

HLS II 新的注入器束流强度测量系统^{*}

程超才, 孙葆根, 卢平, 杨永良, 周泽然, 吴芳芳, 唐凯, 罗箐, 李皓

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘要: 合肥光源升级改造任务已基本完成, 注入器实现满能量注入。为适应新的注入器束流强度的测量需求, 设计了新的注入器束流强度测量系统, 该系统利用安装在真空腔上的 3 个快速束流变压器(FCT)和 2 个积分束流变压器(IFT), 能够实现束流流强和电荷量的非拦截实时测量。为了准确获取束流参数, 首先对束流变压器(CT)传输电缆进行了在线和离线标定; 由于 IFT 输出信号信号幅度较小, 噪声大, 设计了低噪声前置放大器以改善信噪比; 考虑低频谐波噪声和 Kicker 噪声的干扰, 软件中通过适当的算法对噪声进行了处理; 最后给出了部分在线实验结果。实验结果表明, 束流传输效率约为 27.4%, 注入效率约为 44.3%。

关键词: 注入器; 束流变压器; 宏脉冲宽度; 峰值流强; 束团电荷量

中图分类号: TL594; TL506

文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201527.045106

合肥光源是专用的二代同步辐射光源, 储存环电子的能量为 800 MeV, 回旋周期约为 220 ns。HLS II 重大维修改造项目开始于 2010 年 1 月, 改造工程的一个重要目的就是实现注入器满能量注入, 并为以后实现准恒流注入做准备^[1]。新注入器由长度约为 74.5 m 的加速段和长度约为 55 m 的输运线构成, 3 个快速束流变压器(FCT)和 2 个积分束流变压器(IFT)沿注入器分布, FCT1 安装在预聚束腔和聚束器之间, 距离电子枪约 0.66 m, FCT2 安装在直线段末端, 距离偏转磁铁约 0.68 m, FCT3 安装在输运线中部; IFT1 安装在聚束器与 1 号加速管之间, 距离电子枪约 3.14 m, IFT2 安装在输运线末端, 距离注入点约 2.16 m。

在新的时序系统的控制下, 为改善注入效率, 要求实现 ns 量级束团对束团的注入模式^[2-3]。合肥光源原有注入器中用于测量 μ s 量级脉冲宽度的测量系统^[4]无法满足新的测量任务的需求, 因此需要研制一套新的注入器束流强度测量系统。

1 系统框图

图 1 为新注入器测量系统框图。3 个 FCT 均为带法兰的 FCT, 型号为 FCT-CF4.5"-34.9-UHV-10 : 1, 灵敏度为 2.5 V/A, 输出信号经过固定在真空腔外侧和束测设备机箱上的两次转接以及长度分别为 85.0, 73.2, 84.1 m 的 LMR-400 同轴电缆后, 接入四通道模拟输入高速数字化仪 NI PXIe-5162。2 个 IFT 的型号为 IFT-055-070-10 : 1, 灵敏度为 $2.5 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{-1}$, 通过自制的屏蔽结构安装到真空室, 输出信号首先由靠近真空腔的

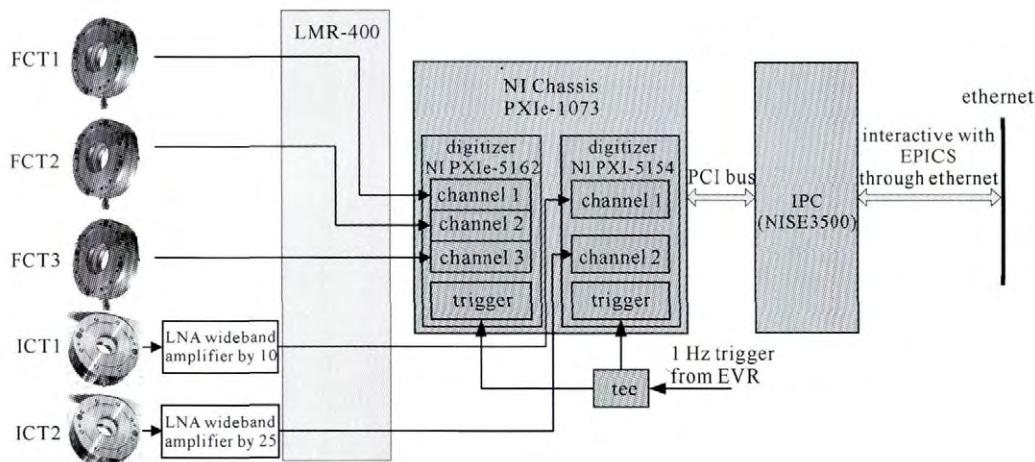


Fig. 1 Schematic diagram of measurement system for new injector

图 1 新注入器测量系统框图

* 收稿日期: 2014-10-29; 修订日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(11175173, 11105141, 11375178)

作者简介: 程超才(1989—), 男, 博士研究生, 核科学技术专业; ccc1989@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 孙葆根(1961—), 男, 研究员, 博导, 从事束流诊断与测量研究; bgsun@ustc.edu.cn。

低噪声宽带前置放大器进行放大,其中 ICT1 输出信号放大 10 倍,ICT2 输出信号放大 25 倍,然后同样经过两次转接以及长度分别为 86.5 m 和 118.0 m 的 LMR-400 同轴电缆后送入双通道模拟输入高速数字化仪 NI PXI-5154^[5-6]。

来自事件接受设备(EVR)的 1 Hz 触发信号接入三通后经等长线送入两块数字化仪,以保证两块板卡均在同一时基下进行触发采样。两块板卡均插入 NI 机箱 PXIe-1073,通过 PCI 总线完成与工控机的交互式通信。服务器端程序基于 Windows 下的 LabView,负责完成数据采集与分析,束团电参数计算以及基于网络与 EPICS 进行通信,客户机端程序基于 Windows 下的 Control System Studio/Best OPI, Yet(CSS/BOY)。

2 系统设计及指标测试

高速脉冲信号经过有损长电缆后将发生波形失真,导致幅度衰减、脉宽展宽,为了准确获取电子束流参数,需要对电缆进行标定;ICT 将输入 ns 量级的束流信号展宽至几十 ns 量级,而电荷量保持不变,因此输出信号大幅度降低,需要低噪声前置放大器对 ICT 输出信号进行放大以提高信噪比;针对低频谐波噪声的干扰,软件中对 ICT 输出信号进行了去噪处理^[7-8]。

2.1 FCT 电缆的离线标定

采用输出脉宽为 1.0~3.6 ns 的类似束流信号进行模拟,分别测量原始信号和电缆末端信号的幅度和脉宽,得到单个离散点构成的标定系数。为保证数据的连续性,对离散数据进行拟合。对幅度衰减系数 A_2 采用二次项拟合,脉宽展宽系数 P_2 采用指数拟合,得到 FCT2 电缆以标定用信号的脉宽 p 为变量的拟合方程

$$A_2 = -0.01338p^2 + 0.1527p + 0.3943, \quad P_2 = 1.196e^{-1.965p} + 1.021, \quad p \in (1.0, 3.6) \text{ ns} \quad (1)$$

图 2 显示了 FCT2 电缆的离线标定结果。图 2(a)为幅度衰减系数,图 2(b)为脉宽展宽系数,当脉冲宽度为 1.0~3.6 ns 时,幅度衰减变化范围为 0.52~0.78,脉宽展宽变化范围为 1.20~1.02。

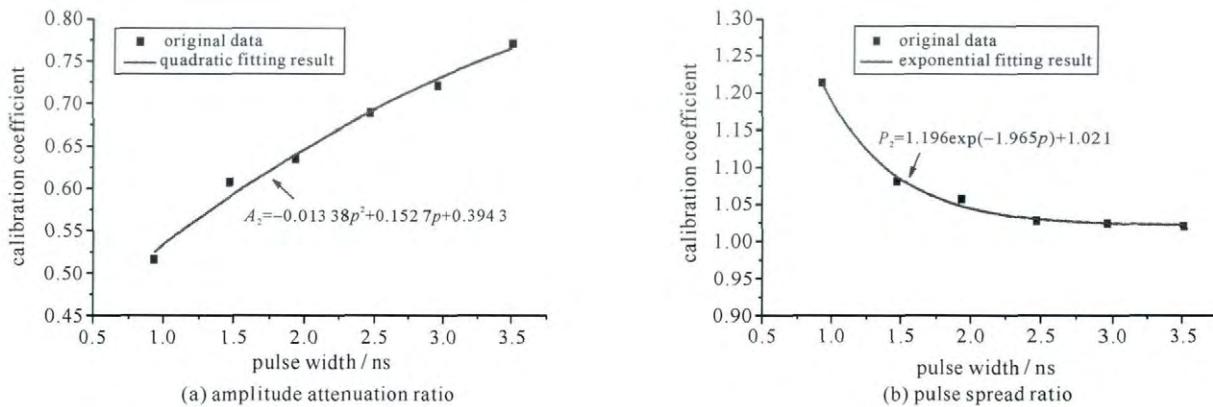


Fig. 2 Off-line calibration curve for FCT2 coaxial cable

图 2 FCT2 电缆离线标定结果

按照同样方法对 FCT1 和 FCT3 电缆进行标定。可以得到 FCT1 电缆的标定系数为

$$A_1 = -0.0344p^2 + 0.245p + 0.2704, \quad P_1 = 4.521e^{-3.042p} + 1.028, \quad p \in (1.0, 3.6) \text{ ns} \quad (2)$$

FCT3 电缆的标定系数为

$$A_3 = -0.029p^2 + 0.2235p + 0.2981, \quad P_3 = 1.97e^{-2.338p} + 1.036, \quad p \in (1.0, 3.6) \text{ ns} \quad (3)$$

式中: A_1 和 A_3 分别为 FCT1 电缆和 FCT3 电缆的幅度衰减系数; P_1 和 P_3 分别为 FCT1 电缆和 FCT3 电缆的脉宽展宽系数。根据实测结果,对类高斯脉冲信号,幅度衰减系数和脉宽展宽系数之间没有严格的联系,它们均是脉宽和电缆长度的函数。

程序中根据实测脉冲宽度查询方程(1),方程(2)和方程(3)表示的幅度衰减系数和脉宽展宽系数,通过除法运算可以恢复信号的幅度和脉宽,再扣除 FCT 和高速数字化仪的频响引起的幅度衰减和脉冲展宽,可得到真实束流的峰值流强和脉冲宽度。

2.2 ICT 电缆的在线标定

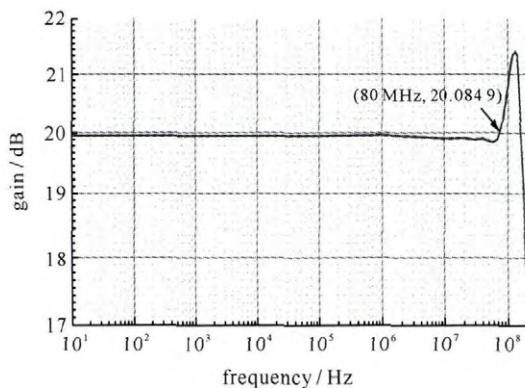
为了获取更多的高频分量信息,标定时选用频率为 3 MHz,脉宽为 20 ns 的脉冲信号,采样率为 4 GHz,采样持续三个完整周期。通过计算电缆两端时域信号的快速傅里叶变换(FFT)得到电缆的实测频率响应。注入

器运行期间,根据离线标定得到的电缆频率响应和实时获取的 ICT 输出信号的波形,利用 FFT/IFFT 算法可以得到消除畸变后 ICT 的实际波形^[9-10]。但通常的 FFT/IFFT 算法消耗太多的 CPU 资源,考虑到电子枪运行时,ICT 输出信号波形一般不变,可以利用多次测量的平均结果在线标定 ICT 电缆的衰减系数。ICT1 电缆的在线标定结果如图 3 所示,曲线分别表示实测信号和恢复得到的 ICT 实际输出信号,对波形进行处理,得到标定系数 $K_{ICT1} = 0.921$ 。按照同样方法对 ICT2 电缆进行标定,得到标定系数 $K_{ICT2} = 0.910$ 。

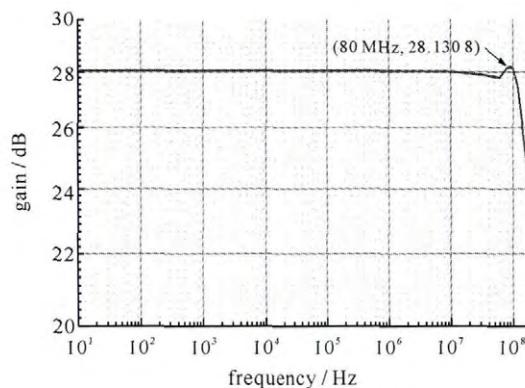
2.3 低噪声宽带放大器的设计

合肥光源注入器中,当电子枪输出电荷量从 0.5 nC 增大到 2.2 nC,对应 ICT 输出信号幅度从 39 mV 增大到 171 mV。为提高信噪比,需要对 ICT 输出信号进行放大。考虑到电子束传输效率,拟将 ICT1 输出信号放大 10 倍,ICT2 输出信号放大 25 倍。根据实测 ICT 输出波形,信号上升时间约为 15 ns,利用上升时间与带宽之间的近似关系,所设计放大器的 3 dB 带宽 $F_{3dB} = 23.3$ MHz。获取更多频率分量将有利于更精确的恢复波形和计算电荷量,因此放大器的带宽需高于 80 MHz,并且通带内增益波动尽可能小。

ICT 前置放大器增益特性曲线如图 4 所示。图 4(a)为当输入信号幅度为 80 mV 时,ICT1 前置放大器的频率响应曲线,中频区增益约为 19.95 dB,即放大倍数约为 9.943,在 80 MHz 以内的增益平坦度好于 0.15 dB;图 4(b)为当输入信号幅度为 50 mV 时,ICT2 前置放大器的频率响应曲线,中频区增益为 28.06 dB,即放大倍数约为 25.3,在 80 MHz 以内的增益平坦度好于 0.35 dB;两种情况下的 3 dB 带宽均超过 80 MHz。



(a) ICT1 pre-amplifier frequency response



(b) ICT2 pre-amplifier frequency response

Fig. 4 Frequency response curve of pre-amplifiers for ICT1 and ICT2

图 4 ICT 前置放大器频率响应曲线

2.4 ICT 去噪处理

程序中提取束团电荷量需要对电压波形进行积分,微波老炼过程中发现,积分过程很容易受到 50 Hz 工频及高达几十 kHz 的低频谐波分量的干扰,以 1 GS/s 的采样率进行采样,有效信号长度约为 100 点,持续时间 0.1 μs,在有效信号持续的时间内,这种低频噪声幅度基本不变。因此,程序中利用有效信号区间左右两侧的 100 点的数据计算得到本次测量的本底噪声,在计算电荷量时扣除此噪声可以得到剔除低频谐波干扰时的实际束团电荷量。没有束流注入时,去除低频谐波噪声前后 ICT 测量结果如图 5 所示,剔除噪声前,谐波引起的噪声抖动很大;剔除噪声后,谐波引起的噪声明显降低,噪声均小于 0.025 nC;软件去噪处理使低频谐波噪声的标准

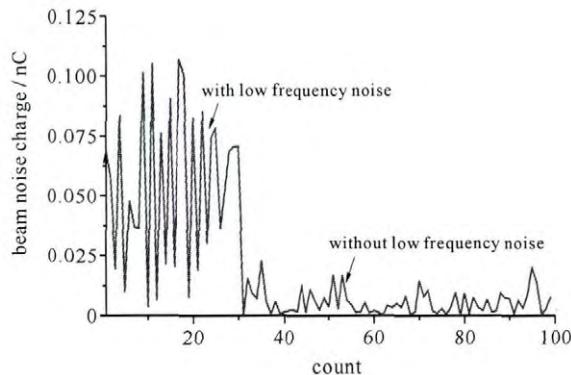


Fig. 5 Beam charge with and without deducting low frequency noise

图 5 剔除低频谐波噪声前后电荷量变化

差由 0.032 4 nC 减小为 0.005 2 nC。

2.5 系统分辨率

分辨率是衡量一个系统的重要指标。图 6 给出了束流强度测量系统分辨率测试结果(包含电子束抖动在内)。图 6(a)中束流幅度平均值为 0.563 A, 标准差为 0.010 A, 相对误差小于 1.78%; 图 6(b)中束团电荷量为 1.102 nC, 标准差为 0.014 5, 相对误差小于 1.32%, 所以测量系统的分辨率好于 2%。

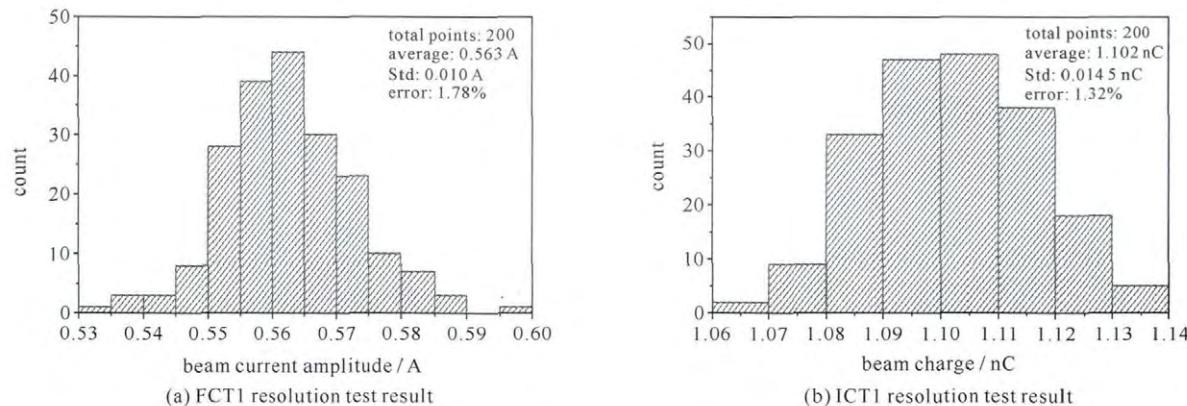


Fig. 6 Resolution test result of beam intensity measurement

图 6 束流强度测量系统分辨率测试结果

3 在线实验结果

3.1 实时测量结果

束流变压器是电子束形状的最直观反映, 为方便调束人员判断束流品质是否符合要求, 束流是否到达指定位置等, 需要实时监测束流变压器的输出波形。注入器束流强度测量系统在 1 Hz 的触发时序控制下, 每隔 1 s 更新一次数据。FCT 和 ICT 的实时测量结果如图 7 所示。图 7(a)表示 3 个 FCT 处的电子束波形, 本次测量的电子束峰值流强分别为 0.693, 0.313, 0.171 A, 脉冲宽度分别为 1.54, 1.63, 1.68 ns, 脉宽略有增加是因为三个 FCT 同时工作时单个通道的实时采样率仅为 1.25 GS/s, 单次测量结果有一定的抖动, 通过取一段历史数据进行平均或者采用单通道 5 GS/s 的实时采样率进行采样以减小抖动, 脉宽基本不变; 图 7(b)表示 2 个 ICT 处的输出电压波形, 本次测量的电荷量分别为 0.695 nC 和 0.330 nC, ICT2 输出信号是扣除 Kicker 噪声以后得到的结果, 但仍然存在一定的抖动。

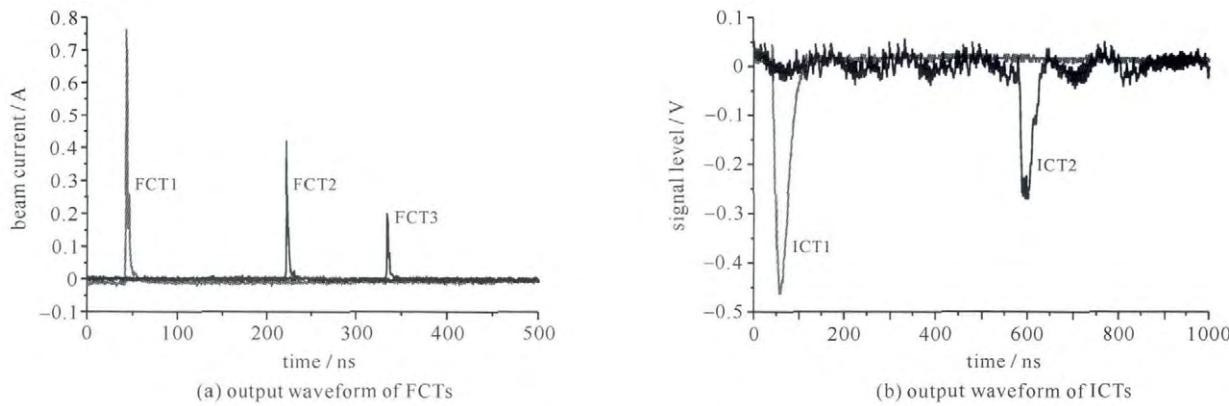


Fig. 7 Real-time measurement result of FCT and ICT

图 7 FCT 和 ICT 实时测量结果

3.2 束流传输效率的计算

电子束从出电子枪, 到达输运线末端, 其宏脉冲形状基本不变, 束流传输效率可以通过同时测量并计算 3 个 FCT 处束流峰值流强和 2 个 ICT 处束流电荷量得到。图 8(a)表示 3 个 FCT 处束流幅度值的历史数据, 图 8(b)表示 2 个 ICT 处束流电荷量的历史数据, 为减小随机误差, 对 360 s 内的数据取平均得到: FCT1 处电子束幅度约为 0.664 A, FCT2 处电子束幅度约为 0.307 A, FCT3 处电子束幅度约为 0.182 A, ICT1 处经过聚相

以后电子束的电荷量约为 0.685 nC, ICT2 处电子束的电荷量约为 0.342 nC。所以, FCT1 到 FCT2 束流损失约为 46.2%, FCT2 到 FCT3 束流的损失约为 59.3%, 即从 FCT1 到 FCT3 的束流传输效率约为 27.4%, 从 ICT1 到 ICT2 的束流传输效率约为 50.0%。由于电子束在输运线上损失很少, 利用 ICT 计算得到的传输效率却明显高于 FCT 的计算结果, 是因为电子束经过聚束器时由于相位压缩导致束流存在较大损失, 并且由最靠近电子枪和输运线中部的两个 FCT 测得的注入效率能够比较真实地反映束流在整个注入器的丢失情况。

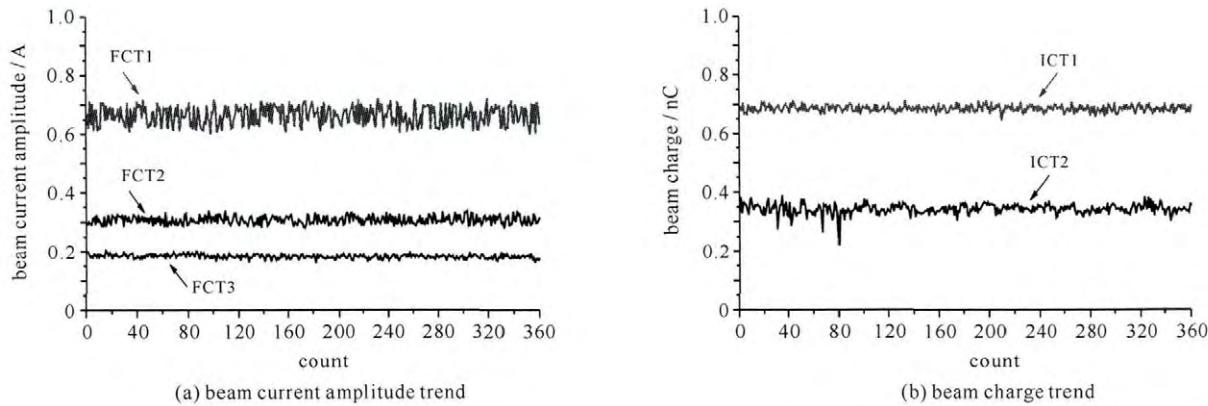


Fig. 8 History data of beam current amplitude for 3 FCTs and beam charge for 2 ICTs

图 8 3 个 FCT 处束流峰值流强和 2 个 ICT 处束流电荷量的历史数据

3.3 注入效率的计算

束流注入过程中, 可利用靠近注入点的 ICT2 测得的电荷量以及 DCCT 测得的储存环束流流强计算注入效率, 注入效率 R 的计算公式为

$$R = \frac{\Delta IT_c}{Q} \quad (4)$$

式中: Q 表示 ICT2 测得的电荷量; ΔI 表示储存环单位时间内积累的束流流强; T_c 表示储存环中电子的回旋周期。

注入效率的计算结果如图 9 所示。图 9(a)为当储存环束流流强从 2.9 mA 增大到 92.3 mA 时, ICT2 测得的注入点处电荷量的历史曲线;图 9(b)为按照公式(4)换算得到的注入效率的统计结果, 可知, 此过程注入效率约为 44.3%。

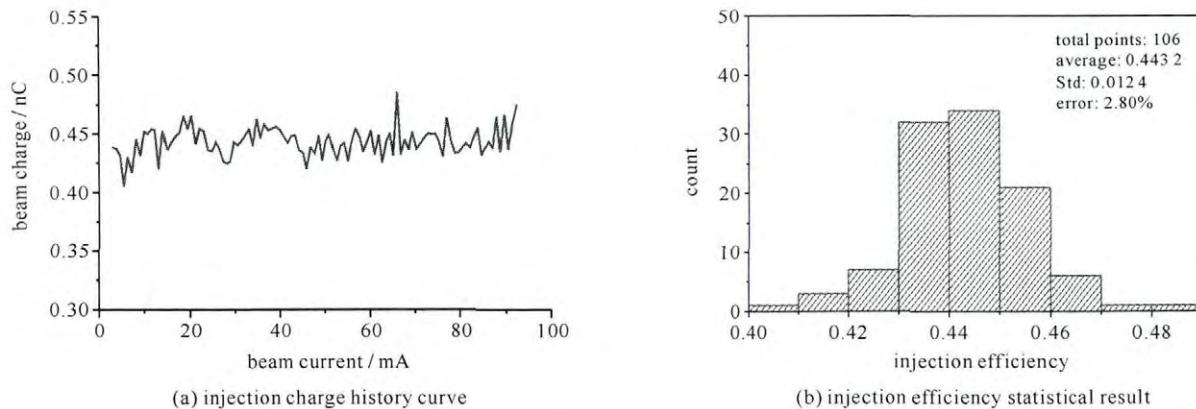


Fig. 9 Calculating result of injection efficiency

图 9 注入效率的计算结果

4 结论

本文为升级后的 HLS II 注入器设计了一套新的注入器束流强度测量系统。对系统进行在线测试, 得到 FCT1 包含束流抖动在内的分辨率好于 1.78%, ICT1 包含束流抖动在内的分辨率好于 1.32%; 从聚束器前端到输运线中部的束流传输效率约为 27.4%, 注入效率约为 44.3%。注入效率的相对偏差约为 2.8%, 其偏差偏大是因为注入 Kicker 和储存环中电子束流的影响, 靠近注入点的 ICT2 测量结果受到一定的干扰, 导致测量

结果抖动较大,后续可以通过更有效的屏蔽或者更好的算法进行改进。

参考文献:

- [1] Wang Lin, Li Weimin, Feng Guangyao, et al. The upgrade project of Hefei Light Source (HLS)[C]//Proc of IPAC. 2010:2588-2590.
- [2] Wang Lin, Li Weimin, Xu Hongliang, et al. An upgrade proposal of injection bump system for HLS[C]//IEEE Particle Accelerator Conference. 2007;1067-1069.
- [3] Feng Guangyao, Zhang Shanhai, Wang Lin, et al. Conceptual design of injection system for Hefei Light Source (HLS) upgrade project[C]// Proc of IPAC 2010. 2010:1785-1787.
- [4] 王贵诚,李辉,田宝瑛,等.合肥光源200 MeV直线加速器束流强测量系统的改进[J].核技术,2000,23(7):491-495.(Wang Guicheng, Li Hui, Tian Baoying, et al. Improvement of beam current measurement system on Hefei Light Source LINAC. *Nuclear Techniques*, 2000, **23** (7):491-495)
- [5] Denard J C. Beam current monitors[R]. France: CERN accelerator school on beam diagnostics, 2008.
- [6] 王晓辉.合肥光源高亮度注入器束流测量系统的研制[D].合肥:中国科学技术大学,2011;64-73.(Wang Xiaohui. Design of beam diagnostics system for high-brightness injector in HLS. Hefei: University of Science and Technology of China. 2011;64-73)
- [7] 薛磊,杜应超,胡超,等.基于积分束流变压器的加速器束团电荷量测量系统[J].强激光与粒子束,2007,19(7):1207-1210.(Xue Lei, Du Yingchao, Hu Chao, et al. Bunch charge monitoring system based on integrating current transformer. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7):1207-1210)
- [8] Cheng Chaocai, Yang Yongliang, Sun Baogen, et al. Design of beam intensity measurement system in injector for HLS II [C]//Proc of IPAC. 2014;3581-3583.
- [9] 李宪优,田耕,于丽娟,等.强光一号加速器测量电缆补偿技术[J].强激光与粒子束,2009,21(3):473-476.(Li Xianyou, Tian Geng, Yu Li-juan, et al. Bandwidth compensation technology of QG-I accelerator's cables. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(3):473-476)
- [10] 付佳斌,卿燕玲,卫兵,等.ns脉冲测量中的波形重建[J].强激光与粒子束,2010,22(11):2759-2762.(Fu Jiabin, Qing Yanling, Wei Bing, et al. Waveform reconstruction of nanosecond pulse measurement. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11):2759-2762)

New beam intensity measurement system for HLS II injector

Cheng Chaocai, Sun Baogen, Lu Ping, Yang Yongliang, Zhou Zeran,
Wu Fangfang, Tang Kai, Luo Qing, Li Hao

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

Abstract: The upgrade project of HLS II is almost finished and the new injector has achieved the goal of full energy injection. To satisfy the need of measuring the new injector beam intensity, a beam intensity measurement (BIM) system is designed, which has 3 fast current transformers (FCT) and 2 integrating current transformers (ICT) installed in the vacuum chamber to non-destructively and real-timely measure beam current and beam charge. To acquire beam parameters accurately, the article elaborates the on-line and off-line calibration method of long transmission coaxial cable. Then two low noise pre-amplifiers used to amplify the output signal of ICT to improve SNR are designed and appropriate algorithms of reducing the low frequency harmonic noise and kicker noise in software are proposed. In the end, some on-line experiment results are presented, which show that beam transmission efficiency is about 27.4% and injection efficiency is approximately 44.3%.

Key words: injector; current transformer; macro pulse width; beam peak current; beam charge

PACS: 41.85.Qg; 42.60.Jf; 07.05.Hd