

上海软 X 射线自由电子激光装置定时系统设计

于春蕾¹, 赵欢, 丁建国, 胡守明

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要:为满足自由电子激光装置的正常运行, 需要向加速器设备提供精确的定时触发信号。本文依据 SXFEL 的物理需求和系统分配, 基于高精度脉冲发生器, 结合具有联锁接口的光电转换器, 实现了定时系统的硬件设计。软件部分使用实验物理与工业控制系统完成基于网络的分布式远程控制系统。通过在线测试, 该系统运行稳定可靠, 各方面性能满足加速器对定时系统的要求。

关键字: 定时; 脉冲发生器; EPICS; 光电转换

文章分类: 核技术与公共安全及其应用的研究成果

1. 引言

上海软 X 射线自由电子激光装置 (Soft X-ray Free-Electron Laser) 是国内在建的第四代光源, SXFEL 产生 8.8 nm 左右的相干软 X 射线出光, 加速器设计能量为 840 MeV^[1-2], SXFEL 试验装置由注入器、直线加速器、波荡器以及 FEL 诊断线组成。定时系统是 SXFEL 的定时同步触发系统, 提供同步的时钟脉冲和加速器设备的时间基准。定时系统要产生一系列时序信号为激光器、微波功率源等需要同步触发的设备提供精确的时钟信号, 以确保 SXFEL 能产生满足要求的自由电子激光。同时, 定时系统还为束流测量系统发出定时触发脉冲信号以及参考信号, 为参数的测量提供时间基准。

定时系统是保障加速器各种设备协调运行的重要系统, 它的性能直接影响 SXFEL 的运行指标, 因此它必须是一个高精度、高稳定度的系统。国内外的许多加速器实验室已经实现了多种同步定时触发系统, 例如基于 PXIe、VME、PCI 和 CPCI 等多种总线的定时触发系统, 但这些系统的成本较高, 软硬件不易剪裁^[3]。由于 SXFEL 需要精确同步的子系统已经采取了飞秒级光学同步系统, 所以对定时系统的精度要求只需到纳秒量级。结合 SXFEL 对定时系统的物理要求, 考虑到成本控制等因素, SXFEL 采用基于高精度数字延时触发器的解决方案, 结合光电转换技术和系统联锁需求, 实现 SXFEL 定时系统的设计。

2. 系统架构

SXFEL 定时系统的远程控制采用基于分布式架构的实验物理和工业控制系统 (EPICS)

作者简介: 于春蕾 (1987.4), 女, 中国科学院上海应用物理研究所, 助理研究员, 从事加速器控制系统研究。

实现系统开发和运行，系统结构是加速器控制系统“标准模型”的三层架构形式，具有良好的扩展性和稳定性，如图 1 所示。操作员界面 OPI 通过局域网与输入输出控制器 IOC 相连，采用 EPICS 的 CA 协议进行通讯^[4]。IOC 运行在 Linux 系统上，服务器使用的是 MOXA DA-662 嵌入式计算机，通过 Ethernet 接口连接脉冲延时器的远程控制。前端服务器利用嵌入式软硬件技术，完成了嵌入式 EPICS IOC 开发。通过设计实时数据库记录以及图形化人机界面实现定时参数的重复频率设定和时序调整等功能。

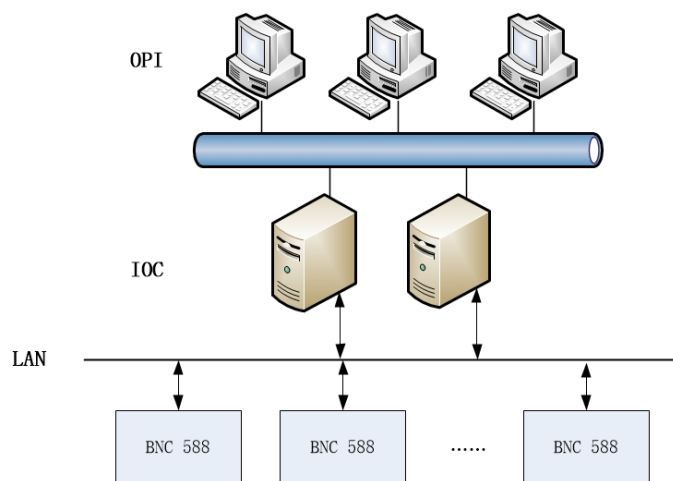


图 1 SXFEL 定时系统控制结构

定时系统采用美国 Berkely Nucleonics Corp 公司的 BNC 588 系列 8 通道数字延时/脉冲发生器，具有 250ps 的延迟与宽度分辨率，50ps 的内部抖动。主定时系统的所有数字延时器均工作在外部触发模式，从 SXFEL 飞级同步系统获取 10MH--100MHz 频率信号作为时间基准，作为用于时序触发的起始基准 T_0 ，根据设定的触发时序，产生触发脉冲序列输出到设备上，对设备进行触发和同步。

3. 硬件结构和设计

3.1 定时系统硬件结构

SXFEL 试验装置目前共使用了 9 台 BNC 588 脉冲发生器，其中一台用来接收来自同步系统的 T_0 基准触发信号，通过 8 路输出信号将 T_0 扇出至其他 8 台 BNC 588，如图 2 所示。8 台 BNC 588 设备的输出信号连接各个需要触发的子系统设备，产生的时序信号主要用于：

- 光阴极电子枪触发；
- 调制器触发信号；
- 数字化低电平 LLRF 系统触发时序；
- RF 放大器触发时序；
- 束流测量系统触发信号；
- 激光系统触发时序等。

定时系统在同一定时脉冲的触发在时间上要求有较高的一致性,由光纤长度引起的误差可通过有效的补偿来消除。通过测量每一路触发脉冲的响应时间,进而计算每一路的补偿时间,通过对 BNC 588 每路设置不同的延时步长的方法,确保各系统在同一时间接收到触发脉冲。

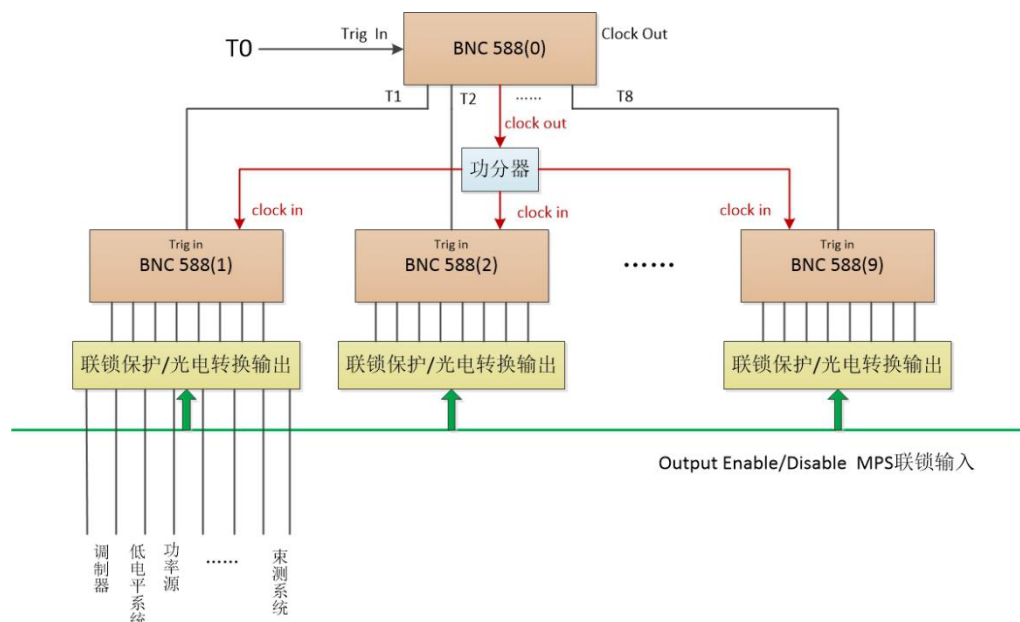


图 2 定时系统硬件结构

定时系统的每路信号都要保证触发信号的精确性,所以 BNC 588 之间使用时钟锁相技术保证每台设备工作频率的一致性。BNC 588(0)这台设备将设定的工作时钟输出给功分器,功分器将扇出 8 路时钟信号给每个 BNC 588 设备,每台脉冲发生器都工作在外部时钟锁相环模式下,目前的时钟频率为 100MHz,有效提高了定时系统的精度。

3.2 光电转换模块设计

BNC 588 的脉冲输出信号采用 BNC 接头,由于定时机柜和各触发子系统设备间距离较长,触发信号将通过光纤传输,在主定时系统与接收设备端采用光电转换模块恢复为电信号。

自主设计了定时系统触发信号光电转换器的发送端和接收端,其原理图如图 3 所示。接收端具有 8 个输入和输出通道接口,可将触发信号转换成光信号传输,并且加入了来自联锁系统的使能信号。机器联锁保护系统提供给主定时的触发 Enable 信号,可以根据联锁逻辑运算结果来控制开启或屏蔽触发脉冲的输出。

光电转换的接收端将光信号恢复为电信号连接至各个子系统设备,依据不同设备的接口要求,接收端提供两种电信号类型,一种是用于低电平系统的 LVDS 差分信号,一种是用于其他触发设备的 TTL 电平信号。

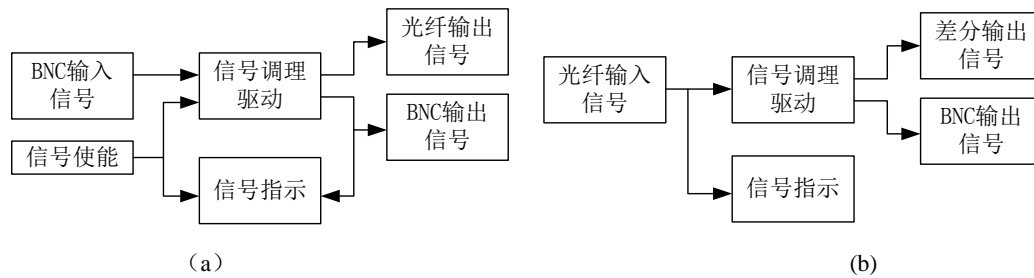


图3 光电转换器原理图

(a) 发送端原理图 (b) 接收端原理图

4. 控制软件设计

BNC 588 支持串口、网络等多种远程接口,出于系统管理和运行开发需求等因素考虑,控制系统的接口尽量使用 Ethernet 接口。所以对 BNC 588 进行了网络配置,通过以太网实现脉冲发生器的控制和状态读取。BNC 588 采用命令控制模式,因此在 EPICS 驱动开发过程中使用 StreamDevice 模块发送命令字符和接收状态字符。StreamDevice 是基于数据流的 EPICS 设备通讯支持模块,通过发送和接收字符串数据来实现对串口设备的远程控制,字符串可以包含非显示字符的广义字符。每一个支持的记录通过执行 Protocol 文件中的一条协议实现对设备的读、写操作。Protocol 文件定义了记录处理时发送的字符串内容和数据转换格式,以及对接收字符串的解释与格式转换,进而提取记录的数值^[5]。

SXFEL 控制系统的操作界面全部使用 EDM(Extensible Display Manager)开发设计,目前正在运行使用的定时系统操作界面如图 4 所示。操作员可从界面中读取当前脉冲发生器的运行状态,对设备进行运行/停止的控制操作,并且可以根据需求调整每一路脉冲信号的延时和脉宽等信息。



图4 SXFEL 定时系统操作界面

5. 系统测试

SXFEL 试验装置已于 2016 年 12 月完成设备安装并已经成功出束，在实验室和加速器运行中，对定时系统的性能进行了测试。对光电转换接受端的触发信号进行了时间抖动测试，测试采样 1 万次以上，结果显示定时系统的时间抖动小于 150ps，满足目前的物理需求，如图 5 所示。



图 5 触发信号时间抖动测试

SXFEL 定时系统已在线运行超过一年半的时间，期间从未出现过触发中断或误触发的现象，系统的可靠性和稳定性得到了实际的检验。同时，测试了定时系统的联锁响应功能，当联锁信号出现时，可自动切断定时系统的触发信号。

6. 小结

本文基于 BNC 588 脉冲发生器，结合自行设计的光电转换模块，实现了上海软 X 射线自由电子激光定时系统的设计。使用 EPICS 将定时系统纳入加速器的分布式控制系统中，可以设定精密的延时、脉宽等参数，并产生具有联锁保护的触发脉冲。经长期运行测试，该系统稳定可靠，并且具有易扩展、成本低、开发周期短等优势，满足加速器的正常运行需求。

参考文献:

- [1] 赵振堂, 王东. 种子型高增益自由电子激光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8):1-13.
- [2] 谷端, 赵明华. 上海软 X 射线自由电子激光束流准直[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9):2183-2186.
- [3] 赵江, 陈又新, 黄玉珍, 等. 重离子加速器同步定时触发系统的实现[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10):1899-1903.
- [4] 李刚, 赵籍九, 等. BEPC II 储存环真空控制系统[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(04): 504-507.
- [5] EPICS StreamDevice User's Guide[EB/OL]. <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/doc/>.

Timing System for Soft X-ray Free-Electron Laser in Shanghai

Yu Chunlei, Zhao Huan, Ding Jianguo, Hu Shouming

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In order to meet the requirement of free electronic laser operation, an accurate timing trigger signal to the accelerator device should be provided. According to the physical requirements and system allocation of SXFEL, the hardware design of the timing system is realized, which based on the high-precision pulse generator and combined with the photoelectric converter with interlocking interface. Experimental physics and industrial control systems (EPICS) is used to perform the network-based distributed remote control system. All the functions are verified through the on line operation, and the system works stably and reliably.

Key words: timing, pulse generator, EPICS, photoelectric conversion