



·粒子束及加速器技术·

用于重离子治癌回旋引出的实时流强测量系统*

游尧尧^{1,2}, 李 敏^{1,2}, 毛瑞士^{1,2}, 李维龙¹, 冯永春¹, 赵铁成¹, 杨耀雄¹, 王文韬¹

(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: 为满足重离子治癌加速器装置(HIMM)回旋加速器引出段束流流强的测量需求, 设计了新的束流流强测量系统, 该系统利用积分电流变换器(ICT)及锁相放大器等配套电子学, 能够实现束流流强的非拦截实时测量。文中首先分析了中能束线(MEBT)束流流强的测量需求, 并对设计方案进行了实验室系统分析和在线束流流强测量。实验结果表明, 锁相放大器的幅度和相位响应一致性满足测量需求。由于 ICT 对束流流强的测量是相对测量, 先使用法拉第筒对 ICT 进行在线标定; 标定前先对法拉第筒(FC)(20 μ A 档位)和 ICT 系统的流强分辨在线测量, 分别为 6.45 nA 和 5.163 nA。由于束流抖动的影响, 测量的束流的稳定性约 90 nA, 其对应的相对测量误差约 8%, ICT 系统响应时间小于 1 ms。测量结果表明, 该系统满足物理测量需求。回旋加速器高频系统参数变化引起 ICT 标定系数变化的工作将在进一步工作中展开。

关键词: 重离子治癌加速器; 束流流强测量; 积分束流变压器; 锁相放大器; 响应时间

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220064

Real-time beam intensity measurement system for extraction section of cyclotron in Heavy Ion Medical Machine

You Yaoyao^{1,2}, Li Min^{1,2}, Mao Ruishi^{1,2}, Li Weilong¹, Feng Yongchun¹,
Zhao Tiecheng¹, Yang Yaoxiong¹, Wang Wentao¹

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

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

Abstract: To meet the beam intensity measurement requirements at the extraction section of the cyclotron in Heavy Ion Medical Machine (HIMM), the integral current transformer (ICT) and lock-in amplifier scheme was adopted to implement non-destructive and real-time beam intensity measurement on the medium energy beam transport line (MEBT). ICT acquires the relative beam intensity which can't be monitored directly, as a result, the Faraday cup which is a kind of destructive detector was used to achieve calibration of ICT with beam. In this paper, the requirements and design scheme of beam intensity measurement at MEBT are firstly analyzed, and based on the design scheme, tests with this beam intensity measurement system are carried out in the laboratory and with beam. According to the test results, the beam intensity stability is about 90 nA, while the corresponding relative error is about 8%. Furthermore, the response time of ICT and Faraday cup system is less than 1 ms and 100 ms respectively, which meet the physical measurement requirements. Further study on the relationship between frequency-variation of cyclotron radio-frequency system and beam current measured by ICT will be carried on in the next step.

Key words: Heavy Ion Medical Machine, beam intensity measurement, integral current transformer, lock-in amplifier, response time

医用重离子加速器(HIMM)由离子源、低能束线、回旋加速器、中能束线、同步加速器、高能束线及治癌终端组成^[1-3]。离子源产生的 C^{5+} 离子束, 通过回旋加速器加速到 7 MeV/u(流强约 10 μ A), 注入到同步加速器, 同时被剥离成 C^{6+} 离子束, 经同步加速器加速, 引出到治疗终端, 终端治癌用束流流强范围为 120~400 MeV/u。

束流变压器^[4-5]被广泛用于加速器束流流强测量。在 HIMM 加速器上, 重离子从回旋加速器引出, 经中能束线

* 收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11905271)

联系方式: 游尧尧, youy2016@impcas.ac.cn。

通信作者: 李 敏, limin@impcas.ac.cn。

(MEBT), 注入到同步加速器之前, 需要对注入的束流流强在线实时精确测量。要求探测器流强测量精度小于 $1 \mu\text{A}$, 测量范围在 $10 \sim 100 \mu\text{A}$, 采样频率 10 Hz 。为实现束流实时测量、保证束流的运行状态, 不能使用法拉第筒 (FC) 探测器、电离室、二次电子探测器等拦截式、半拦截式探测器。直流流强变压器 (DCCT), 测量范围一般在几 μA 到几十 A , 多用于连续束的束流流强。HIMM 回旋引出束流使用普通的电流变换器来测量会给电子学带来挑战。HIMM MEBT 使用 Bergoz 生产的积分电流变换器 (ICT) 实现此处束流流强的测量功能^[6]。

1 ICT 电子学及数据获取

ICT 作为一款通用的非拦截式流强测量设备已在多家实验室使用^[7-11], 其作为一款被动式电流变换器可以以很高的精度测量极快的短脉冲, 输出信号正比于脉冲束流的总电荷量。根据选用的型号不同, ICT 的积分时间常数可以在 $1 \sim 20 \text{ ns}$ 之间选择。表 1 是 ICT 的基本测量参数。

表 1 ICT 参数
Table 1 ICT parameters

measuring range/ μA	frequency range/MHz	output up time/ns	noise/ μA	nonlinearity/%
0.5~3000	10~350	< 70	0.1	2

图 1 是 ICT 原理结构示意图, 它由一个被电容短路线圈耦合到一个快速读出线圈的磁路组成, 能够精确测量快脉冲束电荷量及 CW 束流强。在不同模式下、根据束流脉冲上升时间不同, ICT 对信号的积分时间在 $1 \sim 20 \text{ ns}$ 。使用脉冲模式, ICT 被用于 HIMM 回旋加速器引出到 MEBT 的束流流强测量。

Bergoz ICT 通常自带电子学采集单元 BCM-RF-E, 该电子学有两种工作模式。一种模式为采样和保持模式 (S&H), 该模式适用于单次束流的引出测试, 采样对数放大器的最大值并保持 100 ms 或直到下一束团到达, 该模式可用于最高 2 MHz 重复频率的脉冲信号。另外一种工作模式为 Track-Continuous 模式 (T-C), 此模式适用于 CW 束流或长宏脉冲平均电流测量, 该模式下可以测量上升时间 ($10\% \sim 90\%$) 大于 35 ns 的宏脉冲^[5], 但是在信噪比较差的时候, 测量结果不理想。除此之外, 还可以采用简单直接的示波器方案实现 ICT 的数据采集, 但该系统不适合连续监测, 因为射频噪声总是叠加在示波器显示的束流信号上; 尤其是在弱束流的情况下, 信噪比较差, 很难直接实现束流信号与本底噪声的区别^[12]。

因此, 项目选用锁相放大器加 NI 高速采集模块的方案。ICT 电子学及数据获取系统主要由前置放大器、锁相放大器、数据获取模块、工控机等组成, 其连接示意图如图 2 所示。从回旋加速器引出的束流流强在 MEBT 上相对较弱, 且 ICT 探针的数据采集系统放置在数据获取间, 距离现场有一定的距离, 因此为保证在适当距离范围内的传输, ICT 探头引出的信号首先接入到固定增益的低噪声前置放大器预先放大处理, 前置放大器的频率响应曲线如图 3 所示, 其工作频率范围在 $0.01 \sim 400 \text{ MHz}$, 带宽范围内的放大增益为 58 dB , 经该放大器后的信号输入到锁相放大器。MEBT 束流信号与回旋加速器高频频率是同频信

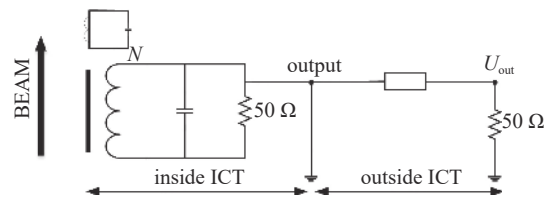


Fig. 1 Schematic diagram of ICT

图 1 ICT 原理结构示意图

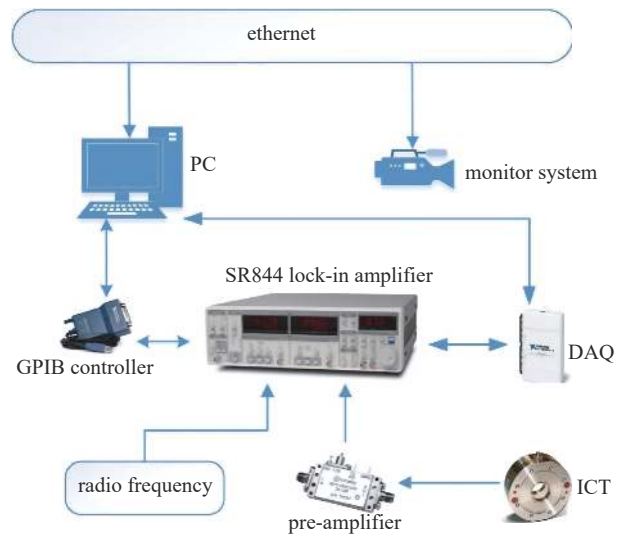


Fig. 2 Measurement architecture of ICT system

图 2 ICT 测量系统架构

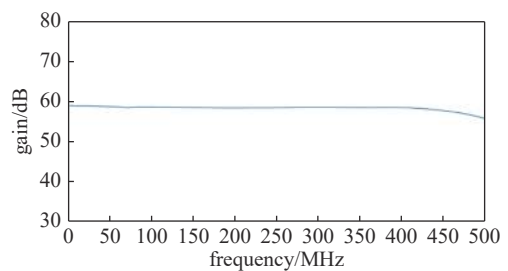


Fig. 3 Frequency response curve of the preamplifier

图 3 ICT 前置放大器的频率响应曲线

号,因此采用回旋加速器高频信号作为锁相放大器的输入参考信号。数据采集系统采集锁相放大器的输出信号,并将采集数据在工控机上进行数据处理和显示。

1.1 锁相放大器

锁相放大器是一种对交变信号进行相敏检波的放大器,它利用和被测信号有相同频率和相位关系的参考信号作为比较基准,只对被测信号本身和那些与参考信号同频(或者倍频)、同相的噪声分量有响应^[13-14]。因此,能大幅度抑制无用噪声,改善被检信号信噪比。此外,锁相放大器有很高的检测灵敏度,信号处理比较简单,是弱信号检测的一种有效方法。而MEBT上的束流信号非常微弱,且信噪比极低,有用的待检测信号被大量的噪声和干扰所淹没。图4显示了示波器采集的ICT原始信号及其频域信息,当束流信号较弱时,通过示波器采集ICT信号很难分辨出束流信息,对其原始数据进行傅里叶变换可以观察到束流信息。此情况下,常规的测量方法无法进行检测,而利用锁相放大器检测弱信号的优点则可以实现ICT在MEBT的束流测量。

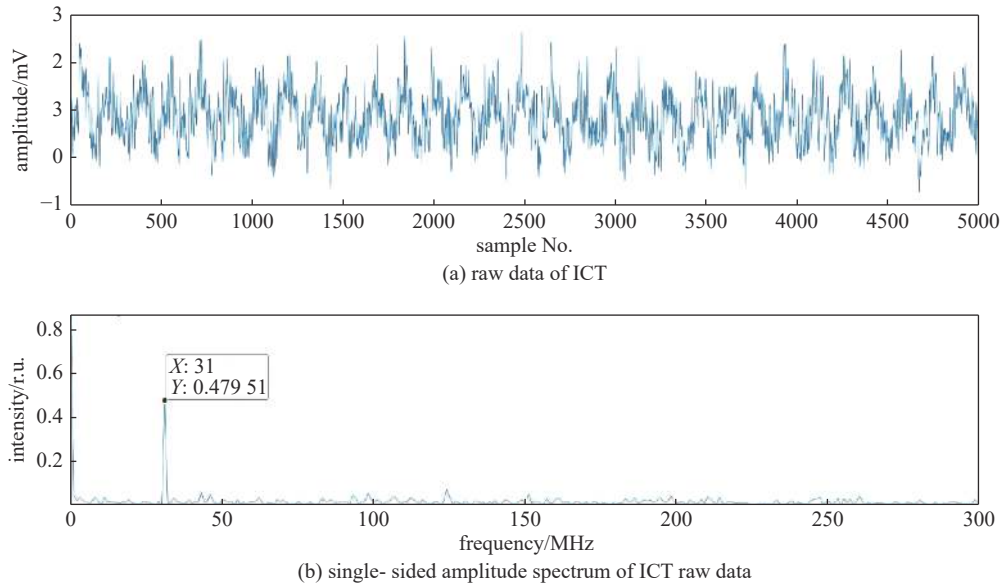


Fig. 4 Small ICT signal and its frequency information

图4 ICT弱信号及其频域信息

项目采用SR844锁相放大器^[15]和NI USB-6210 DAQ^[16]模块采集ICT信号,由于NI USB-6210 DAQ模块数据采集频率最高为250 kHz比GPIB(最高速率为7920 kbytes/s)高很多,具有更高的实时性。

1.2 锁相放大器分辨率的实验室测试

实验室利用泰克AFG 3252信号发生器仿真束流信号,输出不同幅度和相位的信号,用于测量锁相放大器的幅度和相位的分辨率,如图5所示。AFG 3252的一路信号输入到锁相放大器的“signal input”,另一路信号作为高频参考信号输入到锁相放大器的“ref input”,测量的幅值和相位信息通过NI USB 6210采集到上位机进行分析处理。幅度测量时,锁相放大器的输入信号为300 mV,增加该幅值的0.1%到1%输出信号。相位测量时,输入信号幅值不变,在 0° 到 0.1° 范围内按照 0.01° 步距, 0.1° 到 1° 范围到按照 0.1° 步距输出相位差异的信号。测量锁相放大器输出的幅度和相位的变化分别如图6所示,计算的幅值和相位分辨率小于0.1%和 0.1° 。

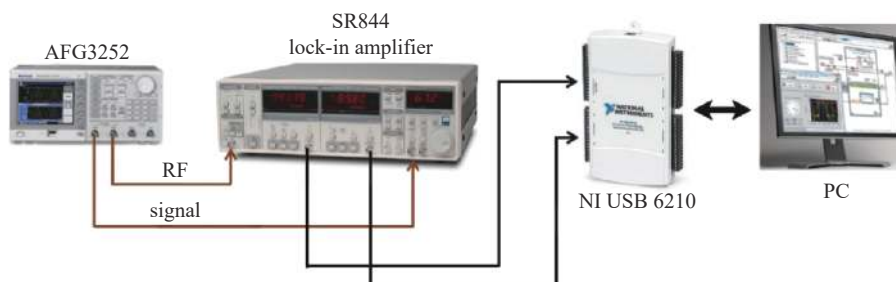


Fig. 5 Schematic diagram for measuring amplitude and phase resolution of SR844 in laboratory

图5 实验室测量SR844幅度和相位响应的示意图

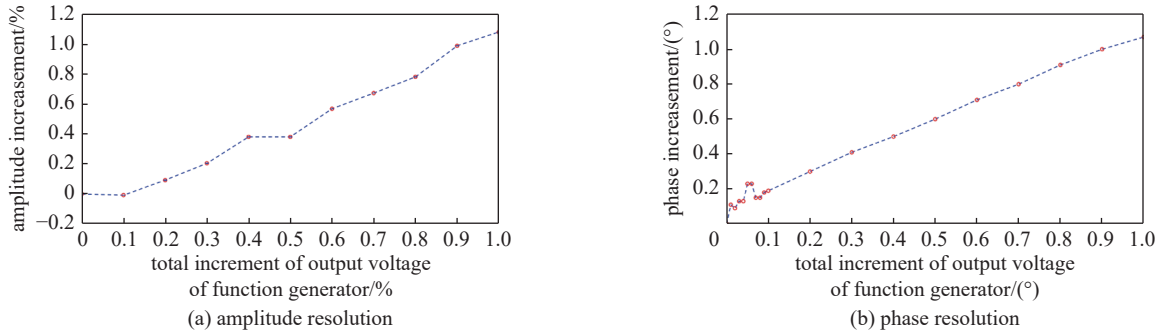


Fig. 6 Test results of amplitude and phase response of SR844

图6 实验室测量的SR844幅度和相位响应测试结果

2 ICT 在束测试

2.1 系统分辨率测试

利用在线测量的FC和ICT的本底噪声,分析两个系统的流强分辨率,如图7所示。其中FC快速采集系统和ICT采集系统电压分辨率分别为0.6291 mV和1.8498 mV,结合两种探测器在束标定的系数,两者对应的流强分辨率为6.45 nA和5.163 nA。

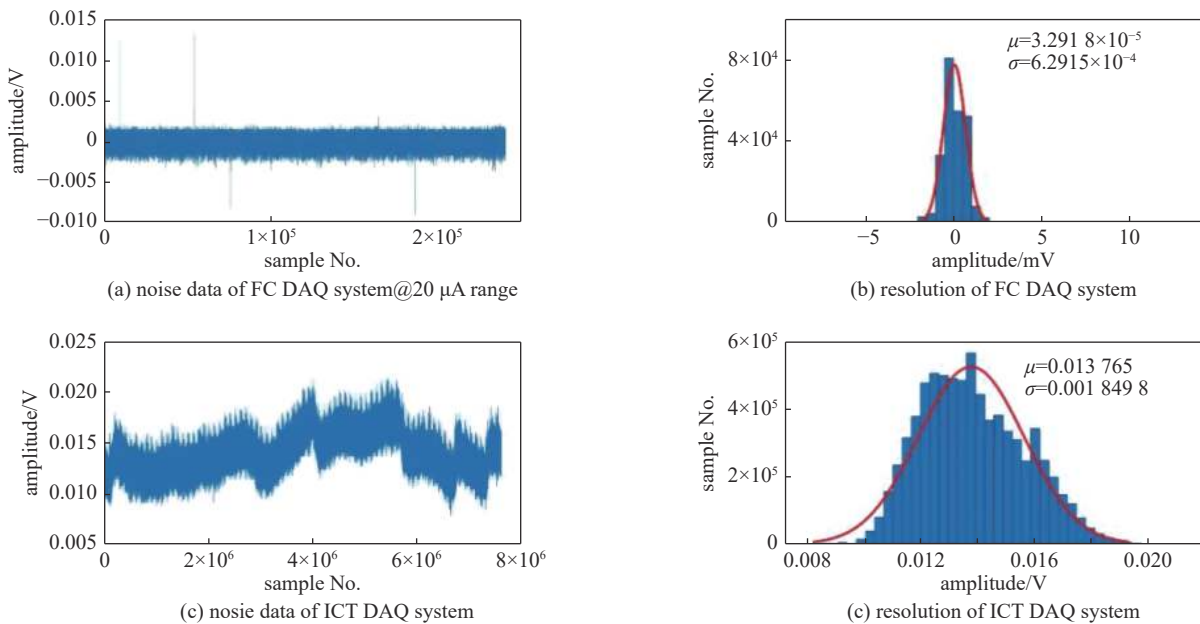


Fig. 7 Resolution results for the FC and ICT data acquisition systems

图7 FC和ICT数据采集系统的分辨率测试结果

2.2 ICT 的在线标定

ICT利用SR844测量束流流强时输出的为电压值,是相对测量,而FC可以实现绝对测量,因此需使用FC对ICT进行标定。HIMM FC的前端电子学选用的皮安表Keithley 6485^[17],其流强分辨率高,同时具有非常高的灵敏度。FC的数据采集可以实现基于串口的慢速和基于NI-cRIO的快速、实时数据采集。其中,基于NI-cRIO的快速采集系统用于采集6485皮安表后面板上输出的模拟信号,皮安表满量程读数对应于 ± 2 V输出,该模拟端口则输出缩放的反相 ± 2 V信号。利用快速采集系统采集的数据可以观察引出束流是否存在50 Hz噪声的干扰^[16],通常利用该类型的数据分析束流状态。经串口采集的慢速数据被皮安表电子学直接换算成流强值,且经过了滤波、平均等算法的处理,数据刷新率为Hz量级,HIMM监测信号通常采用慢速串口数据,用于监测回旋引出束流流强值。综上所述,现场使用慢速采集流强数据在线标定FC和ICT测量的电压数据。

HIMM正常运行时,回旋引出束流一般为几 μ A,因此皮安表的量程设置在20 μ A档位。MEBT上安装的FC和ICT的相对位置如图8所示,其中ICT在MEBT上的第二个FC的前端,且距离较近为258.764 mm。标定过程中,通过改变回旋加速器引出束流流强,获取并存储FC和ICT数据采集系统测量值,同时记录皮安表的慢速流

强值。随着输入束流流强信号的变化, ICT 的测量结果如图 9(a)所示, 拟合 FC 慢速流强值与 ICT 采集系统数据, 其拟合 R^2 值为 0.96613。值得注意的是, 标定时高频参数的差异, 会导致标定的 ICT 系数不同, 如图 9(b)所示, 2022 年 1 月 20 日的 ICT 标定系数则与图 9(a)中的标定系数差异很大。其中 ICT 标定系数添加到其数据获取系统后, 可以实现回旋引出束流流强的非拦截实时测量。

2.3 ICT 在线测试

根据锁相放大器原理, 其输出信号的带宽直接取决于选通的低通滤波器。滤波时间常数与低通滤波器带宽的关系为

$$\Delta_{FLP} = 1/2\pi\tau \quad (1)$$

其中 Δ_{FLP} 是低通滤波器的带宽, τ 是仪器时间常数。而当时间常数为 $100 \mu\text{s}$ 时, 锁相放大器不使用低通滤波器。在束测试时, 调整回旋加速器束流引出时间占空比(1:4), 在连续工作模式下, 分别测量不同时间参数不同流强值束流的稳定性。

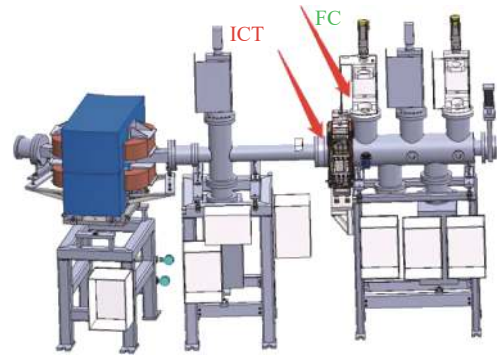
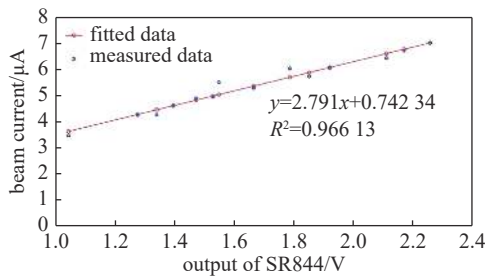
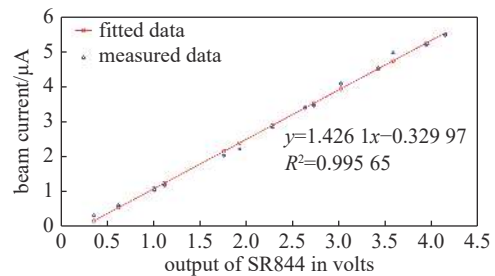


Fig. 8 Schematic diagram of the ICT and FC installation at MEBT

图 8 MEBT 上的 ICT 与 FC 安装示意图



(a) linear relationship between FC and ICT DAQ system, 2022-02-22



(b) linear relationship between FC and ICT, 2022-01-20

Fig. 9 Calibration results for ICT data acquisition systems

图 9 ICT 数据采集系统的在束标定结果

实验中分别测量了时间常数为 $100 \mu\text{s}$ 、 3ms 和 30ms 时不同流强下的束流稳定性情况, 提取对应上述 3 个时间常数下流强分别为 $4.21 \mu\text{A}$ 、 $4 \mu\text{A}$ 和 $3.5 \mu\text{A}$ 的连续 5 个周期的 ICT 和 FC 数据进行统计分析。其中统计的束流流强 $3.5 \mu\text{A}$, 时间常数为 30ms 时, ICT 和 FC 连续 5 个周期内的测量的束流如图 10 所示。测量的束流稳定性分析如表 2 所示。由表 3 可知, 通过增加锁相放大器时间常数可以提升 ICT 测量结果的稳定性, 但是会部分消除束流振荡信息; 而在不同的流强下, FC 不采用任何滤波算法, 测量的束流稳定性好于 90nA ; 时间常数为 $100 \mu\text{s}$ 时(无滤波), ICT 系统测量的束流稳定性约 100nA ; 两者类型的探测器测量的相对测量误差小于 8%。不同流强相同时间常数设置时, 束流稳定性分析结果如表 3 所示, 根据计算结果可知, 此情况下测量的束流稳定性基本一致。

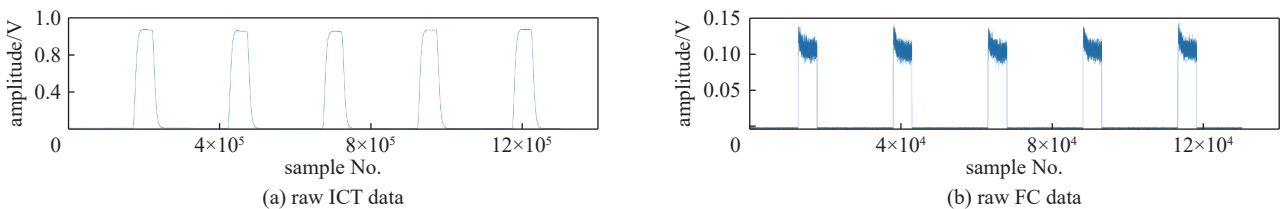


Fig. 10 Raw ICT and FC data measured with beam

图 10 ICT 和 FC 在束测量数据

表 2 不同时间常数下 ICT 和 FC 在束测量分析结果

Table 2 Analysis results of ICT and FC data at different time constants

time constant/ μs	ICT stability/ μA					FC stability/ μA				
30000	0.0083	0.0078	0.0086	0.0052	0.0046	0.0750	0.0880	0.0802	0.0824	0.0844
3000	0.0705	0.0704	0.0487	0.0530	0.0656	0.0811	0.0857	0.0908	0.0978	0.0880
100	0.1009	0.1044	0.0995	0.1035	0.1045	0.0847	0.0887	0.0841	0.0834	0.0845

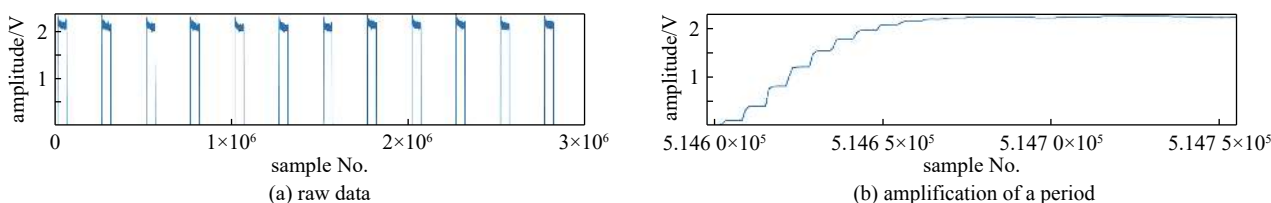
表 3 ICT 和 FC 在束测量数据分析结果 (不同流强、相同时间常数)

Table 3 Analysis results of ICT and FC data @ 30 ms time constant

6485 current/ μA	FC stability/ μA	ICT stability/ μA
6.0624	0.0701	0.0095
5.5349	0.0848	0.0065
4.915	0.0756	0.0045
4.6128	0.0745	0.0076
3.5044	0.0727	0.0059
4.2639	0.0724	0.0086
7.0346	0.0681	0.0178
6.7264	0.072	0.0108
6.4543	0.0715	0.0149
5.7614	0.0773	0.0082

2.4 响应时间测试

为测量系统响应时间,测量时将 SR844 的时间常数设置为 $100\ \mu\text{s}$ 。在束测试时,ICT 数据采集系统的采样率设备为 10^5 帧/s。ICT 采集的原始数据及放大一个周期的数据如图 11 所示。分析多个引出周期的响应时间,经计算 ICT 的系统响应时间约 $800\ \mu\text{s}$,小于 $1\ \text{ms}$ 。同时,由于时间常数设置为 $100\ \mu\text{s}$,经锁相放大器输出的信号没有使用滤波器,和图 10 测量的数据相比(时间常数为 $30\ \text{ms}$),ICT 顶部的数据抖动明显增大。

Fig. 11 System time response tested result for ICT @ $\tau=100\ \mu\text{s}$ 图 11 ICT 系统响应时间的测量 ($\tau=100\ \mu\text{s}$)

3 结 论

本文根据重离子治癌加速器装置在 MEBT 测量束流流强的物理需求,设计了基于锁相放大器的 ICT 流强测量系统,分析了该方法的特点。同时,利用 FC 标定了锁相放大器的测量数据,在束测量并分析了 ICT 和 FC 的系统分辨分别为 $6.45\ \text{nA}$ 和 $5.163\ \text{nA}$;测量了设置锁相放大器不同时间常数,不同流强下束流的稳定性,此次在束测量的束流抖动约 $90\ \text{nA}$,对应的相对误差约 8% ,参考 ICT 和 FC 的系统分辨可知两种探测器均满足物理测量需求。束流运行和调试时,使用基于锁相放大器的 ICT 可以实现 MEBT 流强的实时、非拦截测量。同时,由于束流的状态与回旋加速器高频参数密切相关,高频参数的变化将最后体现在 ICT 测量的束流幅值上。分析该系统在武威 (2020-09-25) 和兰州重离子加速器 (2022-01-20 和 2022-02-22) 三次实验的标定数据可知,由于每次高频参数差异,标定的 ICT 系数均不同,且通过分析 MEBT 上相位探针测量的束流信号频谱信息可知,束流幅频特性在不同高频参数下发生了变化。因此每当高频参数发生变化时,均需要利用 FC 重新标定 ICT 系数,后续的流强测量工作将针对此现象进一步展开。

致 谢 感谢兰州科近泰基新技术有限责任公司运维部同事们的束流调试工作以及束诊组同事提供的帮助。

参考文献:

- [1] Yang J C, Shi J, Chai W P, et al. Design of a compact structure cancer therapy synchrotron[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 756: 19-22.
- [2] Xu Zhiguo, Mao Ruishi, Duan Limin, et al. A new multi-strip ionization chamber used as online beam monitor for heavy ion therapy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 729: 895-899.
- [3] 李敏. HIMM束流诊断前端控制系统的设计与实现[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2015. (Li Min. The design and implementation of front-end control system of beam diagnostics for HIMM[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015)

- [4] Forck P. Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics[R]. Joint University Accelerator School, 2017.
- [5] Belohrad D. Beam charge measurements[C]//Proceedings of DIPAC2011. Hamburg: DIPAC, 2011: 564-568.
- [6] Bergoz. Integrating current transformer user's manual[EB/OL]. <http://www.bergoz.com/wp-content/uploads/ICT-manual-4-2.pdf>.
- [7] Unser K B. Design and preliminary tests of a beam intensity monitor for LEP[C]//Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference, 'Accelerator Science and Technology. 1989: 71-73.
- [8] Krupa M, Soby L. Beam intensity measurements in the Large Hadron Collider[C]//Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2013. 2013: 592-597.
- [9] Nakamura K, Mittelberger D E, Gonsalves A J, et al. Pico-Coulomb charge measured at BELLA to percent-level precision using a Turbo-ICT[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2016, 58(3): 034010.
- [10] Wu Yuchi, Han Dan, Zhu Bin, et al. A new method to calculate the beam charge for an integrating current transformer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 093302.
- [11] 程超才, 孙葆根, 卢平, 等. HLSII新的注入器束流强度测量系统[J]. *强激光与粒子数*, 2015, 27: 045106. (Cheng Chaocai, Sun Baogen, Lu Ping, et al. New beam intensity measurement system for HLSII injector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 045106)
- [12] Koyama R, Sakamoto N, Fujimaki M, et al. Online monitoring of beam phase and intensity using lock-in amplifiers[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 729: 788-799.
- [13] Schell L, Sadun A. Lock-in amplifier[R]. 6.101 Project Report.
- [14] Lock-in amplifier and applications[EB/OL]. <https://www.lehigh.edu/~jph7/website/Physics262/LockInAmplifierAndApplications.pdf>.
- [15] SRS. Lock-in amplifier: SR844 — 200 MHz lock-in amplifier[EB/OL]. <https://thinksrs.com/products/SR844.htm>.
- [16] USB-6210 specification[EB/OL]. <https://www.download.ni.com/support/manuals/357194d.pdf>.
- [17] Keithley. Model 6485 picoammeter instruction manual[M]. Cleveland: Keithley Instruments, Inc. , 2001.