

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

300 MeV质子重离子加速器直线注入器定时系统设计与实现

韩小东 刘冬娥 许哲 张瑞锋 李世龙 周睿怀 丛岩

Design and implementation of linear injector timing system for 300 MeV proton and heavy ion accelerator

Han Xiaodong, Liu Donge, Xu Zhe, Zhang Ruifeng, Li Shilong, Zhou Ruihuai, Cong Yan

引用本文:

韩小东, 刘冬娥, 许哲, 张瑞锋, 李世龙, 周睿怀, 丛岩. 300 MeV质子重离子加速器直线注入器定时系统设计与实现[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36: 084003. doi: 10.11884/HPLPB202436.240041

Han Xiaodong, Liu Donge, Xu Zhe, Zhang Ruifeng, Li Shilong, Zhou Ruihuai, Cong Yan. Design and implementation of linear injector timing system for 300 MeV proton and heavy ion accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 084003. doi: 10.11884/HPLPB202436.240041

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

实验物理和工业控制系统在极向场电源控制系统中的应用

Application of experimental physics and industrial control system in poloidal field power supply control system

强激光与粒子束. 2017, 29: 026001 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160436>

基于实验物理和工业控制系统的电源操作节点开发

Development of console system for EAST poloidal field power supply

强激光与粒子束. 2017, 29: 046002 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160438>

CSNS加速器真空控制系统的设计与实现

Design and implementation of vacuum control system of China Spallation Neutron Source

强激光与粒子束. 2020, 32: 084001-1-084001-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200042>

质子治疗装置动态电源控制系统研发

Development of dynamic power control system in proton therapy facility

强激光与粒子束. 2020, 32: 045108-1-045108-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190442>

BEPCII直线加速器数字延时触发器的设计与实现

Design and implementation of digital delay and pulse generator of BEPC II linear accelerator

强激光与粒子束. 2020, 32: 074001-1-074001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200018>

APTR质子同步加速器RFQ直线注入器的优化设计

Upgrade of RFQ injector system for proton synchrotron at Shanghai Advanced Proton Therapy Facility

强激光与粒子束. 2020, 32: 064004-1-064004-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200036>



·粒子束及加速器技术·

300 MeV 质子重离子加速器直线注入器 定时系统设计与实现^{*}

韩小东^{1,2,3}, 刘冬娥^{2,3,4}, 许哲^{1,3}, 张瑞锋^{1,3}, 李世龙^{1,3}, 周睿怀⁴, 丛岩^{1,3}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049; 4. 先进能源科学与技术广东省实验室, 广东惠州 516003)

摘 要: 针对哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置 (SESRI)-300 MeV 质子重离子加速器直线注入器, 设计了直线定时系统, 为脉冲工作模式的直线注入器斩波器、高频低电平系统、束流诊断与反馈系统提供精准的、符合物理调束需求的工作时序触发信号。系统硬件基于现场可编程门阵列 (FPGA) 设计和开发, 实现了内触发模式与外触发模式两种模式下对直线加速器相关设备的精准时序控制以及斩波器的控制与安全联锁。硬件支持光信号通信、W5300 以太网通信、多路继电器输出与多路同步触发信号的精准时序输出。同时, 系统采用光信号通信模块方便系统的级联, 易于系统扩展, 可满足大规模直线加速器定时系统需求。用户上位机软件基于实验物理和工业控制系统 (EPICS) 分布式架构开发。该系统已成功运用在 300 MeV 质子重离子加速器装置、近代物理研究所 SSC-LINAC 装置, 且长期运行稳定、可靠, 无任何故障。

关键词: 空间环境地面模拟装置; 直线定时系统; 可编程门阵列; 实验物理和工业控制系统; 时序控制

中图分类号: TL56

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240041

Design and implementation of linear injector timing system for 300 MeV proton and heavy ion accelerator

Han Xiaodong^{1,2,3}, Liu Dong'e^{2,3,4}, Xu Zhe^{1,3}, Zhang Ruifeng^{1,3}, Li Shilong^{1,3}, Zhou Ruihuai⁴, Cong Yan^{1,3}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516003, China)

Abstract: A linear timing system was designed for the linear injector of harbin institution of Technology's space environment simulation and research infrastructure (SESRI) -300 MeV proton and heavy ion accelerator. The linear timing system provides precise timing trigger signals for linear accelerator chopper system with pulse operation mode, low-level RF control system, beam current diagnostic and feedback system to meet the demands of physical beam tuning. The system hardware, based on Field Programmable Gate Array (FPGA), realizes precise timing control of related equipment of linear timing system in internal trigger mode and external trigger mode, as well as the control and safety interlock of chopper. The hardware can realize optical signal communication, W5300 Ethernet communication, multiple relay outputs and multiple synchronized trigger signals with precise timing outputs. At the same time, the use of optical signal communication module will facilitate the cascade of systems and system scalability, which can meet the large-scale needs of linear gas pedal timing system. The user high level software is developed based on the distributed architecture of EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System). The linear timing system has been successfully used in SESRI-300 MeV and SSC-LINAC of Institute of Modern Physics (IMP), and has operated stably and reliably for a long period of time without any failure.

* 收稿日期: 2024-01-30; 修订日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11975289)

联系方式: 韩小东, hanxiaodong102@impcas.ac.cn。

通信作者: 丛岩, congyan@impcas.ac.cn。

Key words: SESRI, linear timing system, FPGA, EPICS, temporal control

300 MeV 质子重离子加速器是国家“十二五”重大科技基础设施空间环境地面模拟装置(SESRI)的核心装置,为离子辐射与材料、器件及生命体的相互作用研究提供地面模拟辐照源,为我国空间科学与航天技术基础研究提供先进的实验平台^[1]。该装置采用电子回旋共振(ECR)离子源、直线注入器与同步加速器组合方案^[2]。直线注入器由1套四杆型射频四极场加速器(RFQ)、4套漂移管直线加速器(IH-DTL)、1套聚束器(BUNCHER)、2套散束器(DEBUNCHER)以及各能段束流传输线组成。8套高频加速单元工作在频率108.48 MHz、脉冲宽度最大1 ms、重复频率最大10 Hz的射频脉冲功率下,将质子和重离子束流分别加速至5.6 MeV/u与2 MeV/u后注入至同步环中,继而进一步加速至最高能量300 MeV/u(质子),最后引出至高能束线终端开展各种辐照实验。

直线加速器作为同步环注入器,其加速梯度高,束流品质好,传输效率高,注入引出结构简单,对铍、铀等多种高电荷态、高能量的重核束流的研究具有重要作用^[3]。直线定时系统能够为脉冲工作模式的直线加速器斩波器、离子源系统、高频低电平系统、束流诊断与反馈系统提供不同工作模式下(内触发、外触发模式)精准的符合物理调束需求的工作时序的同步触发信号(各路之间周期、脉宽、延时可调的触发信号)。斩波器根据直线定时系统提供的触发信号,将直流束按物理调束人员的需求切换成符合一定时间结构的脉冲束,是实现人身安全联锁与机器保护的核心设备;高频低电平系统响应直线定时系统的触发信号,产生周期性的射频激励信号作用于高频发射机,使直线加速器的高频腔建立加速电场对通过斩波器的束流进行加速;束流诊断与反馈系统则根据直线定时系统提供的触发信号,进行束流发射度、流强的准确获取。粒子加速器的发展过程中,定时技术最初主要是基带分布定时技术,发展到现在主要有事件定时技术和白兔定时技术^[4]。基带分布定时技术一般采用储存环高频频率或者储存环高频的倍频作为参考时钟,对参考时钟进行分频、延时、锁相同步得到触发信号,该种方案多采用独立部件,导致系统的集成度较差,在传输过程中还会引入误差;事件定时技术是由美国先进光源提出的一种由事件驱动的定时技术,主要包括事件产生器(EVG)、事件扇出器(Fan-out)、事件接收器(EVR),事件定时系统具有结构简单,集成度高的特点,被广泛应用于国内外的大型粒子加速器装置中;白兔定时(WR)技术是欧洲核子中心提出的一种基于以太网的定时技术,其准确性可达ns量级,精度可达ps量级。现阶段直线定时系统普遍采用通用的同步脉冲发生装置,此类通用同步脉冲发生装置输出通道有限,触发模式单一,不利于系统扩展、维护。为此,结合本文300 MeV 质子重离子加速器直线注入器的需求,基于事件定时技术,设计了基于FPGA架构的直线定时系统,实现了不同触发模式(内触发/外触发(光信号触发、电信号))下多路同步触发信号精准的时序输出,接收外部冷却水、真空故障联锁信号,用于控制斩波器快速切断束流,实现设备(高频腔体)安全联锁。同时,可输出外部联锁信号控制离子源微波机,实现人身安全联锁^[5-6]。

1 系统介绍

为了将带电粒子加速至物理设计能量,300 MeV 质子重离子加速器装置直线注入器由ECR离子源,低能线的斩波器、8套高频系统、束流诊断与反馈系统与各能段的束流传输线组成。为实现粒子加速与束流在线实时监测、诊断,这些设备需要按严格的时序关系工作,而直线定时系统按照物理给定的时序,提供精准、稳定、可靠的同步触发信号,使以上相关设备按照既定的时序关系工作,实现不同工作模式、不同粒子的稳定加速与供束。直线定时系统可工作在内触发模式和外触发模式。内触发模式用于直线注入器单独进行束流优化,便于物理人员调束。外触发模式用于直线注入器束流优化完成,束流注入同步环加速器时,接收外部触发信号,使直线注入器相关设备与注入线相关设备按照一定时序关系工作。外触发模式下,可接收电信号触发也可接收光事例信号触发。以上相关设备不同工作模式的工作时序如图1、图2所示。

内触发模式下,以 T_0 通道为参考基准,离子源系统、斩波器、高频系统和束测系统的同步触发信号皆相对于 T_0 进行延时^[7]。 T_0 基准输出通道没有延时,周期100 μs ~10 s可调,占空比为固定的50%。同步触发信号输出通道原理相同,各输出通道周期与 T_0 通道相同,延时、脉宽均可调,要求延时、脉宽可调节范围0~220 ms,步进1 μs ,各输出通道峰峰值抖动小于1 ns,输出通道之间延时准确度小于1 ns。外触发模式下,直线定时系统接收外部光信号或电信号触发,离子源系统、斩波器、高频系统和束测系统的同步触发信号延时皆相对于外部触发信号上升沿。要求同步触发信号延时范围0~20 ms,步进1 μs ,各输出通道峰峰值抖动小于1 ns,输出通道之间延时准确度小于1 ns。外触发模式下,斩波器接收外部触发信号,响应外部触发信号的上升沿,停止输出高压脉冲,使离子源引出

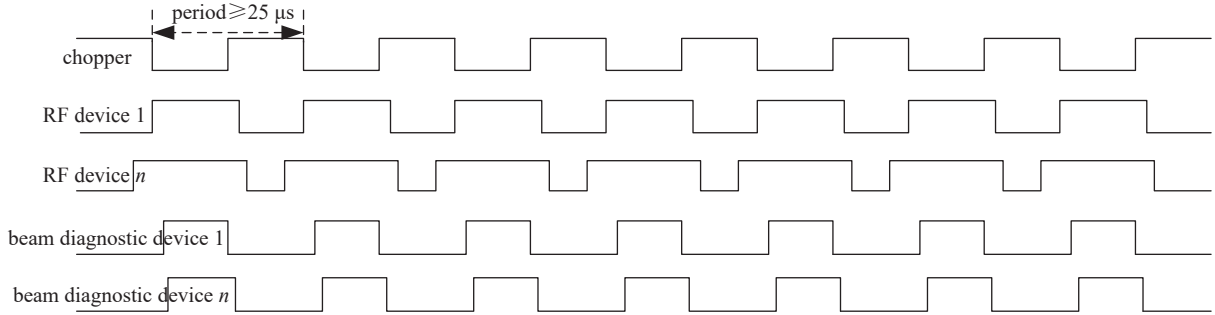


Fig. 1 Timing diagram of linear timing system triggering related devices in internal trigger mode

图 1 内触发模式下直线定时系统触发相关设备时序图

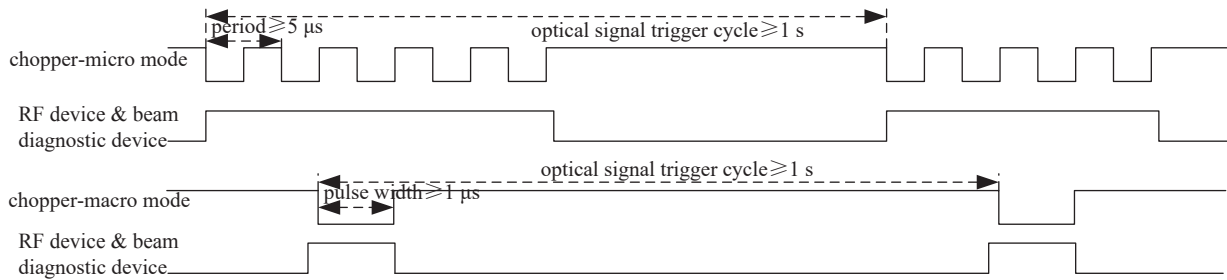


Fig. 2 Timing diagram of linear timing system triggering related devices in external trigger mode (micro pulse, macro pulse)

图 2 外触发模式下(微脉冲、宏脉冲)工作方式直线定时系统触发相关设备时序图

束流通过斩波器电极。此时, 高频系统和束测系统按照外部触发信号的上升沿开始工作, 以达到加速、在线实时监测束流的目的。待此周期对应脉宽的同步触发信号输出完毕, 斩波器开始输出高压脉冲, 偏转束流, 防止束流漂移进入高频腔体, 损坏腔体加速电极。内触发模式下, 斩波器、高频系统和束测系统同步触发信号工作过程与外触发工作模式下工作过程相同。外触发模式下又可分为微脉冲工作方式和宏脉冲工作方式, 两种工作方式的不同点在于斩波器工作方式。微脉冲工作方式下, 在一个外触发信号到来期间, 斩波器输出脉冲高压会切换不同次, 且切换次数、工作周期、脉宽、延时均可调。而宏脉冲工作方式下, 在一个外触发信号到来期间, 斩波器输出脉冲高压只切换一次。考虑到设备安全和人员联锁安全, 设计了快联锁保护。当检测到高频系统水联锁信号或者真空联锁信号异常时, 直线定时系统停止输出同步触发信号, 同时输出一路联锁信号, 使离子源出口处的法拉第筒插入, 阻止束流通过; 当检测到辐射防护门联锁信号异常时, 直线定时系统停止输出同步触发信号, 同时输出一路联锁信号关闭离子源的微波机, 切断束流。同时, 为了方便完成对斩波器系统高压脉冲发生器的控制, 设计了一路继电器输出用来实现高压脉冲发生器输出脉冲高压的控制和远程复位。

2 硬件系统设计

硬件设计采用 Altera Cyclone II 系列的 FPGA, 该系列的 FPGA 具有功耗低、成本低的优势, 具体型号是 EP2C35F484C8。硬件设计主要包括 FPGA 模块, 外部触发信号生成电路(电信号触发、光信号触发), W5300 通信电路, 同步触发信号输出电路、光事例信号输出电路以及时钟、电源、复位电路。其硬件系统总体框图如图 3 所示。

2.1 内触发模式下基准 T_0 通道输出逻辑电路

内触发模式下, 不接收外部触发信号, 用于直线注入器单独进行束流优化, 方便物理调束人员分段调束。离子源系统、斩波器、高频系统和束测系统同步触发信号延时皆相对于 T_0 基准输出的上升沿, 周期与 T_0 同步, T_0 通道只能调节周期, 占空比为固定的 50%。 T_0 通道输出模块的逻辑电路采用 Verilog 语言实现, 其状态机如图 4 所示。 s_0 为初始状态, 此时高、低电平时间分别等于上位机界面 T_0 通道周期下发值的一半, T_0 通道开始输出高电平, s_1 为高电平持续时间计数状态, 当高电平持续时间等于 0 时, T_0 通道输出低电平, 进入 s_2 状态, s_2 为低电平持续时间计数状态, 当低电平持续时间等于 0 时, T_0 输出高电平, 复位进入 s_0 状态, 开始下一周期的输出。设计中采用 50 MHz 的有源晶振, 高、低电平计数周期都为 20 ns。由于离子源设备、高频设备、束测设备和斩波器触发阈值都为 (5 ± 1) V, FPGA 通用引脚输出逻辑电平为 3.3 V, 因此设计了电平转换电路, 采用 SN74LVC4245 芯片, 电平转换的同时将 FPGA 与输出驱动电路进行了隔离, 防止 FPGA 的损坏。同时, 为防止直线定时系统意外断电时, 同步触

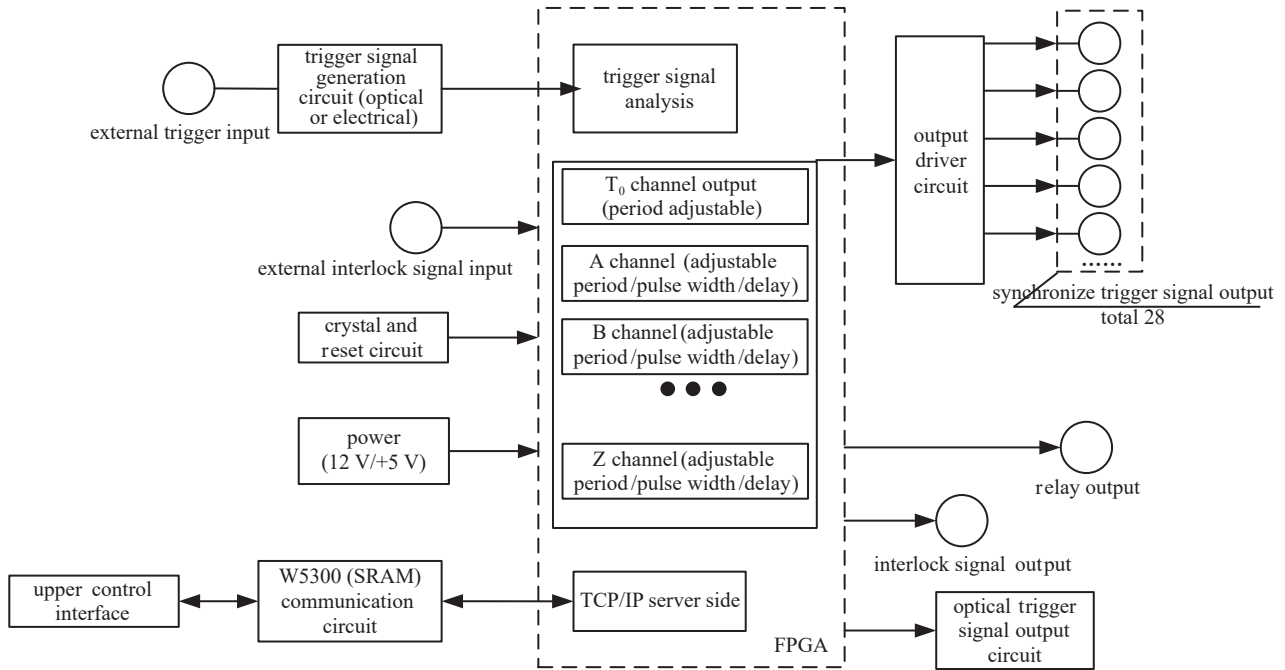


Fig. 3 General block diagram of linear timing system and chopper control system hardware system

图 3 直线定时系统硬件总体框图

发信号意外输出高电平,对工作于脉冲模式的高频发射机造成损坏,设计时在 FPGA 输出引脚上下拉 $2.2\text{ k}\Omega$ 的电阻,保证因意外断电时,可靠的输出低电平。

2.2 内触发模式下同步触发信号输出逻辑电路

内触发模式与外触发模式下,高频系统、束测系统同步触发逻辑电路相似。同步触发信号模块的状态机如图 5 所示。 s_0 为初始状态,当检测到内触发模式 T_0 通道的上升沿或外触发模式下(光事例触发事例号符合预置事例号时,标志位置 1,或电信号时触发信号的上升沿)且脉宽大于 0 时,状态机由 s_0 转换到 s_1 ,进入延时计数状态,当延时时间到,开始输出高电平,然后由 s_1 转换到 s_2 状态,进入脉宽计数状态,当脉宽计数大于设置脉宽时,输出低电平,复位进入 s_0 状态,等待下一周期的输出。

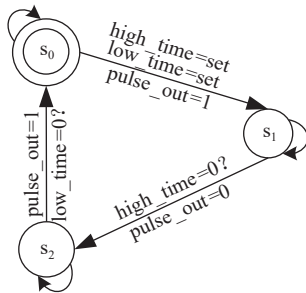
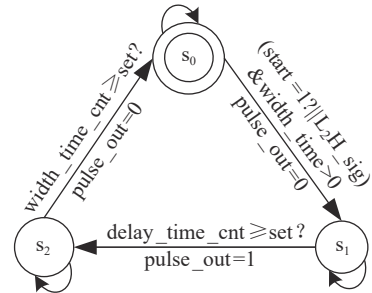
Fig. 4 T_0 channel (reference) state machine in internal trigger mode图 4 内触发 T_0 通道(基准)状态机

Fig. 5 Synchronized trigger output channel state machine in internal/external trigger mode

图 5 内触发/外触发模式下同步触发输出通道状态机

2.3 外触发模式光事例解析逻辑电路

外触发模式下,直线注入器、注入引出段、同步环相关设备需要按照严格的时序关系启动或停止工作,300 MeV 质子重离子加速器采用光事例信号集中分发模式实现相关设备同步触发。直线定时系统接收外部光事例号,实现直线注入器相关设备与注入线设备的同步触发。接收外部光事例触发流程图如图 6 所示。

外部光事例触发信号解析逻辑电路与外部触发信号生成电路相连,用于在外触发模式下接收经光电转换电路输入的 32 位位宽的光事例号并进行解析,将解析得到的光事例号与外部事例触发信号解析单元内预存的光事例号进行比较,如果符合预存的光事例号,开始进行延时,延时时间到,输出相应脉宽的同步触发信号,同时判断本次触发周期内的脉冲输出是否结束,未结束的情况下不会响应下一个触发周期,如果不符合预存的光事例号,则不

动作。采用光事例触发模式, 具有衰减小, 抗干扰能力强、安全性能高、体积小、质量小的优点, 尤其在长距离传输和加速器这种特殊电磁环境的应用下具有无法比拟的优势^[8]。设计中采用 HFBR2521 光纤接收器。

2.4 W5300 通信电路

W5300 内部集成有 10/100 M 以太网控制器, 内部集成了全硬件的 TCP/IP 协议栈、以太网介质传输层 (MAC) 和物理层 (PHY)^[9]。设计中使用 FPGA 控制 W5300 实现以太网通信, FPGA 通过直接地址模式进行 W5300 进行相关寄存器、存储器、端口等配置, 就可以实现高速度的数据传输。其优点是系统造价低, 数据传输稳定、开发时间短、设计者易于上手操作。基于 FPGA 的 W5300 通信电路框图如图 7 所示。

图 7 中, W5300 采用 16 位数据总线, 配置全功能自动握手运行模式。16 位数据位, 10 位地址位均直接与 FPGA 的 I/O 引脚相连, 接收到的数据在静态随机存取存储器 (SRAM) 缓存。W5300 的 RST-BG 内部 PHY 模式介质接口引脚通过 1 个 $12\text{ k}\Omega(\pm 1\%)$ 和 1 个 $300\text{ }\Omega(\pm 1\%)$ 的电阻接地。为了保证 W5300 在传输数据的过程中具有更好的抑制高频电压的能力,

将 W5300 内部产生的电压信号与外部电压信号进行隔离, 选用了带网口变压器的 RJ45 连接器 (13F60FGYDPNW2NL)。它的作用使通带中的信号通过, 极大抑制阻带中的信号。接收差分线 RXIP/RXIN 和发送差分线 TXOP/TXON 之间分别串联 $51\text{ }\Omega$ 的电阻实现阻抗匹配。当前, 在主流的以太网接口协议中, 主要有 TCP/IP 协议和 UDP 协议。相较于 TCP/IP 协议, UDP 传输速度更快, 但是, 客户端和服务端没有握手验证机制, 不能很好地保证数据传输的可靠性、稳定性^[10]。而 TCP/IP 协议具有优良的双向传输机制, 在建立连接前需要进行 3 次握手, 以达到客户端和服务端的确认证连接。本次设计中, 选用 TCP/IP 协议, 在满足数据传输速度的基础上又保证了数据传输的稳定性、可靠性。TCP/IP 服务器端程序实现时, 采用 Verilog 语言实现, 包括 W5300 的初始化, 主要进行硬件复位, 源 MAC 地址寄存器 (SHAR)、网关地址寄存器 (GAR)、子网掩码寄存器 (SUBR), 本机 IP 地址寄存器 (SIPR) 以及相应端口中断寄存器设置; 侦听主要用于将 W5300 设置为 TCP Server 模式, 为数据收发做准备; 数据的接收和发送代码。

3 系统软件设计

3.1 系统硬件板卡软件设计

300 MeV 质子重离子加速器直线定时系统硬件板卡采用基于 FPGA (EP2C35F484C8) 的硬件框架实现。软件设计主要由 T_0 触发源 (基准) 输出控制程序, 27 路同步触发信号输出控制程序, 模式切换控制程序, 32 位光事例触发信号收、发解析控制程序, 基于 W5300 的 TCP Server (服务器端) 控制程序, 外部联锁信号控制程序组成, 采用 Verilog 语言实现。直线定时系统硬件板卡工作流程如图 8 所示。

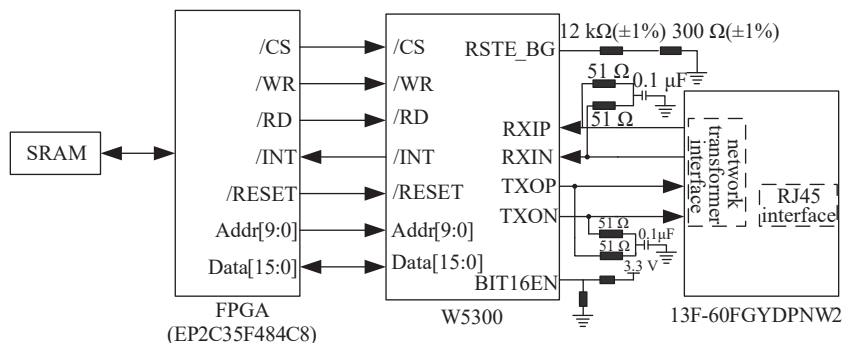


Fig. 7 Block diagram of FPGA-based W5300 communication circuit

图 7 基于 FPGA 的 W5300 通信电路框图

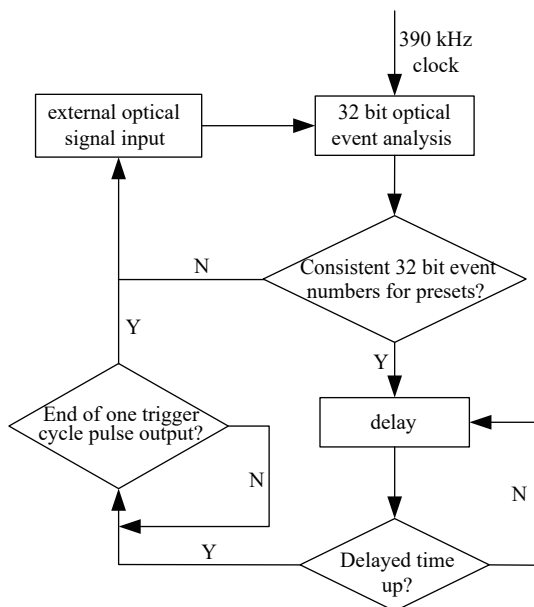


Fig. 6 Diagram of optical example input signal analysis in external trigger mode

图 6 外触发模式下光事例输入信号解析流程图

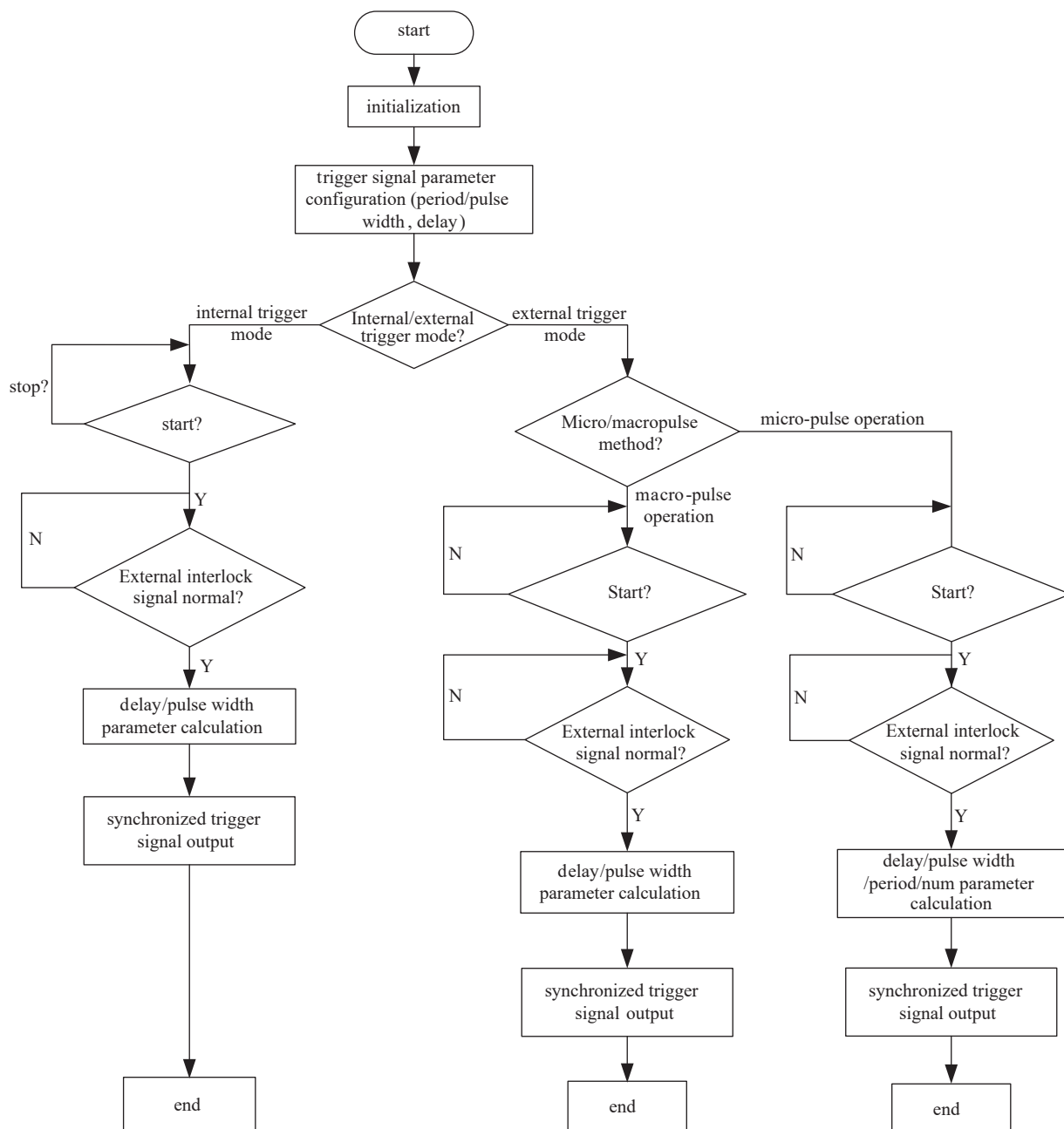


Fig. 8 Diagram of linear timing system workflow

图 8 直线定时系统工作流程图

首先进行系统初始化,与上位机控制界面客户端(TCP Client)建立连接,做好收发数据的准备;接着进行基准输出通道周期参数设置,同时进行其它同步触发信号延时、脉宽参数设置。选择触发模式,若是内触发模式,判断是否开始触发,若开始触发,下一步判断外部联锁输入信号(真空、水)是否正常,正常时,进行同步触发信号延时、脉宽参数计算,最后输出同步触发信号;若是外触发模式,进行 32 bit 光事例触发信号解析,光事例触发信号符合且为宏脉冲触发方式,若开始触发,判断外部联锁信号是否正常,正常,则进行延时、脉宽参数计算,最后输出同步触发信号,外触发模式下微脉冲工作方式流程类似。同时,可进行人身安全一级联锁保护和设备安全二级联锁保护。若一级联锁保护信号(辐射防护门联锁信号)异常,直线定时系统停止输出同步触发信号,同时输出一路外部联锁信号将离子源微波机联锁,切断束流;若是真空、冷却水联锁信号异常,直线定时系统停止输出同步触发信号的同时,输出一路外部联锁信号使离子源出口处的法拉第筒插入,阻止束流通过,避免束流通过未建立高频腔的高频腔,损坏加速电极。

3.2 系统上位机控制软件设计

EPICS 是一套基于以太网的分布式控制系统软件框架,已被世界上多个大型实验物理装置所采用,可保障装

置控制系统的稳定性和可靠性,易于系统扩展,且能极大简化控制系统的开发^[1]。300 MeV 质子重离子加速器直线定时系统上位机软件基于 EPICS 架构实现。本次设计中完成了基于 CSS 控制界面的开发和基于 TCP/IP 协议的数字接口 IOC 程序的开发。EPICS 框架中用于界面开发的软件 CSS 是 Eclipse 插件的合集,上位机控制系统界面开发使用了该软件,直线定时系统上位机控制界面如图 9 所示。

数字接口 IOC 程序的开发中,由于原始的 EPICS base 中并没有直线定时控制对应的记录类型,因此采用自定义记录类型的方案,并开发了相应的记录支持和设备支持程序。以定时系统斩波器控制参数为例,其记录类型定义如表 1 所示,不同的控制变量定义为不同的域。设备支持程序开发采用了状态机跳转,即将定时系统的控制需求分解为若干状态,设备支持程序在多个状态中切换。相比于直接使用 EPICS 提供的标准记录类型和驱动程序,采用该种方案可以实现复杂控制协议被控设备的灵活控制,满足直线定时系统控制的复杂逻辑需求。



Fig. 9 Interface diagram of linear timing system CSS
图 9 直线定时系统 CSS 上位机界面图

表 1 直线定时控制 EPICS 记录类型及结构体定义

Table 1 Definition of linac timing control

definition of record type for chopper	definition of struct for chopper
<pre>recordtype(Chopper) { include "dbCommon.dbd" field(mPulsePeriod,DBF_FLOAT) { promptgroup (GUI_INPUTS) asl(ASL0) pp(TRUE) } field(modeChoice,DBF_UCHAR) { promptgroup(GUI_INPUTS) asl(ASL0) pp(TRUE) } }</pre>	<pre>typedef struct ChopperRecord { char name[61]; /* Record Name */ char desc[41]; /* Descriptor */ char asg[29]; /* Access Security Group */ epicsEnum16 scan; /* Scan Mechanism */ epicsFloat32 mPulsePeriod; epicsUInt8 modeChoice; Char ip[16]; /* IP address */ epicsInt32 port; /* port */ } ChopperRecord;</pre>

4 系统在线测试

各触发通道输出信号测试过程中,使用 6 通道数字示波器,其具有 1 GHz 带宽、5 GSa/s 采样率。通过直线定时系统上位机界面设定不同触发模式。在内触发模式下,设定 T_0 基准(触发源)周期为 50 μs ,同步触发信号 A、B、C 通道延时分别为 5、10、15 μs ,脉宽分别为 10、20、30 μs ,示波器测试结果如图 10 所示。

然后通过上位机界面设定为外触发模式下(32 bit 光事例触发)的微脉冲工作方式,同步触发信号 A、B、C、D 通道延时分别为 0、10、20、30 μs ,A 通道微脉冲周期 20 μs ,脉宽 10 μs ,脉冲个数 20 个,B、C、D 通道脉宽分别为 400、600、800 μs ,示波器测试结果如图 11 所示。

同时,对各输出通道自身抖动及输出通道之间的延时准确度和精度测试过程中,为了使测试结果更精确,采用了型号为 DSA70604B 的泰克示波器,其具有 6 GHz 带宽,25 GSa/s 采样率,且自带抖动分析工具。内触发模式与外触发模式下,同步触发信号输出通道工作原理相同。测试过程中,选取内触发模式下,以测量 A 通道为例,进行通道抖动分析,以测量 A 通道和 B 通道进行通道间延时准确度及精度分析。设置在内触发模式下,A 通道相对 T_0 通道延时为 0,示波器自带的抖动分析工具 DPOJET v2.2.1 Build 进行 A 通道抖动分析测试,测试结果如表 2 所示。测试结果表明,A 通道抖动时间间隔误差(TIE)峰峰值(p-p)为 64.047 ps,小于需求值 1 ns。表中: σ_{sd} 为同步触发 A 通道 TIE 指标多次测试(本文中是 975 次)的标准差,max 是同步触发 A 通道 TIE 指标多次测试(本文中是 975 次)的最大值,min 是同步触发 TIE 指标多次测试(本文中是 975 次)的最小值,p-p 是同步触发 A 通道 TIE 指标多次测试



Fig. 10 Synchronized trigger signal test chart in internal trigger mode

图 10 内触发模式下同步触发信号测试图

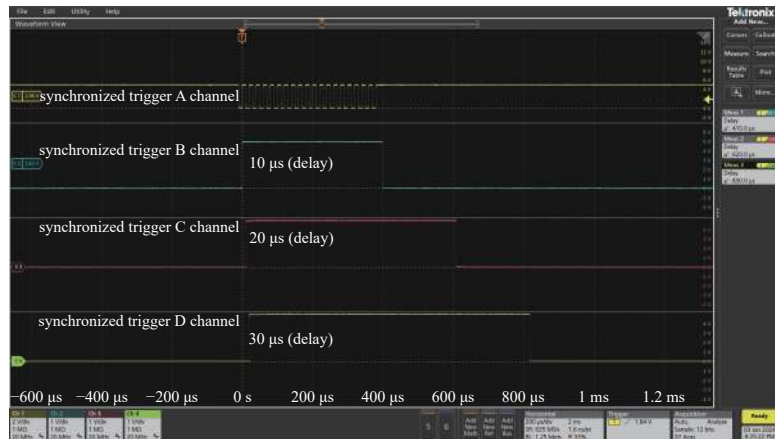


Fig. 11 Synchronized trigger signal test chart in external trigger mode

图 11 外触发模式下同步触发信号测试图

表 2 内触发模式下 A 通道输出抖动测试结果

Table 2 A-channel output jitter statistics in internal trigger mode

description	σ_{sd}/ps	max/ps	min/ps	p-p value/ps	test number	maximum of cycle-cycle/ps	minimum of cycle-cycle/ps
TIE1,Ch1	15.393	36.178	-36.155	72.333	975	56.314	-62.164
current acquisition	15.015	29.386	-34.661	64.047	65	49.640	-48.016

(本文中是 975 次)的峰峰值, test number 是统计测试次数, maximum of cycle-cycle 为同步触发 A 通道 TIE 指标相邻周期多次测试(本文中是 975 次)的最大值, minimum of cycle-cycle 同步触发 A 通道 TIE 指标相邻周期多次测试(本文中是 975 次)的最小值。

设置在内触发模式下, A 通道相对 T_0 通道延时为 0, B 通道相对 T_0 通道延时为 0, 采用等长的线缆将输出通道 A、B 与示波器相连。通道延时都设置为 0, 是为了充分利用示波器高采样率, 提高测试精度。通道间的延时准确度及精度测试结果如图 12 所示。测试结果表明, 在相对延时为 0 时, 通道间延时准确度为 670.7 ps, 精度为 9.044 ps, 小于需求值 1 ns。

实测结果表明: 内触发模式下, 同步触发信号输出通道抖动 TIE 峰峰值 64.047 ps, 输出通道相对延时为 0 时, 通道间延时准确度为 670.7 ps, 上升沿小于 5 ns, 延时分辨率可达 20 ns, 延时调节范围 0~0.22 s, 脉宽调节范围 0~0.22 s, 内触发模式下, 同步触发信号输出频率范围 0.05 Hz~200 kHz。测试结果满足设计需求。

5 结 论

本文完成了 300 MeV 质子重离子加速器直线注入器定时系统的设计、在线验证工作, 包括系统硬件设计及内部逻辑设计、基于 Verilog 语言的系统板卡软件设计、基于 TCP/IP 协议客户端数字接口 IOC 程序的开发及基于

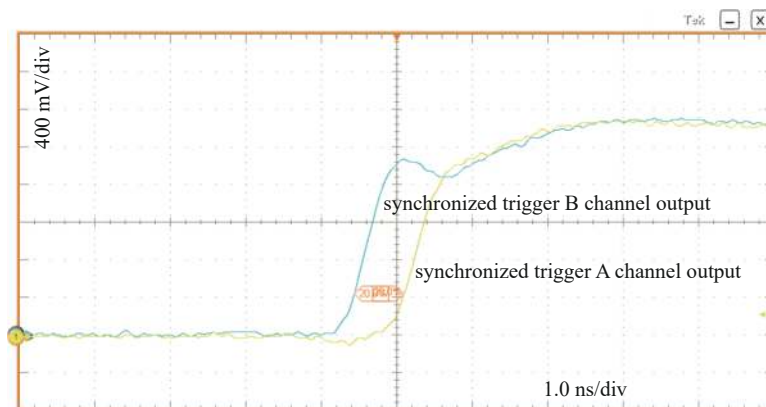


Fig. 12 Jitter test chart between channels A-B in internal trigger mode

图 12 内触发模式下 A-B 通道间延时准确度测试图

CSS 软件上位机控制界面的设计。本设计可实现直线定时系统不同工作模式(内触发、外触发工作模式)下,输出多路同步触发信号,满足 300 MeV 质子重离子加速器直线注入器相关设备精准的时序控制要求,通过继电器控制,实现斩波器系统高压脉冲发生器远程开关机及复位功能。同时可实现人身安全一级联锁和设备二级联锁功能,可通过光信号收、发模块进行系统级联,便于系统扩展,易于系统升级。目前,该直线定时系统已成功运行于哈尔滨工业大学 300 MeV 质子重离子加速器装置、近代物理研究所 SSC_LINAC 装置,经长时间在线运行,直线定时系统工作稳定、可靠。同时该系统作为同步信号触发装置,也可应用于光谱分析仪器、离子质谱仪等领域。

参考文献:

- [1] 刘明, 柴伟平, 杨建成, 等. 空间辐射地面模拟装置 (SESRI) 同步加速器注入设计和模拟研究[J]. *原子核物理评论*, 2017, 34(4): 730-734. (Liu Ming, Chai Weiping, Yang Jiancheng, et al. Injection design and simulation study of synchrotron in SESRI[J]. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(4): 730-734)
- [2] Ruan Shuan, Yang Jiancheng, Xia Jiawen, et al. The 300 MeV proton and heavy ion accelerator complex for SESRI project in China[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, 1048: 167916.
- [3] 孔启宇, 殷学军, 杜衡, 等. 紧凑型强流重离子 CH 型漂移管直线加速器动力学设计[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(3): 362-369. (Kong Qiyu, Yin Xuejun, Du Heng, et al. Dynamics design on a compact high intensity heavy-ion CH-DTL[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(3): 362-369)
- [4] 翟港佳. 合肥先进光源定时系统设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023: 1-14. (Zhai Gangjia. Design of the timing system for Hefei Advanced Light Facility[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023: 1-14)
- [5] 张建川, 周德泰, 李运杰, 等. HIMM 回旋加速器控制系统中连锁保护功能设计与实现[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 125107. (Zhang Jianchuan, Zhou Detai, Li Yunjie, et al. Design of the interlock function for HIMM cyclotron control system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 125107)
- [6] 王永鹏, 郭玉辉, 罗冰峰, 等. 基于 FPGA 技术的加速器切束控制系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 105103. (Wang Yongpeng, Guo Yuhui, Luo Bingfeng, et al. Design of accelerator beam cut control system based on FPGA[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 105103)
- [7] 孙玉桥, 邱春玲, 杨光, 等. TOF-SIMS 纳秒级脉冲发生器的设计[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(6): 72-75. (Sun Yuqiao, Qiu Chunling, Yang Guang, et al. Design of nanosecond pulse generator of TOF-SIMS[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(6): 72-75)
- [8] 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)
- [9] 杜志美, 文丰, 张凯华. 基于 W5300 的高速数据传输系统设计与实现[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(3): 121-125. (Du Zhimei, Wen Feng, Zhang Kaihua. Design and implementation of high speed data transmission system based on W5300[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(3): 121-125)
- [10] 王雨婷, 薛志超, 文丰. 基于 W5300 的以太网高速数据传输系统设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2021, 29(6): 49-52, 59. (Wang Yuting, Xue Zhichao, Wen Feng. Design of Ethernet high speed data transmission system based on W5300[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(6): 49-52, 59)
- [11] 王鹏鹏, 张玮, 武启, 等. 锦屏深地强流离子源控制系统的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 104001. (Wang Pengpeng, Zhang Wei, Wu Qi, et al. Development of control system for JUNA ion source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 104001)