

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences



BESIII快亮度监控系统软件方案

触发与数据获取组

报告人：刘生辉

日期：2026-09-28



01

项目背景

系统介绍 软件升级方向

02

系统需求与规模

核心需求 系统规模

03

系统业务与架构

业务功能 技术架构 数据流

04

系统模块设计

高压 电子学 亮度数据 数据服务 Web

05

接口设计

内外接口设计

06

实施计划

计划与交付

07

测试验收

部署、测试、验收

BEPCII是多束团、高亮度双环对撞机，峰值亮度为 $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @1.89 GeV，逐束团亮度监测是调束关键。

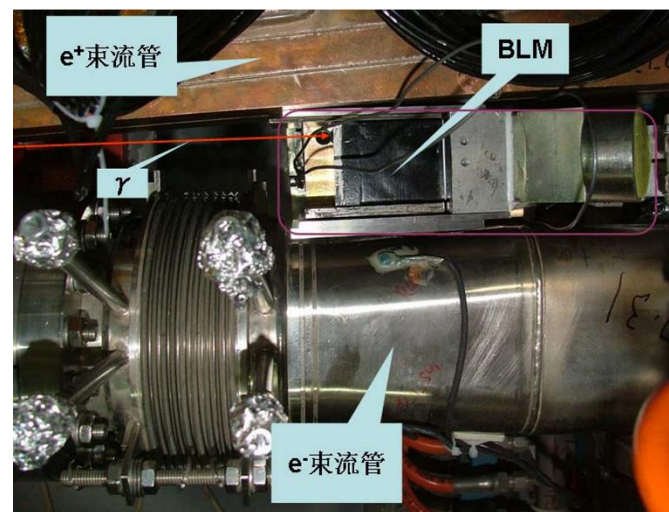
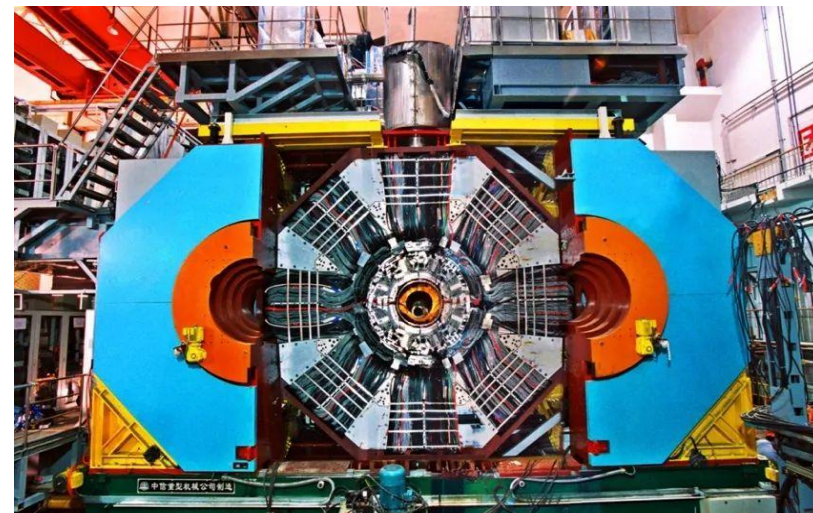
升级后对撞周期由8ns缩短为6ns，原探测器及电子学老化、数据获取系统不匹配，导致丢数频繁、柱间本底达柱高30%、精度变差并影响调束，且人工反馈亮度数据慢。

>> 为此，研发基于LYSO+SiPM的新一代快亮度探测器、电子学及监控软件，替代现有的LUM和ZDD；

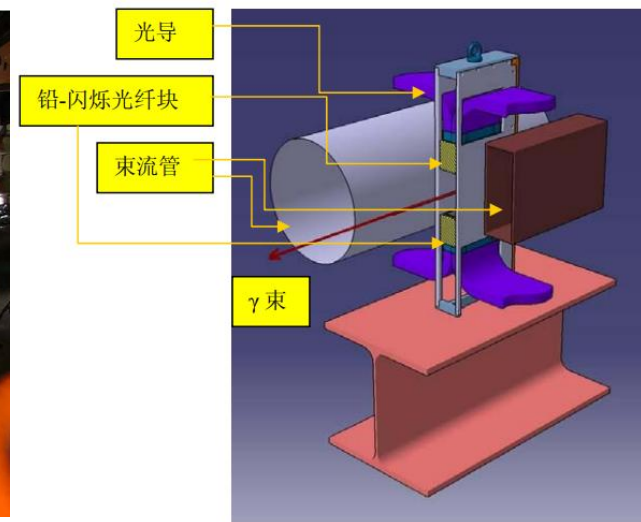
- 快亮度监控软件负责硬件控制、状态监视、数据处理与实时显示发布，为调束提供实时反馈。

原西端小角度LUM

东端零角度ZDD

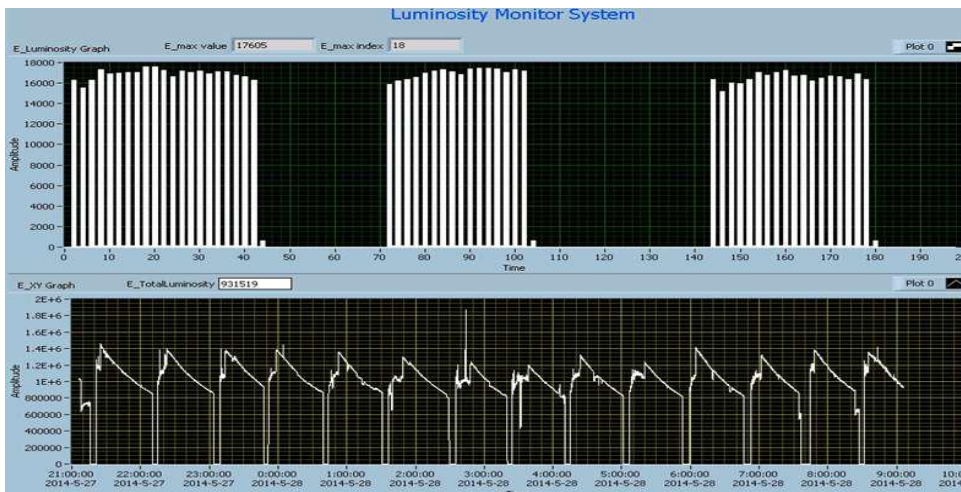


LUM实际安装位置图

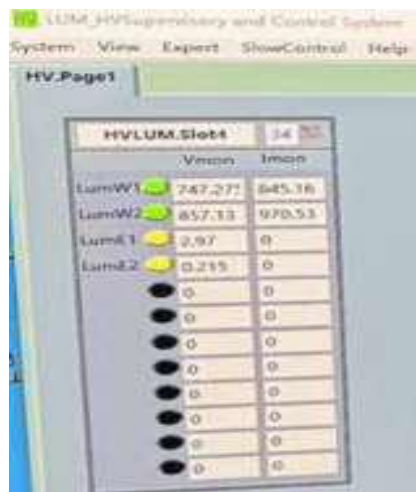


ZDD的安装示意图

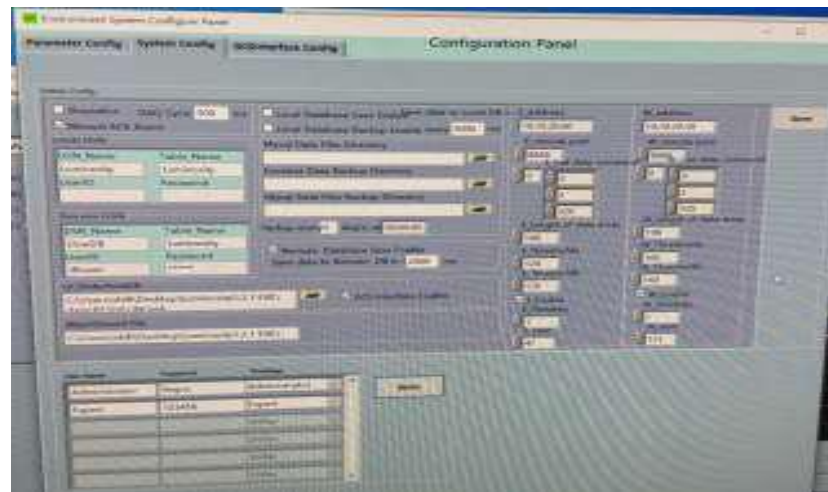
原系统显示控制软件采用C++Builder开发，为单机桌面程序；高压监控部分采用LabVIEW页面。



亮度显示



高压监控



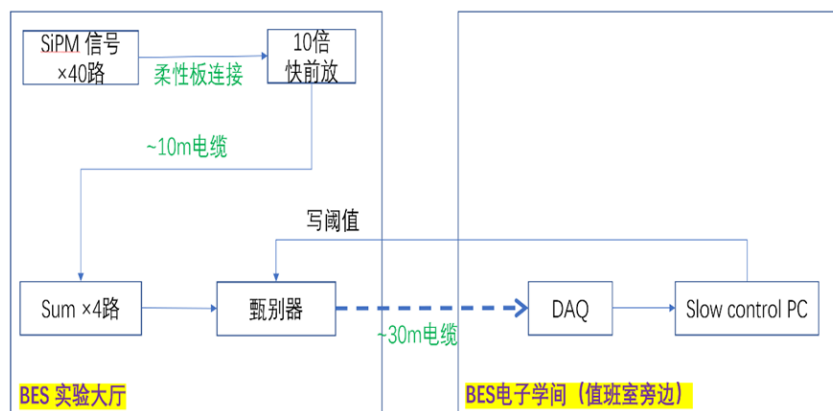
阈值配置

旧系统能力	改造后设计方向
亮度显示：实时柱状图、总亮度曲线	统一网页监控；实时柱状图 + 总相对亮度曲线 + 历史查询
高压监控：显示/控制为主	240路远程监控、历史曲线、告警、权限与审计
阈值配置：参数分散、缺少回读闭环	0 ~ 2.5 V、0.01 V精度、设置后回读校验
数据交互：本地/专用总线	EPICS CA/PVA；面向加速器发布束团相对亮度

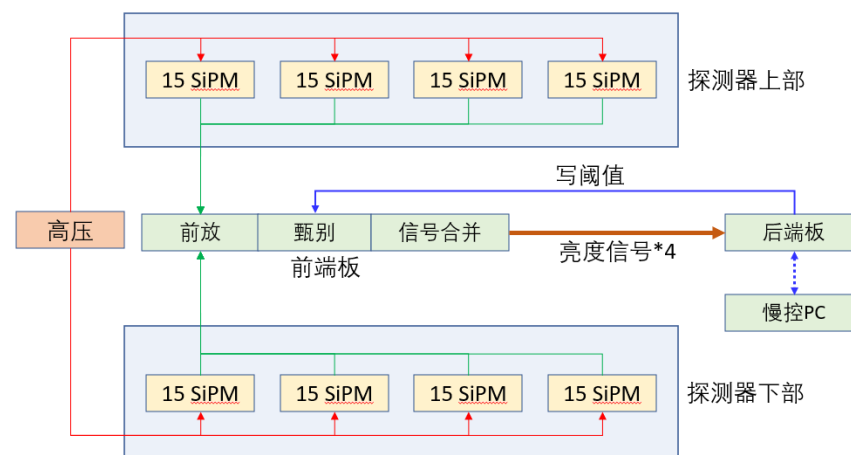
核心需求:

- 快亮度高压监控系统
- 电子学板监控
- 亮度数据处理与监测发布

----- 快亮度监控系统 -----



单端探测器 (15*8=120路SiPM)



编号	功能模块	功能描述
F1	高压控制模块	远程连接高压电源，控制高压电源及高压分配板输出；实时显示高压、电流曲线；查询历史数据
F2	电子学监控模块	通过 EPICS 监控网页，实现东西两端前放阈值实时远程设置；0-2.5V 可写，精度 0.01V；实时显示状态参数；历史数据查询
F3	亮度数据处理模块	高速采集数据，采用快速积分算法计算瞬时亮度；按参考束流强度归一化，生成相对亮度值
F4	在线相对亮度显示	读取数据读出系统实时亮度统计数据，显示束团相对亮度柱状图；发布束团相对亮度数据；显示总相对亮度曲线；历史数据查询
F5	数据发布	实时亮度发布时间间隔可调，最短 0.1s
F6	系统监控	240 路光电倍增管高压监控；双端前置放大器阈值远程设置及参数监测；双端亮度读出监测与发布

16

探测单元

240

SiPM / 高压通道

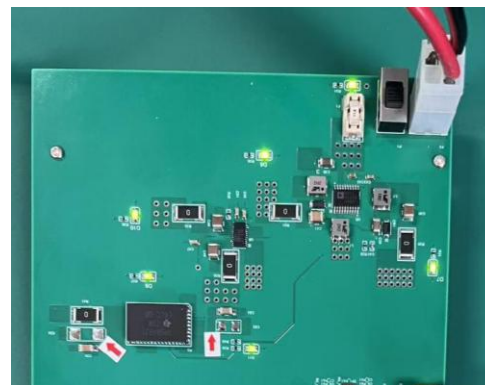
40

合并输出信号

4

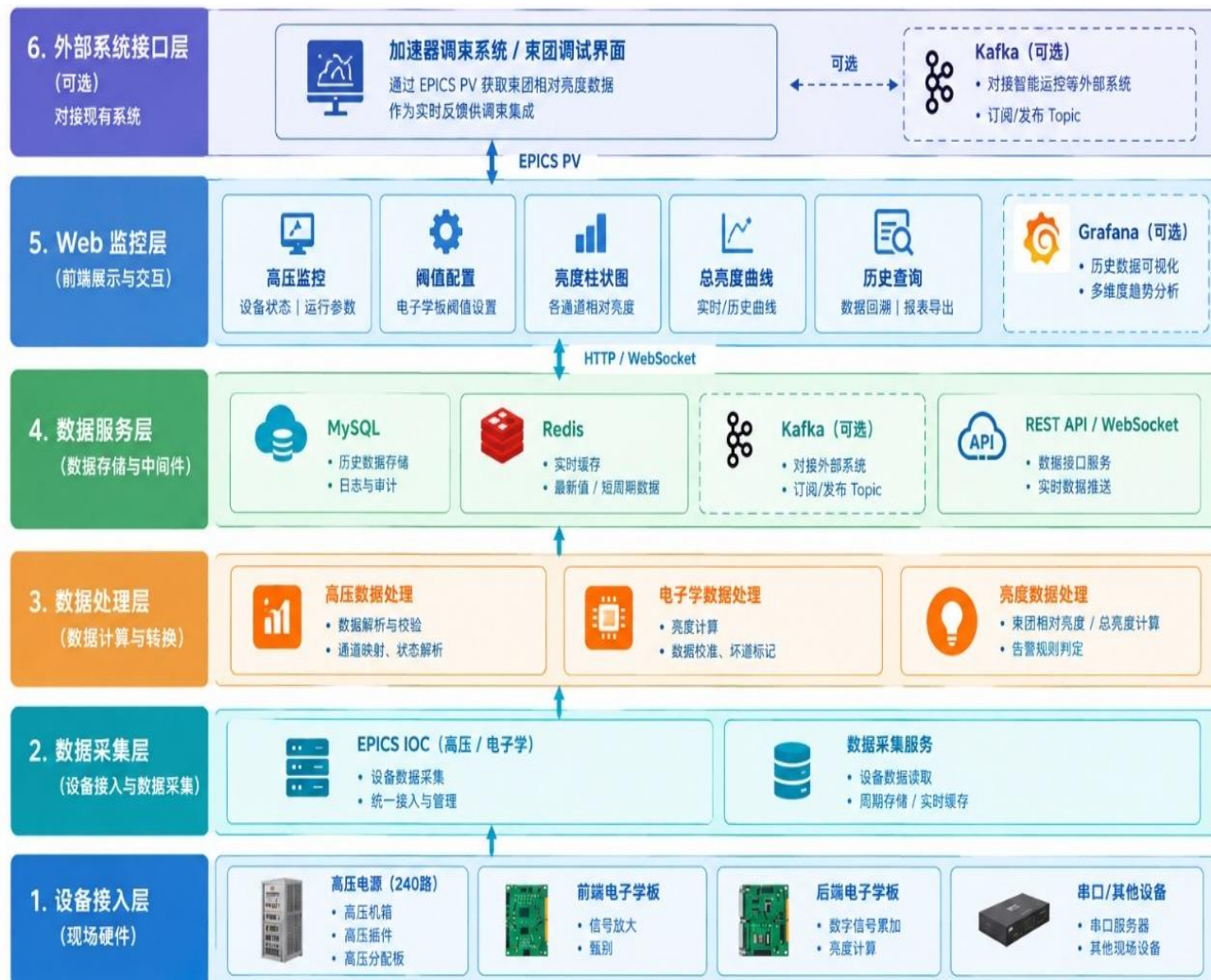
Sum信号组

设备	型号/规格	数量	软件关注点
高压机箱	CAEN SY4527 (16插槽)	1	高压接入与状态监控
高压插件	A2554, 0 ~ 64 V, 8通道	5	240路高压供电
高压分配/转接	定制	1 + 3	通道分配与微调
后端电子学板	自研 ZYNQ	3	阈值配置、亮度采集与计算
电子学快前放	自研, 东西两端	5	亮度/符合信号放大、甄别
PDU + 串口服务器	8路智能PDU + 485	2 + 2	电子学供电与远程管理





角色驱动 → 业务分层 → 设备解耦 → 数据贯通



设备接入层

高压电压、前放、ZYNQ读出、PDU等现场设备

数据采集层

EPICS IOC / 适配器, 屏蔽硬件差异

数据处理层

亮度算法、数据规范化、告警规则

数据服务层

Redis实时缓存、MySQL历史存储、发布与告警

Web监控层

监控展示、控制配置、历史分析

外部接口层

EPICS CA/PVA, 面向加速器/总控

上行监测数据流



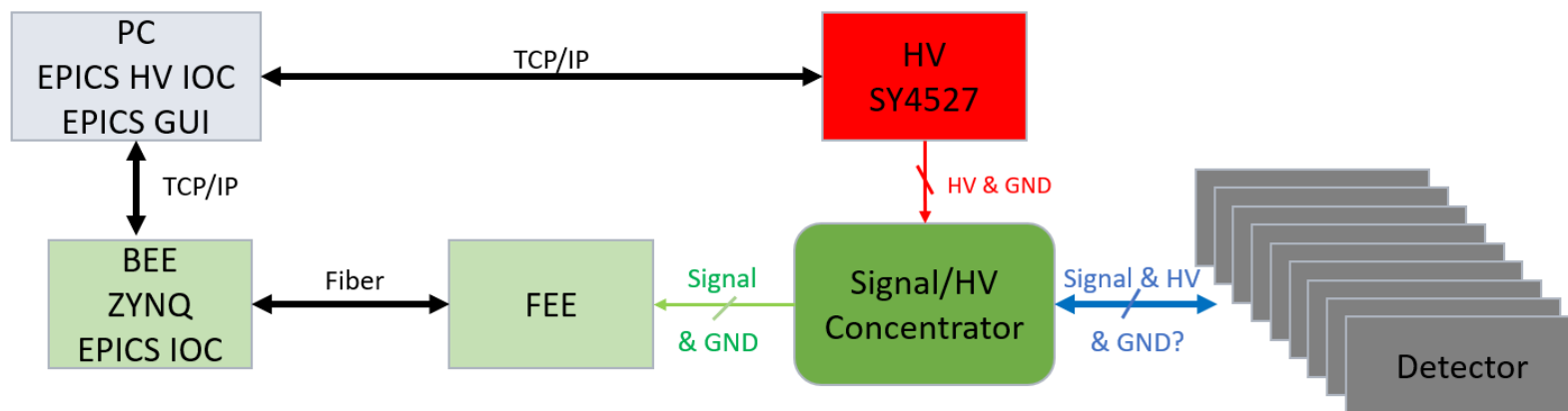
亮度高速数据流



下行控制闭环



关键点： 原始亮度数据不经过普通 PV 采集路径，由亮度处理模块直接读取 Zynq 乒乓缓存，保证高速低延迟。



高压控制模块是软件与高压硬件的接口，管理CAEN SY4527机箱、A2554插件（0~64 V，8通道/块）和8块定制1分32分配板。

职责

覆盖240路SiPM高压输出、通断控制、单通道微调，以及电压/电流实时监测和历史查询。

软件组成

EPICS高压IOC + 采集归档服务 + Web控制接口；实时值进入Redis，历史值归档MySQL。

安全闭环

Web → 权限/范围校验 → CA写PV → IOC下发 → 回读校验 → Redis刷新 → audit_log；异常触发告警。

典型控制流程

用户操作

权限/范围
校验

IOC下发

设备执行

回读校验

记录/告警

阈值配置

东西两端前放甄别阈值

- 0 ~ 2.5 V
- 精度 0.01 V
- 亮度/符合信号分别配置
- 设置后自动回读校验

状态监控

电子学运行状态及相关参数实时显示；支持历史查询与图表；异常状态进入告警链路。

关键设计：回读闭环

不以“写入成功”作为生效判据，以“回读值在容差内”为判据；偏差超过0.01 V时判定失败并告警。

阈值设置业务流程

Web阈值设置

范围校验

IOC写入

硬件生效

回读校验

审计/告警

与亮度数据链路解耦：电子学IOC负责监控/配置，ZYNQ原始亮度计数经读出适配器直接进入亮度处理模块。

原始计数帧

ZYNQ乒乓缓存

完整性校验

帧头/束团数/序号/时间戳

顺序复原

处理乒乓缓冲帧

快速积分

有效时间窗+本底扣除

信号选择

4组Sum噪声评估

归一化

参考束流强度

质量判定

溢出/丢数/异常

结果发布

EPICS + Redis + MySQL

核心输出**束团相对亮度**

EPICS PV, 面向加速器调束

总相对亮度

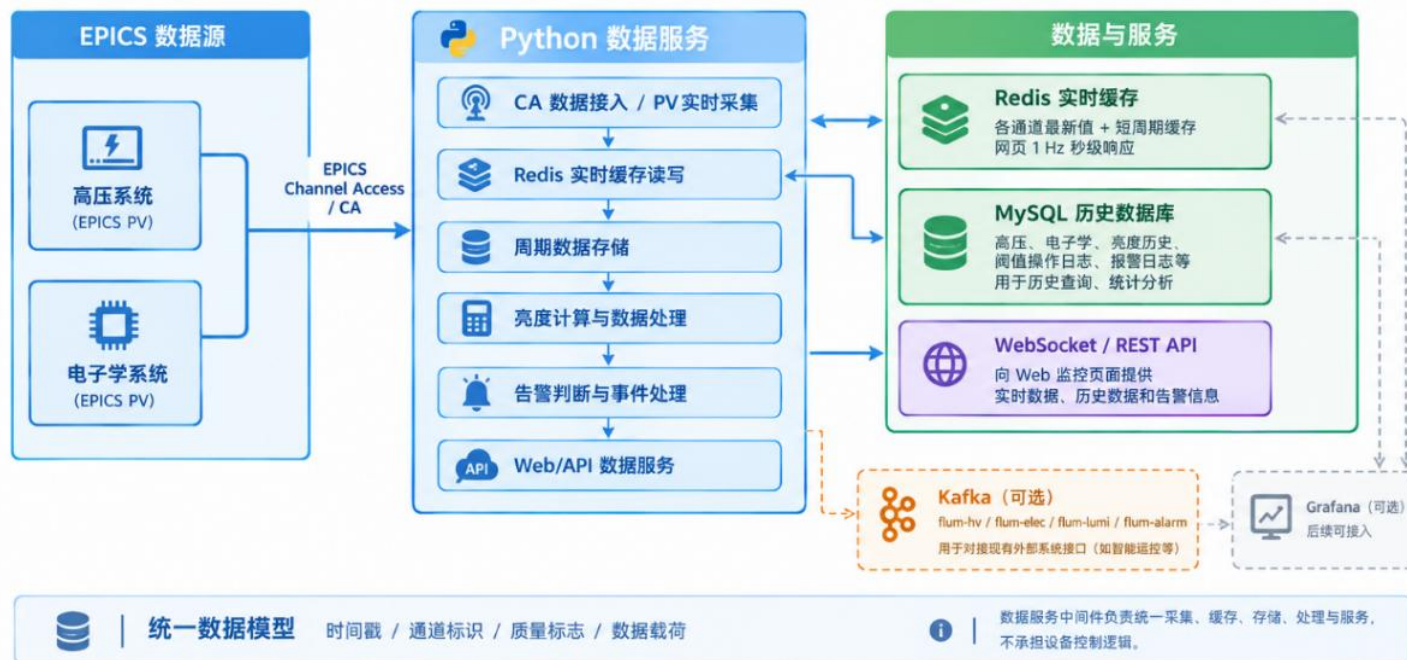
网页实时/历史曲线

质量标志

随数据贯穿显示与发布

数据服务中间件数据流图

统一数据采集、实时缓存、历史存储与数据服务



MySQL: 历史与审计

高压、电子学、亮度、阈值、告警、审计、配置、用户等历史数据；支持分区与聚合。

Redis: 实时数据枢纽

保存各PV最新值与短周期缓冲；支撑网页秒级响应，并作为存储服务的实时输入。

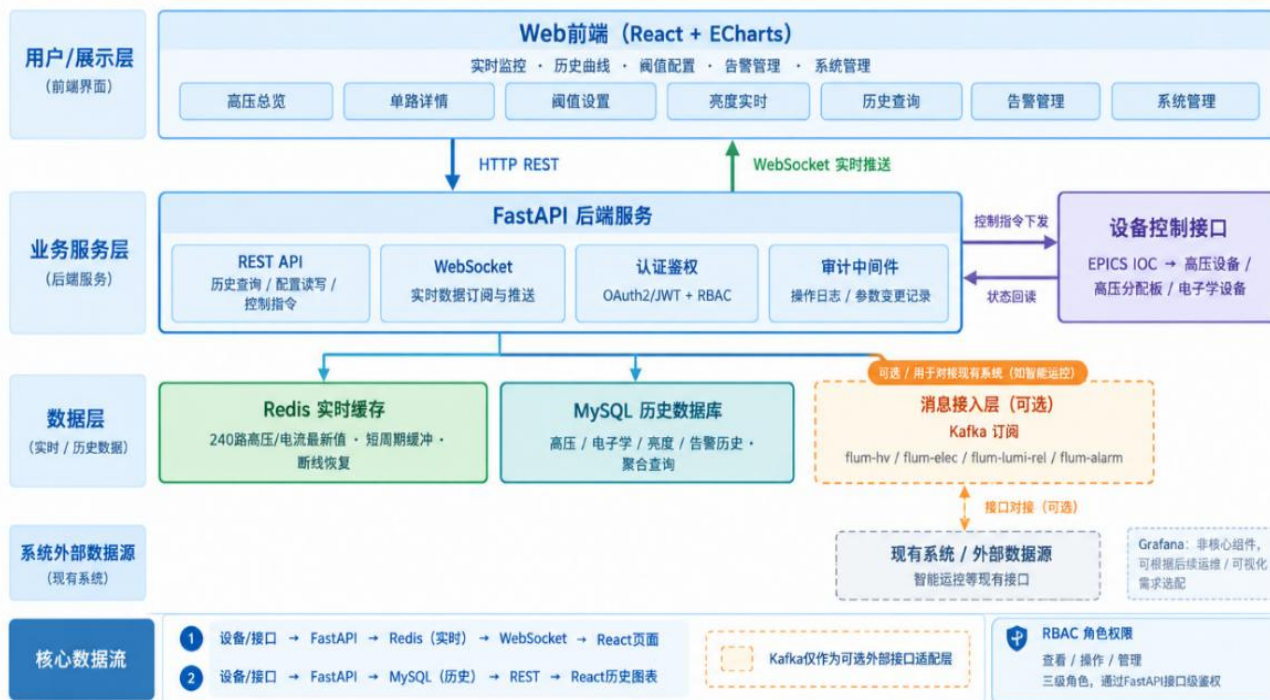
Kafka: 可选消息通道

根据外部系统集成需求启用，用于消息发布或告警分发。

职责边界：采集/存储统一；亮度原始数据不走普通PV采集路径，直接由亮度处理模块读取ZYNQ乒乓缓存。

设计原则	方案要点
统一数据模型	时间戳 + 端别 + 通道/束团标识 + 质量标志 + 数据载荷
冷热分离	实时值 Redis；历史值 MySQL；高频消息可选 Kafka
规模控制	大表按时间分区；必要时 hour/day 聚合；按策略清理
数据保留	原始数据不少于3个月；聚合数据不少于1年（可配置）
统一对时	控制网 NTP；PV、数据库、网页时间轴保持一致

网页监控模块软件结构与数据交互架构 (React + FastAPI)



页面规划

高压总览

240路电压/电流、异常高亮

单路详情

实时曲线、多路对比、历史、控制

阈值设置

设置、回读、生效值

亮度实时

束团柱状图、总曲线、质量标志

历史查询

高压/电子学/亮度、CSV导出

告警与系统管理

告警、用户权限、配置、审计

实时与历史分离

实时页面走WebSocket; 历史/配置走REST, 两类通道互不争用。

断线恢复

WebSocket自动重连; 重连后先拉Redis最新值, 再恢复推送。

防误操作与审计

范围校验 + 二次确认 + 回读联动 + 统一审计中间件。



接口设计与对发布

接口	方式	主要用途	当前状态
高压源/分配板	RS-232 / 以太网等	240路高压控制与监测	协议待硬件确认 TCP/IP
前放控制	IPbus / LVDS	东西端阈值远程读写	按硬件接口对接
ZYNQ后端	千兆以太网 / IPbus	亮度读取、乒乓控制、复位、状态	核心高速链路
亮度发布	EPICS CA / PVAccess	束团相对亮度、总亮度、质量标志	面向加速器
历史数据	数据库 / Archiver	历史查询与图表	方案级设计 mysql
Web	B/S + WebSocket / REST	监控与配置	方案级设计
总控系统	EPICS CA或约定接口	系统互联	按总控要求

PV命名示例 FLUM:HV:E01:CH001:VMon | FLUM:THR:EAST:LUMI:Set | FLUM:LUMI:BUNCH:REL

- ❑ LVDS（低压差分信号）是一种 低功耗、高速、抗干扰 的差分信号传输技术，通过一对互补的电压信号（正负端差值）传递数据。
- ❑ IPbus 协议是一种基于数据包的简单控制协议，用于读取和修改具有虚拟 A32/D32 总线的基于 FPGA 的硬件设备中的内存映射资源。
- ❑ EPICS 实验物理与工业控制系统 / CA Channel access通道访问协议

软件开发周期：2个月/ ~ 7周

2026年12月完成系统软件开发并验收

阶段一 | 软件开发

第1 ~ 3周

主要任务

开发环境/配置框架；EPICS IOC；亮度处理与发布；Web页面；数据服务

阶段交付

IOC联调通过；Web原型可用；数据链路打通



阶段二 | 联调运行优化

第3 ~ 5周

主要任务

实验室硬件联调；6 ns现场试运行；发布节拍/归一化/告警参数优化；EPICS联合调试

阶段交付

现场稳定运行；调束系统集成验证；参数固化



阶段三 | 测试验收

第6~7周

主要任务

功能/性能测试；复用性演示；文档整理；验收评审

阶段交付

测试报告；操作手册；验收资料

总体节奏：开发 → 联调运行优化 → 测试验收；阶段允许交叉，联调适当前移。

部署：基于Linux操作系统部署相关业务：EPICS、Redis、MySQL、Web、采集服务。

注：控制网与数据网隔离/跨区经防火墙仅开放所需端口/全系统以控制网 NTP 对时

测试验收方案

实验室：SY4527、A2554、电子学板（后端ZYNQ，前放）、PDU、串口服务器 + 模拟信号源。

现场：6 ns真实束流条件，与调束系统联合验证。

覆盖：高压、电子学、亮度处理、在线显示发布、系统控制、历史与审计。

□ 性能测试

- 240 路高压实时监控，无丢帧。
- 实时亮度0.1 s 发布间隔连续稳定。
- IPbus 读取→处理→发布端到端延迟满足要求。
- 试运行可用性 >95%。
- 连续 72 小时运行无内存泄漏、无服务异常退出。

验收重点确认

- 总体分层与模块边界是否满足开发与联调需要
- 对外亮度发布统一采用EPICS的接口约束与命名规范
- 高压通信协议、束团参数、参考束流来源等
- 0.1 s发布节拍(亮度)、相对亮度精度、可用性等指标的验收口径
- 软件开发—联调—验收阶段的资源与现场窗口是否匹配



Thank you!

刘生辉, TDAQ组

