

HEPS-BPIX 6M探测器DAQ系统 的设计与开发

报告人：张水涵

日期：2023年08月10日

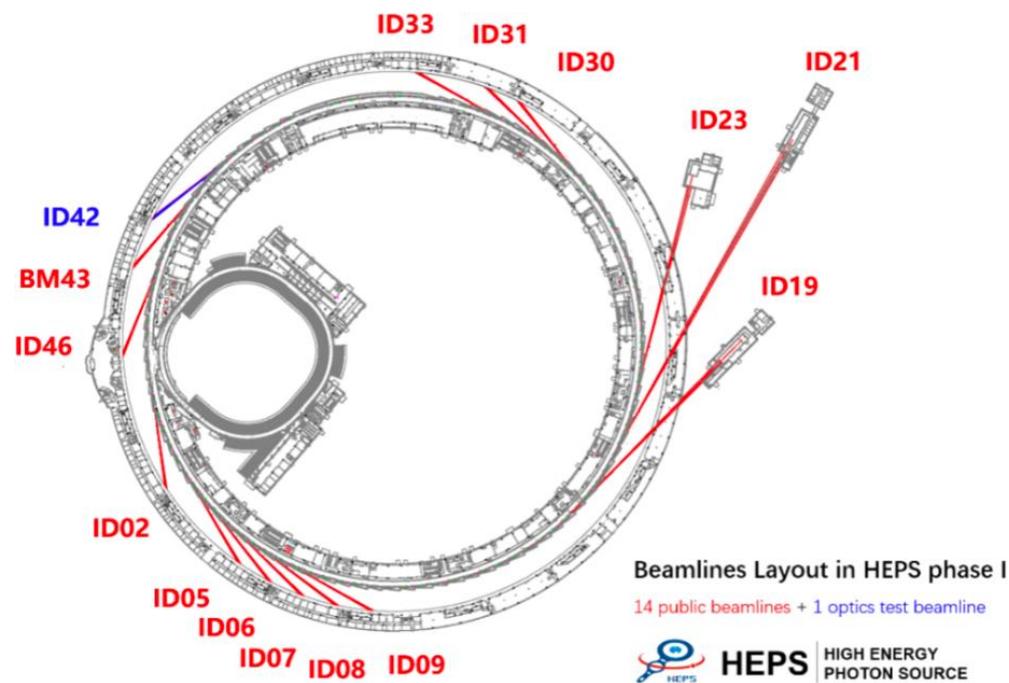
主要内容

- 高能同步辐射光源 (HEPS)
- HEPS-BPIX1/2/3 DAQ系统的设计实现
- HEPS-BPIX4 DAQ 系统整体框架设计
- HEPS-BPIX4 DAQ 系统数据流设计开发
- HEPS-BPIX4 DAQ 系统在线软件设计开发
- 总结

HEPS

■ 高能同步辐射光源，High Energy Photon Source (HEPS)

- 中国在建的首台第四代高能同步辐射光源
- 建成后将成为世界上亮度最高的同步辐射光源之一
- 位置：北京市怀柔科学城北部核心区



HEPS-BPIX

- 高能所正开展自研硅像素阵列探测器（**HEPS-Beijing Pixel, HEPS-BPIX**）
- 目前正在进行第四代自研硅像素探测器（**HEPS-BPIX4**）

自研样机DAQ指标

世界上先进代表商业产品指标

探测器	一代样机 (2015-2016)	二代样机 (2017-2018)	三代样机 (2019-2021)	四代样机 (2022-至今)	PILATUS3 X 6M	EIGER2 XE 16M
模块数/个	6	16	24	40	60	32
能量阈值	1	1	1	2	1	
像素/个	360 K	~1 M	~1.5 M	6 M	6 M	
计数深度 (bit)	16	16	16	16	16	
最高帧率 (Hz)	1000	1200	1000	1000	100	
最大带宽 (Gbps)	6	20	22	192	12	

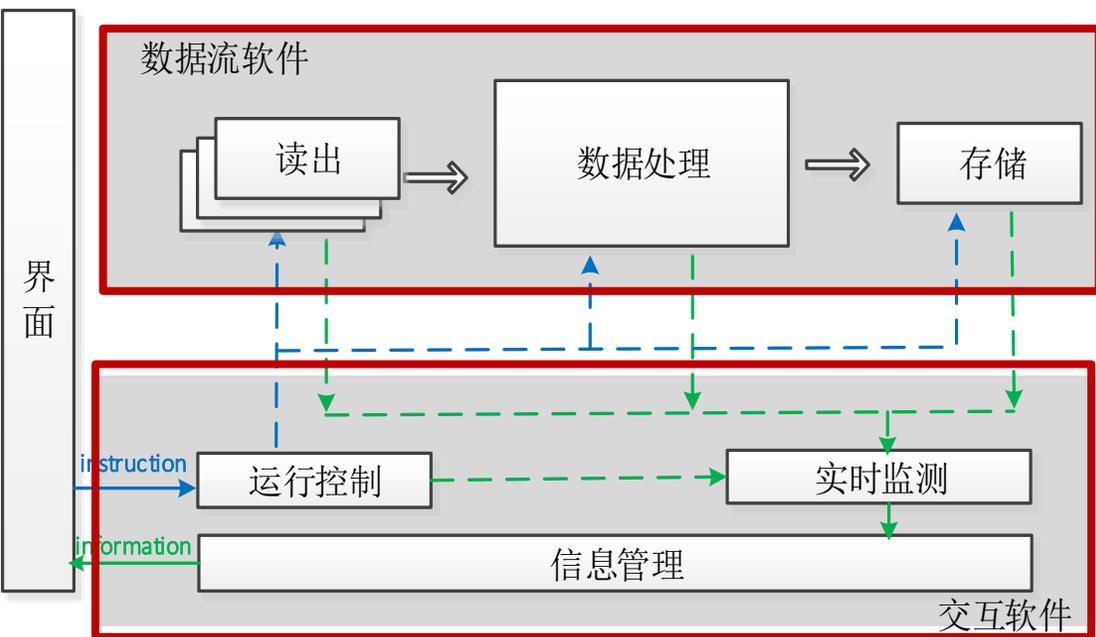
HEPS-BPIX4探测器DAQ特点

- 高吞吐瞬态海量数据**读出能力**
- 高集成度密集型数据**实时处理**
- 高通量数据实时可靠**存储能力**
- 在线数据实时监测和分析功能
- **部署空间+灵活性需求**

四代样机DAQ带宽媲美国际先进产品

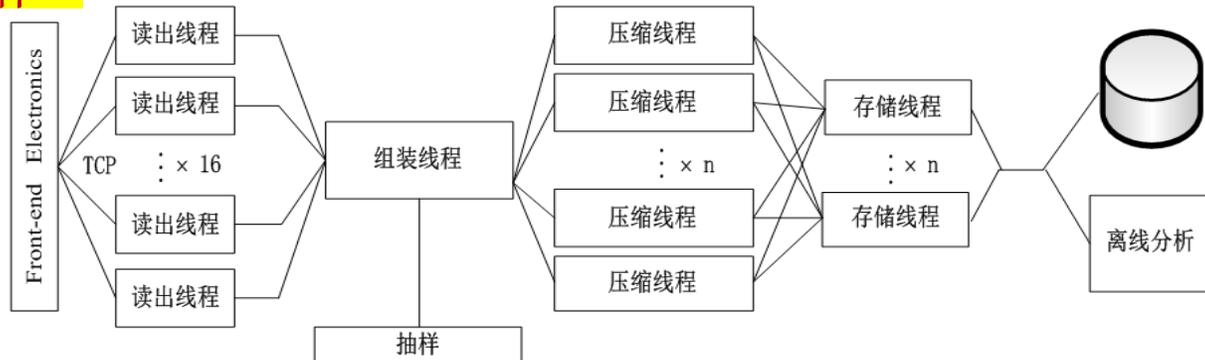
HEPS-BPIX1/2/3 DAQ系统设计实现

◆ DAQ系统整体设计框架

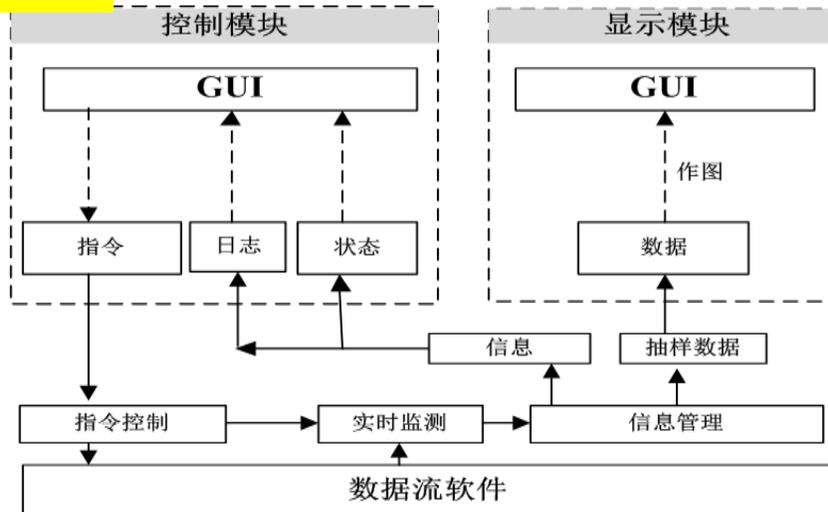


数据流软件和交互软件相互独立，两者之间的信息通过网络进行传递

数据流软件



交互软件



HEPS-BPIX1/2/3 DAQ系统设计实现

单机版DAQ系统界面展示

运行状态
参数

Current State ON
Event Count 0
Event Rate 0
Elapsed Time 0
Run Number 0

运行控制

Terminate
Config
Unconfig
Start
Stop

参数配置

Setting Real_Time_Display

Remote Config

Remote Disable Remote Enable

Server Ip Server Port Build Connect or Listen

State Name Value Accept Reject

DAQ Config

Manual Auto s or f Sampling Time (ms)

Correction File Name EnableCorrection

Frame Integration

Electronic Config

ConfigFile Trigger Mode

Expose Time (ms) Frame Count / Trigger

Latency(pre) (ms) Idle(after) (ms)

Data Mode

Save Config

File Folder User File Name

Save Raw Data Save TIFF

Boot Shutdown

设置三种日志等级，便于多角度高效定位故障，提高软件测试开发效率

日志显示

TIME	LEVEL	TYPE	INFO	CAUSE
2022-11-13 18:48:19 Sunday	NORMAL	OPREATE	set parameters success!	NULL
2022-11-13 18:48:18 Sunday	NORMAL	INFORMATION	Connect to Remote Server(Data Transport) Success!	
2022-11-13 18:48:18 Sunday	NORMAL	INFORMATION	Connect to Remote Server(Control) Success!	
2022-11-13 18:48:18 Sunday	NORMAL	INFORMATION	Click 'Boot' Button !	

2022-11-13 18:48:25 Sunday

HEPS-BPIX1/2/3 DAQ系统设计实现

单机版DAQ系统图像显示

DAQ SYSTEM

Parameter_Setting Real_Time_Display

Current State **eRUN**

Event Count

Event Rate

Elapsed Time

Run Number

Configure

Start

Stop

Terminate

Region of Interest x1 y1 **Reset**
x2 y2 **Clear**

Integration Waveform

Save

Stop

Integral Frame Count **Set** **Reset**

Set Contrast **Set**

ShowImage

ManualTrigger

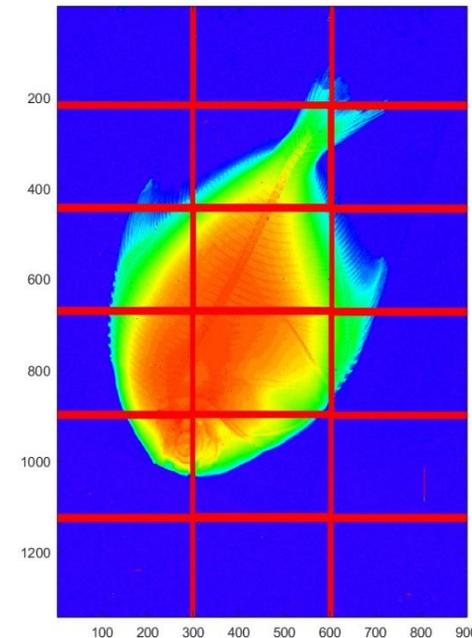
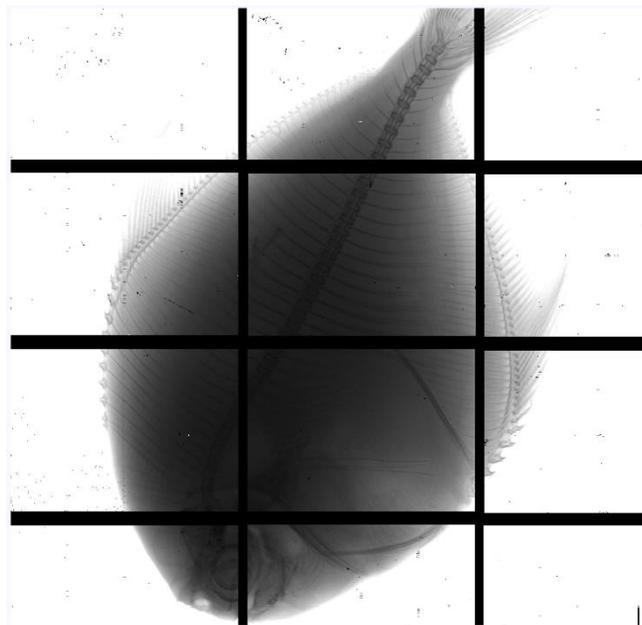
Max_X Max_Y Max_Value

Target_X Target_Y **Set**

Target_Value **Clear**

TIME	LEVEL	TYPE	INFO	CAUSE
2020-10-29 17:43:42 Thursday	WARNING	NETWORK	no log or status received in 10s from remote server!	
2020-10-29 17:43:32 Thursday	WARNING	NETWORK	no log or status received in 10s from remote server!	
2020-10-29 17:43:22 Thursday	WARNING	NETWORK	no log or status received in 10s from remote server!	

2020-10-29 17:43:49 Thursday



➤ 单机版DAQ系统已实现功能

- 实时数据读出、组装、无损压缩和数据存储
- 提供友好用户交互控制界面以及实时图像显示和处理

➤ 满足前三代样机实际需求，代码经过迭代更新已相对成熟

性能指标



192Gbps

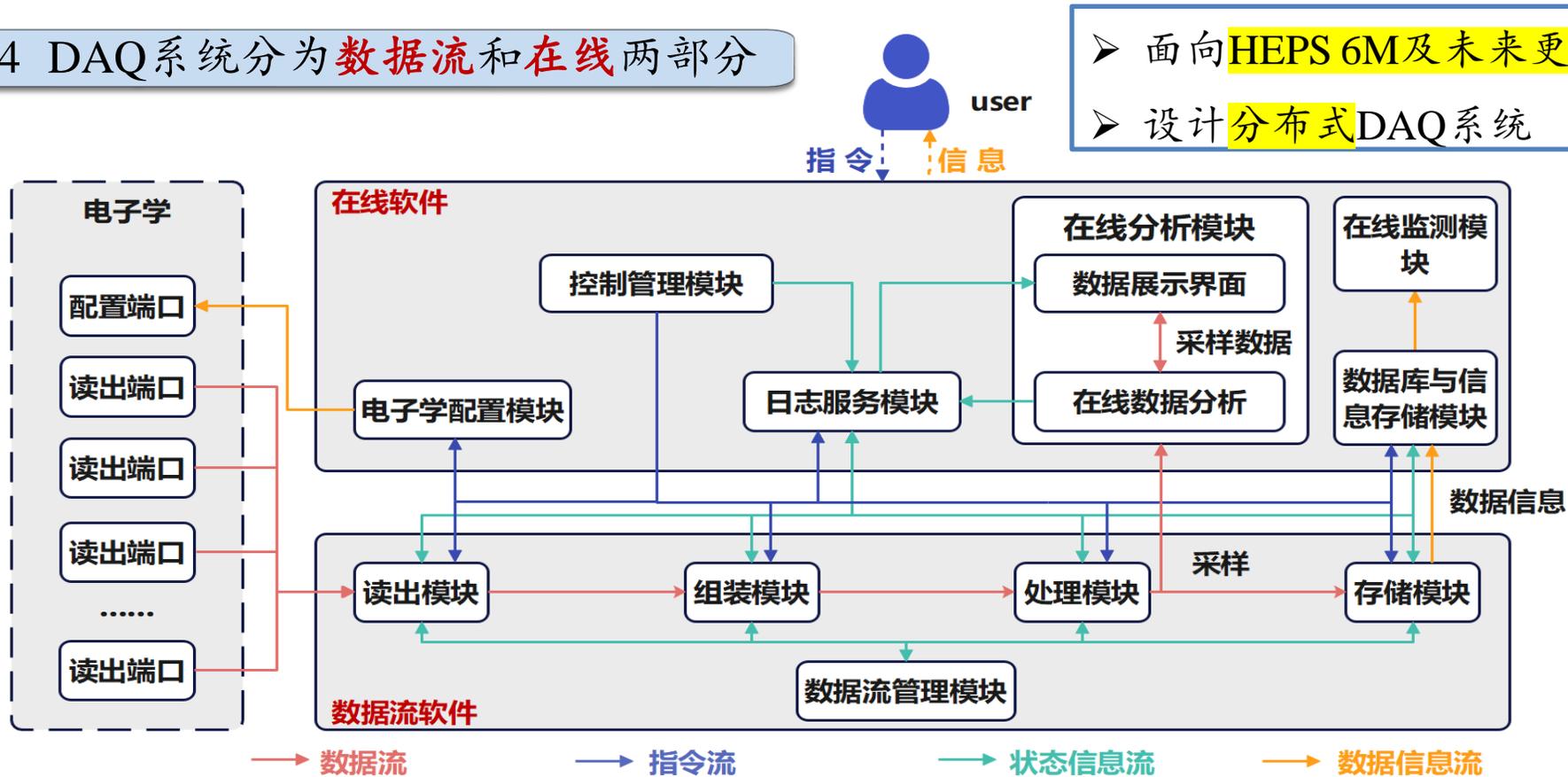
分布式
DAQ系统

HEPS-BPIX4 DAQ系统整体设计架构

HEPS-BPIX4 DAQ系统分为**数据流**和**在线**两部分

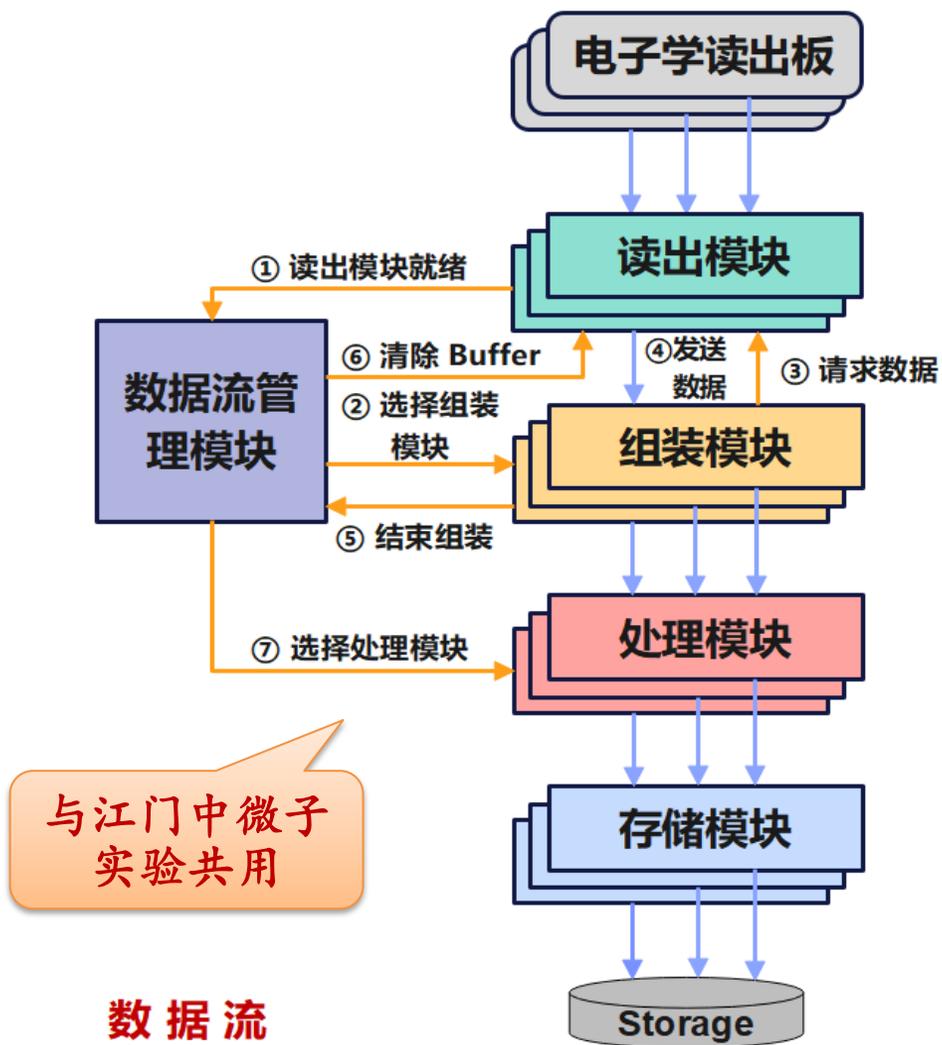
- 面向**HEPS 6M**及未来更大规模探测器
- 设计**分布式**DAQ系统

- 解耦式设计
- 模块化设计



- **数据流:** 负责从前端电子学获取数据完成组装、处理与存盘等功能
- **在线软件:** 负责与用户交互, 提供运行控制, 在线实时监测, 并反馈DAQ信息

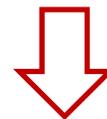
HEPS-BPIX4 DAQ系统数据流设计与开发



优势:

- 灵活的模块化架构，便于集成定制或升级
- 各模块提供接口，支持动态调整，具备可扩展性

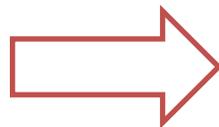
功能	HEPS-BPIX4数据流
读出	高吞吐率瞬态海量数据读出能力
组装	以 每个模块 为单位 拼接组装成 完整帧图像
处理	同步辐射实验需求
存储	实时 全部存储



结合HEPS-BPIX4的**需求与特点**进行定制化设计开发

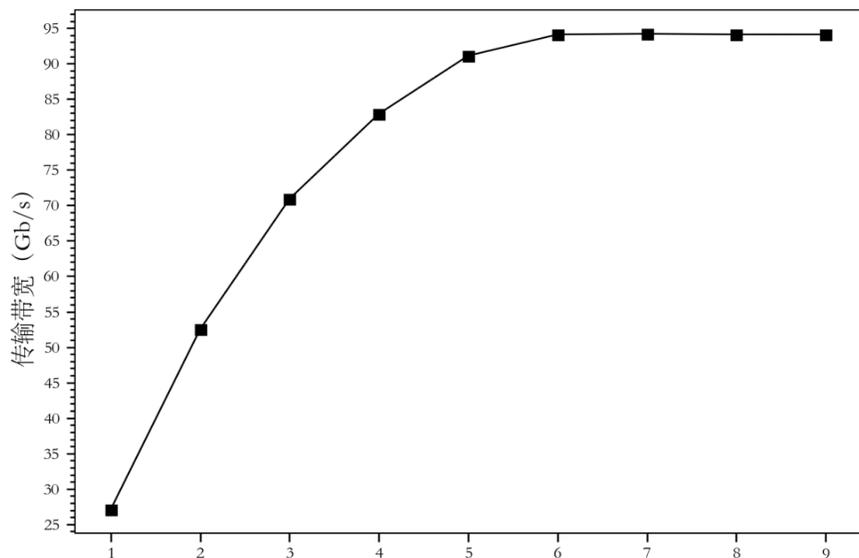
◆ 数据读出模块

- 高吞吐率瞬态海量数据**读出能力**
- 多任务并行：多线程
- 基于TCP的网络传输性能研究
- **可满足192Gbps的数据读出带宽要求**



◆ 数据组装模块

- 不同读出电子学模块同一帧片段成完整帧数据



基于多线程的数据读出性能研究

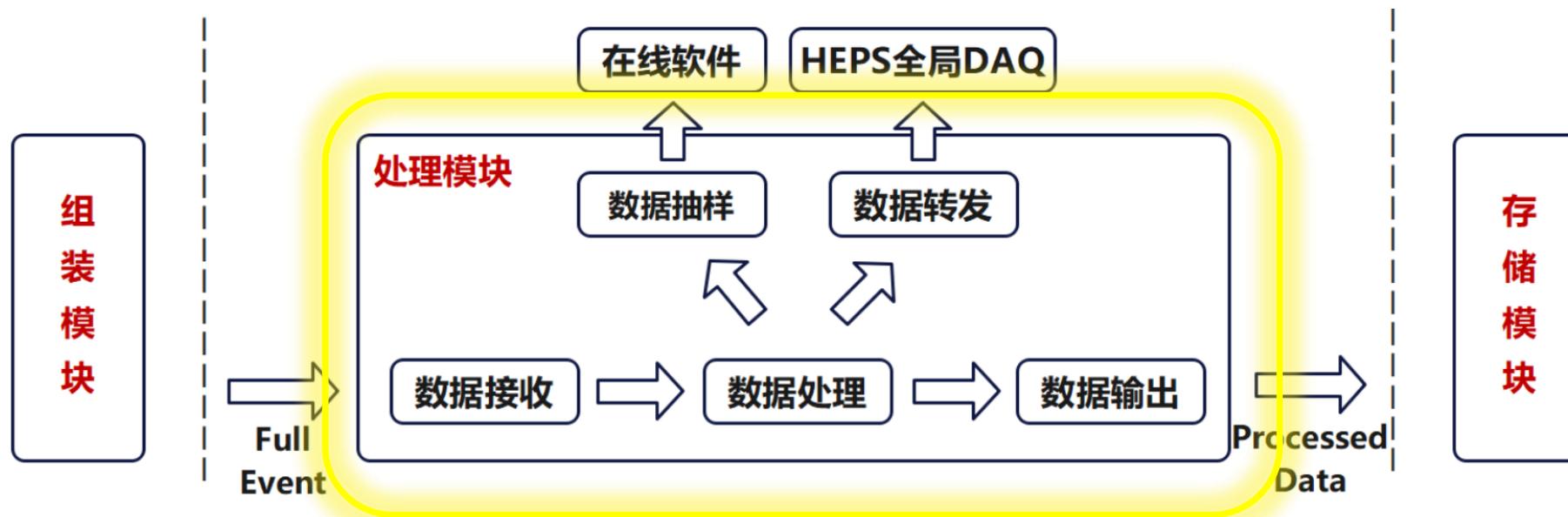
测试环境

服务器名	Daqheps (发送方)	HD01 (接收方)
CPU型号	Intel(R) Xeon(R) Gold 6326 CPU@2.90 GHz (16核)	Intel(R) Xeon(R) Gold 6244 CPU@3.60 GHz (8核)
CPU个数	2	2
CPU逻辑核数	64	32
是否开启超线程	是	是
操作系统	Linux 3.10.0	
网卡	100 Gbps网卡	

服务器名	Daqheps (发送方)	HD01 (接收方)
占用逻辑核数	3	2

多级数据缓存保证数据可靠性

◆ 数据处理模块



- 数据处理 - 提供算法接口便于灵活定制和动态调整
- 数据抽样 - 抽样数据实时图像处理 and 显示
- 数据传输 - 提供数据传输端口，使用**ZeroMQ**协议实现

具备可复用性和可扩展性

可以根据**实验用户需求**灵活定制额外数据处理功能

◆ 数据存储模块

● 格式转换

原始二进制数据 \Rightarrow 指定的图像格式

考虑高能同步辐射实验用户习惯，支持TIFF、HDF5等格式

- 主要任务
- ① 格式转换
 - ② 数据压缩与存储

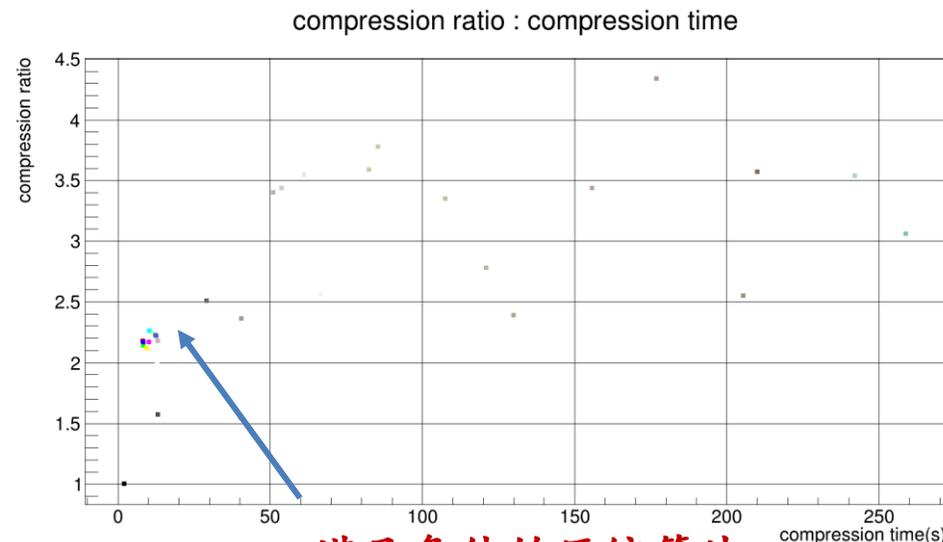
● 数据压缩

- 存储带宽大（24GB/s），压缩数据减轻存储压力
- 选择合适压缩算法

多方面综合比较压缩比和压缩速率进行选择

● 存储方案调研

- 集成度高，尽量减少节点数，压缩体积
- 可满足实际需求 (Dell PowerEdge RAID Controller 12 (PERC 12) 16th Generation (16G) Server)

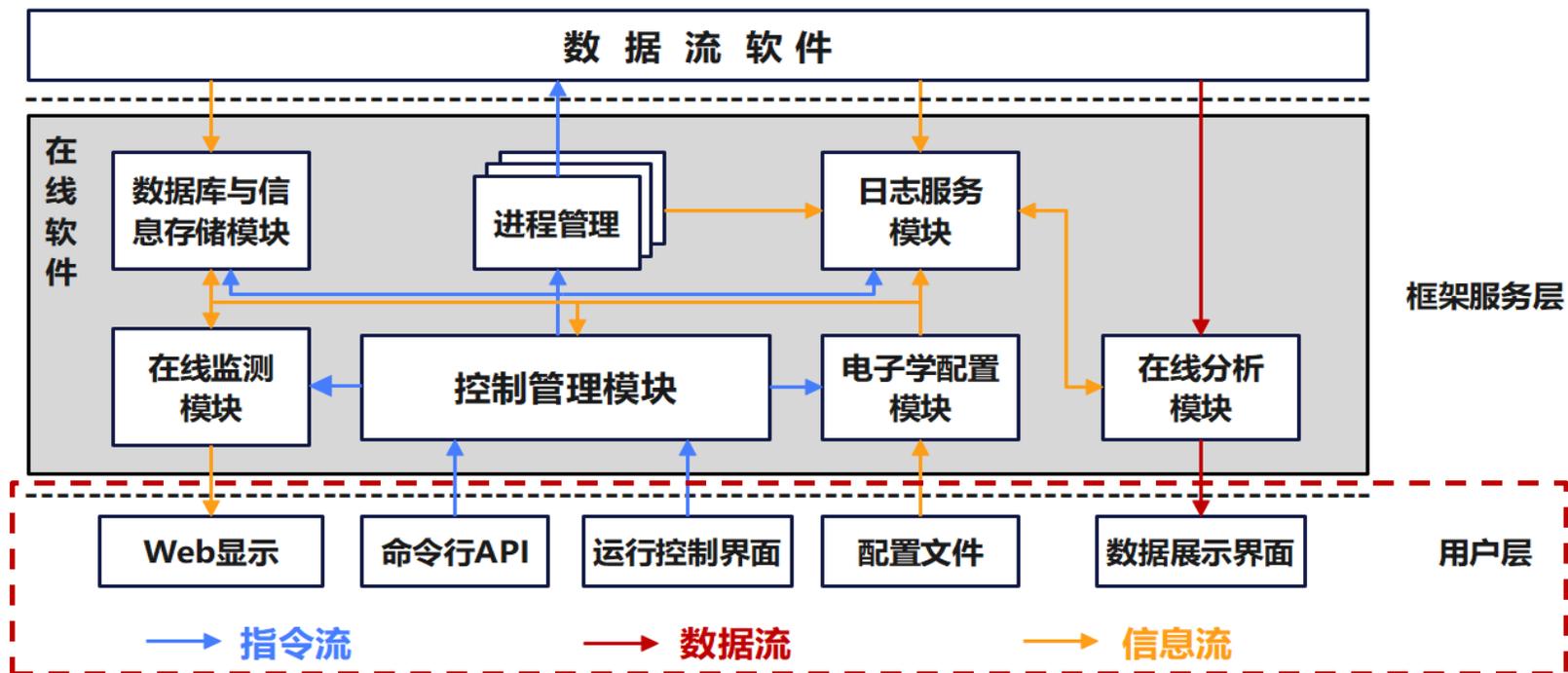


满足条件的压缩算法
(quicklz、lz4等)

不同的压缩算法的压缩率/压缩时间分布图

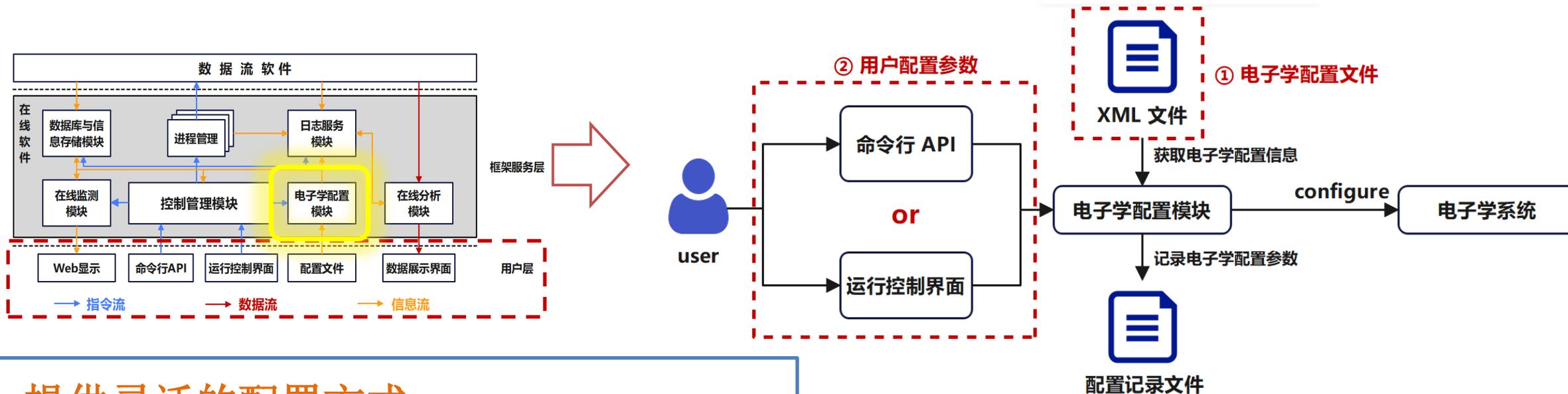
HEPS-BPIX4 DAQ系统在线软件设计与开发

- 与数据流软件进行信息传递，保障数据流的稳定工作
- 与用户进行交互，接收控制命令并将数据流运行状态反馈至用户



- 模块化设计策略
- 进程控制管理
- 数据库与存储
- 数据可视化
 - 实时图像展示
 - 实时数据分析

提供灵活的运行控制方法与友好的数据交互方式



提供灵活的配置方式

- 命令行API配置
- GUI配置

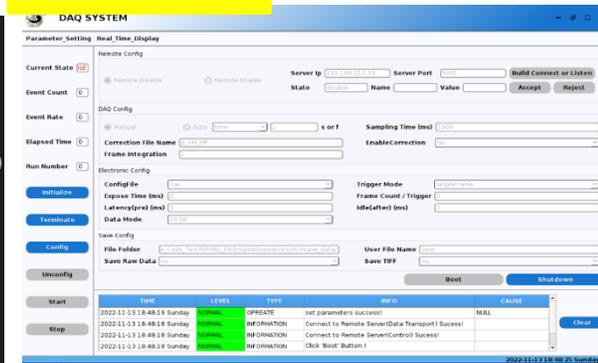
配置信息来源

- 电子学配置文件 - 记录相对固定的配置信息
- 用户配置参数 - 用户配置的探测器运行状态参数

命令行配置

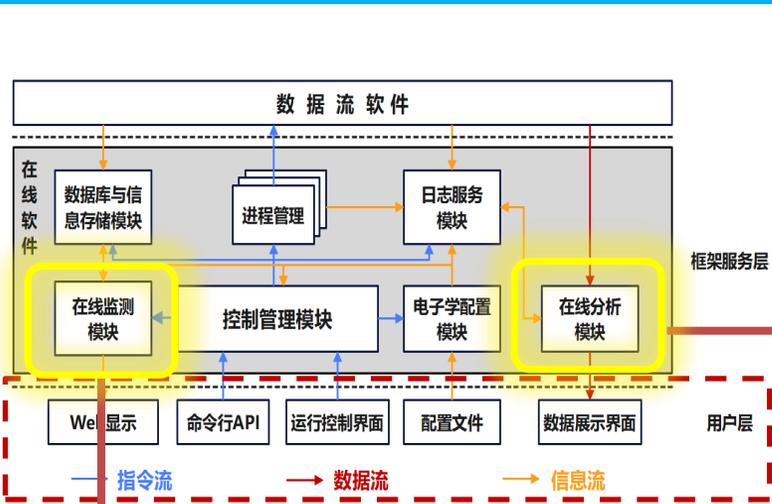
```
[daq@daqheps bin]$ ./server.out --help
Usage: ./server.out [options]
Options:
-sampling_time      数据抽样频率(ms)
-EnableCorrection   是否开启像素修正(true/false)
-ConfigFile         配置文件(low/middle/high)
-Trigger_Mode       触发模式(singleFrame/multiFrame/intelna/gating)
-Expose_Time        曝光时间(ms)
-Frame_Count        曝光张数
-Latency_Time       提前时间(ms)
-Idle_Time          延后时间(ms)
-Data_Mode          数据格式(16 bit/32 bit)
-File Folder        数据存储位置
-User File Name     文件名
-Save_rawdata      是否存储Raw文件
-Save TIFF          是否存储TIFF文件
-all               加载默认路径下的配置文件中的配置信息
```

GUI配置

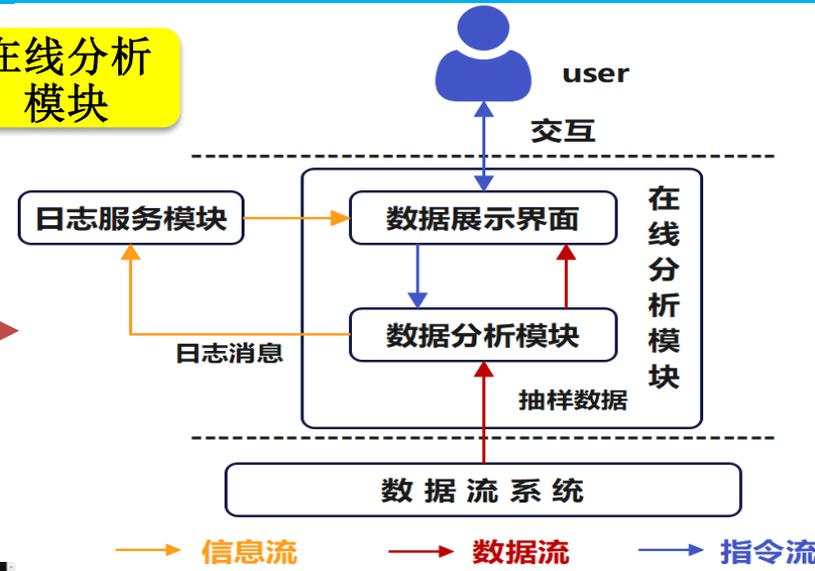


HEPS-BPIX4 DAQ系统在线软件设计与开发

在线数据分析 & 监测模块



在线分析
模块



- 提供功能:
- 实时抽样图像显示
 - 图像分析功能
 - 消息日志显示
 - 状态信息显示

在线监测
模块



集成并兼容了前三代HEPS-BPIX DAQ在线处理功能

- 基于Exporters + Prometheus + Grafana实现
- 实现对系统使用资源的全方面、实时监控
- 便于高效诊断异常，提高实验效率

总结

- 面向HEPS-BPIX前三代样机设计的单机版DAQ系统已经成功部署并应用，技术经过多次迭代更新已经相对成熟
- 面向第四代样机及未来更大规模的探测器，设计了一套分布式DAQ系统
- 目前该系统已使用模拟数据源完成功能性验证，验证了数据获取系统架构设计方案的可行性
- 计划明年正式部署应用于HEPS光源线站系统

Thanks!

BACKUP

使用戴尔最新的16th Generation (16G) Server 服务器与磁盘 (硬RAID)

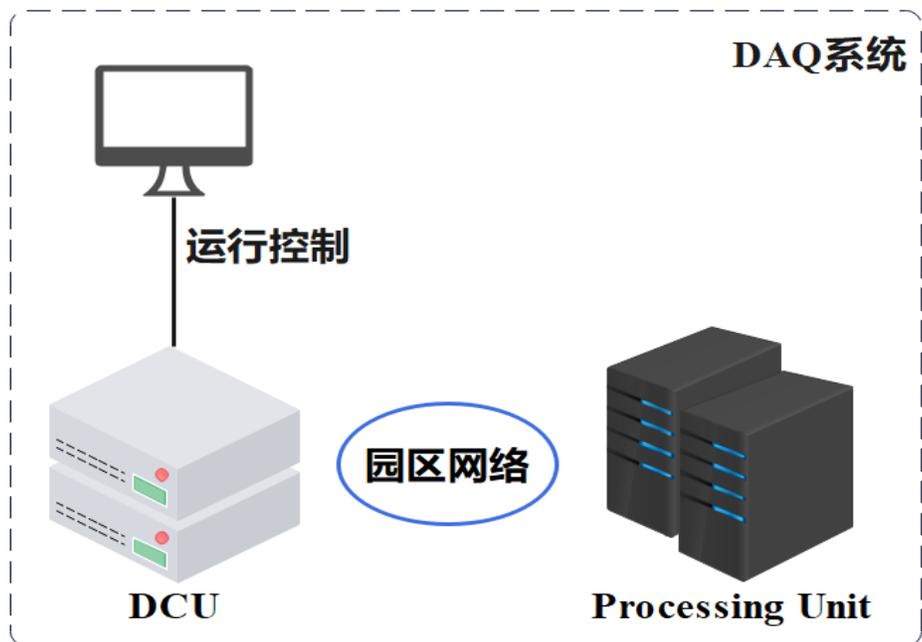
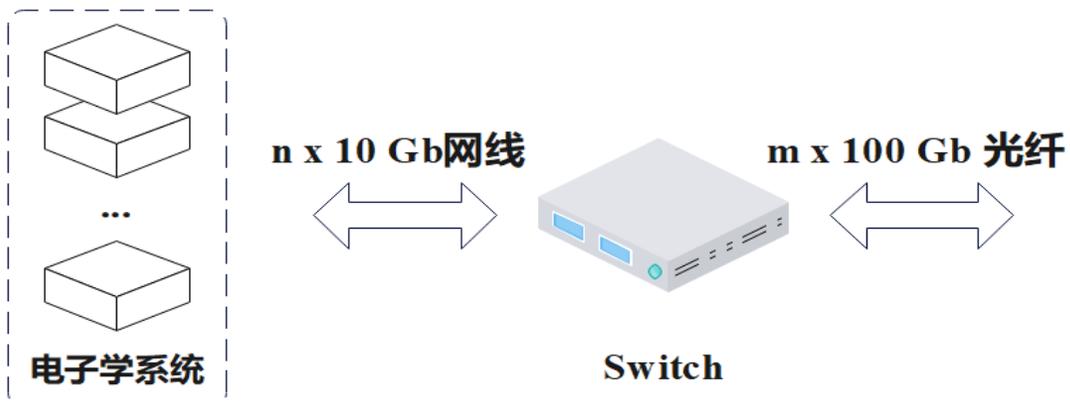
	SAS SSD	NVMe SSD
系统	Dell PowerEdge R760	Dell PowerEdge R660
CPU	Intel Xeon Platinum 8452Y @2.0GHz	
CPU个数	2	
内存	256 GB 4800MHz DDR5 (16x16GB DIMM)	
磁盘种类	PM1655 (24 G SAS SSD)	Dell Ent NVMe AGN MU U.2 3.2 TB (NVMe PCIe Gen4)
磁盘个数	16	8
RAID 5 64 K顺序读	27800 MB/s	28205 MB/s
RAID 5 64 K顺序写	14040 MB/s (~14 GB/s)	10474 MB/s (~10 GB/s)

方法三可以做到一台服务器存储速度 > 10 GB/s，可以达到数据压缩后的存储带宽需求

Backup——HEPS-BPIX4 DAQ系统部署方案研究

方案一：面向HEPS-BPIX4定制的部署方案

考虑到部署与使用灵活性



1-2 台高性能服务器

计算集群

单台服务器存储速度 > 10 GB/s

低频运行时，可以将计算集群里的数据处理放DCU里处理
 高频运行时，DCU算力有限，将占用 CPU 的数据处理的功能放到后续的计算集群里处理

数据实时处理 -> 数据异步处理

数据处理	测试环境	处理0.15 M像素 平均用时	资源预估 (256pixel×576pixel×40个/1 kHz/双 阈值)
数据解析	E7-8891 v4@2.80GHz(10物 理核)×4 开启超线程	~ 2.1028 ms	~160个逻辑核
映射转换		~ 395 us	~30个逻辑核
图像修复		~ 500 us	~40个逻辑核
平场校正		~ 1.427 ms	~110个逻辑核
格式转换 (转TIFF)		~ 690 us	~55个逻辑核