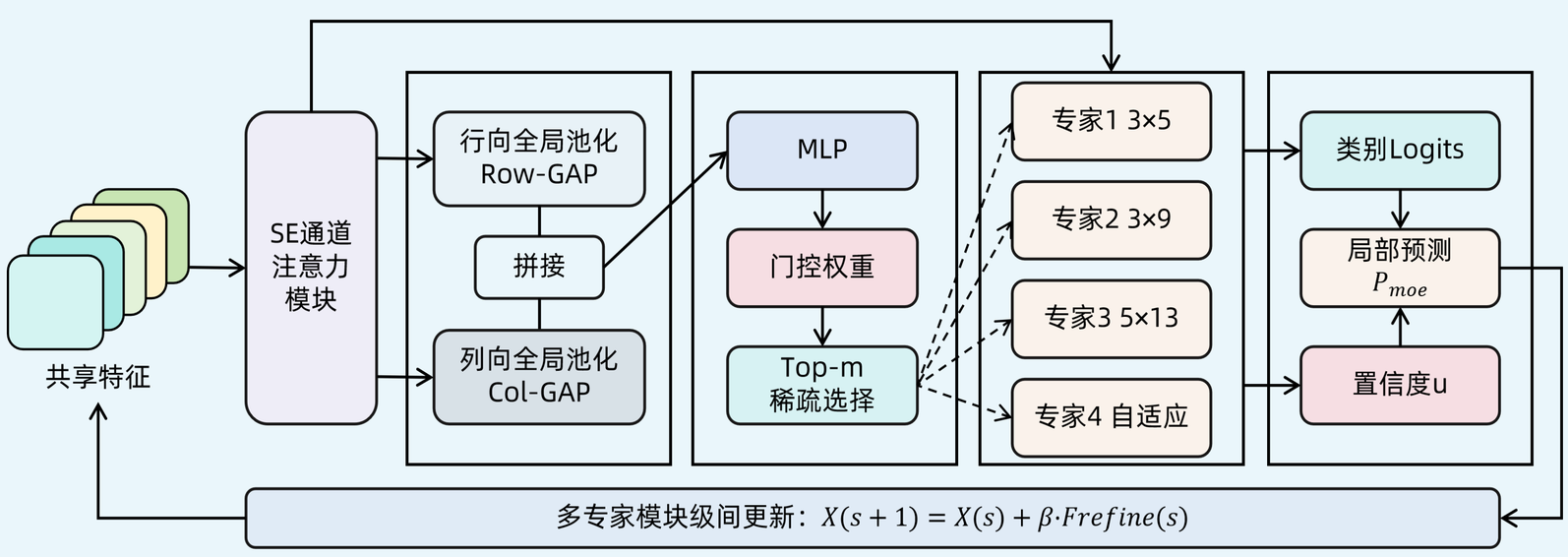
提出一种**多尺度共享编码与全局 / 局部双分支融合结构**。共享编码用并行非对称卷积核扩展感受野：小尺度分支捕捉相邻单元突变，大尺度分支描述跨区域光顺与分布，拼接后经通道注意力（SE）与空间注意力抑制无关背景。局部专家输出与全局分类头输出按可学习系数 λ 联合：

$$P_{\text{final}} = \lambda P_{\text{cls}} + (1-\lambda) P_{\text{moe}}$$



设计**动态专家网络机制**。先将网格几何量组织为规则特征张量，经多尺度共享编码后，沿流向渐变等各向异性线索，由行列方向分离的稀疏门控动态激活专长专家。局部专家对单元突变敏感，并行的全局分支则补充对全域趋势的观察，二者以可学习权重融合。

核心模块设计



设计了一种**几何感知稀疏路由机制**。门控网络不把二维特征直接压成标量，而是沿行、列方向分别做全局平均池化，得到两组一维描述向量，拼接后由 MLP 计算专家权重，并经 Softmax 后只保留 Top-m 个专家：

$$g_{raw} = MLP[Row-GAP(X_{shared})] \| Col-GAP(X_{shared})$$

训练采用**两阶段策略**：先整体优化共享编码、专家、门控与融合头；收敛后冻结专家卷积参数，只微调前端深化层与门控网络，以缓解路由震荡、专家负载失衡与深层过平滑。

致谢

通信作者：

李海生，男，教授，博士。主要研究方向为计算机图形学、网格生成、数字几何处理等。

E-mail：lihsh@th.btbu.edu.cn

论文作者：2307010124@st.btbu.edu.cn

数据来源：https://github.com/chenxinhai1234/NACA-Market