



·粒子束及加速器技术·

## 中国散裂中子源加速器束流引出调试和束损优化

黄明阳<sup>1,2,3,4</sup>, 许守彦<sup>1,2</sup>, 齐欣<sup>1,2</sup>, 王生<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;  
4. 中国科学院粒子加速物理与技术重点实验室, 北京 100049)

**摘要:** 引出系统是中国散裂中子源快循环同步加速器的核心组成部分, 对束流精确打靶和加速器稳定运行具有重要意义。首先, 详细介绍了快循环同步加速器的引出系统和束流引出方案, 重点介绍了一些引出系统相关的关键技术。其次, 对引出束流调试进行深入研究, 包括纵向束流调试、横向束流调试、引出束流分布优化等, 其中纵向束流调试主要针对 8 个引出 Kicker 定时进行精确标定, 横向束流调试主要指 Lambertson 型磁铁、8 个 Kicker 磁铁、高能输运线模式的匹配设置。最后, 对引出束流束损进行深入研究和针对性优化, 探索引出束流损失的各种来源, 对 Lambertson 型磁铁漏场、引出束团长度、Kicker 波形平顶、Kicker 波形变化进行深入研究并对一些新的测量方法进行详细论述。同时, 对 Lambertson 型磁铁入口产生超大辐射热点的现象进行深入研究, 寻找其产生大量束流损失的根源, 并提出最终解决方案, 降低引出束流损失和辐射剂量, 使其满足加速器运行要求。

**关键词:** 散裂中子源; 束流引出; 束流调试; 束流损失; 辐射剂量

中图分类号: O572.21<sup>+</sup>1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230110

## Beam extraction commissioning and extraction beam loss optimization for China Spallation Neutron Source accelerator

Huang Mingyang<sup>1,2,3,4</sup>, Xu Shouyan<sup>1,2</sup>, Qi Xin<sup>1,2</sup>, Wang Sheng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523808, China;

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

4. Key Laboratory of Particle Acceleration Physics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The extraction system is the core component of the Rapid Cycling Synchrotron (RCS) of the China Spallation Neutron Source (CSNS). It is very important for beam striking the target accurately and stable operation of the accelerator. In this paper, firstly, the extraction system and beam extraction scheme of the RCS are introduced in detail, with emphasis on some key technologies. Secondly, the extraction beam commissioning is studied in depth, including longitudinal beam commissioning, transverse beam commissioning, and extraction beam distribution optimization. The longitudinal beam commissioning mainly refers to the accurate calibration of 8 Kickers' timing. The transverse beam commissioning mainly refers to the matching settings between the Lambertson magnet, 8 Kicker magnets and the beam transport line mode from the RCS to the target. Finally, the extraction beam loss is studied and optimized in-depth. Various sources of the extraction beam loss are explored. The leakage field of the Lambertson magnet, extraction bunch length, flat top of kicker waveform, kicker waveform variation, and so on, are studied in depth. Some new measurement methods are also discussed in detail. At the same time, the phenomenon of super-large radiation hot spot generated at the entrance of Lambertson magnet is studied in depth to find out the source of the large beam loss and put forward the final solution to reduce the extraction beam loss and radiation dose, and then make it meet the requirements of the accelerator operation.

**Key words:** spallation neutron source, beam extraction, beam commissioning, beam loss, radiation dose

\* 收稿日期: 2023-04-30; 修订日期: 2023-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12075134); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2021B1515120021)

联系方式: 黄明阳, huangmy@ihep.ac.cn。

中国散裂中子源(CSNS)是进行中子散射研究的大型科学研究平台,主要包括一台 80 MeV 直线加速器、一台 1.6 GeV 快循环同步加速器(RCS)、一个中子靶站和多台谱仪<sup>[1-2]</sup>。引出系统是 CSNS RCS 的核心组成部分,为了降低引出过程的束流损失,束流引出采用单圈快引出方案,利用一组冲击磁铁(Kicker)和一块切割磁铁将能量为 1.6 GeV 的质子束流快速引出<sup>[3-4]</sup>。引出过程的重复频率同为 25 Hz,在每一个循环周期中,将一次引出 RCS 中的两个束团,束团长度与注入及加速过程中的射频(RF)电压曲线有关。

引出系统采用了一组 Kicker 加一块切割磁铁的设计,Kicker 设计为垂直偏转,配合水平偏转的 Lambertson 型切割磁铁。Kicker 组必须在束团间隙之内建立引出所需的平顶磁场并保持 550 ns 以上,以保证束流引出的高效率和减小对引出束流品质的破坏。Kicker 磁场提供的偏转可以使引出束流在切割磁铁入口处产生足够的相对于循环束流轨道(环的接收度区)的分离,从而允许在内外束流之间插入切割磁铁的切割板,对于 Lambertson 型切割磁铁<sup>[5]</sup>,切割板为铁轭。切割磁铁的较大偏转能力使引出束流进入高能输运线(RTBT)。

本文研究工作主要包括:首先,对 CSNS 引出系统的束流调试进行深入研究,详细介绍束流调试方法和问题解决方案。其次,束流损失和辐射剂量是加速器调试和运行的核心问题,本文将对引出束流损失进行深入研究 and 调试,探索引出束流损失的各种来源。同时,针对 Lambertson 型磁铁入口大剂量率热点问题,将深入探索其根源并提出解决方案。

## 1 束流引出调试

为了确保 RCS 中两个束团被顺利引出,需要在横向和纵向上对束流进行深入调试,主要包括两部分:(1)对 8 个引出 Kicker(K1—K8)定时进行精确标定<sup>[6]</sup>;(2)对束流引出模式进行调试,即 Lambertson 型磁铁、8 个 Kicker 磁铁、RTBT 模式的匹配设置。图 1 给出了 CSNS 引出系统示意图。在束流引出过程中,可能束流损失的主要来源包括:引出定时不匹配、引出横向模式不合理、Lambertson 型磁铁漏场超标、引出束团太长、Kicker 波形平顶不够、引出波形抖动太大、Lambertson 型磁铁的循环束管和引出管接收度不够等多种情况。为了提高引出效率、减少引出束流损失,需要对不同来源束流损失进行精细调试。同时,对于束流引出过程碰到的不合理现象,需要深入研究并提出解决方案。

精确引出定时对 RCS 束流顺利引出打靶至关重要。由于 Lambertson 型磁铁是直流型磁铁,因而引出定时主要指两个引出束团先后落在 8 个 Kicker 波形平顶上的精确同步。在调束过程中,为了将 RCS 两个束团顺利引出,需要对 8 个 Kicker 定时进行标定,以便满足束流引出条件。Kicker 定时标定包括两部分:8 个 Kicker 整体定时标定和不同 Kicker 之间相对定时标定。由于引出定时对引出轨道和束流损失比较敏感,因而主要通过引出轨道变化和束流损失来标定引出定时。图 2 给出了引出定时控制系统。通过仔细地引出定时调节,最后可以得到精确的引出定时,如图 3 所示。在图 3 中,不同 kicker 之间定时偏差是来源于引出束团通过位于不同的纵向位置的 8 个 Kicker 所需的固有时间偏差。

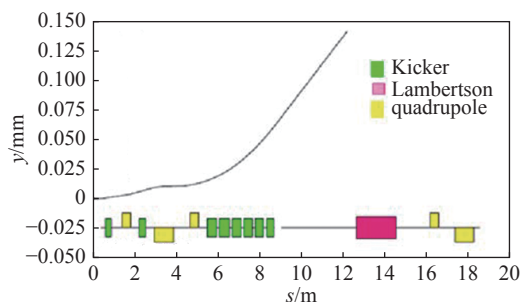


Fig. 1 Layout of the CSNS extraction system

图 1 CSNS 引出系统示意图

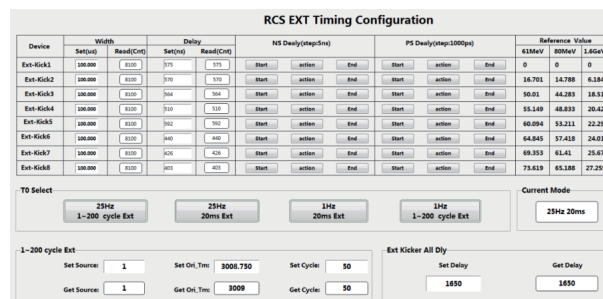


Fig. 2 Control system of the extraction timing

图 2 引出定时控制系统

束流引出模式主要是指为了将 RCS 束流顺利引出打靶,需要将 8 个 Kicker 的磁场强度值、Lambertson 型磁铁的磁场强度值与 RTBT 模式进行精确匹配。Lambertson 型磁铁用于调节水平相空间坐标,8 个 Kicker 用于匹配垂直相空间坐标。RCS 束流要精确引出打靶,需要同时满足:(1)引出束流水平和垂直相空间坐标符合 Lambertson 型磁铁引出真空盒接收度的要求;(2)引出束流相空间坐标与 RTBT 相匹配。图 4 给出了束流引出过程示意图。

在束流调试过程中<sup>[7]</sup>,虽然没有采用中空涂抹方法,但是引出束流分布在水平方向上出现了中间凹陷,这与理论设计方案的模拟结果存在很大差异。经过深入分析后发现造成这种现象可能有以下两个原因:(1)注入束流宏

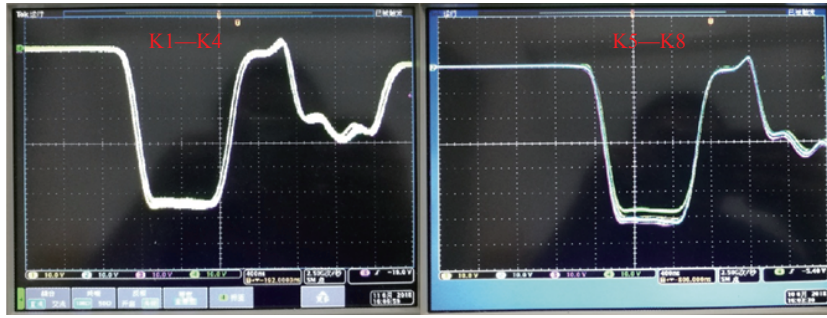


Fig. 3 Current curves of 8 Kickers after the timing calibration

图3 定时标定后8个Kicker的电流曲线

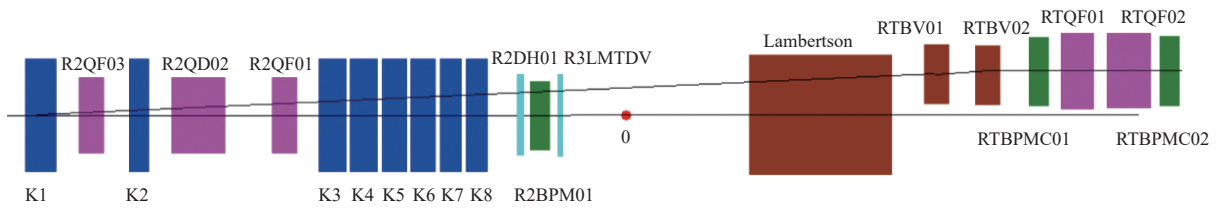
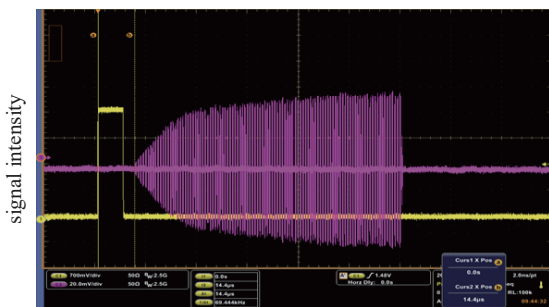


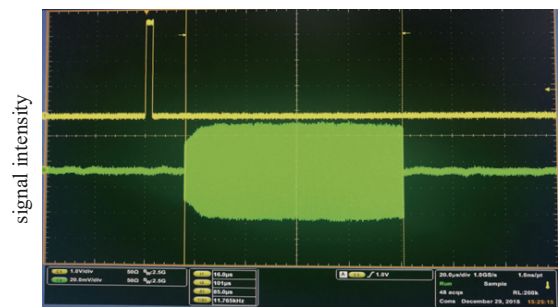
Fig. 4 Layout of the beam extraction process

图4 束流引出过程示意图

脉冲头部比较尖、上升沿束流品质差、粒子数比较少,如图5(a)所示。CSNS束流注入采用反相关涂抹作为设计方案<sup>[4]</sup>,在水平方向上采用从中心到边缘的位置涂抹。注入过程开始时,宏脉冲头部的粒子被注入到水平中心位置,这样导致注入完成后束流分布水平中心位置的粒子密度就会比较小。(2)由于注入束流上升沿起始点比较模糊,注入定时标定精确度较差,这就可能造成注入开始头几圈没有束流粒子,进而导致束流分布水平中心位置粒子密度小。为了解决引出束流分布水平方向上中间凹陷问题,利用切束器切掉注入束流的头部品质较差的上升沿,如图5(b)所示,整个脉冲粒子数相对比较均衡,注入定时标定精确度大幅提高。然后对注入定时精确标定并选择合理的宏脉冲宽度,注入过程每圈注入的粒子数就都比较一致,这样束流水平分布中心位置的粒子密度就不会较小。经过这两方面优化后,引出束流分布在水平方向上不再出现中间凹陷,如图6所示。实际测量结果与模



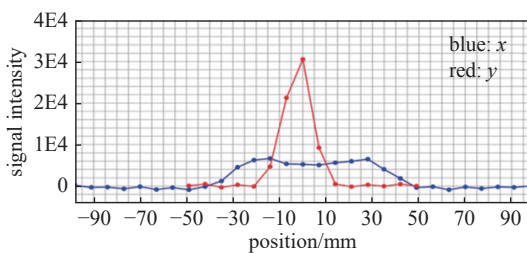
(a) before cutting off the rising edge



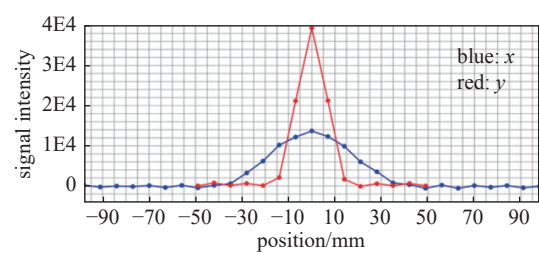
(b) after cutting off the rising edge

Fig. 5 Time structure of the injection beam

图5 注入束团的时间结构



(a) before the injection optimization



(b) after the injection optimization

Fig. 6 Beam distribution on the target

图6 靶上束流分布图

拟结果基本一致,都是接近高斯分布。

## 2 引出束流损失研究和优化

在束流引出过程中,横向、纵向参数不匹配、硬件参数不符合要求等都会导致引出效率下降并造成大量束流损失。横向参数不匹配主要是指束流引出模式不合理,进而造成引出束流损失。纵向参数不匹配主要是指引出定时设置不合理、引出纵向参数设置不合理、引出束团长度过大等,都会造成大量引出束流损失。硬件参数不符合要求可能包括 Lambertson 型磁铁漏场过大、Kicker 波形变化过大、Kicker 波形平顶较窄、Lambertson 型磁铁的循环束管和引出管接收度不够等。为了减少引出束流损失和评估引出系统性能,需要对一些束流引出关键参数进行详细测量和优化,包括:测量 Lambertson 型磁铁漏场,进而评估其对循环束流的影响;测量引出束团长度,进而评估 8 个 Kicker 波形平顶宽度的裕量及束流功率继续提升的可能性;测量 Kicker 波形平顶,进而可以判断 Kicker 性能是否达到设计指标以及给出未来改进方案;研究加速器运行过程中 Kicker 波形变化来源,减小 Kicker 波形抖动,进而评估其是否能满足束流功率继续提升的要求。同时,对于加速器运行过程中突然碰到的一些大剂量率热点,需要深入探索其束流损失根源,并提出具体解决方案。

### 2.1 Lambertson 型磁铁漏场

根据物理设计要求,Lambertson 型磁铁循环束中心积分漏场需要小于 0.05%。图 7 给出了 Lambertson 型磁铁漏场测量结果,其中左图为漏场强度水平分量大小,右图为漏场强度垂直分量大小。磁铁测试结果表明:扣除霍尔片固有误差  $2.76 \times 10^{-4}$  T,并采用正负抵消方法,漏场水平分量与主场比为 0.02%,漏场垂直分量与主场比为 0.004%,均符合物理设计要求。在束流调试过程中,对 Lambertson 型磁铁正常加电运行和关掉电源两种情况,分别测量循环束流轨道,如图 8 所示。从图中可以看出:对于一个循环周期内水平和垂直各 4 个不同时刻点(间隔 5 ms)的 8 张子图,在束流位置探测器(BPM)误差范围内,同一个子图中两条分别代表 Lambertson 型磁铁正常加电运行和关掉电源两种情况的曲线几乎差别不大,这直接证明了 Lambertson 型磁铁漏场非常小,对循环束流轨道几乎没有影响,完全符合物理设计要求。因而,目前 CSNS 的 Lambertson 型磁铁漏场不会造成引出束流损失。

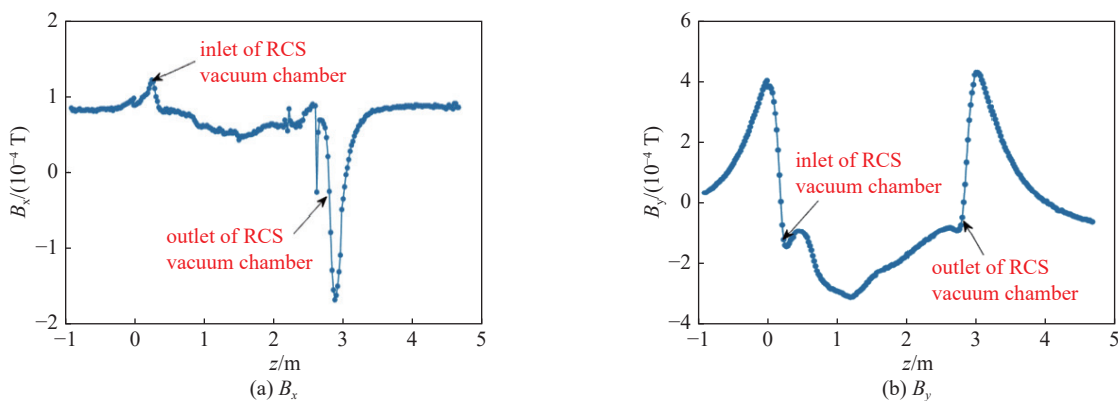


Fig. 7 Measurement results of the leakage field for the Lambertson magnet

图 7 Lambertson 型磁铁漏场测量结果

### 2.2 引出束团长度

在引出方案设计中,RCS 引出束团长度约 85 ns,两个束团之间的时间间隔约为 320 ns。但是在加速器实际运行过程中,在设计打靶束流功率 100 kW 下,引出束团长度为 105 ns<sup>[8]</sup>。经过深入分析,实际引出束团长度与设计值存在差别主要原因是:在实际运行过程中,RCS 的高频曲线、腔压、注入能量和能散、注入相位、切束率、纵向工作点等机器参数与设计值差别较大。如果实际机器参数调整到和设计参数一致,测量到的束团长度约 85 ns,与实际值一致。

随着打靶束流功率的增加,引出束团长度也在不断增加,进而导致 Kicker 波形平顶的容忍裕量减少,可能造成引出束流损失。通过纵向调试,特别是增加磁合金二次谐波腔,可以对引出束团长度进行优化。理论上,束团长度均方根值  $\sigma_\tau$  与腔压  $V$  的关系为<sup>[9]</sup>

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{A_{\text{rms}}}{\omega_0} \left( \frac{2|\eta|}{\pi h e V \beta^2 |\cos\varphi_s|} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (1)$$

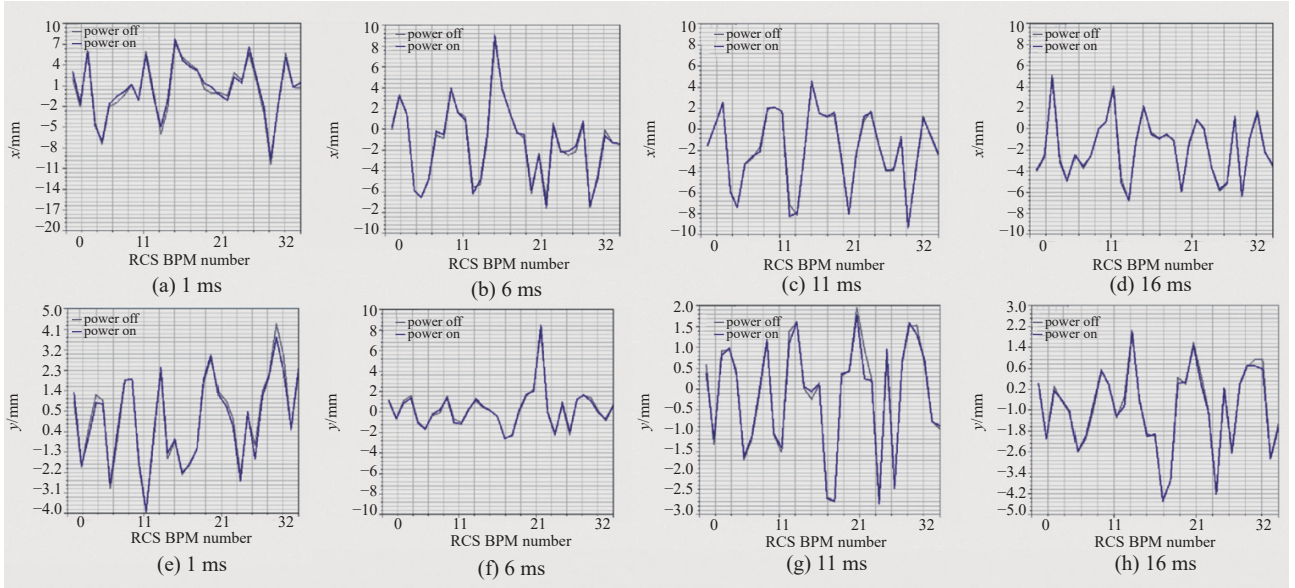


Fig. 8 Beam measurement results of the leakage field for the Lambertson magnet

图 8 Lambertson 型磁铁漏场束流测量结果

式中:  $A_{rms}$  是相空间面积均方根值;  $\omega_0$  为同步粒子的回旋角频率;  $\eta$  为滑相因子;  $h$  为谐波数;  $\beta$  为相对论能量因子;  $\varphi_s$  为同步相位。因此, 束团长度变化随腔压变化的关系为<sup>[10]</sup>

$$\sigma_{\tau_2} = \sigma_{\tau_1} \left/ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{4}} \right. \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{\tau_1}$  和  $\sigma_{\tau_2}$  分别为腔压  $V_1$  和  $V_2$  对应的均方根束团长度。从式(2)中可以看出提高腔压可以使束团长度缩短。因此, 通过增加磁合金二次谐波腔的腔压, 可以提高引出段腔压, 进而缩短引出束团长度。图 9 给出了目前加速器运行在打靶束流功率为 140 kW 时实际引出束团长度测量结果。从图中可以看出, 140 kW 打靶束流功率下, 优化后的引出束团长度约 122 ns, 完全满足 RCS 束流引出对束团长度的要求。

### 2.3 Kicker 波形平顶

根据 RCS 引出系统设计方案, 8 个 Kicker 波形的平顶时间都超过 600 ns, 上升时间小于 265 ns。但是, 在实际硬件设计、加工和具体应用过程中, 可能存在多种误差, 进而造成 Kicker 波形平顶时间和上升时间没有达到设计值。为了查验引出束流感受到的 Kicker 波形真实的平顶和进一步测量 8 个 Kicker 的实际励磁关系, 同时, 参考 J-PARC 的 Kicker 波形测量结果<sup>[11-12]</sup>, 查验波形尾部是否存在振荡, 我们需要对 8 个 Kicker 波形进行精确地测量。

在加速器研究过程中, Kicker 波形测量分为以下几个步骤: (1) 通过选择合理的高频曲线、切束率、束流脉宽、注入相位, 进而找到合理的实验短束团探针, 用于对 8 个 Kicker 波形进行精确测量; (2) 通过调节束流引出模式, 确保束流引出时在 8 个 Kicker 波形平顶, 进而让束流顺利引出; (3) 验证引出定时设置值是否为电源感受到的真实值; (4) 测量 RTBT 上所有 BPM 对不同 Kicker 的响应, 选择响应大的合理 BPM, 通过调整 Kicker 模式, 将实验区域放在 BPM 较好的线性区域; (5) 测量每个 Kicker 电压变化与选定 BPM 所测量到的位置变化的响应关系; (6) 测量每个 Kicker 定时移动引起的 RTBT 上束流位置变化; (7) 通过联合(5)和(6), 可以推导得到每个 Kicker 的电压波形。图 10 给出了 8 个 Kicker 波形测量结果。从图中可以发现: K5—K8 的实测波形与脉冲电源输出波形非常吻合, K3—K4 的实测波形与脉冲电源输出波形稍有差异, K1—K2 的实测波形与脉冲电源输出波形差异很大; K1—K2 实测波形尾部有很大的过冲, K3—K4 实测波形尾部也有过冲, 但比较小。如果 K1—K2 波形尾部过冲真实存

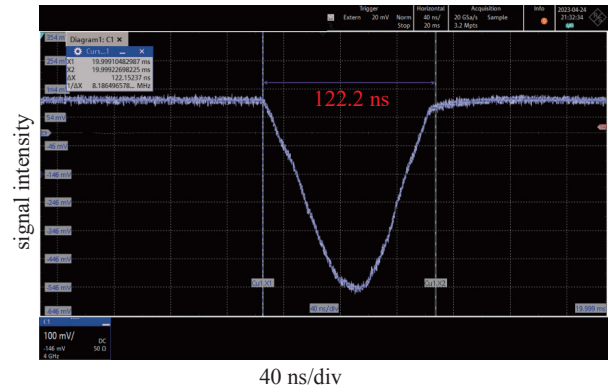


Fig. 9 Measurement results of actual bunch length when the beam power on the target is 140 kW

图 9 打靶束流功率为 140 kW 时实际引出束团长度测量结果

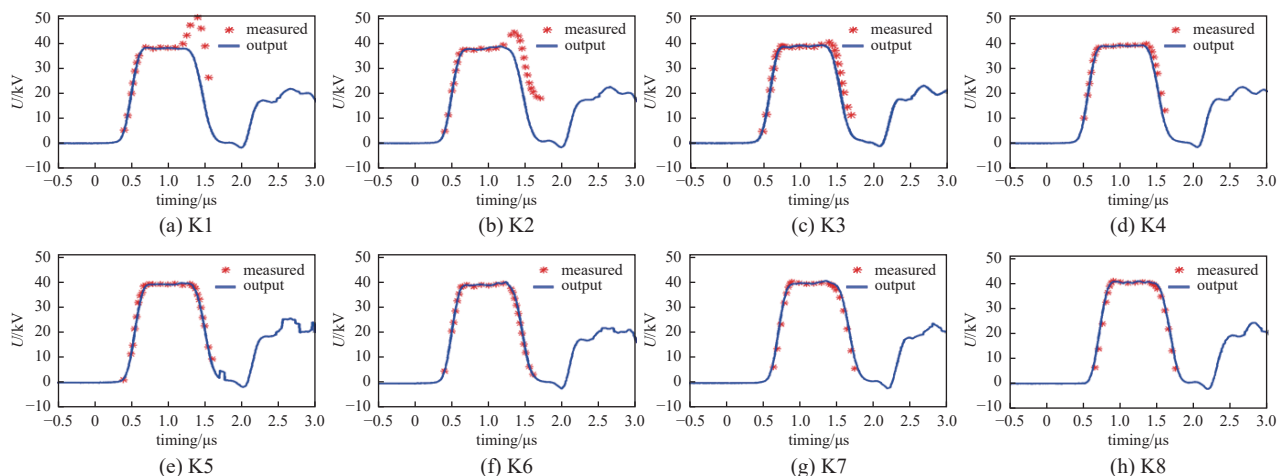


Fig. 10 Measurement results of 8 Kicker waveforms

图 10 8 个 Kicker 波形测量结果

在,那么 Kicker 波形平顶时间将大幅度缩小(小于 550 ns),进而导致 Kicker 波形平顶的容忍裕量大幅减少,可能引出束流损失,因而需要对 Kicker 波形尾部过冲现象进行深入的研究和探索。

经过对磁铁/电源自身机制、磁铁杂散场、电源过冲、磁铁/电源与束测设备串扰<sup>[13]</sup>等纵向方面进行深入研究和讨论,并通过设计两个束流实验来研究和判断 K1 磁铁与束测设备的电磁干扰对束流测量结果的影响,初步可以判定 K1—K2 尾部过冲很大可能性是由电磁干扰造成,但具体不同设备间串扰根源还需要更加深入的研究和实验证实。

#### 2.4 Kicker 波形变化

在加速器运行过程中,Kicker 波形发生变化的主要原因有:漏触发<sup>[14]</sup>、线缆击穿、波形抖动、磁铁或电源故障等,都会造成引出束流损失,这些现象在加速器运行过程中都比较常见。

Kicker 漏触发典型现象是造成波形丢失(大幅度移动并离开监测屏幕),进而引起这一周期引出束流损失。图 11(a)给出了 Kicker 发生漏触发现象后波形图留下的余晖。根据目前国际国内研究结果,Kicker 漏触发是冲击磁铁自身固有现象,只能通过优化硬件来降低发生频率,但基本上无法根除。在 CSNS 加速器运行 5 年时间里,通过对 Kicker 脉冲电源部分硬件进行深入优化和改进,Kicker 漏触发发生频率从每周几十次慢慢下降到如今的每周两三次,Kicker 漏触发发生概率大幅下降,造成的引出束流损失也在明显减小。

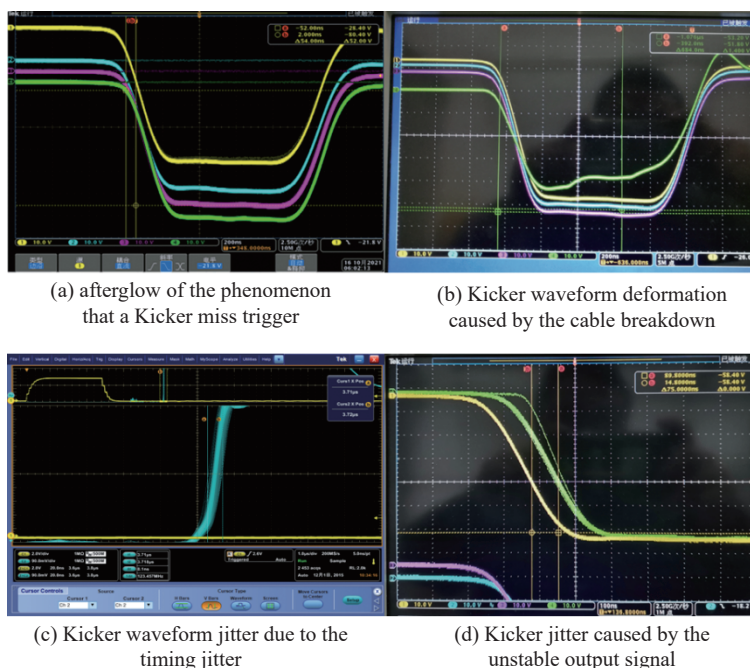


Fig. 11 Variation diagrams of Kicker waveform

图 11 Kicker 波形变化示意图

对于 CSNS 脉冲电源传输线缆, 虽然都采用了终端绝缘技术<sup>[15]</sup>, 但是传输线缆有一定的使用寿命, 在寿命末期, 就有可能发生线缆击穿现象, 导致 Kicker 波形明显变形, 进而造成大量束流损失。图 11(b) 给出了 Kicker 线缆击穿后引起的波形变形。因而, 在 Kicker 传输线缆到达使用寿命时, 需要及时更换, 避免加速器运行中造成不必要的束流损失。

Kicker 波形抖动主要有三个来源: 控制系统定时抖动、RCS 高频信号抖动和脉冲电源自身抖动。图 11(c) 给出了控制系统定时抖动引起的 Kicker 波形抖动。图 11(d) 给出了 Kicker 脉冲电源输出信号不稳定引起的 Kicker 抖动。目前 CSNS 三个不同来源造成总的 Kicker 波形抖动量大约  $\pm 15$  ns。在加速器运行过程中, Kicker 波形抖动会造成可供使用的 Kicker 波形平顶大幅缩小, 导致 Kicker 波形平顶裕量变小, 甚至不足, 进而产生大量的引出束流损失。因而, 为了减少这部分引出束流损失, 需要对不同来源的 Kicker 波形抖动进行针对性的优化和改进, 尽量减少波形抖动量。

### 2.5 Lambertson 型磁铁入口大剂量率热点研究

在 CSNS 加速器运行过程中, 由于辐射剂量测量越来越精细化, 2022 年 3 月在 Lambertson 型磁铁入口发现了一个表面  $5 \sim 10$  mSv/h 大剂量率热点, 如图 12(a) 所示。经过对束流引出横向参数、纵向参数、引出束团长度、Kicker 波形、Kicker 不同来源波形抖动等进行深入研究和排查, 发现这些都不是 Lambertson 型磁铁入口大量束流损失的来源。为了探索这个大剂量率热点的源头, 在 Lambertson 型磁铁入口新增一个高精度的中子探测器, 其位置正好对准辐射热点, 如图 12(b) 所示。中子探测器测量结果表明: 在  $3 \sim 5$  ms 位置, 大剂量率热点位置出现大量束流损失。同时, 在束流实验过程中, 通过调节准直器垂直挡块, 改变准直器垂直接收度, 用于刮掉垂直发射度大的束流粒子, 可以明显看到中子探测器测量到的束损变化。图 13 给出了子探测器测量值随准直器垂直接收度变化而变化。从图中可以看出, 随着准直器垂直接收度的缩小, Lambertson 型磁铁入口束流损失明显减小。因而, 可以判定 Lambertson 型磁铁入口大剂量率热点来源于  $3 \sim 5$  ms 束流损失, 而且是垂直方向束流损失。

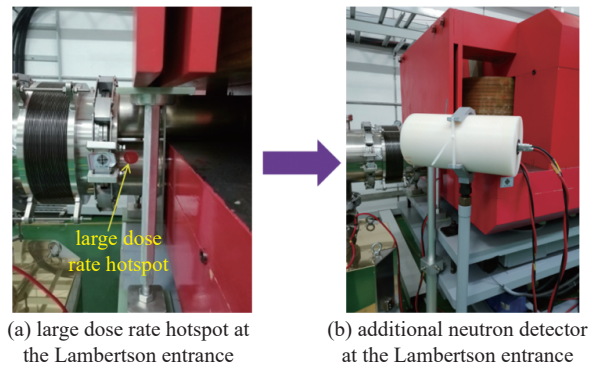


Fig. 12 Large dose rate hotspot at the Lambertson magnet entrance

图 12 Lambertson 型磁铁入口大剂量率热点

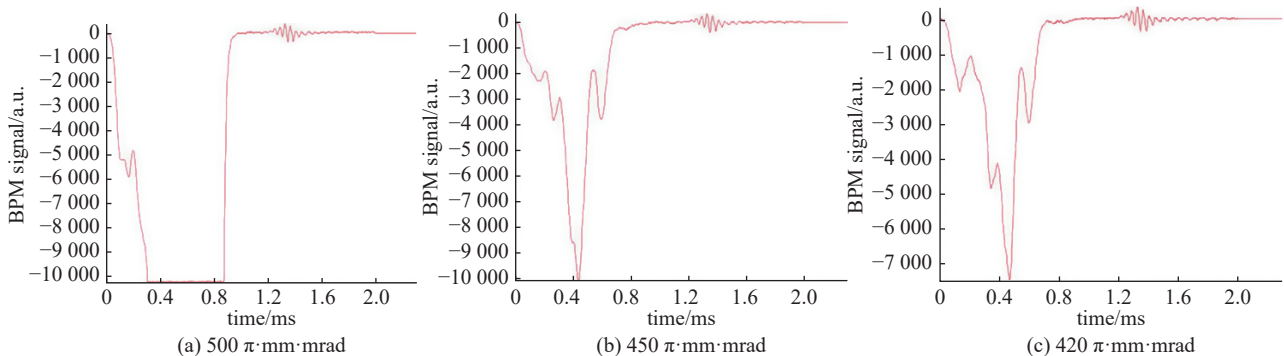


Fig. 13 Neutron detector (R3MB03INBLM) measurement results varying with the collimator vertical acceptance

图 13 中子探测器 (R3MB03INBLM) 测量值随准直器垂直接收度变化而变化

通过详细的仿真模拟和大量的束流实验发现: 由于目前加速器工作模式与设计模式差别很大, 导致 RCS 机器参数与设计值有比较大的差别, Lambertson 型磁铁入口垂直  $\beta$  函数大幅增加 (增加了约 20%), 其循环束真空盒垂直接收大幅减少, 进而造成了大量束流损失, 这就是 Lambertson 型磁铁入口产生大剂量率热点的最根本原因。考虑到同时满足束流不稳定性和横向耦合效应的工作点模式再进行微调的裕量极小, 导致很难通过改变 Lambertson 型磁铁入口磁聚焦结构来减少垂直  $\beta$  函数, 因而为了消除这个大剂量率热点, 提高 Lambertson 型磁铁入口循环束真空盒的垂直接收度, 需要重新设计新的 Lambertson 型磁铁, 增加其入口的有效孔径。

## 3 结论

本文详细介绍了中国散裂中子源快循环同步加速器引出系统和束流快引出方案。在加速器束流调试过程中,

对束流引出进行深入研究,提出了 Kicker 定时精确标定方法,解决了引出束流水平分布凹陷难题。对加速器束流调试和正常运行过程中引出束流损失进行深入研究,探索其不同引出束流来源,针对不同引出束流损失,提出不同的解决方案。

在未来研究工作中,对 Kicker 波形尾部过冲问题还需要更加深入地研究,提出具体解决方案;对于 Kicker 波形抖动,需要从硬件设计角度对其进行优化,为 Kicker 波形平顶提供足够的裕量;新的 Lambertson 型磁铁设计还需要留更多的裕量,以应对未来束流功率大幅提升过程中加速器工作模式更大范围的变动。

**致 谢** 感谢中国科学院高能物理研究所东莞研究部加速器技术部张玉亮、张文庆、邓昌东、杨仁俊、朱鹏、徐智虹、李海波、吴煜文、韩文杰、吴青彪、庄思璇等人在研究过程中提供的有益讨论、指导和帮助。

#### 参考文献:

- [1] Wang Sheng, Fang Shouxian, Fu Shinian, et al. Introduction to the overall physics design of CSNS accelerators[J]. *Chinese Physics C*, 2009, 33(s2): 1-3.
- [2] 陈和生, 马力, 陈元柏, 等. 散裂中子源初步设计报告[R]. 中国科学院, 2016. (Chen Hesheng, Ma Li, Chen Yuanbai, et al. Preliminary design report for the China Spallation Neutron Source[R]. Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [3] Wei Jie, Fu Shinian, Tang Jingyu, et al. China Spallation Neutron Source- an overview of application prospects[J]. *Chinese Physics C*, 2009, 33(11): 1033-1042.
- [4] Huang Mingyang, Wang Sheng, Qiu Jing, et al. Effects of injection beam parameters and foil scattering for CSNS/RCS[J]. *Chinese Physics C*, 2013, 37: 067001.
- [5] Wu Yuwen, Kang Wen, Chen Yuan, et al. Development of the CSNS Lambertson magnet with very low stray field[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 882: 45-52.
- [6] Huang Mingyang, Jin Dapeng, Shen Li, et al. Timing adjustment of eight kickers and a method to calibrate the kicker current curves during the beam commissioning for CSNS[C]//Proceedings of the 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018). 2018: 312-314.
- [7] Xu Shouyan, Liu Hanyang, Peng Jun, et al. Beam commissioning and beam loss control for CSNS accelerators[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15: P07023.
- [8] 黄良生, 刘汉阳, 李明涛, 等. 中国散裂中子源快循环同步加速器束团长度研究[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(7): 1456-1464. (Huang Liangsheng, Liu Hanyang, Li Mingtao, et al. Bunch length study in rapid cycling synchrotron of China Spallation Neutron Source[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(7): 1456-1464)
- [9] Fung K M, Ball M, Chu C M, et al. Bunch length compression manipulations[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2000, 3: 100101.
- [10] Zou Ye, Tang Jingyu, Chen Jinfang, et al. Short-bunch extraction in a rapid cycling synchrotron[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2014, 17: 060101.
- [11] Kamiya J, Takayanagi T, Watanabe M. Performance of extraction kicker magnet in a rapid cycling synchrotron[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2009, 12: 072401.
- [12] Harada H, Saha P K, Tamura F, et al. Beam-based compensation of extracted-beam displacement caused by field ringing of pulsed kicker magnets in the 3 GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2017, 2017: 093G01.
- [13] Carwardine J A, Wang J. Analysis of the electrical noise from the APS kicker magnet power supplies[C]//Proceedings of Particle Accelerator Conference. 1996: 1242-1244.
- [14] 李海波, 齐欣, 张文庆, 等. CSNS 的 kicker 电源闸流管触发特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 105003. (Li Haibo, Qi Xin, Zhang Wenqing, et al. Thyatron trigger characteristics analysis of CSNS kicker power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 105003)
- [15] 翟军, 沈莉, 李海波, 等. CSNS/RCS 引出脉冲电源传输电缆终端绝缘技术[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 075104. (Zhai Jun, Shen Li, Li Haibo, et al. Insulation technology of transmission cable terminal for CSNS/RCS extraction pulsed power supply system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 075104)