基于嵌入式 EPICS 的合肥光源储存环 束流损失监测系统^{*}

蔡袁琦, 唐雷雷, 周泽然

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘 要: 针对合肥光源储存环恒流运行(Top-off)改造等性能提升的需要,研制了新型的基于嵌入式 EP-ICS 架构的储存环束流损失监测(BLM)系统,用于监测储存环中束流损失发生的位置和大小。新 BLM 处理器 获取储存环各处双 PIN 型光电二极管传感器所采集的簇射电子的信号,分析处理后通过各个处理器内部的嵌 入式系统所运行的 EPICS 程序将数据实时发布到加速器控制网络,使中控室能够实时获取束损的数据。新 BLM 系统能够实时对双 PIN 型传感器进行自检操作,排查故障隐患,提高了系统运行的效率和可靠性,经过试 运行表明,新 BLM 系统可完全满足合肥光源恒流的运行需要。

关键词: 合肥光源; 束流损失探测; 嵌入式系统; EPICS
中图分类号: TL822
文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201931.190041

Embedded EPICS based beam loss monitor system of HLS-II storage ring

Cai Yuanqi, Tang Leilei, Zhou Zeran

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: A new beam loss monitor system based on embedded EPICS is developed for the top-off upgrade of HLS- [], to monitor the position and value of beam loss of storage ring. The electron shower signals are obtained by the double PIN photodiode detectors around the storage ring, then acquired by the new BLM processors, where the beam loss signals are analysed and distributed to the accelerator control network, by embedded EPICS on embedded Linux system of the BLM processors, and the beam loss data could be obtained in the central control room. The new BLM system could actuate the self-checking function of the double PIN photodiode detectors, eliminate hidden malfunction of the detectors, and improve stability and reliability of the whole system. Preliminary operation shows that the new BLM system can meet the needs of the top-off upgrade of HLS- [].

Key words: HLS []; beam loss monitor; embedded system; EPICS PACS: 07.77.Ka; 41.85.Qg

电子储存环损失的电子与真空室壁撞击的过程会产生簇射电子^[1],储存环束流损失监测系统通过对它们 的探测可以获得束流损失的数量及位置等信息,该系统可以在储存环调机、运行状态监测以及束流寿命研究等 方面发挥重要作用。合肥光源恒流运行(top-off)关键系统改造项目^[2-3]为了保证稳定的光亮度,需要通过多次 频繁注入(间隔 10 min 左右,注入 10 s 左右)以补充损失的电子。在光源运行期间,用户实验持续进行,不会 因注入而被打断,实验人员可以驻留实验大厅,这对储存环束流损失监测系统提出了更高的要求。相对于改造 前的束损探测系统使用单台主机运行 LabView 软件获取各处的束损数据^[4],新的束损监测系统使用分布式的 嵌入式 EPICS 构架:每个探测点的处理器内部运行的嵌入式操作系统独立运行 IOC 程序将本地采集的束损 数据直接发布到加速器控制网络内,使得储存环各点的束损数据可以被实时访问。同时,新系统集成了传感器 自检功能,能够在线排查故障,提高了系统的运行稳定性。本文针对合肥光源恒流运行改造的需要,设计了基 于嵌入式 EPICS 架构的束流损失监测系统。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11675170);"双一流"重点建设项目(YD2030000603) 作者简介:蔡袁琦(1994-),男,硕士,从事加速器束流诊断研究;ustccyq@mail.ustc.edu.cn。 通信作者:周泽然(1982-),男,副研究员,从事加速器束流诊断研究;zhouzr@ustc.edu.cn。

^{*} 收稿日期:2019-02-21; 修订日期:2019-04-16

1 储存环束损探测原理

束流寿命是衡量储存环性能的关键指标,束流寿命与束流损失状况密切相关。电子储存环的束流寿命受 到量子效应、残余气体散射和托歇克效应的影响和制约^[5-7]。三者满足以下关系

$$\frac{1}{\tau_{\text{total}}} = \frac{1}{\tau_{\text{g}}} + \frac{1}{\tau_{\text{g}}} + \frac{1}{\tau_{\text{t}}}$$
(1)

式中: τ_{total}是束流总寿命; τ_q 是量子寿命; τ_g 是残余气体影响的寿命; τ_t 是托歇克寿命。其中 τ_g 和 τ_t 是主要影 响储存环束流寿命的因素。托歇克寿命总是引起电子成对丢失,转向储存环真空室内外两个方向机会均等。 残余气体散射一般会使得电子的能量损失,经过弯铁时或者之后就会转向环的内侧。光源运行时,储存环内的 电子受到以上等因素影响造成损失,使得电子在偏转磁场的作用下撞击真空壁,发生簇射反应,产生簇射电子 和光子,同时加速器运行过程中,在空间杂散的光子较多,因而存储环束损检测需要面对复杂的混合辐射场。 目前常见的束流损失探测器有气体探测器、闪烁体探测器和半导体探测器等。半导体探测器将辐射粒子反应 材料添加到半导体二极管中。具有体积小、线性范围宽、不需要加高压、幅度分辨率高等特点,非常适合合肥光 源这类电子加速器装置。

2 系统组成

束损监测采用的双 PIN 型光电二极管探测器为半导体探测器,由德国 DESY 实验室开发,并由法国 Bergoz 公司生产,型号为 BLM-XS^[8+9]。该探测器由 PIN 型光电二极管探测器改进而来。改进后探测器对光子不 敏感,对电子散射有很强的分辨能力,适用于同步辐射环境中的混合辐射场。参数如下:最小电离粒子(MIP) 探测效率大于 30%,γ 灵敏度小于 0.06%。束流损失往往发生在水平聚焦和色散较大位置,并在这些位置产生 簇射电子和光子^[10],因此探测器安装在四级铁及六级铁附近位置。由于电子在空气中的发射行程较短,聚集 在真空室附近,因而传感器紧贴储存环真空管壁安装,并在内外上下四个方向分别安装探测器,如图 1 所示。 合肥光源磁场聚焦结构为分离型强聚焦(TBA)结构,如图 2 所示,在位置 H_1~H_16,探测器成对地安装于水 平方向;在位置 V_1~V_16,探测器成对地安装于垂直方向,总共 16 个固定探测点,64 个 Bergoz 束流损失探 测器紧贴着储存环的真空室壁进行固定。每个固定探测点都有一个处理器,采集 4 个方向的束损信号,处理器 本地运行嵌入式操作系统,加速器控制网可以通过 EPICS 系统直接通信,中控室内运行 OPI 束损监测程序。





Fig.2 Distribution of BLM system 图 2 束损处理器分布图

3 处理器硬件电路设计

束流损失探测系统的处理器硬件电路分为电路板 1 和 2(board1 和 board2)。电路板 1 负责本地束损传感 器信号的调理与采集,包括:电源电路、信号调理电路、Cortex-M3 处理器电路、触摸屏、看门狗以及存储电路 等。电路板 2 主要完成数据通信功能以及自检功能,包括:嵌入式操作系统电路、USB 通信电路、串口通信电 路以及以太网电路等。如图 3 所示,电路板 1 对四个象限的探测器信号进行调理,产生脉冲宽度可调的电压信 号。CORTEX-M3 处理器对处理后的脉冲信号进行计数,同时转换为频率值。束流损失值采用计数值或频率 值 表示。触摸屏负责本地操作,同时通过电路板2内嵌入式操作系统运行的EPICS协议包含的IOC程序将数 据发布到控制网中。用户通过OPI界面远程操作与查看。受限于电路板尺寸,传感器自检电路被放置在电路 板 2, 自检电路通过板件数据总线, 与 Cortex-M3 处理器 相连。

3.1 电源电路与信号调理电路

双 PIN 型光电二极管探测器工作电压为+24,+5和 -5 V 电压,工作电流分别为 10,50 和 80 mA。电源电路 需要提供传感器工作电压,信号处理电路工作电压等。如 图 4 所示,220 V 交流电源供电经过开关电源转换为+24V 直流电源,+24 V 经过 VRA2405YMD-6WR3 产生 ± 5 V 电压供传感器工作。同时+24 V 电压经过 DC-DC 电 源模块转化为+5 V 电压,以及 LDO 芯片得到+3.3 V 供 触摸屏、处理器芯片、存储芯片、看门狗等电路使用。





Fig.4 Schematic diagram of power supply circuit 图 4 电源电路原理图

探测器工作输出信号为一个窄脉冲信号,脉冲宽度约为 50 ns,峰值约为 2.5 V,如图 5 所示。信号调理电路与原束损 监控系统类似,使用 74HC221 单稳态触发器产生一个脉宽可 调的方波信号,提供给 Cortex-M3 处理器采集。

3.2 Cortex-M3 处理器电路

Cortex-M3 是 32 位的嵌入式处理器,工作电压为 3.3 V, 使用外部 8 MHz 的无源晶振,处理器内部倍频到 72 MHz 的 工作频率,芯片自带的多通道 16 位定时器可以设置为脉冲计 数功能,同时获取一个测量点 4 个方向的束损信号。处理器 芯片通过 SPI 总线控制 512 K 的 EEPROM 存储芯片,用于 存储系统的工作参数,自带的通用串口通道 UART 用来操控



图 5 探测器输出波形

本地触摸屏,以及与嵌入式系统进行数据交换。处理器电路使用外部专用看门狗芯片并配合复位电路,提高系统的稳定性,此外电路还包括时钟系统工作所需的电池供电电路以及 32.768 kHz 晶振电路。

3.3 探测器自检电路

双 PIN 型光电二极管探测器有两种工作模式:普通测量模式和校准模式。图 6 为传感器端口定义,普通测量模式工作时,探测器管脚5和9悬空不接,只接电源(+5V,-5V,+24V)、地和输出管脚;校准模式下,

管脚 5 或者 9 可以通过连接上拉电阻,使能通道 A 或者通道 B 的校准输出,此时输出端子(端口 10)输出频率

为 10 kHz \pm 800 Hz 的脉冲信号,如果校准输出信号与此频率 有偏差,则需要分别调节各自电位器进行修正。原系统运行经 验表明,长时间处于辐射环境下的二极管探测器容易损坏,此时 测量得到的数值是不可信的(异常偏高或者无信号),且由于光 源连续运行,检修非常不便。为此,我们设计了自检电路,用于 在线校准检测探测器,排查隐患。图 7 为自检电路原理图,Cortex-M3 处理器通过 IO 口控制继电器通断来使得探测器校准使 能端口(管脚 5 或者 9)上拉:普通测量模式时校准使能端口悬 空,校准模式时管脚 5 或 9 通过上拉电阻 4.7 kΩ 接 5 V 电源, 此时输出通道输出的信号应为 10 kHz 左右的通道 A 或者通道 B 的校准脉冲信号。



Fig.6 Sensor port definition 图 6 传感器端口定义



图 7 自检电路原理图

3.4 Cortex-A8 嵌入式系统电路

嵌入式系统是一种软硬件可以裁剪的计算机系统,适用于对功能、可靠性、体积和功耗要求严格的应用场 合。在嵌入式系统中运行嵌入式 Linux 操作系统,在操作系统上运行 EPICS 程序。嵌入式系统的处理器芯片 使用 32 位 ARM Cortex-A8 处理器,实现低功耗与小体积,工作主频为 1 GHz,工业级($-40 \sim 85$ °C),使用 512 MB 的 DDR3 内存,256 MB 的 Nand Flash 存储芯片用作系统启动引导以及系统本身存储,另外 32 kB 的 EE-PROM 作为辅助存储芯片,可以存放引导程序配置参数等。图 8 所示,系统支持 CAN,USB,UART,SPI 以及 Ethernet 等多种通信总线,工作功耗不超过 2 W。

4 系统软件实现

合肥光源储存环控制系统是基于 EPICS 的分布式控制系统^[11],包括磁铁电源控制系统、注入控制系统、 高频控制系统、真空控制系统等。新的束流损失监测系统基于嵌入式 EPICS 系统构架,与储存环控制系统兼 容,使控制网内任一运行 EPICS 协议的设备可以方便获取储存环束流损失数据。如图 9,储存环束损探测器测 点(图 2)附近的束损处理器内部的嵌入式系统的 Cortex-A8 处理器通过 UART 总线访问 CORTEX-M3 来操 控 BLM-XS 探测器获取数据,嵌入式 Linux 操作系统运行 EPICS 协议和 IOC 控制程序,通过以太网总线与加 速器控制网相连,控制网内任一点 OPI 可以直接访问,简化了系统构架,提高了系统的稳定性和效率。



图 8 Cortex-A8 电路框图



4.1 嵌入式 EPICS 系统

为了制作适用于 ARM Cortex-A8 处理器的嵌入式 EPICS 系统,需要在一台安装 CentOS 系统的 PC 上交 叉编译 Epics 源码,最后将编译成功后的可执行程序复制到 ARM Cortex-A8 处理器的 Linux 操作系统中。

4.2 IOC 程序

基于 StreamDevice 构建了 IOC 程序,此程序首先通过串口从 ARM Cortex-M3 处理器一次性读取 4 个探 测器的数据并存放到一个波形记录中,然后把此波形记录转换成 4 个 calc 记录,从而既减少了 IOC 程序访问 串口的频率,又使得上层 OPI 程序可以方便地访问到每个探测器的数据。

4.3 时钟同步机制

为了与储存环里的 NTP (Network Time Protocol) 服务器保持时间同步,需要移植 NTP 客户端程序到 ARM Cortex-A8 处理器的嵌入式 Linux 操作系统中,编写脚本定期运行"ntpdate *.*.*.*"命令以保证与 NTP 服务器的时间同步,其中"*.*.*.*"为 NTP 服务器的 IP 地址。

5 初步实验与应用

16 台新的束损处理器安装在储存环附近,靠近 Bergoz 束损传感器,如图 2 所示,中控室通过 EPICS 网络可以直接访问这些数据。选取第 8 台新安装的束流损失监测设备,对采集的数据进行分析,测量时束流损失越大,计数值越大。分析了合肥光源 decay 模式、injection 模式和 top-off 模式下流强和束流损失数值之间的关系。图 10(a)表明 decay 模式流强随着时间正常衰减,由图 10(b)可以看出,计数值从 600 左右下降到 150 左右,说明束流损失产生的辐射粒子数量在不断降低,与流强衰减曲线相符。图 11(a)表示流强从 0 mA 迅速增加到 360 mA,图 11(b)表示在束团注入的过程中,束流损失明显,计数值在 10 k 范围波动。



在合肥光源恒流运行(top-off)模式时进行了实验测试,结果如图12所示。左边纵坐标代表的是流强,右

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



Fig.11 The operation condition of injection mode

图 11 Injection 模式下运行情况

边纵坐标代表的是束流损失值。恒流运行模式和 injection 模式的区别在于:将束流一次性注入到 360 mA 后,随着束流损失,每当束流下降到 355 mA,就注 入 5 mA 束流,使得束流保持在 360 mA。由图 12 可 见,束流损失量和一次性注入相比下降明显。

6 结 论

本文新设计了一套带有自检功能的束流损失监测 系统,同时将该系统整合到合肥光源的 EPICS 系统 中。基于嵌入式 EPICS 的合肥光源储存环束流损失 监测系统完成后运行情况良好,加速器控制网能够通 过网络直接访问分布在储存环各处的束损处理器,同 时通过自检电路实现在线传感器故障排查,提高了系统



图 12 Top-off 模式下运行情况

时通过自检电路实现在线传感器故障排查,提高了系统的稳定性和可维护性。

参考文献:

- [1] 孙玉聪,蓝杰软,张剑锋,等. 合肥光源托歇克效应损失电子的探测[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 771-773.(Sun Yucong, Lan Jieqin, Zhang Jianfeng, et al. Detection of electron loss due to Touschek effect in Hefei Light Source. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 771-773)
- [2] 王远远. HLS []新注入系统分析与调试[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015. (Wang Yuanyuan. Analysis and commissioning of HLS [] new injection system. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015)
- [3] Shang Fenglei, Wang Yuanyuan, Shang Lei, et al. Commissioning and research of HLS injection system under top-off mode[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49: 648-651.
- [4] 孙玉聪. 电子储存环束流损失测量系统的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011. (Sun Yucong. The study on measurement system of loss beam on electron storage ring. Anhui: University of Science and Technology of China, 2011)
- [5] 刘乃泉,林郁正,刘志国,等.加速器理论[M].北京:清华大学出版社,2004:153-168. (Liu Naiquan, Lin Yuzheng, Liu Zhiguo, et al. Accelerator theory. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 153-168)
- [6] Jiang Bocheng, Zhao Zhentang, Liu Guimin. Study of Touschek lifetime in SSRF storage ring[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006(7): 693-698.
- [7] 赵晓岩,曹建社,汪林,等. BEPC [] 束流损失探测系统及其初步应用 [J]. 中国物理 C, 2008: 80-82. (Zhao Xiaoyan, Cao Jianshe, Wang Lin, et al. Beam loss monitoring system of BEPC [] and its first application. Chinese Physics C, 2008: 80-82)
- [8] 侯磊.上海光源储存环束流损失监测系统研制与应用[D].北京:清华大学,2009. (Hou Lei. Design and application of the beam loss monitoring system for the storage ring of SSRF. Beijing: Tsinghua University, 2009)
- [9] Yoon P S, Siddons D P. Photodiode-based X-ray beam-position monitor with high spatial-resolution for the NSLS-II beamlines[C]//DIPAC 9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. 2009: 315-317.
- [10] 陈裕凯. 合肥光源(HLS II)储存环束流损失监测系统的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015. (Cheng Yukai. Data acquisition system for beam loss monitoring of HLS storage ring at NSRL. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015)
- [11] 刘功发,李京祎,李为民,等. 合肥光源储存环控制系统[J]. 核技术, 2004(7): 501-505. (Liu Gongfa, Li Jingyi, Li Weiming, et al. HLS storage ring control system. Nuclear Techniques, 2004(7): 501-505)