

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**



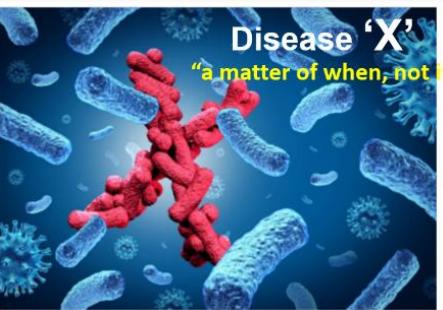
SXFEL智能化数字化改造项目介绍

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

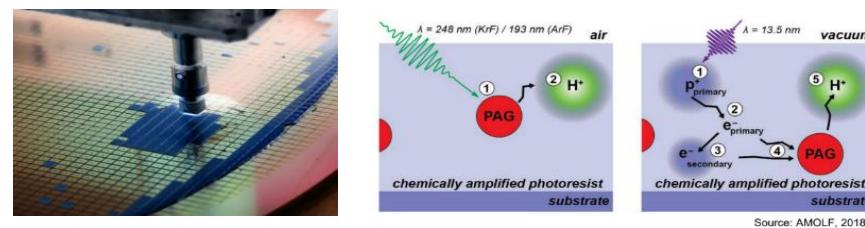
活细胞成像将为研究细胞的结构与功能研究带来前所未有的突破



- 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

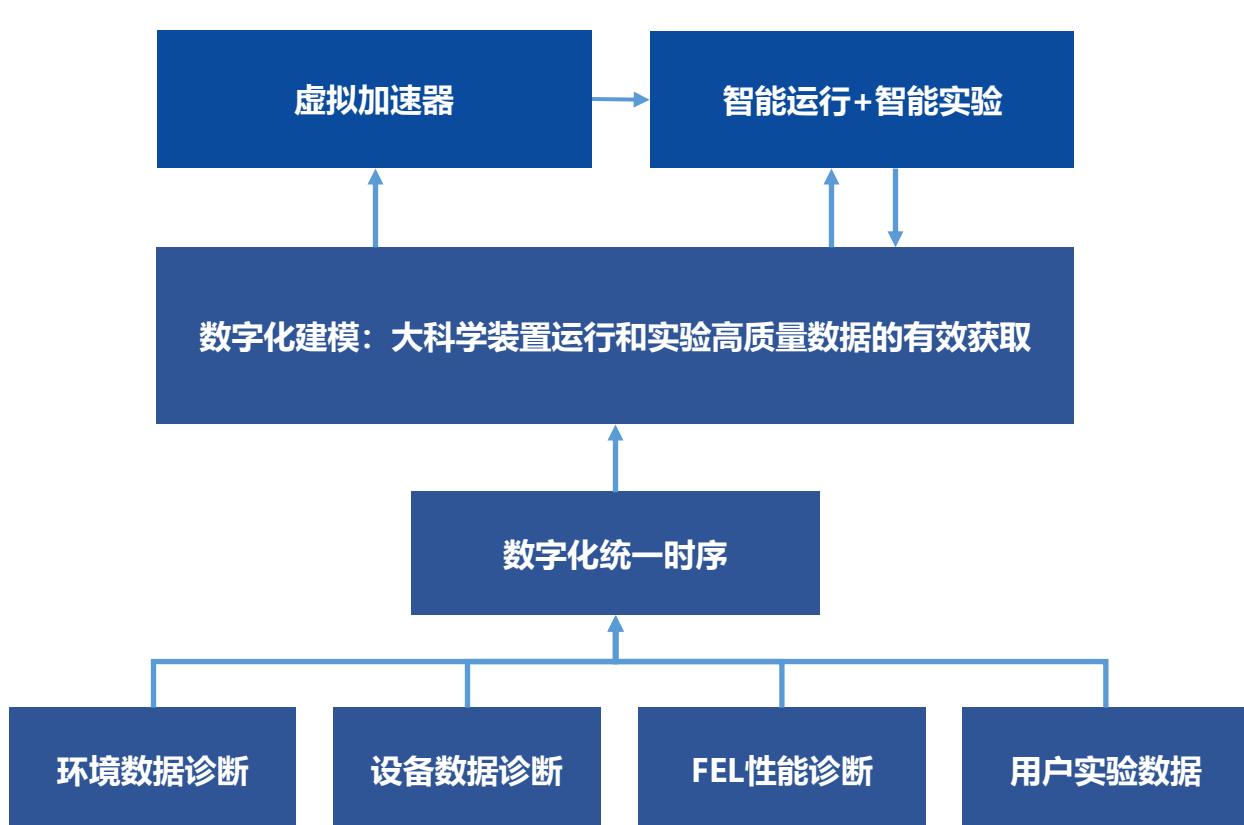
上海软线的超快全相干XFEL为我国EUV光刻材料和损伤机理研究提供了独一无二的工具



- 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



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



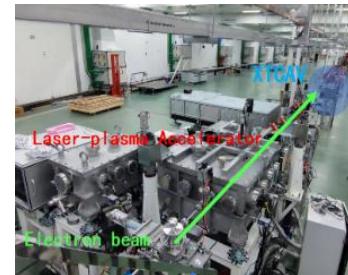
数字模型



□ 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



数字模型

□ 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。

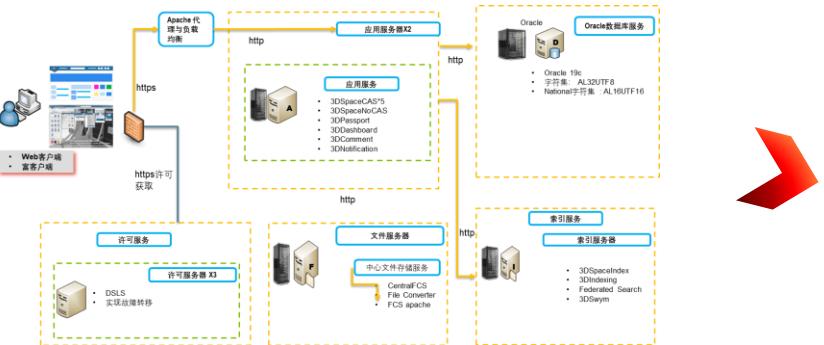
架构：

3DE平台

CS+BS架构

Windows平台

基于角色的
模块化设计



综合效果



3DE关键功能



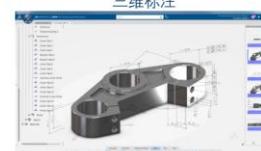
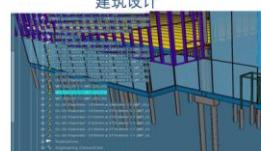
3DE

基础功能



建模

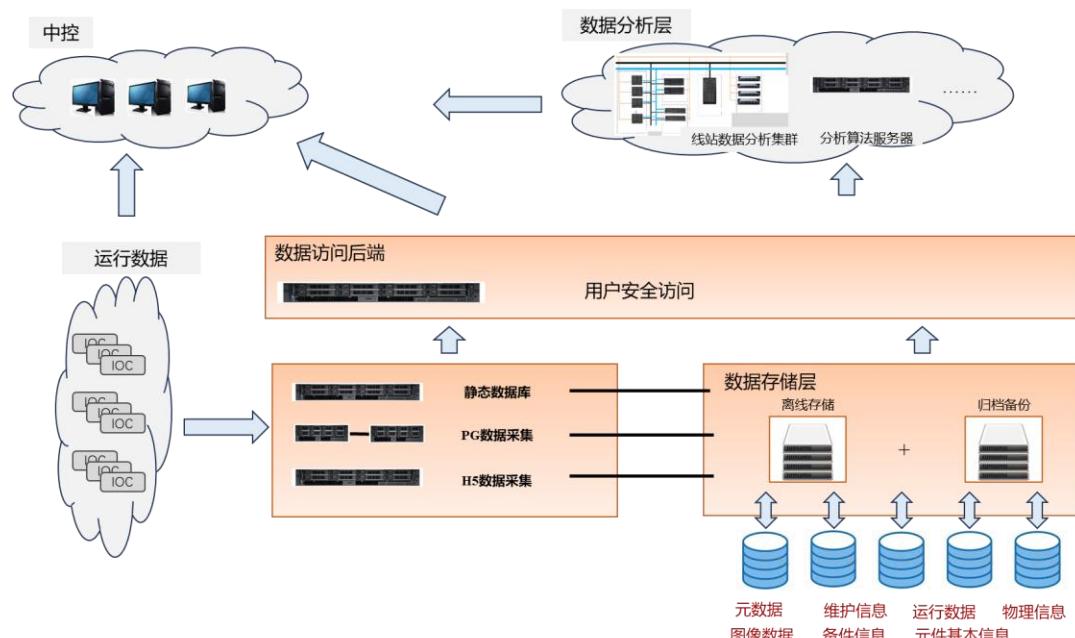
主要功能



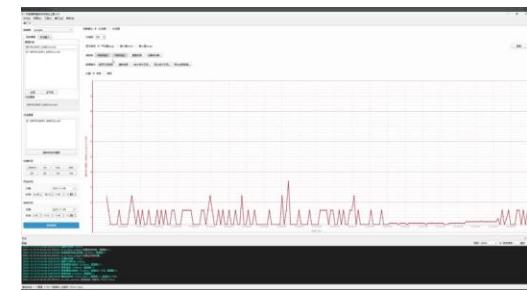
数据存储

- 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。

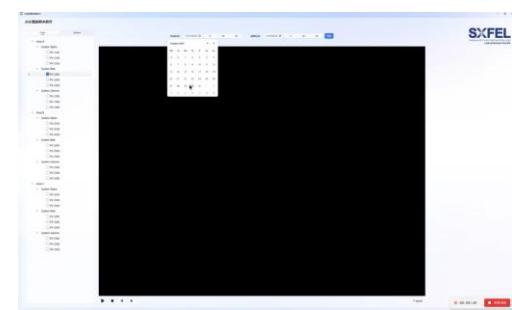
结构化数据	PostgreSQL存储方案
具表结构关系数据	元信息、元件基本信息、备件信息、维护信息、设备运行参数信息、物理参数信息.....
非结构化数据	HDF5存储方案
文件或大块数据	波形数据、图像数据
统一访问接口	统一用户数据检索接口



在线设备运行数据访问效果



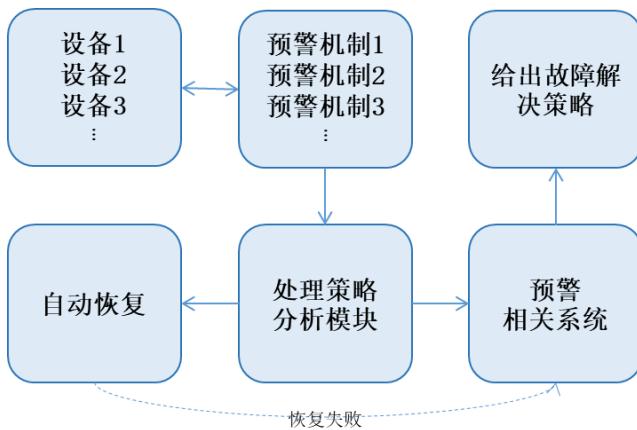
图像数据访问效果



故障预警

- 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



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

卷积算法

$$H_{out} = \frac{H + 2P - K}{S} + 1$$

$$W_{out} = \frac{W + 2P - K}{S} + 1$$

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

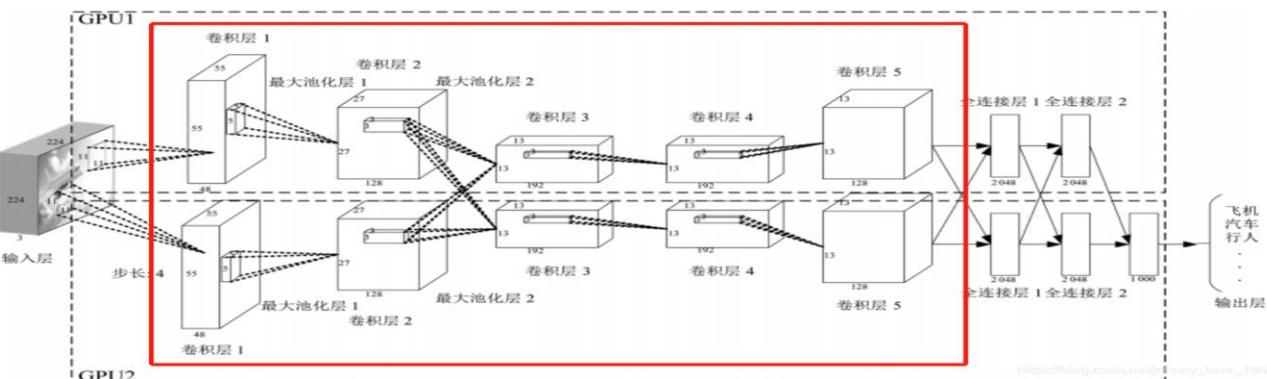
输出维度

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

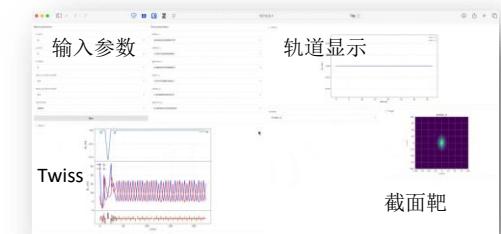
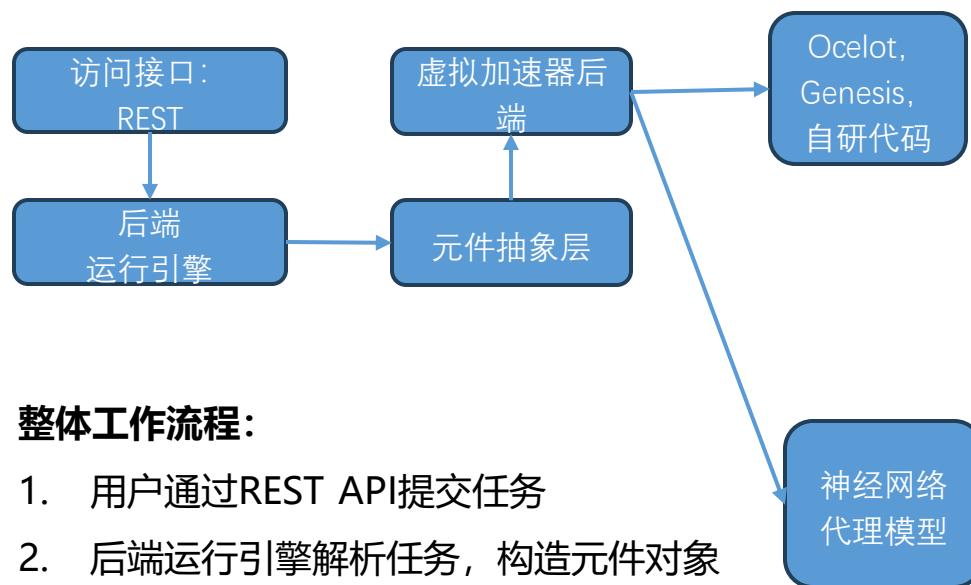


https://blog.csdn.net/qq_2999_1968

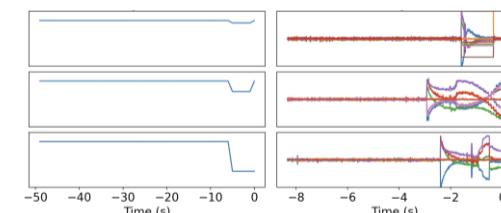
罗航: luohang@sari.ac.cn

虚拟加速器

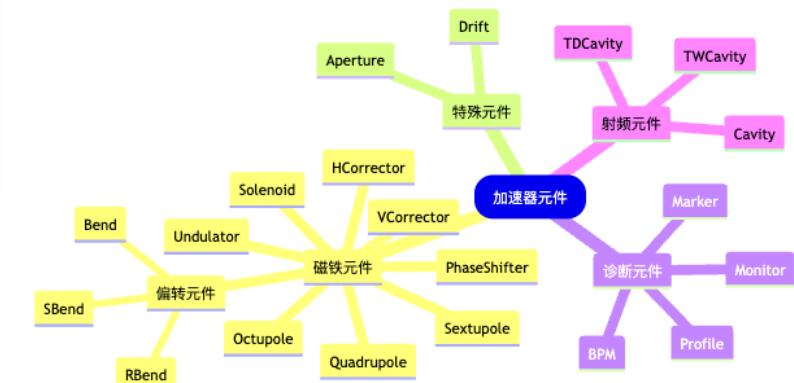
- 研制全加速器段虚拟加速器，实现束流聚焦、轨道、相空间和辐射特性快速模拟，基于加速器参数和相空间测量，对装置的出光状态进行预测和分析。



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

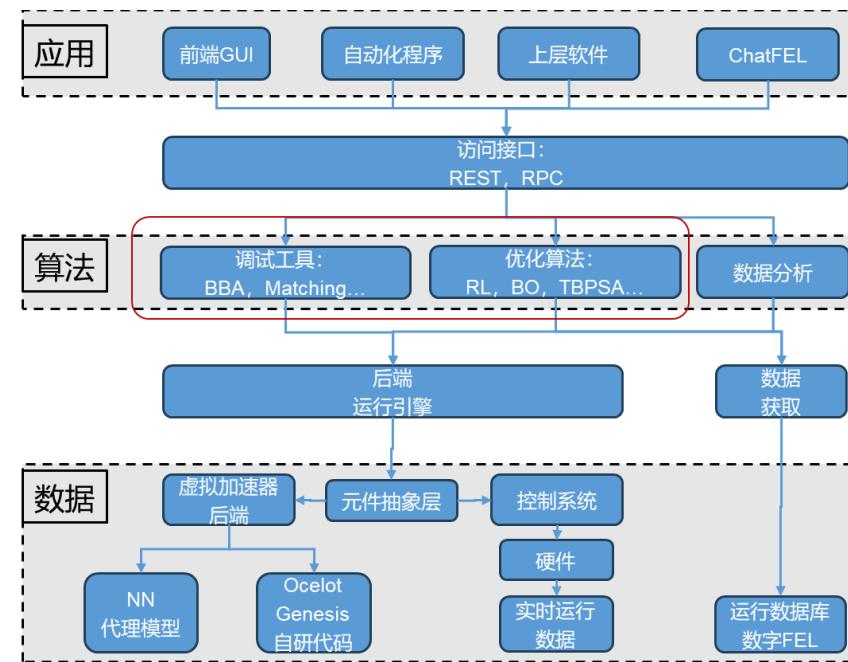
黄楠顺：huangnanshun@sari.ac.cn

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。

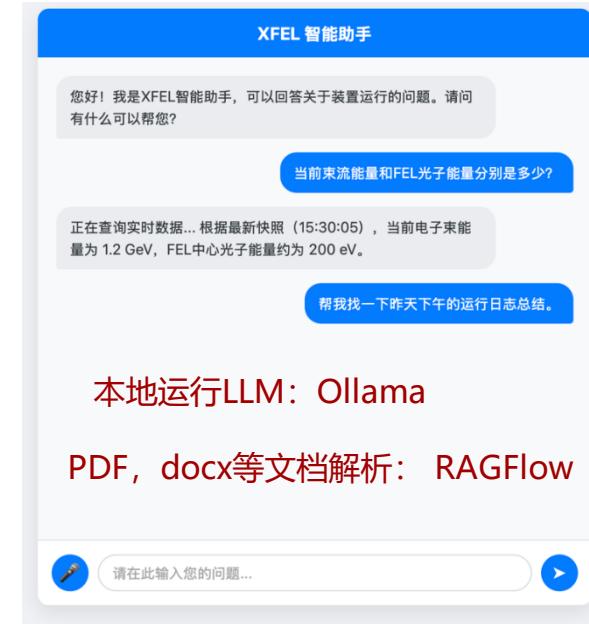
智能调试：聚焦核心调试算法，开发上层应用：

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。



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

知识库



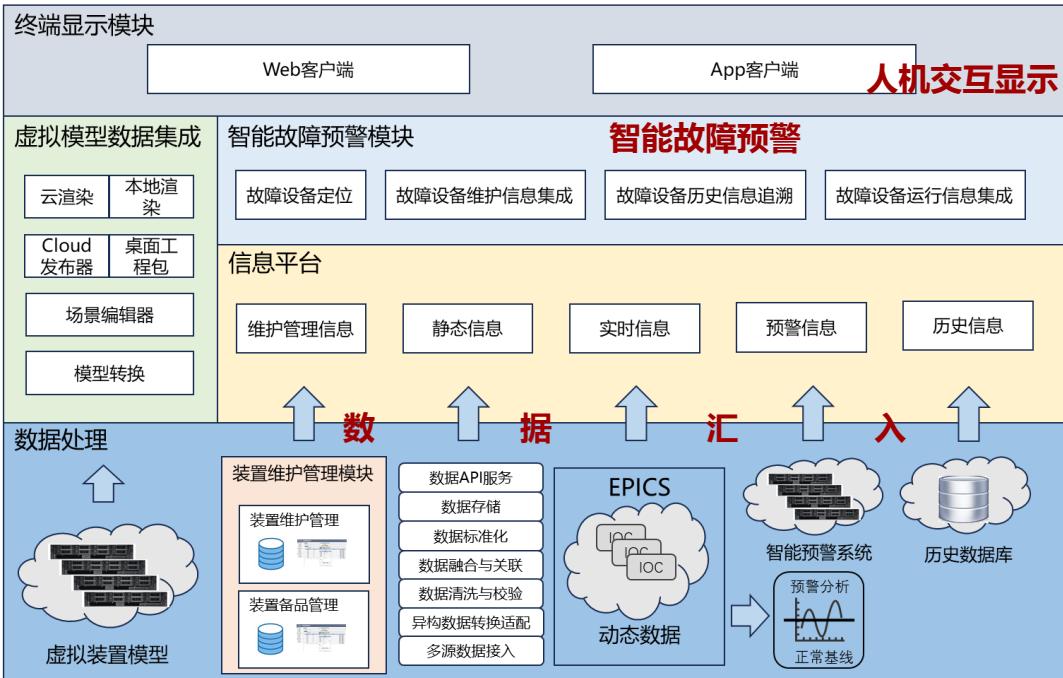
本地运行LLM: Ollama

PDF, docx等文档解析: RAGFlow

黄楠顺: huangnanshun@sari.ac.cn

□ 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

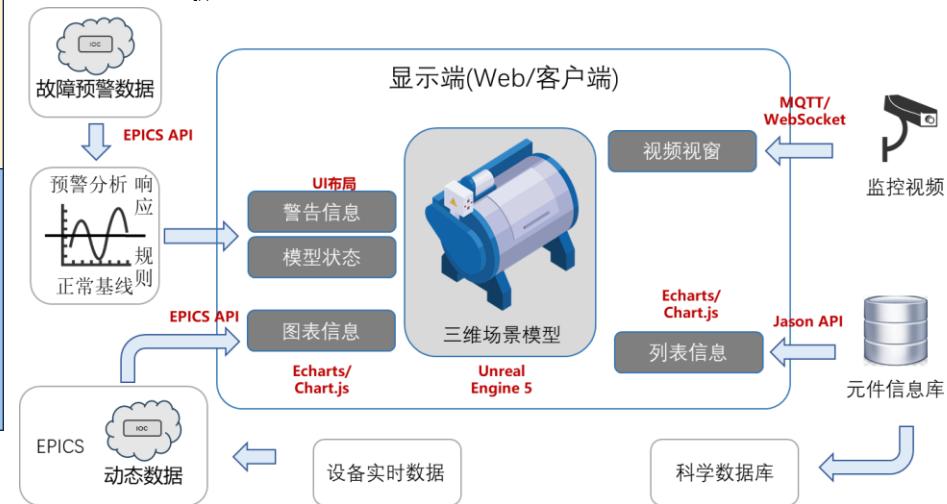


数据交互接口

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



实时数据汇入效果



总结

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！