

基于高精度脉冲发生器的定时系统设计

于春蕾 赵 欢 胡守明 丁建国

(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求,需要向加速器设备提供精确的定时触发信号。依据上海软X射线自由电子激光装置(Soft X-ray Free-Electron Laser Facility, 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SXFEL定时系统的硬件设计。系统的软件部分使用实验物理与工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control Systems, EPICS)完成基于网络的分布式远程控制。通过在线测试,该系统运行稳定可靠,抖动时间小于150 ps,满足加速器对定时系统的要求。

关键词 定时, 脉冲发生器, 实验物理与工业控制系统, 光电转换

中图分类号 TL503.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040102

Design of timing system based on high accurate pulse generator

YU Chunlei ZHAO Huan HU Shouming DING Jianguo

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

Abstract [Background] The Soft X-ray Free-Electron Laser (SXFEL) is the fourth generation light source. The timing system is the key subsystem of the accelerator which can provide accurate timing trigger signal for the devices. [Purpose] This study aims to design a timing system which can totally meet the requirements of SXFEL facility operation. [Methods] According to the physical requirements and system physical equipments allocation of SXFEL, the hardware design of the timing system was based on the high precision pulse generator to realize high precision timing signals. The machine protection system (MPS) interface circuit and photoelectric converter for long distance transmission were developed as well. Experimental Physics and Industrial Control Systems (EPICS) was employed to perform the network-based distributed remote control system. [Results & Conclusions] The system works stably and reliably during the on line operation. The test results show that the jitter time is less than 150 ps, satisfying accelerator's requirements for timing system.

Key words Timing, Pulse generator, EPICS, Photoelectric conversion

上海软X射线自由电子激光装置(Soft X-ray Free-Electron Laser Facility, SXFEL)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

第一作者: 于春蕾, 女, 1987年出生, 2014年于中国科学院大学获博士学位, 研究领域为加速器控制技术

通信作者: 丁建国, E-mail: dingjianguo@sinap.ac.cn

收稿日期: 2018-11-16, 修回日期: 2019-02-11

First author: YU Chunlei, female, born in 1987, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2014, focusing on accelerate control system

Corresponding author: DING Jianguo, E-mail: dingjianguo@sinap.ac.cn

Received date: 2018-11-16, revised date: 2019-02-11

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(PXI extensions for Instrumentation Express)、VME(VersaModule Eurocard)、PCI(Peripheral Component Interconnect)和CPCI(Compact PCI)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^[3-4]。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^[5],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。

1 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(Experimental Physics and Industrial Control Systems, EPICS)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(Operator Interface, 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^[6]。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接口连接脉冲发生器的远程控制。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。

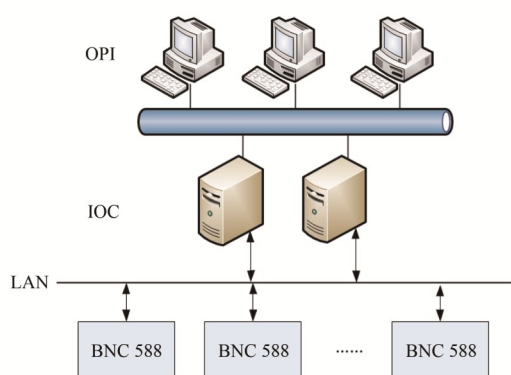


图1 SXFEL定时系统控制结构
Fig.1 Structure of timing system for SXFEL

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250 ps的延迟与宽度分辨率、50 ps的内部抖动。主定时系统的所有数字脉冲发生器均工作在外部触

发模式,从SXFEL飞级同步系统获取10~100 MHz频率信号作为时间基准,作为用于时序触发的起始基准T0,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。

2 硬件结构和设计

2.1 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T0基准触发信号,通过8路输出信号将T0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:1)光阴极电子枪触发;2)调制器触发信号;3)数字化低电平(Low-Level Radio Frequency, LLRF)系统触发时序;4)RF(Radio Frequency)放大器触发时序;5)束流测量系统触发信号;6)激光系统触发时序等。

BNC 588有4种工作模式:Continuous、Single shot、Burst、Duty cycle,依据SXFEL定时系统的整体设计方案,所有BNC 588应该工作在Single shot并且允许外部触发的特定模式下。BNC 588的每路触发信号可以独立地调节脉宽和延时等参数,因此由光纤长度引起的误差可通过有效的延时补偿来消除^[7]。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每路通道设置不同的延时补偿的方法,确保各系统在同一时间接收到触发脉冲。

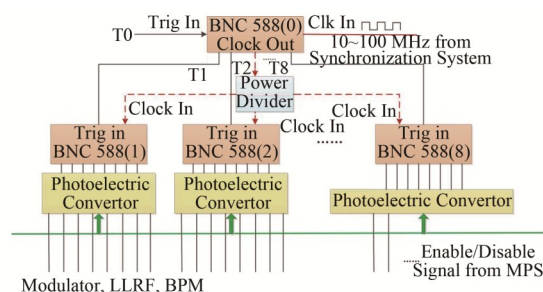


图2 定时系统硬件结构
Fig.2 Hardware architecture of timing system

定时系统的每路信号都要保证触发信号的精确性,BNC 588可以接收外部时钟信号,所以脉冲发生器之间可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)接收来自同步系统的10~100 MHz的时钟信号,将此工作时钟输出给功分器,功分器将扇出8路时钟信号给每台BNC 588设备作为输入时钟信号,所有脉冲发生器都工作在外时钟锁相环模式下,有效提高了定时系统的精度。

2.2 光电转换模块设计

目前 SXFEL 试验装置的加速器段和波荡器段长达 300 多米,今后升级为用户装置后长度会达到 540 m。定时机柜至各触发子系统距离较远,并且需要经过调制器和速调管设备间,会对信号产生一定的干扰和噪声,而光纤传输具有较强的抗电磁干扰能力,因此触发信号将通过光纤传输。由于 BNC 588 的脉冲输出信号采用 BNC 接头,因此需设计光电转换器先在主定时端将电信号转为光信号传输,再在设备端将光信号恢复为电信号。

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,对应BNC 588的8路输出脉冲信号,可将触发信号通过信号驱动和调理转换成光信号传输,并且加入了来自联锁系统的使能信号。机器联锁保护系统(Machine Protection System, MPS)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,有效保障了机器的安全运行。考虑到有些设备可能距离定时机柜较近,定时信号不需要通过光纤传输,因此光电转换器的发送端依然保留了BNC输出接口的设计,可依据现场的具体情况进行选择。

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 (Low - Voltage Differential Signaling)差分信号,一种是用于其他触发设备的TTL (Transistor-Transistor Logic)电平信号。

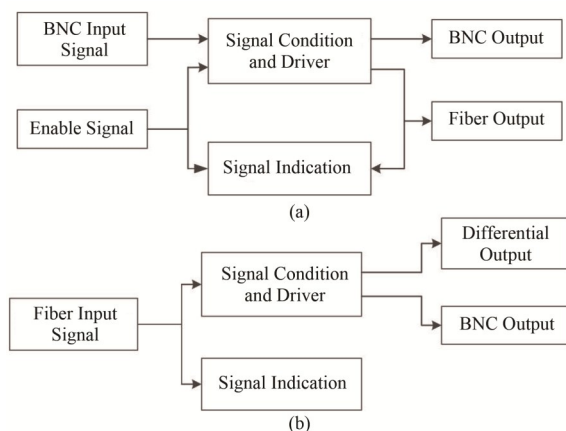


图3 光电转换器原理图

(a) 发送端, (b) 接收端

Fig.3 Principle charts of hotoelectric converter

(a) The sender, (b) The receiver

3 控制软件设计

BNC 588 支持串口、网络等多种远程通讯接口，

出于系统管理和运行开发需求等因素考虑, SXFEL 控制系统的接口尽量统一使用以太网接口。因此对 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, 采用 SCPI 协议^[8]。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^[9]。

EPICS 通过触发分布式动态数据库的记录执行,用来实现过程控制。定时系统的动态数据库文件使用模板化载入的方式,分为BNC 588 整机控制文件和各通道控制文件两种。整机控制主要实现设备开关机、运行状态、运行模式选择、T0 频率设定以及时钟选择等功能设置和状态回读,各通道控制主要完成每个通道的脉宽、延时、触发使能等参数的监控。目前试验装置定时系统运行的 PV(Process Variable)数目已达到4 000 个以上。

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^[10]。

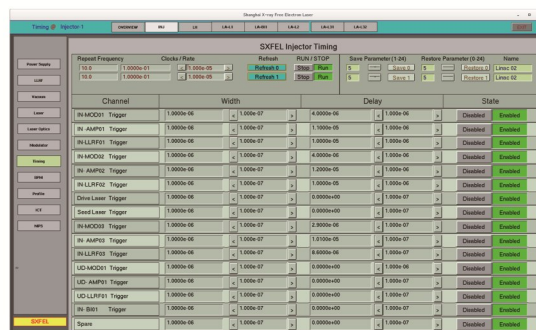


图4 SXFEL定时系统操作界面

Fig.4 The interface of timing system for SXFEL

4 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。使用两台BNC 588搭建测试平台,BNC 588之间的同步时钟信号频率为

100 MHz。其中一台用来接收外部触发信号T0,对输出T1和T2通道进行相同的配置,设定脉宽为1 μ s,延时为0 s。其中,T1接入示波器,作为示波器触发信号,T2作为另外一台BNC 588的Trig in信号,其输出信号接入光电转换器。在光电转换接收端对触发信号进行了时间抖动测试,测试采样 10^4 次以上,结果显示定时系统的时间抖动均方根值(Root Mean Square, RMS)小于150 ps,满足目前的物理需求,如图5所示。

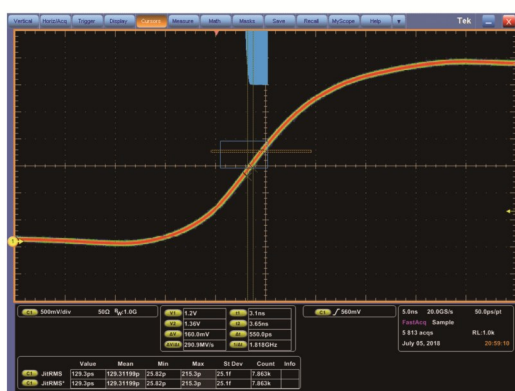


图5 触发信号时间抖动测试
Fig.5 The trigger signal timing jitter test

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现场设备的运行检验。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。

5 结语

本文基于BNC 588脉冲发生器,结合自行设计的光电转换器,实现了上海软X射线自由电子激光试验装置定时系统的设计。使用EPICS将定时系统的远程控制纳入加速器的分布式控制系统中,可以在线设定精密的延时、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,也为今后升级用户装置奠定了基础。

参考文献

- 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.
ZHAO Zhentang, WANG Dong. Seeded high-gain free-electron lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, **50**(8): 1-13.
- 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.
GU Duan, ZHAO Minghua. Beam alignment for SXFEL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, **24**(9): 2183-2186.
- 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.
ZHAO Jiang, CHEN Youxin, HUANG Yuzhen, *et al.* Implement of synchronous timing trigger system in heavy ion accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(10): 1899-1903.
- Liu M, Dai X L, Yin C X, *et al.* Preliminary design of a femtosecond timing system for large accelerator facilities[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(3): 32. DOI: 10.1007/s41365-018-0369-1.
- Zhang W Y, Liu X Q, Feng L, *et al.* 2.856 GHz microwave signal extraction from mode-locked Erfiber lasers with sub-100 femtosecond timing jitter[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(6): 91. DOI: 10.1007/s41365-018-0419-8.
- 李刚, 赵籍九, 陈伯飞, 等. BEPCII储存环真空控制系统[J]. 原子能科学技术, 2010, **44**(4): 504-507.
LI Gang, ZHAO Jijiu, CHEN Bofei, *et al.* Vacuum control system of BEPC II storage ring[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**(4): 504-507.
- 刘鸣, 殷重先, 赵黎颖, 等. 新型定时系统设计[J]. 核技术, 2010, **33**(6): 425-428.
LIU Ming, YIN Chongxian, ZHAO Liying, *et al.* Design of a novel timing system[J]. Nuclear Techniques, 2010, **33**(4): 425-428.
- 邵娟. 基于SCPI协议的可编程直流电源设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
SHAO Juan. Design of a programmable DC power supply system based on SCPI[D]. Suzhou: Soochow University, 2016.
- EPICS Stream Device User's Guide[EB/OL]. 2016-07 [2018-11]. <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/doc/>.
- Wang J G, Liu X Q, Feng L, *et al.* Analysis of electro-optical intensity modulator for bunch arrival-time monitor at SXFEL[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(1): 3. DOI: 10.1007/s41365-018-0524-8.