

高能电子成像直线加速器低电平控制系统研制

周有为^{1,2}, 曹树春^{1,2}, 申晓康^{1,2}, 赵全堂^{1,2}, 宗 阳¹, 张子民^{1,2,*}

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学 核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要:为了开展高能电子成像相关实验研究,中国科学院近代物理研究所建造了一台 S 波段的射频电子直线加速器。为保证实验束流品质和加速器稳定运行的要求,设计了一套低电平控制系统,利用上下变频、IQ 解调技术,实现了相位的反馈控制。本文介绍了低电平控制系统的设计及数字化算法的实现,给出了系统闭环实验的测试结果,实现相位控制精度达到 $\pm 0.5^\circ$ (峰峰值)和 0.1108° (均方根)。该系统利用成熟的商业化模拟微波器件和相关的 PXI 板卡实现,基于 LabVIEW 软件开发了相关的控制程序和界面,具有搭建方便、开发时间短、结构简单紧凑、易于使用和维护的特点。

关键词:数字低电平; IQ 解调; 反馈控制

中图分类号: TL53 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2019)12-2491-07

doi: 10.7538/yzk.2018.youxian.0863

Development of Low Level Radio Frequency Control System for Electron Linac of High Energy Electron Radiography

ZHOU Youwei^{1,2}, CAO Shuchun^{1,2}, SHEN Xiaokang^{1,2}, ZHAO Quantang^{1,2}, ZONG Yang¹, ZHANG Zimin^{1,2,*}

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

2. School of Nuclear Science and Technology,

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

Abstract: An electron linac was built at Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, dedicated for high energy electron radiography experimental study. In order to satisfy the requirement of the experiment and stable linac operation, a low level radio frequency control system was designed, which achieved phase feedback control by using up-down converter and IQ demodulation techniques. In this paper, the design principle and digital algorithm of the low level radio frequency control system were introduced and the result of the closed loop test was given. The low level radio frequency control sys-

收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11435015, 11505251); 国家重点研发计划资助项目(2016YFE0104900); 甘肃省青年科技基金计划资助项目(18JR3RA379); 中国科学院科研仪器设备研制项目资助(28Y740010); 中国科学院对外合作重点项目资助(113462KYSB20160036)

作者简介: 周有为(1991—), 男, 湖南益阳人, 博士研究生, 核技术及应用专业

* 通信作者: 张子民, E-mail: zzm@impcas.ac.cn

网络出版时间: 2019-03-17; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190315.0957.004.html>

tem achieves phase stability control accuracy of $\pm 0.5^\circ$ (peak to peak value) and 0.1108° (root mean square), meeting the design goal. The low level radio frequency control system was built with commercial analog microwave device and mature commercial PXI card, and the control program was realized with LabVIEW software. The system has the characteristics of fast building, easy developing and realizing, compact structure and convenient use and maintain.

Key words: digital low level radio frequency; IQ demodulation; feedback control

高能电子成像由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室首先提出并开展了相关研究,其利用 30 MeV 电子束进行了静态薄靶的成像实验^[1]。中国科学院近代物理研究所提出将高能电子成像技术作为诊断工具,探索高能量密度物理和惯性约束聚变物理过程中的关键科学问题^[2]。近代物理研究所与美国阿贡国家实验室、清华大学合作,完成了高能电子成像装置的物理设计并开展了相关实验研究,验证了高能电子成像作为高能量密度物理诊断方法的可行性^[3-6]。为更深入地开展高能电子成像实验,近代物理研究所正在建造一台 50 MeV 的电子直线加速器,专用于高能电子成像实验研究。这台电子直线加速器由热阴极微波电子枪、 α 磁铁、加速管、偏转磁铁和聚焦磁铁等构成,工作频率为 2 856 MHz,重复频率 5~50 Hz 可调,流强可达 400 mA^[7]。该加速器的低电平控制系统采用上下变频、IQ 解调技术^[8-10]和 PXI 板卡,实现微波功率源相位的反馈控制,要求对加速场相位控制精度稳定在 $\pm 1^\circ$ 内。本文给出低电平控制系统的设计和实现过程,并进行相关测试。

1 低电平控制系统硬件设计及实现

低电平控制系统用于控制高频功率源的高频信号幅度和相位,保证加速器的稳定运行。目前常用的低电平控制方法有幅度相位分离控制方法和矢量控制方法,本系统中采用的是幅度相位分离控制方法。对于这台加速器而言,速调管处于饱和和工作模式,输出信号幅度不能体现输入信号的幅度变化,低电平控制系统无法通过调节信号输出幅度来进行幅度反馈控制。因此,本控制系统主要控制对象是信号的相位,仅包含相位控制反馈回路,幅度稳定性通过调整速调管的工作状态来保证。

低电平控制系统总体布局如图 1 所示,其

包括:微波信号源、本振信号生成模块、上下变频模块、时钟模块、数字化及其处理模块等。其中,微波信号源为控制系统提供同步信号和射频参考信号;本振信号生成模块产生上下变频所需的本振信号;上下变频模块用于将射频信号下变频为中频信号,及将中频信号上变频为射频信号;时钟模块的功能是生成采样时钟信号和分配同步信号;数字化及其处理模块用于中频信号的采集、处理和闭环控制。该系统的工作过程为:从电子枪和加速管提取出的射频功率信号与本振信号混频,下变频为 10 MHz 的中频信号,送入采集板卡 PXIe-5105 完成中频信号的采集,经过模数转换器(ADC)形成两路数字信号到计算机,进行数字化运算处理。数模转换器(DAC)输出调制后的 10 MHz 中频信号,上变频为 2 856 MHz 的射频信号,作为固态放大器的激励信号。

低电平系统微波信号源采用罗德与施瓦茨公司生产的 SMB100A 型信号源,该型信号源配备有产生 10 MHz 信号的内部参考信号源,该信号同时可作为外部参考信号输出。因此,本设计中信号源同步输出 10 MHz 的同步信号和 2 856 MHz 的射频参考信号。

本振信号的产生如图 2 所示,本振信号的生成采用直接频率合成的方法,利用数字分频器、混频器及带通滤波器来合成本振信号。由于信号源同步输出 10 MHz 的同步信号和 2 856 MHz 的射频参考信号,因此直接将同步信号和射频参考信号混频,经过放大滤波,得到 2 846 MHz 的本振信号,减少了使用分频器而引入的相位噪声。图 3 为由该方法产生的本振信号频谱,频谱仪的参考电平为 23.00 dBm,本振信号的功率为 22.74 dBm,最大杂波 2 866 MHz 信号功率为 -30.32 dBm,抑制比为 53.06 dB,本振信号频谱干净。

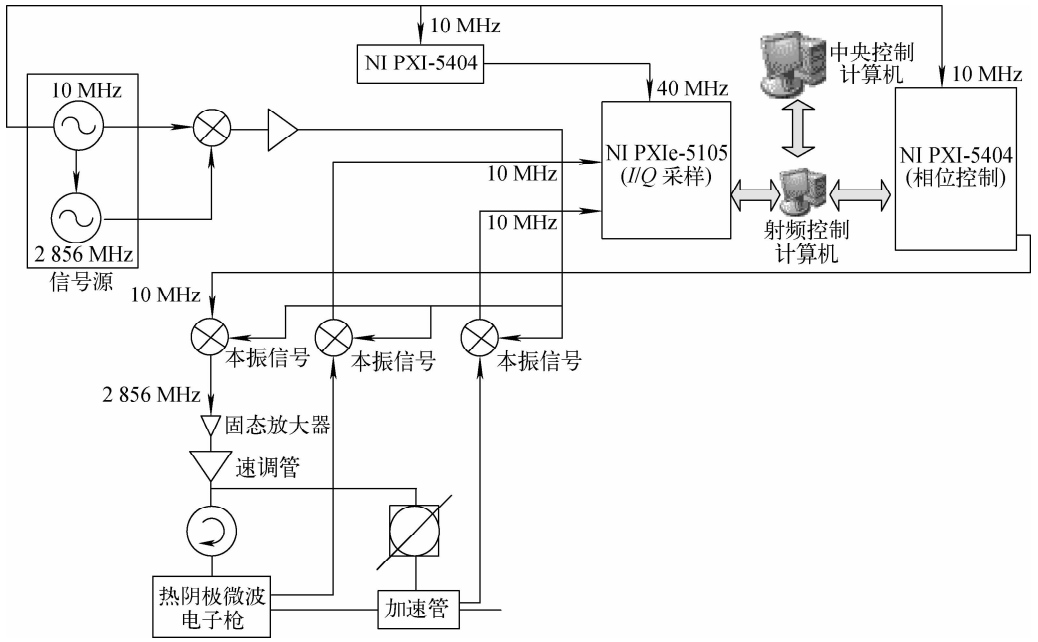


图 1 低电平控制系统总体布局

Fig. 1 General layout of low level radio frequency control system

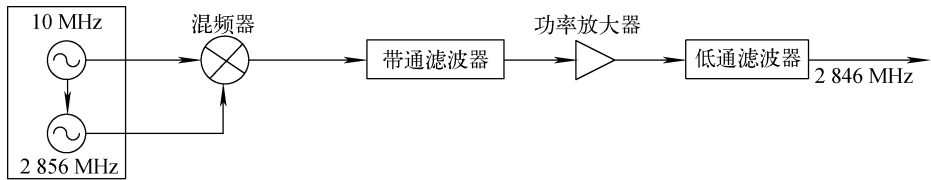
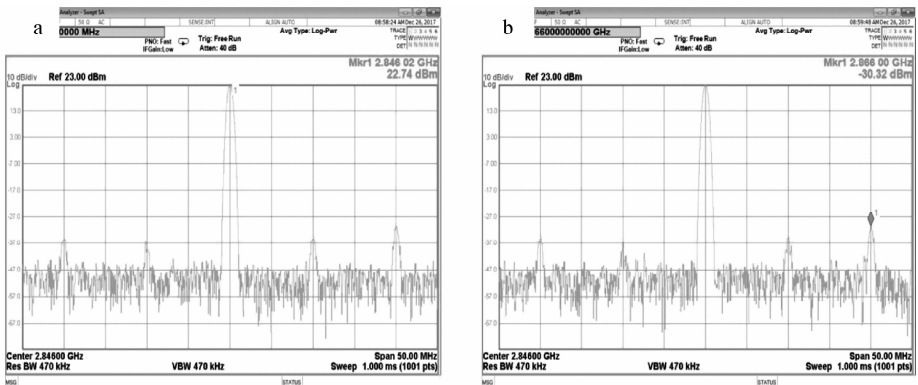


图 2 本振信号生成图

Fig. 2 Diagram of local signal generation



a——2.846 MHz 信号功率;b——2.866 MHz 信号功率

图 3 本振信号频谱

Fig. 3 Spectrum of local signal frequency

本设计中时钟板卡采用美国国家仪器公司的 PXI-5404 波形发生器,时钟和同步信号分配如图 4 所示。10 MHz 同步信号从时钟板卡的

同步信号输入端口输入,驱动板卡产生 40 MHz 的 ADC 采样时钟,同时利用板卡内部的锁相环,从同步信号输出端口输出同步信号发送到

DAC,以同步其产生的 10 MHz 中频信号。外部触发信号从可编程功能输入端口 PFI0 输入,通过 PXIe-1073 机箱背板上的 PXI 局部总线和 PXI 触发总线,将信号发送给 ADC,从而实现数据的同步采集过程。

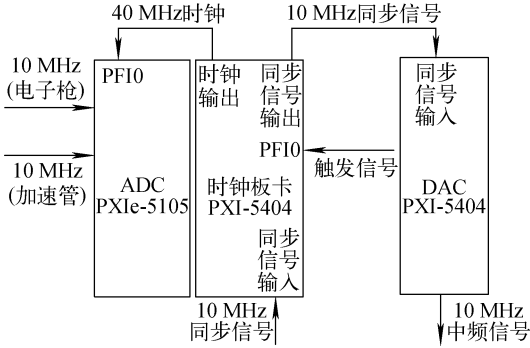
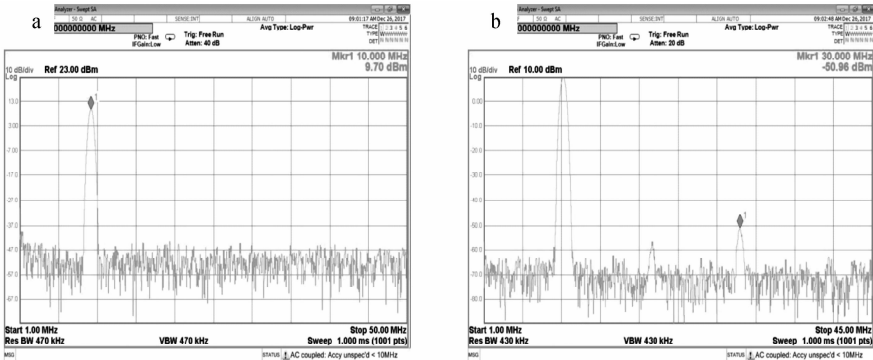


图 4 时钟分配模块

Fig. 4 Layout of clock distribution module

低电平系统中使用的数字板卡和机箱,均是美国国家仪器公司生产的成熟商业化产品。PXIe-1073 机箱内置 MXI-Express 控制器,具有远程连接能力,可持续处理 250 MB/s 的数据。PXIe-5105 有 8 路同步采样通道,12 位垂直分辨率,实时采样率 60 MS/s,模拟带宽 60 MHz。PXI-5404 具有 1.07 μ Hz 的频率分辨率和 12 位幅值分辨率,100 MHz 带宽,采样率为 300 MS/s,用直接数字合成技术精确生成波形。图 5 为 DAC 生成的中频信号频谱。图 5a 频谱仪参考电平为 23.00 dBm,图 5b 参考电平为 10.00 dBm,测得中频信号功率为 9.70 dBm,30 MHz 谐波信号功率为 -50.96 dBm,抑制比为 60.66 dB,中频信号频谱干净。

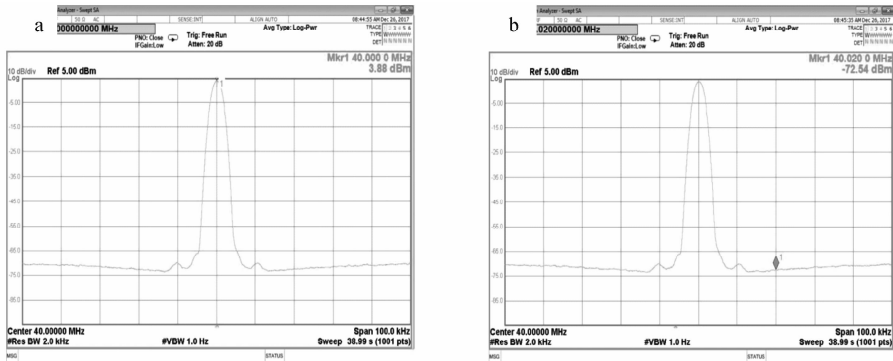
图 6 为时钟信号相位噪声谱,频谱仪参考电平为 5.00 dBm。测得 40 MHz 时钟载波功率为 3.88 dBm,在频偏 20 kHz 处的噪声功率



a——10 MHz 信号功率;b——30 MHz 谐波信号功率

图 5 中频信号频谱

Fig. 5 Spectrum of intermediate frequency



a——40 MHz 时钟信号电平;b——频偏 20 kHz 处的噪声电平

图 6 时钟信号相位噪声谱

Fig. 6 Phase noise spectrum of clock signal

为-72.54 dBm,分辨率带宽为200 kHz,由此可计算出频偏20 kHz处的相位噪声为-140.2 dBc/Hz,时钟信号相位噪声较小,性能优异。

本设计下变频采用的混频器为Mini公司的ZX05-42MH-S,该混频器的作用是将拾取到的射频信号下变频为中频信号,其工作频率范围为5~4 200 MHz,中频输出为5~3 500 MHz。实验中,对混频器在不同输入功率下的中频输出进行测量,结果如图7所示,可看出,当混频器输入信号的功率在-1~6 dBm之间时,混频器的输出是线性的,输出信号可有效反映输入信号的大小。本设计中,混频器输入的射频信号功率为1.5 dBm,测试结果表明,该混频器的中频信号能有效反映射频信号幅度和相位的信息。

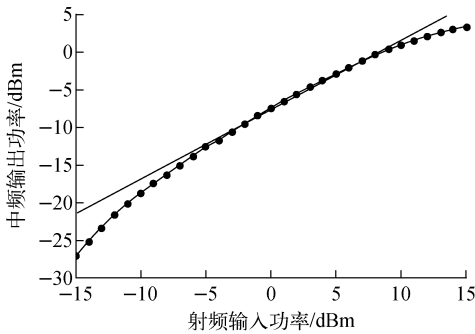


图7 混频器线性度测量结果

Fig. 7 Measurement result of mixer linearity

2 数字化算法

时域内中频信号^[11-12]可表示为:

$$y(t) = A\sin(\omega_c t + \varphi(t)) = A\cos \varphi(t)\sin(\omega_c t) + A\sin \varphi(t)\cos(\omega_c t) \quad (1)$$

其中: A 为幅度; φ 为初相位; ω_c 为角速度; t 为时间。

若以 $I=A\cos \varphi(t)$ 和 $Q=A\sin \varphi(t)$,则有:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan \frac{Q}{I} \quad (3)$$

本系统中,采样时钟频率是中频信号频率的4倍,得到的输出信号为 $S(n) = I, Q, -I, -Q, \dots$ 的采样序列。 I 和 $-I, Q$ 和 $-Q$ 分别按式(4)、(5)通过相差和平均,去除信号中的直流成分,得到正交分离的 I, Q ,再利用式(2)、(3)^[13]及通过LabVIEW编程分别计算得到幅度和相位。

$$I = \frac{S(4n+0) - S(4n+2)}{2} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$Q = \frac{S(4n+1) - S(4n+3)}{2} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

闭环反馈采用数字比例-积分(PI)控制器,图8为低电平数字化算法的流程。来自下变频模块输出的10 MHz中频信号,经过 I/Q 采样后,形成 I/Q 采样序列,送入控制计算机。 I/Q 值经过LabVIEW程序计算,得到信号相位,再经数字滑动平均滤波器(DMAF)滤波,比较滤波后相位和设定的相位,得出偏差,由PI控制器进行调节实现输出。相位控制板卡根据PI控制器的输出,产生调制后的10 MHz中频信号。

3 低电平控制系统人机界面及测试结果

调试界面如图9所示,控制程序采用LabVIEW开发,从而实现参数设定和数据显示。控制界面能设定PI参数,实现相位的开环和闭环控制,并实现对电子枪和加速管加速场的相位控制。

低电平控制系统搭建完成后,与电子直线

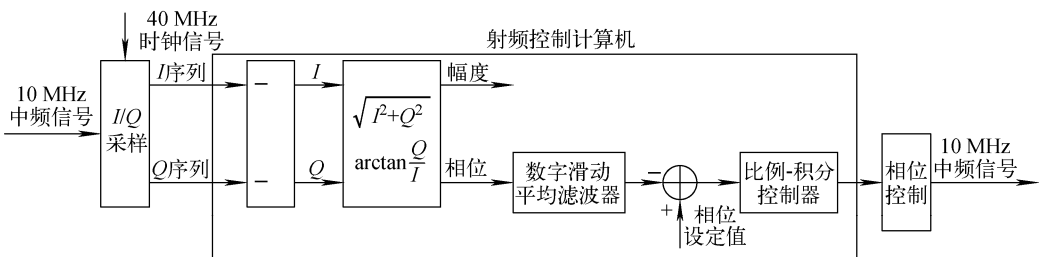


图8 低电平控制系统数字化算法流程

Fig. 8 Control algorithm of low level radio frequency control system

加速器射频功率源联机进行无束流负载的高功率测试实验。在射频脉冲 $1 \mu\text{s}$ 、脉冲重复频率 10 Hz 、速调管输出功率 25 MW 、无束流通过的情况下,低电平控制系统的采样信号从加速管拾取端引出,相位测量结果示于图 10。图 10a

是相位稳定性随时间的变化情况,图 10b 是相位的直方分布。可看出,闭环后控制系统对相位的控制精度可达 $\pm 0.5^\circ$ (峰峰值) 和 0.1108° (均方根), 优于 $\pm 1^\circ$ 的设计指标, 完全满足设计要求。

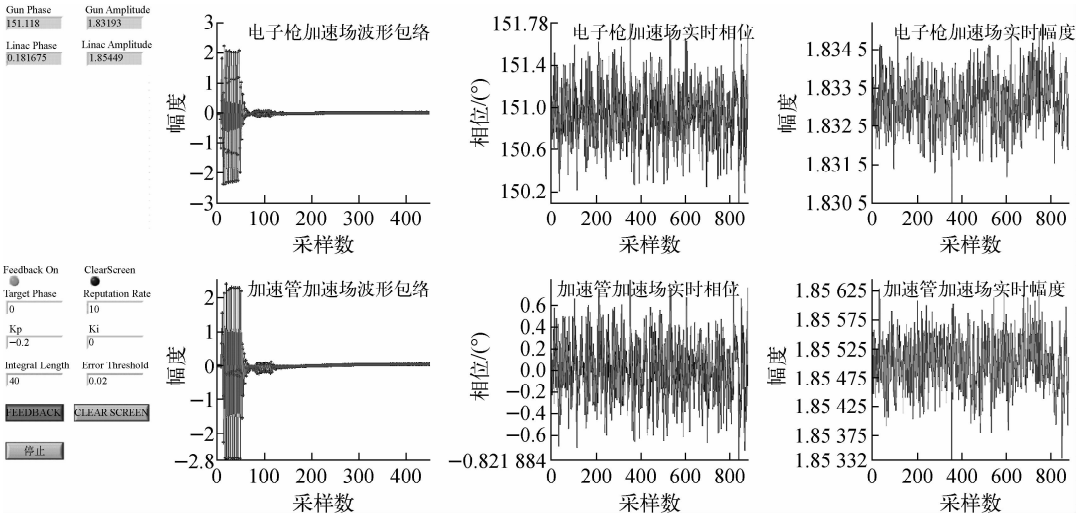
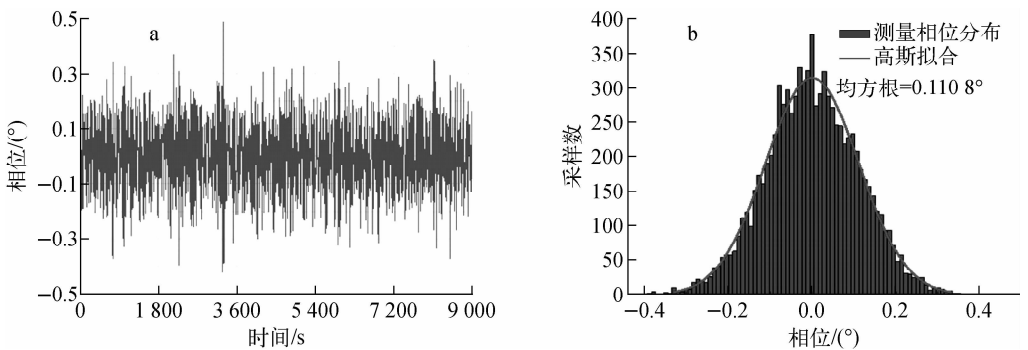


图 9 低电平控制系统的 LabVIEW 界面

Fig. 9 LabVIEW operating panel of low level radio frequency control system



a——相位稳定性;b——相位直方分布

图 10 相位测量结果

Fig. 10 Phase test result

4 结论

本文利用上下变频、IQ 解调技术和商业化 PXI 板卡, 研制了一套低电平控制系统, 实现了用于高能电子成像实验研究的射频电子直线加速器的相位反馈控制, 相位稳定控制精度达到设计指标。在该低电平控制系统的设计中, 本振信号的产生和上下变频的硬件实现均使用商业模拟微波器件, 这些模拟器件体积小、使用简单、易获取。信号发生器和数字化模块采用成

熟的商业化产品, 集成度高、性能优异, 板卡控制程序基于 LabVIEW 软件, 易于开发且便于实验人员操作。商业模拟器件和商业化板卡的使用, 不仅使整个低电平控制系统的结构紧凑, 而且还可缩短开发时间。

参考文献:

- [1] MERRILL F, GOLUBEV A A, MARIAM F G, et al. Electron radiography[J]. Nuclear Instru-

- ments and Methods in Physics Research B, 2007, 261: 382-386.
- [2] ZHAO Y, ZHANG Z, XU H, et al. A high resolution spatial-temporal imaging diagnostic for high energy density physics experiments[C]//Proceedings of IPAC2014. [S. l.]: [s. n.], 2014.
- [3] ZHAO Q, CAO S, CHENG R, et al. High energy electron radiography experiment research based on picosecond pulse width bunch[C]//Proceedings of LINAC2014. [S. l.]: [s. n.], 2014.
- [4] ZHOU Z, DU Y, CAO S, et al. Experiments on bright field and dark field high energy electron imaging with thick target material[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2018, 21: 074701.
- [5] ZHAO Q, CAO S, SHEN X, et al. Design and simulation study of ultra-fast beam bunches split for three orthogonal planes high-energy electron dynamics radiography[J]. Laser and Particle Beams, 2017, 35: 579-586.
- [6] ZHAO Q, CAO S, LIU M, et al. High energy electron radiography system design and simulation study of beam angle-position correlation and aperture effect on the images[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 832: 144-151.
- [7] ZHU Y, YUAN P, CAO S, et al. Design and simulation of a linac for high energy electron radiography research[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2018, 911: 74-78.
- [8] ZIOMEK C, CORREDOURA P. Digital I/Q demodulator[C]//Proceedings of PAC1995. [S. l.]: [s. n.], 1995.
- [9] 张同宣,赵玉彬,尹成科,等. 上海光源数字化低电平控制系统的硬件设计与实现[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 1 048-1 052.
- ZHANG Tongxuan, ZHAO Yubin, YIN Chengke, et al. Design and realization of digital low level RF system for SSRF[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6): 1 048-1 052(in Chinese).
- [10] 殷治国,宫鹏飞,付晓亮,等. 230 MeV 超导回旋加速器高频低电平系统设计与桌面实验研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(9): 1 716-1 721.
- YIN Zhiguo, GONG Pengfei, FU Xiaoliang, et al. Design and deaktop experiment of LLRF system for CYCIAE-230 superconducting cyclotron [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(9): 1 716-1 721(in Chinese).
- [11] 从岩,许哲,李刚,等. HIRFL 数字化高频低电平控制系统研究[J]. 原子核物理评论, 2012, 29(3): 248-252.
- CONG Yan, XU Zhe, LI Gang, et al. Research of digital low level radio frequency control system for HIRFL[J]. Nuclear Physics Review, 2012, 29(3): 248-252(in Chinese).
- [12] 张俊强,殷重先,高永强,等. FPGA 实现次谐波聚束器的幅相控制[J]. 核技术, 2012, 35(7): 499-502.
- ZHANG Junqiang, YIN Chongxian, GAO Yongqiang, et al. An FPGA-based amplitude and phase control of sub-harmonic buncher[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(7): 499-502(in Chinese).
- [13] 朱正龙,王贤武,李春龙,等. LLRF 超导腔体控制系统的测试[J]. 原子核物理评论, 2015, 32(2): 196-201.
- ZHU Zhenglong, WANG Xianwu, LI Chunlong, et al. Test of LLRF control system on superconducting cavity[J]. Nuclear Physics Review, 2015, 32(2): 196-201(in Chinese).