

SDUV-FEL实验装置控制系统

丁建国 (dingjg@sinap.ac.cn)

中科院上海应用物理所

第16届全国核电子学与探测技术年会

8/28/2012 四川绵阳

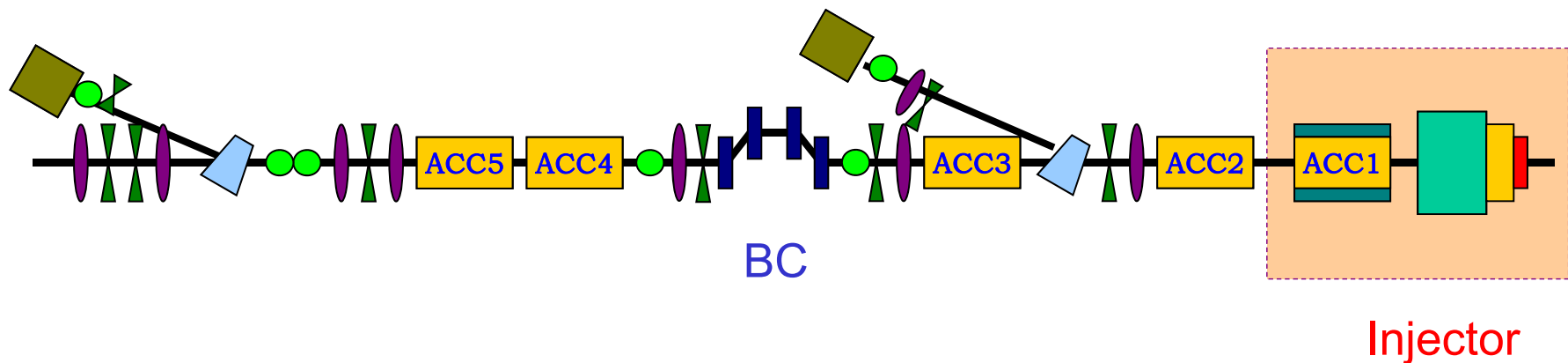
报告内容

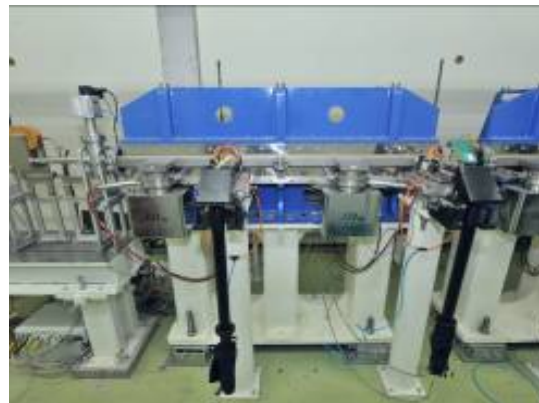
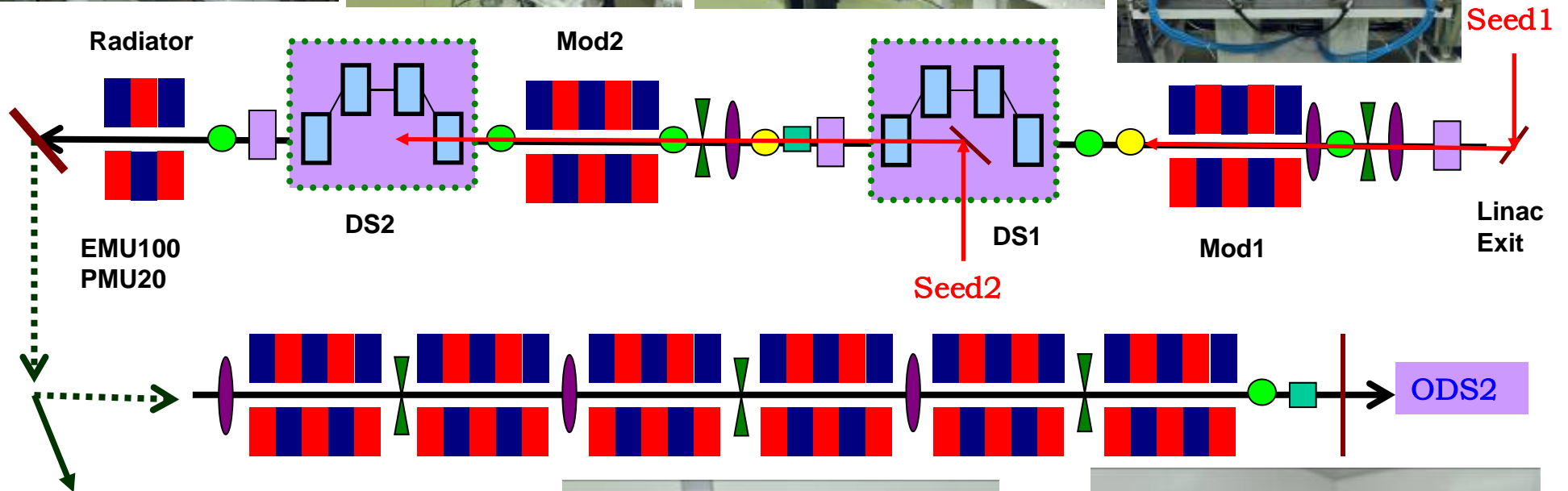
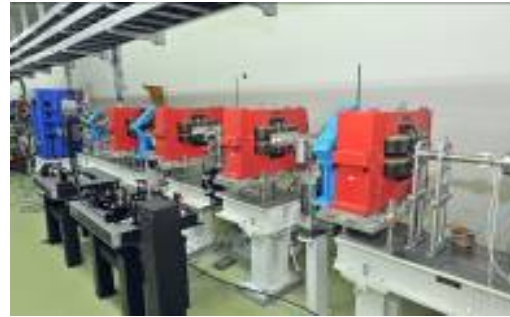
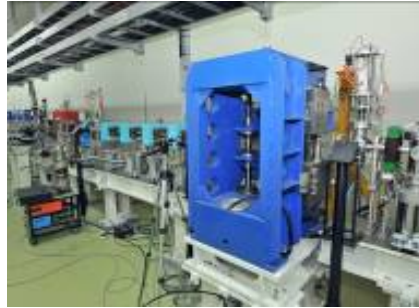
- SDUV-FEL 实验装置
- 系统结构与工作原理
- 控制方案
- 控制软件开发
- 总结

一、SDUV-FEL实验装置

SDUV-FEL Test Facility

- 上海深紫外自由电子激光是进行FEL关键技术与新原理实验验证的实验装置（2008- ）
- SDUV-FEL由两部分组成：直线加速器Linac（包括注入器与主加速器）和波荡器段（FEL实验区）。
- 直线加速器由原100MeV Linac升级改造实现，由一个低发射度光阴极注入器、5个S-band加速结构和束团磁压缩段（Bunch Compressor, BC）





ODS=Optical Diagnostics Station

SDUV-FEL 实验

SASE	Self-Amplified Spontaneous Emission 自放大自发辐射
HGHG	High Gain Harmonic Generation 高增益谐波产生
Echo(EEHG)	Echo-Enabled Harmonic Generation 回声效应谐波产生

SASE	实现相对简单，无需种子 无纵向相干性，功率和谱学特性涨落大
HGHG	光谱特性好，纵向相干性好 需要种子激光。到短波长需要多次级联（新）
ECHO	特点类似HGHG，但级联次数少 调制比HGHG复杂，原理需要验证（新）

目前正在进行两级级联FEL实验 (cascaded HGHG)

控制系统

- 控制系统是SDUV-FEL的重要组成部分；
- 通过计算机控制手段实现对SDUV-FEL中设备的全面运行控制，满足通过中央控制室等授权计算机平台获取机器的运行信息，在设备与人身安全联锁的前提下，调整各种相关参数，使装置达到最佳运行状态的要求；
- 控制系统由磁铁电源、真空监控等设备控制子系统、主定时与安全联锁系统、控制网络及其系统运行环境等组成。

二、系统结构与工作原理

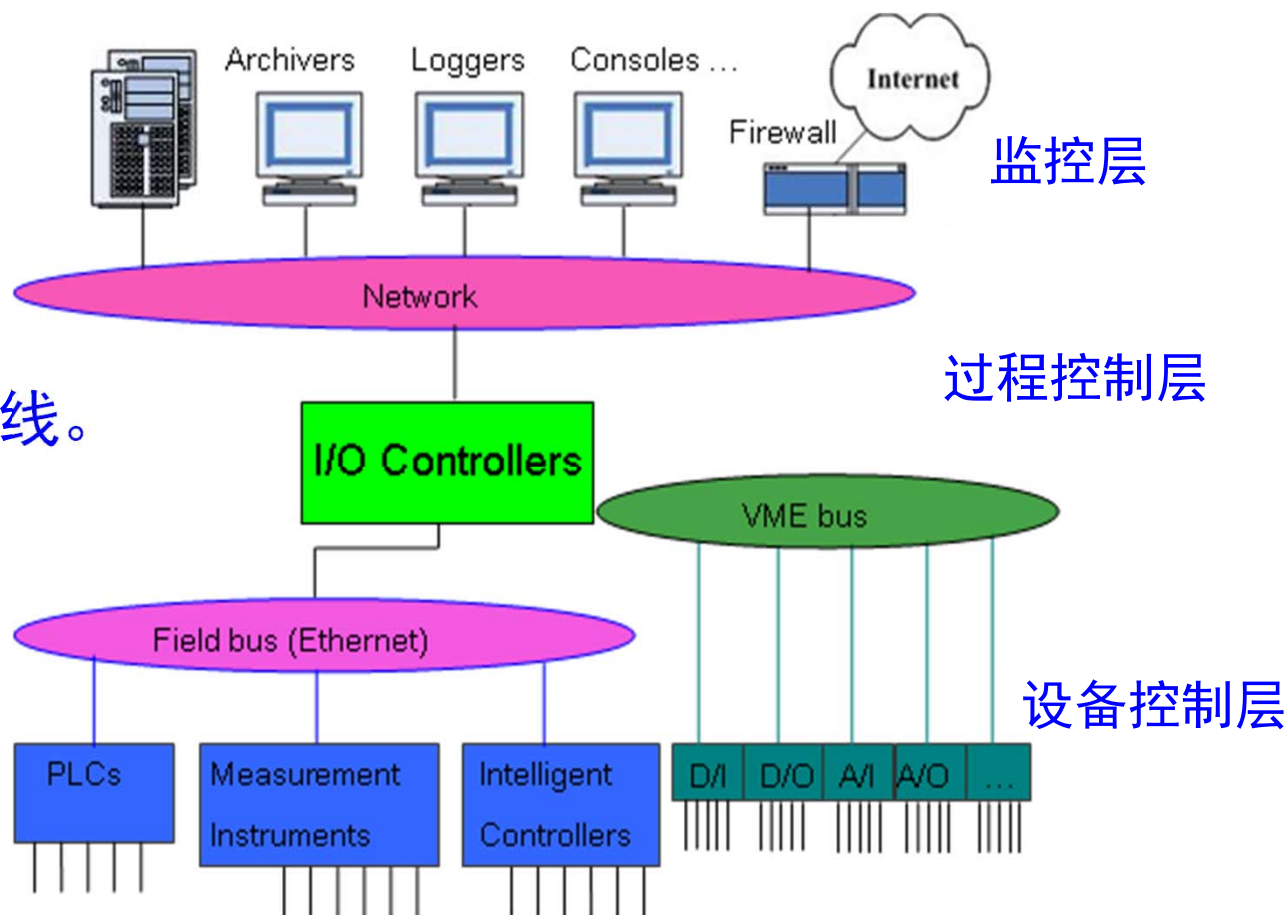
总体设计

- ❑ 加速器系统特点：具有设备类型多、地域分布广；SDUV-FEL新老设备共存；针对不同实验目的，系统配置经常变动。
- ❑ 采用分布式控制系统结构；尽量采用成熟的控制技术，标准化的商业化产品，以实现系统最快的开发周期，并满足长期稳定可靠运行要求。
- ❑ 针对国内外大型加速器控制系统的发展及趋势，选择实验物理与工业控制系统 (EPICS Experimental Physics and Industrial Control System) 作为系统开发与运行平台，在统一平台下实现系统集成。

层次式DCS系统架构

基于DCS“标准模型”的结构：

- 监控层；
- 过程控制层；
- 设备控制层；
- 计算机网络与通讯总线。



层次式DCS结构

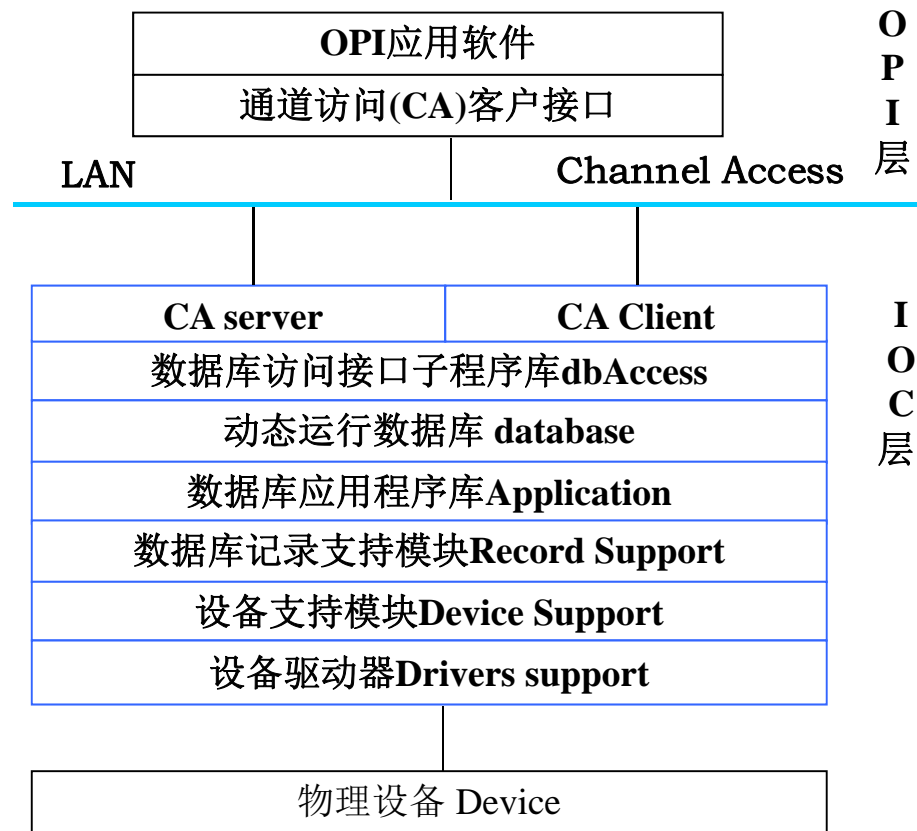
- **监控层：操作员计算机（Operator Interface, OPI）**
系统顶层，具有访问整个控制系统的功能。通过人机交互界面监控系统的运行，实现控制参数设置/回读、报警处理、数据存档、访问控制等。
- **过程控制层：输入输出控制器（Input/Output Controller, IOC）**
系统的核心。通过现场总线或直接I/O控制前端设备控制器，实现数据的采集/存储、控制量的设置/调节，响应监控层或其他IOC的请求、处理来自设备控制层的外部事件等。
- **设备控制层：设备控制器（Device Controller）**
直接与受控设备接口，负责模拟信号和数字信号的输入输出及信号调理等。设备控制器一般为I/O板卡，可编程控制器（PLC）、智能仪表。

EPICS

- EPICS，实验物理及工业控制系统是基于工具集的大型分布式控制系统。
- 上世纪90年代，美国Los Alamos 国家实验室和阿贡国家实验室等联合开发，目前已被世界数百个大型科学研究工程项目采用。涉及加速器和探测器系统、同步辐射装置、飞机制造等领域。
- 在国内，SSRF、BEPCII、NRSL等国家大型科学工程选用了EPICS系统作为用于控制系统开发与运行的基本平台。
- 基于计算机网络，具有开放、多平台、模块化可裁剪、易扩充、稳定可靠的特点，便于构建各种大小规模的控制系統。
- 全世界的开发、交流与技术共享平台，节约了开发成本。

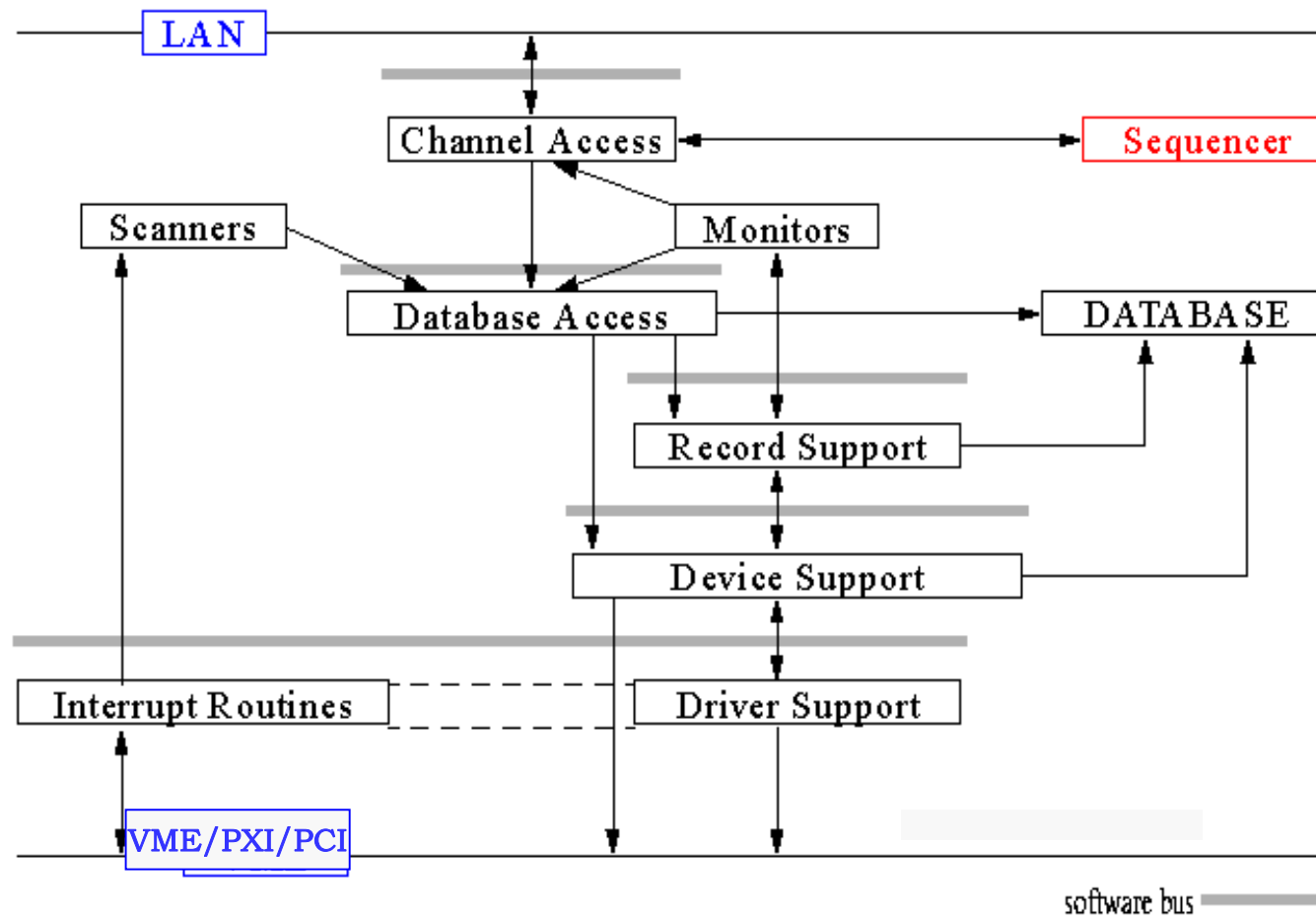
EPICS软件结构

- 根据软件所在平台，EPICS系统软件包括两个主要部分，IOC层和OPI层软件；
- EPICS系统的基本机制：
 - 执行过程控制的分布式动态数据库（Runtime database）
 - 基于TCP/IP基的通道访问协议（Channel access, CA）。
- 多种CA客户端接口库（Matlab CA，javaCA, Python CA, ...），可以开发各种OPI应用程序。



IOC软件

IOC软件各部分之间的关系



Runtime Database

- ❑ EPICS采用实时运行的数据库来记录系统中频繁变动的I/O量。EPICS系统的应用开发，都是围绕着IOC数据库展开的。
- ❑ 按照控制对象的不同，对各个I/O信号选用相应的记录类型，生成一个个记录，并按照逻辑关系链接起来，就构成了模块化的IOC数据库。
- ❑ 记录由多个定义域(field)组成，域值反映过程量的各种属性。EPICS通过激活记录的处理，执行相应的功能模块，实现控制系统过程控制功能。
- ❑ EPICS通过基础内核中的扫描器（Scanner）对数据库记录的扫描，激活记录处理，扫描机制包括：
周期性扫描、事件触发扫描（中断和事件触发）和被动性扫描。

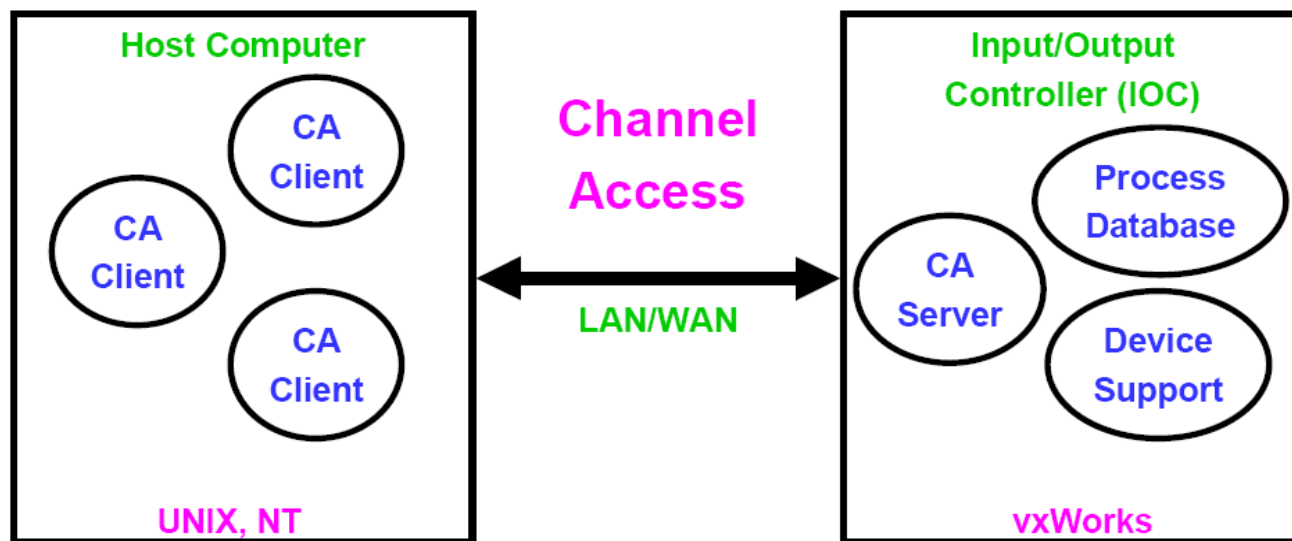
Database示例

```
record(ao,"QPS-01:SETI") {
    field(DESC, "desired direct current set")
    field(SCAN, "Passive")
    field(DTYP, "stream")
    field(OUT, "@sinapPS.proto SETI $(terminal)")
    field(EGU, "Amps")
}
record(ai,"QPS-01:I") {
    field(DESC, "Magnet current readback")
    field(DTYP, "stream")
    field(INP, "@sinapPS.proto I $(terminal)")
    field(SCAN, ".1 second")
    field(EGU, "Amps")
    field(LINR, "NO CONVERSION")
    field(PREC, "4")
    field(MDEL, "0.00099")
    field(ADEL, "0.00099")
    field(HIHI, "20")
    field(HIGH, "18")
    field(LOW, "1")
    field(LOLO, "0" )
}
}
```


通道访问协议

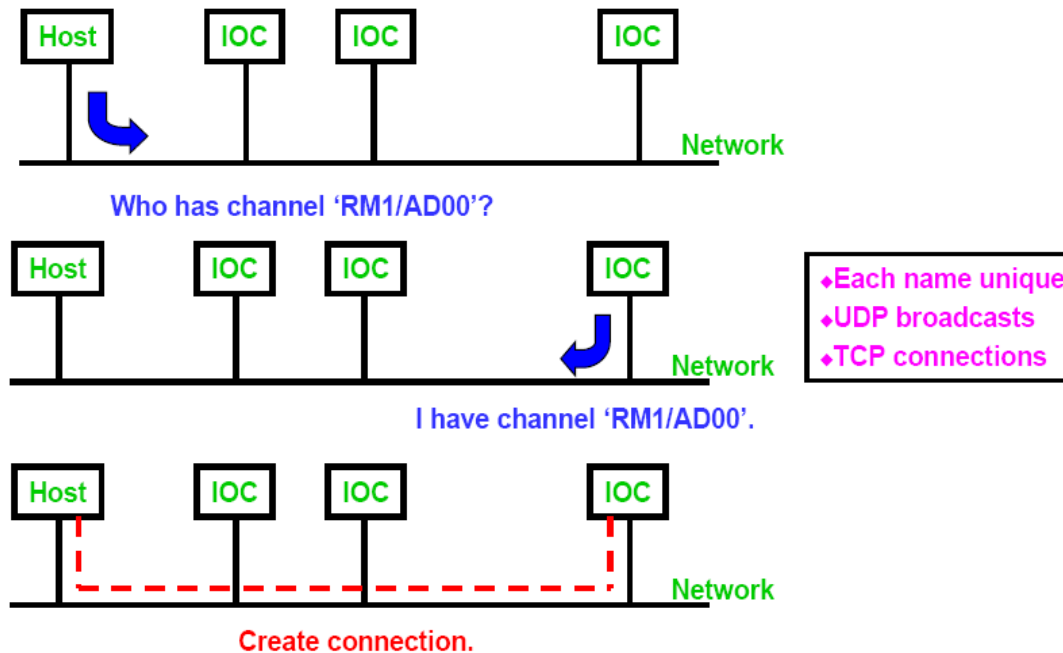
通道访问协议： EPICS系统依据客户-服务者模型，建立在TCP/IP协议之上的应用层协议。它相当于一软件总线，EPICS各个组件通过这一总线交换数据，CA通过PV名称访问数据。

通道： CA客户端程序，与IOC中数据库记录的某个域值（即过程变量, PV）建立起连接时，就建立了一个通道（Channel）。



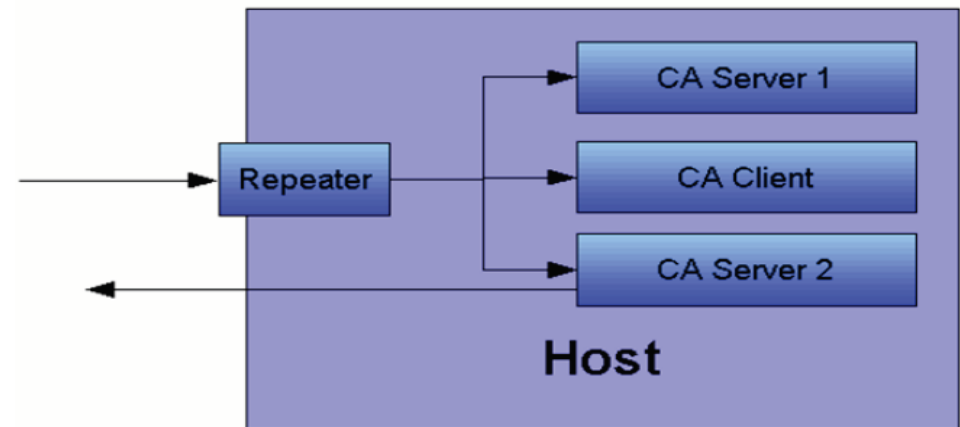
CA功能

- **通道定位：** 客户程序通过UDP广播搜索目标机和过程变量，拥有请求PV的服务器将作出应答；
- **建立连接：** 通道定位后，在客户端与服务器之间将建立TCP连接，连接是建立在虚拟电路（Virtual circuit）的基础上的。相同客户与服务端的通道共享一个连接。



CA功能

- **数据读写：** 连接建立后，通过TCP连接实现数据交换；
- **访问监控：** 访问监控（Monitor）机制是当PV值或报警状态发生一定变化时，IOC向所有CA客户端发送监控PV的信息。
- **连接监控与自动重接：** IOC通过节拍（Beacon）消息动态监控CA连接。
 - 服务器定时地送出UDP广播消息表明其存在。
 - OPI在约定时间内收不到节拍，断开连接，并监听节拍以恢复连接。
 - IOC重启时发出不同节奏的节拍，通知客户重建连接。
- **消息中继技术：** 通过消息中继（Repeater）技术，将侦听到的UDP广播消息扇出到多个客户程序。



三、控制方案

控制对象

设备与通讯接口

设备	数目	控制接口
电源	138	DeviceNet, GPIB, Serial/Ethernet
调制器	3	Ethernet, AB-DCM
移相器	4	AB-DCM
真空计	11	RS232/Ethernet
离子泵电源	31	RS232/Ethernet
真空保护	1	Ethernet
波荡器	4	RS232, Etherent
RF放大器	3	Direct I/O
定时系统	2	RS232

I/O控制器

I/O 控制器

I/O	数目	操作系统	控制设备
Motorola MVME 2302	1	vxWorks	Power supply
Motorola MVME 2302	1	vxWorks	RF, Shifter, Modulator
Emerson MVME 3100	1	RTEMS	Power supply
Motorola MVME 5500	1	vxWorks	Power supply
Motorola MVME 5500	1	vxWorks	Vacuum
Moxa DA 662	1	Embedded Linux	Undulator
Moxa DA662	1	Embedded Linux	Modulator
Moxa DA661	1	Embedded Linux	Vacuum protection

IOC系统开发与运行

在宿主机（Host）上对目标机（Target）进行开发，通过FTP、TFTP、NFS下载装入后运行。

1. 生成目标机运行的操作系统映像：

vxWorks： 在Windows Tornado集成环境下进行。通过系统剪裁和安装BSP发行包，交叉编译产生目标机的操作系统映像。

Rtems： 开源操作系统。在Linux主机上，先编译交叉编译工具，然后交叉编译Rtems系统发行包，得到操作系统映像。

2. 面对目标，开发EPICS应用：

- 选择目标机类型，编译EPICS base；
- 通过Perl script生成简单应用实例example。
- 对example增加特定对象的设备支持与驱动程序，生成设备控制的EPICS映像。

3. 嵌入式Linux IOC开发：

- 系统出厂时内建Linux内核；
- IOC的开发，在Linux/PC开发主机上安装交叉编译工具，直接对目标机编译EPICS base和EPICS应用。

4. 开发实时数据库。

磁铁电源控制

由于历史原因，系统存在3种不同控制接口类型的电源：

1. **直接I/O接口的模拟电源，使用DeviceNet 现场总线技术控制。**

- 电源控制器：总线编制，采用具有DeviceNet 总线接口的AB1794 FlexI/O 系列模块构建；
- 1794ADN通信模块向上通过DeviceNet总线与IOC通信；向下通过Flexbus 总线与1794 系列数字、模拟I/O 模块传输数据，对受控电源直接控制。
- IOC为VME系统，MVME2302单板机。在IOC端，通过一个DeviceNet Scanner，将IOC命令发给指定节点，并定时地从各本地节点获得电源的电流及状态信息。
- SINAP开发了相应的EPICS设备支持与驱动程序。

磁铁电源控制

2. 全数字化控制电源，通过Ethernet通讯控制：

- 电源控制器：基于DSP与FPGA技术，内置于电源机箱，为电流输出提供高速反馈调节回路，达到电流输出的高精度与分辨率。
- 控制器提供一对光纤接口用于远程访问，执行异步串行通讯协议。通过接入MOXA串行通讯服务器，将串行通讯转换为Ethernet网络通讯。
- 通讯服务器前端，通过光电转换模块实现信号转换。
- IOC通过TCP/IP实现对电源的控制。
专门的通讯协议：对控制器中一组寄存器地址的读写访问，监控电源工作。
- EPICS设备支持采用SLS开发的streamDevice，驱动程序采用通用异步通讯驱动asynDriver（APS）。

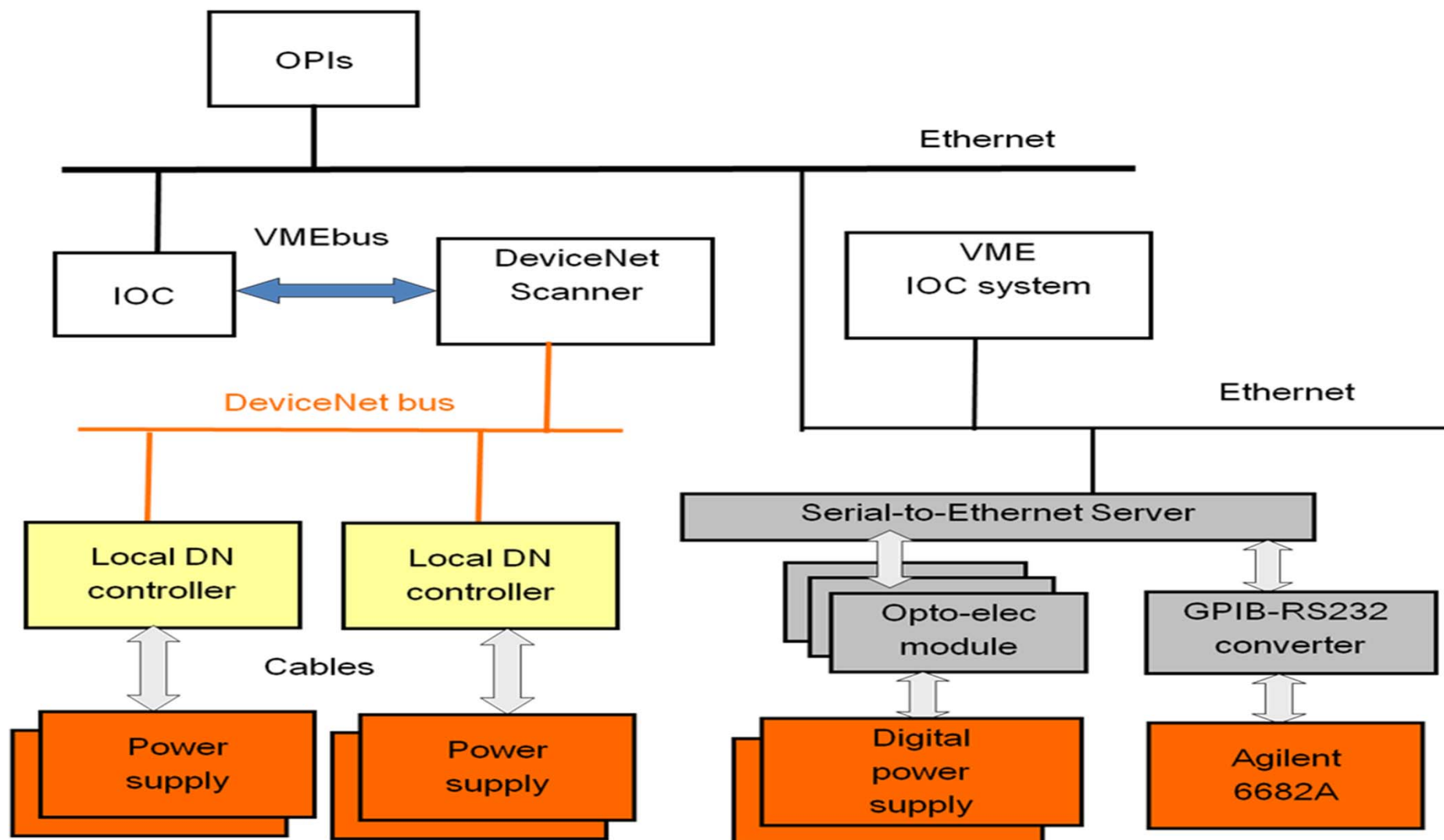
磁铁电源控制

3. 注入器中包含一台具有GPIB通讯接口的Agilent 6682A电源，该电源可以通过国GPIB SCPI语言规范进行控制。

通过一个GPIB-RS232转换器实现协议转换，接入通讯服务器，使得对IOC电源的操作通过TCP/IP网络通讯实现。

设备支持与驱动：streamDevice+asynDriver。

磁铁电源控制



真空监控与保护

真空控制包括真空监控两部分：

- ① 真空远程监控：对真空计与泵电源远程控制，监控真空系统的状态；
- ② 真空保护：建立真空阀门与真空状态连锁系统。

当发生泄漏时，通过关闭阀门动作隔离泄露区域，实现真空保护。

真空监控与保护

真空监控控制方案：

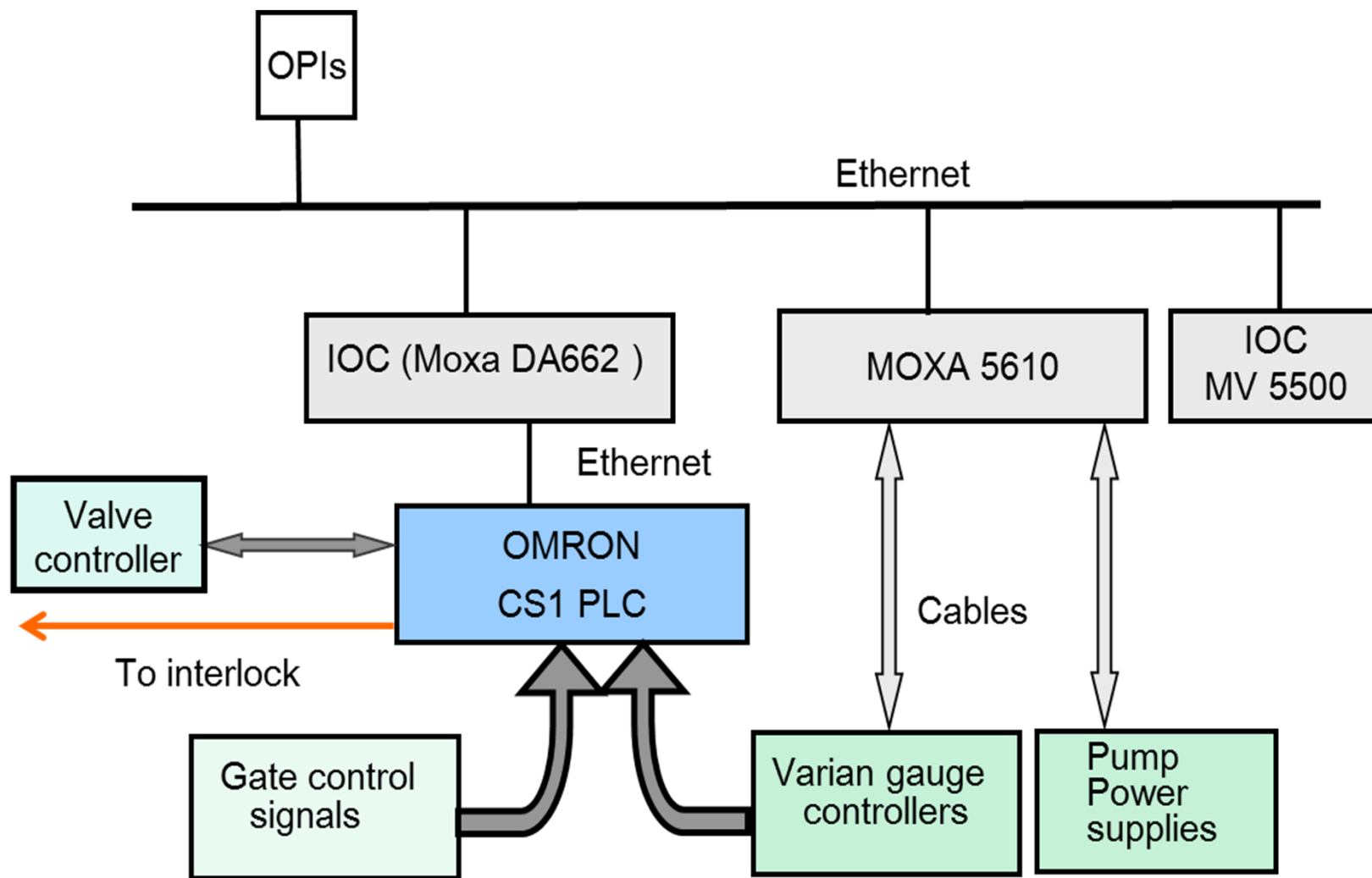
- 真空计与泵电源，都具有RS232通讯接口。
- 控制系统通过在本地接入MOXA通讯服务器，
- 将串行通讯协议转换为TCP/IP的网络通讯。I0C端通过TCP/IP连接访问真空计。
- I0C: Emerson mvme5500;
Device Support/Driver: streamDevice/asynDriver。

真空监控与保护

真空保护方案：

- 一台OMRON CS1 PLC执行真空保护功能；
- 真空计对每个真空规设定两个Setpoint阈值（**预警、报警**），通过对应的常开OC门输出真空状态用于真空保护输入；
- PLC根据Setpoint**报警输出**确定阀门的动作，以实现当真空破坏时隔离泄露区域。
- 根据运行模式和Setpoint**预警输出**，产生综合输出信号到主定时系统，实现真空破坏时停止触发，保护机器设备。
- PLC包括一个网络通讯模块，IOC通过OMRON的FINS/TCP数据报文，可直接访问PLC内存，实现远程控制。
- IOC: Moxa Da662;
Device support/driver: netDev。

真空监控与保护



RF控制

功率源系统：

- 三台功率源，通过本地PLC控制调制器与束调管的运行，并实现设备保护联锁。
- 由于制造时间与设备来源不同，分别通过OMRON CS1、AB SLC-500和SIEMENS S7/300执行本地控制，
- OMRON和SIEMENS通过网络模块与上层IOC通讯；
- SLC-500采用DCM通讯模块与VME/IOC中的AB RIO模块通过内存映射方式交换数据。
- 主定时系统提供功率源预触发和触发脉冲。

移相器系统

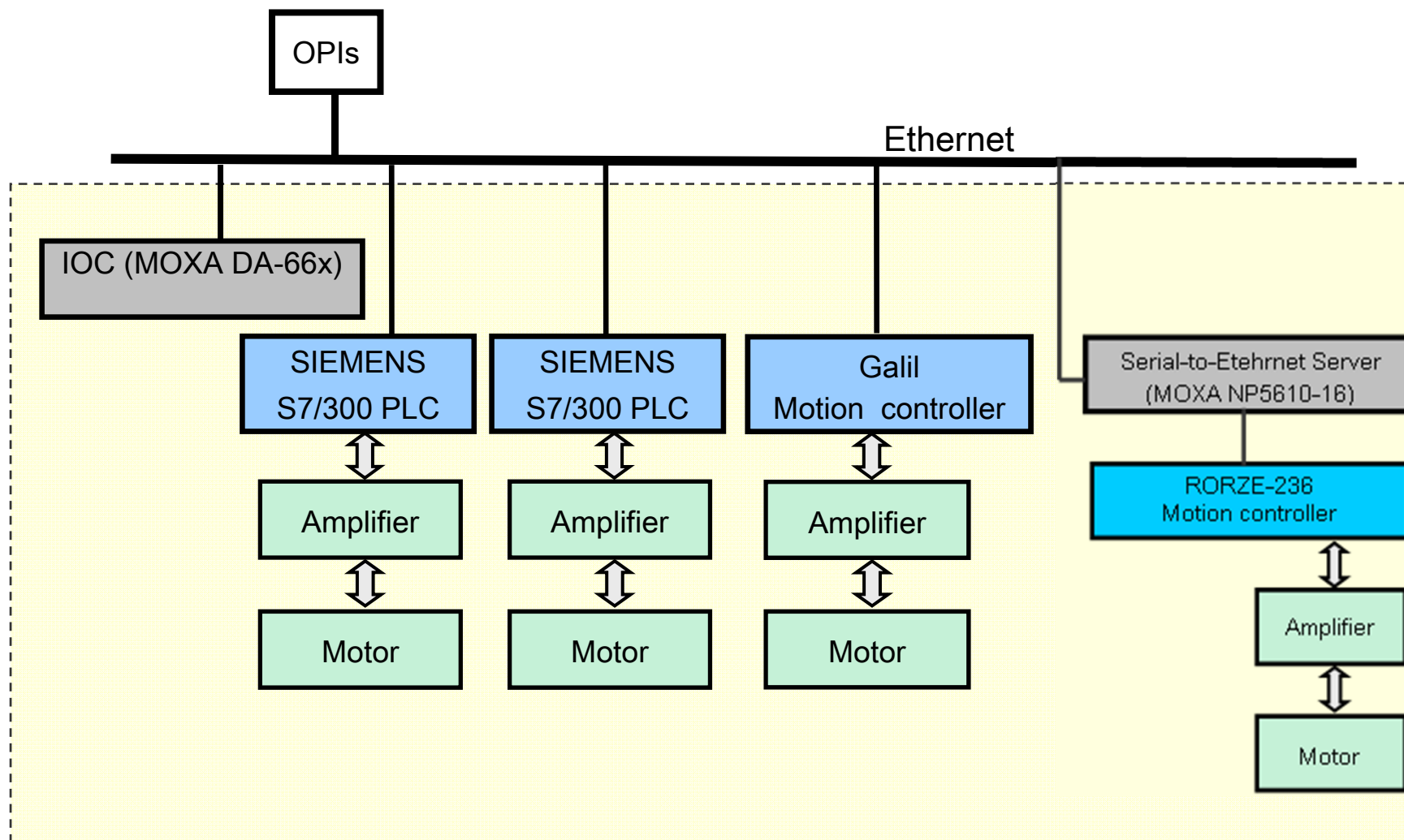
- 系统中通过SLC-500 PLC的一组步进马达控制模块，进行移相器和衰减器的运动控制，远程控制方案与功率源系统相同。

对于微波放大器等其他设备，通过VME/IOC的模拟量与数字量直接I/O模块直接操作设备。

波荡器控制

- ❑ 共有 4 台波荡器需要通过对电机控制实现隙缝的调节，分别命名为PMU、U40，UV40-1，UV40-2。
- ❑ UV40-1、UV40-2采用SIEMENS S7/300 PLC进行电机运动的本地控制与联锁，通过其网络通讯模块实现远程控制；
- ❑ PMU的运动控制器采用RORZE智能运动控制器，通过RS232接口实现远程控制，在实现过程中，将其连接到通讯服务器转换为网络通讯；
- ❑ U40 通过一台GALIL 2143多轴运动控制器控制电机的运动，通过其以太网接口实现远程控制。
- ❑ IOC采用一台Moxa DA662嵌入式计算机系统。
Device support/Driver: S7Plc, streamDevice/asynDriver

波荡器控制



波荡器狭缝控制实现方案

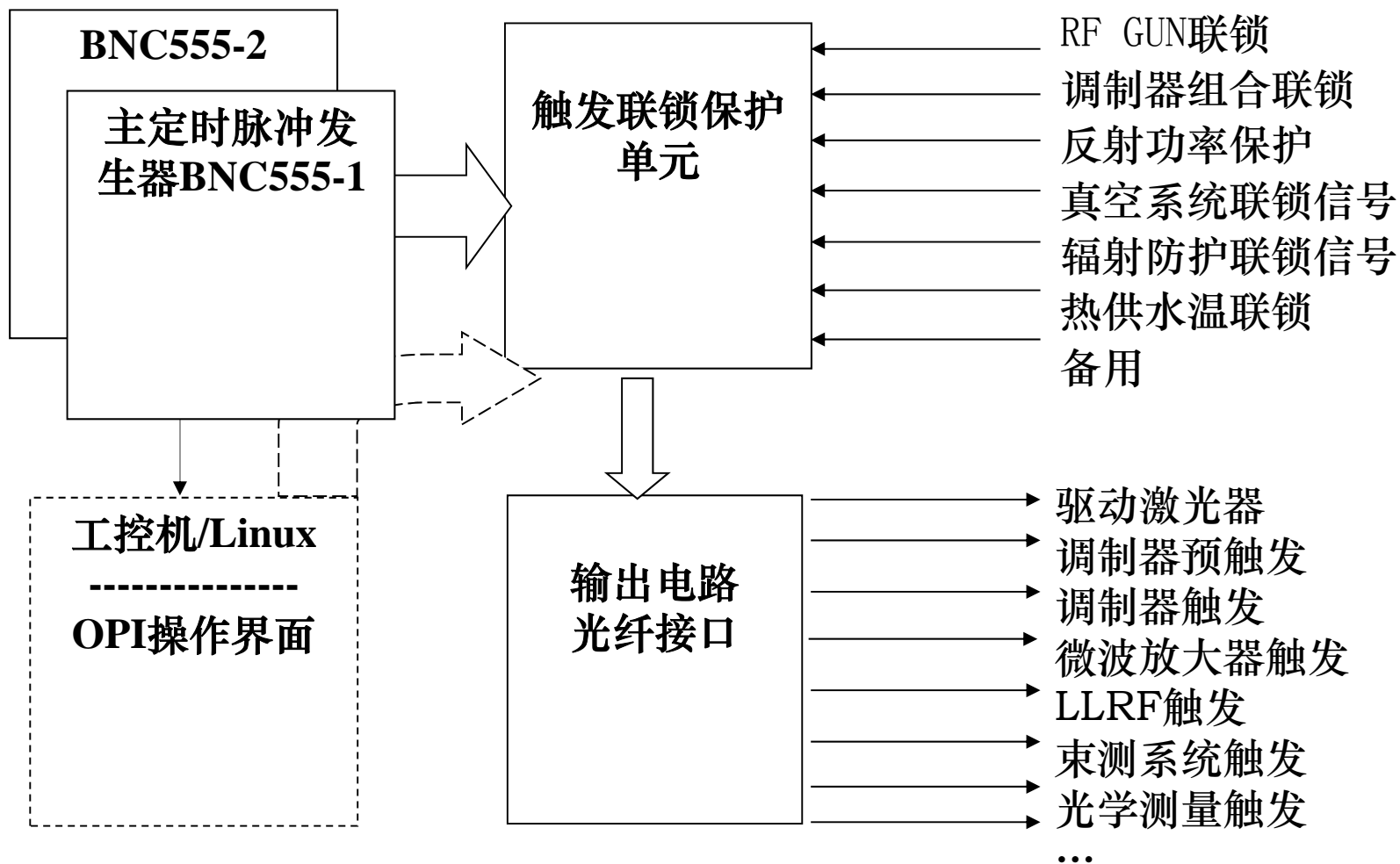
定时与联锁

- ❑ 主定时（Timing）为注入器、微波功率源、束流诊断等提供触发时序信号，协调机器的运行。
- ❑ 定时系统由两台串接的8通道高精度BNC 555序数字脉冲延时信号发生器实现。脉冲宽度、重复频率和相对基准的时延可调，用来控制时序信号的启动和停止。
- ❑ 定时系统从FEL的飞秒级激光同步系统获得基准触发信号，根据延时设定提供触发信号给注入器、微波放大器、微波低电平系统、调制器系统和束流诊断系统。
- ❑ 采用光纤信号传输。
- ❑ 通过设计的硬件逻辑电路实现机器保护功能。

当机器状态不能满足联锁条件时，屏蔽定时系统的触发信号输出。
- ❑ 机器联锁信号来自真空保护系统的输出、调制器的联锁信号输出、人身保护系统的输出、冷却水的工作状态等。

定时与联锁

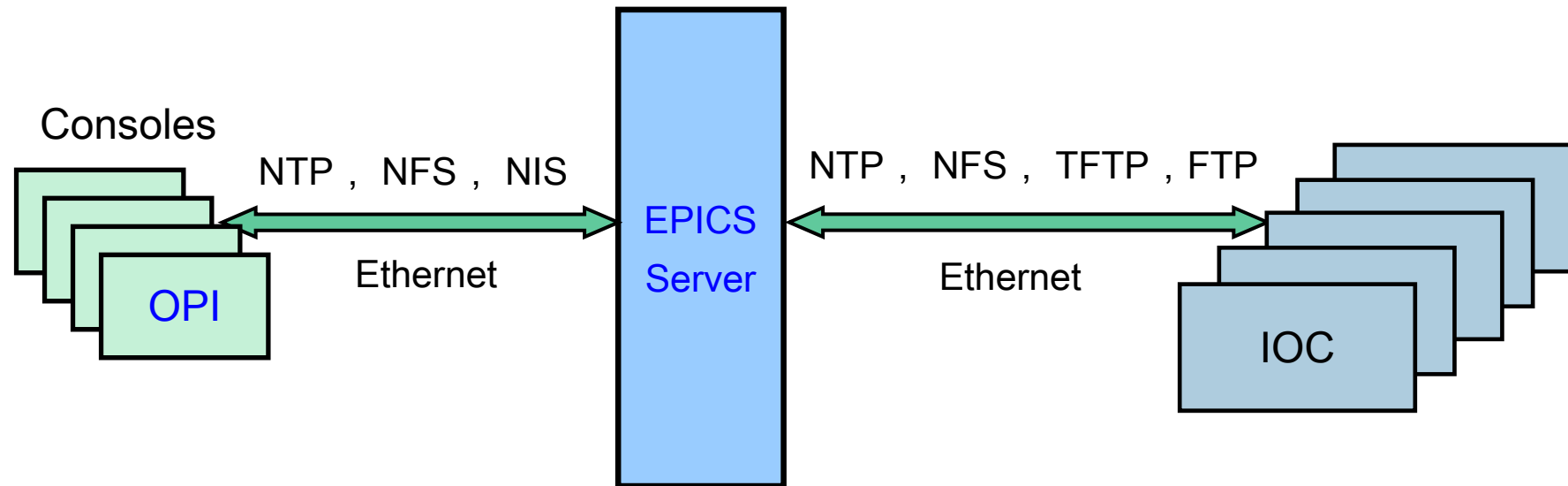
外同步，
光纤输入



服务器与中控运行环境

- 1台EPICS服务器：
 - EPICS base and extensions (Epics toolkit);
 - IOC development platform;
 - TFTP and FTP server for IOC download;
 - NTP server for system time synchronization;
 - NIS for user account management;
 - NFS for file sharing ;
 - Matlab, Python,...
 - PV archiving ,
 - Backup and Restore tool,
 - Commissioning tools,
 - ELOG
- 4台Linux/PC控制台电脑。所有OP1登陆至服务器运行，软件资源全部共享。

服务器与中控运行环境



四、控制软件开发

软件开发内容

□ 开发EPICS设备支持与驱动程序

- streamDevice/asynDriver: 电源, 真空设备, 波荡器控制等基于流式I/O的异步串行通讯设备;
- netDev: OMRON PLC, 基于网络通讯模块, 调制器远程控制、真空保护系统;
- s7Plc: Siemens S7/300, 基于网络通讯模块, 调制器、波荡器远程控制;
- DeviceNet Driver: 模拟电源, 基于DeviceNet总线通讯;
- AB DCM Device support: SLC-500 PLC的DCM RIO通讯, 调制器与移相器控制;
- ...

□ 设备控制实时数据库开发

- 根据不同控制对象的控制要求, 开发实时数据库记录;

□ 操作台控制界面、应用软件开发

- 根据被控设备控制要求, 选用EPICS工具, 开发OPI设备操作界面;
- 使用Matlab, C++等及对应CA接口, 开发应用软件。

软件开发内容

The image displays several overlapping software control windows:

- FEL Undulator Control:** Shows PMU control with a 'Set Gap in mm' of 25.000 and 'Actual Gap Position' of 25.0000 mm. It includes a 'HeartBeat' indicator and 'ADC UV40-1 Control'.
- FEL Undulator PS control:** A large table listing magnet and switch parameters (Magnet, Switch, Setpoint, Readback, Status) for various undulator sections (e.g., Q15, Q16, Q17, Q18, Q19, Q20, Q21, Q22, Q23, Q24).
- The Vacuum Interlocking Protection System:** Displays 'VACUUM GAUGE STATUS' and 'VALVE CONTROLLERS' with various status indicators (WR-ST, BP-ST, AL-ST).
- DUV FEL Restore Operation:** Shows a 'Machines And File List' with file names like 'SaveRestore_16-Apr-2010_13-51-34.mat'.
- Other Windows:** Includes 'SDUV FEL', 'FEL PMU Control', 'DUV FEL Restore Operation', 'Energy' (150), 'Scaling' (100%), and 'Restore From File'.

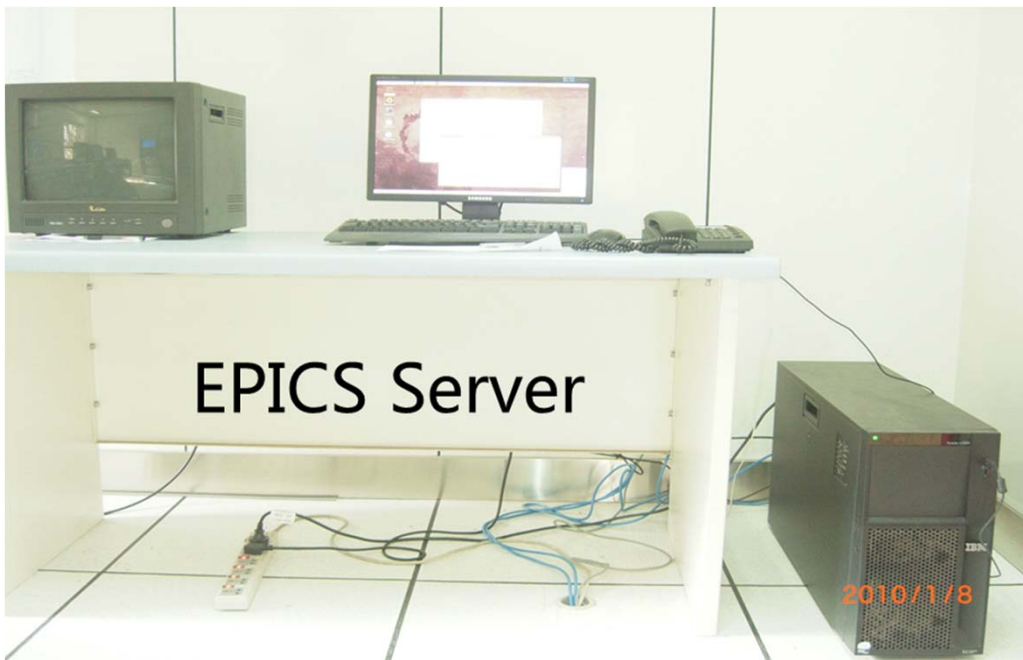
总结

- ❑ SDUV-FEL控制系统是基于EPICS系统集成开发与运行的分布式控制系统，系统中共包含约8000个控制通道；
- ❑ 针对各种不同的设备控制需求，分别设计与实现了设备控制方案。系统在SDUV-FEL实验中经过长期运行，稳定性与可靠性得到检验；
- ❑ 系统涉及到嵌入式系统开发、计算机网络、现场总线、可编程控制等诸多方面。各种控制技术在EPICS系统下进行了成功集成。
- ❑ 计算机网络通讯技术在控制系统的开发中得到了广泛应用；
- ❑ SDUV-FEL已先后进行了SASE、seeded HGHG、ECHO、级联HGHC等多个FEL原理实验并在一些实验上取得重要进展。控制系统在实验中进行了多次改造更新以不断满足FEL实验的新需求。

FEL 中控室



电源与真空设备间



EPICS Server





IO控制器



真空保护系统



定时与联锁

谢谢大家

