

强流加速器中子源高能束流传输线的束流均匀化研究

苏浩泉^{1,2}, 孔国庆^{1,2}, 李竞伦^{1,2}, 潘文龙^{1,2}, 陈勇奇^{1,2}, 胡耀程^{1,2},
姜泉旭^{1,2}, 杨京鹤³, 李海鹏^{1,2}, 王盛^{1,2,4}

(1. 西安交通大学核科学与技术学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学湖州中子科学实验室, 313000, 浙江湖州; 3. 中国原子能科学研究院, 北京, 102413; 4. 华硼中子科技(杭州)有限公司, 310000, 杭州)

摘要: 为满足强流连续波运行模式下加速器中子源对高传输效率与束流均匀度的双重要求, 开展了高能束流传输线(HEBT)的束流动力学设计与均匀化研究, 提出了一种兼顾双靶供束与末端均匀展宽的 HEBT 结构优化方案。设计通过磁铁布局优化, 实现了质子能量 2.8 MeV、束流强度 20 mA、束流占空比 100% 的质子束从加速器出口至靶终端的高效传输, 传输效率超过 99.90%。在终端段前引入 1 台双向偏转 2 极磁铁, 实现对 2 个靶站的独立供束, 显著提升了束流利用率。针对终端段空间紧凑的问题, 通过在偏转磁铁后设计了由 2 组双单元 4 极磁铁和 2 台连续布置的 8 极磁铁构成的组合磁铁布局, 在 3.2 m 空间内实现了 x 、 y 方向的均匀展宽, 并在靶面上形成了边长约 110 mm, 均匀度超过 90% 的方形束斑, 从而兼顾了高传输效率与高均匀度需求。通过调节终端段 4 极与 8 极磁铁参数, 实现了在 50~130 mm 范围内灵活调控束斑尺寸, 均匀度保持在 86% 以上。采用 TraceWin 进行多粒子追踪模拟, 系统评估了该方案在非理想入射束流和磁铁误差条件下的稳定性。进一步引入束流位置监测器与校正磁铁的联合控制机制, 建立反馈回路, 实现了束流轨道的有效校正, 降低误差对传输性能的影响。1 000 次随机误差模拟结果表明: 该设计在多种工况下均能保持传输效率大于 99.84%, 均匀度大于 80%, 验证了其良好的误差容忍性与工程可实现性。

关键词: 加速器中子源; 高能束流传输线; 束流动力学; 束流均匀化; 8 极磁铁

中图分类号: TL501+.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202512008 **文章编号:** 0253-987X(2025)12-0092-13

Study on Beam Uniformization of High-Energy Beam Transport in High-Current Accelerator-Driven Neutron Source

SU Haoquan^{1,2}, KONG Guoqing^{1,2}, LI Jinglun^{1,2}, PAN Wenlong^{1,2}, CHEN Yongqi^{1,2},
HU Yaocheng^{1,2}, JIANG Quanxu^{1,2}, YANG Jinghe³,
LI Haipeng^{1,2}, WANG Sheng^{1,2,4}

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Huzhou Neutron Science Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Huzhou, Zhejiang 313000, China; 3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China; 4. Hua Boron Neutron Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: To satisfy the high transmission efficiency and beam uniformity requirements of accelerator-based neutron sources operating in continuous wave (CW) high-current mode, an optimized high energy

收稿日期: 2025-05-07。 作者简介: 苏浩泉(1998—),男,博士生;李海鹏(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFA1008600);国家自然科学基金资助项目(12375159);中核集团领创科研项目(CNNC202217)。

网络出版时间: 2025-08-06

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250806.1144.006>

beam transport (HEBT) layout with both dual-target beam delivery and terminal beam uniformity taken into account is proposed in this study based on the beam dynamics design and uniformization investigation for HEBT. Through magnetic lattice optimization, the layout achieved efficient transmission of a 2.8 MeV, 20 mA, 100% duty cycle proton beam from the RFQ exit to the target station, with the transmission efficiency exceeding 99.90%. Before the terminal section, a dual-direction bending dipole magnet is introduced for independent beam delivery to two target stations, having significantly improved the beam utilization rate. Considering the limited space in the terminal section, a compact magnetic structure consisting of two doublet quadrupole pairs and two consecutively placed octupoles is provided to realize uniform beam expansion in both x and y directions within the 3.2 m-wide space, forming a square beam spot with the side length of approximately 110 mm and uniformity of over 90% on the target surface to accommodate the high transmission efficiency and uniformity requirements. The parameters of the terminal quadrupoles and octupoles can be adjusted to flexibly change the beam spot size within the range of 50~130 mm while maintaining the uniformity above 86%. Multi-particle tracking simulations were conducted using TraceWin to evaluate the robustness of the design with non-ideal input beams and magnetic field errors. A feedback correction mechanism integrating beam position monitors and steering magnets was established to effectively correct beam trajectory deviations and reduce the effect of errors on the transmission performance. According to results from 1,000 random error simulations, the transmission efficiency with the design consistently maintained above 99.84% and the beam uniformity above 80% under various conditions. This suggests that the layout proposed is of strong error tolerance and engineering feasibility.

Keywords: accelerator-based neutron source; high energy beam transport; beam dynamic; beam uniformization; octupole magnet

基于锂靶的加速器中子源是一种重要的中子产生装置,其工作原理是通过质子加速器将质子能量提升至 1.8 MeV 以上,随后使质子束流轰击锂靶,诱发 ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n}){}^7\text{Be}$ 核反应从而产生中子。中子经过慢化和准直处理后,可广泛应用于材料辐照研究、中子成像技术、放射医疗等多个重要领域。加速器中子源因其可控性强、运行安全可靠等特点,已成为核技术应用研究中不可或缺的实验平台^[1-3]。

高能束流传输线(HEBT)是加速器中子源中连接主加速器与靶站的重要组成部分,其主要功能是高效、稳定地将高能质子束传输至靶站,实现中子产额的最大化。HEBT 不仅要满足束流的空间分布、发散角及能量扩展等参数要求,还需兼顾束流损失控制与辐射安全^[4]。其动力学设计直接影响束流品质、靶站效率及整个中子源装置的运行可靠性^[5-6]。

加速器出口的束流呈类高斯分布,导致束斑中心功率密度高而边缘低。当这种束斑轰击靶材时,会造成靶中心温度过高。由于锂的熔点较低,中心区域的过高功率密度限制了锂靶可承受的最大束流功率^[7-8]。为提高束流功率,可对束斑进行均匀化处理。在相同总功率下,均匀化束斑的峰值功率密

度显著降低,从而使锂靶能承受更高的功率上限。

束流均匀化的方法包括扩束准直法、扫描法和非线性磁铁^[9-10]。扩束法是用 4 极磁铁将束流尺寸扩大,通过准直器刮除外围束斑,留下中心部分束斑,从而提高束斑均匀度,在美国散裂中子源 SNS 和欧洲散裂中子源的束线上均采用扩束法对束斑进行均匀化^[11],扩束法的缺点在于会刮去一部分束流,对束流的利用率较低。扫描法是将束斑聚焦到较小尺寸,通过扫描磁铁使束斑沿一定路径在靶上移动,实现时间积分分布上的束流均匀分布^[12],该方法的束流能量利用率高,可以灵活调整辐照区域。然而,扫描法会产生较高的瞬时功率,用在锂靶上容易导致锂瞬间融化,同时扫描磁铁对磁铁电源的谐波分量、电源稳定度等参数都提出了更高的要求,使得电源成本增加^[13-15]。非线性法是采用非线性磁铁(如 8 极磁铁^[16]、阶梯磁铁^[17-18]等)对束流进行非线性传输,利用非线性磁铁对高阶像差的校正作用,将高斯分布的束流校正成均匀分布。非线性法无机械运动部件,对设备要求低且可靠性高,适用于连续束流。但非线性磁铁对束流品质要求高,对误差敏感,因而束流动力学设计难度较大。

本文针对双终端的强流加速器中子源的高能传输线系统进行束流动力学设计,以提高束流传输效率和提高靶上束斑均匀度为目标,优化磁铁布局和磁铁参数,控制束流包络并提高 HEBT 传输效率;通过分析 8 极磁铁对束流的均匀化作用,提高靶上束斑均匀度;在束流传输中引入误差,模拟在实际工况下的束流传输情况,通过引入校正磁铁和束流位置探测器联合控制策略,提高 HEBT 的误差冗余度;通过多次带随机误差的束流传输模拟,验证 HEBT 设计方案的误差冗余度和工程可靠性。

1 束流传输模型

粒子束流分布可以描述为 6 维坐标,即 $(x, x', y, y', \delta_1, \delta_p)$ 。其中: x, y 表示面向束流前进方向的水平方向和垂直方向; x', y' 表示 x 方向和 y 方向的散角; δ_1 为纵向长度分散; δ_p 为粒子的动量相对于同步粒子的变化量。通过 6 维坐标,可以将束流密度分布描述为 6 维函数 $f(x, x', y, y', \delta_1, \delta_p)$ 。其中,函数 f 满足如下限制条件^[19]

$$\int f(x, x', y, y', \delta_1, \delta_p) dx dx' dy dy' d\delta_1 d\delta_p = N_0 \quad (1)$$

式中: N_0 为总粒子数。对于高斯分布的束流,以 x 平面为例,可以用 σ 矩阵描述束流在 $x-x'$ 相空间的分布, σ 矩阵表示为

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

高斯分布的束流在束流传输线上从 i 位置传输到 j 位置,其束流参数的变化可以用传输矩阵表示为

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{R}_{ij} \mathbf{X}_i \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_i$ 和 $\mathbf{X}_j$ 为 i 位置和 j 位置的束流坐标矩阵,包括束流坐标参数 $(x, x', y, y', \delta_1, \delta_p)$; $\mathbf{R}_{ij}$ 为从 i 位置到 j 位置的一阶传输矩阵。对于高斯分布的粒子束,在经过线性传播之后仍然满足高斯分布。要实现束流均匀化,需要更高阶的磁铁。8 极磁铁是 1 种三阶磁铁,其对束流的坐标变化效果可以表达为

$$x_i = \mathbf{R}_{ij} x_j + \mathbf{T}_{ijk} x_j x_k + \mathbf{T}_{ijkl} x_j x_k x_l \quad (4)$$

式中: $\mathbf{T}_{ijk}$ 和 $\mathbf{T}_{ijkl}$ 分别为二阶和三阶泰勒展开系数矩阵。为简化计算,通常采用“薄磁铁近似”来计算 8 极磁铁的作用。在薄磁铁近似下,8 极磁铁对 x 方向的包络作用可以表示为

$$x \approx l\theta + k\theta^3 \quad (5)$$

式中: θ 为粒子偏离水平方向的角度; l 和 k 为自由参

数,与 8 极磁铁的孔径、磁场强度、有效长度等有关;式(5)的第一项为发散项, $l > 0$; 第二项为收敛项, $k < 0$ 。8 极磁铁产生的磁场作用在束流上,表现为将 θ 较小的束流向外拉,将 θ 比较大的束流往里推。在束流动力学设计中,选择合适的 8 极磁铁参数,可以将高斯分布的束流展开成均匀分布,开 8 极磁铁后束流的分布如图 1 所示。

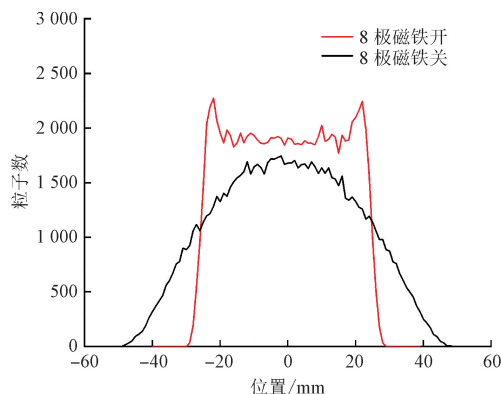


图 1 带 8 极磁铁和不带 8 极磁铁时的束流分布对比

Fig. 1 Comparison of beam distribution with and without the presence of the octupole magnet

为减小束流在 x 方向和 y 方向上的耦合,束流在 8 极磁铁位置处应该是 1 个扁平束,扁平束的长短比例应该大于等于 5 : 1。

2 HEBT 动力学设计

2.1 动力学设计目标

HEBT 的动力学设计目标是将加速器出口束流无损的输运到 2 个靶站终端,在动力学设计中应满足:

- (1) 控制束流包络,减少束晕粒子的产生,降低束流损失,提高靶上可利用束流的比例;
- (2) 实现双终端供束,每个终端靶站均实现束斑均匀化,靶上束斑尺寸为 110 mm × 110 mm (半高宽),束斑核心区域(90%边界)均匀度大于 80%;
- (3) 减少 HEBT 使用磁铁的种类,降低成本;
- (4) 尽可能减小 2 极磁铁的 y 方向孔径;
- (5) 设置合理的束流位置监测和校正磁铁,实现束流中心位置监测和束流轨道校正。

2.2 入口束流

强流加速器中子源入口质子能量 2.8 MeV,束流强度 20 mA,束流占比 100%,HEBT 入口束流 Twiss 参数和发射度如表 1 所示。其中: α 和 β 表示束流的 Twiss 参数; $\epsilon_{\text{norm-rms}}$ 表示束流相空间的归一化均方根发射度; z 表示束流前进方向; z' 表示 z 方向的散角。

表 1 HEBT 入口束流参数

Table 1 Parameters of HEBT entrance beam

相平面	α	$\beta/(\text{mm} \cdot \text{rad}^{-1})$	$\epsilon_{\text{norm-rms}}/(\text{mm} \cdot \text{rad})$
$x-x'$	1.514	0.219×10^3	0.273×10^{-3}
$y-y'$	-1.542	0.214×10^3	0.270×10^{-3}
$z-z'$	-0.068	3.025×10^3	0.443×10^{-3}

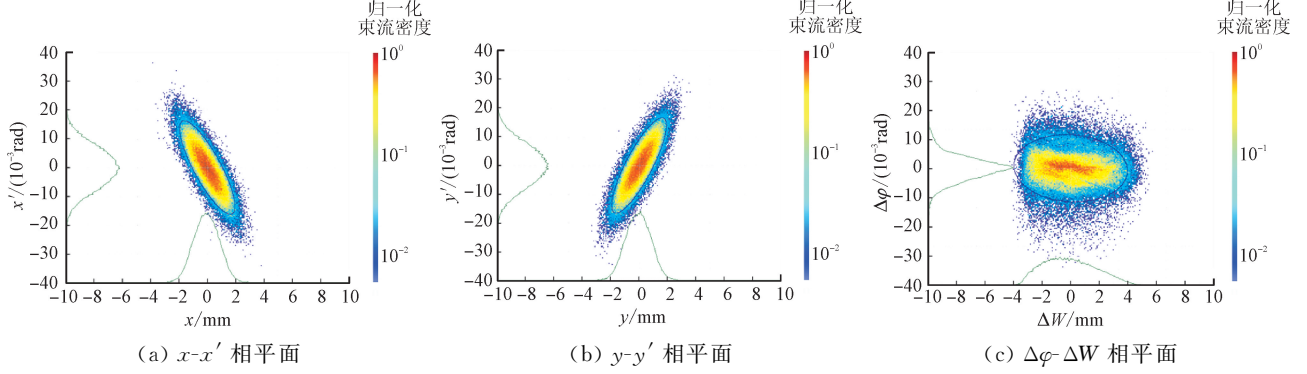


图 2 HEBT 入口束流相图

Fig. 2 Phase space distribution of the beam at the HEBT entrance

2.3 空间布局

HEBT 空间布局如图 3 所示,以 2 极磁铁为界,将 HEBT 分为 4 段,分别为公共段 1、公共段 2、终端段 1 和终端段 2。HEBT 入口至第一个偏转磁

铁 D-1 为公共段 1;2 极磁铁 D-1 和 D-2 之间的部分为公共段 2;D-2 至终端 1 为终端段 1,D-2 至终端 2 为终端段 2,终端 1 和终端 2 长度相等。D-1 和 D-2 偏转角度均为 45° 。

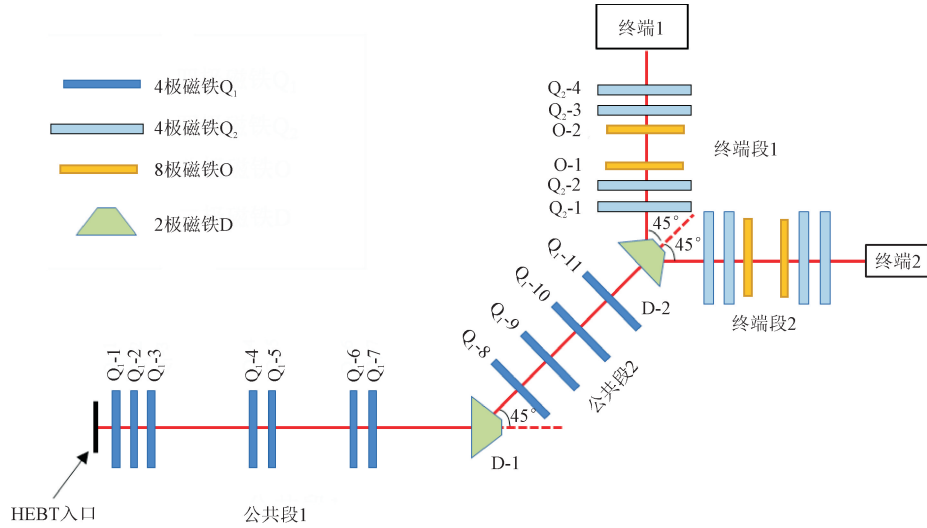


图 3 HEBT 布局示意图

Fig. 3 Schematic layout of the HEBT line

2.4 束流动力学设计与模拟

(1)公共段 1 和公共段 2。公共段 1 和公共段 2 束流动力学设计目标为控制束流包络,避免束流损失。在公共段 1 和公共段 2 采用相同型号的 4 极磁铁 Q_1 , Q_1 有效长度为 200 mm,孔径为 80 mm。

在公共段 1 采用了 1 组 3 单元 4 极磁铁和 2 组双单元 4 极磁铁,共 7 台 Q_1 磁铁来控制束流包络。

在束流动力学中我们采用全体束流位置的整数倍均方根值来表征束流的边界和包络,即均方根包络。对于高斯分布的束流,3 倍均方根包络可以包

含 95% 以上的粒子。公共段 1 的 3 倍均方根包络控制在 20 mm 以内,距真空管道边界 12 mm,有较大余量。

在公共段 2 采用了 FODO 结构,通过 4 台 4 极磁铁交替聚焦,对束流包络进行控制,在实现束流无损传输的同时,减小 2 极磁铁 D-2 处的包络。经过优化的公共段 1 和公共段 2 的横向 3 倍均方根包络沿纵向位置的分布如图 4 所示。最大 3 倍均方根包络约为 27 mm,相较于束流管道半径 36 mm,还有 9 mm 的余量。2 个 2 极磁铁处 y 方向的 3 倍均方根包络均小于 10 mm。

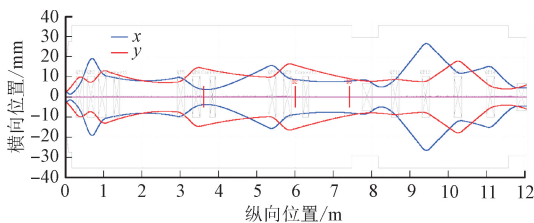


图 4 公共段 1 和公共段 2 的 3 倍均方根包络

Fig. 4 Three times the root mean square beam envelopes in common section 1 and common section 2

(2) 终端段 1 和终端段 2。终端段 1 和终端段 2 的长度和布局完全一致,终端长约 5.08 m,但由于靶站的屏蔽需求,仅有前 3.2 m 范围能放置磁铁。终端段的束流动力学设计需要考虑包络控制、束流均匀化以及束斑尺寸调节。

束流均匀化要求束斑在 8 极磁铁位置呈现扁平束,因此常规的带 8 极磁铁的束流动力学设计会在每个 8 极磁铁之前放置 1-2 台 4 极磁铁,用于调节 8 极磁铁处的束斑横纵比,即交错型均匀化方案^[8]。但由于空间限制,交错型均匀化布局方案难以满足要求。经过优化磁铁,本研究的 HEBT 布局采用了 Doublet+O+O+Doublet 的布局方式。其中,Doublet 表示 4 极磁铁,O 表示 8 极磁铁。该布局先用 1 组 2 单元 4 极磁铁对束流进行控制,在 8 极磁铁 O_1 处产生 y 方向大, x 方向小的扁平束,后经由束流自身的聚焦和发散作用,在 O_2 的位置处产生 x 方向大, y 方向小的扁平束, O_1 和 O_2 处的束斑如图 5 所示。

通过一组双单元 4 极磁铁,同时满足了 2 个 8 极磁铁对束斑横纵比的需求,极大地节省了束流均匀化所需的束线长度。在 O_2 之后用一组 Doublet 控制束流包络,在靶上产生 $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 的束斑,得到终端 1 束流包络如图 6 所示。

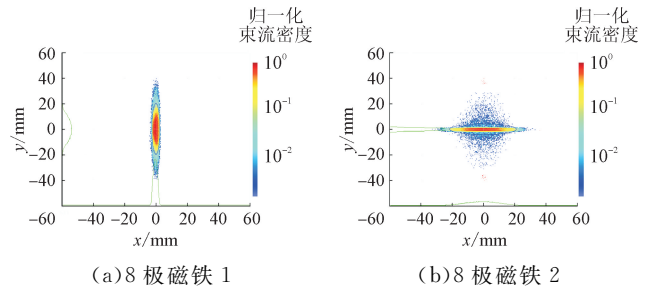


图 5 8 极磁铁处的束斑形状

Fig. 5 Beam spot distributions at the locations of octupole magnets

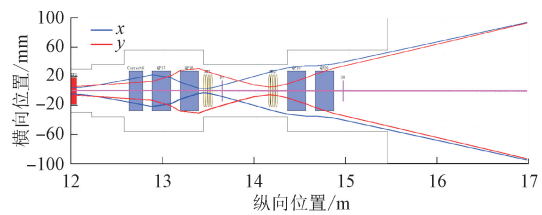


图 6 终端 1 的 3 倍均方根包络

Fig. 6 Three times the root mean square beam envelopes at terminal 1

终端段 2 的布局与终端段 1 完全相同,但由于偏转方向不同,在色散函数和 8 极磁铁高阶场的影响下,终端 1 和终端 2 的束斑有明显区别:终端 1 经过 2 次向左偏转,导致束流偏向左侧,最终的束斑左侧密度大于右侧;终端 2 先经过向左偏转,再向右偏转,最终束斑右侧密度大于左侧^[21]。终端 1 和终端 2 的 x - y 相平面束流分布情况如图 7 所示。

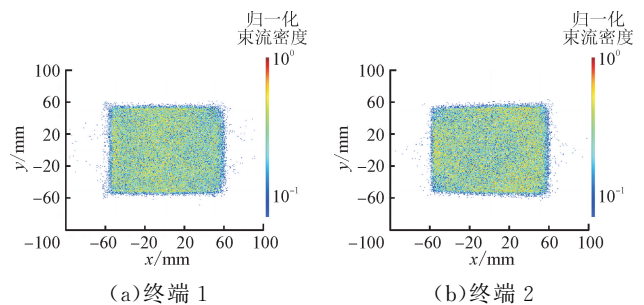
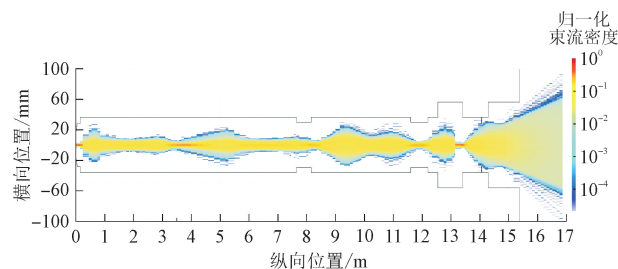


图 7 两个终端的束斑在 x - y 平面的分布情况对比

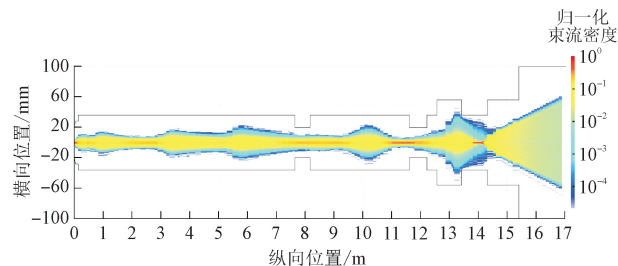
Fig. 7 Comparison of beam spot distribution of two terminals

(3) HEBT 全长模拟。采用 TraceWin 的多粒子追踪模式对 HEBT 全长进行模拟,并设定入口粒子数为 99 515,得到束流全长的 3 倍均方根包络和归一化束流密度分布如图 8 所示。束流在公共段 1 和公共段 2 的密度边界到束流管道均保留有 5 mm 以上的空间,可以保证束流不会丢失在管道上。在终端段 8 极磁铁的位置处,由于管道尺寸缩小,束流

边缘贴近管道,造成了少量粒子丢失,可在 8 极磁铁前设置刮束器,刮除多余粒子,从而保护管道。



(a) x 方向束流密度分布

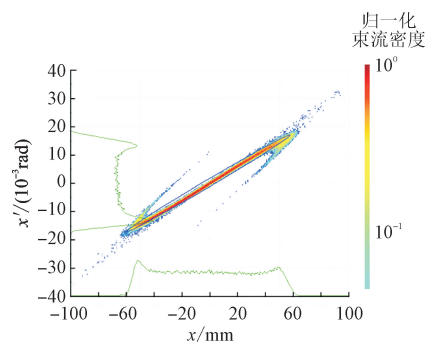


(b) y 方向束流密度分布

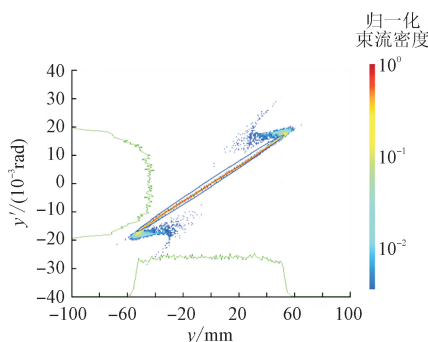
图 8 HEBT 全长归一化束流密度分布

Fig. 8 Normalized beam density distribution along the full length of the HEBT line

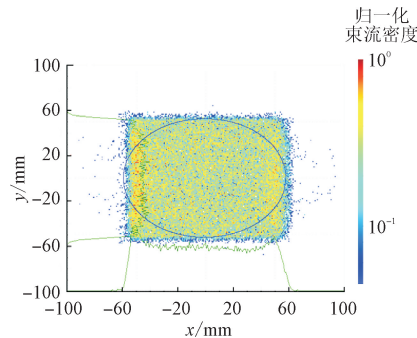
出口束斑 x 方向和 y 方向半高宽约为 ± 55 mm,束斑成规则的方形,具有较好的均匀化效果,且传输效率大于 99.96%。同时 $x-x'$ 和 $y-y'$ 相平面的相图在 8 极磁铁的非线性作用下产生畸变,呈现了“S 化”的效果,如图 9 所示。



(a) $x-x'$ 相平面



(b) $y-y'$ 相平面



(c) $x-y$ 相平面

图 9 HEBT 出口束流相图

Fig. 9 Beam phase space diagrams at the HEBT exit

(4) HEBT 磁铁参数。2 极磁铁 D_1 和 D_2 参数完全相同,为适应空间布局,2 极磁铁的偏转半径设置为 328 mm;为简化 2 极磁铁结构,设置 2 极磁铁的边缘角为 0° 。通过束流动力学模拟可知,束流在 2 极磁铁内主要分布在中心 ± 15 mm 范围内,因此规定 2 极磁铁束流清晰区为 32 mm,按照束流清晰区为磁间隙的 80% 计算,则 2 极磁铁磁间隙确定为 40 mm,在满足束流动力学要求的同时,可以尽可能缩小磁铁体积。

HEBT 共采用了 2 种 4 极磁铁,分别为 4 极磁铁 Q_1 和 4 极磁铁 Q_2 ,孔径分别为 80 mm 和 120 mm。公共段 1 和公共段 2 处束流包络较小,可以选择小孔径的 Q_1 。终端包络较大,因此选择孔径较大的 Q_2 。由于空间限制,8 极磁铁 O 的有效长度为 100 mm,为保证磁场均匀度, O 的孔径不能过大。综合考虑后确定 O 的孔径为 80 mm。4 极磁铁和 8 极磁铁的具体参数如表 2 所示。

表 2 4 极磁铁和 8 极磁铁参数

Table 2 Parameters of quadrupole and octupole magnets

参数	数值		
	4 极磁铁 Q_1	4 极磁铁 Q_2	8 极磁铁 O
有效长度/mm	200	200	100
孔径/mm	80	120	80
数量	11	8	4

2.5 束斑均匀度计算

在束斑区域内均匀地划分网格,统计每个网格中的粒子数,将所有网格粒子数的均方根值与平均值的比值定义为束斑的不均匀度。束斑均匀度 F 计算表达式为

$$F = 1 - \frac{2 \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (N_i - N_{ave})^2 \right] / n}}{N_{ave}} \quad (6)$$

式中: N_i 为第 i 个网格的粒子数; N_{ave} 为网格中粒子数的平均值; n 为网格数。

束斑均匀度的计算结果与网格宽度、网格边界的选取有关。束斑均匀度随网格宽度的变化如图 10 所示。当网格宽度过小时, 网格中粒子数较少, 统计误差较大, 导致均匀度偏低。

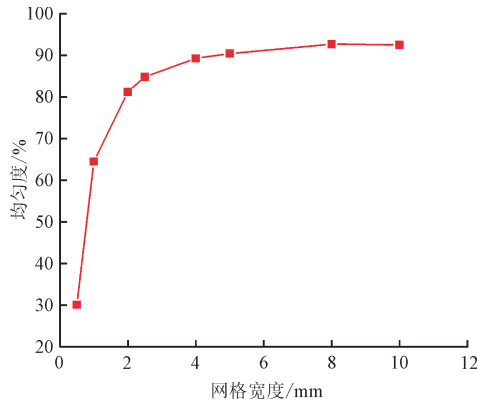


图 10 束斑均匀度随网格宽度的变化

Fig. 10 Dependence of beam spot uniformity on grid width

束斑均匀度随网格边界的变化如图 11 所示。当边界过大时, 外围网格中的粒子数较少, 导致计算的均匀度显著偏低; 当网格边界宽度超过 55 mm 时, 均匀度明显降低。

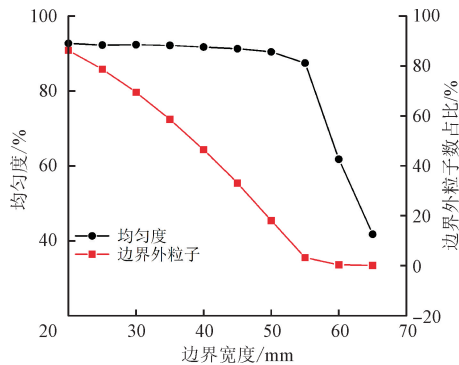


图 11 束斑均匀度随网格边界宽度的变化

Fig. 11 Dependence of beam spot uniformity on grid boundary width

由图 10 和图 11 可知, 网格边界宽度为 50 mm (90% 束流边界), 网格宽度为 5 mm, 每个网格中的粒子数约为 200~500 个时, 可以获得稳定的均匀度计算结果, 计算得到束斑均匀度为 90.10%, 满足均匀度大于 80% 的设计目标。

2.6 束斑尺寸调节

通过调节最后 2 个 4 极磁铁, 可以改变靶上束斑尺寸, 微调 8 极磁铁参数, 可以保证在不同的束斑

尺寸下保持束斑的均匀分布。图 12 展示了束斑半高宽分别为 50、70、90、130 mm 的束斑分布。

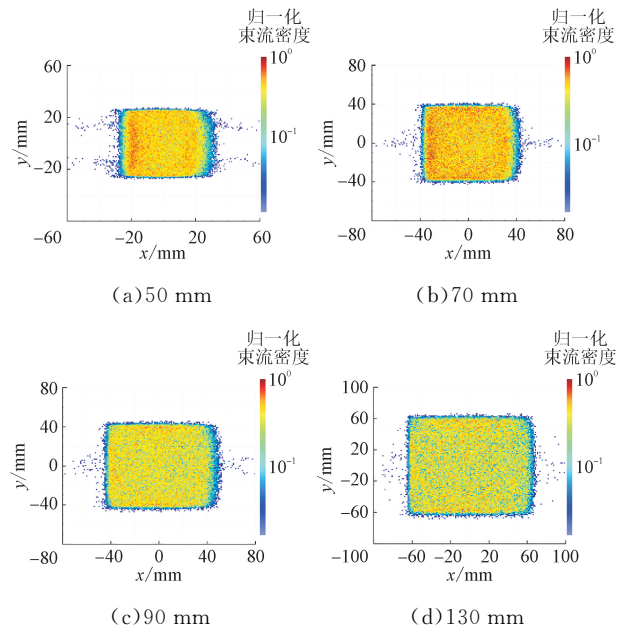


图 12 不同束斑尺寸的束斑在 x - y 平面的分布情况

Fig. 12 Beam distribution in x - y plane for various beam spot sizes

靶上束斑尺寸可以在 50~130 mm 范围内变化, 通过调节 8 极磁铁的极面场强度, 可以保证传输效率大于 99.9%, 束斑 90% 范围内均匀度均大于 86%。通过调节 8 极磁铁磁场强度和最后 2 个 4 极磁铁的磁场梯度, 可以保证不同束斑尺寸下 HEFT 传输效率均大于 99.9%, 均匀度大于 86%, 如图 13 所示。

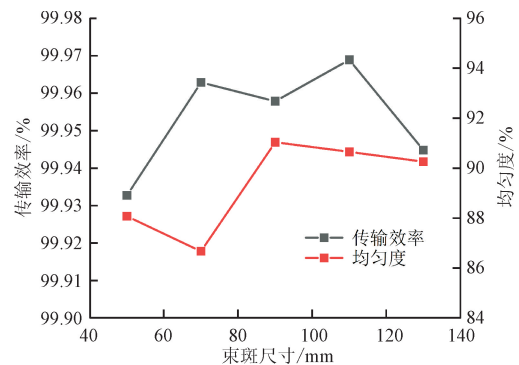


图 13 传输效率和束斑均匀度随束斑尺寸的变化

Fig. 13 Dependence of transmission efficiency and beam spot uniformity on beam spot size

3 误差分析

HEBT 的动力学误差来源可分为两类: 第一类是入口束流参数的误差, 即入口束流非理想; 第二类

是磁铁元件误差,包括磁铁的准直误差和磁场误差。误差不可消除,而且会造成 HEBT 在非理想情况下进行束流传输,造成传输结果偏离模拟结果,造成传输效率的降低及均匀度的下降。因此需要分析 HEBT 对各类误差的冗余,确保 HEBT 在带误差情况下的束流传输能力。

3.1 入口束流误差

入口束流误差是指入口束流参数偏离理想值,其中包括束流强度变化、束流相空间偏移,以及 Twiss 参数不匹配度。

(1)束流强度误差。HEBT 传输效率和网格边界 ± 50 mm 内束斑均匀度随束流强度的变化如图 14 所示。由图可知,束流强度在 0~20 mA 范围内,可以保持超过 99.96% 的传输效率。当束流强度大于 20 mA 时,由于空间电荷效应增强,束流更容易发散,从而使得传输效率随束流强度的增大而减小。在 0~40 mA 束流强度范围内,HEBT 传输效率始终能保持大于 99.90%。束流均匀度在束流强度为 20 mA 时达到最高,在束流强度在 20 mA $\pm$ 5 mA 范围内可以保持在 80.00% 以上的均匀度,该结果证明了 HEBT 动力学方案对束流强度有较好的冗余度。

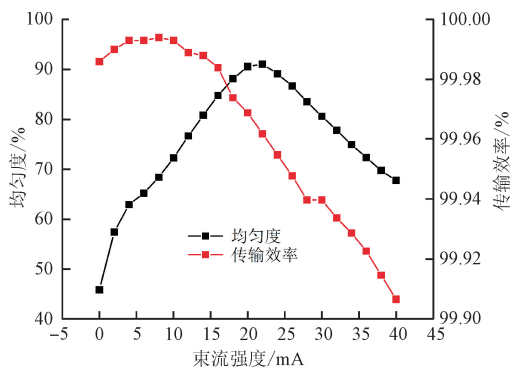


图 14 传输效率和均匀度随束流强度的变化

Fig. 14 Dependence of transmission efficiency and uniformity on beam current

(2)横向接收度。HEBT 具有较宽的横向接收度,如图 15 所示,在 x 方向位置偏移 ± 10 mm,散角偏移 $\pm 40 \times 10^{-3}$ rad, y 方向偏移 ± 5 mm,散角偏移 $\pm 40 \times 10^{-3}$ rad 的范围内,都存在可接收区域。 y 方向的位置接收度小于 x 方向,是因为在 2 极磁铁的 y 方向间隙小于 x 方向间隙,当位置偏差超过 5 mm 时,粒子在 2 极磁铁位置发生了大量丢失。

HEBT 在横向相空间有较大接收度,但束斑的

均匀度对初始位置和散角较为敏感,如图 16 所示,当位置偏差大于 2 mm,散角偏差大于 5×10^{-3} rad 时,均匀度低于 10%。原因是在 8 极磁铁处,如果束流偏心,8 极磁铁对束流的作用不对称,造成束流不能被很好地均匀化。要保证终端束斑均匀度大于 80%,则入口位置误差小于 ± 0.2 mm,散角误差小于 $\pm 2 \times 10^{-3}$ rad。

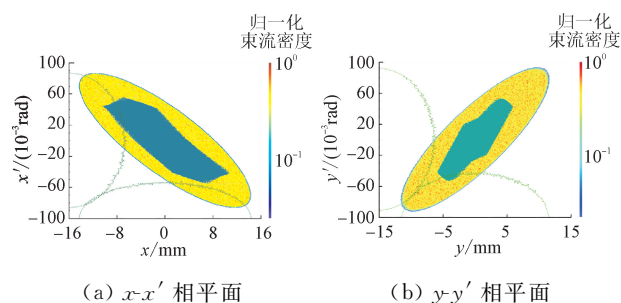


图 15 HEBT 入口束流横向接收度

Fig. 15 Transverse beam acceptance at the HEBT entrance

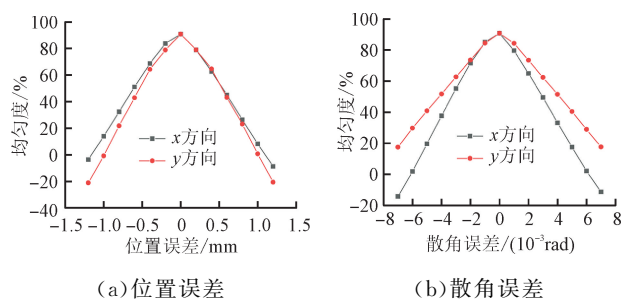


图 16 束流横向位置误差和横向散角误差对束斑均匀度的影响

Fig. 16 Impact of transverse displacement error and transverse angular error on beam spot uniformity

3.2 磁铁误差

磁铁误差主要分为磁场均匀度误差和准直误差。磁场均匀度误差源于高阶谐波和边缘场效应导致的实际磁场与理论值偏差,会增加非线性效应。准直误差指磁铁在安装时产生的 6 自由度偏差 (x 、 y 、 z 位移及绕三轴旋转),会引起束流偏心、轨道畸变和横纵向耦合,影响束流均匀化。这些误差又可分为静态和动态两类:静态误差(如定位误差、磁场均匀度误差)在生产安装后即固定为常数;动态误差(如地基下沉、温湿度变化等)则随时间变化,其值通常比静态误差小 1~2 个数量级^[20-21]。

磁铁误差的大小具有一定的随机性,在一定幅值范围内随机分布。因此,在分析 HEBT 带磁铁误差情况下的束流传输能力时,在每个磁铁上添加在

幅值范围内随机均匀分布的误差。

4 极磁铁的磁场均匀度误差与磁铁的长径比有关,磁铁长径比越大,可以达到的磁场均匀度越高。本研究采用了 2 种不同尺寸的 4 极磁铁,根据工程经验, Q_1 和 Q_2 的磁场不均匀度幅值分别选择

0.2%和 0.5%。磁铁的定位精度与激光跟踪仪精度有关,通常激光准直仪的平移准直精度可以达到 ± 0.1 mm,旋转精度可以达到 0.1° 。在计算中,精度范围在工程可达到的基础上乘以安全系数 2。最终误差分析的误差幅值取值如表 3 所示。

表 3 误差分析中的磁铁参数误差幅值

Table 3 Amplitudes of magnets parameters errors used for error studies

误差参数	数值			
	4 极磁铁 Q_1	4 极磁铁 Q_2	8 极磁铁 O	2 极磁铁 D
x 方向位移静态误差/mm	0.20	0.20	0.20	0.20
x 方向位移动态误差/mm	0.02	0.02	0.02	0.02
y 方向位移静态误差/mm	0.20	0.20	0.20	0.20
y 方向位移动态误差/mm	0.02	0.02	0.02	0.02
x 方向旋转静态误差/ $^\circ$	0.20	0.20	0.20	0.20
x 方向旋转动态误差/ $^\circ$	0.02	0.02	0.02	0.02
y 方向旋转静态误差/ $^\circ$	0.20	0.20	0.20	0.20
y 方向旋转动态误差/ $^\circ$	0.02	0.02	0.03	0.02
z 方向旋转静态误差/ $^\circ$	0.20	0.20	0.20	0.20
z 方向旋转动态误差/ $^\circ$	0.02	0.02	0.03	0.01
磁场不均匀度静态误差/%	0.20	0.50	0.50	0.20
磁场不均匀度动态误差/%	0.02	0.05	0.05	0.01

取多组随机误差分别进行束流传输模拟,消除误差偶然性。经过 1 000 次的随机误差模拟,得到束斑出口束流相图如图 17 所示。

根据 1 000 次随机误差密度分布可知,在带误差情况下,束流横向尺寸大于理想情况,会有部分束晕粒子丢失在真空管道上。1 000 次随机

误差模拟中的束斑均匀度和传输效率统计如图 18 所示,在 1 000 次随机误差模拟中,传输效率均大于 96.0%。其中,传输效率大于 99.9% 的次数占总数的 9.0%,而均匀度大于 80% 的次数仅占总数的 7.5%,可见误差对束斑均匀度影响较大。

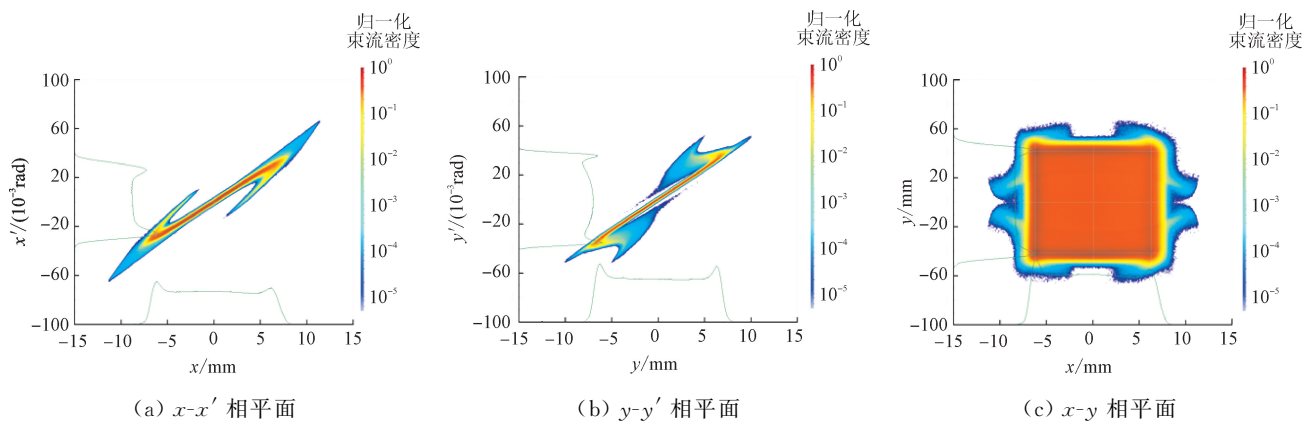


图 17 1 000 次随机误差叠加的出口束流相图

Fig. 17 Phase space distribution at the exit with the superposition of 1 000 random errors

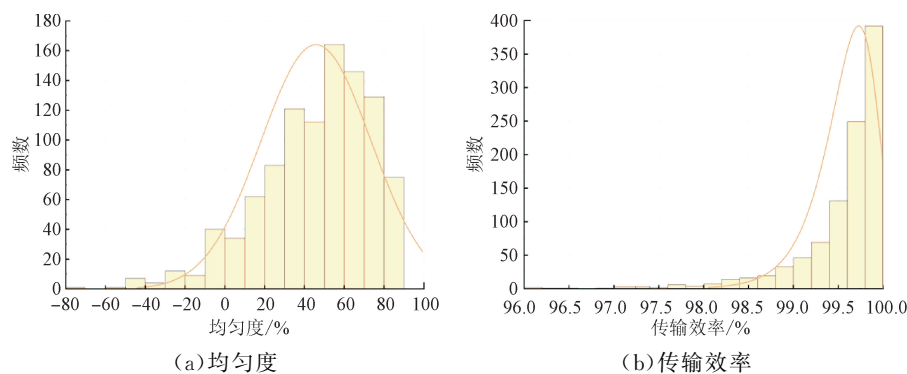


图 18 1 000 次随机误差模拟的均匀度和传输效率统计

Fig. 18 Statistical analysis of uniformity and transmission efficiency based on 1 000 iterations of random error simulation

3.3 束流中心校正

入口束流参数偏移和磁铁位置误差引起了束流轨道中心偏离理想中心,造成磁铁对束流的作用不对称,并带来束流相空间畸变、束流均匀度降低及束流丢失。从 3.2 节误差分析可知,带误差情况下,束流传输效率和均匀度出现了明显的降低,因此需要对束流进行校正,以提高 HEBT 对误差的冗余度。

工程中常用束流位置探测器(BPM)与校正磁铁组合校正束流轨道中心^[22]。BPM 通过测量其内壁上下左右四块极板上的感应电流来定位束流中心:束流感应电流的大小与其到对应极板的距离正相关,比较相对极板电流即可推算中心位置^[23-24]。校正磁铁则产生横向磁场,使通过的束流发生偏转。通过调节磁场强度控制偏转角度,即可将束流中心校正回理想位置^[25]。

根据 HEBT 空间分布,在 HEBT 全长共布置了 8 台 BPM,用于探测束流经过磁铁的位置。相应的,布置了 7 台双向校正磁铁 C1~C7,双向校正磁铁可在 x 和 y 方向上均产生校正磁场,2 个方向的磁场由 2 台独立的电源控制,可分别调节磁场强度。校正磁铁有效长度 150 mm,孔径 120 mm。校正磁铁和 BPM 位置如图 19 所示。

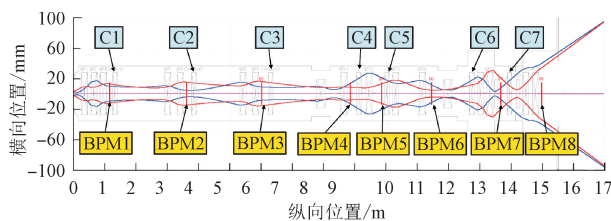


图 19 BPM 和校正磁铁位置示意图

Fig. 19 Schematic diagram of the positions of BPM and correction magnets

应用 TraceWin 的诊断功能对带校正的束流传输进行模拟,其校正策略为:每台校正磁铁调节其前方

1 台 BPM 处的束流中心位置,允许误差范围为 ± 0.05 mm。在与 3.2 节相同的误差条件下,进行 1 000 次随机误差模拟,得到带校正情况下的全长归一化束流密度分布和出口束流相图如图 20 和图 21 所示。

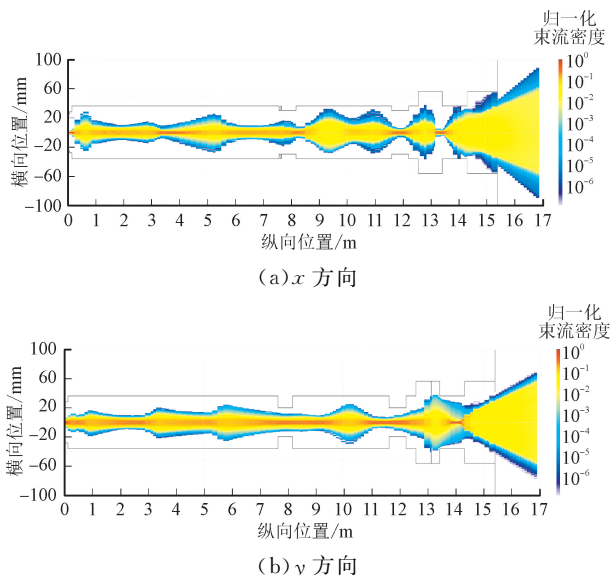
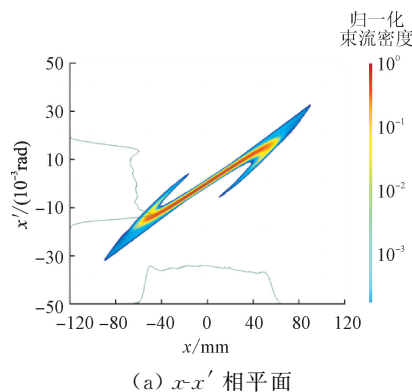


图 20 带束流中心校正下的 1 000 次随机误差叠加的全长归一化束流密度分布

Fig. 20 Normalized beam density distribution after the superposition of 1 000 random errors, with beam center correction applied

(a) x - x' 相平面

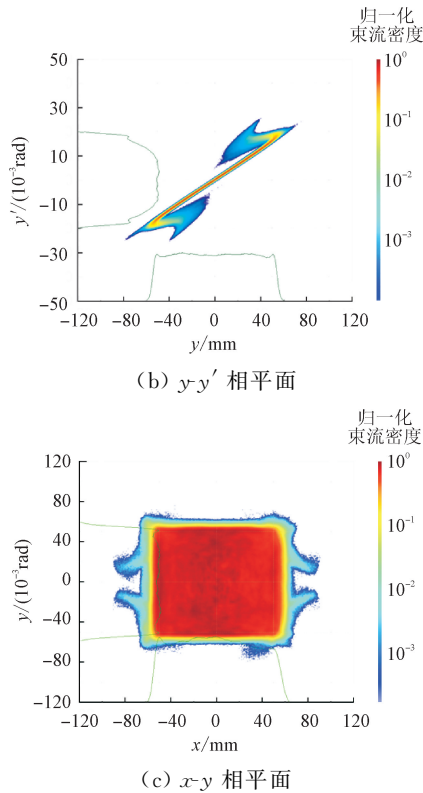


图 21 带束流中心校正下 1 000 次随机误差模拟叠加的束流出口相图

Fig. 21 Beam phase space distribution at the exit, with the superposition of 1 000 random errors and beam center correction applied

带校正和不带校正的 1 000 次随机误差的平均束流中心位置如图 22 所示。

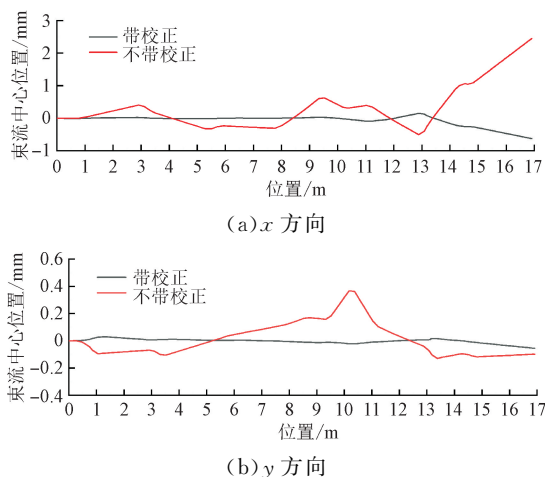


图 22 带校正磁铁和不带校正磁铁的束流中心位置对比
Fig. 22 Comparison of beam center positions with and without the application of correction magnets

不带校正时,束流 y 方向束流中心最大偏移达到了 0.4 mm; x 方向受到 2 极磁铁的影响,偏移量

大于 y 方向,在 8 极磁铁之前达到了 1.0 mm。偏离中心的束斑经过 8 极磁铁时,在非线性力的作用下束斑变得不对称,加大了束流中心的偏移,最大偏移达到了 2.5 mm。经过校正后, y 方向偏移量在 ± 0.1 mm 之内, x 方向的偏移量在 ± 0.5 mm 以内,可见校正磁铁明显减小了束流中心的偏移。

带校正的 1 000 次随机误差模拟中 HEBT 的传输效率和束斑均匀度的分布情况统计如图 23 所示。带校正磁铁后,1 000 次误差运算的传输效率均大于 99.84%,其中大于 99.90% 的次数占总运行次数的 82%;1 000 误差运算的均匀度始终大于 78%,其中均匀度超过 80% 的次数占比超过 99%。相比于不带校正情况下,传输效率和均匀度都有了明显提升。

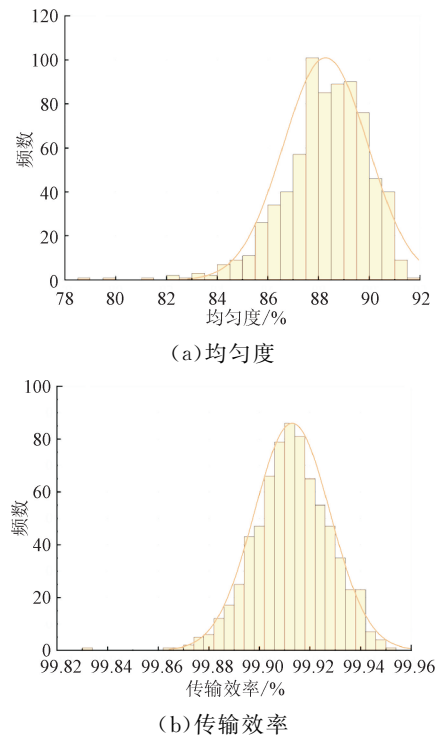


图 23 带校正的 1 000 次随机误差模拟中均匀度和传输效率分布统计

Fig. 23 Distribution profiles of uniformity and transmission efficiency in 1 000 random error simulations with calibration

4 结 论

本文针对双终端强流加速器中子源进行了束流动力学分析及均匀化研究,并基于 8 极磁铁进行了束流均匀化分析,得到如下结论。

(1) 完成了双终端的强流加速器中子源 HEBT 动力学设计,利用双向偏转 2 极磁铁实现对双终端

的供束,实现将质子能量 2.8 MeV、束流强度 20 mA 的连续波质子束从加速器出口传输到终端靶站,且传输效率大于 99.90%。

(2)采用 2 台 8 极磁铁对双终端束斑进行均匀化处理。为适应空间布局需求,提出 Doublet+O+O+Doublet 的磁铁布局,在终端段 3.2 m 的空间内完成对束流包络的控制使其满足束流均匀化的要求,实现靶上束斑尺寸 110 mm×110 mm,90% 边界内均匀度大于 90%。

(3)通过调节终端段的 4 极磁铁和 8 极磁铁参数,可以调节靶上束斑尺寸,实现束斑边长在 50 mm~130 mm 范围内的束斑调节,并且通过调节 8 极磁铁极面场强度,保证不同尺寸的束斑均匀度均大于 86%。

(4)通过误差分析,研究了 HEBT 在非理想条件下的束流传输能力。通过校正磁铁对束流中心的校正,可以保证 HEBT 在非理想条件下仍具有大于 99.84% 的传输效率,均匀度大于 80% 的概率达到 99%。证明 HEBT 在工程允许的误差范围内具有足够的误差冗余,验证了束流动力学设计的可靠性。

参考文献:

- [1] IAEA. Compact accelerator based neutron sources [M]. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2021.
- [2] TASKAEV S Y. Accelerator based epithermal neutron source [J]. Physics of Particles and Nuclei, 2015, 46(6): 956-990.
- [3] UESAKA M, KOBAYASHI H. Compact neutron sources for energy and security [J]. Reviews of Accelerator Science and Technology, 2015, 8: 181-207.
- [4] MENG Cai, TANG Jingyu, PEI Shilun, et al. Mismatch study of C-ADS main linac [J]. Chinese Physics: C, 2015, 39(9): 097002.
- [5] LI Xiaoni, YUAN Youjin, XIAO Chen, et al. Beam dynamics simulation of HEBT for the SSC-linac injector [J]. Chinese Physics: C, 2012, 36(11): 1126-1131.
- [6] ESHRAQI M, DE PRISCO R, MIYAMOTO R, et al. Statistical error studies in the ESS linac [C]//5th International Particle Accelerator Conference, Geneva, Switzerland: JACoW Publishing, 2014: 3323-3325.
- [7] 胡耀程, 范晶晶, 谢宇鹏, 等. 脉冲束流下车载加速器中子源靶传热特性 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(7): 84-93.
HU Yaocheng, FAN Jingjing, XIE Yupeng, et al. Heat transfer characteristics of transportable accelerator neutron source targets under pulsed beam [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(7): 84-93.
- [8] 李晓博, 胡耀程, 范晶晶, 等. 用于车载加速器中子源的边缘冷却靶结构研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(6): 160-171.
LI Xiaobo, HU Yaocheng, FAN Jingjing, et al. Edge-cooling target structure for transportable accelerator-driven neutron source [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(6): 160-171.
- [9] 杨新宇, 郭刚, 彭朝华. 基于八极磁铁的束流均匀化设计方法 [J]. 现代应用物理, 2022, 13(3): 64-69.
YANG Xinyu, GUO Gang, PENG Zhaohua. Design method of beam homogenization based on octupole magnet [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 64-69.
- [10] 王常强, 向益淮, 李金海, 等. 地面模拟空间电子环境束流均匀化设计 [J]. 核技术, 2020, 43(12): 25-32.
WANG Changqiang, XIANG Yihuai, LI Jinhai, et al. Design of beam homogenization for ground simulation of space electron environment [J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(12): 25-32.
- [11] HOLM A I S, MÖLLER S P, THOMSEN H D. The high energy beam transport system for the European spallation source [C]//Proceedings, 2nd International Conference, IPAC 2011. [S. l.: s. n.], 2011: 3540-3542.
- [12] 李金海, 张立锋, 曾自强. 电子辐照加速器束流扫描均匀化研究 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(S2): 564-568.
LI Jinhai, ZHANG Lifeng, ZENG Ziqiang. Research of homogenizing scanned beam of electron irradiation accelerator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(S2): 564-568.
- [13] 贾波磊. 质子治疗多极扫描磁铁的研究 [D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2019.
- [14] 陈威. 用于质子治疗的八极扫描磁铁研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [15] FURUKAWA T, SHIRAI T, INANIWA T, et al. Development of fast scanning magnets and their power supply for particle therapy [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1-4.
- [16] 王磊, 罗箐, 王琳, 等. HLS 脉冲八极磁铁注入方案设计与研究 [J]. 核技术, 2015, 38(6): 060105.
WANG Lei, LUO Qing, WANG Lin, et al. Study of injection scheme of a pulsed octupole magnet for HLS storage ring [J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(6): 060105.
- [17] GUO Zhen, TANG Jingyu, YANG Zheng, et al. A

- novel structure of multipole field magnets and their applications in uniformizing beam spot at target [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research; Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 691: 97-108.
- [18] TANG Jingyu, DENG Changdong, WU Xi, et al. Design and prototyping of simplified multipole magnets [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research; Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 915: 10-16.
- [19] TSOUFAS N. Uniform beam distributions of charged particle beams [J]. AIP Conference Proceedings, 2011, 1336(1): 11-15.
- [20] 贾欢, 何源, 原有进, 等. ADS注入器II的5 MeV 高能传输线的设计与搭建 [J]. 原子核物理评论, 2016, 33(3): 286-290.
- JIA Huan, HE Yuan, YUAN Youjin, et al. Design and setup of 5 MeV HEBT line of the CIADS injector scheme II [J]. Nuclear Physics Review, 2016, 33(3): 286-290.
- [21] MENG Cai, LI Zihui, TANG Jingyu. Error analysis and lattice improvement for the C-ADS Injector-I [J]. Chinese Physics; C, 2014, 38(6): 067008.
- [22] YANG Xuhui, CHEN Youxin, WANG Jinqiang, et al. Online beam orbit correction of MEFT in CiADS based on multi-agent reinforcement learning algorithm [J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 179: 109346.
- [23] TEJIMA M. Beam based calibration for beam position monitors [C]//Proceedings of International Beam Instrumentation Conference. Geneva, Switzerland: JA-CoW Publishing, 2016: 266-272.
- [24] HE Jun, SUI Yanfeng, LIANG Chongyang, et al. Preliminary analysis of beam position monitor accuracy [J]. Symmetry, 2024, 16(5): 566.
- [25] 周建新, 康文, 李帅, 等. CSNS校正磁铁积分场均匀性测量研究 [J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(11): 115105.
- ZHOU Jianxin, KANG Wen, LI Shuai, et al. Research on measurement of integral field uniformity of CSNS corrector magnets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(11): 115105.

(编辑 刘懿莹 赵炜)