

在大模型与优化之间架桥：LLM 驱动的海上导管架多目标优化实践

李文浩 | 海洋结构智能设计团队

2025 年 11 月 11 日

摘要

导语：当海上平台一步步向深远海挺进，导管架结构的设计已不再是“加厚一点钢材”那么简单。我们提出的 OJOLLM（Offshore Jacket Optimization with LLM-driven Meta-operators）框架，将大型语言模型变成会“思考”的遗传算子，让优化过程真正懂工程语义。

00 深水导管架产业背景：海基系列的启示

南海油气开发已经全面迈向 200–350 m 的水深区，95% 以上的海上油气仍由固定导管架平台贡献，深水化趋势让装备需求呈现阶跃式增长（付殿福等，2025¹）。以“海基一号”“陆丰 12-3”“海基二号”为代表的海基系列平台，水深覆盖 241–338 m，导管架高度达到 265–339 m，总重 2.0–3.6 万吨，主腿钢材强度从 355 MPa 升至 420 MPa，桩腿数量增至 24 根。文献还强调，海洋环境、岩土工程、结构设计、建造安装、结构监测与数字孪生需要被放在同一个闭环中，超长桩的端阻影响范围 $0.12D \sim 0.83D$ 、X 撑跨距 120 m、首阶疲劳自振周期 20 s 以上等要素都要求优化算法懂得工程语境。我们由此洞察出机会：如果遗传算子本身具备语义理解，就能主动吸收这些跨学科知识，而不是在数值空间里盲目试探。

01 需求爆发：混合变量让传统优化步履维艰

混合变量设计是传统多目标进化算法的痛点。导管架既要在离散截面库中挑选合理的直径与壁厚，又要持续修剪连续节点坐标以确保几何协同；危险工况下的轴力与弯矩约束高度耦合，随机扰动往往只是在噪声里打转。更糟糕的是，设计—仿真—再设计的长链路让团队把大量算力花在“验证错误方案”上，工程师不得不反复猜测哪里需要加厚、哪个角度应该微调，整个优化过程缺乏可解释性。

¹付殿福等. 中国深水导管架平台工程技术发展现状与展望. 中国海上油气, 2025.

02 我们的思路：让 LLM 成为统一的“语义遗传算子”

OJOLLM 的核心是把大模型嵌入遗传算法的心脏位置。我们直接将 SACS 输入块喂给模型，保留每根构件的拓扑角色和载荷语境，让它明白“这是一根主腿”“那是井口区井架”。在这一语义表示之上，模型结合仿真返回的性能数据，自主判断应优先调整截面参数还是几何坐标，并输出满足构造规则的新个体。为了让模型越用越聪明，我们设计了“经验回路”：周期性抽取 Pareto 前沿与劣解，要求 LLM 总结成功策略与踩坑警示，再把这些洞察前置到后续提示词中，实现一次次在线知识蒸馏。有限元求解会输出每根杆件的 UC（利用系数）分布，如图 1 所示，我们据此推导轴力、弯矩、屈曲等多重安全性指标，并把这些带物理意义的反馈信号回灌给 LLM，使其修改更有理有据。

03 实验案例：某 4 腿导管架多目标优化

我们以一座典型的 4 腿导管架为例，目标是在满足关键构件轴力与弯矩利用系数约束的前提下，把结构总重压到最低。对照对象包括传统 GA、随机搜索（RS）、MOEA/D 以及不含经验回路的 LLM-GA 变体。图 2 展示了自主设计建造的亚洲第一座深水导管架“海基二号”装船瞬间，它提醒我们真实工程中存在的尺度、载荷与装船窗口约束，也让模型生成的方案必须兼顾制造与安装可行性。OJOLLM 的表现主要体现在三个方面：超体积指标提升 **XX%**（待替换为真实数据），收敛代数缩短 **YY%** 并减少 **ZZ%** 的仿真评估次数，最终方案的总重下降约 **AA 吨**，腿部弯矩裕度提升 **BB%**。这些数值背后意味着，大模型生成的候选更接近工程师手绘的方案草图，仿真资源得以集中在真正有潜力的结构上。

04 为什么有效？

在 OJOLLM 中，LLM 拥有“路径—构件”上下文，可以同时操控离散与连续变量，避免了传统算法那种“先随机碰撞再筛选”的低效流程。经验回路相当于不断给模型补课，它会逐渐记住“哪些腿值得加厚”“哪些角度调整后更稳”，因此新一代候选天然符合工程语义，仿真调用次数也显著下降。

05 对行业的启发

这套方法让工程知识显式化：设计规范、经验准则乃至失败案例都可以写进提示词，而不再被埋在调参经验里。语义遗传算子具备明显的迁移潜力，可平移 to 海上风机塔架、深水桩腿等混合变量结构；工程师也能通过修改提示词快速和算法共创，摆脱“黑箱式遗传操作”，真正形成可解释的人机协同。

06 下一步

我们计划引入有限元云图、结构监测时程等多模态提示，让模型读懂更丰富的失效特征；探索与强化学习结合，使经验回路具备策略优化能力；同时搭建可复现的开源基准，推动“懂工程”的大模型优化范式在行业落地。

结语

当大模型从“答题者”变成“遗传算子”，我们终于看到了语义与数值优化融合的雏形。OJOLLM 只是一个起点，它让导管架设计告别盲目试错，也为复杂工程系统打开了通向智能优化的新航道。

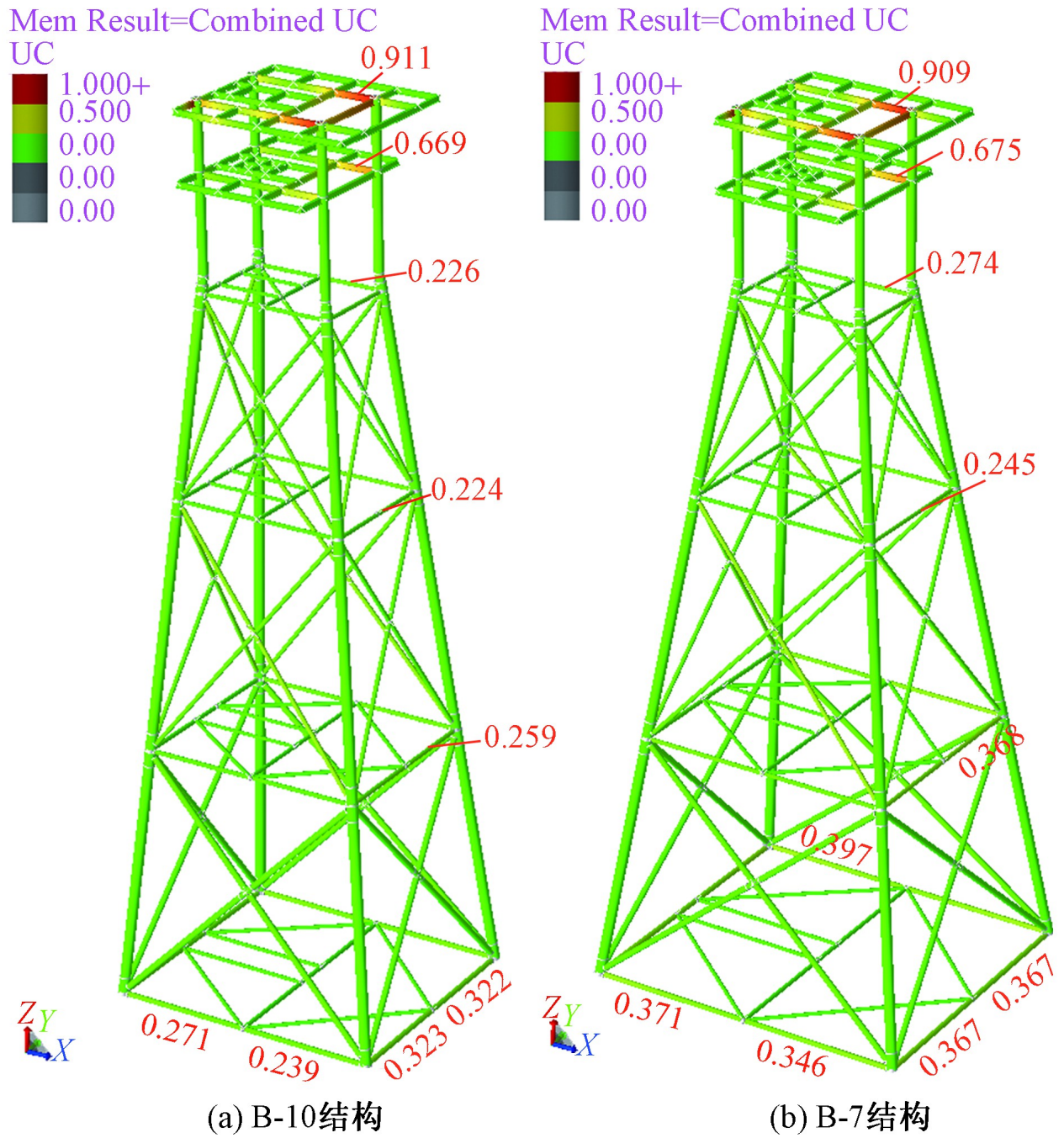


图 1: 有限元 UC 值计算示例: 基于杆件利用系数 (UC) 分布推导轴力、弯矩与屈曲安全性, 为 LLM 提供可解释的反馈信号



图 2: 亚洲第一深水导管架“海基二号”装船现场，体现真实项目中的尺度与装船窗口约束

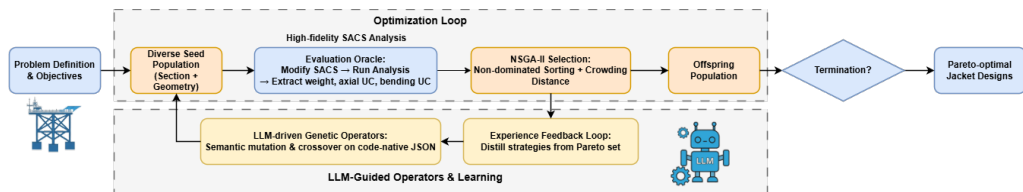


图 3: OJOLLM 生成的代表性导管架拓扑（请替换为实际插图）