

# 氚燃料循环模拟程序开发

## 年终总结

-- 汇报人：桂龙

# 项目背景与挑战

## 现状驱动：项目背景与趋势

 氚燃料循环是实现聚变堆 氚自持的关键技术，涵盖氚的提取、纯化、储存及再利用。  
**战略定位**

 涉及内循环、外循环及安全包容三大子系统。  
**系统构成**

 建模方法正从传统的“平均滞留时间法”向“多物理场耦合模型”跨越。  
**技术演进**

 急需专业的多尺度模拟仿真平台，为优化设计与战略决策提供支撑。  
**核心需求**



## 核心痛点：四大技术难点



### 组件精细化

需准确模拟氚在部件中的扩散、吸附等微观输运行为。



### 多尺度耦合

必须有效集成组件级精细模型与系统级模型，兼顾计算效率与精度。



### 真实工况分析

现有研究难以模拟真实聚变堆的脉冲运行工况及可用性因子影响。



### 自适应优化

复杂工况下的全局参数优化难度大，难以确保燃料循环的自持行为。



## 技术深化：三个阶段

### 阶段一：0维系统模拟分析

核心：基于 OpenModelica 的参数扫描、性能指标分析（首炉气、倍增时间等）及大模型报告生成。

核心：基于 OpenModelica 的参数数据、能分析、ApenModelica 的炉气件指标行策，产出部件与交动计析、倍增时间等）及广大模型生成。

### 阶段二：3维组件模拟分析

核心：OpenModelica-Aspen 自动化交互计算，规范组件集成接口。

### 阶段三：多组件集成模拟

核心：多尺度耦合（宏观系统+微观局部）与数字孪生可视化。



## 成果落地：四个里程碑

### 1 里程碑一： 基础仿真引擎

产出：高并发执行引擎、多物理场组件通用集成协议。

### 2 里程碑二： 从数据分析迈向数据智能

产出：敏感性分析(SA)与不确定量化(UQ)、HDF5 数据中台、代理模型加速寻优。

### 3 里程碑三： 沉浸式可视化与交互进化

产出：OMEedit原生级调用、三维动态可视化平台（实时映射浓度场与库存）。

### 4 里程碑四： 迈向数字孪生与自主决策

产出：虚实对冲分析、自适应调控、LLM 智能决策大脑。

状态：已达成 ✓

状态：初步实现 ✓

状态：开发攻坚阶段 ⚡

状态：前瞻布局阶段

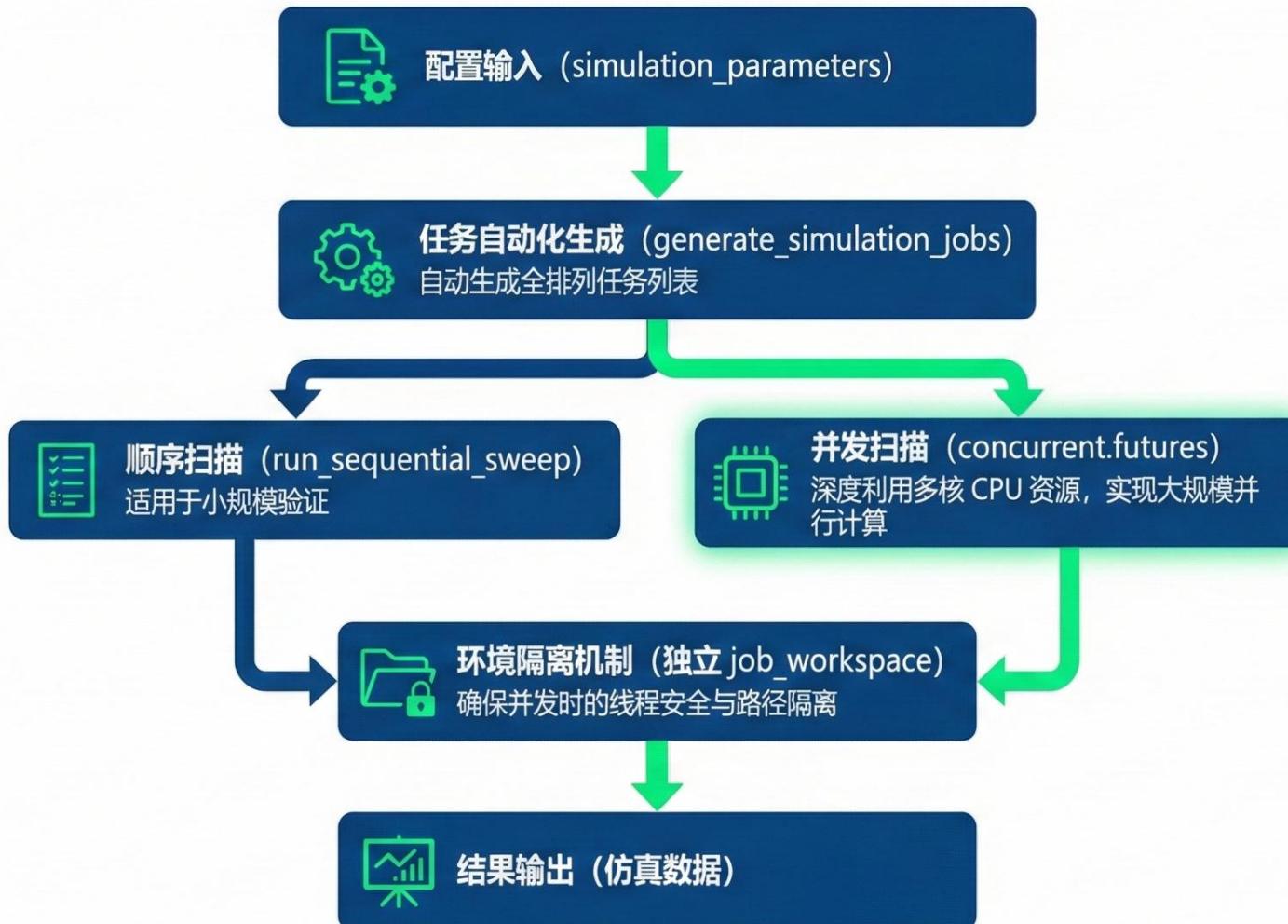
状态：已达成 ✓

状态：初步实现 ✓

状态：开发攻坚阶段 ⚡

状态：前瞻布局阶段

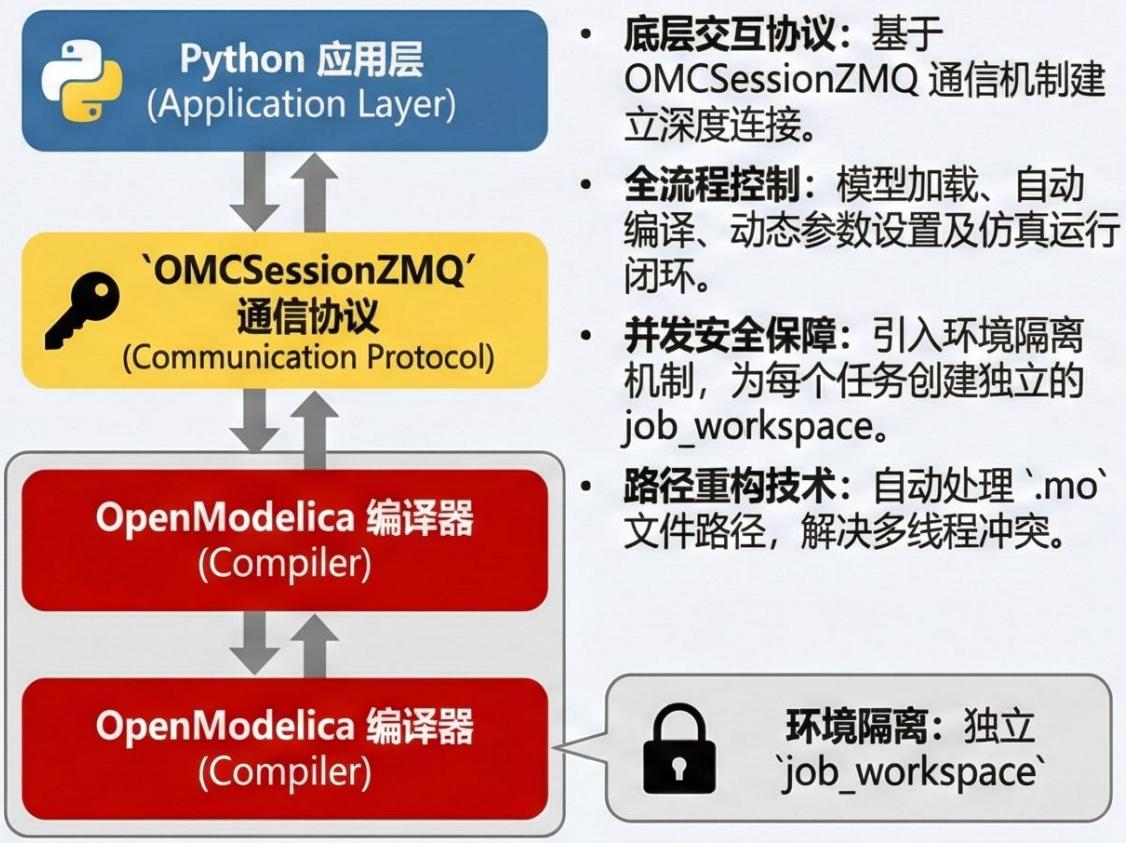
## 任务调度与执行流程 (逻辑化)



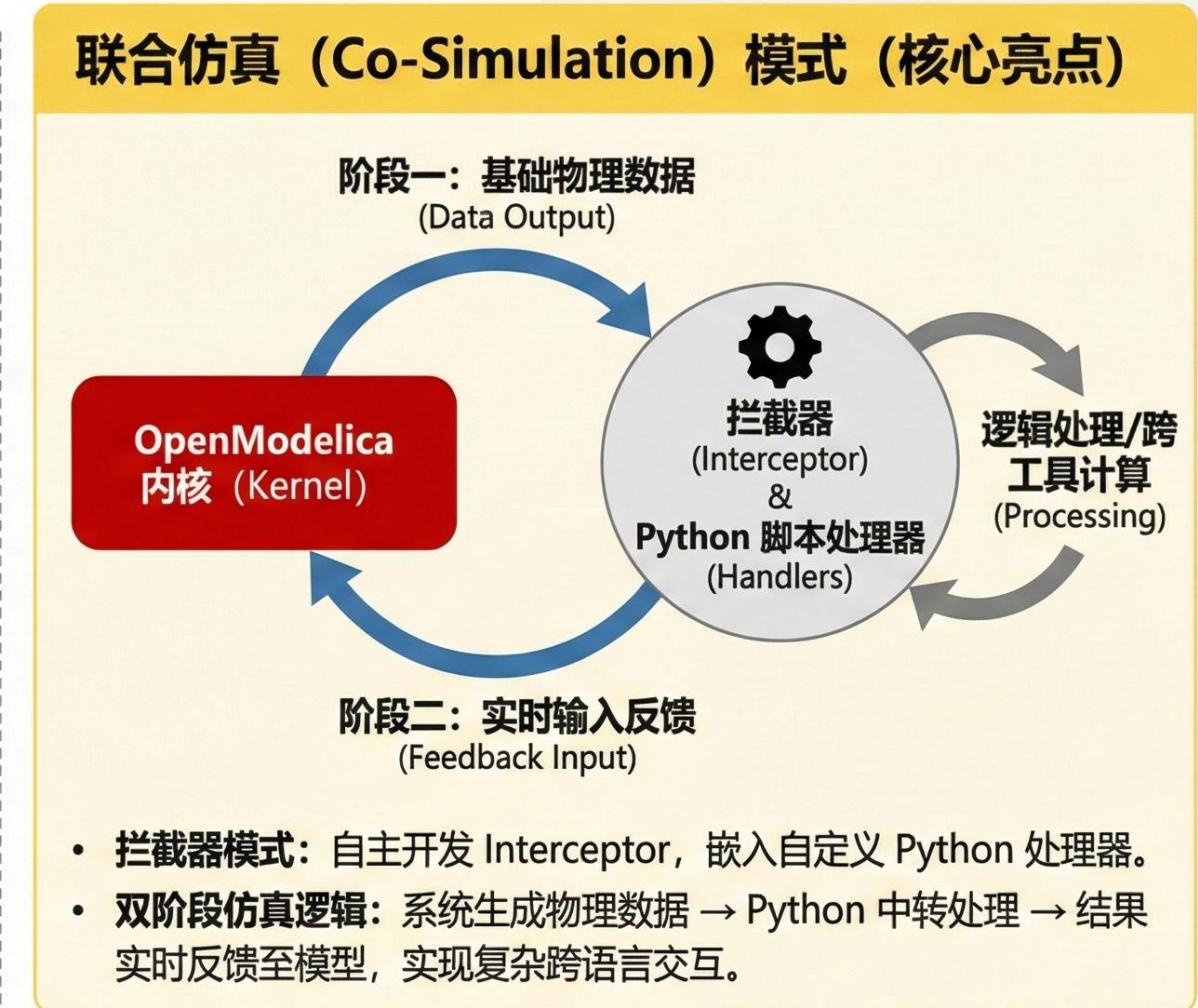
## 核心技术优势 (参数化/性能)



## 集成架构与环境隔离（底层支撑）



## 联合仿真 (Co-Simulation) 模式 (核心亮点)



该方案打破了单一仿真工具的局限，实现了“物理模型+逻辑算法”的深度耦合。

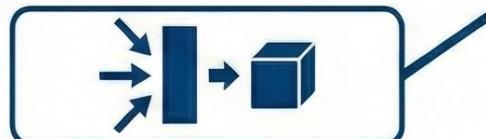
➤ 大规模仿真数据 → HDF5 存储底座 (Blosc 压缩) → 自动化后处理 → 专业分析报告/图表

## HDF5 数据底座 (解决“存”与“控”)



### 流式写入机制

采用 pd.HDFStore 的 append 模式，实时流式写入结果，有效规避大规模仿真任务中的内存储溢出 (OOM) 风险。



### 极致压缩方案

引入 Blosc 压缩算法 (级别 9)，在保证读写速度的同时，显著降低磁盘空间占用。

(小字注：磁盘上占用降低 80%+，支持 TB 级数据检索)



**全流程控制**: 模型加载、自动编译、动态参数设置及仿真运行



### “自包含”结构化管理

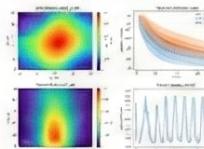
统一存储仿真结果、任务配置 (Config) 与运行日志 (Log)。确保实验数据的全生命周期可回溯与复用。

## 全自动分析流水线 (解决“析”与“见”)



### 关键指标自动提取

内置 extract\_metrics 模块，自动计算 TBR、氯质量转折点、启动库存等核心物理指标。



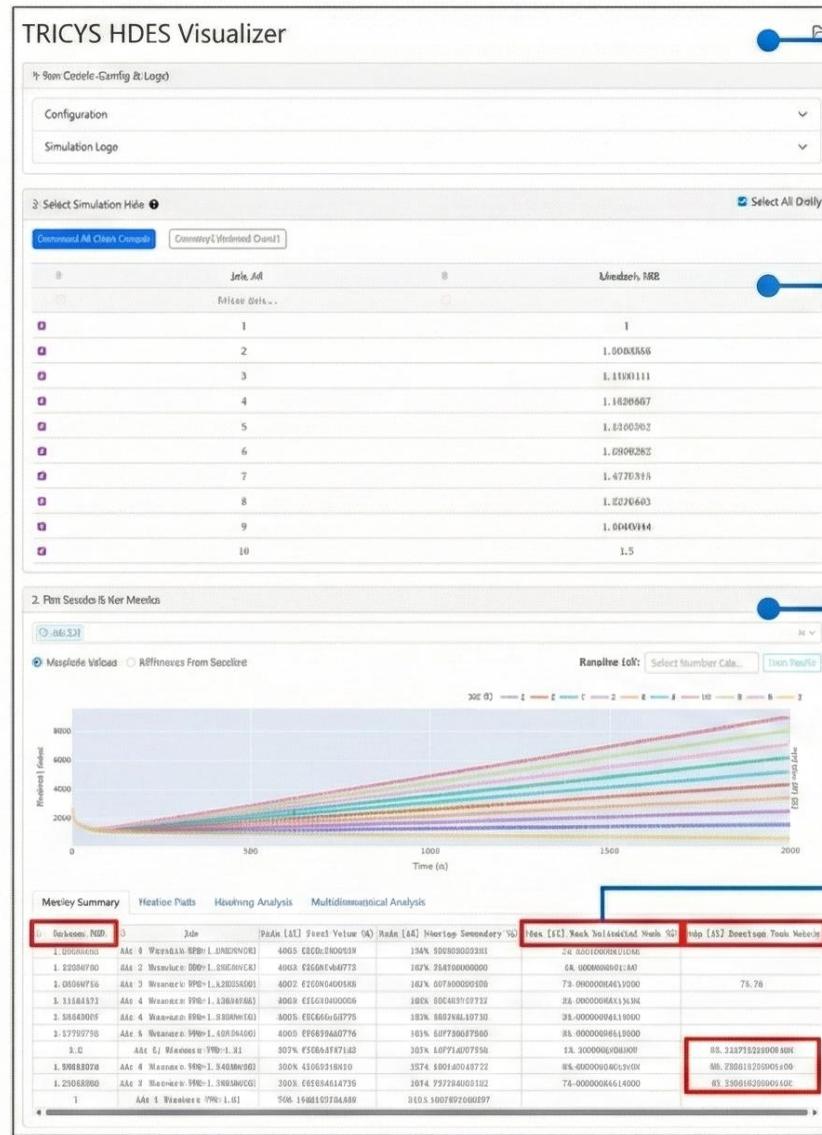
### 多维自动化绘图

自动生成策略性分析 (SA) 云图与时间序列量化图，直观呈现多物理参数耦合下的系物调理。



### 优化结果汇总

自动合并带规扫描与二分法优化结果，生成汇总报告 (sensitivity\_analysis\_summary.csv)。为科研决策提供结转化的燃料循研知识率。



**A 全息数据回溯。**集成实验配置 (JSON) 与运行日志 (Logs) 的一键调阅。

**B 精细化任务管理。**支持成千上万任务的逻辑筛选、多选与批量导出。

**C 动态时变分析。**支持多任务对比及 Baseline Difference 模式，直观展示参数偏差。

**D 关键指标自动提取。**实时计算并呈现 TBR、自持时间、倍增时间等核心物理指标。

## 核心功能总结



### 数据底座解耦：

- 基于 Dash 框架直接读取 HDF5 结果文件，突破传统仿真工具“分析壁垒高、回溯难”的瓶颈。



### 高维空间探索：

- **多维视图：**内置指标汇总 (Metrics Summary)、等高线云图 (Heatmap) 及平行坐标图 (Parallel Coordinates)。
- **决策辅助：**在单一视图中平衡数十个参数与指标的权衡关系 (Trade-offs)。

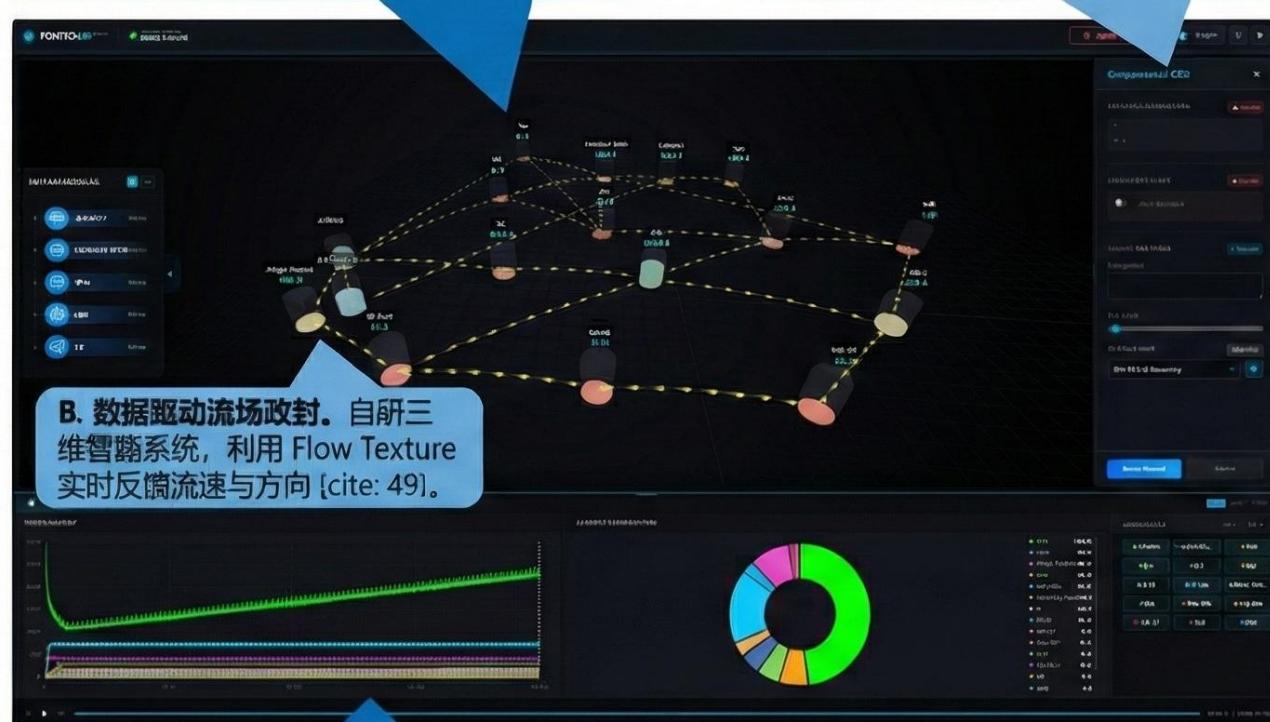


### 科研效能提升：

- **免安装架构：**采用响应式 Web 布局，无需额外客户端即可进行协同分析。
- **全链路闭环：**实现从“原始海量数据”到“结构化知识洞察”的快速转化。

A. 高保真数字孪生底座。基于 Three.js 开发，支持标准几何体与自定义 GLTF 模型动态加载。

C. 实时交互与在线调校。支持参数在线覆写、实时告警监控及组件属性深度管理。



## 核心技术亮点总结

### 高性能三维渲染引擎

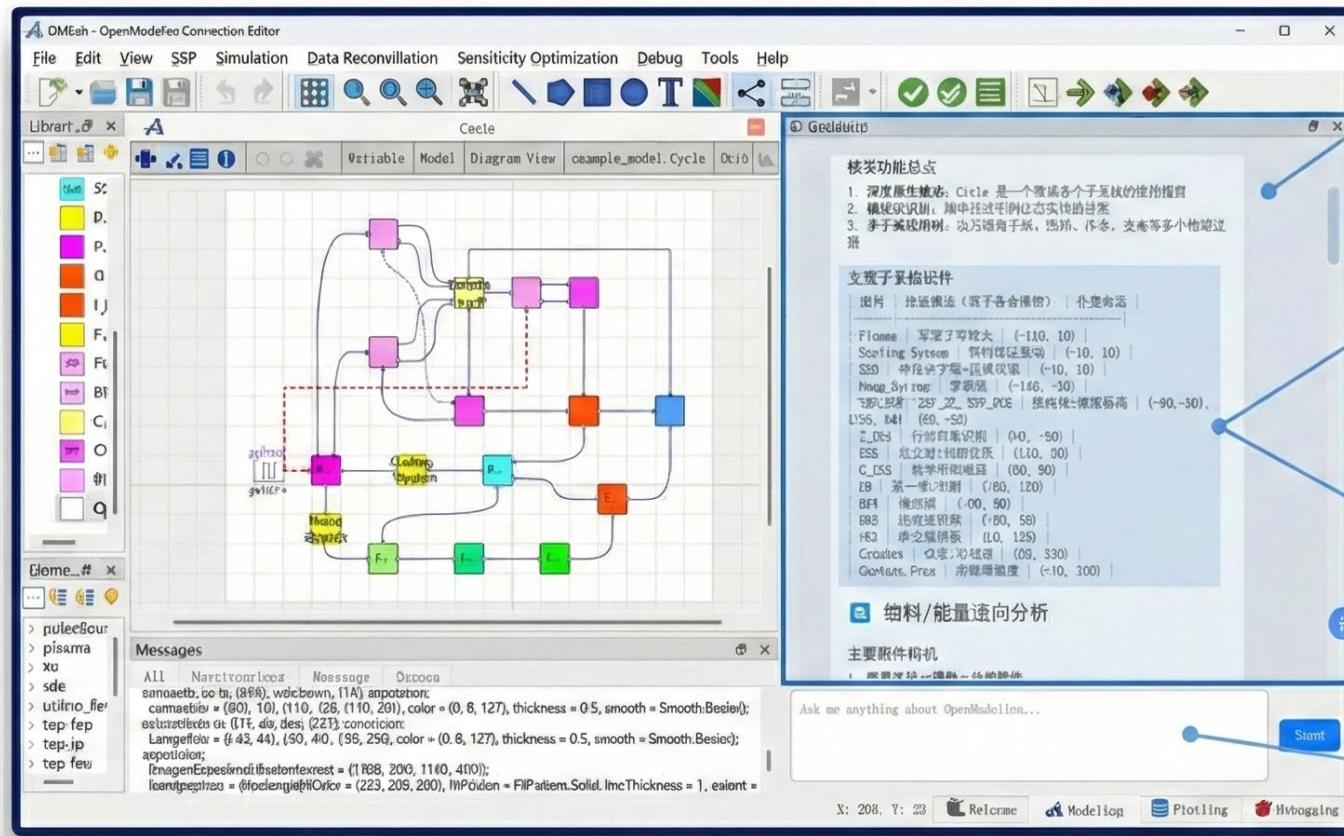
- 多源模型支持：**实现标准几何体与 GLTF 模型自适应解析，构建分层级组件管理体系，支持无限层级嵌套。
- 增强信息展示：**集成 CSS2D 渲染器，实现跟随视角的动态标签与数据悬浮窗，实时显示组件库存状态。

### 全链路仿真交互机制

- 实时反馈控制：**通过 WebSocket/HTTP 轮询实现计算进度反馈，支持模型配置（终止时间、步长）的在线调整。
- 双模视图切换：**支持“3D 数字孪生”与“2D 工艺流程图”一键无缝切换，适配不同监控需求。

### 沉浸式科研决策环境

- 响应式布局：**采用侧边栏组件管理与动态折叠面板，提升大规模复杂系统的定位与管理效率。
- 闭环管理：**实现了仿真全生命周期的可视化管理，打破传统“黑盒仿真”限制。



## 核心功能总结

### 深度原生集成 (Deep Integration)

采用独立 Dock Widget 面板设计，无缝嵌入 OMEdit 主界面。强调 AI 助手与图形建模窗口、代码编辑器并行排列，不干扰建模工作流。



### 模型结构自动识别 (Structural Intelligence)

AI 能够实时读取当前 Modelica 模型的拓扑结构。快速梳理复杂系统架构，自动生成物料/能量流向分析。

**截图关联：**突出显示 AI 自动生成的组件列表和坐标信息。



### 结构化交互与展示 (Structured Interaction)

支持 Markdown 高级渲染，包括专业表格、多级列表及 Modelica 语法高亮。

**截图关联：**指向 AI 输出的组件功能描述表，体现信息的易读性和专业性。



### 领域专家知识库 (Expert Knowledge)

专注于 Modelica 语言规范与 OpenModelica 使用指南，支持流式交互 (Streaming)。

**截图关联：**指向底部输入框 “Ask me anything about OpenModelica....” ，强调其建模导师角色。

LLM 驱动

上下文感知

一键代码插入

# 现状不足与改进方向

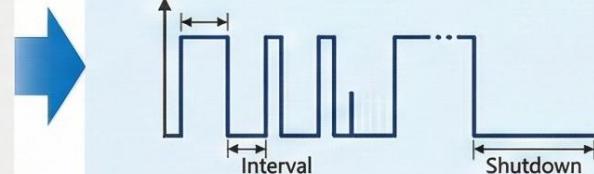
## 1. 物理模型：从“固定脉冲”迈向“全场景变工况”模拟

### 现状：固定脉冲 (Static Pulse)



现有模型多聚焦于稳态或不可变的脉冲运行工况。

### 改进：全场景变工况 (Variable Scene Conditions)



- 引入全场景变工况：引入聚变堆不同运行工况（包括不同脉冲时长、停机过程等）对氚燃料循环的影响分析。

## 2. 计算效能：引入高性能服务器，突破 TB 级数据瓶颈

### 现状：数据 I/O 瓶颈 (Data I/O Bottleneck)



在高维敏感性分析及大规模参数扫描时，计算资源调度与数据 I/O 存在瓶颈。

### 改进：并行 I/O 加速 (Parallel I/O Acceleration)



- 硬件升级：引入 HPC 服务器，作为核心计算节点。
- 架构优化：优化并行 I/O 架构，解决 TB 级仿真数据在存储、压缩与检索过程中的瓶颈，实现高效的数据吞吐。

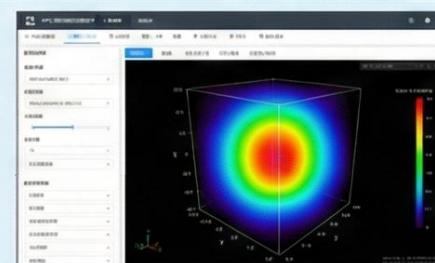
## 3. 可视化决策：从“数据呈现”迈向“交互式科研辅助”

### 现状：结果展示 (Result Display)



可视化功能尚处于结果展示阶段，缺乏交互式探索分析。

### 改进：交互式辅助 (Interactive Decision Support)



- 深度反馈：与研究人员建立迭代反馈机制，研发具有“沉浸式”及“交互式”特征的可视化模块。
- 漫游
- 点选
- 动态分布
- 空间映射：开发基于 Web 的三维空间浓度场动态分布映射，从简单的结果呈现转向

## “工具驱动”模式



以求解器为单一核心，数据零散化

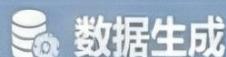
## 战略转型

## “数据驱动”软件生态



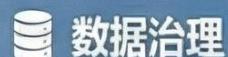
以 HDF5 统一数据底座为核心

### 遵循软件工程规范



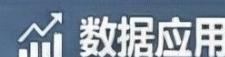
#### 数据生成

强调原始数据的标准化获取



#### 数据治理

强调数据的清洗、存储与全生命周期管理



#### 数据应用

强调面向决策和分析的高层价值

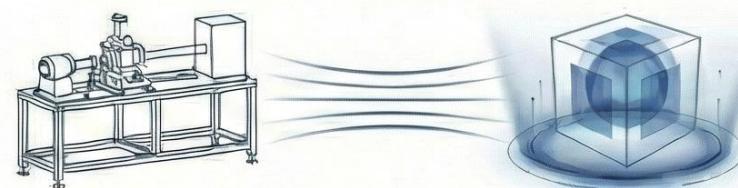
### 管理底座

## 支柱 A: 跨场集成 (组件级 系统级)



- 技术要点：打破物理场壁垒，实现动态双向耦合与联合仿真。
- 关键词：对比分析、双向反演。

## 支柱 B: 数字孪生 (实验 仿真)



- 技术要点：标准化 API 接口实现实时检测数据与模拟数据的无侵校准。
- 关键词：虚实映照、互为验证。

# 2026年度执行路线图

