

文章编号: 1007-4627(2017)03-0580-06

用于强流中子发生器的低能束流传输线的设计模拟

贾泽华¹, 李公平^{1,†}, 潘小东¹, 魏绪波¹, 武启², 张世旭¹, 吴王锁¹

- (1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 兰州大学设计研发的 ZF-400 强流中子发生器设计 D-T 中子产额 6×10^{12} n/s, 主要由 ECR 离子源、低能束流传输线 (LEBT)、加速管、旋转靶等部分组成。LEBT 负责将从离子源引出的束流进行分析聚焦并注入到加速管中。LEBT 对束流的聚焦及分析的好坏程度决定了加速管中束流的损失程度、中子的产额以及靶的寿命。本工作就该强流中子发生器所需的低能传输线进行了设计。使用螺线管、分析磁铁和四极透镜组合的方案。利用 TRACK 软件对此方案进行模拟, 得到符合要求的束流线及元件的参数。用 TraceWin 进行了验证模拟, 验证结果符合要求。另外, 通过软件模拟确定了杂质离子损失的位置, 据此设计了束流管道冷却方案。通过模拟发现, 这种透镜的组合方式可以让整个 LEBT 以较低的功率获得低损失、高纯度的打靶束流。

关键词: 中子; 强束流; LEBT; 光路模拟

中图分类号: TL501.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.580

1 引言

强流中子发生器及快中子测量系统是特种材料辐照损伤、关键核素截面测量、氦倍增材料研究、中子诊断以及钍基熔岩堆和 ADS 工程相关的关键核数据测量等重大科学研究的基础设备, 特别是在连续直流束打靶产生的中子束下进行测量及研究, 对分析材料特性、确定材料损伤程度、核实验关键数据的统计测量等都有不可比拟的优势。

兰州大学 ZF-400 强流中子发生器的 D-D/D-T 预期中子产额分别为 6.0×10^{10} , 6.0×10^{12} n/s, 相应的打靶束流需 ≥ 40 mA。考虑到传输中的束流损失, 在低能束流传输线 (Low Energy Beam Transport, LEBT) 末端的纯氦流强需 ≥ 50 mA。而离子源引出束流为混合束, 为保证 LEBT 末端的流强能符合要求, 需要离子源引出的束流达到 70 mA。此外, 为保证靶的寿命, 须使用 LEBT 对混合束进行杂质离子的分离。

2 LEBT 方案

LEBT 位于 ECR 离子源和加速管之间。我们参考国内外 LEBT 设计^[1-3], 并结合我们的需求, 设计了图 1 所示的 LEBT 方案。

该方案由螺线管、真空室、分析磁铁及三组合四极

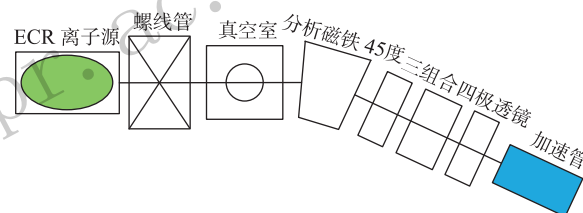


图 1 (在线彩图) LEBT 方案示意图

透镜组成。螺线管对束流进行初步的聚焦调整, 保证进入分析磁铁的束流尺寸不会太大; 真空室部分将安装分子泵及束流诊断装置, 给整个系统提供真空环境并对经螺线管聚焦的束流进行流强及参数的检测; 分析磁铁采用双聚焦二极磁铁, 负责杂质离子的分离并对束流进行聚焦; 三组合四极透镜用来对束流参数进行最后的调整, 完成与加速管的束流匹配。整个 LEBT 长 2.4 m, 与 ECR 离子源一同悬浮于 400 kV 的高压上工作。ECR 离子源和 LEBT 将进行悬浮隔离, 隔离箱的俯视平面尺寸为 $3.2 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ 。

3 束流动力学模拟

对图 1 所示 LEBT 方案进行束流动力学模拟。通过模拟确定各元件的磁场、长度、相对位置等参数, 以便对其进行物理设计。

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器设备研制专项 (21327801)

作者简介: 贾泽华(1991-), 男, 甘肃渭源人, 硕士研究生, 从事核能与核技术研究; E-mail: jiazh14@lzu.edu.cn

† 通信作者: 李公平, E-mail: ligp@lzu.edu.cn.

3.1 设计要求及初始参数

LEBT 的设计目的是将离子源中引出的束流按照要求注入到加速管中。对 LEBT 进行束流动力学计算时，需考虑加速管对注入束流的要求。加速管入口的束流参数要求如表 1 所列。

表 1 加速管入口参数要求

束流参数	参数值
半径	≤ 20 mm
发射角	≤ 30 mrad
状态	发散

加速管要求 LEBT 末端束流的半径不大于 2 cm，发射角不大于 30 mrad，且束流发散，即末端束流 Twiss 参数中的 $\alpha < 0$ 。

离子源引出束流的参数由中国科学院近代物理研究所提供，因束流为直流束，关注其横向发射度即可。具体数据如表 2 所列。

表 2 LEBT 初始束流参数

Transverse	ϵ_n	α	β
x	0.2	-4.52	90.30
y	0.2	-4.52	90.30

表 2 中， ϵ_n 为束流的归一化均方根发射度^[4, 5]； α 、 β 为 Twiss 参数。对于表一中的 x 与 y ， ϵ_n 单位为 $\pi \cdot \text{mmrad}$ ， β 的单位为 cm/rad 。此外，束流的能量为 60 keV，流强 70 mA。引出束流中 D_1^+ ， D_2^+ ， D_3^+ 3 种离子分别占束流的 80%，15%，5%^[1, 4, 6, 7]。我们据上述参数对束流进行模拟。

3.2 空间电荷补偿度的选取

束斑是位于相同 z 轴位置所有离子的二维平面分布图。对于处于此平面上的离子，库仑作用力会使束斑尺寸不断增大，同平面离子更加离散。此外，束流管道存在本底真空度，当带电粒子经过，会把周围气体电离，并吸引相应的反离子，形成“束流中和”^[11, 12]。这些反离子的存在，会减弱库仑发散，一定程度上对束流进行约束，此为空间电荷补偿。它对束流的输运提供了便利。

在 LEBT 方案中，真空室位于螺线管和分析磁铁中间，整个 LEBT 的真空环境由分子泵及机械泵来提供。本底真空度为 10^{-5} Pa，离子源通入气体的流速 2 mL/min，LEBT 的动态真空度为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa。基于以上设计条件，空间电荷补偿度至少可以保证 90%^[7-10]。

3.3 束流动力学模拟

根据表 1 中初始束流参数和上面所述空间电荷补偿度的选取，利用 TRACK 软件^[13, 14]对 LEBT 方案进行束流动力学计算。符合设计要求的束流包络图，如图 2 所示。

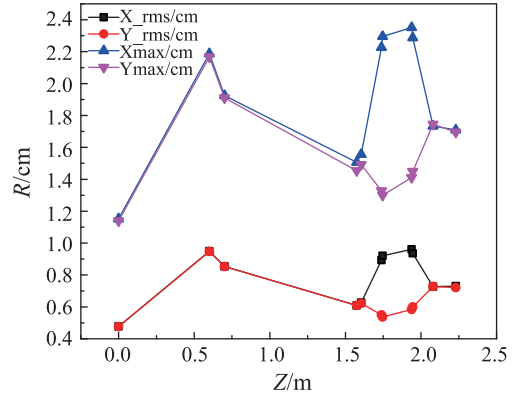


图 2 (在线彩图) 90% 空间电荷补偿度下的束流包络图：
 X_{\max} ， Y_{\max} 分别为 x 与 y 方向最大包络半径， X_{rms} ， Y_{rms} 分别为 x 与 y 方向均方根包络半径

图中的 X_{rms} 和 Y_{rms} 为束流的均方根尺寸。模拟得到的末端束斑尺寸为 $x=1.82$ cm， $y=1.85$ cm，发射角为 10 mrad，符合我们的设计要求。曲线的拐点是各个元件末端的束流尺寸。

图 2 中曲线开始的位置为离子源引出部分末端，束流由此进入低能线的束流管道；经过螺线管部分的聚焦，在螺线管末端的束流半径为 2.5 cm，螺线管中的最大半径为 2.8 cm；经过真空室段的漂移，进入分析磁铁的束流包络半径为 1.7 cm；离开分析磁铁束流半径约为 1.75 cm；束流在 1.65 m 处进入四极透镜，利用 3 组合四极透镜分别对 x ， y ， x 方向进行聚焦，如图 2 中末端“几”字型所示；LEBT 末端的束流尺寸为 1.85 cm。图 3 和图 4 为 LEBT 始末端的束斑图及相图。此外，利用 TraceWin 软件^[4, 18]进行验证模拟，其结果如图 5 所示，束流参数符合设计要求。

对比图 3 和图 4，离子平面分布很近似圆形；初始束斑较末端束斑边缘处离子更加松散，束流发射角相对更大。末端束流呈现发散状态。

x 与 y 的相图中，有两个“尾巴”，这部分尾巴从螺线管之后就开始出现。螺线管部分的计算采用三维真实场。考虑电源的供电能力，设计螺线管机械长度 400 mm，有效作用长度 393 mm，线包孔径 164 mm。通过对比硬边模型和三维模型，发现硬边模型下的相图无“尾巴”；对比两种模型的磁场，硬边模型的轴线磁场为矩形，即在螺线管部分，轴线上各个点的磁感应强

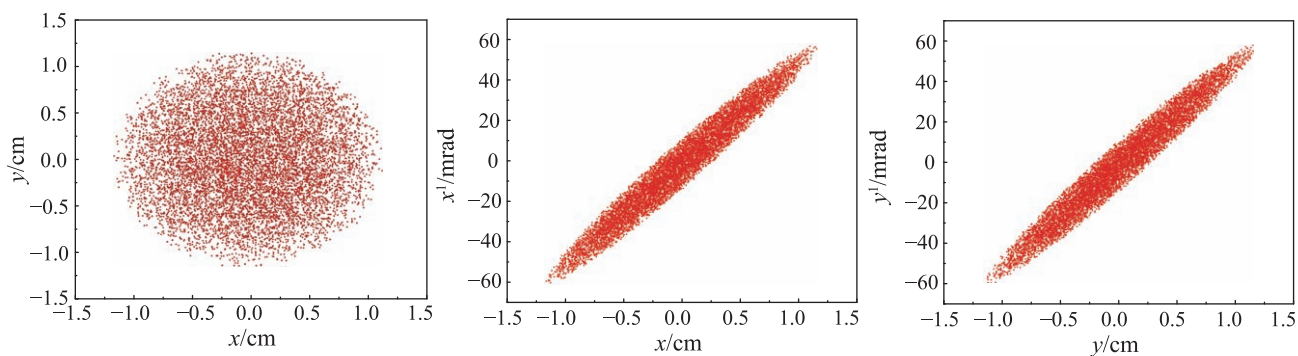


图 3 (在线彩图)LEBT 初始束斑 $(x-y)$ 及相图 $(x-x', y-y')$

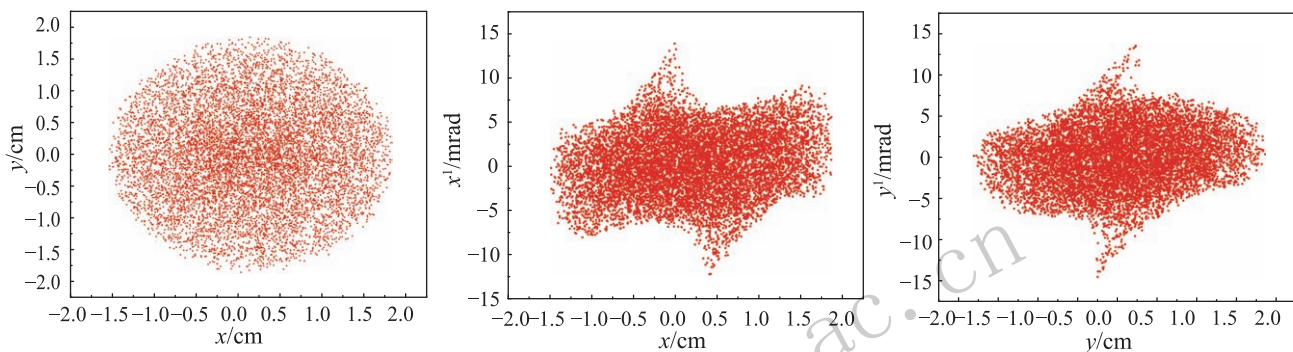


图 4 (在线彩图)90% 中和度下的 LEBT 末端束斑 $(x-y)$ 及相图 $(x-x', y-y')$

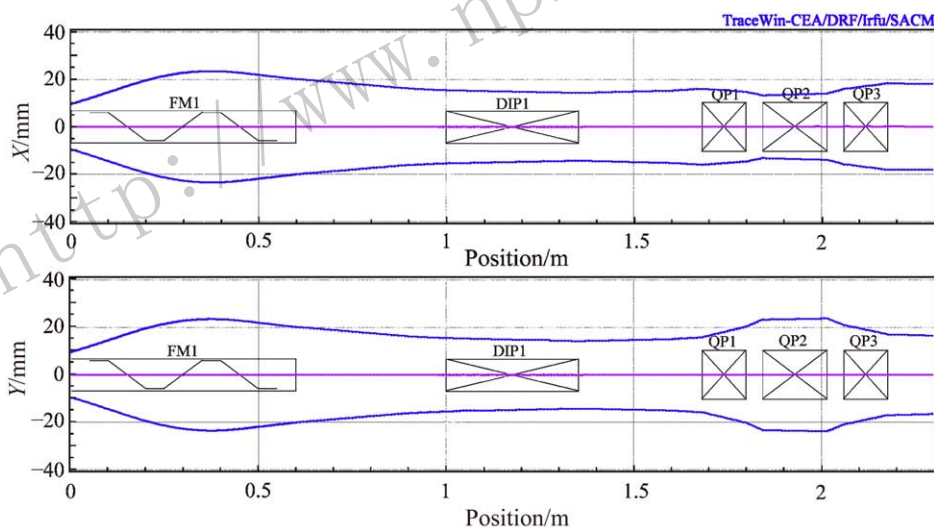


图 5 (在线彩图)TraceWin 模拟的束流包络图

度值相同，而真实三维场有边缘场降落；对比螺线管三维模型不同 R 处的轴向场，发现在 z 轴相同位置处，屏蔽壳外侧的磁场随半径 R 的增大而增大，而在屏蔽壳内侧，磁场随半径 R 的增大而减小；轴向磁场的有效长度随半径 R 增大而增大。

在硬边模型中，螺线管内部的磁场均相同，场有效长度也相同，不同半径处的粒子仍具有相同的像点，故相图不发生畸变。而在三维模型中，不同 R 处轴向磁场具有不同的有效长度，不同半径的粒子经过螺线管，具有了不同的像点，反映到相空间便是相图的畸变，文

献 [15] 对此作了推导并提供了一些改善的建议。

如图 6 所示，比较分析磁铁出入口处束流 x 与 y 方向的相图，发现 x 与 y 方向的束流基本一致。该模拟使用软件自带的硬边界模型进行计算，结果比较理想。真实三维场及实际加工好的分析磁铁，其出口处的束流一般存在不对称现象。因边缘高阶场的作用，会对束流产生非线性影响 [17]，并且这种影响随着束流包络尺寸的增大而增大。可通过提高积分场及横向场的均匀度来减弱这种影响。

动力学计算得到的各元件参数如表 3 所示。对于螺

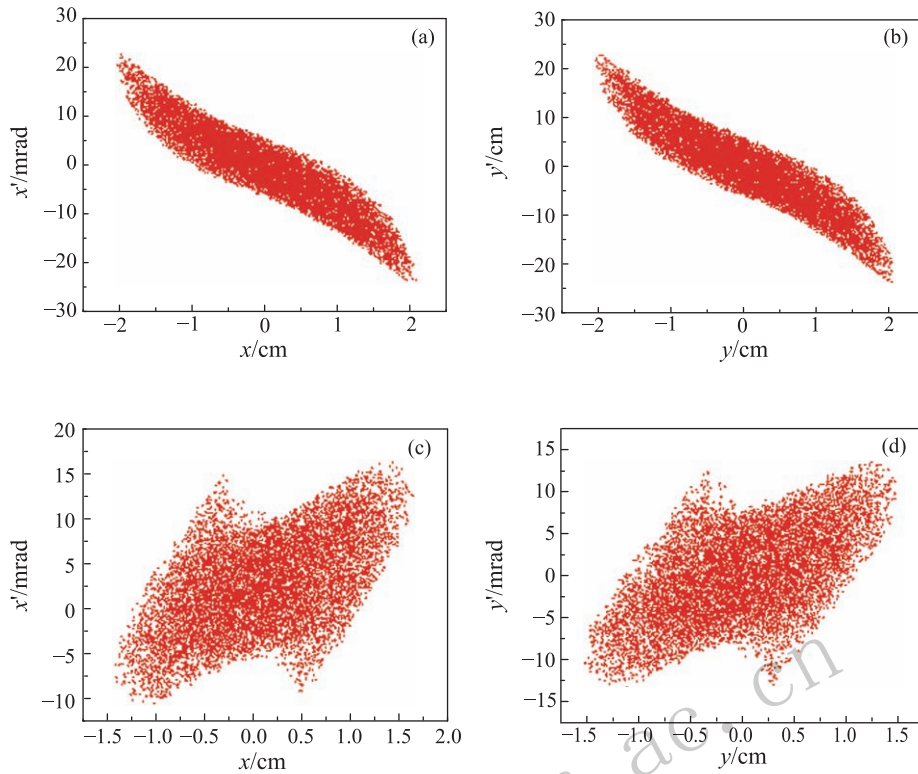


图 6 (在线彩图) 分析磁铁前后束流相图对比: (a)、(b) 分别为分析磁铁入口 x 、 y 方向相图, (c)、(d) 分比为分析磁铁出口 x 、 y 方向相图

表 3 束流动力学计算得到的元件参数

元件	磁感应强度 /GS	长度/mm	偏转角度	半径/mm
螺线管	3 400	400	—	—
分析磁铁	1 108	—	45°	450
四极透镜	—	116, 172, 116	—	60

线管, 考虑实际电源供电能力及对束流的调整能力, 综合因素对其进行优化设计。3 组合四极透镜需确定相对位置, 对其进行建模并分析电磁场, 确定各自的积分长度, 并结合实际线包厚度, 最终确定三组合四极透镜之间的距离均为 10 cm。

3.4 杂质离子损失位置

D^+ 离子束中的杂质离子主要是 D_2^+ , D_3^+ , 70 mA 的总束流, 杂质离子占据 14 mA。这部分杂质束流通过分析磁铁时被分离出来, 主要通过打在真空管道壁上损失掉。14 mA 60 keV 的杂质离子, 打在壁上很容易损坏真空管道。我们需确定离子的损失位置, 以便对真空管道进行重点冷却, 并在主要落点处安装束流垃圾桶。

如图 7 所示, 对于 D_2^+ 离子, 在分析磁铁内部基本无损失; 离开分析磁铁后逐渐开始损失, 并在分析磁铁与四极透镜的管道衔接处有最大损失值, 此处的损失功

率达 625 W。几乎全部的 D_2^+ 离子损失在此位置, 需在此处安放束流垃圾桶并进行重点冷却。对于 D_3^+ 离子, 在进入分析磁铁前就开始损失, 此处的损失源于管道变换, 部分离子损失在分析磁铁矩形管道的上下面; 进入分析磁铁时, 损失有个停止位置, 因边缘场对 y 方向束流的聚焦; 离开分析磁铁后, 开始大量损失, 并在分析磁铁与四极透镜的管道衔接处损失最大, 其最大功率为 118 W。因 D_3^+ 有部分损失在管道上下壁上, 需对该部分进行冷却。

如图 8 所示, 在杂质离子大量损失的位置安放束流垃圾桶, 并对该部分进行重点冷却。此外, 亦可在束流垃圾桶附近的管道上缠绕水冷管。因大部分杂质离子的损失未在主束流线附近, 且传输的离子较轻, 其损失带来的污染较小, 可以暂不考虑。

3.5 束线传输效率

离子源出口流强为 70 mA, 根据初始单原子离子比, 计算束流中的离子密度分布及杂质离子的损失情况。得到该 LEBT 可以保证 LEBT 的束传输效率在 80% 以上, 即末端纯 D 束流的流强可以保证 56 mA, 单原子离子比同样能达到 99% 以上。该 LEBT 传输的束流可以为加速管提供稳定的打靶束流。

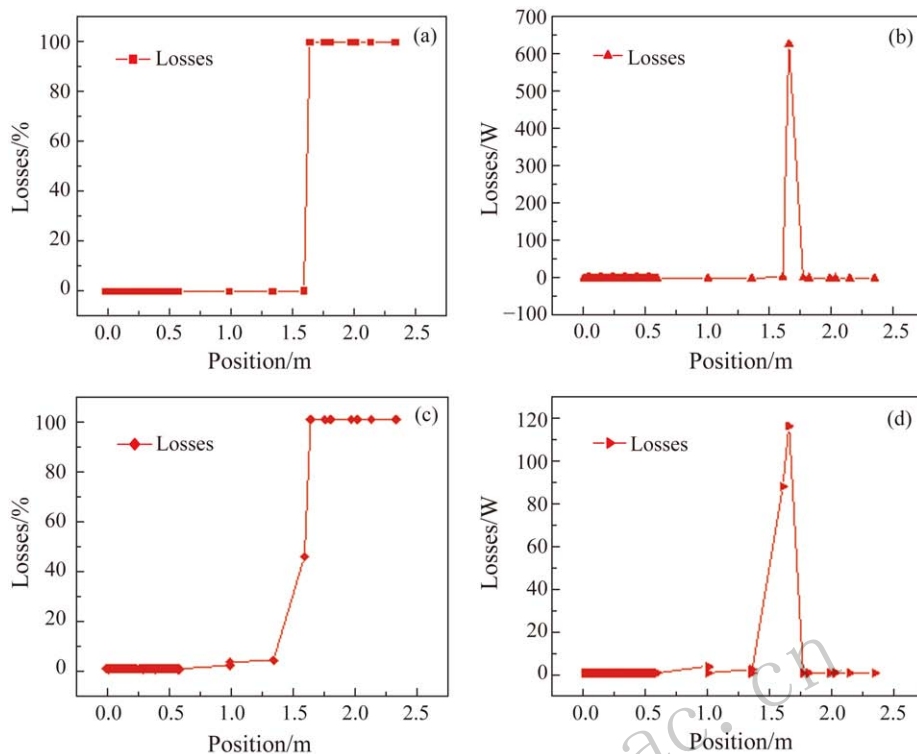


图 7 (在线彩图) 杂质离子的损失比例 (a)(c)、损失功率 (b)(d) 与位置关系图
(a), (b) 为 D_2^+ 的损失图, (c), (d) 为 D_3^+ 的损失图

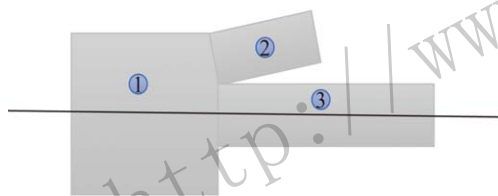


图 8 (在线彩图) 分析磁铁出口管道示意图
1-分析磁铁管道; 2-束流垃圾桶; 3-四极透镜管道。

4 可能存在的问题

整个束流模拟的初始参数亦是模拟得到, 可能影响实际束流传输效率的因素有以下几个方面: (1) 实际束流传输时, 70 mA 强流束的空间电荷补偿度的大小未知; (2) 束流经过分析磁铁, 杂质离子的实际损失位置与理论模拟所得位置存在差距; (3) 整个 LEPT 实际的真空环境。

上述存在的问题会影响 LEPT 的理论传输效率, 不过这些可以根据实际情况, 通过调节螺线管和三组合四极透镜的磁感应强度来对束流进行相应的调整。最终的传输效率较理论值应该差别不会太大。唯一需要注意的是杂质离子的落点, 需在调试过程中逐步确定离子损失具体位置, 并安装相应的冷却装置及束流垃圾桶。

5 结论

为兰州大学强流中子发生器设计了一套 LEPT。通过模拟, 该 LEPT 可以将 60 keV, 70 mA 的束流经过运输提纯后, 注入加速管束流强度在 54 mA 以上, 使用该方案提供的束流流强、参数、单原子离子比等均满足设计要求。通过模拟得到的参数, 后续将进行设备的设计及加工。

参考文献:

- [1] WU Qi, ZHANG Wenhui, YANG Yao, *et al.* Atomic Energy Science and Technology. 2015, **49**(suppl.): 518. (in Chinese) (武启, 张文慧, 杨尧, 等. 原子能科学技术. 2015, **49** (增刊): 518.)
- [2] PENG Shixiang, YUAN Zhongxi, REN Haitao, *et al.* The LEPT Mechanical Design for PKUNIFTY[C]// National Conference of charged ion sources and particle beams, 2010:14. (in Chinese) (彭士香, 袁忠喜, 任海涛, 等. 北京大学中子照相装置 LEPT 的机械设计[C]//全国荷电离子源、粒子束学术会议论文集, 2010:14.)
- [3] HOLLINGER R, BARTH W, DAHL L, *et al.* High current proton beam investigations at the SILHI-LEPT at CEA/SACLAY. Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA.
- [4] PANDE R, SINGH P, RAO S V L S, *et al.* Journal of Instru-

- mentation, 2015, **10**(2): 02001.
- [5] SACHERER F J. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1971, **18**(3): 1105.
- [6] ROYCHOWDHURY P, private communication//PANDE R, SINGH P, RAO S V L S, *et al.* Journal of Instrumentation, 2015, **10**(2): 02001.
- [7] WU Q, SUN L T, CUI B Q, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2016, **830**: 214.
- [8] FERDINAD R, SHERMAN J, STEVENS R R, *et al.* Space-charge Neutralization Measurement of a 75keV, 130mA Hydrogen-ion Beam[C]// Particle Accelerator Conference, 1997. Proceedings of the. IEEE, 1997, **3**: 2723.
- [9] GOBIN R, BEAUVAIS P Y, FERDINAND R, *et al.* Review of Scientific Instruments, 1999, **70**(70): 2652.
- [10] TAN Biao, WU Qi, YANG Yao, *et al.* Nuclear Physics Review, 2016, **33**(1): 36. doi: [10.11804/NuclPhysRev.33.01.036](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.33.01.036) (in Chinese)
(谭彪, 武启, 杨尧, 等. 原子核物理评论, 2016, **33**(1): 36.)
- [11] FENG Zhe. Study on the High Intensity ECR Proton Souce with Beam Extraction and Transmission Characteristics[D]. Beijing: Tsinghua University, Engineering Physics. 2011(4): 68.(in Chinese)
- (冯哲. 强流 ECR 质子源及束流引出和传输特性的研究[D]. 北京: 清华大学工程物理系, 2011(4): 68.)
- [12] JIA Huan. Design and Beam Commissioning of Beam Lines for CADS Injector II Prototype Linac[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. 2015(10): 46. (in Chinese)
(贾欢. 中国 ADS 注入器样机 II 束流传输线的设计与调试[D]. 中国科学院大学: 中国科学院近代物理研究所. 2015(10): 46.)
- [13] ASEEV V N, OSTROUMOV P N, LESSNER E S, *et al.* Proceedings of the PAC 2005, Knoxville, USA, 2005: 2053.
- [14] WU Q, SUN L T, CUI B Q, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2016, **830**: 214.
- [15] YANG Yao, ZHANG Ziming, ZHANG Wenhui, *et al.* Atomic Energy Science and Technology. 2013, **47**(12): 2336. (in Chinese)
(杨尧, 张子民, 张文慧, 等. 原子能科学技术, 2013, **47**(12): 2336.)
- [16] BATYGIN Y B. Nucl Instr Meth A, 2005, **539**(3): 455.
- [17] YANG Y, SUN L T, HU Q, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2014, **85**(2): 02A719.
- [18] <http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/index3.php>.

Design and Simulation of Low Energy Beam Transport Line for Intense Neutron Generator

JIA Zehua¹, LI Gongping^{1,†}, PAN Xiaodong¹, WEI Xubo¹, WU Qi², ZHANG Shixu¹, WU Wangsuo¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China;)

Abstract: The ZF-400 Intense Neutron Generator, which is designed by Lanzhou University with an expected neutron yield of 6×10^{12} n/s, is consist of ECR ion source, low energy beam transport (LEBT) line, accelerating tube and rotating target. The beam extracted from ECR source is analyzed and focused through LEBT, then, the beam is introduced into the accelerating tube. The focus and analysis ability of LEBT is very important for the beam loss, neutron yield and target's life. A LEBT line for intense neutron generator is designed in this paper, the project consisted of a solenoid, a bend magnet and three quadrupole lens. The qualified LEBT and its parameters have been got through the simulation with TRACK code. Then TraceWin program was employed to check this simulation and the result satisfied our requirement. Besides, the loss position of impurity ions was known through the simulation, and a project of beam line's cooling system was designed according to this result. Through the simulation, we find the optimal lens combination plan which can obtain lower beam loss and higher beam purity at low running power of LEBT.

Key words: neutron; intense beam; LEBT; optical simulation

Received date: 8 Dec. 2016; Revised date: 12 Apr. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(21327801);

† Corresponding author: LI Gongping, E-mail: ligp@lzu.edu.cn.