

基于 100 MeV 强流质子回旋加速器生产放射性同位素的束流筛选装置

赵黎杰, 宋国芳, 邢建升, 黄 鹏, 冀鲁豫, 王 飞, 安世忠, 朱鹏飞, 刘 杰

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:在进行放射性同位素生产实验时,有时需要 100 MeV 强流质子回旋加速器引出单圈束流来满足实验要求。目前 100 MeV 强流质子回旋加速器束流引出时存在严重圈重叠问题,因此需要设计一款束流筛选装置对引出束流品质进行改善以满足实验要求。该束流筛选装置具有基于 100 MeV 强流质子回旋加速器的框架结构与狭缝运动系统,以及基于 PLC 设计的控制系统控制步进电机并利用电子尺和按偏差的比例 P、积分 I 和积分 D(PID)控制的算法实现闭环控制。经过多次运行调试,机械装置的运动精度在 ± 0.2 mm,且在加速器运行过程中可以实现对束流的筛选。

关键词:束流筛选; 机械设计; PLC 控制; 安装调试

中图分类号: TL92+1.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2024)03-0288-06

doi: 10.7538/tws.2023.youxian.108

The Beam Screening Device for the Production of Radioisotopes Based on 100 MeV High-Flow Proton Cyclotron

ZHAO Lijie, SONG Guofang, XING Jiansheng, HUANG Peng, JI Luyu,

WANG Fei, AN Shizhong, ZHU Pengfei, LIU Jie

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In some radioisotope production experiments, 100 MeV high-current proton cyclotron is required to extract a single-turn beam to meet the experimental requirements, but at present, there is a serious problem of turn overlap when the beam is extracted, and a beam screening device needs to be designed to improve the quality of the drawn beam. The beam screening device has a frame structure and slit motion system based on the cyclotron, and a control system based on PLC design to control the stepper motor and use the electronic ruler and PID control algorithm to achieve closed-loop control. After many times of operation and debugging, the motion accuracy of the mechanical device is ± 0.2 mm, and the beam screening can be realized during the operation of the accelerator, which has reference significance for the design and manufacture of the cyclotron beam screening device.

Key words: beam screening; mechanical design; PLC control system; installation and commissioning

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(HXCJ20190901)

通信作者: 宋国芳

中国原子能科学研究院研制的 CYCIAE-100 强流质子回旋加速器是目前国际上最大的紧凑型强流质子回旋加速器^[1], 也是中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器升级工程最重要的主工艺设备, 其引出能量为 70~100 MeV, 流强为 10 pA~520 μA^[2]。剥离引出方法是 100 MeV 强流质子回旋加速器获得强流质子束的方法^[3], 该方法设计和操作简单, 造价很低, 引出效率可达 100%, 且可以同时设计多个引出通道以提高加速器的利用率。该方法的基本原理是在引出半径上设置一个电子剥离膜, 负离子或多电荷态的正离子穿过电子剥离膜时即因电子被剥离而变成不同于加速离子电荷态的正离子, 因而随着轨道曲率的反转或者与加速离子轨道有显著差别而通过加速器自身的强磁场被引出加速器^[4]。该方法只需移动剥离膜的位置, 便可以在不改变加速器其他参数的情况下, 改变引出束流的能量^[5]。国际上剥离引出回旋加速器最常见的是加速 H^[2]、D^[-6-7]、H2^{+[8-9]} 等粒子的回旋加速器。

采用剥离膜引出方式的回旋加速器虽然具有引出效率高、操作简单等优势, 但是剥离引出均是多圈引出, 圈重叠非常严重^[10]。以加速到 100 MeV 能量剥离引出质子加速器为例, 剥离引出的圈重叠都在 30 圈以上。而部分放射性同位素生产实验对于引出的质子束流的品质要求很高, 需要实现单圈引出以获得很高的束流品质。此时就需要设计一种束流筛选装置, 以便在束流加速前期对束流进行筛选, 剥离掉扩散的粒子, 提高束流品质, 从而实现单圈引出。

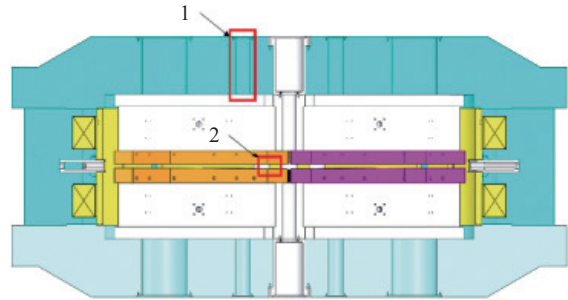
1 总体机械设计

1.1 物理要求

100 MeV 强流质子回旋加速器的加速波形为余弦波形, 加速相宽为 40°~60°, 其加速粒子能量服从余弦波形^[11], 最终导致不同能量束流重叠。需要在低能区域, 即粒子运动轨迹第 3 圈(圈间距为 20 mm)与第 6 圈(圈间距 13 mm)处使用狭缝对束流加速相位宽度进行筛选。根据束流动力学计算, 束流轨迹第 3 圈距离加速器中心区 192 mm, 束流轨迹第 6 圈距离加速器中心区 295 mm, 且束流在加速器中平面附近的束流包络线直径约为 30 mm^[12-13]。

1.2 安装空间

100 MeV 强流质子回旋加速器具有四个谷区, 在谷区上下均有大半径通孔用于实验装置的安装^[14]。根据 1.1 节物理要求, 图 1 中 2 号位置为束流筛选装置工作位置; 为了不影响筛选后束流的正常运动, 选用图 1 中 1 号位置为束流筛选装置安装位置。



1—束流筛选装置安装位置; 2—束流筛选装置工作位置

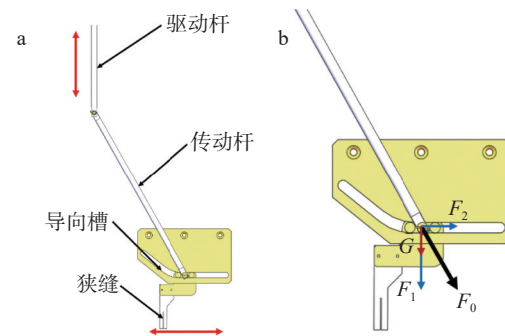
图 1 100 MeV 强流质子回旋加速器主磁铁截面图

Fig.1 Cross-section view of a 100 MeV high-flow proton cyclotron main magnet

1.3 传动结构设计

根据 1.2 节确定的束流筛选装置安装空间的, 装置安装位置与工作位置存在 90°夹角, 故将束流筛选装置设计为 L 型, 整体采用 40 型铝型材搭建。根据 1.1 节所述物理要求, 需要在距离加速器中心区 192 mm 与 295 mm 处安装有狭缝, 同时为了不影响回旋加速器正常运行, 需要设计可以使狭缝脱离工作位置的结构。

由于束流筛选装置工作在加速器内部超高真空和超强磁场范围内, 常规传动部件无法满足使用要求^[15], 故设计图 2 所示传动结构, 驱动杆垂直方向往复运动, 狭缝水平方向往复运动, 中间由传动杆与导向槽配合作用传递驱动力。



a—传动结构原理; b—传动结构受力分析

图 2 束流筛选装置传动机构原理及受力分析

Fig.2 Principle and force analysis of transmission mechanism of beam screening device

而导向槽设计为水平段加倾斜段两级, 分别对应狭缝处于工作位置与狭缝脱离工作位置。

黄铜滚轴与导向槽板的滑动摩擦系数 $\mu=0.17$ ^[16], 考虑到实际安装误差和表面粗糙度的影响, 设定黄铜滚轴与导向槽板的滑动摩擦系数 $\mu=0.5$ 。整个狭缝运动模块的重量为 0.324 kg , 在水平工作段 F_0 与 F_2 夹角最大值为 49.83° , 设图 2b 中 F_0 与 F_2 夹角为 θ , 则在狭缝向下运动且刚好可以运动的极限情况下:

$$(F_1 + G) \times \mu = F_2 \quad (1)$$

$$F_2 = F_0 \times \cos \theta \quad (2)$$

$$F_1 = F_0 \times \sin \theta \quad (3)$$

计算可得 $F_0=2.09\text{ N}$ 。

在狭缝向上运动且刚好可以运动的极限情况下:

$$(G - F_1) \times \mu = F_2 \quad (4)$$

计算可得 $F_0=1.57\text{ N}$ 。

综上所述, 选用有效驱动力大于 2.09 N 的驱动系统驱动狭缝组在径向方向上水平移动的设计方案可行。

1.3.1 狭缝运动控制设计 如图 3 所示, 在刚进入水平位移段, 狭缝 1 的径向推杆两 endpoint 水平距离 308.36 mm , 竖直距离 267.17 mm , 杆的长度为 408 mm 。假设狭缝 1 需要向左移动的距离为 x_1 , 此时需要竖直推杆向下移动的距离为 y_1 , 则根据勾股定理可得出 x_1 与 y_1 的关系式:

$$(308.36 + x_1)^2 + (267.17 - y_1)^2 = 408^2 \quad (5)$$

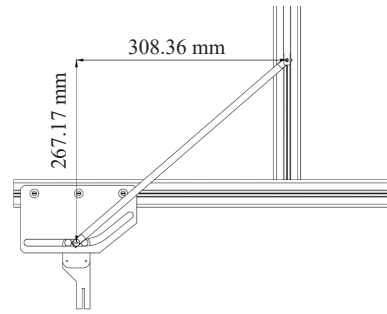


图 3 狭缝 1 位移关系

Fig.3 Slit 1 displacement relationship

如图 4 所示, 在刚进入水平位移段, 狭缝 2 的径向推杆两 endpoint 水平距离 218.36 mm , 竖直距离 258 mm , 杆的长度 338 mm 。假设狭缝 2 需要向右移动的距离为 x_2 , 此时需要竖直推杆向下移动的距离为 y_2 , 则根据勾股定理可得出 x_2 与 y_2 的关系式:

$$(218.36 + x_2)^2 + (258 - y_2)^2 = 338^2 \quad (6)$$

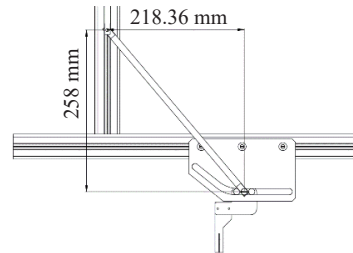
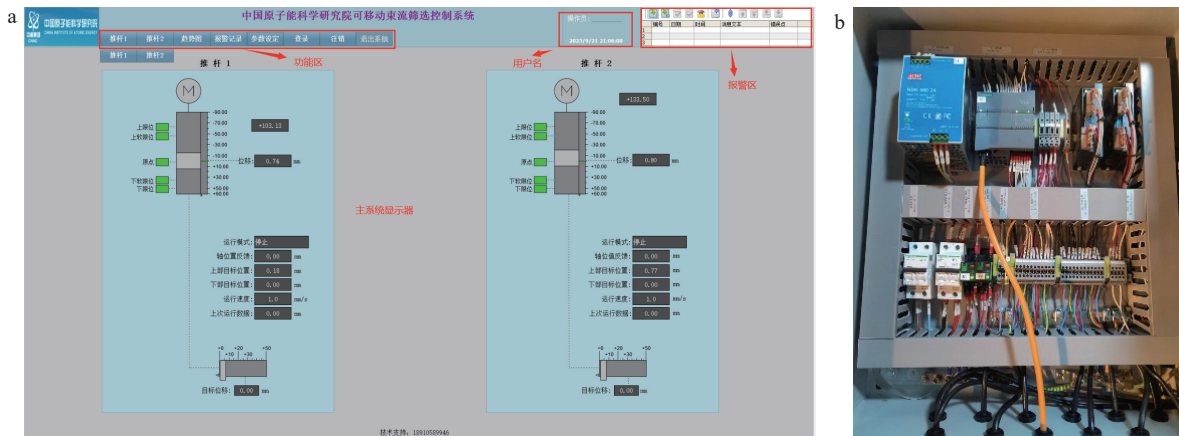


图 4 狭缝 2 位移关系

Fig.4 Slit 2 displacement relationship

2 控制系统设计

束流筛选装置控制系统示于图 5。由于 PLC



a——控制界面; b——机箱

图 5 束流筛选装置控制系统

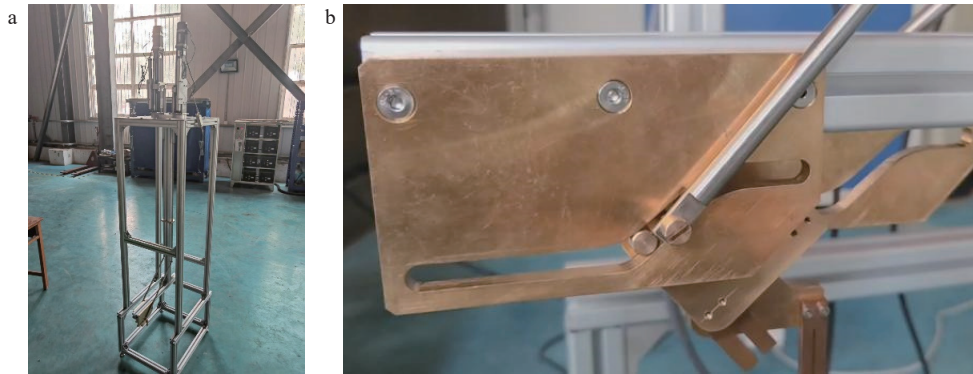
Fig.5 Beam screening device control system

控制模块具有可靠性高、抗干扰能力强、控制速度快、稳定性好、维修方便等优点^[17], 可以在计量较高、辐射较大的环境中正常工作^[18], 所以控制系统基于PLC设计, 控制算法则依靠误差较小的PID算法(结合比例、积分和微分三种环节于一体的控制算法)^[19]实现。

3 安装调试

3.1 器外调试

加速器在停止运行后仍会有部分剂量残留, 操作人员无法长时间滞留在在加速器大厅, 故在实验厂房外进行结构预调试, 束流装置调试示于图6。



a——束流筛选装置试验台架; b——狭缝位置调试

图6 束流筛选装置调试

Fig.6 Beam screening device commissioning

使用控制系统手动控制电机进行运动, 基于1.3.1节提到的狭缝运动与电机运动之间的传递关系来控制狭缝沿径向方向步进移动, 通过人工测量底部狭缝实际移动的距离进行反馈来调节运动传递系数。

如表1所示, 经过多次实验, 狭缝组在导向槽中的运动无停顿, 无明显阻力且实际位移距离与理论位移距离差值小于0.2 mm, 满足物理需求。

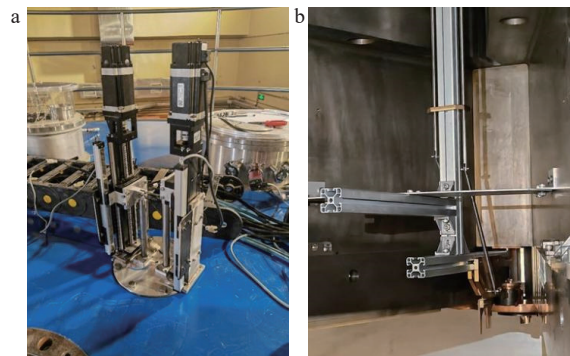
表1 器外调试阶段狭缝运动参数

Table 1 Slit motion parameters during the out-of-accelerator debugging phase

狭缝理论位置/mm	狭缝实际位置/mm	误差/mm
1	0.96	0.04
7	7.08	0.08
10	10.02	0.02
12	12.14	0.14
16	16.13	0.13
18	18.11	0.11
22	22.06	0.06
24	24.08	0.08

3.2 器内验证

在器外调试完成后将束流筛选装置安装(图7)至回旋加速器谷区, 并进行运动传递效果的检测。



a——加速器上盖板电机安装; b——加速器谷区运动模块安装

图7 束流筛选装置安装

Fig.7 Beam screening device installation

手动控制顶部电机来驱动底部狭缝运动, 测量8组不同位置参数, 记录数据列于表2, 误

表2 器内调试阶段狭缝运动参数

Table 2 Slit motion parameters for the debug phase within the accelerator

狭缝理论位置/mm	狭缝实际位置/mm	误差/mm
5	5.09	0.09
10	10.13	0.13
15	14.95	0.05
20	20.06	0.06
25	24.89	0.11
30	30.11	0.11
35	35.13	0.13
40	39.85	0.15

差在 ± 0.2 mm 以内,满足实验要求。

在加速器运行过程中,通过观察剥离膜上束流的反馈来验证狭缝的筛选作用,记录数据列于表3。由此验证了两个半径的狭缝均能起到筛选束流的作用。

表3 束流筛选装置运行数据表

未加狭缝 剥离膜束流/nA	加小半径狭缝 剥离膜束流/nA	加大半径狭缝 剥离膜束流/nA
11.88	1.66	0.3
218.88	24	4.8

随后使用中子计量仪对束流的品质进行检测,结果示于图8。得到较窄的两个波峰,由此可得到纯度较高的束流进行物理实验。

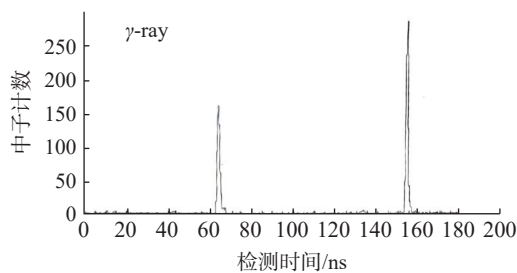


图8 束流品质检测结果

Fig.8 Beam quality test results

4 结论

100 MeV 强流质子回旋加速器束流引出时存在严重圈重叠的问题,无法达到某些物理实验的要求,本研究设计了一款束流筛选装置进行引出束流品质的改善。该束流筛选装置整体呈L型,由特殊传动结构完成驱动装置对狭缝的控制并可以通过运动函数控制实现调节狭缝处于工作位置或脱离工作位置。在调试过程中,狭缝组在导向槽中的运动无停顿,无明显阻力且实际位移距离与理论位移距离差值小于0.2 mm,满足物理要求。在实验过程中,通过剥离膜上束流的反馈观察出狭缝对束流起到筛选效果,且筛选后的束流品质较好,满足实验要求。本研究设计的束流筛选装置运动平稳,精度良好,且可以在两个半径处筛选束流,有很大的实际应用价值,对未来的回旋加速器束流筛选装置的设计有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 黄鹏,李鹏展,安世忠,等.基于100 MeV紧凑型强流质子回旋加速器的束流切割器研制[J].原子能科学技术,2022,56(3):562-569.
Huang Peng, Li Pengzhan, An Shizhong, et al. Development of beam chopper based on 100 MeV compact high-intensity proton cyclotron[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(3): 562-569 (in Chinese).
- [2] Zhang T, Li Z, Chu C. CYCIAE-100, a 100MeV H-cyclotron for RIB production[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 261(1-2): 1027-1031.
- [3] 安世忠,魏素敏,冀鲁豫,等.中国原子能科学研究院紧凑型强流质子回旋加速器剥离引出技术研究[J].原子能科学技术,2022,56(9):1774-1783,1732.
An Shizhong, Wei Sumin, Ji Luyu, et al. Stripping extraction technology study on compact high-intensity proton cyclotron of CIAE[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(9): 1774-1783, 1732 (in Chinese).
- [4] 安世忠,张天爵,姚红娟,等.100 MeV回旋加速器束流剥离引出的COMA模拟[M].北京:中国原子能科学研究院年报,2006(1):3.
- [5] 安世忠,温立鹏,邢建升,等.100 MeV质子回旋加速器南向剥离靶的引出束流调试[M].北京:中国原子能科学研究院年报,2016(1):1.
- [6] 郝焕锋.7MeV/U重离子回旋加速器设计与研制[D].兰州:中国科学院研究生院(近代物理研究所),2014.
- [7] Groppi F, Bonardi M L, Birattari C, et al. Optimisation study of α -cyclotron production of At-211/Po-211g for high-LET metabolic radiotherapy purposes[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2005, 63(5-6): 621-631.
- [8] Alonso J R. High current H^{2+} cyclotrons for neutrino physics: the IsoDAR and DAE δ ALUS projects [EB/OL]. 2012: arXiv: 1210.3679.
- [9] Calabretta L, Celona L, Gammino S, et al. Preliminary design study of high-power H^{2+} cyclotrons for the DAEdALUS experiment[J]. ArXiv e-Prints, 2011; arXiv: 1107.0652.
- [10] An Shizhong, Guan Fengping, Wei Sumin. Calculation and simulation on the extraction trajectories for CYCIAE-100[M]. Beijing: Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2008.
- [11] 王修龙,赵振鲁,纪彬,等.3 100 MeV回旋加速器高频系统方案设计[M].北京:中国原子能科学研究院年报,

- 2005(1): 2.
- [12] 陈银宝,傅世年. 束流动力学[M]. 中国原子能科学研究院年报, 1994(1): 97-98.
- [13] 胡祥青,付淑英,黄新华. 大学物理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2022.
- [14] 吕银龙,姚红娟,宋国芳,等. 100 MeV 回旋加速器中心区结构设计[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(2): 366-371. Lyu Yinlong, Yao Hongjuan, Song Guofang, et al. Center region structure design for 100 MeV cyclotron[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(2): 366-371 (in Chinese).
- [15] 倪红军,黄明宇. 工程材料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2016.
- [16] 成大先. 机械设计手册 第三版 第1卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [17] 海涛. 电气控制与 PLC 实验教程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2020.
- [18] 熊幸明,张文希. PLC 控制系统可靠性设计的研究[J]. 煤矿机电, 2004(3): 13-16. Xiong Xingming, Zhang Wenxi. The study of reliability design on PLC control system[J]. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, 2004(3): 13-16 (in Chinese).
- [19] 聂建华,陶永华. 新型 PID 控制及其应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 1998(2): 59-61.