



·粒子束及加速器技术·

中国散裂中子源 RCS 注入区 H⁰CT 测量系统研制

邱瑞阳^{1,2}, 黄蔚玲^{1,2}, 曾磊^{1,2}, 徐智虹^{1,2}, 李芳^{1,2}, 孟鸣^{1,2},
杨涛^{1,2}, 王安鑫^{1,2}, 刘孟宇³, 孙纪磊^{1,2}, 徐韬光²

(1. 散裂中子源科学中心, 广东东莞 523803; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国散裂中子源的强流质子加速器采用剥离注入的方式, 碳膜将 H⁻ 剥离两个电子后变成质子, 多圈涂抹注入到快循环同步环加速中, 并加速至 1.6 GeV。为了精确测量剥离膜的剥离效率并研究不同厚度剥离膜的使用寿命, 在 I-Dump 束线上新研发并安装了一套束流流强探测器 (H⁰CT), 用于测量未完全剥离的 H⁻ 和 H⁰ (H⁻ 被剥离一个电子) 粒子。为了测量 μA 级束流, H⁰CT 弱流强测量系统的研制考虑了外部干扰, 配合探头、线缆及电子学低噪声的抗干扰设计, 将环境噪声及干扰的影响降至最低, 提高信噪比, 实现了 μA 级脉冲电流的测量。

关键词: CSNS; H⁰CT; 脉冲流强测量; μA 级

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220142

Development of an H⁰CT measurement system at the CSNS injection region

Qiu Ruiyang^{1,2}, Huang Weiling^{1,2}, Zeng Lei^{1,2}, Xu Zhihong^{1,2}, Li Fang^{1,2}, Meng Ming^{1,2},
Yang Tao^{1,2}, Wang Anxin^{1,2}, Liu Mengyu³, Sun Jilei^{1,2}, Xu Taoguang²

(1. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China;

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

Abstract: The high intensity proton accelerator of China Spallation Neutron Source adopts the method of charge exchange injection. A carbon foil strips two electrons of H⁻ into H⁺, and proton beams are multiturn-painted in the phase space of the rapid cycling synchrontron for acceleration to 1.6 GeV. A new-developed beam current transformer (H⁰CT) was installed at the I-Dump beamline to measure the incompletely stripped H⁻ and H⁰ particles, for the sake of an accurate measurement of the stripping efficiency, together with a study of the service life of the foil stripper with different thicknesses. To measure such extremely weak microampere beam current, in the development of the H⁰CT measurement system, we took into account the external interference and the noises from probes, cables and electronics. The new design has minimized the impact of environmental noise, improved the signal-to-noise ratio, and successfully measured the microampere pulsed current.

Key words: CSNS, H⁰CT, pulsed current measurement, microampere

中国散裂中子源 (CSNS) 直线加速器由一台负氢离子源、一台 3 MeV 的射频四极加速器 (RFQ) 和一台 4 腔漂移管直线加速器 (DTL) 组成^[1]。直线加速器将负氢离子束流 (H⁻) 加速到 80 MeV, 经剥离膜剥离外层电子变成质子后注入环快循环同步加速器 (RCS), 通过相空间涂抹的方式将质子束流填充入 2 个 bucket 中 (谐波数为 2), 并在 20 ms 内加速至 1.6 GeV, 最后引出打靶, 产生 25 Hz 的脉冲中子^[2]。

1 系统设计

1.1 剥离方式及剥离效率的测量

由于克服了刘维尔定理对束流相空间的限制, 剥离注入法普遍应用在基于强流质子加速器的大科学装置上, 表 1 给出了同样采取剥离注入模式的国际同类加速器的剥离方法、束流时间结构、束测设备、剥离效率测量值或

* 收稿日期: 2022-05-06; 修订日期: 2022-09-13

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U2032165)

联系方式: 邱瑞阳, qiury@ihep.ac.cn。

通信作者: 黄蔚玲, huangwei@ihep.ac.cn。

表 1 采取剥离注入模式的国际同类加速器剥离方式和束流参数对比

Table 1 Comparison of stripping methods and beam parameters of similar accelerators in the world

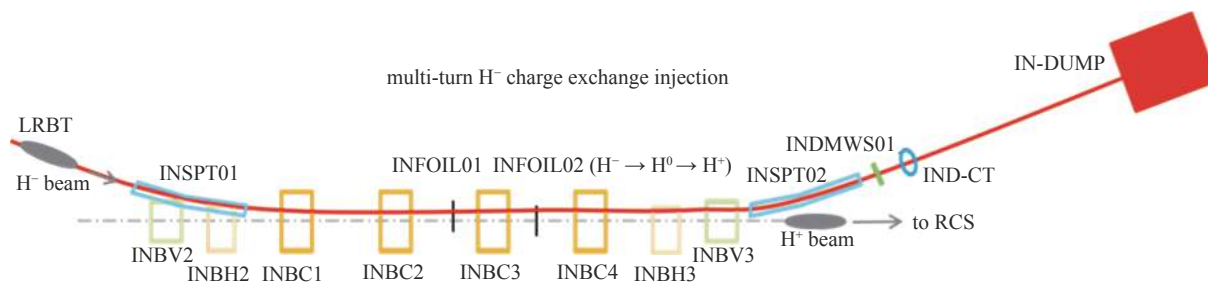
facility	pulse width	beam intensity/mA	beam instruments	stripping method	stripping efficiency
ISIS-RCS ^[3]	200 - 250 μ s	40	BCT	1. Al ₂ O ₃ Foil 2. diamond like carbon foil (DLC)	98%±1%(estimated) 99% (simulated)
CERN-PSB ^[4-5]	400 μ s(1.2 ms)	40/20	BCT BCT+H ⁰ /H ⁻ monitor	1. graphite foil 2. carbon based foil	99%
SNS ^[6-8]	1 ms	38	BCM(FCT)	1. diamond foil 2. laser assisted Lorentz stripping	99%(maximum)
J-PARC ^[9]	600 μ s	50	BCT+preamplifier	1. carbon foil 2. hybrid-type boron doped carbon foil	99.7%

估算值的对比,可见,国内外加速器不同材料不同厚度的剥离膜后面的未剥离粒子数量差别较大,这将影响到注入区废束站和辐射屏蔽的物理设计。

中国散裂中子源注入区主剥离膜采用旋转靶设计,配备了多种厚度的碳剥离膜供实验研究,正常供束运行时为 100 μ g/cm² 的碳膜^[10]。为了精确测量剥离膜的剥离效率,研究不同厚度剥离膜的使用寿命,I-Dump 束线上增加一个束流流强探测器(H⁰CT),用于测量未完全剥离的 H⁻ 和 H⁰ 粒子,这些未完成剥离的粒子(绝大部分是 H⁰, H⁻ 占比很小)经过次剥离膜 INFOIL02 全部转换为质子,以便传输至注入废束站 I-Dump 并且可以测量。宏脉冲流强的测量范围为 10~100 μ A。同时,该弱流流强测量系统还可用于评估注入区废束站对重复频率 25 Hz 和脉宽 500 μ s 的宏脉冲的连续承受能力。

1.2 环境噪声及干扰测试

根据表 1 对世界上同类加速器不同剥离膜材料和束流参数的对比,参考同样为碳剥离膜的 J-PARC/RCS 的相关测量结果^[9],按未剥离粒子占总注入束流流强的 0.4% 比例估算,在散裂中子源直线末端宏脉冲平均流强 6 mA 的条件下,未剥离粒子流强估计在 24 μ A 量级,因此流强测量设计范围在 10~100 μ A。由图 1 散裂中子源注入区布局图可知^[11],环上有注入引出磁铁的脉冲电源,根据以往经验,脉冲电源工作时产生的脉冲大电流在快变化的上升沿和下降沿都可能引起对流强测量系统的电磁干扰^[12]。因此利用停束期间,下隧道在注入区,将注入区位置现有的束流损失探测器 INBLM03 三同轴线缆替换成换 20 圈磁环^[13],如图 2 所示,检测注入区电源加电时空间电磁干扰与噪声。在正常运行时,磁环测得的电压分析,注入引出电源的干扰清晰可见,如图 3 所示,通过束前 3 μ s 触发后有 350 μ s 平缓区域,350 μ s 后有尖峰,如果尖峰信号稳定且没有比信号大而且稳定,则后期通过采集未有束流时的本底干扰信号,在有束流时进行扣除。

Fig. 1 Layout of CSNS injection region^[11]图 1 CSNS 注入区布局图^[11]

1.3 流强测量探测器设计

在研制电流互感器前,对几种软磁合金材料进行了测试和比较。最后,选择了一种铁基软磁合金磁芯,它具有高磁导率,低损耗,磁致伸缩系数接近于零的特点。在互感器的设计上,需考虑 500 μ s 宏脉冲信号在脉宽内的顶降应满足 < 1%,即脉冲信号的顶降时间常数 $\tau_{\text{droop}} > 0.05$ s,相当于低频截止频率 $f_{\text{low-cut}} = 7$ Hz,根据实验测量的噪声水平,互感器线圈匝数 N_s 选择 50 匝,另外有一匝线圈用于流强在线标定。由于真空管道内径为 $\phi 110$ mm,选用内径 $D_i=130$ mm、外径 $D_o=160$ mm、纵向长 $h=25$ mm 的环形磁芯(标称相对磁导率

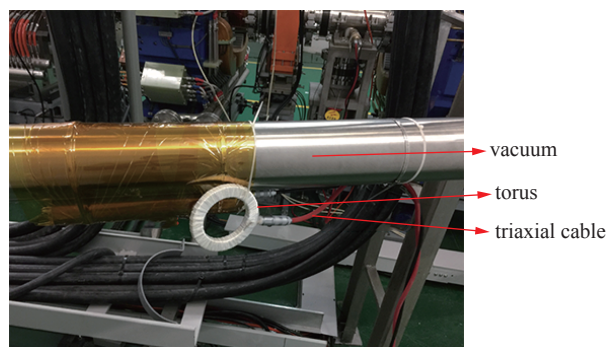


Fig. 2 External core to measure environmental noise

图 2 外置磁环测量环境噪声干扰

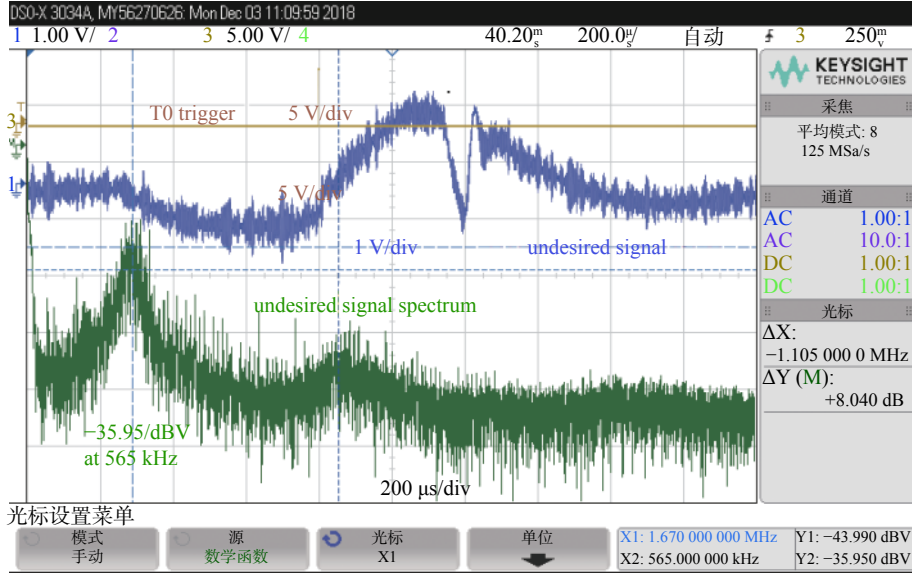


Fig. 3 Interference signal output by the electronics

图 3 电子学输出的干扰信号

$\mu_r \approx 60000$ (@10 Hz) 进行探头线圈绕制。根据公式 (1) 计算探头的等效电感 L_s 为 $0.156 \text{ H}@10 \text{ Hz}$, LCR 计实测为 0.176 H , 与理论估算值接近。

$$L_s = N_s^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} h \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (1)$$

式中: N_s 为磁环绕制圈数; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/s}$, 为真空磁导率。电子学输入阻抗 R 为 2.5Ω , 对应脉冲信号的顶降时间常数 $\tau_{\text{droop}} = L_s/R = 0.062 > 0.05 \text{ s}$, 满足设计需求。

从图 1 注入区设备布局图可知, H⁰CT 电流互感器安装位置附近有注入区 Septum 磁铁和 R_1 区的四极铁等设备^[14], 其杂散磁场可能会令 H⁰CT 的电流互感器瞬间磁饱和而失效, 无法正常测量 H⁰ 束流的流强, 因此需要在电流互感器的外侧设计磁屏蔽兼做 RF 屏蔽层, 如图 4 所示。根据环境杂散磁场的大小, 这里设计了双层 DT4 磁屏蔽, 根据公式(2)计算磁屏蔽效能^[15], 可知相对于单层坡莫合金磁屏蔽, 该方案成本低, 磁屏蔽效果可以满足电流互感器的需求。公式(2)中, μ_{r_s} 为屏蔽体相对磁导率, $p = b^2/a^2$, a 和 b 分别为圆柱形磁屏蔽层的外径和内径。

$$S = \frac{4\mu_{r_s} p}{(\mu_{r_s}^2 + 1)(p - 1) + 2\mu_{r_s}(p + 1)} \quad (2)$$

1.4 电子学设计

电流互感器在感应到束流后, 线圈输出的是电流信号。在检测微弱电流信号的场合, 通常用到跨阻型放大器作为一级 IV 变换芯片。由于测量微弱信号, $10 \mu\text{A}$ 束流经过磁环 50 圈变比, 输入电流为 200 nA , 电子学输入阻抗 R_i 为 2.5Ω , 反馈电阻 R_f 为 $200 \text{ k}\Omega$ 。在选择低噪声运放时输入偏置电流 I_b 参数不可忽略。在设计时, 带宽在满足上升时间的条件下, 尽量减少其他频带噪声引入。电子学框图见图 5, 该电路设计可以通过基线动态反馈^[16], 自动调整电子学基线。

最终, 优化设计后的电流互感器与配套电子学的具体参数见表 2。

1.5 线缆选型及屏蔽方式实验

在信号线选型时, 对比了在同样探测器和电子学的前提

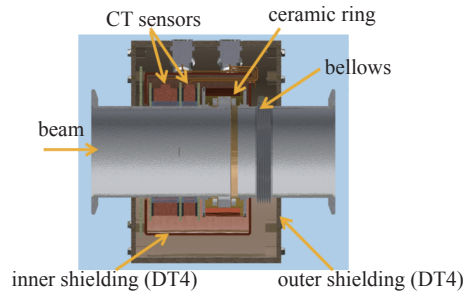


Fig. 4 H⁰CT sensors and magnetic shieldings^[12]

图 4 H⁰CT 电流互感器及磁屏蔽结构图^[12]

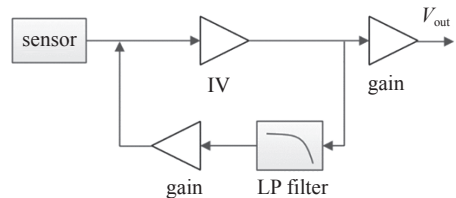


Fig. 5 Electronics block diagram

图 5 电子学框图

表 2 H⁰CT 技术参数
Table 2 Optimized electronics parameters

frequency/Hz	macro pulse width/ μ s	turns of torus/turn	droop/(%/ms)	risetime/ μ s	measuring range/ μ A
25	50 – 500	50	< 1	< 10	\pm 50

下, 60 m 四芯线缆(两芯双绞屏蔽带外层屏蔽)和 60 m 三同轴线缆在不同的接地方式下, 噪声水平测量对比。通过三同轴及四芯线噪声实验对比, 得出三同轴线双端接地时最优的信噪比, 如表 3 所示。

表 3 线缆噪声测量

Table 3 Cable noise measurement

cable	triax	cable quad
CT-output (single-end earthed)/mV	206	286
CT-output (double-end earthed)/mV	54	166

2 系统标定与测试

2.1 系统标定

用脉冲电流源吉时利 6221 输出脉宽 500 μ s 电流 10 μ A 方波, 经过校准线圈到探头, 模拟束流, 感应电流输入到电子学端进行信号调理, 电子学输出供示波器或者 DAQ 采集记录, 波形见图 6。经过感应电流输入到电子学端进行信号调理, 输出电压供示波器或者 DAQ 采集记录, 通过输入模拟束流流强, 与电子学输出进行拟合, 得出标定公式。通过标定公式, 在有束流情况下, 根据电子学输出就可计算出输入束流流强值, 从而实现束流流强测量。经过现场测试与标定, 电子学上升沿满足小于 10 μ s 指标。顶降满足小于 1% 指标, 标定各段数据精度满足小于 1% 的指标。标定数据见图 7, I_{cal} 为输入校准电流流强, V_{out} 为电子学输出, error 为全量程线性度误差, 小于 1%, 满足设计的要求。

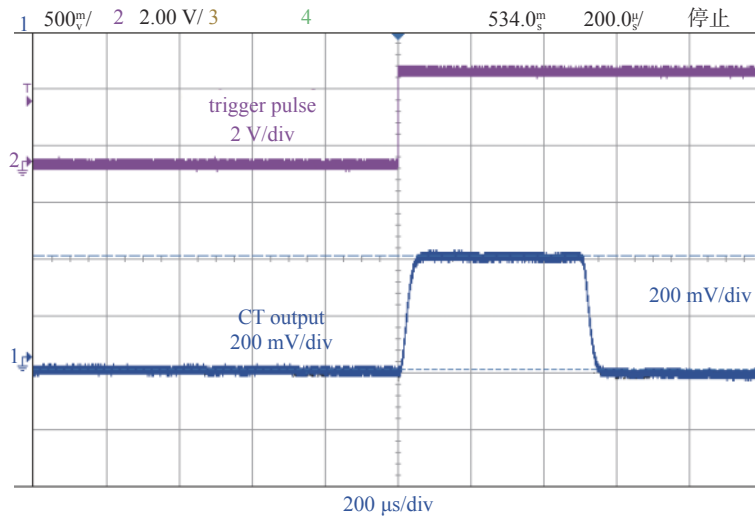


Fig. 6 The electronics output with 10 μ A calibrated input

图 6 10 μ A 校准输入时的电子学输出

2.2 系统接地方式优化

在加速器开机时, 注入电源开启后, 在对应时间 500 μ s 位置能看到明显的注入干扰, 经过多点接地测试后, 发现三通轴探测器端最外层接真空管道地, 电子学端接机柜地能达到最理想效果, 如图 8 所示。图 9 所示横坐标为采样点数。(a) 为其他接地方式, 如三通轴单端接地、电子学端接与电子学共地等; (b) 为三通轴探测器端最外层接真空管道地, 电子学端接机柜地方式。

2.3 剥离效率的在束测算

CSNS 直线加速器末端 H⁰束流经由 LRBT 输运线到达注入区进行剥离。利用 LRBT 上离注入区最近的 LRCT02 测量 H⁰束流的宏脉冲平均流强, 结合 H⁰CT 测得的 H⁰束流流强

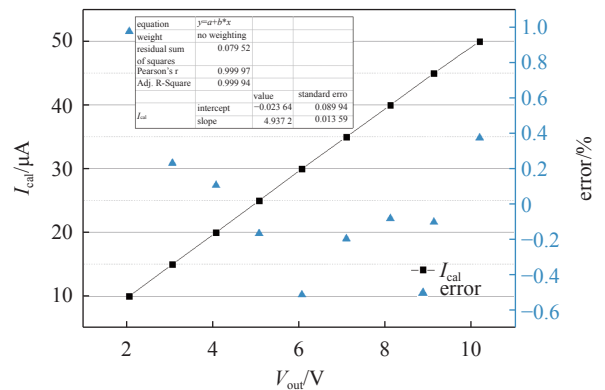


Fig. 7 H⁰CT-BCT electronics calibration data

图 7 H⁰CT-BCT 及电子学标定数据

计算剥离膜的剥离效率。图 10 为 H⁰CT 在不同流强 H⁻束流注入情况下对全新 100 μg/cm² 的碳剥离膜后的 H⁰束流进行流强测量的结果,可见实测线性相关度为 0.99449,进而计算 100 μg/cm² 的碳剥离膜剥离效率为 (99.8±0.003)%。另外,对不同厚度剥离膜的剥离效率的 Monte-Carlo 仿真和实验研究显示,剥离效率随剥离膜厚度增加而增大^[14]。

2.4 H⁰CT 与荧光靶联合测试

在停机前对主剥离膜进行转换,通过用 H⁰CT 和荧光靶对未剥离粒子的流强和剖面进行测量。如图 11(a)换新剥离膜后 H⁰CT 测得的流强为 3.03 μA,(b)旧剥离膜为 1.17 μA。由于荧光靶中心有饱和现象,未对信号进行积分对比,因此从轮廓和亮度进行对比,可见 H⁰CT 和荧光靶响应一致。由于旧剥离膜经过几轮供束使用后,膜面褶皱,通过剥离膜安装位置周围束流损失探头信号变大,推断散射效应使得未被完全剥离的 H⁰和负氢离子不能全部到达次剥离膜,损失在周围真空管道;另外膜面褶皱也会造成等效膜厚增加,剥离效率增大,叠加效果使得束流经过旧剥离膜,H⁰CT 测量到的束流流强比新剥离膜 2#对应的束流流强要小 61.4%。

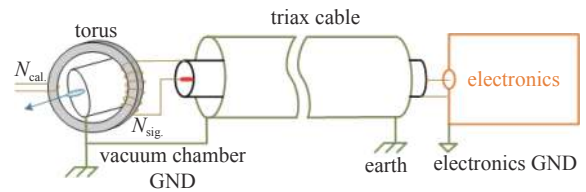


Fig. 8 Minimal noise triax cable grounding diagram

图 8 最小噪声的三同轴线缆接地示意图

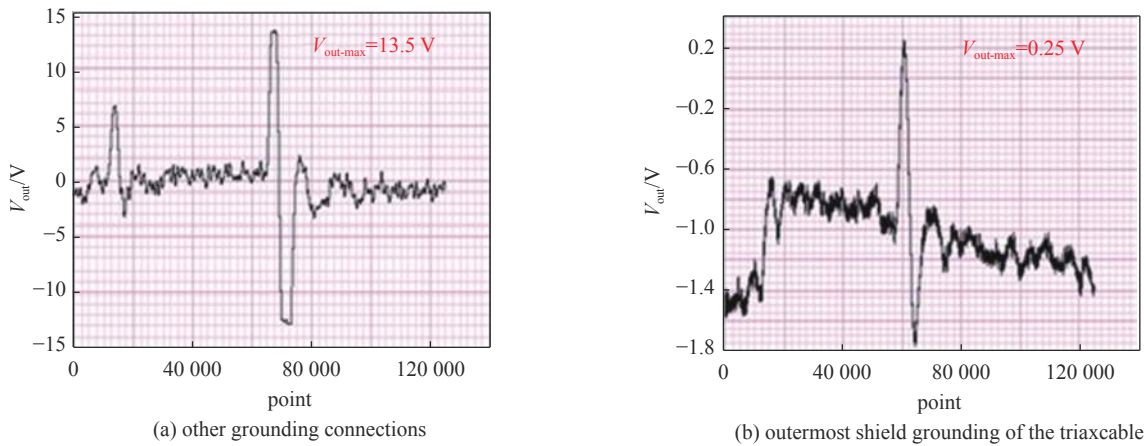


Fig. 9 Electrical output diagram for different grounding modes

图 9 不同接地方式电子学输出图

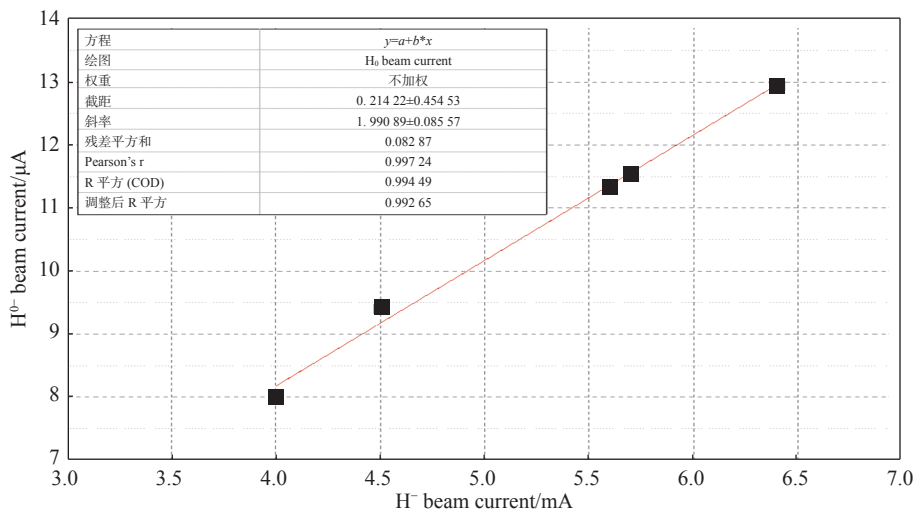
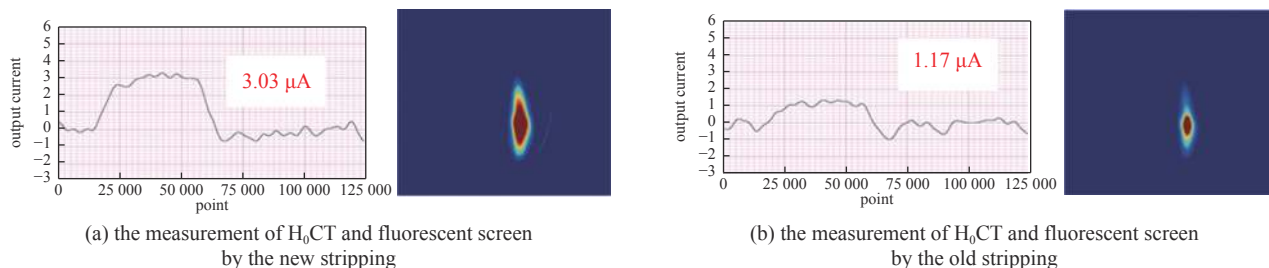


Fig. 10 H⁰ measured by H⁰CT at different H⁻ beam current

图 10 不同流强 H⁻束流注入时 H⁰CT 测量结果

3 结论

日本 J-PARC/RCS 在设计相应的 H⁰CT 时,由于注入的干扰大,信号淹没在噪声中,其选择的方案是通过信号 FFT 后频谱上对应的信号基频幅度来测量^[9]。CSNS/RCS 在进行 H⁰CT 设计时,通过多次实验,评估 RCS 复杂电磁环境对探测器信号的影响,进行了探头的 RF 屏蔽设计优化、选择合适的信号线缆,最终消除了外部噪声和干扰因

Fig. 11 Comparison chart of H_0CT and fluorescent target图 11 H_0CT 及荧光靶对比图

素,尤其是注入引出脉冲功率源带来的尖峰干扰。在电路设计时,也考虑了弱电流测量时,运放漏电流对测量精度的影响。通过综合性的系统设计,使 H^0CT 整体系统没有短板效应,达到了设计指标,实现了更直接的 μA 级弱电流测量。

参考文献:

- [1] Wang Sheng, An Yuwen, Fang Shouxian, et al. An overview of design for CSNS/RCS and beam transport[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(s2): 239-244.
- [2] Xu S Y, Huang L S, Huang M Y, et al. Beam commissioning experience of CSNS/RCS[C]//Proceedings of 10th International Particle Accelerator Conference. 2019: 1012-1014.
- [3] Jones B, Adams D J, Hughes M C, et al. Injection and stripping foil studies for a 180 MeV injection upgrade at ISIS[C]//Proceedings of HB2012. 2012: 456-460.
- [4] Bracco C, Burger S, Forte V, et al. Commissioning of the stripping foil units for the upgrade of the PSB H^- injection system[C]//Proceedings of IPAC2017. 2017: 595-598.
- [5] Roncarolo F, Allica Santamaria J C, Bozzolan M, et al. Beam instrumentation for the CERN LINAC4 and PSB half sector test[C]//Proceedings of IPAC2017. 2017: 408-411.
- [6] Shaw R W, Plum M A, Wilson L L, et al. Spallation Neutron Source (SNS) diamond stripper foil development[C]//Proceedings of 2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC). 2007.
- [7] Danilov V, Aleksandrov A, Assadi S, et al. Proof-of-principle demonstration of high efficiency laser-assisted H^- beam conversion to protons[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2007, 10: 053501.
- [8] Liu Y, Rakhman A, Menshov A, et al. Laser system design and operation for SNS H^- beam laser stripping[C]//Proceedings of IPAC2017. 2017: 57-59.
- [9] Saha P K, Hatakeyama S, Yamamoto K, et al. State of the art online monitoring system for the waste beam in the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2011, 14: 072801.
- [10] Chen J X, Kang L, Yu J B, et al. Research of the Chinese Spallation Neutron Source stripper foil[C]//Proceedings of IPAC2017. 2017: 4562-4564.
- [11] Huang W L, Qiu R Y, Li F, et al. A dual functional current monitor for stripping efficiency measurement in CSNS[C]//8th International Beam Instrumentation Conference. Malmö, Sweden: IBIC, 2019: 96-99.
- [12] 沈莉, 池云龙, 黄川, 等. CSNS RCS注入涂抹凸轨磁铁脉冲电源设计[J]. *中国物理C*, 2008, 32(s1): 22-24. (Shen Li, Chi Yunlong, Huang Chuan, et al. Design of injection painting bumper magnets pulse power supply for CSNS/RCS[J]. *Chinese Physics C*, 2008, 32(s1): 22-24)
- [13] 曾磊, 田建民, 邱瑞阳, 等. CSNS束流损失测量系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 015102. (Zeng Lei, Tian Jianmin, Qiu Ruiyang, et al. Design of the CSNS beam loss monitor system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 015102)
- [14] Huang M Y, Wang S, Xu S Y. Beam loss and the stripping efficiency measurement for CSNS injection system[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC'19). 2019: 2329-2331.
- [15] 高峰, 张合. 弹体磁屏蔽效能的计算与仿真[J]. *计量学报*, 2010, 31(2): 141-144. (Gao Feng, Zhang He. Calculation and simulation of geomagnetic field shielding effectiveness of projectile body[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2010, 31(2): 141-144)
- [16] Zhou Qi, Wang Zhigang. A DC-servo baseline restorer and its implementation in biomedical instrumentation[C]//Proceedings of SPIE. 2006.