

文章编号: 1007-4627(2019)01-0055-07

重离子治疗装置同步加速器高频控制系统研制

丛岩^{1,4}, 许少凡^{2,†}, 李世龙¹, 王皓宁¹, 张瑞锋¹, 韩小东¹, 周睿怀³, 仪孝平¹, 冯勇¹, 杨亚龙¹

- (1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 兰州大学信息科学与工程学院, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学物理学院, 北京 100049;
4. 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516000)

摘要: 重离子治疗对病灶周围健康组织损伤最小, 对癌细胞杀伤效果最佳, 是当代公认的先进有效的放疗方法。重离子 Bragg 峰与束流能量的关系要求重离子束能够在不同的能量间切换, 需要加速器实现变能量加速。变能量加速的关键系统是同步加速器高频计算机控制系统; 要求该系统能够根据光触发事例自动更换加速波形文件。该系统主要由三块基于PXI总线的FPGA板卡组成, 采用了SOPC、DSP等技术, 实现了波形文件的接收、插值及输出等功能。目前, 控制系统经过长期稳定性试验, 指标完全满足重离子治疗要求。

关键词: 重离子治疗; 高频控制; PXI总线; 多能量切换; 嵌入式软核; 可编程门阵列

中图分类号: TL56 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.01.055

1 引言

重离子治癌是当代公认的先进有效的放射疗法, 与常规的放射性疗法相比可在线精确监控照射位置和剂量, 具有对病灶周围健康组织损伤最小, 对癌细胞杀伤效果最佳, 疗程短及几乎没有副作用等优点。重离子治癌是利用进入人体的重离子在 Bragg 峰处释放出大量的能量来杀死癌细胞。重离子束 Bragg 峰的位置对应于肿瘤不同深度的切片层, 治疗的过程是 Bragg 峰遍历整个肿瘤深度的过程^[1]。Bragg 峰与束流能量有着严格的对应关系, 这就需要重离子束能够在不同的能量间切换^[2]。本文研制的高频控制系统可以根据触发事例的不同自动切换 256 种束流能量。

2 同步加速器高频系统介绍

重离子治疗装置同步加速器高频系统是束流能量的来源, 其系统构成如图1所示。高频系统主要由五大部分组成, 分别是铁氧体加载腔、功率源系统、偏磁电流源、低电平系统和高频控制系统。铁氧体加载腔通过谐振原理产生束流加速所需要的高频电场。功率源系统的功能是将直流功率转换成射频功率并馈送到铁氧体加载腔内。偏磁电流源为铁氧体加载腔的偏磁线圈提供电

流以调谐腔体^[3]。低电平系统的功能是实现腔体电压的幅度和相位稳定并控制调谐腔体^[4]。图1中红色虚线所框部分就是本文介绍的基于PXI的高频控制系统。该系统包括上位机控制软件、PXI机箱、PXI控制器及自制PXI板卡四部分, 其中自制PXI板卡有三块:

(1) DDS(Direct Digital Synthesizer)板, 其功能是产生两路正交扫频射频信号; (2) DAC(Digital to analog converter)板, 其功能是接收并解析光触发事例并产生腔体电压和偏磁电压设定波形; (3) ADC(Analog-to-Digital Converter)板, 其功能是采集模拟量电压波形如电子管阳极电流等。三块板卡之间通过PXI背板总线互联。

基于PXI的高频控制器是实现变能量加速的核心部件, 控制器可以存储 256 组波形, 每组波形有 3 个文件分别是腔体电压、偏磁电压和 DDS 正交信号文件^[5]; 不同的数据文件对应将束流加速到不同的能量。400 MeV/u 的三个文件波形如图 2 所示, 各信号的指标要求分别见表 1 和表 2。

同步加速器对高频系统的稳定度要求是相位误差 $< |1^\circ|/24 \text{ h}$, 幅度误差 $< |1\%|/24 \text{ h}$, 腔体调谐相位误差 $< |5^\circ|/24 \text{ h}$ 。由该指标分解得到高频控制系统的指标如表 1 和表 2 所列。

收稿日期: 2018-05-20; 修改日期: 2018-06-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11505252); 珠江人才计划项目

作者简介: 丛岩(1982-), 男, 山东烟台人, 高级工程师, 博士, 从事核技术及应用研究; E-mail: congyan@impcas.ac.cn

† 通信作者: 许少凡, E-mail: 977561441@qq.com。

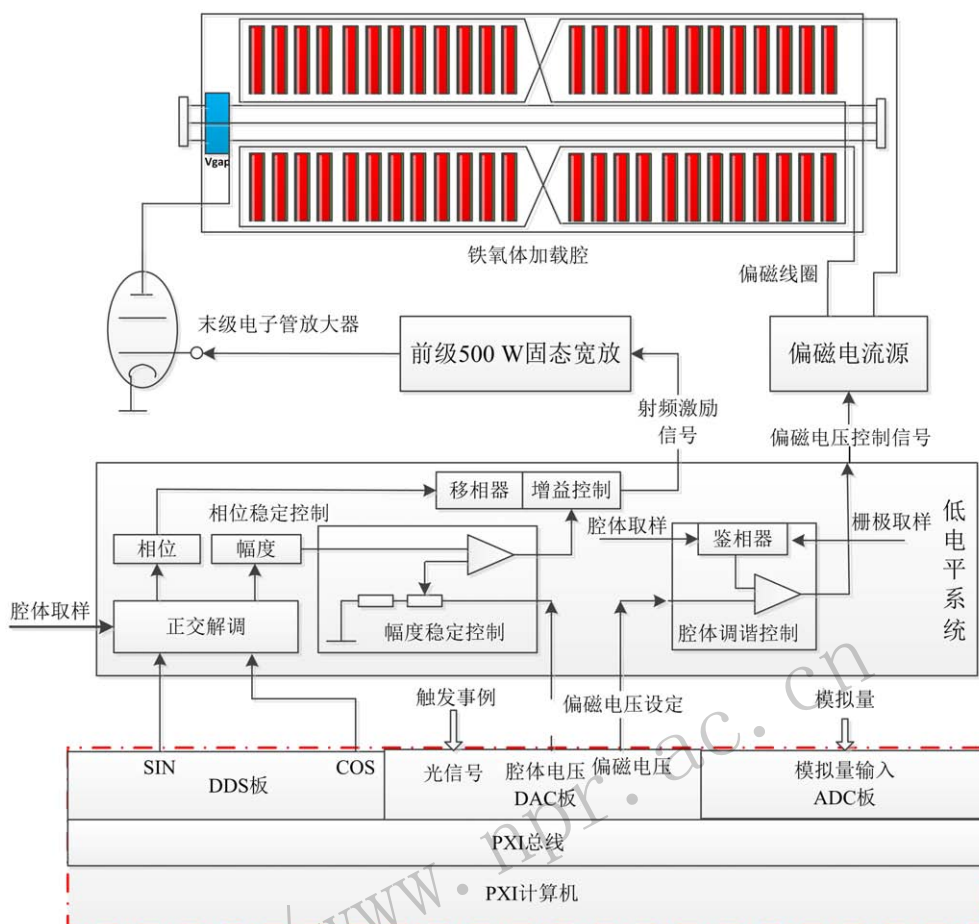


图 1 (在线彩图) 重离子治疗装置同步加速器高频系统结构

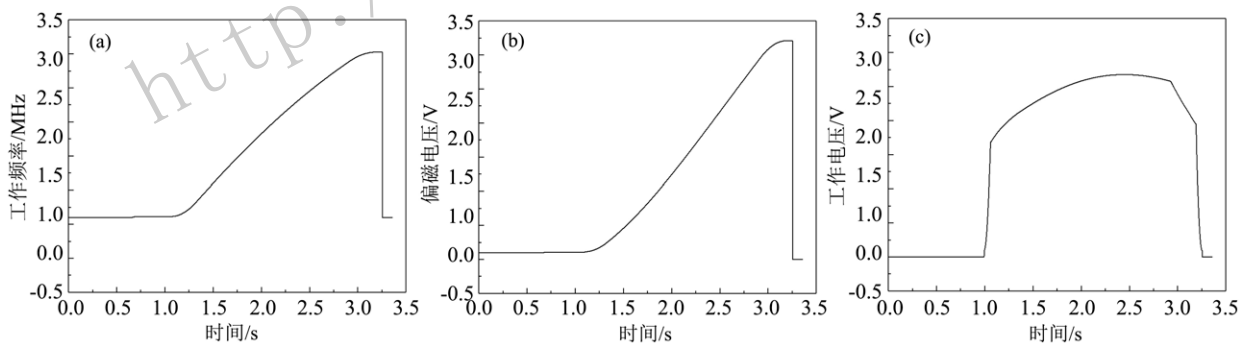


图 2 400 MeV/u三个波形文件

表 1 正交(DDS)信号要求

频率综合DDS	频率/MHz	更新率/(signal/s)	分辨率/Hz	电压值/($V_{p-p}/50 \Omega$)
正交SIN	0.5~4.2	$> 5 \times 10^5$	< 10	2.0
同相COS	0.5~4.2	$> 5 \times 10^5$	< 10	2.0

* 注：由于两路正交 DDS 信号用于做正交解调，解调之后得到的两路低频正交信号 (I/Q) 中包含了 DDS 信号的相位和幅度信息，为降低对低电平幅度和相位稳定指标的影响，DDS 信号在频率范围内幅度波动需小于 1%。

表 2 腔体电压、偏磁电流(DAC)信号要求

数模变换	更新率/(signal/s)	位数	输出电压范围/V
电压幅度	6.25×10^4	16	0~+10
偏磁电压	6.25×10^4	16	0~+10

3 PXI板卡硬件设计

本系统的三块自制板卡均是基于PXI总线以FPGA为核心的3U板卡。其硬件结构如图3所示，由

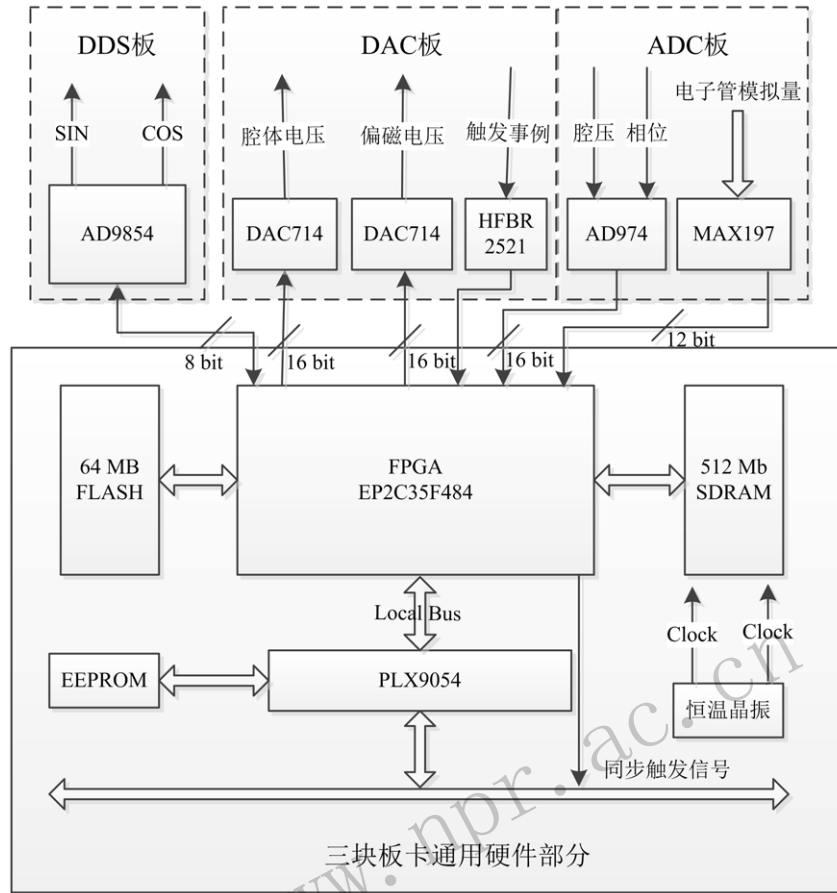


图 3 PXI板卡硬件框图

FPGA、总线接口芯片、存储器等组成三块板卡的通用部分。其中总线接口由芯片 PLX9054 与 PXI 特有的信号组合实现 PXI 总线协议，提高了总线通信的稳定性。FPGA 芯片为 CycloneII EP2C35F484，该芯片的资源完全能够满足要求。内部有 Nios 软核用于进行数据插值等相关运算^[5]。FPGA 芯片外接 512 Mbit 的 SDRAM 存储器，用于运行 Nios 软核和存储波形文件。

3.1 DDS板设计

如图 3 虚线 DDS 板部分所示，该板采用 AD9854 产生两路正交扫频信号。AD9854 的 DDS 内核拥有 48 bit 的频率分辨率，12 bit 的 I 和 Q 通道 D/A 转换器并

有优良的无杂散动态比(SFDR)^[6]。

本系统中使用了 32 位有效频率控制字，AD9854 的时钟频率设置为 200 MHz，可达到的频率分辨率为

$$f = \frac{f_{CLK}}{2^N} = 0.047 \text{ Hz} \quad (1)$$

满足系统频率分辨率 < 10 Hz 的要求。

3.2 DAC板设计

DAC 板卡采用光纤接收器 HFBR-2521 来接收同步触发事例。一组光事例包含 32 位，发送时钟频率为 390 kHz，事例结构如图 4 所示。FPGA 负责对事例码进行解析并根据解析结果产生相应的控制动作。

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
帧头 Head		保留 Reserved(29-24)						功能区(23-16)(2组光事例-换波形事例/触发事例)							
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
保留 Reserved(15-8)								波形号对应的事例码 Wave num(7-0)							

图 4 32 位二进制光事例数据结构

DAC 板卡通过两路 DAC714 分别产生腔体电压和偏磁电压波形。DAC714 是一种带有串行数据接口的 16 bit 低噪声数模转换器，具有电流到电压放大器、高速同步串行接口、可成倍叠加的串行输出接口以及一个可以立即设置输出电压到中档的异步清零接口功能。本系统中 DAC714 的输出电压范围设置为 0~+10 V 之间。

3.3 ADC板设计

如图 3 中虚线框内 ADC 板部分所示，出于对波形采集精度以及传输速率的考虑，分别采用 AD974 和 MAX197 来对信号进行变换。AD974 是具有 4 个单端模拟输入通道，电压输入范围为 0~+5 V，采样率为 200 kSPS 的 16 bit 模数转换芯片。该芯片用来采集对精度要求较高的腔体电压、通道相位差以及腔体失

谐相位波形。MAX197 是 8 通道、12 bit、并口模数转换芯片，用以采集电子管阳极电压、阳极电流、栅极电压、栅极电流、帘栅极电压、帘栅极电流等状态信号。

4 SOPC设计

如图 5 所示，该高频控制系统是基于 NiosII 的软硬件复合 SOPC 系统，因此在设计时分为硬件和软件两部分。NiosII 的硬件设计为系统定制了合适的 CPU 和外设。通用外设主要包括片外存储器接口、PXI 总线接口、定时器、时钟和复位等。专用外设根据板卡的功能不同可选用不同的功能模块，图 5 中虚线框标明不同功能板卡所使用的功能模块。软件部分指是运行在 NiosII 软核内的 C 语言程序，主要实现数据计算、波形数据的存储和读取以及中断响应等功能^[7]。

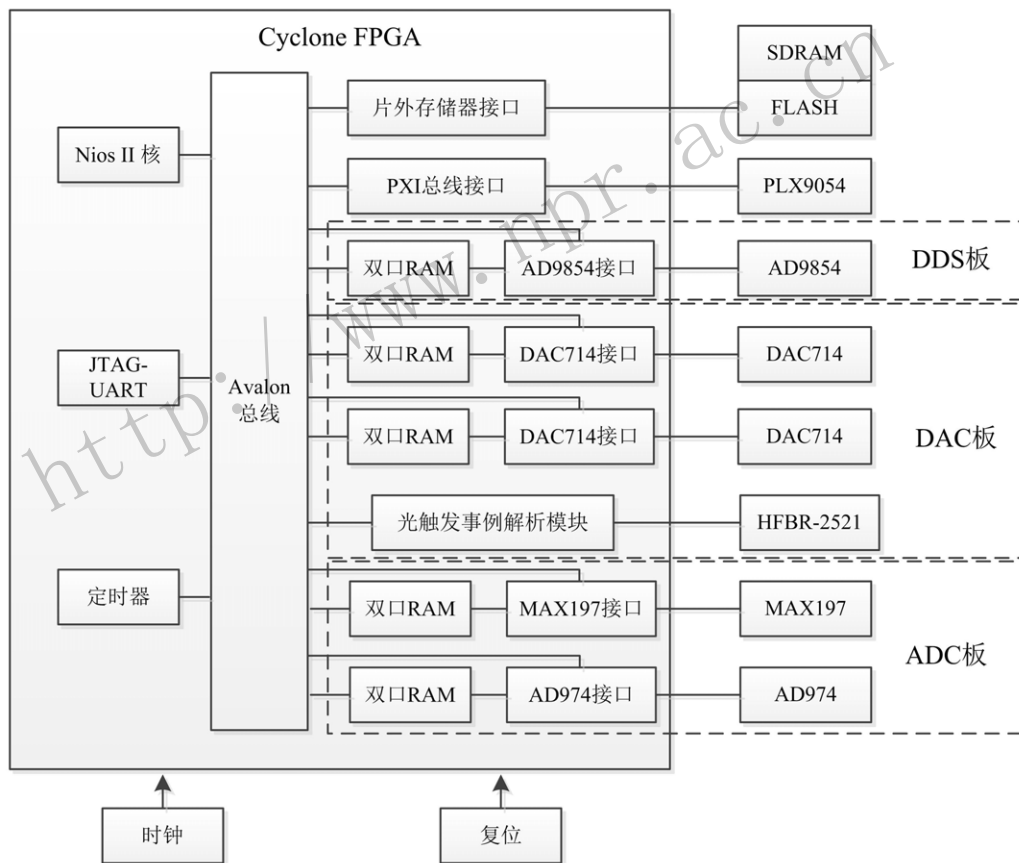


图 5 FPGA SOPC系统结构图

4.1 能量切换

高频控制器多波形能量切换由两组光事例来控制完成，分别为换波形事例和触发事例，如图 4 所示。FPGA 负责对事例码解析，首先根据事例码的功能区 23-16 位判断事例是否为更换波形事例，如果满

足上述条件由 FPGA 发出中断告知 NiosII 需要更换数据文件，然后 NiosII 响应中断，读取事例码 7-0 位波形号所对应的数据，并对数据进行处理后输出。如果收到的事例功能区 23-16 是输出波形事例，则控制板卡输出事例码 7-0 位所对应的波形。事例接收和解析流程如图 6 所示。三个波形数据在 SOPC 系统中以二

维数组的形式存放, 分别为 alt_u32 DDS[256][10000]、VOLT[256][10000] 和 BIAS[256][10000], 方便数据读取和处理。

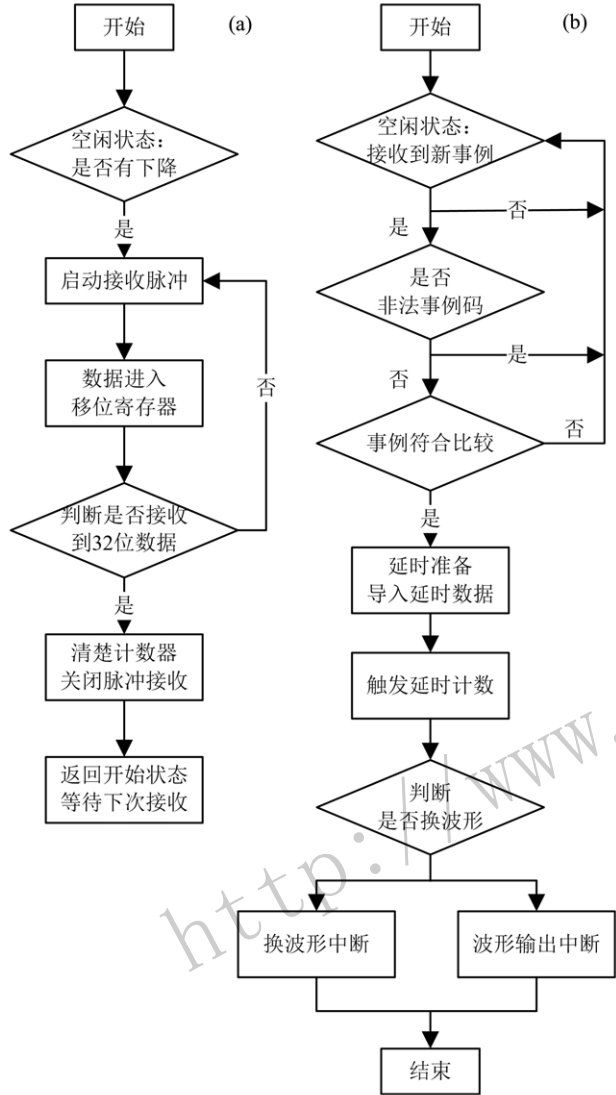


图 6 事例接收(a)和解析(b)流程图

4.2 数据处理

为满足深层治癌逐层扫描的要求, 需要将对应束流不同能量的 256 组数据全部存放在存储空间中。为减少对系统内存的占用, 波形文件中的数据时间间隔为 2.048 ms。波形输出之前, NiosII 通过数据插值算法得到满足精度要求的波形数据, 设计中采用的插值方法为拉格朗日插值^[8]:

$$P(x) = y_{k-1}l_{k-1}(x) + y_k l_k(x) + y_{k+1}l_{k+1}(x), \quad (2)$$

其中

$$l_{k-1}(x) = \frac{(x-x_k)(x-x_{k+1})}{(x_{k-1}-x_k)(x_{k-1}-x_{k+1})}, \quad (3)$$

$$l_k(x) = \frac{(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})}{(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})}, \quad (4)$$

$$l_{k+1}(x) = \frac{(x-x_{k-1})(x-x_k)}{(x_{k+1}-x_{k-1})(x_{k+1}-x_k)}. \quad (5)$$

依据上述公式已知三时刻的值 (X_{K-1}, Y_{K-1}) , (X_K, Y_K) , (X_{K+1}, Y_{K+1}) 分别代入式(3)、式(4)、式(5)中可计算出 $I_{K-1}(X)$, $I_K(X)$, $I_{K+1}(X)$ 参数代入式(2)中可计算得到 X_{K-1} 和 X_{K+1} 间任意 x 时刻的值。以 DDS 的数据插值为例, 读取到板卡上的数据时间间隔是 2.048 ms, 而系统要求 DDS 波形的周期为 2 μ s, 因此需要在两个数据之间插值 1023 个数据。插值算法在 NiosII 中以定点数的格式来处理, 并且满足系统对精度的要求。

4.3 数据传输

本系统的数据传输包括三部分: (1) 给定波形数据文件分别加载到 DDS 板和 DAC 板; (2) DDS 和 DAC 输出数据传输; (3) ADC 板到上位机监控软件的波形数据传输。

系统 DDS 和 DAC 输出数据传输采用如图 7 所示的“乒乓方式”进行。以 DDS 数据的发送为例, 当“半满中断”时, NiosII 开始进行数据插值运算, 并将插值后的 1024 个数据写入双口 RAM 的上半部分; 当“全空中断”时, NiosII 继续进行数据插值运算, 并将插值后的 1024 个数据写入双口 RAM 的下半部分。NiosII 根据两个中断信号按节拍地向双口 RAM 中写入数据, 使数据流没有停顿地送入到 AD9854 的接口模块中。

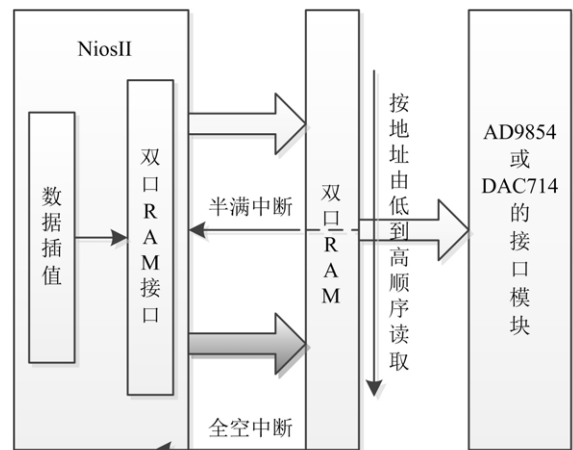


图 7 “乒乓方式”框图

通过 ADC 状态采集, 主要是采集在加速周期中不同信号的波形, 根据信号可判断高频系统的运行状态。对 ADC 的采集分别采用了两种不同的方法实现, 一种为周期采集传输, 另一种为实时采集传输, 各具特点, 实现手段也不相同。周期采集传输指数据采集只在加速

器的加速过程中对数据进行采集，当一次加速周期完成后上位机软件才通过 PXI 总线进行数据的读取与显示。腔体电压、通道相位差、调谐相位差等信号的采集采用该方式实现，占用 DAC 板卡的存储空间较多。实时采集传输与上一种方法最大的区别是 ADC 在采样的同时将已转换好的值通过 PXI 总线传送给上位机而不是在一加速周期完后才读取 ADC 的数据。该数据的传输也是采用“乒乓方式”进行。功率源电子管的各级电压及电流均是采用实时传输以利于及时反映电子管的工作状态。

5 测试结果

对系统的测试分两部分进行，一部分是在系统空载的情况下对各路输出信号的指标进行了测试；另外一部分是系统与功率源、谐振腔并且在有束流的情况下下调测试。

经测试两路 DAC 输出信号与文件给定的信号在时间和幅度上均保持一致，如图 8 所示。

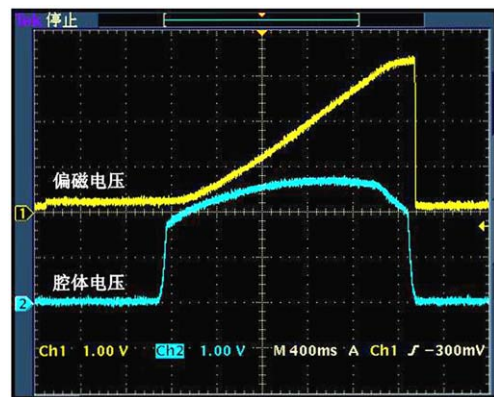


图 8 (在线彩图) 腔体电压和偏磁电压给定信号

测试了 DDS 信号在 0.5~4 MHz 工作频率范围内的幅度波动情况，最大的幅度波动为 0.28 dB(1.03%)，见表 3。同时测试了 DDS 输出信号的杂波和谐波抑制度，均在 50 dB 以上，满足系统要求，如表 4 所列。

图 9 为 DCCT 束流强测试图。该系统控制下的高频系统可以将 C^{6+} 粒子的能量从 7 MeV/u 加速到 400 MeV/u。

表 3 工作频带内信号幅度漂移

频率/MHz	正交SIN/dBm	同相COS/dBm	幅度差SIN/COS/dBc
0.5	9.68	9.61	0.07
1.0	9.76	9.74	0.02
2.0	9.90	9.80	0.10
2.5	9.80	9.80	0.0
3.0	9.90	9.86	0.04
3.5	9.90	9.88	0.02
4.0	9.90	9.89	0.01

表 4 工作频带内 DDS 信号杂波和谐波抑制

频率/MHz	基波/dBm		二次谐波/dBc		三次谐波/dBc		杂散/dBc	
	同相COS	正交SIN	同相COS	正交SIN	同相COS	正交SIN	同相COS	正交SIN
0.5	9.61	9.68	68.8	71.3	62.3	62.4	80.0	79.0
1.0	9.74	9.76	68.8	65.5	66.9	66.2	80.4	80.3
2.0	9.80	9.90	68.3	66.6	69.5	69.7	77.0	76.0
2.5	9.80	9.80	70.9	68.7	71.3	71.5	80.0	74.3
3.0	9.86	9.90	69.7	73.6	73.5	78.7	73.0	73.6
3.5	9.88	9.90	69.5	69.2	78.2	77.2	72.6	73.0
4.0	9.89	9.90	69.6	68.1	81.0	80.7	71.5	71.0

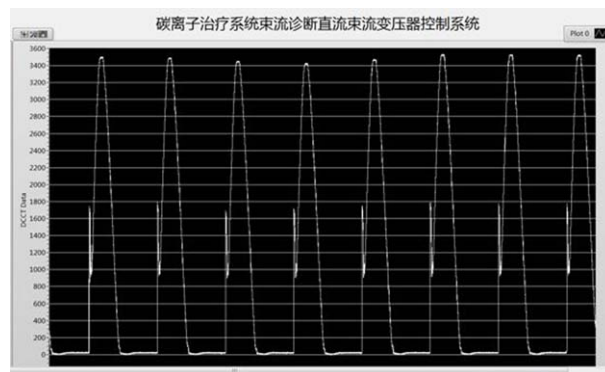


图 9 (在线彩图) DCCT 束流强测试图

6 总结与展望

目前, 系统已经武威重离子治疗装置上投入在线运行约3年时间, 满足相位误差 $< |1^\circ|/24\text{ h}$, 幅度误差 $< |1\%|/24\text{ h}$, 腔体调谐相位误差 $< |5^\circ|/24\text{ h}$, 并且系统运行稳定可靠。从束流测试的结果来看, 在该系统的配合下束流得到了正常俘获、加速和引出。鉴于该系统具有模块化、结构紧凑、总线速率高、稳定可靠等优势, 兰州冷却储存环同步加速器高频系统也采用了完全相同的控制系统。但是该系统也存在几个问题: (1) 系统Nios软核性能仅能满足系统目前的需求, 不能满足未来大量实时性数据传输的需求; (2) 低电平部分仍采用模拟技术, 不利于指标的提高。未来计划将模拟的低电平控制系统数字化并与控制系统相融合, 集成到基于PXI或cPCI总线的机箱内, 以提高系统的性能。

参考文献:

- [1] [1] SONG Mingtao, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2001, **18**(2): 116. (in Chinese)
(宋明涛, 詹文龙, 魏宝文, 等. *原子核物理评论*, 2001, **18**(2): 116.)
- [2] XIAO Guoqing, ZHANG Hong, LI Qiang, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2007, **24** (2): 85. (in Chinese)
(肖国青, 张红, 李强, 等. *原子核物理评论*, 2007, **24** (2): 85.)
- [3] CONG Yan, WEI Baowen, XU Zhe, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22** (11): 2699. (in Chinese)
(丛岩, 魏宝文, 许哲, 等. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(11): 2699.)
- [4] ZHONG Shaopeng, ZHAO Minghua, ZHANG Junqiang. *Nuclear Techniques*, 2014, **37**(4): 11. (in Chinese)
(钟少鹏, 赵明华, 张俊强. *核技术*, 2014, **37**(4):11.)
- [5] FU Zechuan, ZHAO Yubin, ZHAO Zhentang. *Nuclear Techniques*, 2010, **33**(9): 649. (in Chinese)
(付泽川, 赵玉彬, 赵振堂. *核技术*, 2010, **33**(9): 649.)
- [6] EDA leader. *Altera FPGA/CPLD design (Senior Part)* [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2005: 50. (in Chinese)
(EDA先锋工作室. *Altera FPGA/CPLD设计(高级篇)*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 50.)
- [7] SUN Kai, CHENG Shiheng. *NIOSII System Design and Application*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2007: 70. (in Chinese)
(孙恺, 程世恒. *NIOSII系统开发设计与应用实例*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 70.)
- [8] HU Xue, ZHANG Junqiang, ZHONG Shaopeng, *et al.* *Nuclear Techniques*, 2013, **36**(7): 33. (in Chinese)
(胡雪, 张俊强, 钟少鹏, 等. *核技术*, 2013, **36**(7): 33.)

Development of RF Control System for Heavy Ion Medical Machine

CONG Yan^{1,4}, XU Shaofan^{2,†}, LI Shilong¹, WANG Haoning¹, ZHANG Ruifeng¹, HAN Xiaodong¹,
ZHOU Ruihuai³, YI Xiaoping¹, FENG Yong¹, YANG Yalong¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. *School of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*
3. *School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
4. *Huizhou Ionic Scientific Research Center, Huizhou 516000, Guangdong, China*)

Abstract: Heavy ion therapy is the most advanced and effective method of radiotherapy. Because it has the advantage that it has minimal damage to surrounding healthy tissue and the greatest cancer celling killing effect. The relationship between heavy ion Bragg peak and beam energy requires the accelerator to switch the beam between different energy. The PXI RF control system plays an important role in Heavy Ion Medical Machine(HIMM). It can automatically change the waveform files according to the optical event. The system is mainly consisted by three FPGA cards, based on PXI bus, and mainly use the technology such as SOPC, DSP and so on. The PXI RF control system for HIMM has been tested through a long-term stability experiments, the system meets the proposed requirements.

Key words: heavy ion therapy; radio frequency control; PXI bus; various energy change; NIOS; FPGA

Received date: 20 May 2018; Revised date: 8 Jun. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11505252); Pearl River Talent Program

† Corresponding author: XU Shaofan, E-mail: 977561441@qq.com.