

上海软X射线自由电子激光装置智慧FEL系统

汇报人：赵欢

中国科学院上海高等研究院

主要内容



- SXFEL装置介绍
- SXFEL智能化数字化改造项目介绍
- SXFEL智慧FEL系统
- 总结

SXFEL装置介绍

SXFEL装置基本信息



- 上海软X射线自由电子激光装置（SXFEL）在国家发改委、中国科学院和上海市的支持下分阶段建设，2022年建成，2023年开放运行，**是我国第一台、未来数年内唯一向用户开放运行的X射线FEL装置**
- SXFEL与SSRF形成集成布局，功能与优势互补
- 目标：支撑先进X射线科学和产业研究，为我国培养XFEL用户群体，**为我国探索先进XFEL新原理、运行模式和实验方法学提供了必要的平台**



试验
装置

用户
装置

SXFEL智能化数字化改造项目介绍

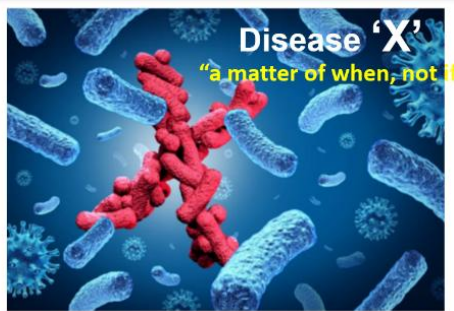
SXFEL数字化智能化改造



- ❑ 数字化智能化改造项目是国家发改委两重项目，建设的核心内容是XFEL大科学装置海量运行数据的有效获取，为装置的全面智能化运行奠定基础。
 - 提升装置的**稳定性、可靠性**以及计量控制的**精确性**
 - 实现**全信息诊断数据**和**更智能**的实验方法及解析手段

前沿科学

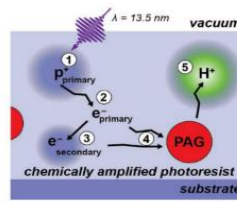
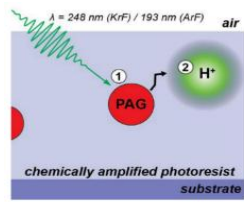
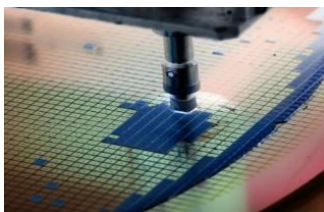
活细胞成像将为研究细胞的结构与功能研究带来前所未有的突破



- 活细胞成像需要详细的单发XFEL数据、光与活细胞的精确对准、对实验数据的智能解析

国家重大需求

上海软线的超快全相干XFEL为我国EUV光刻材料和损伤机理研究提供了独一无二的工具



- 光刻研究对光的稳定性、精确性和可靠性提出了极高的要求

2025.2

• 项目批复

2025.7

• 工程评审

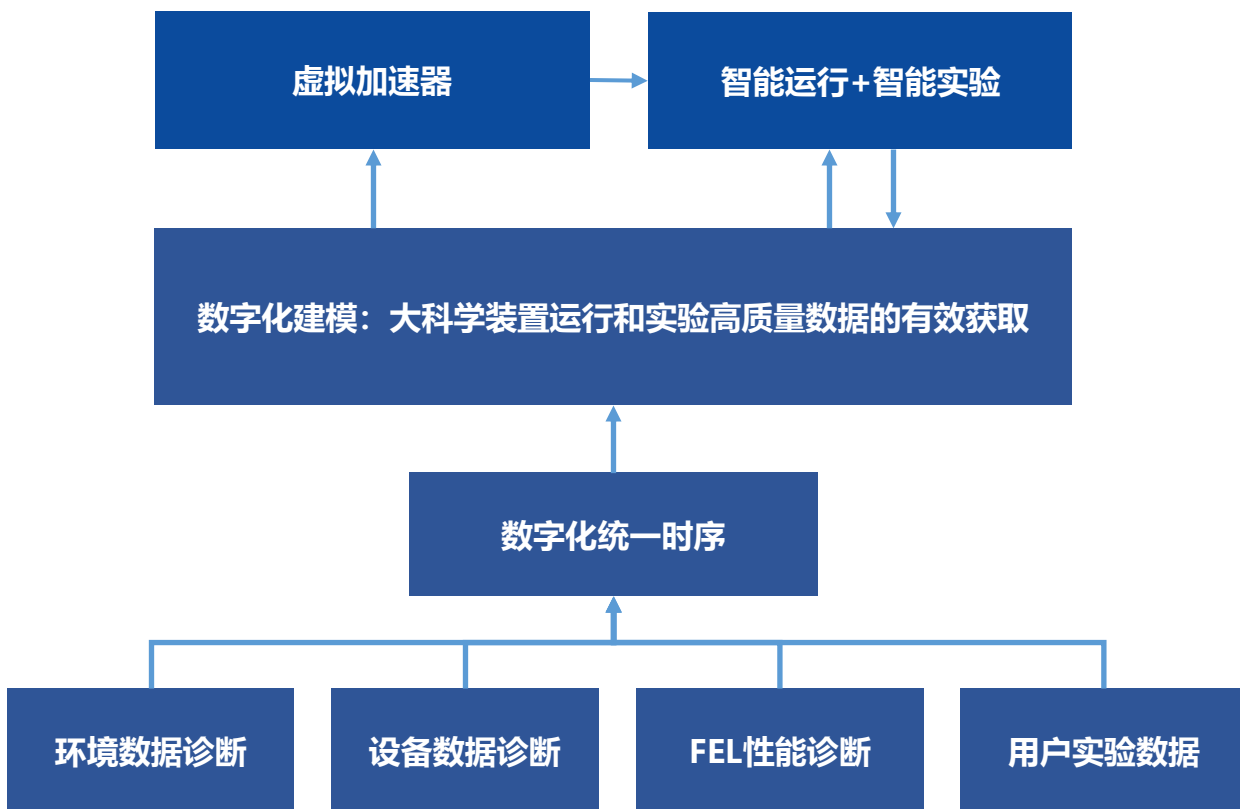
2026.5

• 中期评估

2027.2

• 项目验收

SXFEL数字化智能化改造



- EPICS——标准化运行数据
- 数字化统一时序——统一数据时间戳
- 数字化建模——装置数据可视化终端
- 虚拟加速器——预测与分析FEL性能
- 智能反馈——确保束流长期稳定性
- 故障预警——减少故障率与故障处理时间
- 智能实验——提升实验效率与成功率

传统“物理”装置



“物理+数字化+智能化”装置

智慧FEL系统

智慧FEL系统



数字模型



实现高精度1: 1映射虚拟装置模型,建成532米、4万量级元件模型库。

5个物理空间

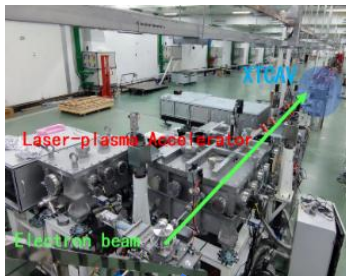
- 加速器隧道
- 波荡器大厅
- 实验站大厅
- 技术走廊
- 整体建筑

14个设备系统

- | | | |
|---------|---------|-----------|
| ➤ 电子枪 | ➤ 波荡器 | ➤ 工艺系统 |
| ➤ 机械支撑 | ➤ 真空 | ➤ 光束线与实验站 |
| ➤ 光学 | ➤ 同步与激光 | |
| ➤ 微波 | ➤ 功率源 | |
| ➤ 磁铁与电源 | ➤ 辐射防护 | |
| ➤ 束测 | ➤ 公用设施 | |

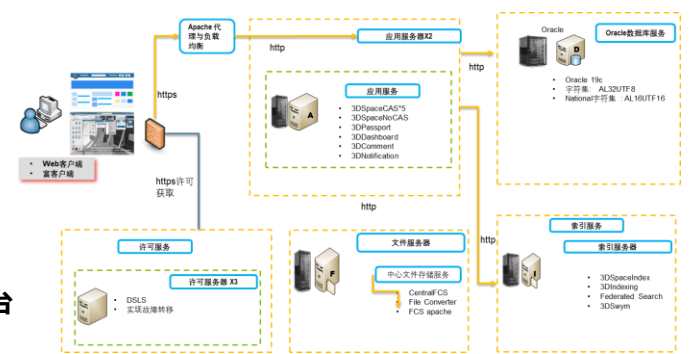
万级建模需求

- >4万束流元件
- >350台机柜
- >3300台柜内设备
- >1万米工艺水管
- >3000米 工艺线缆桥架

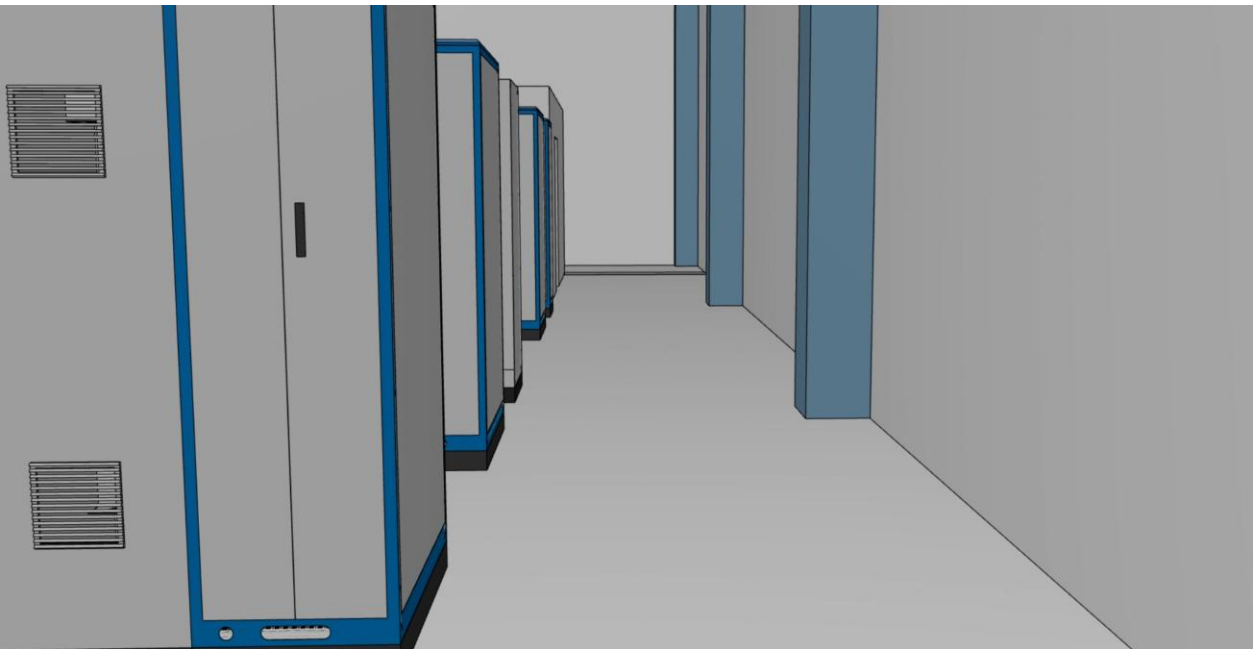


基于CATIA实现高精度、多专业、大规模装配等能力，构建装置三维模型。

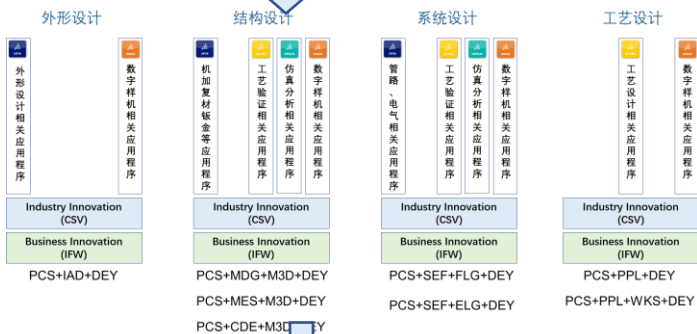
架构：
3DE平台
CS+BS架构
Windows平台



综合效果

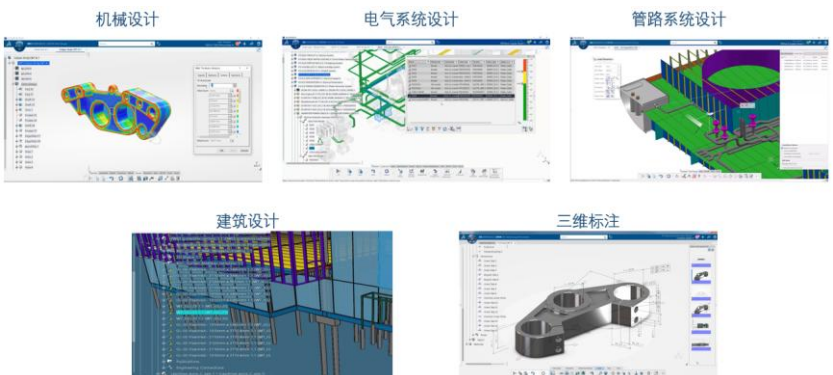


基于角色的
模块化设计



3DE关键功能

3DE
基础功能



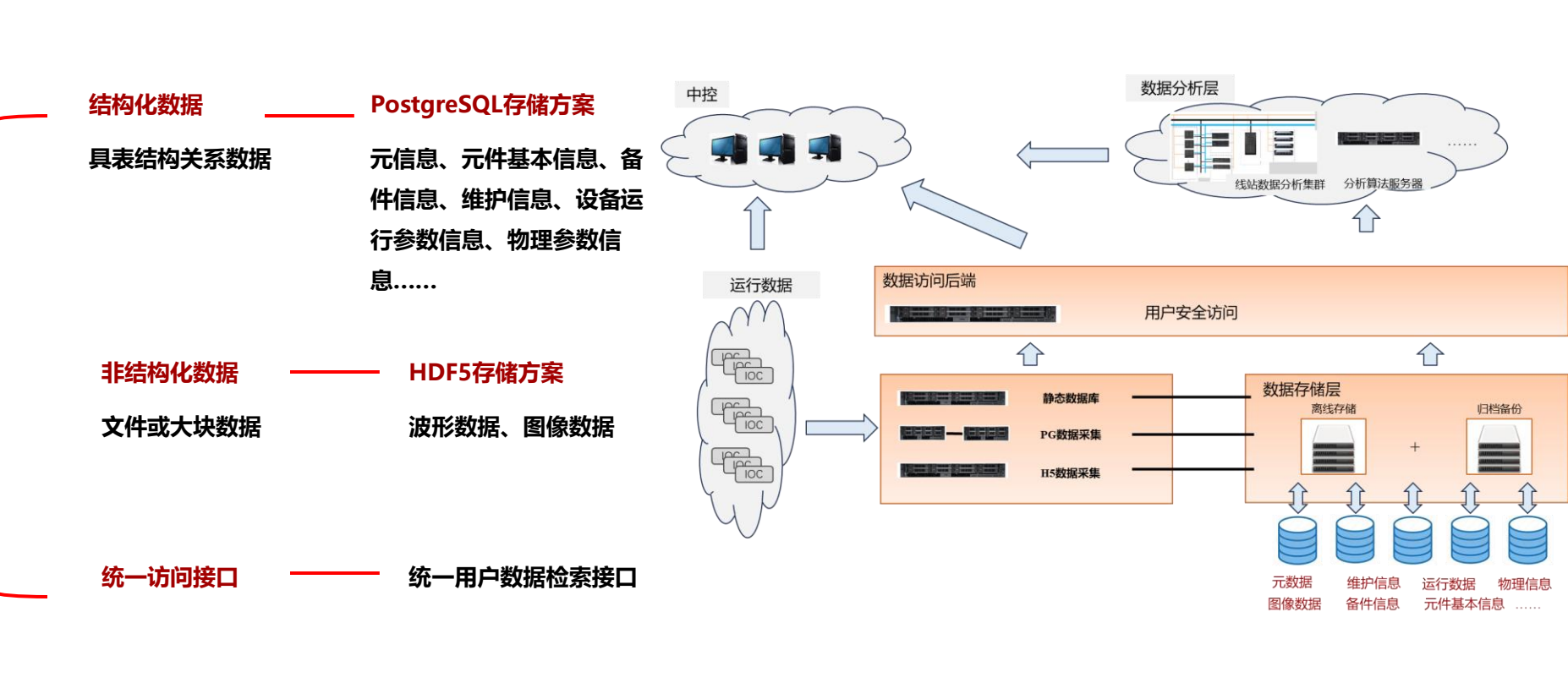
建模

主要功能

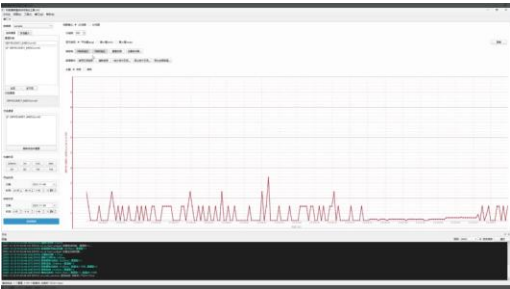
数据存储



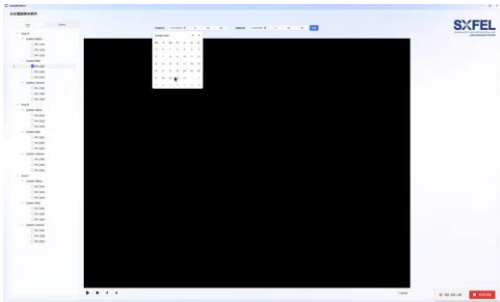
- 实现全加速器段的科学数据全生命周期管理，涵盖数据采集和传输、存储和管理。
- 高通量数据采集、数据管理。



在线设备运行数据访问效果



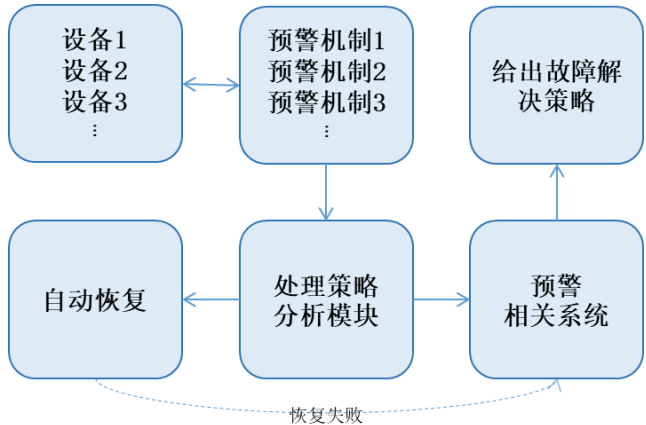
图像数据访问效果





建立全加速器段包含驱动激光锁相、真空、阀门掉落、低电平幅相、调制器高压等设备的智能预警系统，故障定位及完成时间小于10分钟。

系统架构



操作页面

卷积算法

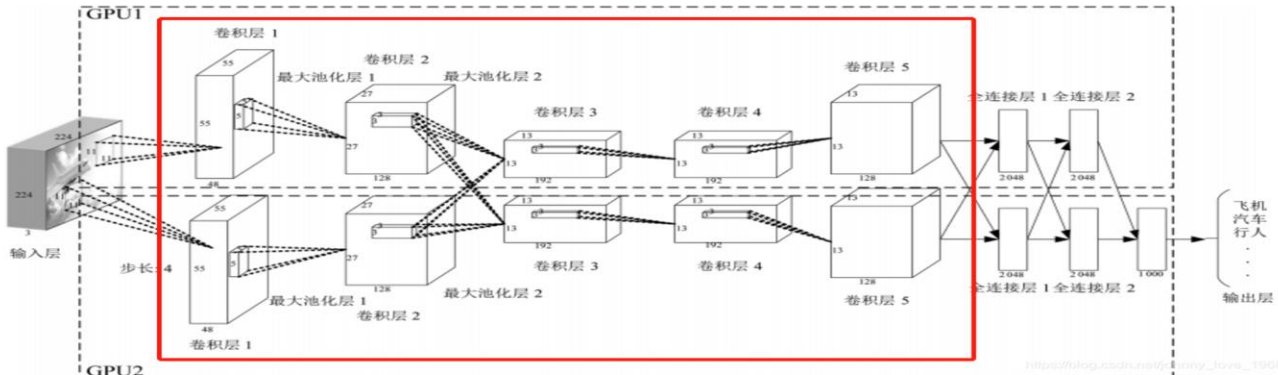
$$y(i,j) = (x * w)(i,j) = \sum_m \sum_n x(i+m,j+n) \cdot w(m,n)$$
 卷积

$$H_{out} = \frac{H + 2P - K}{S} + 1$$
$$W_{out} = \frac{W + 2P - K}{S} + 1$$
 输出维度

$$f(x) = \max(0, x) \quad f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$
 增加非线性

$$y(i,j) = \max(x(2i,2j), x(2i+1,2j), x(2i,2j+1), x(2i+1,2j+1))$$

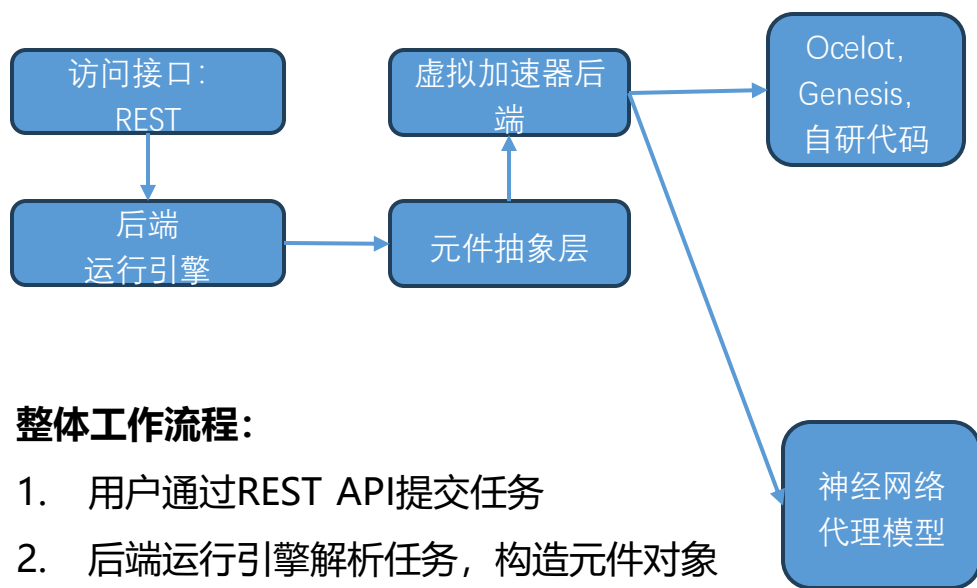
$$L = - \sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i)$$
 损失函数



虚拟加速器

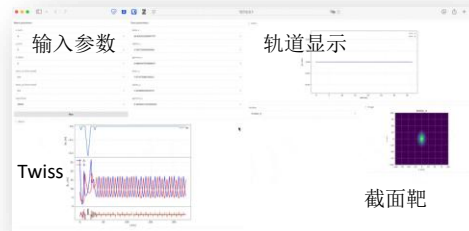


- 研制全加速器段虚拟加速器，实现束流聚焦、轨道、相空间和辐射特性快速模拟，基于加速器参数和相空间测量，对装置的出光状态进行预测和分析。

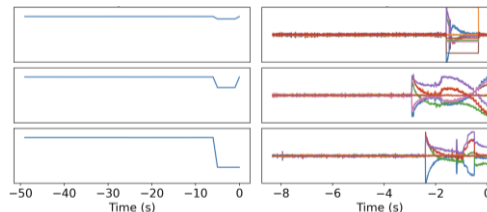


整体工作流程:

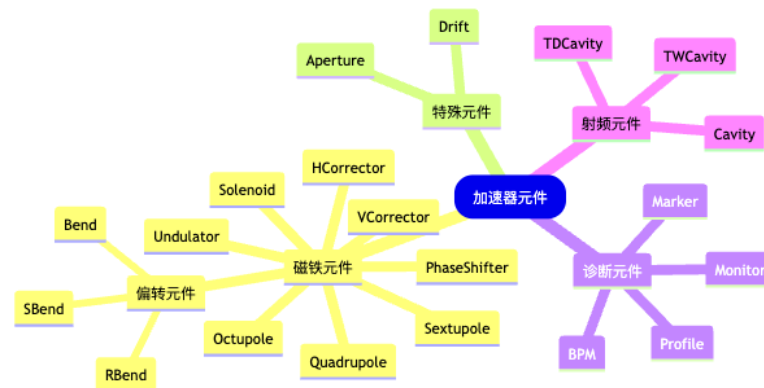
1. 用户通过REST API提交任务
2. 后端运行引擎解析任务，构造元件对象
3. 元件被抽象化处理，交由虚拟加速器
4. 虚拟加速器根据需求动态选择的后端
5. 后端插件实际执行束流模拟仿真，然后返回结果至上层



基于Ocelot的虚拟加速器实现
实时S2E模拟



神经网络代理模型效果



实现加速器元件

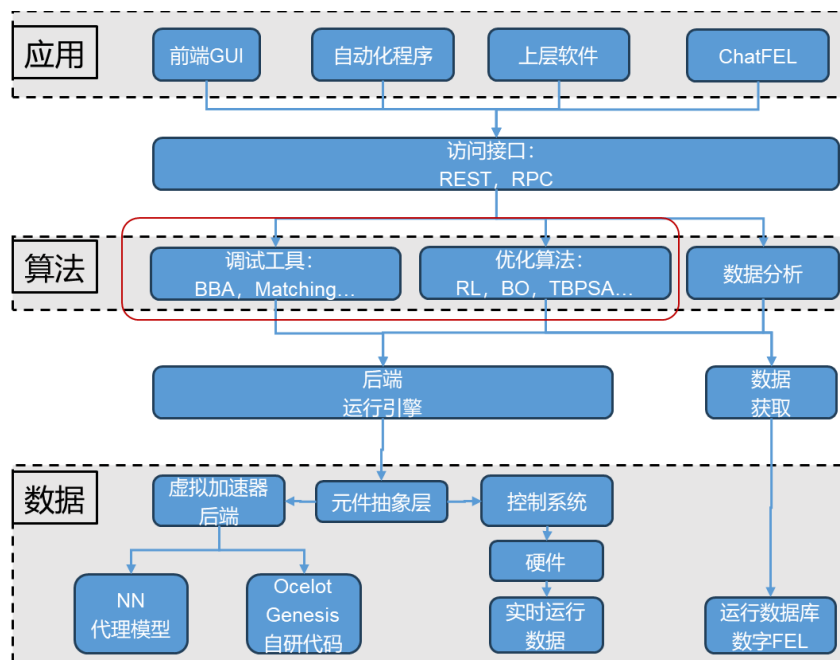
智能调束



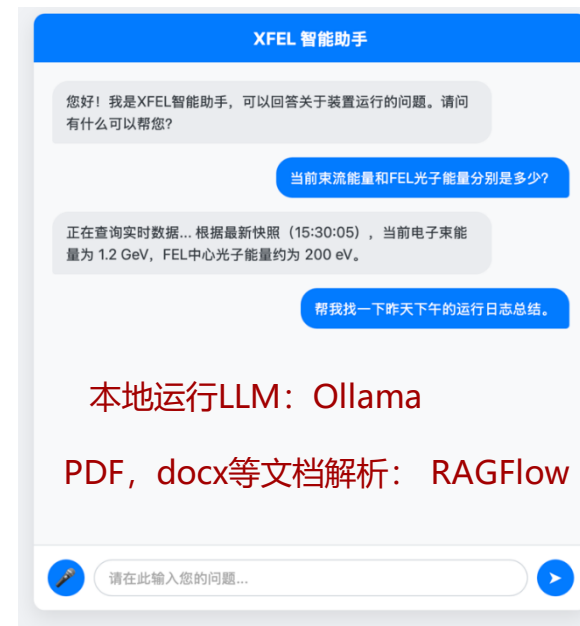
- ❑ 研制基于算法的通用智能调束系统，应用于智能调束、运行、束流优化、匹配和轨道优化等应用场景，实现调试的自动化；
- ❑ 结合算法建立加速器和实验站的知识库，建立装置语音交互系统。

智能调试：聚焦核心调试算法，开发上层应用：

1. **流程调试工具**：自动完成束流优化、参数匹配等常规调试任务。
2. **智能算法调试**：利用强化学习RL、贝叶斯优化BO、TBPSA等针对高维复杂参数空间，自动寻优提升性能。
3. **数据分析优化**：对采集到的实验和仿真数据进行深度分析，发现规律、辅助决策。



知识库

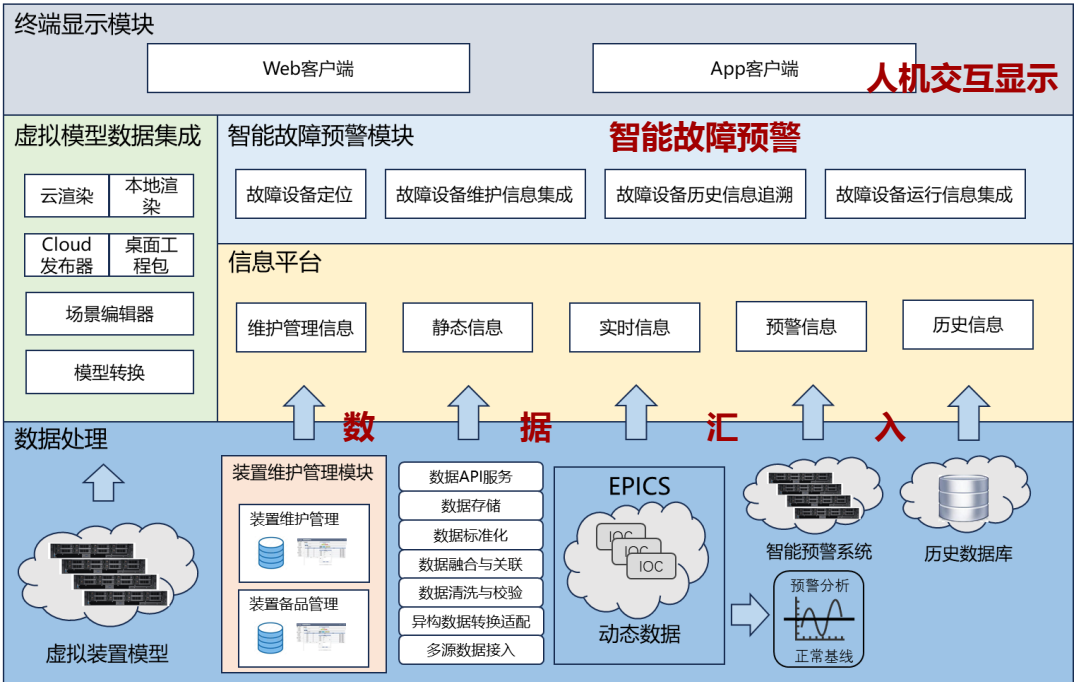


长期目标：实现调试的数据采集，ML建模，AI辅助决策和的闭环



建成模型数据、运行数据、历史数据、故障预警数据、虚拟加速器数据等各类数据可视化终端。实现具备故障定位、实时监控的人机交互式束流调试系统。

数据交互模式

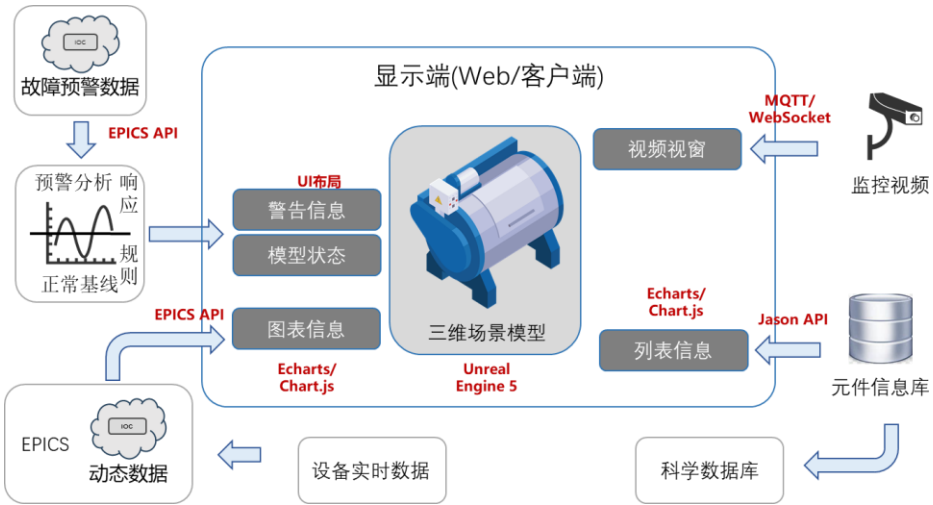


数据交互接口

- 实时数据汇入
- ✓ EPICS格式汇入
- 历史数据汇入
- ✓ 连接统一访问接口获取
- 智能故障预警
- ✓ 获取故障预警信号
- ✓ 快速故障设备定位
- ✓ 获取故障设备各类信息



实时数据汇入效果



总结

❑ **智慧FEL系统的建成将大大提升SXFEL的调试效率和光源供给率，为进一步提高装置的稳定性、可靠性以及用户实验效率奠定坚实的数字基础。**

- **数字模型——高精度1：1全装置数字模型。**
- **数据存储——全加速器段数据全生命周期管理，多源数据汇入，统一访问接口。**
- **智能反馈——全加速器段智能反馈系统，实现束流长期稳定。**
- **故障预警——全加速器段智能预警系统，减少故障率与故障处理时间。**
- **虚拟加速器——全加速器段虚拟加速器，预测与分析FEL性能。**
- **智能调束——基于算法的通用智能调束系统，实现调试的自动化。全装置知识库，助力调试效率。**
- **数字汇集——全装置数据可视化终端。**



谢谢!