

SDUV-FEL 实验装置控制系统

丁建国, 胡守明, 蒋舸扬, 缪海峰, 赵欢, 朱海君

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800)

摘要: 本文介绍了 SDUV-FEL 实验装置控制系统基于 EPICS 系统的分布式控制结构和工作原理, 描述了磁铁电源控制、真空监控与保护、微波设备控制、波荡器隙缝调节等设备控制方案, 以及定时与机器联锁系统的技术实现, 介绍了系统集成化的运行环境和图形化的控制台操作界面设计。

关键词: 自由电子激光, EPICS, 控制系统, Ethernet

文章分类: 计算机技术及其应用的研究成果

上海深紫外自由电子激光实验装置 (Shanghai Deep Ultraviolet Free Electron Laser test facility, SDUV-FEL) 是进行多种 FEL 新原理与关键技术测试的实验平台。SDUV-FEL 由两部分组成: 直线加速器 (包括注入器与主加速器) 和波荡器。直线加速器 (Linear Accelerator, LINAC) 部分由上海应用物理所 100MeV 直线加速器升级改造实现, 由一个低发射度光阴极注入器、5 个 S-band 加速结构和一个束团磁压缩段 (Bunch Compressor, BC), 如图 1 所示。波荡器是进行 FEL 实验的部分, 如图 2 所示^[1]。

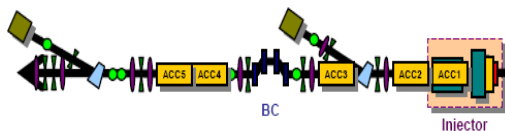
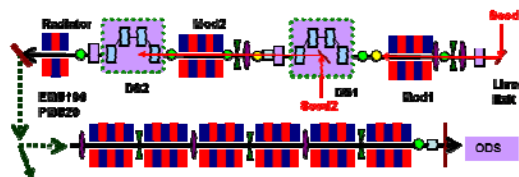


图 1. LINAC 布局图

控制系统是 SDUV-FEL 的重要组成部分, 其任务是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。本文将介绍 SDUV-FEL 控制系统基于 Ethernet 的分布式控制结构与工作原理, 详细的设备控制实现方案, 集成化



系统运行环境等。

图 2. SDUV-FEL 实验区布局图 (seed: seeded laser; Mod1: EMU type modulator; Mod2: PMU type modulator with movable gap; DS: dispersive section; Radiator: small radiators with only a few periods; ODS: optical diagnostics system)

1 系统结构与工作原理

加速器系统具有设备多、地域分布广的特点。SDUV-FEL 中包括一百多台各种磁铁电源、数十台真空监控设备、多台波荡器与微波功率源等设备。同时 Linac 部分是在原系统上改造, 新老设备并存;

作者简介: 丁建国 (1964-), 男, 博士, 中科院上海应用物理所研究员, 研究方向: 大型加速器控制系统。

设备来源不同,设备接口类型多,为控制系统的实现增加了难度。SDUV-FEL 控制系统选择实验物理与工业控制系统 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^[2]作为系统开发与运行平台,在统一平台下实现系统集成。

EPICS 系统是基于标准模型的分布式控制系统工具集,基于 Ethernet 的层次式结构,包括操作员计算机 (Operator Interface, OPI), 输入输出控制器 (Input/Output Controller, IOC) 和连接 OPI 和 IOC 的计算机网络。OPI 工作站,在中央运行环境下,运行 GUI 图形界面,实现对设备运行参数的监控显示,或者运行上层基于模型的物理调束软件。OPI 通过基于 TCP/IP 的通道访问协议 (Channel Access, CA) 访问 IOC 中的 I/O 过程变量。IOC 控制器运行 EPICS 系统基础内核和实时运行数据库 (Runtime database) 实现对被控设备的访问操作。通过分布式运行于 IOC 中的数据库记录,控制系统实现过程控制功能。数据库记录根据定义的扫描方式触发记录的处理实时刷新记录内容,真实反映现实世界的变化。IOC 通过 CA 服务器对来自 OPI 的请求做出响应,同时将过程变量的变化及时通知关联的 OPI 进程。

IOC 对被控设备的访问通过各种通讯总线或直接 I/O 操作实现。对各种通讯总线的通讯协议,必须开发对应的 EPICS 设备支持与驱动程序,以此实现当记录激活处理时 IOC 对设备的 I/O 读写操作。

2 控制方案

2.1 IOC 控制器

为了实现系统稳定可靠运行的要求,系统中采用了两种 IOC 控制器: VME 总线控制器和嵌入式工业计算机。VME 总线的 IOC 系统,包括 PowerPC 结构的 Motorola MVME 2302 和 MVME 5500 单板机,运行 vxWorks 实时操作系统,以及 MVME 3100,

运行 RTEMS 实时操作系统。嵌入式 IOC 采用 MOXA DA66x 系列,嵌入式运行 Linux 操作系统。IOC 系统的开发在宿主机 (Host) 上进行。首先对目标机 (Target) 可装载运行的操作系统映像, vxWorks 操作系统的开发,在 Windows Tornado 集成开发环境下进行,通过系统剪裁和安装 BSP 发行包,交叉编译产生可装载运行的 vxWorks 操作系统映像。Rtems 是开源操作系统,在 Linux 主机上通过交叉编译工具包编译系统发行包得到操作系统映像。进一步在主机上安装 EPICS 应用开发环境,选择目标机类型编译 EPICS base,最后,建立包括特定设备支持与驱动接口的 EPICS 应用实例,编译产生下载运行的映像。嵌入式系统出厂时包含 Linux 系统,IOC 的开发,在 Linux/PC 开发主机上安装交叉编译后直接对目标机编译 EPICS base 和 EPICS 应用实例。

系统启动时,通过 FTP, TFTP 或 NFS 设置从 EPICS 服务器上下载系统映像后,运行启动脚本文件,装入数据库后开始执行。

多种 IOC 存在一是由于原 Linac 系统保留的旧设备,另一种原因是实验新的 IOC 型号,为其他大型科学装置建设积累数据。

表 1 SDUV-FEL 中的 IOC 控制器

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

2.2 设备与通讯接口

SDUV-FEL 包括相当数量的设备控制,由于设备来源、制造与购买时间不同,这些设备的控制接口种类较多。主要有:直接 I/O (ADC/DAC、数字

I/O), 异步串行通讯接口 (RS232/485), 现场总线 (DeviceNet), NI GPIB, Allen-Bradley DCM^[3]和 Ethernet 等。对这些不同的通讯总线、接口与通讯协议, 必须采用不同的控制方案。对 100MeV Linac 保留下来的设备, 基本保持原控制方案^[4], 或稍作修改以节约成本和工作量。对新增设备, 许多具有串行通讯接口, 通过在设备机柜中接入 serial-to-Ethernet 通讯服务器 MOXA NP5610 的方法, 将串行通讯转换为 TCP/IP 的网络通讯, 突破串行通讯对距离的限制, 减少布线工作量。对 GPIB 接口设备, 同样转换为网络通讯。表 2 列出了 SDUV-FEL 被控设备与通讯接口。

表 2 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, DCM
移相器	4	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, Ethernet
RF 放大器	3	Direct I/O
定时系统	2	RS232

2.3 磁铁电源控制

SDUV-FEL 中共有 138 台各类磁铁电源。按照远控接口类型, 电源分为三种。一种是原 Linac 保留的具有直接 I/O 接口的模拟电源, 使用 DeviceNet 现场总线控制^[5]。总线编址的电源控制器采用具有 DeviceNet 总线接口的 Allen-Bradley 1794 Flex I/O 系列模块构建, 其中 1794ADN 通信模块向上通过现场总线 DeviceNet 与 IOC 通信, 向下通过 Flexbus 总线与 1794 FLEX 系列数字、模拟 I/O 模块传输数据, 这些 I/O 模块直接对受控电源进行控制。IOC 为 VME 总线计算机系统, CPU 板为 Motorola MVME2302 单板机。在 IOC 端, 通过一个 DeviceNet Scanner 模块, 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。

系统中新增 92 台电源采用全数字化控制技术, 上海光源研制的基于 DSP 与 FPGA 芯片的电源控制器内置于电源中, 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操作, 执行异步串行通讯协议, 远程控制可在电源机柜本地接入 MOXA 串行通讯服务器, 将 RS232 串行通讯协议转换为 Ethernet 网络通讯。在通讯服务器前端, 通过光电转换模块实现光电信号转换。IOC 通过 TCP/IP 通讯实现对电源的访问。

SDUV-FEL 注入器中包含一台具有 GPIB 通讯接口的 Agilent 6682A 电源, 电源可以通过国 GPIB SCPI 语言规范进行控制。通过一个 GPIB-Ethernet 转换器实现协议转换, 使得对 IOC 电源的操作通过 TCP/IP 网络通讯实现。

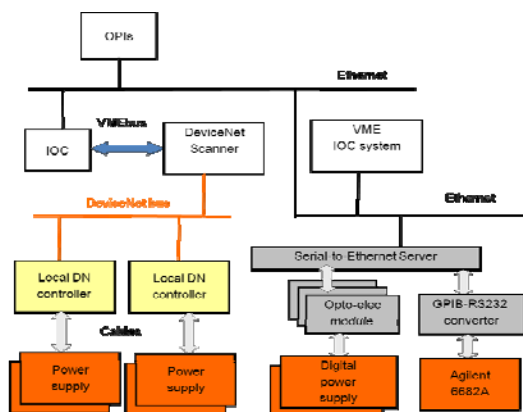


图 3. 磁铁电源控制原理图

数字化电源和 Agilent 电源通过二个 VME 总线的 IOC 控制, 分别为一块 Emerson MVME 5500 和一块 MVME 3100 单板机。图 3 为电源控制的 MVME 31004。

2.4 真空监控与真空保护

真空系统包括真空监控与保护两部分。真空监控是对真空控制仪器真空计与泵电源通过控制接口远程控制。真空计为 Varian XGS600, 具有 RS232 通讯接口。控制系统通过在本本地接入 MOXA 通讯服务器, 将串行通讯协议转换为 TCP/IP 的网络通

讯, IOC 端通过网络连接访问真空计。新增的 21 泵电源也都具有 RS232 通讯接口, 控制方案与真空计相同。14 台原系统的泵电源, 采用 RS485 总线控制, 保留原系统方案, 在本地通过一台工控机对总线上的泵电源进行扫描, 并通过其网络端口与 IOC 通讯。真空监控 IOC 为 1 块 Emerson MVME 5500 CPU 单板机。

一台 OMRON CS1 可编程控制器执行真空保护功能^[6]。每个真空计控制 2 路真空规, 可对每个规设定若干 Setpoint 阈值, 通过对应的常开 OC 门输出真空状态信号, PLC 根据读入的状态确定真空阀门的动作, 以实现当某一段真空破坏时隔离保护真空的目的。PLC 同时根据运行模式不同和真空计的输出信号, 产生联锁输出到主定时系统, 实现真空破坏时立即停止触发, 保护机器设备。PLC 包括一个网络通讯模块, IOC 在建立与网络模块的连接后, 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 为 Moxa DA661 嵌入式计算机系统。图 4 是真空监控与保护的原理图。

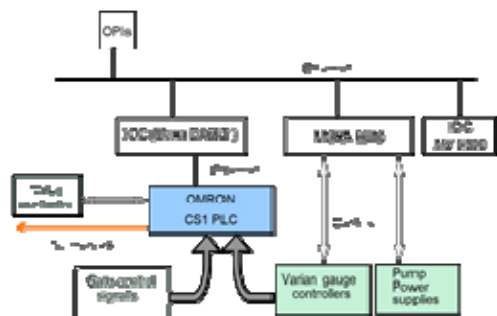


图 4 真空监控与保护原理图

2.5 RF 控制

SDUV-FEL 包括三个功率源, 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。主定时系统分别提供功率源预触发和触发脉冲。由于制造时间与设备来源不同, 这三台设备分别通过 OMRON CS1、AB SLC-500 和 SIEMENS S7/300 执

行本地控制, 其中 OMRON 和 SIEMENS 通过网络模块与上层 IOC 通讯, SLC-500 采用 AB DCM 通讯模块与 VME/IOC 中的 AB Remote IO 模块通过内存映射的方法交换数据。

系统中通过 SLC-500 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, 远程控制同样通过 DCM 模块实现。

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。

RF 控制 IOC 采用一台 Moxa DA662 嵌入式计算机系统和一个 CPU 主板为 Motorola MVME 2302 的 VME 系统。

2.6 波荡器隙缝调节控制

SDUV-FEL 中共有 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。其中 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。

2.7 定时与联锁

加速器主定时系统由两台串接的 8 通道高精度 BNC 555 同步时序脉冲信号发生器, 每路脉冲的宽度, 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 的非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。

SDUV-FEL 通过设计的硬件逻辑电路实现及其

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脉冲输出。机器联锁信号来自真空保护系统的输出信号、调制器的联锁输出信号、人身保护系统的输出信号、冷却水的工作状态等。

2.8 服务器与运行环境

SUV-FEL 中，一台 IBM x3500 服务器用作 EPICS 系统服务器。服务器提供 FTP, TFTP 服务供 IOC 启动时的软件下载运行，NTP 服务供 IOC、OPI 的时间同步。服务器运行 NIS 用作统一的用户账号管理，NFS 服务供所有的用户共享系统资源。

控制室配备 4 台控制台 OPI 电脑，运行 Linux 系统，操作员须登录至服务器上运行，共享所有运行资源，包括 EPICS 系统开发与运行环境，控制台 OPI 控制界面，系统实用工具，物理调束软件、实验结果数据、以及应用程序开发工具等。

3 控制软件

基于 EPICS 控制系统应用开发的核心是 IOC 软件的开发。对不同的设备及其通讯协议，要实现基于 EPICS 的设备控制，必须开发专门的 EPICS 设备支持程序与驱动程序。在 EPICS 社区中已存在多种设备的 EPICS 设备支持与驱动程序供开发者共享。例如，在 SDUV-FEL 控制系统中，streamDevice^[7] 和 asyn-Driver^[8] 用于对 Ethernet 接口的设备控制，如数字化电源控制、真空监控，波荡器控制等；S7Driver 用于对 Siemens PLC 的控制；NetDev^[9] 用于对 OMRON PLC 的控制等。同时，针对 DeviceNet 总线电源控制、VME 的模拟量与数字量控制板等开发了相应设备支持程序软件^[10]。

物理的 I/O 数据是频繁变化的，EPICS 采用分布式运行于 IOC 中的实时运行数据库来记录数据。数据库在记录支持、设备支持、设备驱动支持下运行，每个 I/O 控制通道对应于控制该通道 IOC 中的

一个数据库记录。数据库记录采用结构简单的 (flat) 列表方式，由记录类型、记录名称、记录扫描处理方式、数据输入/输出定义、线性变换计算、报警值等一系列域 (field) 组成，域值描述了过程控制的所有属性。在 SDUV-FEL 实验装置中，控制系统中共开发了约 8000 个实时运行数据库记录。这些数据库记录分布运行于 IOC 中实现过程控制与执行基本控制逻辑。

在 OPI 控制台上，通过 EPICS 的 EDM 工具，设计了满足运行要求的图形化设备控制操作界面；通过 ALH 工具，实现了报警及其处理功能；通过 ChannelArchiver 工具，实现了对历史数据的存档与浏览。另外，为了实现对机器运行参数存储与恢复的需求，通过 Matlab 及其 EPICS MCA 接口，开发了 FEL 参数存储与恢复程序。图 5 是波荡器间隙调节的主页面。

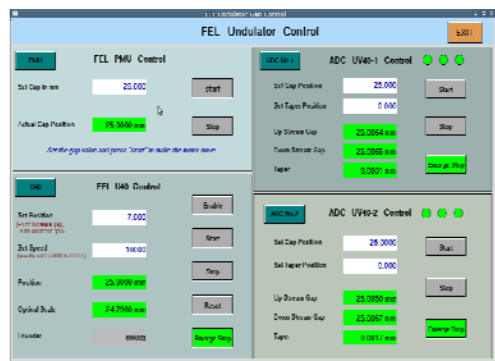


图 5. 波荡器控制页面

4 结论

SDUV-FEL 已先后进行了 SASE、seeded HGHG、ECHO 等多个 FEL 原理实验并在一些实验上取得重要进展，级联 HGHG FEL 实验也在进行中。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。

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。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。控制

系统在实验中经过长期运行, 稳定性与可靠性得到检验。系统中, 对新增的设备基本采用了网络接口, 或通过通讯服务器将不适合长距离信号传输的异步串行通讯转换为网络通讯, 提升了系统性能及建设灵活性。

基于开源系统, 开发了性价比更高的嵌入式 Linux IOC, Rtems/MVME 3100 IOC 并在电源、振荡器、调制器、真空保护等设备控制中使用, 实现了长期稳定可靠运行。

参考文献:

- [1] Zhao Z T, Wang D. Progress in the SDUV-FEL and Development of X-ray FELs in Shanghai[R]. Proceedings of FEL 2010, 2010, Sweden
- [2] Kraimer M R, Anderson J, Johnson A. EPICS Input/Output controller application developer's guide [M], 2005
- [3] Kraimer M R, Delesio B. EPICS Allen Bradley driver and device support [Z], 1999
- [4] 丁建国, 郑丽芳, 胡守明等, EPICS 环境下的 LINAC 控制系统[J], 核电子学与探测技术, 2006, 26: 36-40
- [5] 李纪堂, 郑丽芳, 陆承蒙等, 基于 EPICS 的磁铁电源控制系统[J].核技术, 2005, 28(10): 729-732
- [6] 祁斌川, 朱海君, 丁建国, SDUV-FEL 真空联锁保护系统[J], 核技术, 2009,34(12):885-888
- [7] Zimoch D. StreamDevice: A multi-purpose character driver for EPICS 3.14[Z]. 2003
- [8] Kraimer M, Norum E, Rivers M. asynDriver: Asynchronour driver support [Z], 2009
- [9] Odagiri J, Chiba J, Furukawa K, et al. EPICS Device/driver support modules for network based intelligent controllers[C]. Proceedings of ICALEPCS 2003, 2003, Korea
- [10] Leng Y B, Shen G B, Zheng L F, et al. DeviceNet in SSRF control system[J]. Necl Sci. and Tech. 2001, 12(3):235-240

The Control System of the SDUV-FEL Test Facility

DING Jian-guo, HU Shou-ming, JIANG Ge-yang, MIAO Hai-feng, ZHAO Huan, ZHU Hai-jun
(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800)

Abstract: In this paper, the control system of the SDUV-FEL test facility is presented. Distributed architecture and working principles of the control system are introduced. Device control solutions for magnet power supply, vacuum monitor and protection, RF equipment, undulator gap adjustment, etc., and timing and interlock system are described in details. The integrated system running environment and the GUI console software are introduced as well.

Keyword: Free electron laser, EPICS; Control system, Ethernet