



μ XI: 新一代软件定义数据读出技术

曹 平

2025年7月23日

中国科学技术大学
(核科学技术学院、核探测与核电子学国家重点实验室、先进技术研究院)
合肥中科采象科技有限公司



目 录

1

仪器平台发展

2

μ XI数据读出平台

3

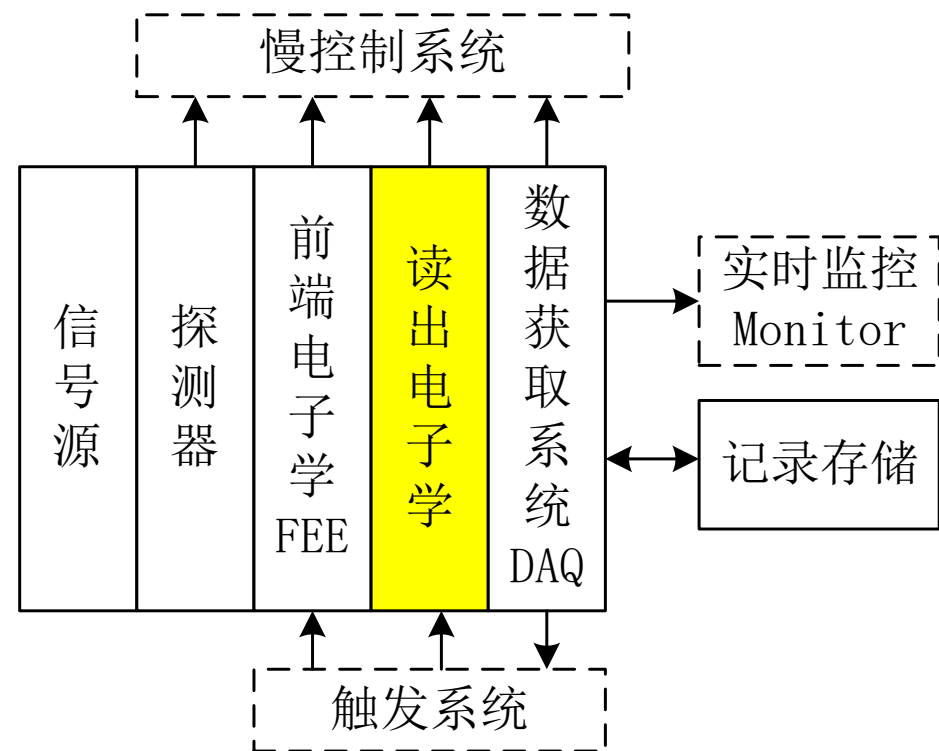
μ XI平台应用

4

工作设想及总结

核与粒子物理实验的数据获取基本原理

- 实验科学或工程应用，具有明确的科学或工程目标
- 需要满足特定条件的科学数据
- **科学数据怎么来？**
- **信号来源：**加速器、对撞机、放射源、宇宙线等等
- **信号探测：**探测器（气体、液体、闪烁体、半导体、带电粒子、中性粒子等等）
- **数据获取：**电子学系统、计算机系统

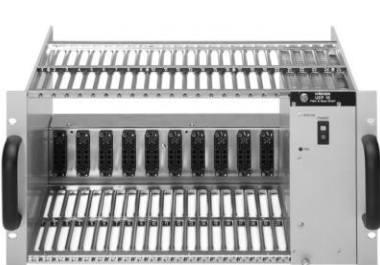


数据读出系统 (readout) 的作用

- 位于前端电子学 (FEE) 与数据获取系统 (DAQ) 之间
- 将数据或信号从FEE (按特定格式) 读出并送至DAQ
- DAQ一般特指PC (farm) 上运行的软件系统
- 读出系统一般位于读出机箱中

核仪器的发展离不开平台的标准化

- 插件式：功能模块化
- 标准化：机械尺寸及结构、电源电压、供电方式、IO电平标准
- 仪器总线：FastBus、CAMAC、VME、PCI、PXI、PXIe、ATCA
- 总线传输协议标准化：并行、串行
- 数字化平台：仪器总线+机箱控制器



NIM



CAMAC



VME



Compact PCI

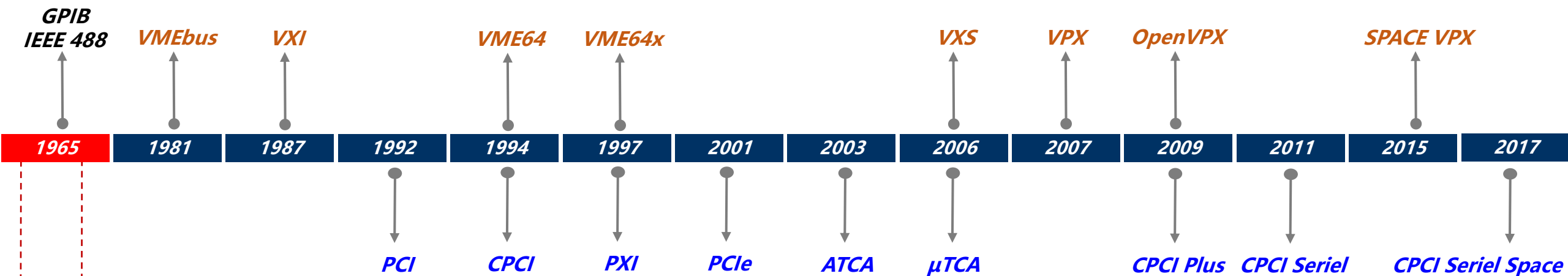


ATCA



PXI

模块化仪器平台发展历程



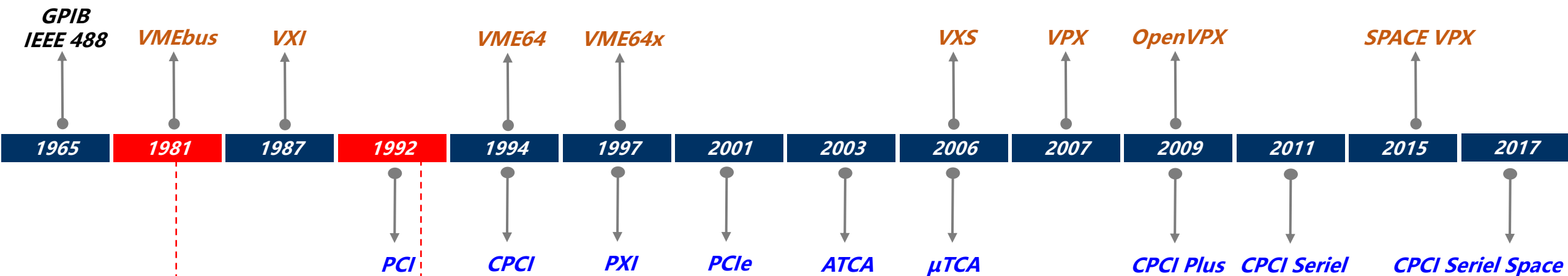
1972年 ESONE提出
CAMAC

1964年 USAEC提出核数据领域仪器标准
NIM

仪器平台发展的早期阶段——插件式模块化思路

- 为解决仪器的**机械与电气互换性**问题，实现**插件式**仪器的标准化，1964年NIM提出，成为最早的仪器平台，专用于核仪器的设计。**其插件式设计思路也是后期模块化仪器设计思路的起源**
- 标准化的模块设计，包括电气机械标准、环境适应性、电磁兼容性及电气安全
- 1965年惠普公司设计HP-IB，是一种设备和计算机连接的总线，规范了总线接口的**机械及电气标准**，1975年引入IEEE标准，成为最早推广应用的**工业总线**

模块化仪器平台发展历程



• 1992年 Intel提出**PCI总线**



• 1981年 Motorola提出**VME总线**

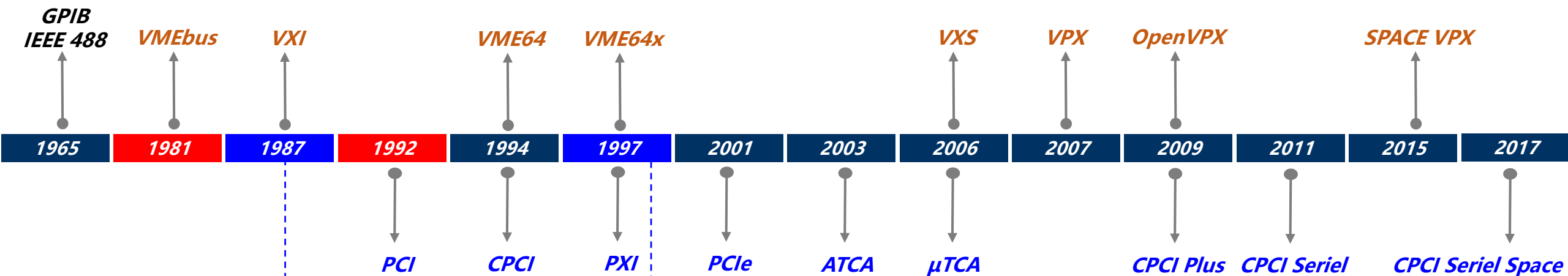


开启了高性能总线技术的时代

计算机总线发展演变

- 计算机总线技术得到了大范围应用，以**PICMG联盟**与**VITA联盟**为代表的组织推进总线不断发展和应用
- 形成**PCI总线**及**VME总线**为代表的两大主流总线技术，有了总线技术的加持，模块化设计思路得到了广泛应用

模块化仪器平台发展历程



1987年 HP和Tekronix等五家公司
基于VME提出VXI



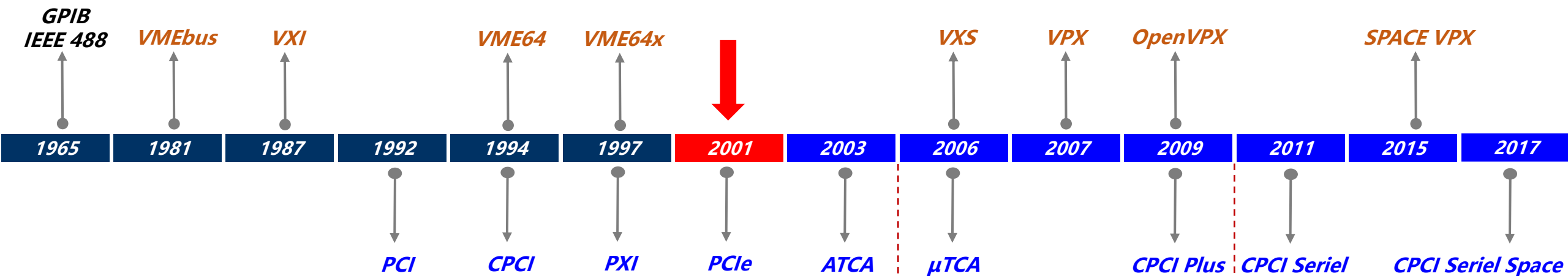
1997年 NI基于CPCI提出PXI,
并于1998年联合成立PXISA联盟

开启了高性能总线的工业应用新时代

工业总线及仪器平台技术的发展

- 在计算机总线技术基础上发展**工业总线**，提供**高可靠和模块化**的工业解决方案（**VXI**、**PXI**）
- 在计算机总线的基础上，引入仪器领域专用的**触发总线**、**时钟总线**
- 引入**虚拟仪器**概念，在仪器领域全面引入软件技术，极大推进了仪器技术的进化

模块化仪器平台发展历程



工业总线的变革——串行化数据传输技术

- 随着PCIe总线广泛应用，以其为代表的**串行工业总线**推动了工业总线全面向串行总线技术的进化，此时期陆续推出了以**PXIe**、**VXS**为代表的串行工业总线
- 先进的电信计算平台ATCA**，其背板开始转向不再局限于一种总线协议，支持多种串行传输协议标准（PCIe、InfiniBand / RapidIO、10G / 40G / 100G以太网）

2010年 AXIe联盟基于ATCA提出AXIe

2004年 安捷伦（Keysight联合R&S、Tektronix等）基于以太网技术提出**LXI标准**，旨在替代GPIB、VXI/PXI

2005年 PXISA基于PCIe提出**PXIe**

仪器平台技术的对比

仪器平台技术的特点:

- 模块化设计
- 多种传输协议
- 协议开放
- 高速串行传输
- 触发总线
- 时钟总线
- 虚拟仪器
-



下一步发展方向?

▶ NIM (1964)



- 总线: 无
- 单板尺寸结构: 约5U
- 特点: 高可靠、仅供电

▶ CAMAC (1972)



- 总线: 并行、适配不同CPU
- 单板尺寸结构: 3U/6U
- 特点: 背板走线丰富

▶ VXI (1987)



- 总线: 并行VME Bus
- 单板尺寸结构: 3U/6U
- 特点: 专用触发时钟总线、后插

▶ PXI (1997)



- 总线: 并行PCI
- 单板尺寸结构: 3U/6U
- 特点: 专用触发时钟总线

▶ PXIe (2005)



- 总线: 串行PCIe
- 尺寸结构: 3U/6U
- 特点: 专用触发时钟总线

▶ AXIe (2010)



- 总线: 串行PCIe&Ethernet
- 尺寸结构: 约5U
- 特点: 专用触发时钟总线



目 录

1

仪器平台发展

2

μ XI数据读出平台

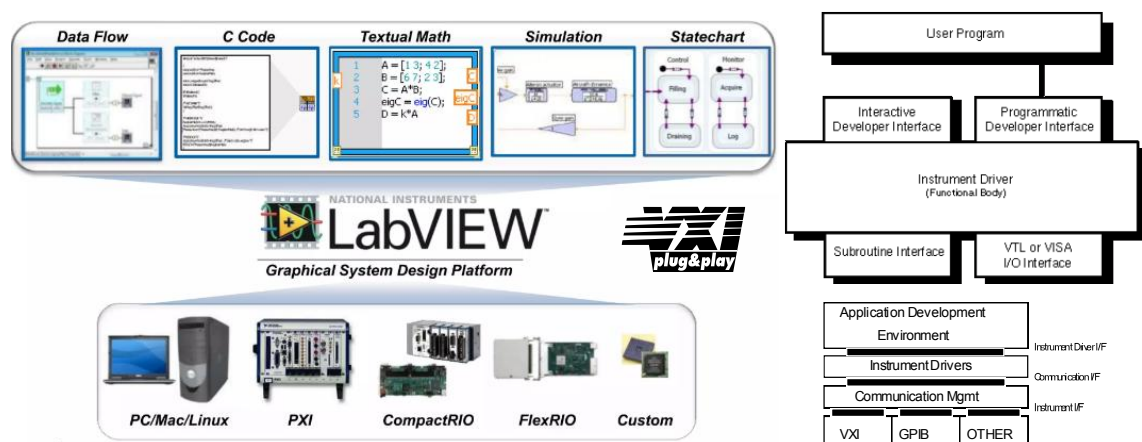
3

μ XI平台应用

4

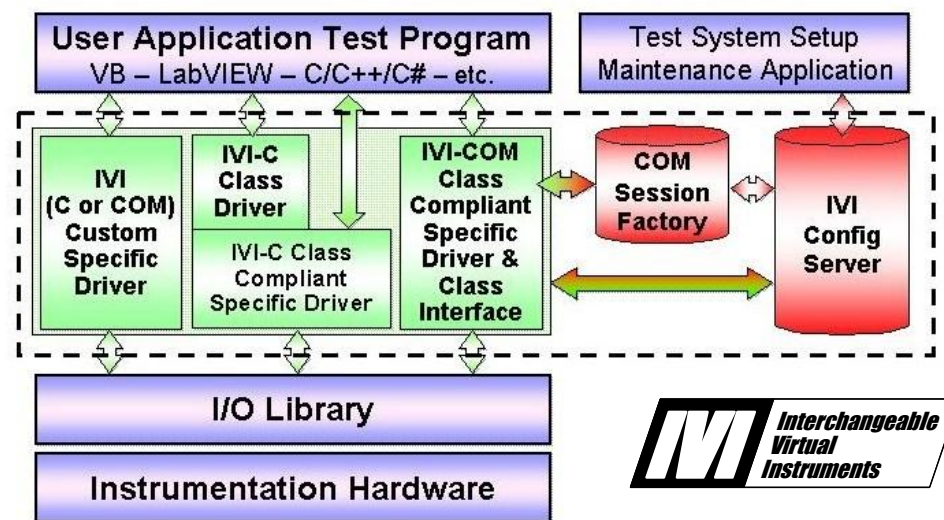
工作设想及总结

虚拟仪器及可互换虚拟仪器技术的发展：标准化



虚拟仪器 (Virtual Instrument) 概念由美国国家仪器公司 (NI) 于 **1986年** 提出

- 利用**模块化硬件**结合**高效灵活软件**来完成各种测试、测量和自动化的应用
- 虚拟仪器允许终端用户**通过软件对仪器的核心功能进行定义，将仪器行为与I/O行为进行分离**
- **VISA (VI Software Architecture)**：VPP的IO接口标准 (VPP-4.X)，可实现对VXI、GPIB、RS-232、Ethernet等接口的标准化控制



IVI系统架构图

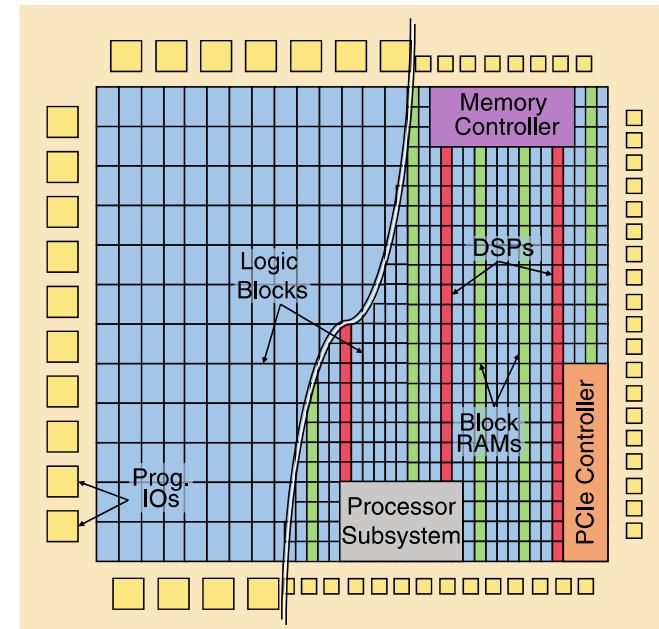
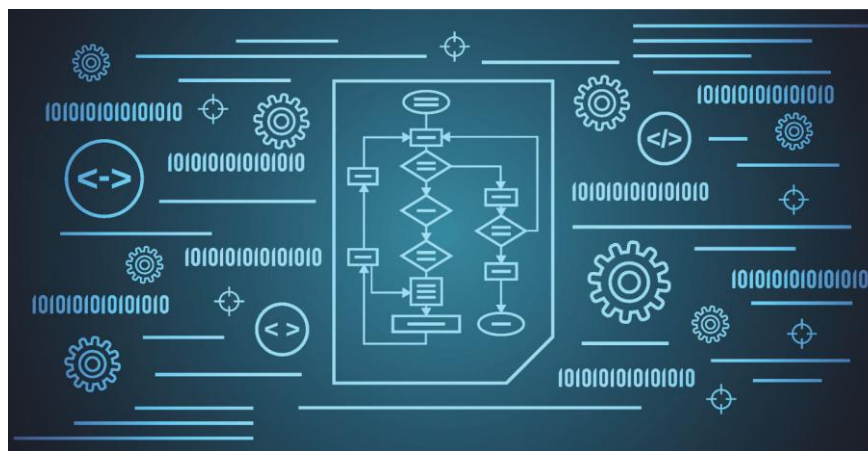
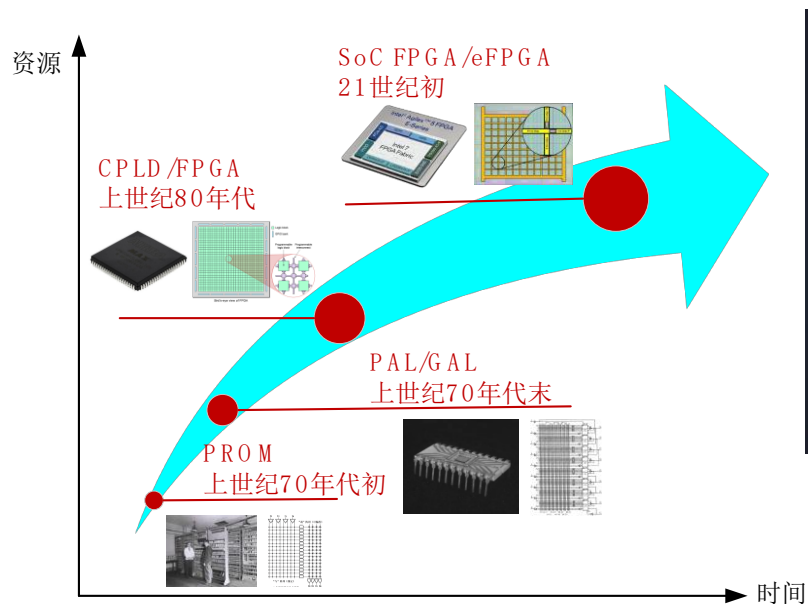
可互换虚拟仪器 (Interchangeable VI) 技术规范由IVI基金会于**1998年**推出

- 实现仪器驱动的**可互换性**、开发灵活性、测试高效性及保证测试品质
- 仪器涵盖：示波器、数字万用表、电源、任意波发生器、射频信号发生器、频谱分析仪等**13类仪器**

可编程逻辑器件技术的发展

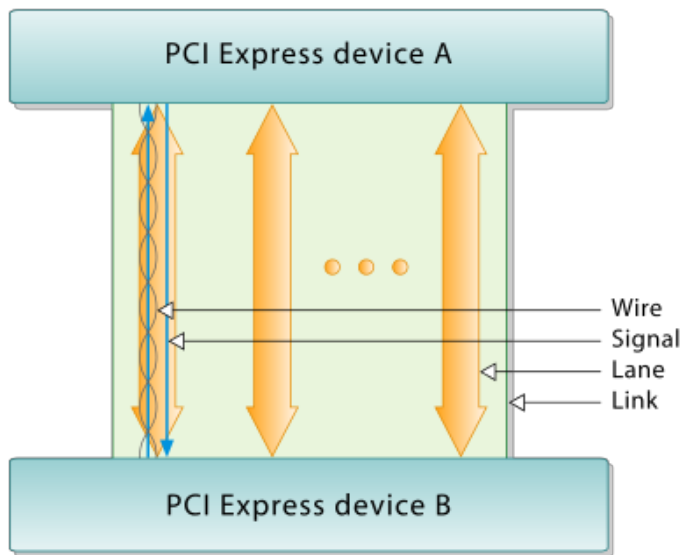
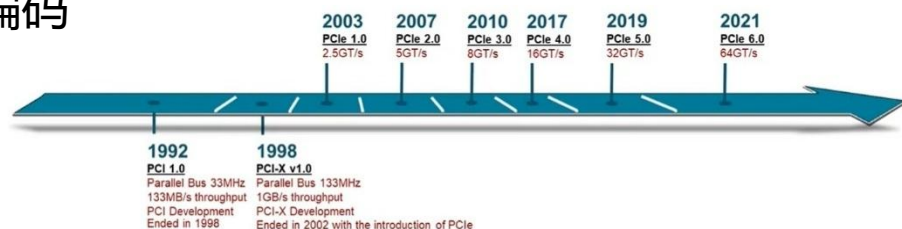
可编程逻辑器件（PLD）是一种**通用器件**，但逻辑功能可由用户通过对器件**编程**来设定，成为现代电子技术必不可缺的常用技术

- 最大特点：可编程，通过HDL重新“编程”（**烧写固件**），实现器件可执行**不同硬件功能**
- 相比于早期，现代FPGA具有强大的硬件实时处理（RAM、DSP）和数据通信能力（Transceiver、PCIe...）
- 应用场景：**仪器仪表、工业控制、网络通信、数据中心、汽车电子、人工智能等**，广泛应用



PCIe总线技术的发展

- 高速串行互联技术的发展，推动PCIe（PCI Express）技术的出现
- **点到点数据传输技术**，每个设备都有一个专用连接而不需要共享带宽
- 一个PCIe通道在每个方向同时以2.5Gb/s传送数据并使用8b/10b编码
- PCIe通道灵活组合：x1，x2，x4，x8，x16和x32
- **设备不共享总线，容易热交换（Hot-swap）**

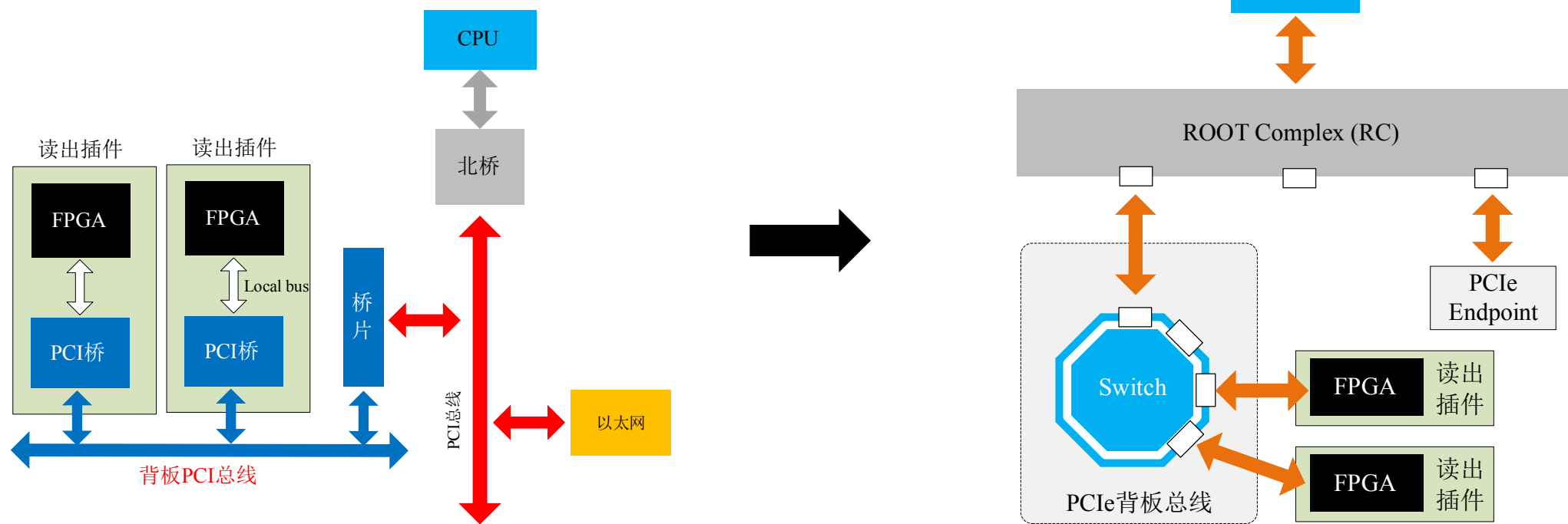


PCIe版本	单通道传输速率 (GT/s)	编码方式	编码效率	×1单向带宽 (GB/s)	×16总带宽 (双向, GB/s)
PCIe 1.0	2.5	8b/10b	80%	0.25	8 (4 Tx + 4 Rx)
PCIe 2.0	5.0	8b/10b	80%	0.5	16 (8 Tx + 8 Rx)
PCIe 3.0	8.0	128b/130b	98.5%	0.985	31.5 (15.75 Tx + 15.75 Rx)
PCIe 4.0	16.0	128b/130b	98.5%	1.97	63 (31.5 Tx + 31.5 Rx)
PCIe 5.0	32.0	128b/130b	98.5%	3.94	126 (63 Tx + 63 Rx)
PCIe 6.0	64.0	PAM4 + FEC	~95%	7.56	242 (121 Tx + 121 Rx)

数据读出模式的变化

读出机箱内，控制器从功能板卡读出数据的模式发生变化：

- 传统：FPGA+PCI桥片的数据读出模式
- 现代：基于FPGA+IP核的单芯片解决方案

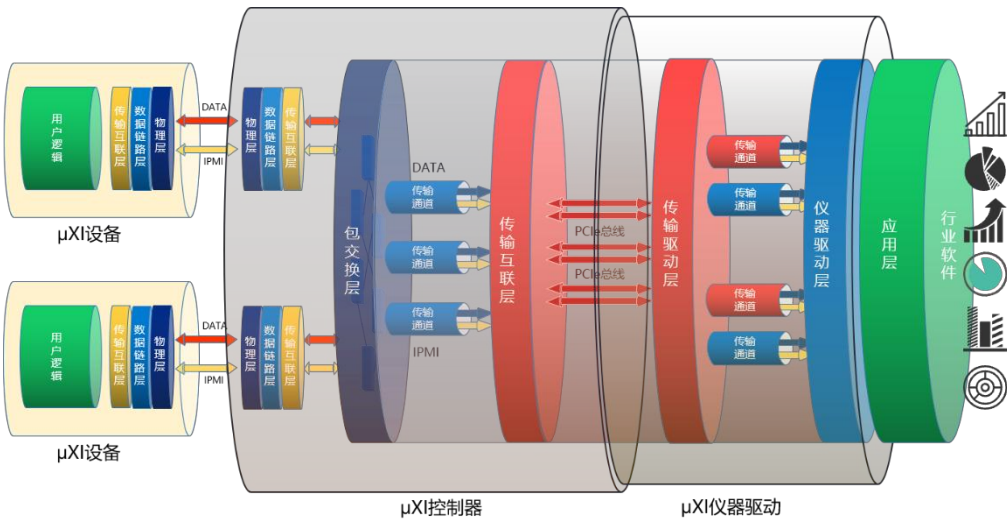


μXI：一种全新的开放式软件定义模块化仪器架构



μXI: **micro** **eX**tensions for **I**nstrumentation

重新定义模块化仪器 DNA：仪器定义拓展到软件与固件层



- ✓ **更紧凑、更灵活** 的体系架构
- ✓ **更智能化** 的机箱及设备管理技术
- ✓ **更高性能** 的背板总线
- ✓ **第一个支持** 逻辑可重构和同步定时技术的控制器
- ✓ **更通用、更可靠** 的数据读出技术

	CPCI	PXI	PXIe	μXI
机箱管理	无		无	IPMI智能化管理 1
数据总线及速率	PCI 320 Mbps		PCIe 64 Gbps	PCIe + GTH 64 Gbps
同步时钟	无	PXI_CLK10	PXI_CLK10 PXIe_CLK100 PXIe_SYNC100	TCLK (支持自定义配置, 高性能) 2
触发总线及传输速度	无	PXI_STAR 直连线	PXI_STAR PXIe_DSTARA PXIe_DSTARB PXIe_DSTARC 625 Mbps	Tx1 & Rx1 10 Gbps
控制器	Intel CPU, 无授时及触发处理, 不支持FPGA可编程		Intel CPU, 无授时及触发处理, 不支持FPGA可编程	可支持Intel、ARM、SoC、国产CPU等多种体系, 支持授时及触发处理, 支持FPGA可编程 3
设备卡尺寸	3U、6U		3U	3U、6U、灵活定制 4
数据读出	无定义, 自行开发			通用化数据读出技术 5
通信体系	仅提供数据传输通道			具备指令集, 协议及通用IP 6

智能化机箱

高性能背板

逻辑可重构的同步定时控制器

多形态设备卡

通用化读出

仪器指令集



读出机箱、控制器、软固件体系

μ XI模块化仪器平台架构

■ 定义了统一的硬件、软件及固件系统架构，设备组成包括：

1. μ XI设备卡

- 标准结构的用户业务处理设备

2. μ XI控制器

- 可软件定义的控制及数据处理平台

3. μ XI仪器软件

- 仪器运行的操作软件

■ 数据传输链路：

1. μ XI总线

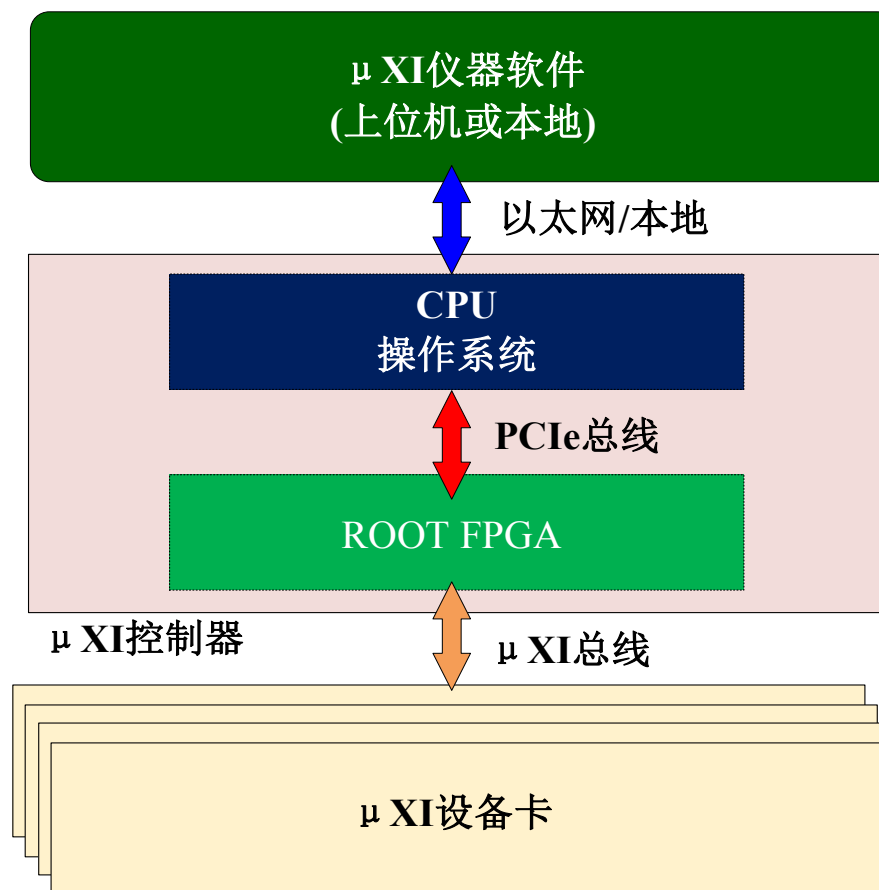
- 设备卡与控制器之间的传输链路

2. PCIe总线

- 控制器中ROOT FPGA与CPU传输链路

3. 以太网或本地传输

- 读出平台与仪器软件间的传输链路



μXI总线的构成

μXI总线定义为外设与控制器ROOT FPGA之间的传输总线，具备**三个独立的串行数据传输通道**：

1. 触发&时钟通道（可配置）

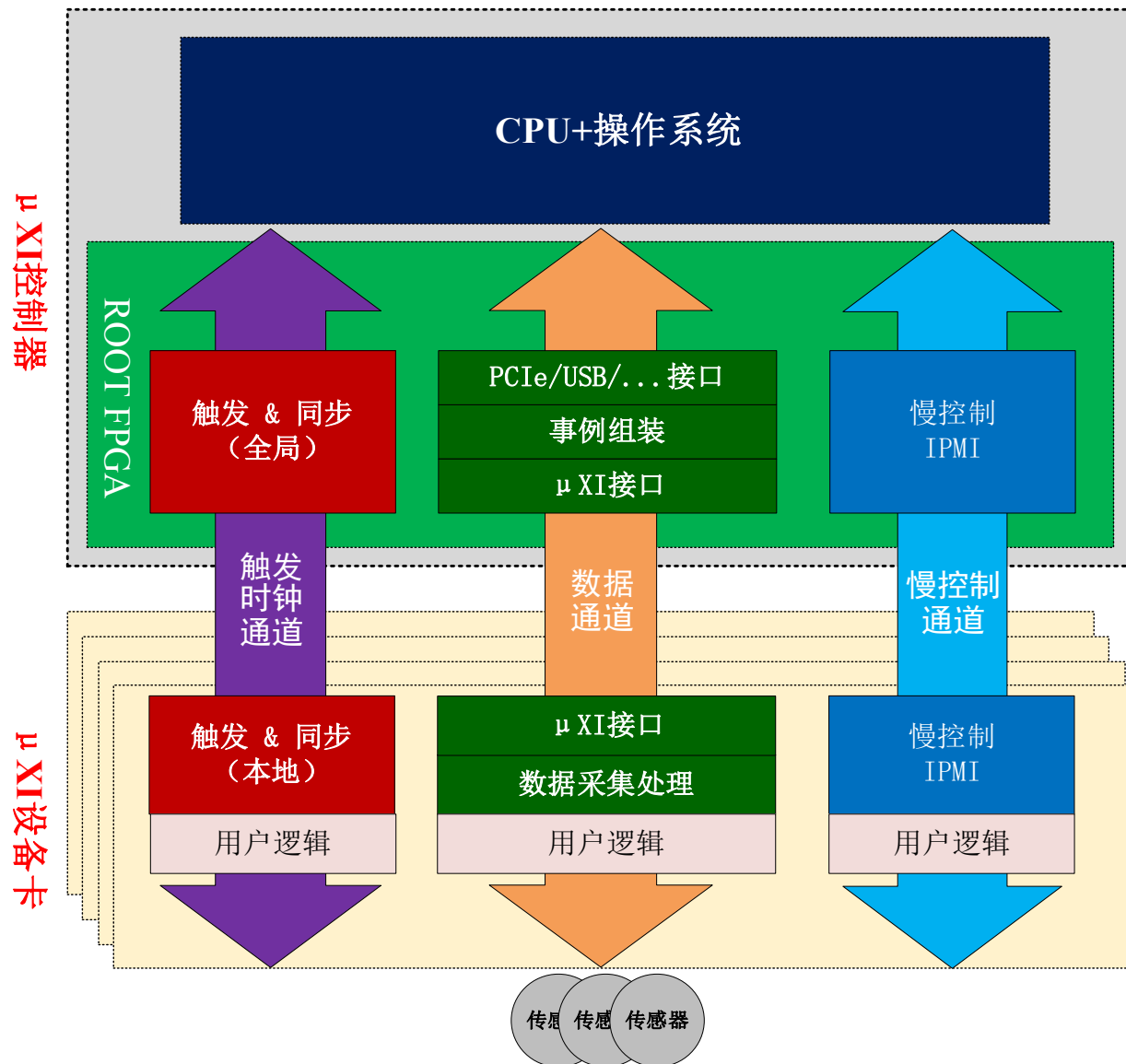
- 子触发数据汇聚传输
- 总触发判选及扇出
- 同步时钟处理及扇出

2. 数据通道

- 多lane的高速串行数据传输
- 双向传输能力
- 配合软固件架构完成高效稳定的数据传输

3. 慢控制通道

- 系统工作状态及信息的智能化监测
- 开机自动扫描外设及运行



μXI软固件架构

■ I/O接口层 → I/O驱动层

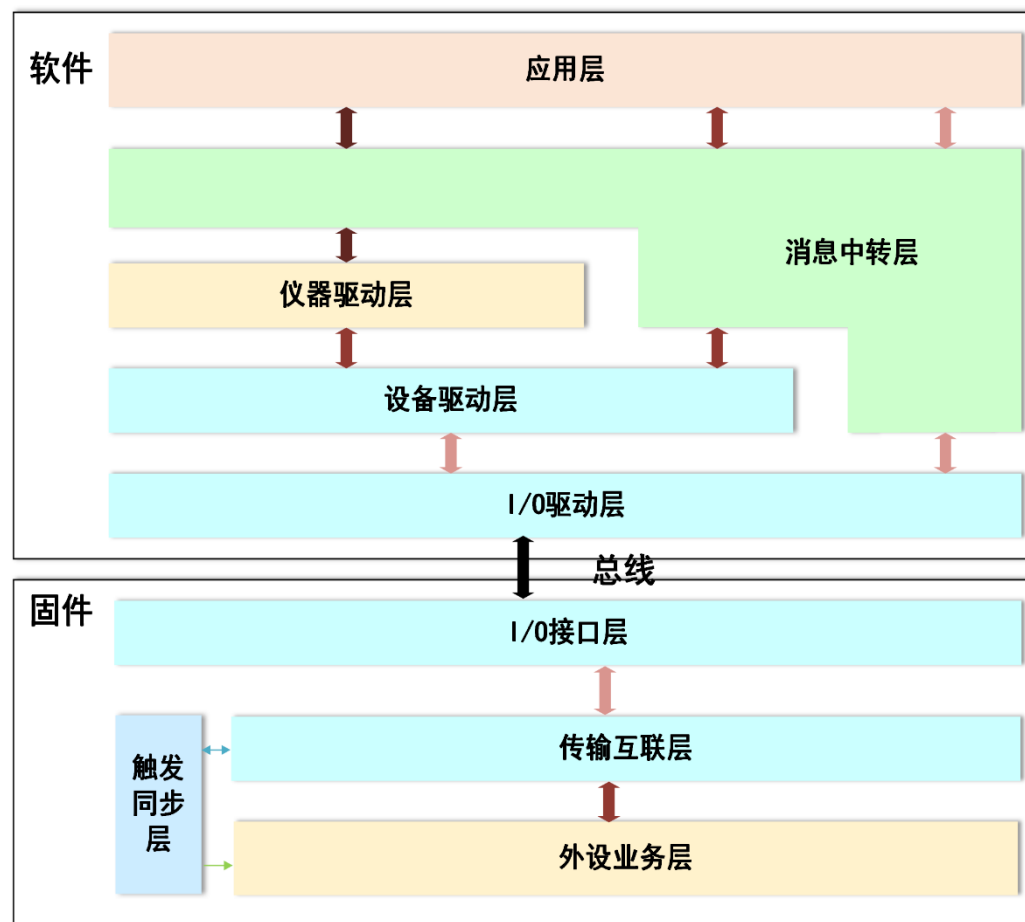
- 完成软硬件数据交互

■ 传输互连层 → 设备驱动层

- 完成基于μXI协议的数据传输
- 实现μXI设备虚拟化，多种设备形态统一

■ 外设业务层 → 仪器驱动层

- 实现仪器行为模型抽象
- 实现仪器API接口标准化：接口定义、仪器指令集



μXI软固件架构

关键特性

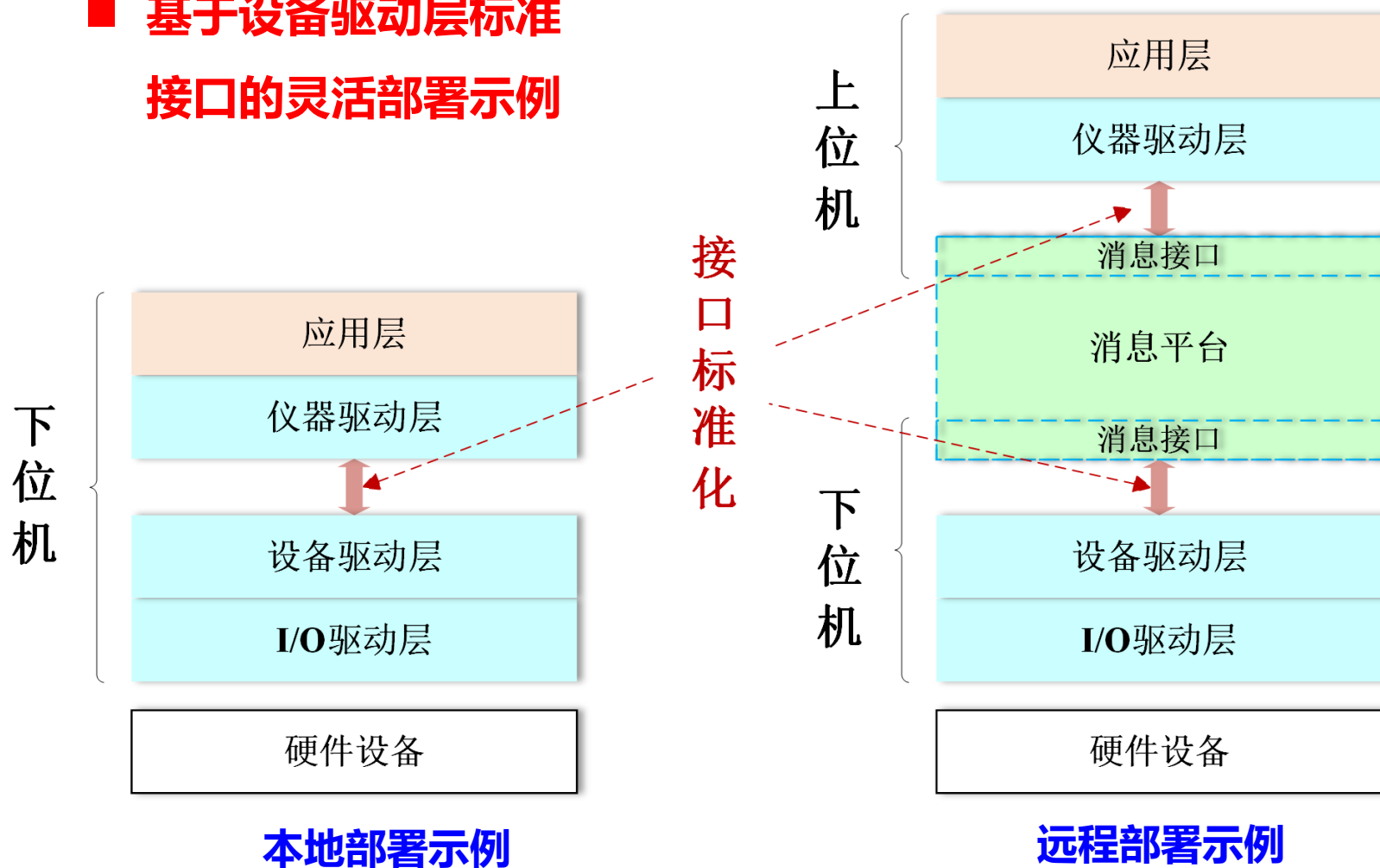
- 功能丰富的软件SDK，兼容 C++、C#、LabView、Python
- 固件IP模型标准化（通信协议、输入输出接口、寄存器定义等）

应用优势

- 功能丰富的软件SDK及固件IP，快速集成应用开发
- 兼容多种开发语言，满足不同的客户二次开发需求

μXI软件接口标准化

■ 基于设备驱动层标准 接口的灵活部署示例



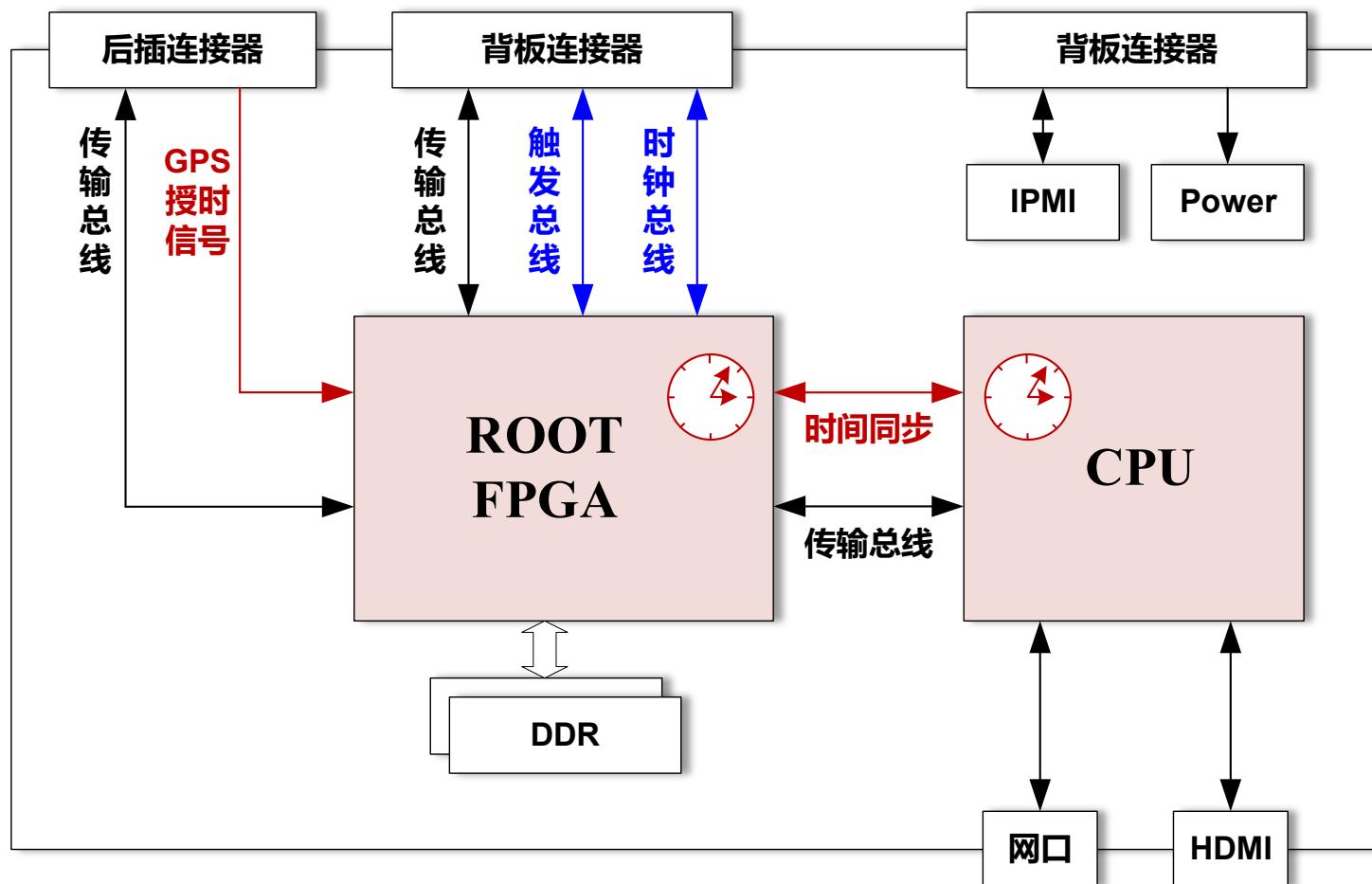
关键特性

- 接口设计标准化
- 消息平台的灵活互联

应用优势

- 快速开发迭代
- 可维护性高

μXI控制器



μXI控制器结构

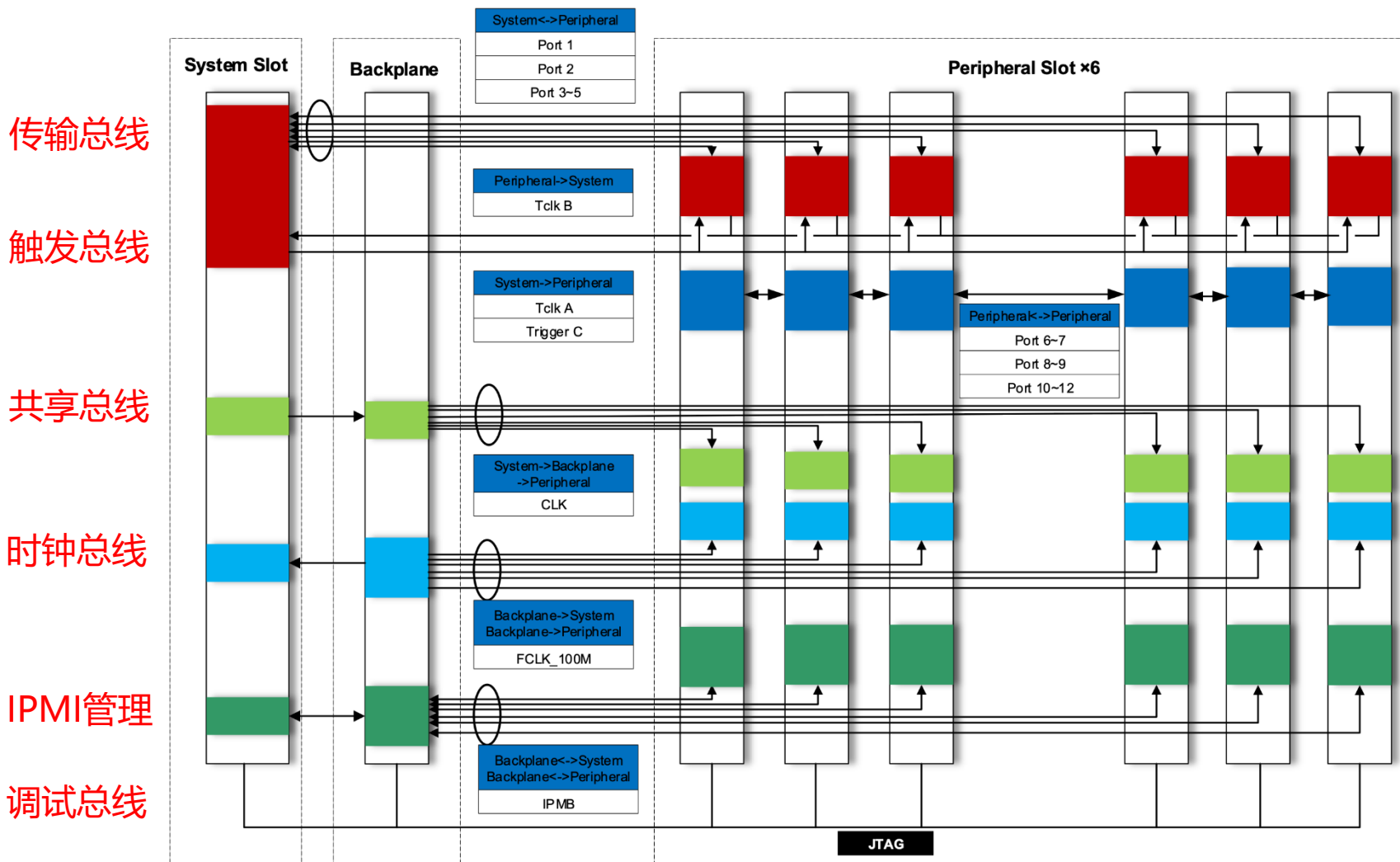
关键特性

- 集成CPU与FPGA的逻辑可重构同步定时控制器
- 提供高精度同步时钟、同步时间、同步触发
- 提供板对板的高速数据路由

应用优势

- 外设与CPU隔离，高可靠热插拔
- 无需额外的定时同步模块，即可提供高精度同步时钟、同步触发

μXI机箱背板



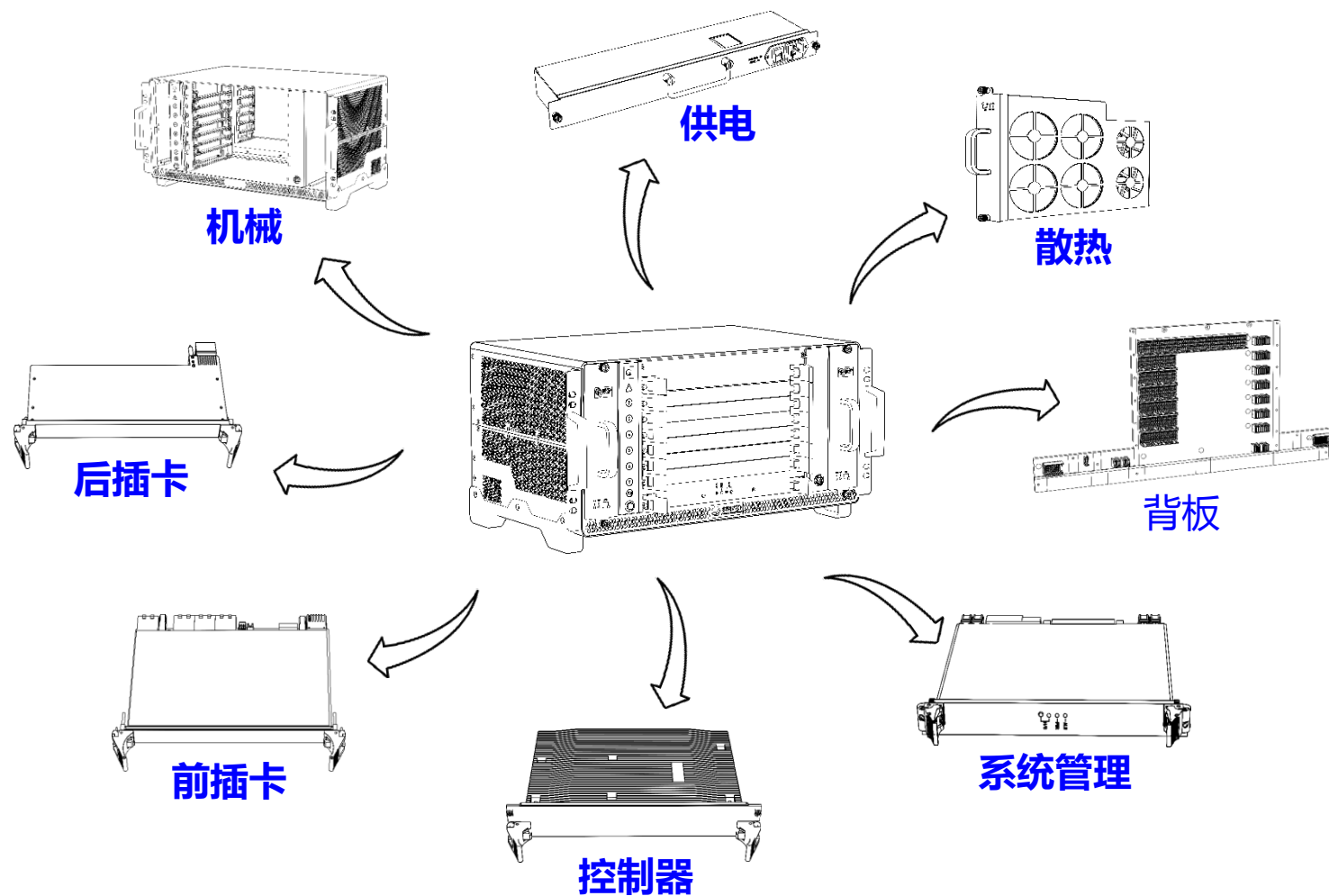
关键特性

- 多样总线资源
- IPMI智能管理
- 无源背板设计

应用优势

- 无源设计支持多种**串行传输协议**，适配更多应用场景，减少产品迭代需求
- 多样总线资源满足仪器领域、工业领域、科研领域等应用，适用范围更广

μ XI机箱结构



μ XI机箱硬件组成

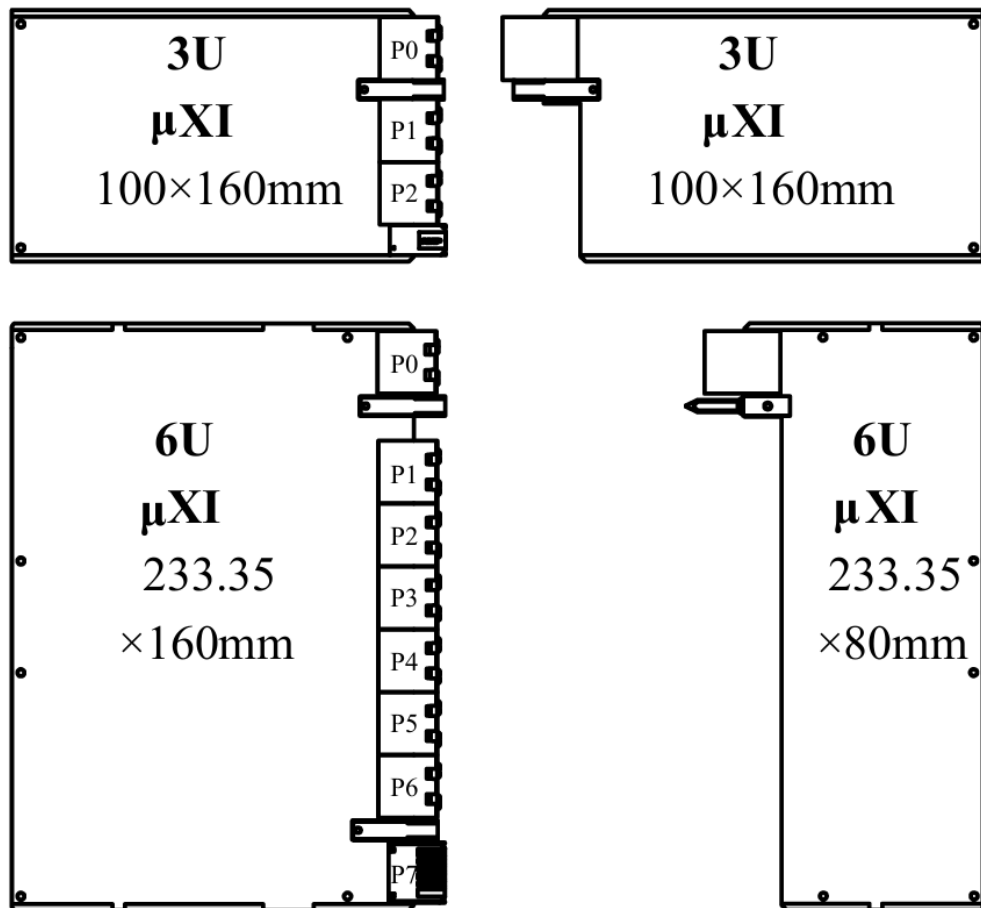
关键特性

- 机箱及板卡模块化设计
- 高可靠的智能设备管理
- 高可靠的机械及电气设计

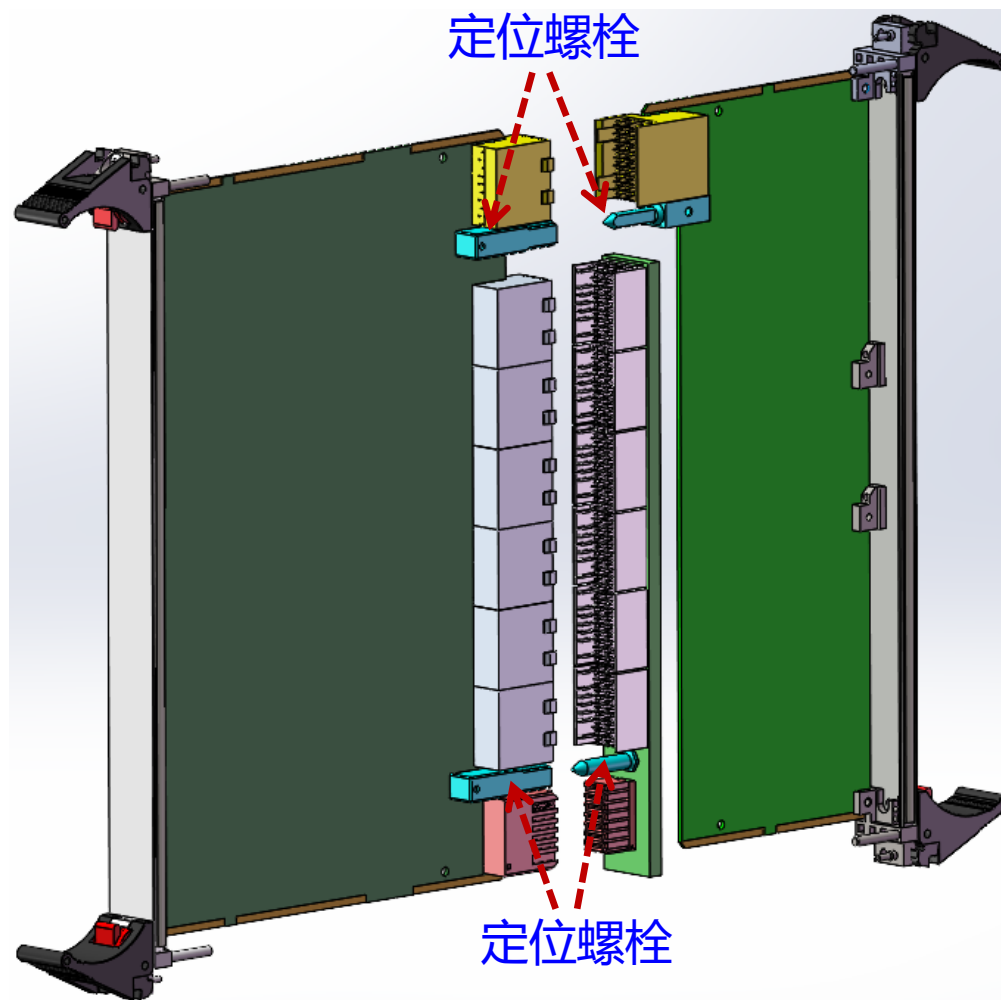
应用优势

- 机箱部件快速替换，即插即用，维护成本更低
- 全智能化的供电与扇热管理、板卡状态监控，实时报告仪器的健康状态

μ XI插板结构尺寸

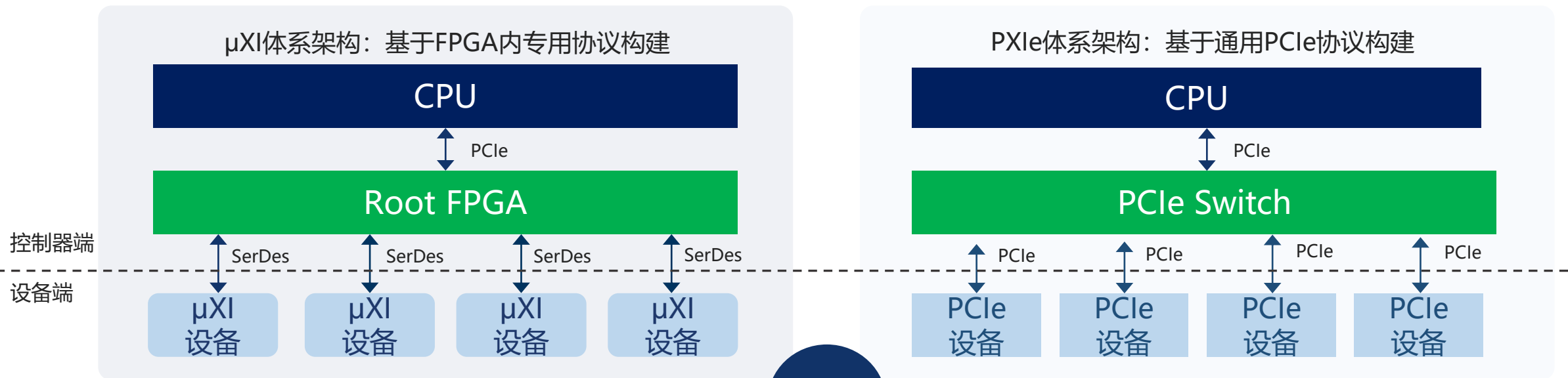


μ XI 3U & 6U插件式欧卡 (Eurocard) 结构



- 防止插拔板卡对接插件造成损伤
- 防止板卡插错槽位

μXI模块化仪器—2×可靠性提升



VS

- **硬件架构可靠**：CPU通过**Root FPGA**扩展多设备，屏蔽复杂PCIe接口，“暴露”简单SerDes接口
 - ✓ 单点故障隔离，CPU运行不受影响
 - ✓ 支持热插拔，维护便捷，系统可靠性高
- **协议与传输可靠**：基于**μXI协议**传输数据，系统集成开发更简单，整体可靠性高
 - ✓ 协议简单高效，降低开发复杂度
 - ✓ 控制器实现可靠的PCIe转换，统一固件及驱动

- **传统PCIe硬件架构**：CPU通过**PCIe Switch**扩展多设备，直接“暴露”复杂PCIe接口
 - › 单点异常易波及CPU，系统崩溃/蓝屏
 - › 热插拔需处理PCIe协议状态机 → 开发难度大，兼容性差
- **传统PCIe协议**：基于**PCIe协议**传输数据，协议功能多、复杂度高
 - › 各厂商的PXIe设备及驱动难以相互兼容，系统集成时需大量适配工作
 - › 依赖厂商实现质量，系统可靠性难以保证

μ XI模块化仪器—全维度智能监测的“健康管家”

- 芯片温度监测
- 湿度阈值报警

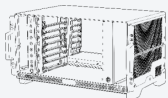
- 风扇转速调控
- 设备识别检测

- 供电电压监测
- 供电过流保护

- CPU状态监测
- FPGA通信故障报警
- 设备慢控制系统

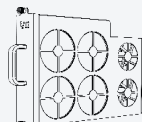
基础环境

温度
湿度



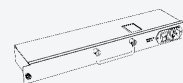
设备状态

转速
在位



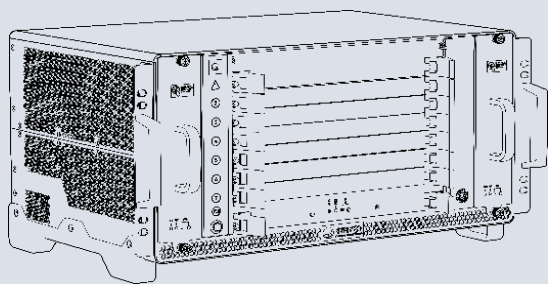
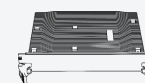
电源状态

电流
电压



硬件监测

CPU
FPGA



IPMI

(智能平台管理接口)

μ XI仪器平台IPMI智能管理系统——简单、智能、安全

μXI平台与其他平台对比

	VXI	PXI	PXIe	AXIe	μXI
机箱管理	？	用户拓展	用户拓展	IPMI智能化管理	IPMI智能化管理
数据总线及速率	VME 500Mbps	PCI	PCIe 64 Gbps	PCIE+ETH	PCIe + GTH 64 Gbps
同步时钟	专用单端星型时钟线	专用单端星型时钟线	专用差分星型触发线 专用单端星型时钟线	专用差分星型时钟线	专用差分星型时钟线 专用单端星型时钟线
触发总线及传输速度	专用单端星型触发线	专用单端星型触发线	专用差分星型时钟线 专用单端星型触发线	专用差分星型触发线	可拓展自定义差分触发线 专用高速触发信息触发线
控制器	Intel CPU，无授时及触发处理，不支持FPGA可编程 Intel CPU，无授时及触发处理，不支持FPGA可编程				可支持Intel、ARM、SoC、国产CPU等多种体系，支持授时及触发处理，支持FPGA可编程
设备卡尺寸	3U、6U			8U	3U、6U、灵活定制
数据读出	无定义 用户开发	用户开发/Labview		用户开发	通用化数据读出技术 (软件驱动、固件IP)
通信协议	仅提供数据传输通道				指令集、传输协议

1 智能化机箱

2 高性能背板

3 逻辑可重构的同步定时控制器

4 多形态设备卡

5 通用化读出

6 指令集

新一代 μ XI高性能读出机箱及控制器实物图



2槽、6槽、12槽 μ XI读出机箱

μ XI高性能读出机箱



μ XI控制器
(龙芯LS3A5000)

μ XI控制器
(intel i7 10gen CPU)

μ XI控制器
(intel i3 10gen CPU)

μ XI逻辑可重构定时控制器



目 录

1

仪器平台发展

2

μ XI数据读出平台

3

μ XI平台应用

4

工作设想及总结

应用：核能谱测量与分析

- 应用背景：粒子物理实验、核物理实验、核设施安全、放射诊疗、环境监测等场景的核信号测量与分析
- 探测器类型：BaF₂探测器、CZT探测器、HPGe探测器、MCP探测器、液闪探测器等

● 瞬态信号记录仪

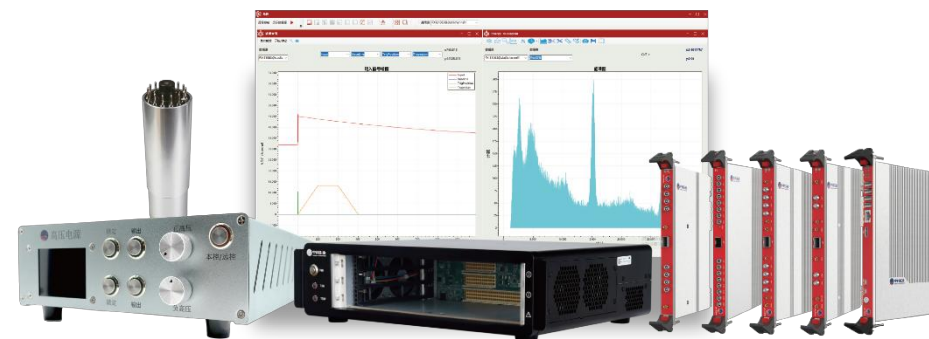
实现实验物理等场景下多通道瞬态脉冲信号的高效精准并行采集、触发及分析



- **高性能智能架构**：独家 μ XI总线架构，支持硬件逻辑在线重构；纳秒级多通道同步
- **全实时处理系统**：12Gbps高速数据流盘；内置实时算法引擎；开放式软件开发框架
- **军工级可靠设计**：三级抗干扰背板架构；-40℃~85℃宽温工作；双冗余电源设计

● 核能谱测量分析仪

结合不同类型探测器及数字信号处理算法对核辐射能量、时间、强度进行测量，实现对粒子类型的快速识别及定量分析



- **模块化灵活配置**：支持探测、信号调理、采集处理等模块自由组合；可按需增减或更换功能模块多通道同步采集
- **多场景辐射检测**：适配多种核辐射探测器；支持X/ γ 射线、中子、 α/β 粒子全谱系测量
- **高精度采集分析**：100MSPS~10GSPS可调采样率，具备原始波形采集与高精度能谱分析能力，支持在线参数优化与个性化分析

应用：BNCT中子注量率空间分布测量

■ 应用背景：硼中子俘获治疗（BNCT）

■ 探测器结构

□ Micromegas探测器，**300路交叉阳极读出**

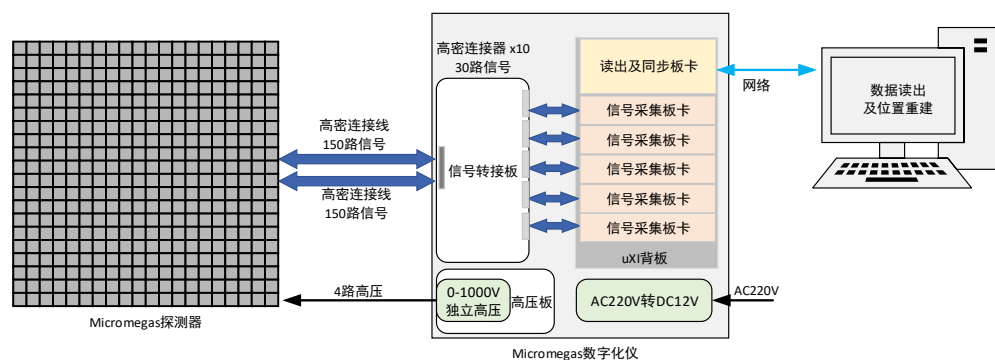
■ 读出电子学

□ 采集：100MSps@12bit、300通道；5块μXI-X1065 64ch采集卡

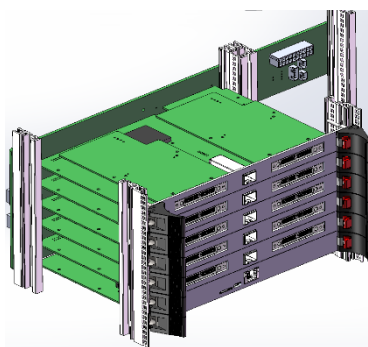
□ 读出：μXI-X6010 6槽机箱、μXI-X4030 ZYNQ控制器、千兆以太网

□ 处理：CRRC数字滤波，能量及时间提取

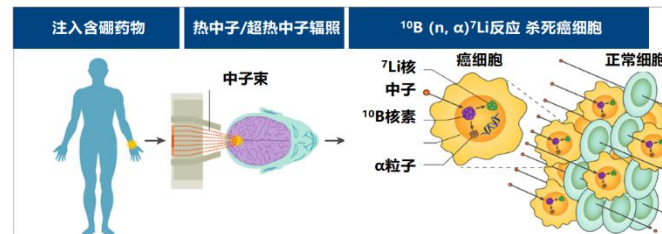
□ 成像：μTPC定位原理



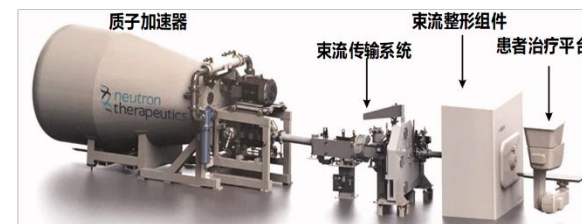
读出电子学系统方案



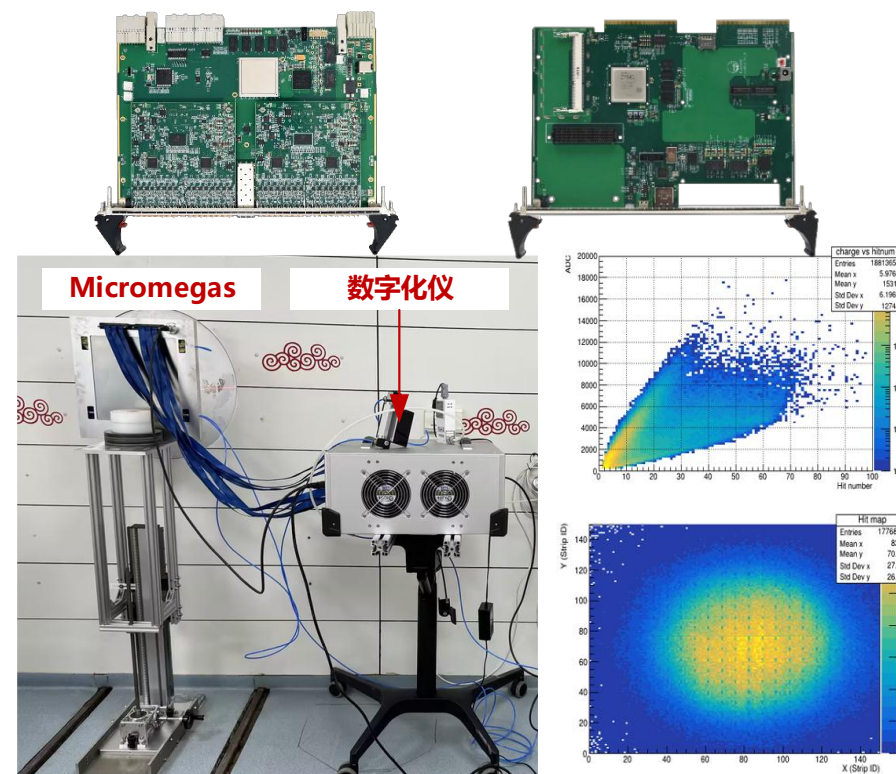
读出电子学系统模型图



硼中子俘获治疗（BNCT）



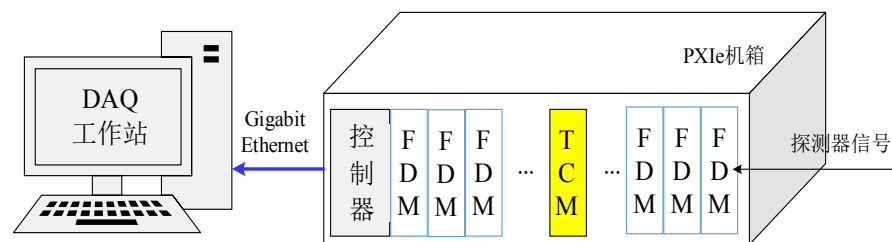
BNCT治疗装置



现场图及测试结果图

应用：白光中子源共用电子学系统 (PXIe)

- 应用背景：中国散裂中子源白光中子源多种谱仪的信号读出
- 测量需求
 - GTAF-II、C6D6、FIXM、NTOX、LPDA等谱仪的电子学共用
 - 采集通道数量 ≥ 40 、动态范围 ≥ 500 、时间分辨 $< 1\text{ns}$ 、触发率 $> 3\text{kHz}$
- 读出电子学
 - 采集：**1GSps@16bit、40通道**；10块 4ch PXIe采集卡 (FDM_V4.0)
 - 读出：18槽PXIe机箱；PXIe控制器； **μXI 仪器驱动程序、 μXI 固件IP**
 - 同步：多通道同步精度 $\leq 10\text{ps}$ ；1块 PXIe时钟触发卡 (TCM_V3.0)
 - 处理：TDC测量，CFD时间定时，PSD粒子甄别，QDC电荷积分



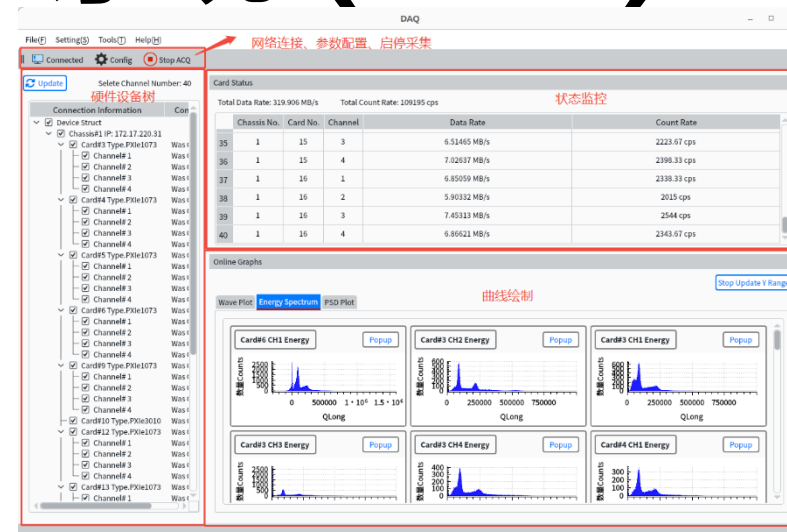
基于PXIe平台的读出电子学系统方案



PXIe采集卡



PXIe时钟触发卡



DAQ获取界面



在束实验现场图

应用：多物理量测量（工业测控）

■ 应用背景：航空航天、船舶工业、汽车工业等工业测量场景，电压、电流、电阻、温度、压力、振动、IEPE等多种信号采集

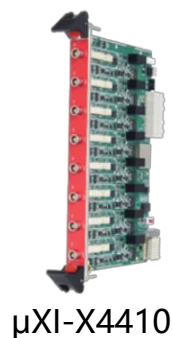
■ 传感器类型

□ 激光探测器、热电偶传感器、压电式力传感器、IEPE传感器、加速度传感器、位移传感器等

■ 读出电子学

□ 采集：μXI-X4410多功能数采卡；μXI-X3449隔离型电压卡；μXI-X3048隔离型温度卡；μXI-X1063 100M数据采集卡；μXI-X1073 1G数据采集卡；μXI-X1012 10.4G数据采集卡等

□ 读出：μXI-X6010 12槽机箱；μXI-X6131 龙芯控制器等



μXI-X4410



μXI-X3349



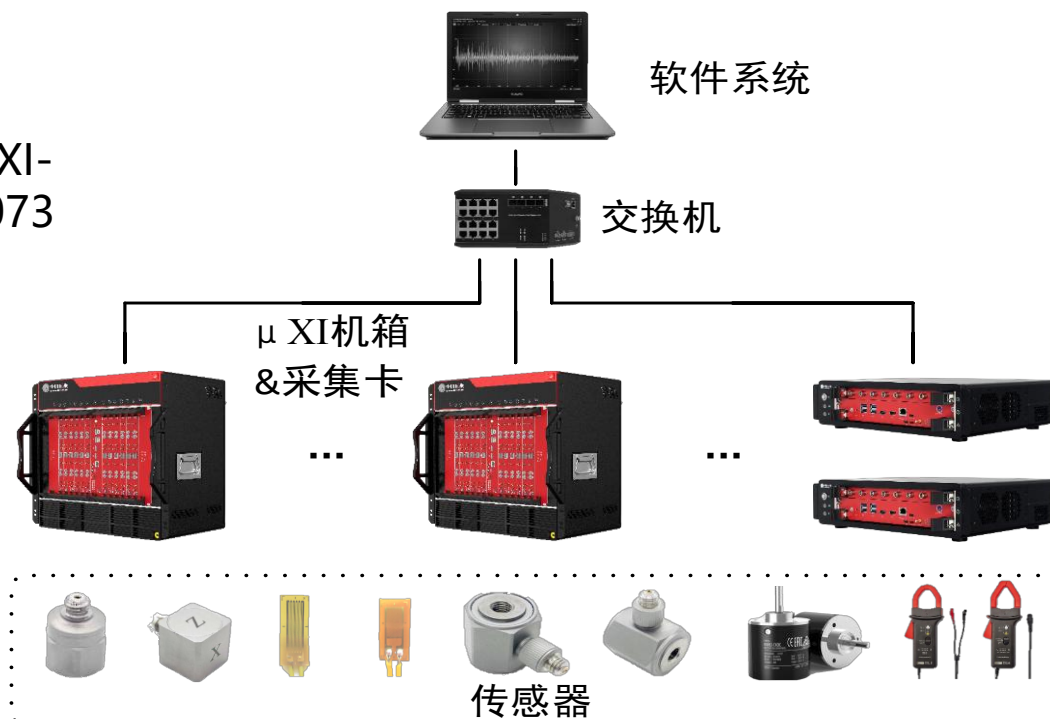
μXI-X1063



μXI-X1073



μXI-X1012



多物理量数据采集系统框图



目 录

1

仪器平台发展

2

μ XI数据读出平台

3

μ XI平台应用

4

工作设想及总结

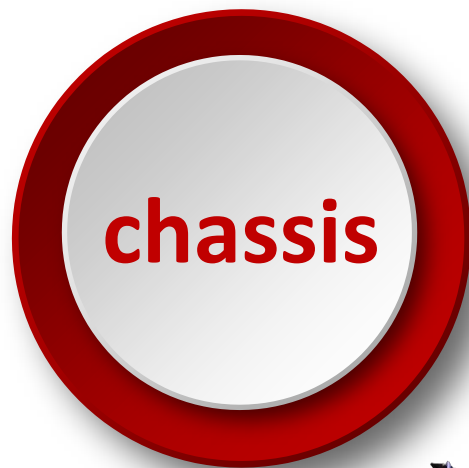
持续打造模块化仪器平台的技术底座



车架



底盘



背板



机架



机箱



发动机



变速箱



座椅



悬挂及制动



电气系统



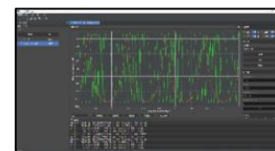
控制器



电源



各类功能模块



软件系统



合肥中科采象科技有限公司

中国科大首批科技成果赋权改革企业

- 创立于2021年12月，由中国科学技术大学核科学技术学院、核探测与核电子学国家重点实验室科研团队，联合中国科大先进技术研究院成立
- 发展加速器和谱仪等大科学装置研制所涉先进探测方法和技术，为多行业提供获取高品质数据的采集技术、产品及解决方案



合肥中科采象科技有限公司

VISION 愿景

成为跨学科数据采集技术的领导者，
助力科学进步与产业变革

MISSION 使命

解决科学与工程数据采集问题，
完整捕捉每一份数据的价值

SLOGAN

完整捕捉每一份数据的价值 Engineer Certainty

总 结

- 数据读出系统是现代核与粒子物理实验的核心之一，直接关系到物理实验科学数据的获取能力
- 读出机箱大大简化了读出系统的结构，使其更加有利于工程实现和维护升级
- 高性能背板总线极大地提高系统数据读出能力
- 随着物理实验的发展，读出系统设计面临挑战：
 - 如何高效、实时地将多通道海量数据进行读出？
- 实验物理应该要学习仪器领域的发展思路（虚拟仪器、可互换仪器），并需要引入CPU、FPGA、PCIe、软件、AI等最新发展技术
- **技术创新带来发展源动力，模式创新带来发展加速度**，围绕产业链打造“**塑固强补**” **深度融合的协同创新**，加速发展新质生产力
- **发明全新一代软件定义的开放式模块化仪器平台架构，将持续推进其进化及应用**
- “短平快”的思维扼杀了中国的基础化通用性工作，呼吁“**耐心业主**” + “**耐心场景**”，坚持长期主义，持续推动前沿科技成果赋能国家产供应链安全，将论文写在祖国大地上



谢谢大家!



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



中国科学技术大学先进技术研究院
Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China



中科采象
EVERACQ TECHNOLOGIES