

质子治疗装置动态电源控制系统研发*

李海荣^{1,2}, 蒋舸扬¹, 金 林¹, 李乾楠¹, 李 瑞¹, 沈立人¹

(1. 中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对质子治疗装置中主环动态电源多平台能量的引出需求, 研制了基于开源平台的高速实时动态电源控制系统, 该控制系统以开源平台 Beaglebone 作为顶层硬件接口, 以现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 为核心的控制器作为底层硬件接口, 采用分布式的实验物理及工业控制系统 (EPICS) 进行远程控制。该系统可实时传输任意动态电源的输出参考电流波形数据, 并结合定时系统与联锁系统, 控制动态电源按预设电流波形进行输出, 并实现多平台能量的引出。实验结果显示该控制系统能够实现每秒最高十万条指令传输, 百万次数据传输零误码率。同时, 该系统结构灵活、扩展性强, 可作为通用控制平台。

关键词: 质子治疗; 电源控制; Beaglebone; GPMC; FPGA

中图分类号: TL99

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190442

Development of dynamic power control system in proton therapy facility

Li Hairong^{1,2}, Jiang Geyang¹, Jin Lin¹, Li Qiannan¹, Li Rui¹, Shen Liren¹

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A high-speed real-time dynamic power control system based on an open source platform has been developed to satisfy the multi-platform energy extraction requirements of the main loop dynamic power supply in a proton therapy facility. The control system uses a Beaglebone based open-source platform as the top-level hardware interface, the controller with Field Programmable Gate Array (FPGA) as the core as the underlying hardware interface, and uses a distributed Experiment Physics and Industrial Control System (EPICS) for remote control. This system can transmit the output reference current waveform data of any dynamic power source in real time, and controls the dynamic power source to output according to the preset current waveform combined with the timing system and the interlocking system, and realizes the energy extraction of multiple platforms. Experimental results show that the control system can achieve a maximum of 100 000 instructions per second and zero error rates for millions of data transmissions. In addition, the system structure is flexible and extensible, and it can be served as a universal control platform.

Key words: proton therapy; power supply control; Beaglebone; GPMC; FPGA

上海质子治疗示范装置是我国自主研发的首台国产质子医用加速器, 主要由注入器、低能输运线、同步加速环、高能输运线以及两个固定支架治疗室和一个旋转支架治疗室组成^[1]。同步加速环上的动态电源及其控制系统是质子治疗装置中重要的子系统之一, 通过控制同步加速器主环上的磁铁电源输出动态励磁电流以满足磁场要求^[2-5]; 根据治疗系统需求, 动态电源组输出的励磁电流的同步性、分辨率及动态响应具有较高要求。因此, 质子治疗装置对电源及其控制系统具有很高的要求, 电源控制系统必须保证电源实时响应且具备高可靠性和高控制精度。典型的电流波形包括束流注入过程、束流升能过程、电流独特的减小涡流超调曲线、能量引出平台(用于质子治疗装置扫描治疗)和降能过程。为了实现不同治疗需求, 当前的电源控制系统预先在板卡上储存了 94 组电流波形离散数据, 通过网络控制系统逐一触发所需波形^[6]。按照治疗系统需求, 束流引出的能量平台时间相对较长, 且对同一组电流波形离散数据而言, 引出时间也不固定, 故电源控制板卡采用“中断序列”触发模式, 即: 控制系统提前告知电源控制板卡, 控制板卡在对第 N 个波形数据触发时, 触发到第 M (中断序列号) 个离散电流数据点时暂

* 收稿日期: 2019-12-02; 修订日期: 2020-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0105402)

作者简介: 李海荣 (1993—), 男, 硕士研究生, 从事质子治疗装置电源控制研究; lihairong@sinap.ac.cn。

通信作者: 蒋舸扬 (1974—), 男, 研究员, 从事加速器控制系统研究; jianggeyang@zjlab.org.cn。

停触发,此时电源输出电流(对应第 M 个离散电流数据)对应所需的引出平台电流;引出结束后,控制系统通知电源控制板卡继续触发剩余离散波形数据。受电源控制板卡的处理能力及实时通信要求限制,电源控制板卡只能预处理 1 个“中断序列”,无法处理多能量平台引出情况。

数字电源与模拟电源相比具有高精度、高可靠性、易维护等优势,现国内外加速器电源控制大都向数字化发展,数字电源控制系统主要有三种架构:(1)前端计算机直接控制数字电源控制器;(2)前端计算机加 VME 总线(或 PCI、PXI 等总线)控制数字电源控制器;(3)前端计算机加上层控制器控制数字电源控制器。方案一是目前上海质子治疗装置采用的方式,其架构简单灵活,但实时性较差,且数字电源控制器功能实现复杂,不仅要负责底层的电源转换控制还要负责上层的功能控制;方案二是加速器电源控制的主流方式,其优点是具备很好的可靠性和扩展性,但缺点是系统成本高、通用性较差。方案三的控制架构具有较好的通用性、软硬件可裁剪的优点,缺点是架构较复杂、研发成本偏高^[7-8]。

针对质子治疗装置中动态电源后期可能提出需要高速控制实现实时的动态数据传输的要求,本文设计了一种新的控制方式,即使用基于 ARM 的开源硬件和 FPGA 来控制波形的传输。该控制系统有以下优点:可实现远程控制电源触发任意波形、完成动态电源上层控制从而释放底层电源控制的压力,减小系统调试难度并提升了系统的可靠性;FPGA 可逻辑再编程,具有响应速度快、可严格约束控制时序等特点,从而可实现对动态电源的实时控制,克服了一般网络控制系统中存在的确定延时问题;该控制器也满足静态电源控制需求,是一套通用电源控制系统;该架构灵活方便,功能扩展性强,可作为通用控制平台,且基于开源硬件有较长的生命周期。

1 系统总体设计

电源控制系统采用 FPGA 实现对电源的同步触发、波形数据校验与打包发送、状态监测等功能。基于 ARM 开源硬件 Beaglebone(BBB)作为前端控制计算机,运行 Linux 操作系统并集成了 EPICS(Experiment Physics and Industrial Control System)控制软件。系统框图如图 1 所示,实现对系统的远程实时操作^[9-10]。

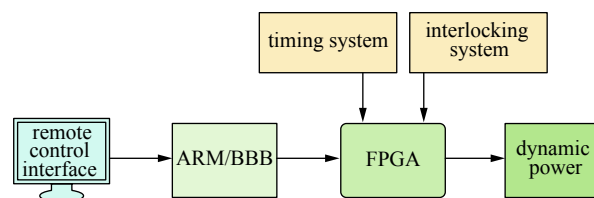


Fig. 1 Block diagram of system

图 1 系统框图

控制主体流程如图 2 所示,远程计算机通过网络接口

连接基于 ARM 的开源硬件 Beaglebone, Beaglebone 上运行 EPICS 方便远程计算机进行控制,波形数据预先存储在 BBB 的 SD 卡中, BBB 接收到触发命令后从 SD 卡中将波形数据读到内存中,通过存储控制器(General-Purpose Memory Controller, GPMC)高速并行总线将数据发送给 FPGA。FPGA 接收到波形数据后,把数据存放到控制板卡的双倍速率同步动态随机存储器(Double Data Rate 2 Synchronous Dynamic Random Access Memory, DDR2)中,根据定时系统和联锁系统触发信号控制数据的发送,当定时系统触发到达后, FPGA 开始从 DDR2 中逐一取出波形中

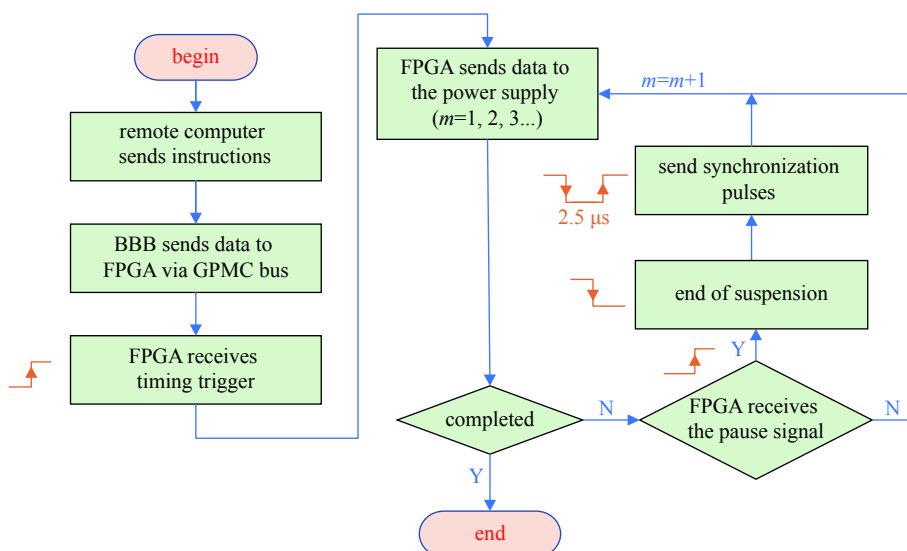


Fig. 2 Control flow chart

图 2 控制流程图

的数据点,进行数据打包、曼彻斯特编码,并通过电光转换模块将数据发送给底层的电源。如果中途接收到联锁暂停信号,数据传输立即暂停,等待暂停结束后 FPGA 给底层电源发送低电平同步脉冲,同时继续发送波形数据直到发送完成^[11]。

2 硬件系统设计

控制器硬件结构如图 3(a)所示,包括两个部分:搭载 FPGA 的主控板卡和 Beaglebone 子板。主控板卡主要搭载 FPGA 主控芯片、GPMC 接口、DDR2、数据缓存模块、8 路光电转换模块和必要的外围模块,对应的控制器实物图如图 3(b)所示。FPGA 选择 Altera 的 cyclone IV EP4CE40F23C8,其具有丰富的逻辑单元、ns 级逻辑处理响应速度;GPMC 硬件接口实现 Beaglebone 子板和主控板卡的连接;DDR2 作为 FPGA 的外部缓存器,容量为 128 MB,最高工作频率可达 800 MHz,可实现大量数据的高速缓存功能;使用 8 路 AFBR/Z-1624Z 光电转换模块实现与底层电源的双向数据通信、收发定时信号、收发暂停信号以及收发同步信号的功能;FPGA 中程序掉电易丢失,这里使用 Flash 作为固件存储器,固件通过 JTAG 下载到 Flash 中,FPGA 每次上电自动从 Flash 中载入程序。Beaglebone 子板主要有 AM3358 处理器、512 M DDR3,4G EMMC、以太网口、USB 接口以及大量的外部 IO,作为前端控制器,实现远程控制功能^[12]。

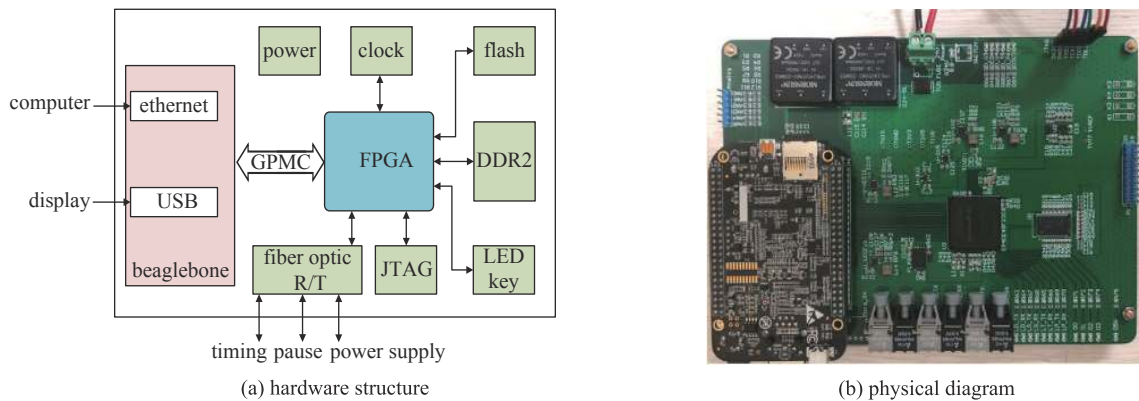


Fig. 3 Power controller hardware structure

图 3 电源控制器硬件结构

3 固件及接口

固件模块如图 4 所示,主要分为信号处理器和数据处理器 2 个功能模块,信号处理器模块负责定时信号、暂停信号和同步信号的处理^[13-16];数据处理器模块包含 4 部分,即 GPMC 总线接口、DDR2 控制器、通信协议的实现以及编码与解码。GPMC 总线接口实现固件层的 GPMC 驱动从而完成和 BBB 通信功能;DDR2 负责高速缓存数据,其物理层接口的实现是调用 Quartus DDR2 SDRAM Controller with ALTMEMPHY IP 核,IP 核接口的控制使用状态机实现;通信协议的实现负责动态电源指令的解析和打包发送;编码与解码模块负责曼彻斯特编码与解码功能和 CRC16 校验功能。控制器 100 MHz 主工作时钟频率由 FPGA 内部 PLL 倍频板载 50 MHz 时钟实现,其中 DDR2 控制器工作的 166.6 MHz 时钟由 ALTMEMPHY IP 倍频实现。

上层控制器与定时系统、联锁系统和底层电源通信皆采用光纤通信,对定时、联锁和同步信号的时序处理如图 5 所示。FPGA 在内部控制定时信号上升沿到达后的 200 ns 内开始发送数据包,数据包包括 8 位状态、8 位数据、32 位数据及 16 位 CRC 校验位共 64 位,曼彻斯特编码为 128 位。数据包发送间隔为 10 μ s,同时给电源发送 2.5 μ s 的同步信号,在接收到暂停信号后停止发送,暂停结束后 200 ns 内继续发送,同时发送同步信号。

Beaglebone 上运行的 Debian 专用系统支持包括网络、USB 等各类设备驱动。Beaglebone 和 FPGA 之间使用 GPMC 高速总线通信,GPMC 支持同步读写、异步读写和块读写模式,最高工作频率可达 100 MHz,GPMC 接口的底层驱动内置在内核中,启动方式是通过编写设备树文件(Device Tree)来实现^[17-18],设备树文件主要实现以下功能:配置 GPMC 地址、内存空间、中断号、通信时序和通信模式。这里配置 GPMC 接口为 16 位地址和数据复用的同步通信单次读写模式,同步时钟为 50 MHz。Beaglebone 的 IO 口为多功能复用 IO,GPMC 端口的使用必须禁止 EMMC(嵌入式多媒体存储卡)和 HDMI(高清多媒体接口)功能,加载设备树文件后操作设备文件可实现和 FPGA 通信。

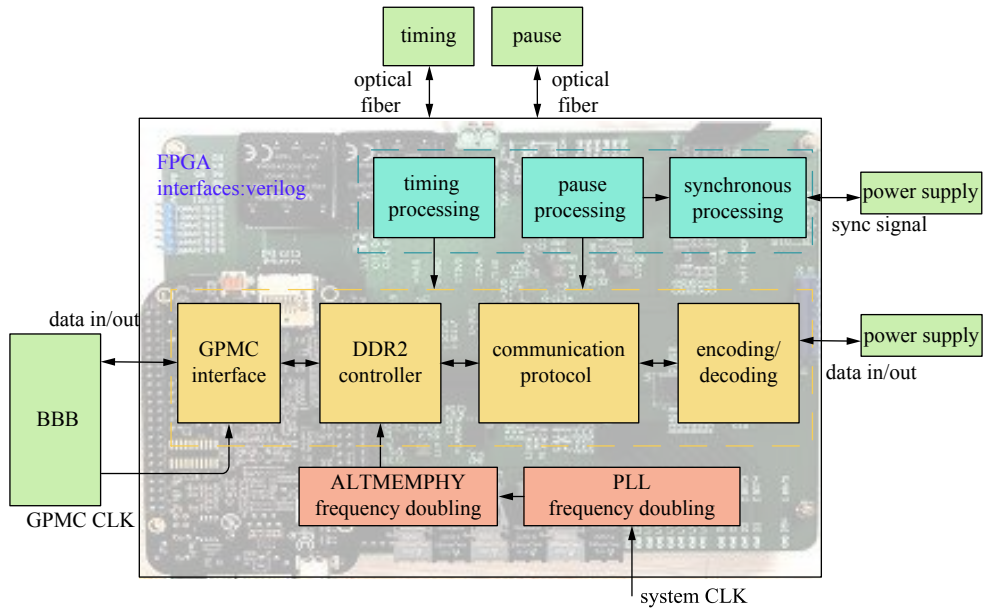


Fig. 4 Firmware logic module

图 4 固件逻辑模块

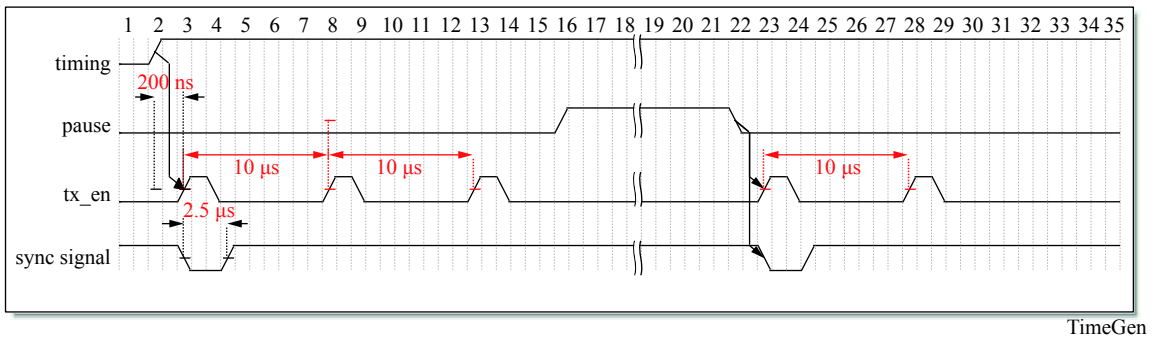


Fig. 5 Timing, interlocking and synchronization signal processing

图 5 定时、联锁和同步信号处理

GPMC 接口如图 6(a)所示,该接口包括 A/D[15:0] 数据和地址复用总线、地址有效信号 ADV_n、片选信号 CS_n、写有效信号 WE_n、读有效信号 OEn 和同步时钟 CLK。FPGA 对 GPMC 接口的时序处理如图 6(b)所示,通过 GPMC_CLK 同步时钟作为数据控制接收时钟,CS_n 为低时表示开始通信,ADV_n 为低时接收总线 A/D 数据为地址,WE_n/OEn 为低时表示总线上为数据。GPMC 接口涉及到 100 MHz 系统时钟 sys_clk 和 50 MHz 的同步时钟 GPMC_CLK,针对异步时钟处理,这里使用边沿检测同步器,在输入信号后加上三个紧密相连的触发器,减小亚稳态带来的影响,使用后两个触发器的输出作边沿检测,解决了时钟异步的问题。

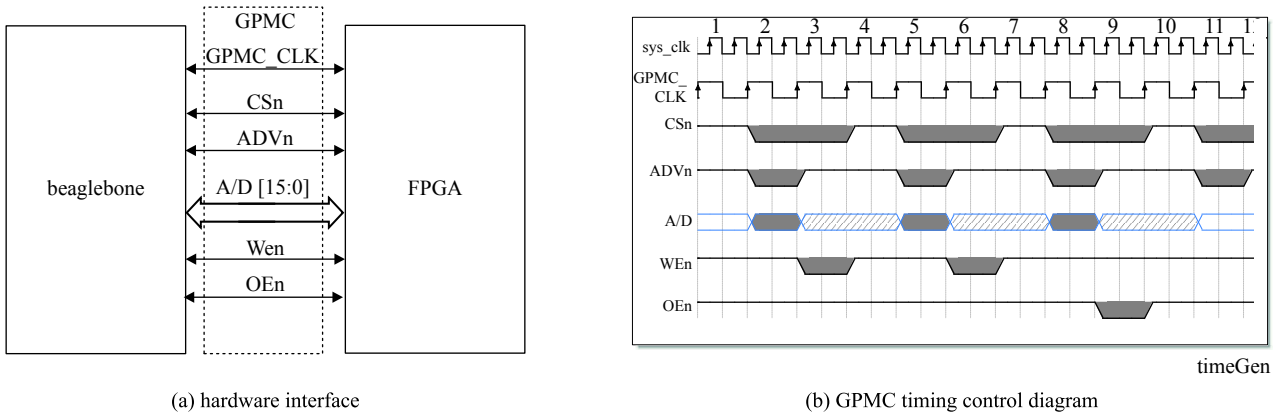


Fig. 6 Interface between Beaglebone and FPGA

图 6 Beaglebone 与 FPGA 的接口

4 应用软件

Beaglebone 开发平台是高性能的 Linux 开源平台, 带有高速的通用存储控制器 (General-Purpose Memory Controller, GPMC) 总线接口, 可方便实现和 FPGA 高速通信, 板载网络接口方便远程控制, 在本文应用中作为动态电源控制系统的前端控制计算机。软件采用三层结构, 客服层、服务层和实时控制层 (FPGA 上实现)。客服层提供操作界面, 便于调束人员进行控制; 服务层满足客服端控制需求, 为了实现质子治疗装置的整体控制, 在 Beaglebone 上运行基于 Linux 的 Debian 专用系统, 在系统上开发基于 EPICES 动态电源远程控制驱动, 采用 C/S (Client/Server) 架构开发电源控制 Input Output Controller (IOC), 实现质子注入器本地控制计算机与远程控制计算机之间的通信, 进而实现远程控制计算机对质子动态电源波形的控制及运行状态参数的获取。控制界面如图 7 所示, IOC 实现以下功能: 发送命令参数设置、触发波形参数设置、返回命令查询结果、显示电源当前运行状态。

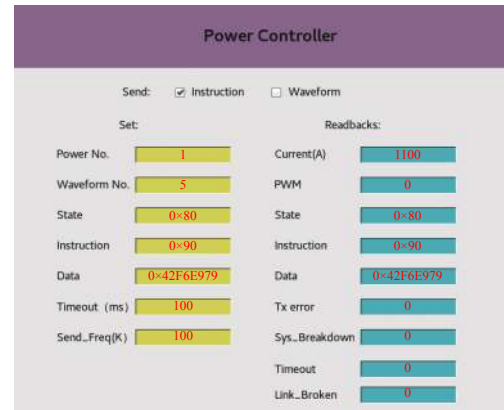


Fig. 7 Control panel

图 7 控制面板

5 测试结果

通信中随机产生测试数据模拟任意的波形数据, 发送命令频率设置为 100 kHz, 通信 10^6 次, 使用 Quartus 软件中的 Signaltap 在线逻辑分析仪抓取 FPGA 实际通信结果, 实验结果显示控制系统可在定时系统信号到达后 200 ns 发送数据, 数据发送为间隔 $10 \mu\text{s}$, 具备联锁暂停功能与传输出错暂停及远程实时显示功能, 满足动态电源实时控制及能量多平台引出的要求, 验证了基于开源平台和 FPGA 控制动态电源的可行性。通信测试结果如图 8 所示, tx_clk 为发送命令时钟, code_tx 为曼彻斯特编码后的命令, code_rx 为接收电源返回数据, 发送总数 tx_cnt 为 100 万条指令, 接收计数器 rx_cnt 为解析出电源返回的 100 万条指令, 未发生传输出错。

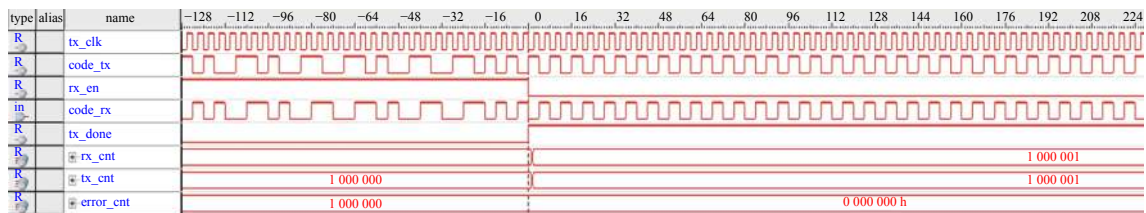


Fig. 8 Signaltap crawled communication results

图 8 Signaltap 抓取通信结果

6 结论

本文设计并开发了一种基于 Beaglebone 开源硬件和 FPGA 的质子治疗装置动态电源控制系统。经初步实验验证, 该控制系统可以满足动态电源实时传输任意波形、多能量平台引出的控制要求, 验证了该控制架构的可行性。此外, Beaglebone 开源硬件功能丰富, FPGA 逻辑可再编程, 两者搭配的架构具有较好的灵活性, 可满足多种控制系统需求, 有助于降低电源控制板卡的数据传输与处理负担, 对电源的稳定性有利。

致谢 控制系统在研制和实验过程中得到谭松清老师耐心指导和束测组师兄师姐大力支持, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 汤启升, 王志山, 李雪军. 上海质子治疗装置同步环真空布局及真空室设计[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(s2): 529-532. (Tang Qisheng, Wang Zhishan, Li Xuejun. Vacuum layout and chamber design for synchrotron ring of Shanghai Proton Therapy Facility[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(s2): 529-532)
- [2] Qian Xiangping, Yao Zeen, Wang Qiang. Model-predictive control of power supply for particle accelerators[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(5): 25-28.
- [3] 蒋舸扬, 谭松清, 赵欢, 等. 上海质子治疗装置动态电源控制系统[J]. 核技术, 2018, 41(2): 42-46. (Jiang Geyang, Tan Songqing, Zho Huan, et al. Dynamic power controls in Shanghai Proton Therapy Facility[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(2): 42-46)

- [4] Ke Xinhua, Lu Songlin, Li Rui, et al. A novel testing approach for SSRF digital power supply controllers[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008(4): 209-212.
- [5] 缪亚运, 谷鸣, 陈志豪, 等. 质子治疗装置脉冲电源研制[J]. 核技术, 2016, 39(4): 32-36. (Miao Yanyun, Gu Ming, Chen Zhihao, et al. Development of pulsed power supply in proton therapy[J]. Nuclear Technology, 2016, 39(4): 32-36)
- [6] Tan S, Li R, Guo C, et al. A novel input power control strategy for high-power dynamic dipole power supply for proton therapy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 911: 25-29.
- [7] 丁建国, 赵欢, 朱海君, 等. 上海同步辐射装置电源控制系统[J]. 核技术, 2012, 35(8): 573-577. (Ding Jianguo, Zhao Huan, Zhu Haijun, et al. The SSRF power supply control system[J]. Nuclear Technology, 2012, 35(8): 573-577)
- [8] 赵江. 重离子加速器数字电源实时控制方法的研究与实现[D]. 兰州: 中国科学院研究生院(近代物理研究所), 2014: 14-31. (Zhao Jiang. Research and Implementation of real-time control method for heavy-ion accelerator digital power supply[D]. Lanzhou: Graduate school of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics), 2014: 14-31)
- [9] 焦喜香, 敬岚, 顾可伟, 等. 重离子加速器注入器电源控制器的设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2155-2159. (Jiao Xixiang, Jing Lan, Gu Kewei, et al. Design of digital power control system applied in sector focusing cyclotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2155-2159)
- [10] 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, Gu 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)
- [11] 李瑞, 谭松清, 郭春龙. 数字化超低纹波可编程动态电源[J]. 电力电子技术, 2014, 48(12): 22-24. (Li Rui, Tan Songqing, Gu Chunlong. Digital programmable dynamic power supply with low ripple[J]. Power Electronics, 2014, 48(12): 22-24)
- [12] Molloy D. Exploring Beaglebone: Tools and techniques for building with embedded Linux[M]. 2nd ed. Indiana: John Wiley & Sons Inc, 2019.
- [13] Li Fenghan, Yong Zhongchen, Jun Cai, et al. The application of EPICS in TMSR radiation protection and access control system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, 27(02): 60-65.
- [14] 张根灿, 蒋舸扬, 李德明, 等. 基于EPICS的质子注入器远程控制及监测系统的构建[J]. 核技术, 2018, 41(03): 53-57. (Zhang Gencan, Jiang Geyang, Li Deming, et al. Construct of remote control and monitor system for proton injector based on EPICS[J]. Nuclear Technology, 2018, 41(03): 53-57)
- [15] 蔡袁琦, 唐雷雷, 周泽然. 基于嵌入式EPICS的合肥光源储存环束流损失监测系统[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 085103. (Cai Yuanqi, Tang Leilei, Zhou Zeran. Embedded EPICS based beam loss monitor system of HLS-II storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 085103)
- [16] 朱黎黎, 黄连生, 傅鹏, 等. 基于实验物理和工业控制系统的电源操作节点开发[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 046002. (Zhu Lili, Huang Liansheng, Fu Peng, et al. Development of console system for EAST poloidal field power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 046002)
- [17] 刁彦华, 贾宝青, 王晓君. GPMC总线在AM3354与FPGA接口应用中的Android驱动实现[J]. 电子器件, 2017, 40(6): 1502-1505. (Diao Yanhua, Jia Baoqing, Wang Xiaojun. Implementation of Android driver in AM3354 and FPGA interface application based on GPMC bus[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017, 40(6): 1502-1505)
- [18] Cleva S, Pivetta L, Sigalotti P. Beaglebone for embedded control system applications[C]//Proc ICALEPCS2013. 2013.