



CAD/CAE 一体化：从理论、算法到工程实践

分析适用参数化 · 等几何分析 · 高效鲁棒工程仿真分析

CSIAM GDC 2026 · 新锐人才沙龙暨校企行业对话专场 · 呼和浩特 · 2026年7月29日

纪 野

代尔夫特理工大学 (TU Delft) 应用数学研究所 · 数值分析组
博士后研究员



研究兴趣

以数学与计算为桥梁，打通 **CAD 几何设计与 CAE 数值仿真**：聚焦**分析适用样条参数化、高阶高质量网格生成与高效鲁棒数值仿真求解器（预条件 Anderson 加速非线性求解器、半解析等几何分析热求解器、等几何格子玻尔兹曼方法等）**，并落地于螺杆机械、金属增材制造等复杂工程系统。

现职与背景

代尔夫特理工大学

- 应用数学系数值分析组 · **博士后**
- 合作导师：**Prof. Matthias Möller**
- 研究：**CAGD · 等几何分析 · 高效数值仿真算法和求解器**

2013—2017

学士 · 大连理工

2017—2019

硕士 · 大连理工

2019—2023

博士 · 大连理工

研究与工具

参数化 · 样条网格

- **分析适用参数化、样条网格生成与高效数值计算**
- 面向**螺杆机械、金属增材制造**等复杂工程问题
- **G+Smo、SplineMesh / Scorg™** 核心开发者

2021—2023

访学 · TU Delft

成果与荣誉

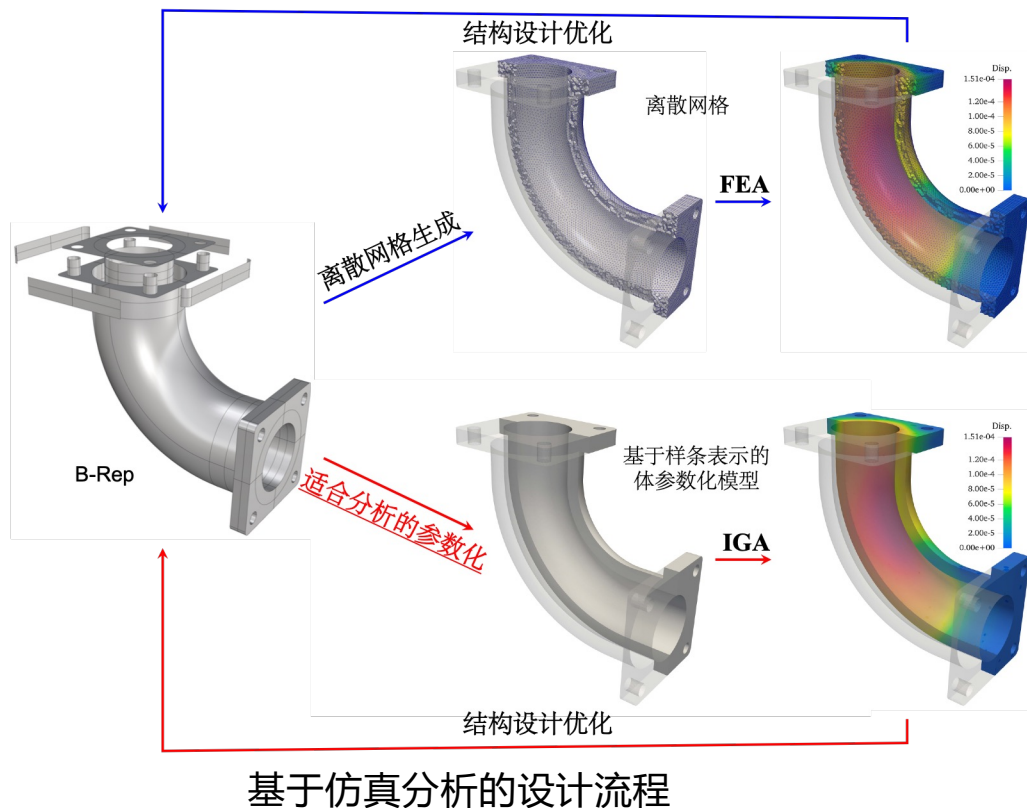
20+ 论文 · 30+ 报告

- CMAME · CAD · CAGD 等期刊 **20+ 篇**
- **四项国际会议最佳论文奖**
- SIAM Hackathon 2023 **冠军**
- 期刊**审稿人** · AMS **MR 评论员**

2024—至今

博士后 · TU Delft

CSIAM GDC 2026^{18th}



➤ 传统CAD-CAE流程：三段割裂

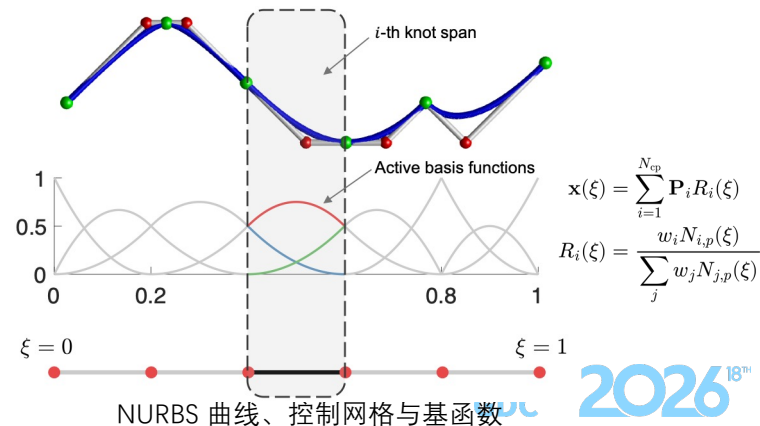
- CAD → 网格生成 → 有限元分析, 几何被离散近似
- 前处理与几何修复往往耗掉大部分仿真工时(70%以上)

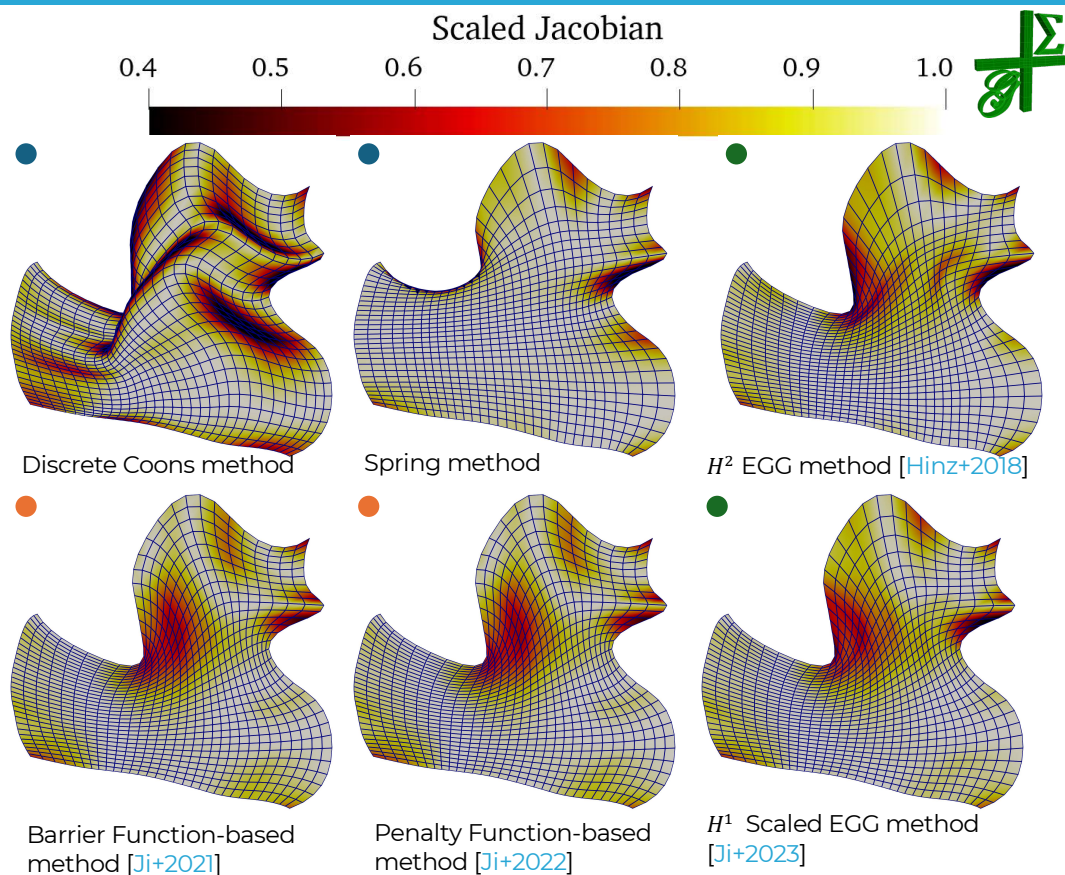
➤ 等几何分析 IGA (Hughes 等, 2005)

- CAD → 直接分析, 几何精确、无数据转换
- 设计与分析共用同一个模型
- $h/p/k$ 统一细化, 高阶连续, 精度更高

➤ 我的切入点

- 让 CAD 模型自动变成可直接计算的参数化模型





- 博士学位论文《面向等几何分析的区域参数化方法研究》
- G+Smo: 开源跨平台的 C++ 等几何分析库, 本人为核心开发者之一
 - **代数方法:** Coons 片、Spring 片
 - **优化方法:** 障碍函数法¹、罚函数法²
 - **PDE 方法:** 椭圆网格生成³ 及其改进⁴
- G+Smo developer days



意大利佛罗伦萨, 2025



捷克比尔森, 2026

1. Ji, Y. et al. (2021). JCAM, 396, 113615.
2. Ji, Y. et al. (2022). CAGD, 94, 102081.
3. Hinz, J. et al. (2018). CAGD, 65, 48-75.
4. Ji, Y. et al. (2023). CAGD, 102, 102191.

Check it out ! github.com/gismo-examples/as_parameterization

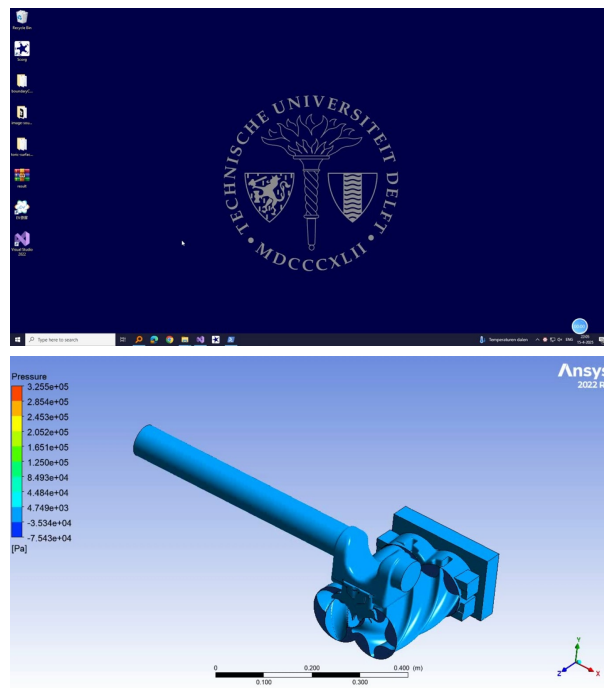
CSIAM GDC 2026^{18th}

工程落地 | 复杂零件的自动结构化网格 (SplineMesh)

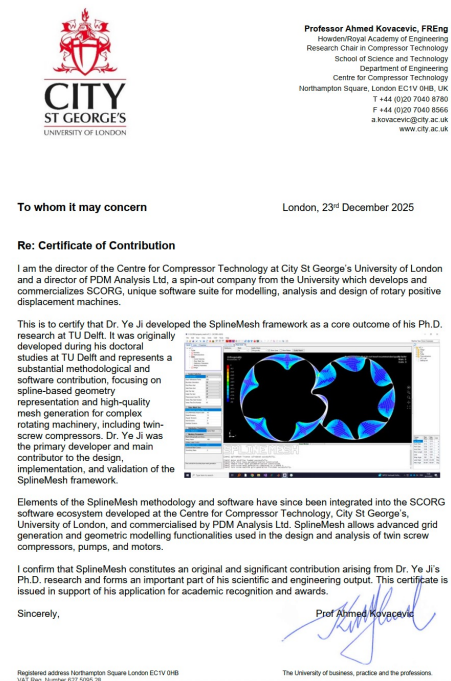
- 博士论文中提出的高质量区域参数化方法，已被**集成到商业工程软件 SCORGM™** 中，用于旋转机械（如螺杆压缩机）的几何建模与数值分析，支撑复杂工程系统的仿真与设计流程。
- 相关研究成果获得International Conference on Screw Machines 2024（德国·多特蒙德）**最佳论文奖**。



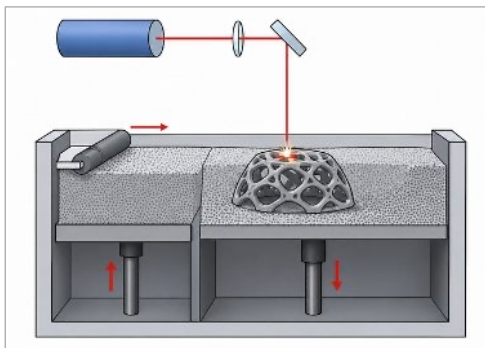
伦敦国际压缩机会议
2025: 会前短课程与报告



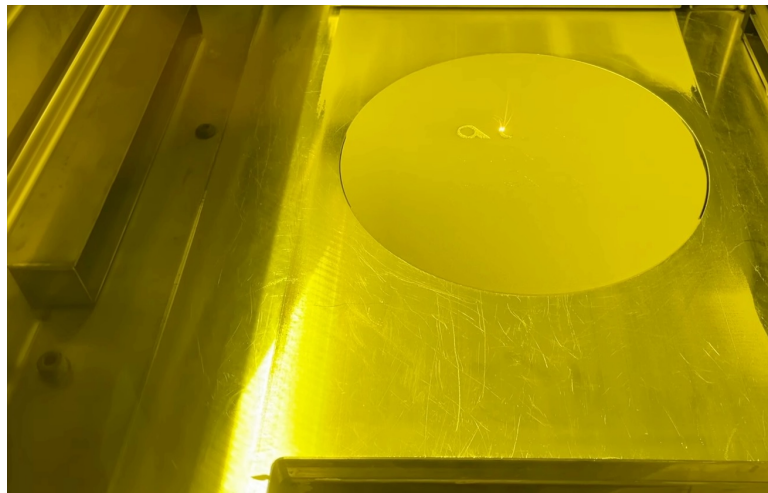
SplineMesh 自动结构化网格 → SCORGM™ 螺杆仿真



SCORGM™ 开发方出具的贡献证明信



激光粉末床熔融 (LPBF) 工艺原理



LPBF 设备加工过程



LPBF 打印金属零件热仿真

熔池多物理场耦合

激光—粉末—熔池间传热、流动与相变强耦合，跨尺度、强非线性

残余应力与变形

逐层热循环导致应力累积、翘曲与开裂，需零件级预测能力

以仿真替代试错

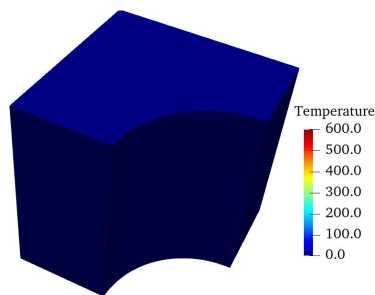
工艺参数空间大、实验成本高，数值仿真加速工艺优化与认证

CSIAM GDC 2026^{18th}

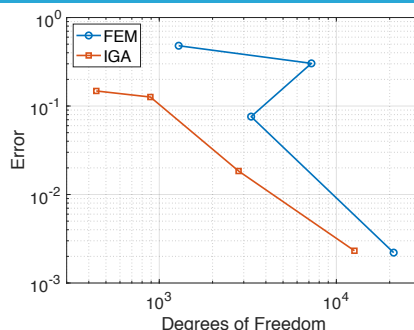
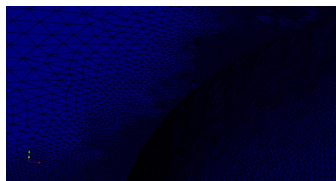
$$T(x, t) = \tilde{T}(x, t) + \hat{T}(x, t)$$

已知 未知

等几何分析 G+Smo



有限元分析 Abaqus



80×

对比 Abaqus C3D4

258×

对比 Abaqus C3D20

同等 5% 误差下的单步 CPU 时间

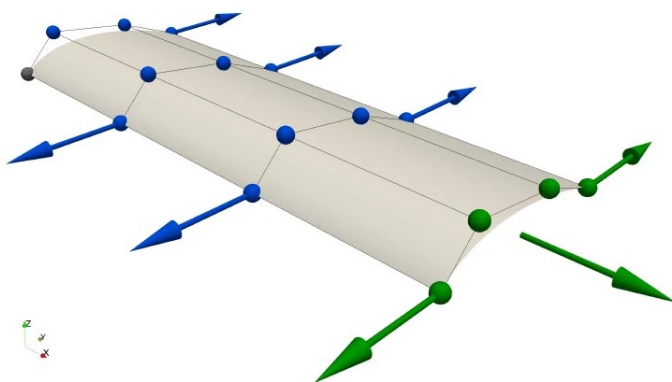
薄壁基准算例 (均匀网格, 相对误差 ≤ 5%)

方法	自由度	单步 CPU
IGA (G+Smo, 二次)	2 639	0.132 s
Abaqus C3D4	11 536	10.6 s
Abaqus C3D20	45 261	34.0 s

1. Yang, Y., Ji, Y., Möller, M., & Ayas, C. (2025). Computational efficient process simulation of geometrically complex parts in metal additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 248, 127059.
2. Yang, Y., Ji, Y., Möller, M., & Ayas, C. (2026). Efficient thermal simulation in metal additive manufacturing via semi-analytical isogeometric analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 457, 118992.

CSIAM GDC 2026^{18th}

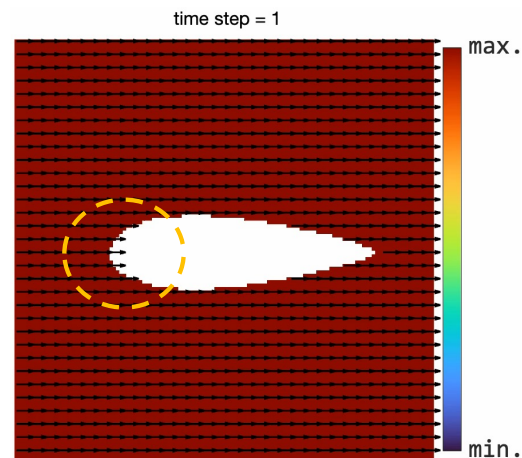
- 格子玻尔兹曼方法 (LBM) 无需求解大规模线性方程组、速度快、易并行、通用性强；但笛卡尔网格无法精确表达曲面边界，几何被“阶梯化”，尤其是边界层精度直接受限。
- 为此，提出一种**等几何格子玻尔兹曼方法(IGA-LBM)**新方法。



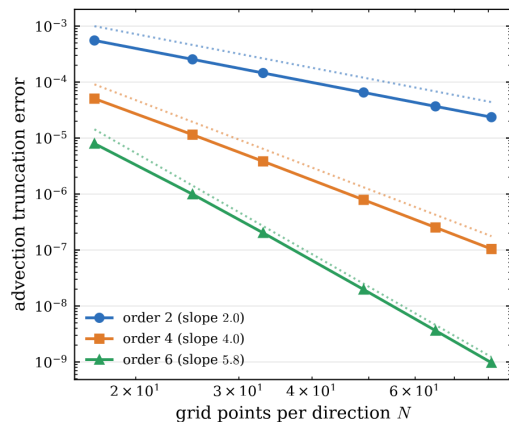
CAD 精确几何表示

M. Ghommem et al. (2012). DOI: 10.4203/ccp.100.133

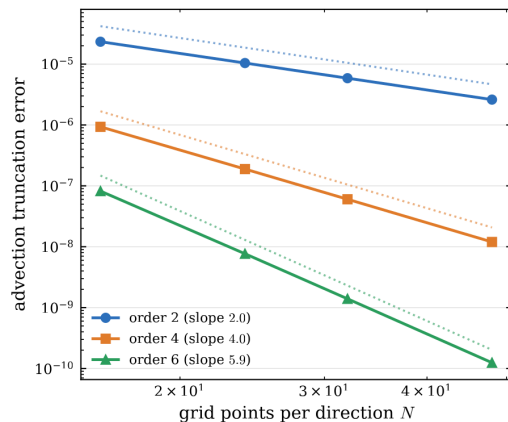
用 LBM 离散



笛卡尔网格 LBM: 阶梯化边界

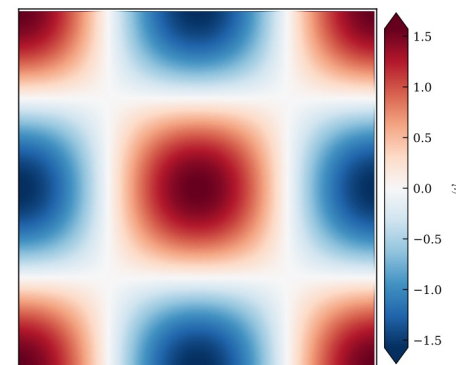


二维 Taylor-Green 涡 (D2Q9)

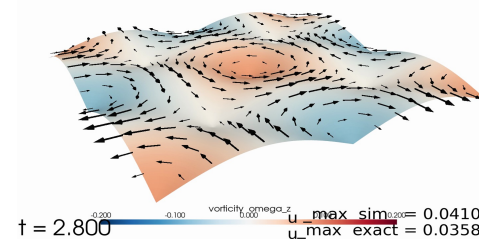


三维 ABC / Beltrami 流 (D3Q19)

- 用有精确解的基准算例检验：二维 Taylor-Green 涡与三维 ABC/Beltrami 流
- **实测收敛阶与设计阶完全吻合**，2 阶、4 阶、6 阶逐一复现
- **曲边壁面附近同样保持高阶**，几何精度不再是精度瓶颈

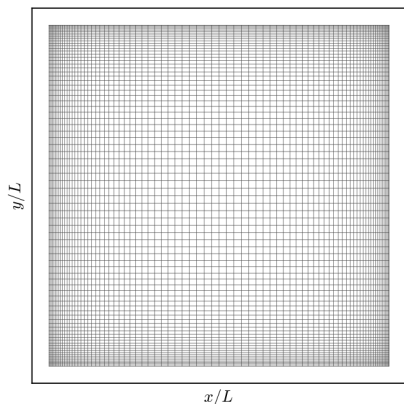


IGA-LBM 2D Taylor-Green Vortex
Nx = 64, Ny = 64 tau = 0.550 nu = 0.1833

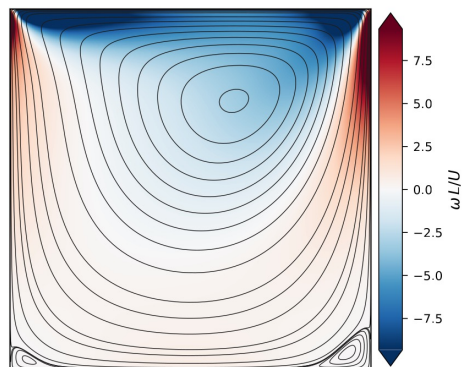


二维 Taylor-Green 涡

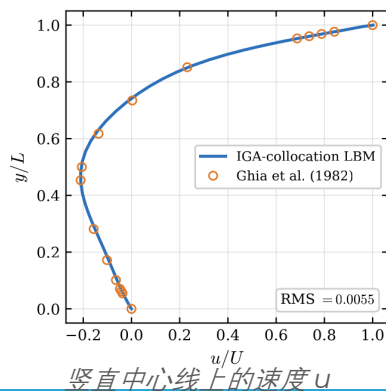
基准对标：方腔流 $Re = 100$ ，粗网格即触精度上限



贴体加密网格



涡量与流线



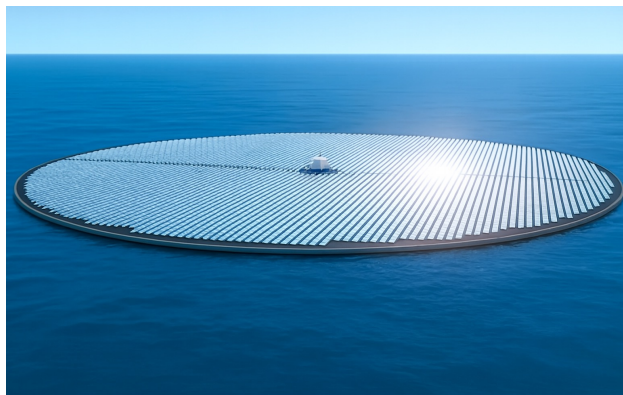
竖直中心线上的速度 u

设置：48×48 拉伸网格 · $Re = 100$ · 方腔
对标 Ghia 等(1982)：中心线速度吻合，
RMS 5.5×10^{-3} (u)、 4.3×10^{-3} (v)

Grid K×K	24	32	48	64
RMS vs Ghia	1.92×10^{-2}	1.11×10^{-2}	5.50×10^{-3}	5.50×10^{-3}

- 网格加密后误差下降，到 48^2 即趋于稳定
- 该稳定是 $O(Ma^2)$ 可压缩性误差下限，属模型限制而非网格问题
- 意味着**高阶 IGA-LBM** 在很粗的网格上就已达到模型精度极限

工程场景（三）：海上光伏与超柔性浮式结构 (VFFS)



北海海上漂浮式光伏阵列

土地稀缺，向海要地

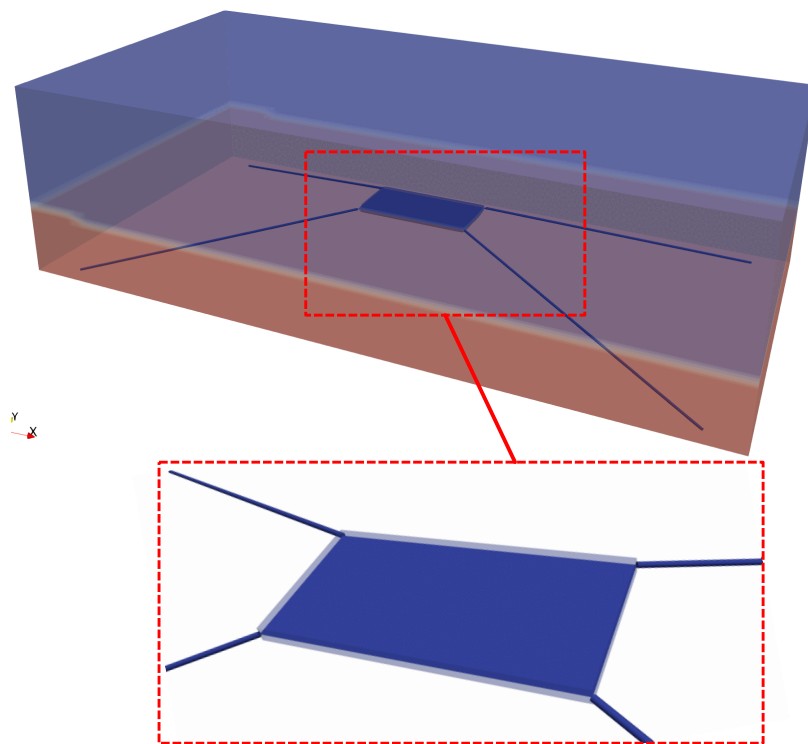
海上光伏不占用土地，可与海上风电共享场址与电缆，北海约 5% 海域即可满足荷兰约一半能源需求

规模化前景广阔

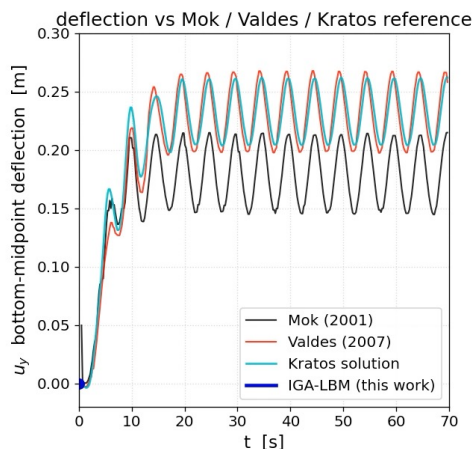
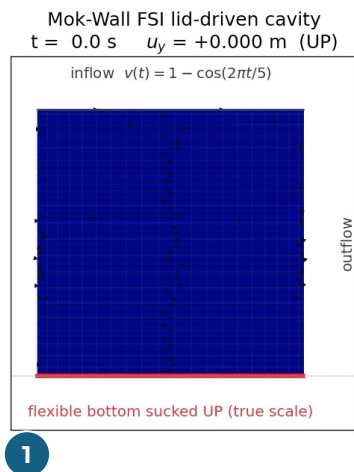
预测荷兰 2050 年海上光伏达 45 GWp，北海多个示范项目已投运并经受 10 米级风暴海况考验

核心挑战：水弹性响应

超柔性浮体随波浪发生大变形，高效的流固耦合数值仿真是设计与安全评估的关键

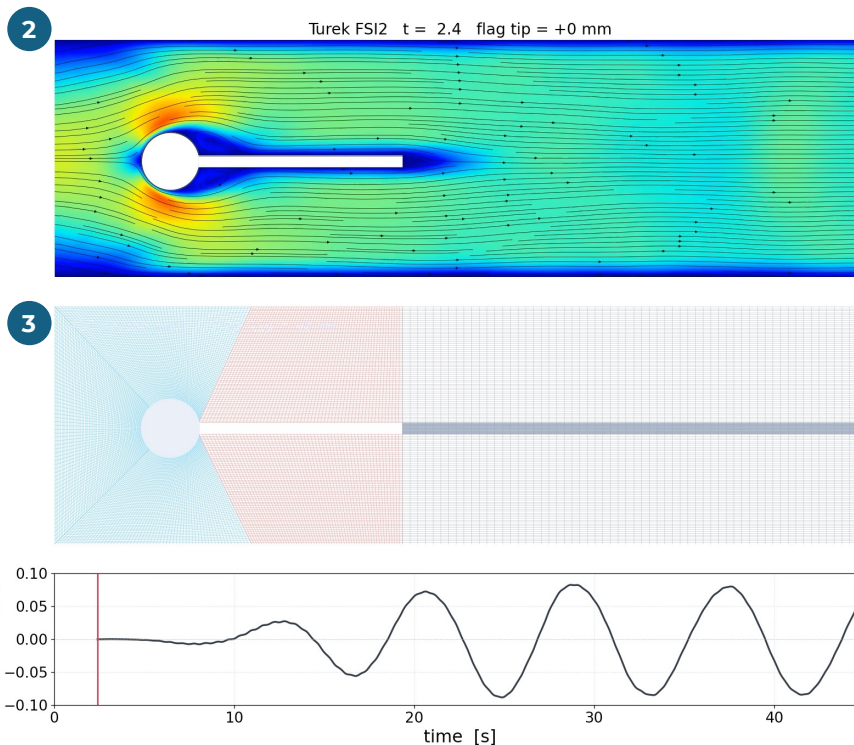


系泊超柔性浮体的数值波浪水池仿真



动边界依旧在贴体网格上求解，求解器不变。

- ① Mok 柔性壁面：通道流中的板件变形
- ② Turek-Hron FSI2：圆柱后方弹性薄片的持续振荡
- ③ 贴体动网格：网格随结构变形，全程无需重新划分



01 高保真仿真提速

面向增材制造、压缩机等高端装备，
提供仿真加速方案，缩短研发周期、降低试制成本。

02 CAD-CAE 一体化

打通设计模型到可分析模型的链路，
实现参数化与结构化网格的自动化生成。

03 联合课题与人才培养

联合研究项目、开源工具定制开发，
以及研究生联合培养与技术咨询。

纪野 Ye Ji | y.ji-1@tudelft.nl | jiyess.github.io | GitHub: jiyess

非常感谢您的时间和关注！

CSIAM GDC 2026^{18th}