

文章编号: 1007-4627(2015)01-0063-06

基于浏览器的Kicker踢轨控制系统软件设计

罗金富^{1, 2}, 王彦瑜¹, 周文雄^{1, 2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)现有的Kicker踢轨控制系统为多板结构, 需要安装多个控制软件对其进行参数配置, 系统的时间分辨率为5 ns; 新研制的踢轨控制系统采用单板结构, 将系统的时间分辨率提高至2.5 ns。界面设计采用流行的浏览器/服务器模式, 在嵌入式系统中移植Boa Web服务器, 用来实现浏览器和底层硬件的通信, 操作人员通过浏览器即可对Kicker控制系统各项参数进行配置。实验验证, 该软件系统具有免安装、操作简单、易于与其他软件系统集成的优点, 能够满足踢轨控制系统的需要。

关键词: HIRFL-CSR; 时间分辨率; 浏览器/服务器; Boa

中图分类号: TL56 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.063

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的Kicker踢轨系统是一种以快脉冲(ns)方式工作的、以高压(kV)大电流(kA)电源驱动的特殊二极磁铁系统^[2], 该系统是整个束流传输系统的关键环节; 它的控制精度直接影响着束流的传输效率、束流品质和核物理实验的精度。现有的束流传输系统共配备了两套Kicker踢轨控制系统来完成HIRFL-CSR主环(CSRm)与实验环(CSRe)之间束流的传输。该系统为多板结构, 控制界面采用VC6.0/MFC编写, 每一块控制板都需要一个控制界面^[3], 操作人员需要在指定的PC上安装多个控制软件才能进行调束工作, 效率较低。新研制的Kicker踢轨控制系统采用ARM+FPGA+DSP的单板结构, 具有强大的硬件资源和网络性能, 为开发新型的软件控制系统提供了必要的保障。

传统的单机/主从模式, 客户机/服务器(C/S)软件设计模式需要为每个客户端分别设计相应的软件, 增加了系统的开发和维护的成本^[4]。浏览器/服务器(B/S)模式以Web服务器为核心, 来处理浏览器和底层应用或数据库之间的交互; 这样软件功能的增加、改动只需更改服务器端即可, 发送HTTP服务的客户浏览器方面不需要任何改动, 极大地降低了软件系统设计和维护的复杂性。所以, 开发基于B/S的Kicker控制界面具有跨平台、免安装、界面美观、使用便捷的优点, 具有

很高的实用价值。

2 踢轨控制系统的总体结构

新设计的踢轨控制系统由两个踢轨控制器组成, 分别用于束流在CSRm的快引出与CSRe的快注入, 图1给出了踢轨控制系统在HIRFL-CSR总体布局图中的位置分布。束流在CSRm加速、累积到一定的流强, 需要将其引出送入CSRe。由于CSRm没有相位探针, 无法直接获取束流在环中的相位信息, 故位于CSRm的踢轨控制器需要对与束流同步的高速扫频电场进行频率监

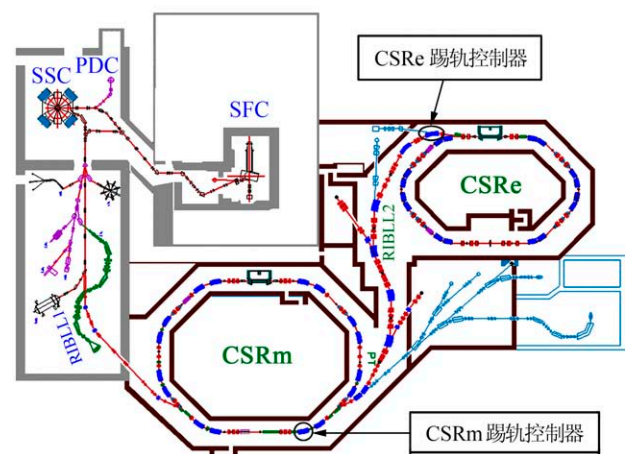


图 1 (在线彩图) HIRFL-CSR中踢轨控制系统位置分布

收稿日期: 2014-04-18; 修改日期: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1232123)

作者简介: 罗金富(1988-), 男, 河南信阳人, 硕士, 从事核技术及应用研究; E-mail: luojinfu@impcas.ac.cn

通信作者: 王彦瑜, E-mail: yanyu@impcas.ac.cn

测，来间接地获取束流的相位信息。在扫频电场的顶点频率处，CSRm 的踢轨控制器需要产生时间可调的脉冲触发信号和脉冲同步信号，来同步位于 CSR_e 的踢轨控制器和控制位于 CSR_m 的 6 台磁铁电源产生引出磁场，将束流引出到 CSR_e。CSR_e 的踢轨控制器在收到来自 CSR_m 的同步信号后，产生时间可调的脉冲触发信号来控制 4 台磁铁电源产生注入磁场以用于束流的注入。

图 2 给出了踢轨控制系统的硬件结构图^[5]。由于磁铁电源的输出功率很大，不宜长期工作在高压状态下，只需在被触发放电产生踢轨磁场几十毫秒前预充电即可。位于 CSR_m 和 CSR_e 的踢轨控制系统目标是一致的，都需要产生控制磁铁电源的脉冲触发信号。因而，这两处的踢轨控制器是相同的，只需要针对 CSR_m 和 CSR_e 的需求对输入接口进行重新定义即可。

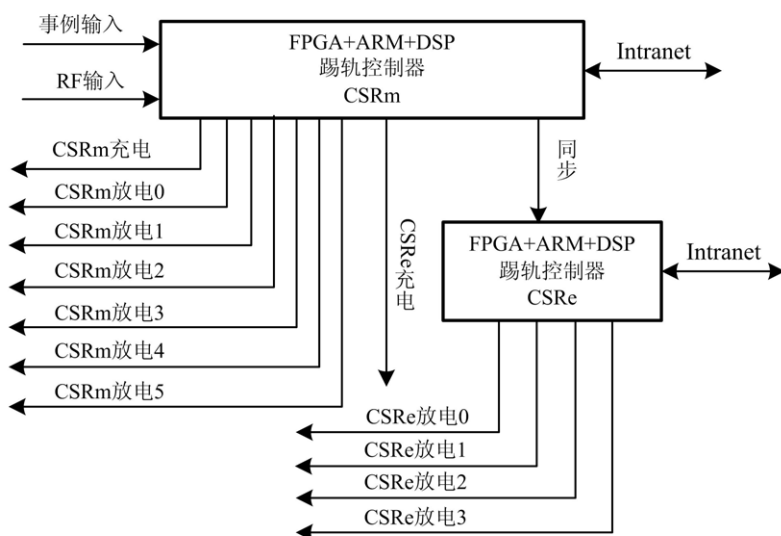


图 2 踢轨控制系统的硬件结构图

3 软件系统结构

图 3 为采用 B/S 模式开发的踢轨控制系统软件平台，CSR_m 和 CSR_e 使用相同结构的软件系统，只需要分配不同的 IP 地址即可。操作人员在浏览器上的输入通

过 HTTP 请求发送给 Linux 系统上的嵌入式 Boa 服务器，服务器对 HTTP 请求进行解析，然后根据传入的参数调用相应的 CGI(Common Gateway Interface) 程序。由于 ARM 与 FPGA 间的参数配置是通过 UART 实现的，因此 CGI 程序被调用后通过 FIFO 文件与应用程序进行交互，完成对 ARM 端 UART 驱动的调用，进而实现 ARM-FPGA 间数据的传输，ARM 通过 UART 可方便快捷地实现对 FPGA 的参数配置等操作。FPGA 在 UART 和通信协议的配合下接受 ARM 传递的参数，来实现对延时调节、扫频电场频率等参数的配置。DSP 在后续的功能升级中为实现一键智能调束提供保证。

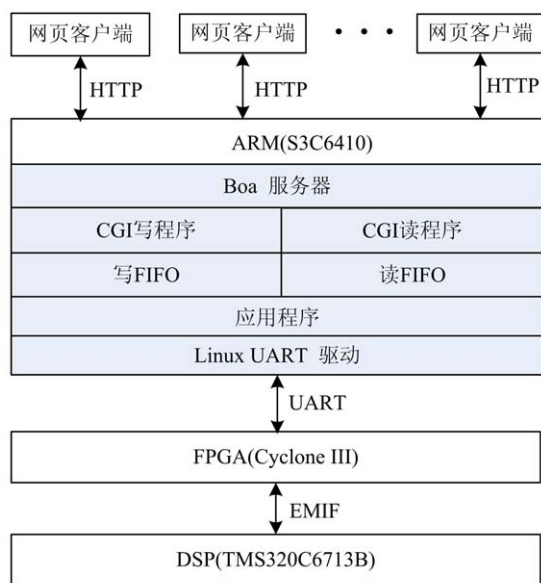


图 3 踢轨控制系统的软件框架

4 ARM 软件设计

S3C6410 芯片是韩国三星公司生产的一款通用嵌入式 ARM 处理器，能够移植 Linux 操作系统，具有非常出色的网络性能，在本系统中充当浏览器和 FPGA 之间通信的桥梁。ARM 的软件设计涉及到 Boa 服务器的移植，应用层程序的编写，以及用于浏览器显示的 HTML 文件设计。

4.1 Boa 服务器和 CGI 应用程序

Boa 服务器是一个运行于 Unix/Linux 下、支持 CGI 标准、适合于嵌入式系统的 Web 服务器。Boa 服务器设计十分小巧,可执行代码只有 60 KB 左右,并且支持开放源代码协议,可以很方便地移植到嵌入式系统中。同时,相对于大型服务器复杂的功能来说,Boa 服务器可进行一定程度上的精简,所以对浏览器响应速度非常快,而且十分稳定,符合踢轨控制系统的软件健壮性要求。在本平台中,Boa 服务器主要负责对实验人员提交的表单进行解析,并将提取出来的参数转发给指定的 CGI 程序。

CGI 是 Web 服务器同外部应用程序进行交流的一种标准,为信息在浏览器或服务器与外部应用程序之间的传递提供了一种标准化的手段。符合 CGI 规范的外部应用程序一般称为 CGI 应用程序,可以由各种脚本语言编写,也可由 C/C++ 等传统编程语言编写。图 4 为 CGI 标准的工作原理。用户通过浏览器输入各种参数,浏览器将表单中的参数以指定的 POST 或者 GET 方式传递给 Boa 服务器;然后 Boa 服务器用提取出来的 CGI 应用程序名来启动该应用,并传递其参数;CGI 应用程序以指定的参数进行一定的运算,并将结果通过 STDOUT 的方式返回给 Boa 服务器;最后 Boa 服务器将结果组织成 HTML 的标准格式并发送给浏览器进行解析并显示。本系统中 CGI 应用程序由 C 语言编写,根据传递的参数通过 FIFO 与大型应用程序进行交互,并将返回的结果通过 printf 函数传递给 Boa 服务器。

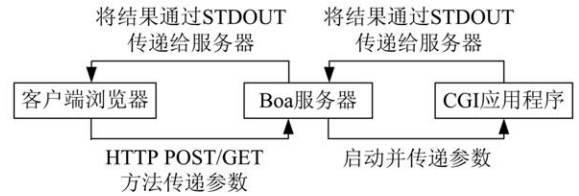


图 4 CGI 标准的工作原理

4.2 应用层程序设计

CGI 应用程序频繁地被服务器调用,具有功能单一、短小简洁等特点。如果 CGI 应用程序直接调用驱动进行交互,会存在多浏览器用户的操作带来的硬件设备并发问题。所以,在驱动层之上抽象出一个应用层,该应用程序常驻内存,只需打开一次设备文件,就可通过 FIFO 文件与不同的 CGI 应用程序进行交互,从而达到 CGI 应用对设备文件的并发访问。

4.3 HTML 文件设计

HTML 是超文本标记语言,由头部(head)和主体(body)组成,其中 head 负责提供关于网页的信息,body 负责提供网页的具体内容。一个 HTML 文件就是一个 page,放在服务器的目录下;当客户端浏览器通过 IP 地址访问作为主页的 page 时,由浏览器负责解释该 HTML 文件,并显示出具体的网页图形。图 5 为用 HTML 语言设计的踢轨控制系统的简易界面,该文件放置于 Boa 服务器的目录下作为主页,操作人员在任一接入局域网的电脑上通过浏览器输入 IP 地址即可调出该控制界面。

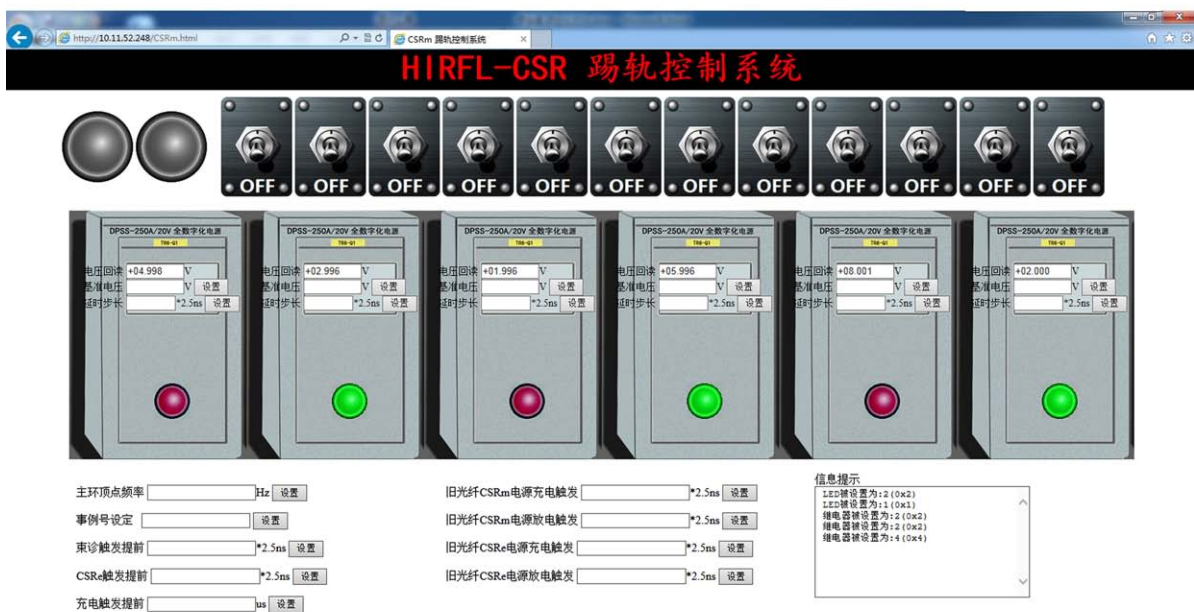


图 5 (在线彩图) 踢轨控制系统简易界面

5 FPGA 逻辑设计

FPGA 主控芯片采用美国 Altera 公司的 Cyclone III EP3C25Q240C8, 该芯片有 24 624 个 LE, 高达 594 K 个 RAM bits 自带计数器 IP 能够稳定地运行在 400 MHz 时钟频率下。FPGA 是踢轨控制系统的核心, 通过对高频电场的频率检测来确定 CSRm 束流的引出时间点, 以及实现快引出/注入触发信号的高精度步长调

节来确定 CSRm 束流精确的引出点以及 CSR_e 束流的准确注入时间点。如图 6 为 CSRm FPGA 逻辑设计的框图, UART 模块负责与 ARM 进行通信, 获取设定的参数; 然后通过参数中提取的地址和数据使用统一的地址总线 and 数据总线对指定的模块进行配置。实验环不需要监测事例码和束流的相位信息, FPGA 逻辑设计在此基础上需要进行简单的修改, 用 CSRm 踢轨控制器的一路同步信号直接触发 CSR_e 的延时调节模块。

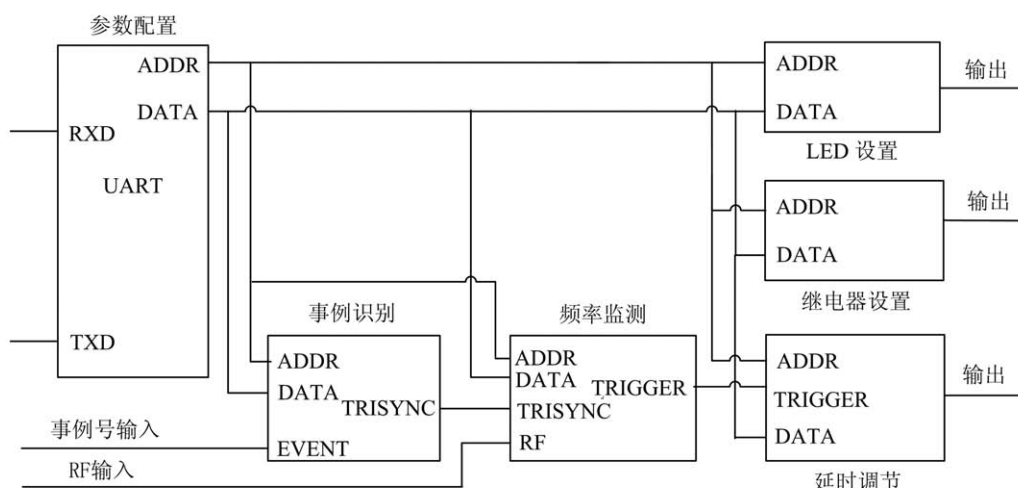


图 6 FPGA 逻辑设计

5.1 UART 通信设计

由于是板上的 UART 通信, ARM 与 FPGA 的 CMOS 电平互相兼容, 且二者共用一套电源系统, 所以 FPGA 任选两个管脚和 ARM 的 UART 管脚相连即可。FPGA 用 Verilog 进行 UART 的逻辑设计, 指定管脚的输入输出方向, 设定与 ARM 应用程序中相同的波特率, 然后对 UART 的接收和发送时序进行模拟, 在 FPGA 的 RXD 管脚上进行数据的接收, 在 TXD 上进行数据的发送。

表 1 为 UART 上采用的自定义通信协议, 根据控制器的自身特点对 ModBus 协议进行一定程度的裁剪, 只保留地址域和数据域。

表 1 UART 通信协议

地址域	数据域
bit39:bit32	bit31:bit24 bit23:bit16 bit15:bit8 bit7:bit0

一帧数据为 5 个字节, 第一个字节为地址码, 用来识别要配置的模块; 后四个字节为数据位, 用来对识别的模块进行参数配置, 即每个被识别的设备使用 32 bit 的数据来对其进行配置。地址码为 8 bit 可以产生 256 个地址, 即地址总线上可以挂载多达 256 个设备; 表 2

和表 3 分别为 CSRm 和 CSR_e 对 UART 通信的设备的地址分配。

表 2 CSRm 控制器 UART 地址分配

地址	设备	地址	设备
1	LED	7	放电 1
2	继电器	8	放电 2
3	事例码	9	放电 3
4	频率	10	放电 4
5	充电	11	放电 5
6	放电 0		

表 3 CSR_e 控制器 UART 地址分配

地址	设备	地址	设备
1	LED	4	放电 1
2	继电器	5	放电 2
3	放电 0	6	放电 3

5.2 事例识别和频率监测

踢轨控制系统属于整个 CSR 控制系统的一部分, 需要符合 CSR 控制系统的逻辑关系。CSR 控制系统统一采用事例驱动的模式, 当子系统检测到了特定的事例码, 才能开展进一步的工作。因而, 正确地识别踢轨系

统的事例码是一次快引出/注入事件的开始。分配好的事例码共32 bit，由 CSRm 通过一路光纤传入 FPGA，FPGA 采取状态机对事例脉冲进行检测，以产生频率检测模块的触发信号。图 7 为用来对 CSR 事例码进行脉冲检测的状态机流程图。

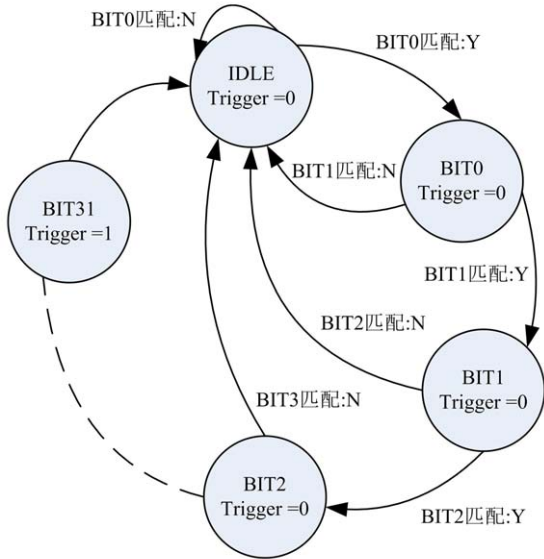


图 7 事例检测的状态机

扫频电场 RF 信号在顶点频率处可以保持几秒的时间，所以可以采取直接计数法对其频率进行监测。FPGA 内部以 50 MHz 的时钟频率为基准，产生周期 1 Hz 的标准门限信号并在门限信号内对 RF 脉冲进行计

数，计数的数目即为扫频电场的频率。对于顶点频率为 1 MHz 的扫频电场，直接计数法的频率识别精度误差不超过 2 Hz，响应时间不超过 2 s。

5.3 高精度延时调节输出

新型踢轨控制系统最重要的目标就是提高束流在主环中的时间分辨率，要求在 ns 量级^[6]。已有的踢轨控制器 FPGA 芯片工作频率为 200 MHz，只能实现 5 ns 精度的延时调节。束流累积到引出流强时高频电场的顶点频率在 1 MHz 左右，要实现 1° 的相位分辨率，需要至少 360 MHz 的工作频率。

为了实现 2.5 ns 延时调节的目标，需要使用锁相环 (PLL: Phase-locked loops) 对时钟频率进行倍频，使用 400 MHz 的时钟频率驱动计数器进行延时调节。每个计算器模块使用 16 bit 的 Altera 计数器 IP Core，可以处理 65 536 单位个 2.5 ns 延时调节范围，能够满足 Kicker 踢轨控制系统不超过 1ms 的延时调节需要；同时，CSRm 和 CSRc 仅计数器模块工作在 400 MHz，FPGA 资源消耗率不到 5%。

6 实验结果与总结

为了测试软件系统以及 FPGA 逻辑是否能够正常工作，我们通过图 5 的简易控制界面对 CSRm 的两路放电触发信号进行配置，参数之差为 4 个单位和 5 个单位；把这两路触发信号送入示波器中，从图 8 中可以看出，两路延时参数相差 4 个单位时的信号时间差为 10.1 ns，

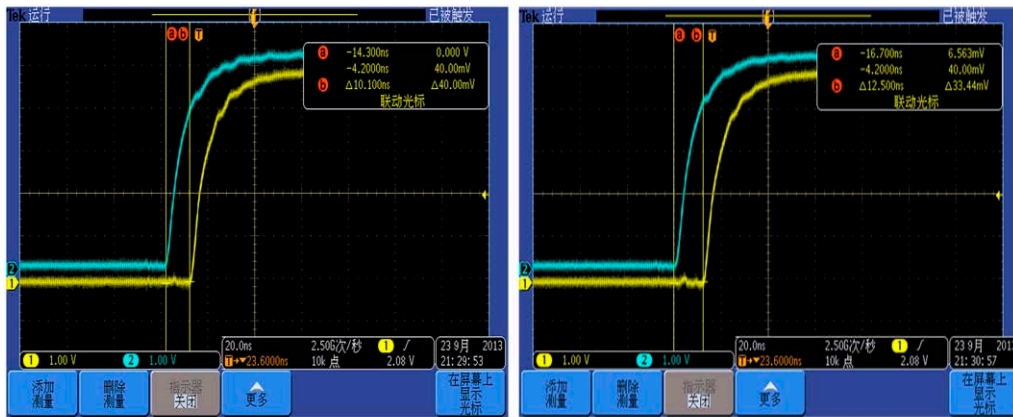


图 8 (在线彩图) 示波器下步长 2.5 ns 精度的延时调节

相差为 5 个单位时的信号时间差为 12.5 个 ns，FPGA 的计数器 IP 能够稳定地工作在 400 MHz。所以，该软件系统能够满足踢轨控制系统的各项要求。在下一步的工作中，需要进行程序设计的完善和控制界面的美化。

参考文献：

[1] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2002, **488**: 11
 [2] WANG Yanyu, GUO Yuhui, LIN Feiyu, *et al.* 2008, **20**(8): 1353. (in Chinese)

- (王彦瑜, 郭玉辉, 林飞宇, 等. 2008, **20**(8): 1353.)
- [3] GUO Yuhui, QIAO Weimin, LI Guihua, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2007, **19**(10): 1727. (in chinese)
(郭玉辉, 乔卫民, 李桂花, 等. 强激光与粒子束, 2007, **19**(10): 1727.)
- [4] XIONG Jin, TAO Juncai. Computer and modernization, 2005, **8**: 113. (in Chinese)
(熊瑾, 陶俊才. 计算机与现代化, 2005, **8**: 113.)
- [5] WANG Yanyu, ZHOU Wenxiong, LUO Jinfu, *et al.* Nucl Instr and Meth in Physics Research A. 2014, **738**: 50. (in Chinese)
(王彦瑜, 周文雄, 罗金富, 等. NIMA, 2014, **738**: 50.)
- [6] HUANG Jijiang, WANG Yanyu, QIAO Weimin, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology. 2008, **28**(3): 617. (in Chinese)
(黄继江, 王彦瑜, 乔卫民, 等. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 617.)

Software Design for Kicker Control System Based on Browser

LUO Jinfu^{1, 2}, WANG Yanyu¹, ZHOU Wenxiong^{1, 2}

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

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

Abstract: The existed Kicker Control System for HIRFL-CSR in Lanzhou is multi-board and many software interfaces have been installed to have the parameters to be configured. The time resolution for the beam to be identified is 5 ns. The newly designed Kicker Control System is designed with single-board architecture and raises the system time resolution to 2.5 ns. The B/S model has been applied to upgrade the software interface. In order to realize the target, we use the browser to communicate with hardware for the purpose of configuring the controller, the Boa web server has been transplanted into embedded system. The experiments showed that this software system is easy to use and integrate with other control system, without setup process, and is of great research value and popularization.

Key words: HIRFL-CSR; time resolution; B/S; Boa

Received date: 14 Apr. 2014; Revised date: 29 Apr. 2014

Foundation item: Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (U1232123)

Corresponding author: WANG Yanyu, E-mail: yanyu@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>