

100MeV强流质子回旋加速器轴向 注入系统和中心区物理设计*

姚红娟^{1,2;1)} 张天爵² 贾先禄² 管锋平² 魏素敏² 吕银龙² 林郁正¹

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 100MeV强流质子回旋加速器设计的引出质子束流强为大于200 μ A, 并计划提供脉冲束流. 轴向注入系统设计有两条注入线, 即1#和2#注入线. 1#注入线利用负氢束的中性化以解决强流连续束流的注入, 为保证达到高中性化程度, 横向聚焦均采用磁元件; 2#注入线的设计目的主要是提供一定流强的脉冲化束流, 由于脉冲化负氢束的中性化过程难以建立, 因此, 横向聚焦元件均为静电元件. 两条线合理的结构设计使得注入系统可方便切换运行模式. 采用包含空间电荷力的光学计算程序, 匹配不同中性化程度的注入束流光学特性, 匹配工作的重点在于高达40°的高频相位接收度. 从离子源出口到粒子加速前15圈的连续匹配计算结果表明: 所设计的注入系统可有效地控制束流包络, 减少束流损失; 中心区高的高频接收度使设计的100MeV质子回旋加速器具有加速强流负氢束的能力.

关键词 强流回旋加速器 注入线 轴向磁场 中心区

1 引言

中国原子能科学研究院设计的100MeV强流质子回旋加速器(CYCIAE100)是串列升级工程中的一个重要部分, 它不仅产生放射性核束, 而且可同时进行多项科学研究. 采用外部多峰型负氢离子源^[1], 提供40keV最高流强约达10mA的负氢离子束. 加速器主磁铁采用4片直角扇形磁极结构, 四次谐波加速. 中心区处安装螺旋静电偏转板进行90°偏转将垂直方向注入的离子偏转到水平面上. 注入系统采用两条注入线设计, 分别提供强流连续束和一定流强的脉冲束. 两条注入线不同时运行, 但可以方便切换.

2 注入系统结构及光学匹配

轴向注入系统主要是将外部离子源产生的H⁻束注入到回旋加速器的中心区, 并保证较高的传输效率和较好的束流品质. 设计的过程中需要考虑的问题包括空间布局、元件选择、真空度、空间电荷效

应、轴向磁场和造价等等. CYCIAE100外部离子源引出H⁻的能量为40keV, 发射度为32 π mm·mrad时流强高于5mA. 注入系统束流传输采用二阶传输程序TRANSOPTR^[2]计算, 并且考虑空间电荷力.

2.1 轴向磁场的考虑

CYCIAE100的轴向注入线部分位于主磁铁内部, 因此该段束线的计算需要考虑轴向磁场的影响, 即将轴向磁场作为螺旋场加入到元件的传输矩阵中, TRANSOPTR程序中包含了轴向磁场的计算. 但程序将偏转板中的轴向磁场处理成了均匀分布, 而实际情况是有着较大的梯度. 采用CASINO^[3]数值跟踪可得到真实磁场下的偏转板传输矩阵, 通过转换可以得到表达偏转板光学特性的矩阵M. 将M编写到TRANSOPTR的子程序中, 并在其中合理设置将偏转板的空间电荷效应考虑进去.

1#线是直流束注入, 空间电荷效应采用二维计算. CYCIAE100离子源引出的是H⁻, 真空度满足约

* 国家自然科学基金(10125518)资助

1) E-mail: yhj03@mails.tsinghua.edu.cn

10^{-6} Torr 时可得到较高的中性化程度. 根据 TRIUMF 的经验^[4], 考虑了 100%, 99% 和 95% 3 种中性化程度.

2.2 计算结果

注入系统光学布局如图 1 所示, 1# 线从下往上注入, 束流传输过程可以表示为 d4-S-d3-Q1-d2-Q2-d1-inf, 其中 S 为螺线管透镜, Q 为磁四极透镜, d 为漂移节, inf 为螺旋偏转板. 2# 线束流传输过程为 d4-E-d12-EQ1-d8-EBend-d9-EQ2-d10-EQ3-d11-EQ4-d10-EQ5-d9-EBend-d8-EQ6-d7-EQ7-d6-B-d5-Q1-d2-Q2-d1-inf, 其中 E 为三圆筒静电透镜, EQ 为静电四极透镜, EBend 为静电偏转器, B 为聚束器. 元件参数分别为: S 有效长度为 400mm, 磁场强度 0.183T; Q1 和 Q2 有效长度为 120mm, 孔半径为 25mm, 最大场强为 0.06T; E 圆筒间隙为 20mm, 两端接地, 中间电极电压为 30kV; EQ1, EQ2, EQ3, EQ4, EQ5, EQ6 和 EQ7 电极电压分别为 ± 1.38 kV, ± 3.97 kV, ± 5.0 kV, ± 5.0 kV, ± 3.97 kV, ± 1.32 kV 和 ± 2.15 kV, 孔半径为 25mm; EBend 偏转半径为 200mm, 极板间距为 40mm, 电压为 ± 8 kV; B 电压为 0.9kV; inf 的电半径为 40mm, 磁半径为 39.695mm, 倾斜参数 -0.74 ; d1 到 d12 分别为 135, 35, 1450, 230, 420, 590, 30, 50, 120, 25, 150, 440, 单位为 mm.

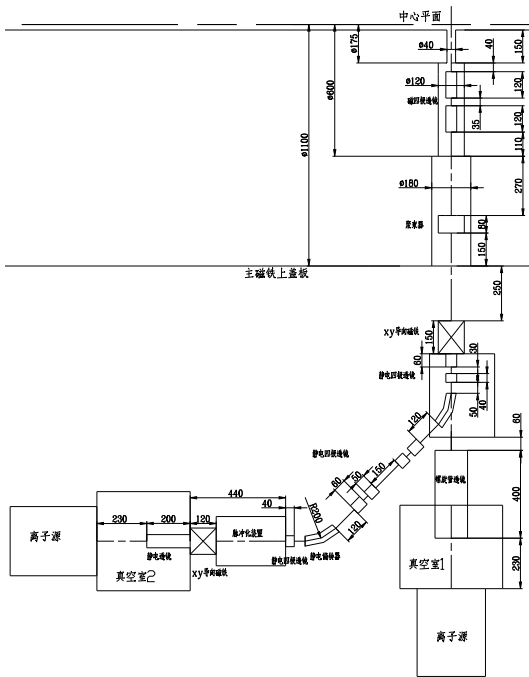


图 1 两条注入线光学布局图及尺寸标注

表 1 给出了 1# 注入线在三种中性化程度下的元件参数, 可以看出中性化程度越高, 束流包络会越小. 图 2 为 95% 中性化程度下的束流横向包络示意图, 图 3

为 2# 线的束流横向包络示意图.

表 1 1# 线上各元件参数匹配结果

中性化	S(T)	Q1(T)	Q2(T)	最大包络
100%	0.183	0.0374	0.0534	18.01mm
99%	0.184	0.0366	0.0532	18.03mm
95%	0.177	0.0362	0.0531	19.31mm

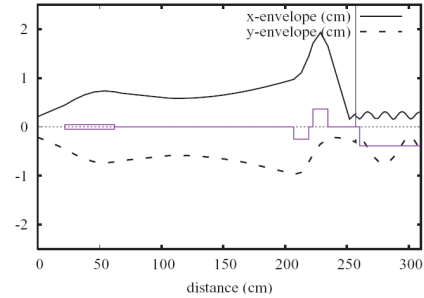


图 2 1# 线 95% 中性化束流传输包络图

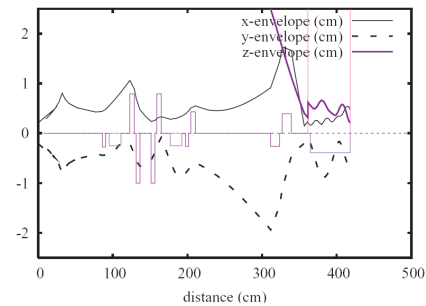


图 3 2# 注入线束流传输包络图

3 CYCIAE100 的中心区设计

离子在中心区的运动, 大部分时间受到电场的作用, 同时由于该区域电场分布十分复杂, 很难对离子在这一区域中的运动作一般的分析, 因此, 中心区的许多研究工作都是基于实验或二维近似. 在这里, 我们采用三维数值分析手段, 对离子出偏转板后, 开始受高频电场加速的初始 15 圈的运动行为进行研究, 以此为基础设计中心区的结构.

通过对主磁铁镶条结构的近似得到加速间隙结构, 按这些初步间隙的位置构造几何形状, 并求解等位分布, 通过跟踪粒子轨迹就可以确定加速电极的位置. 在加速电极和加速间隙都确定的情况下, 需要进一步对电极进行优化计算. 主要包括为: 1) 束流相位接收度, 2) 束流轨迹对中, 3) 束流轴向聚焦, 4) 束流发射度. 通过反复调试确定最优化的电极形状.

注入点的选择是通过和偏转板的设计相互配合, 反复调节得到的. 采用 CYCLONE^[5] 进行轨迹跟踪给出中心粒子的运动情况, 如图 4 所示, 给出了 60° 相位接收度范围内的中心粒子束流轨迹.

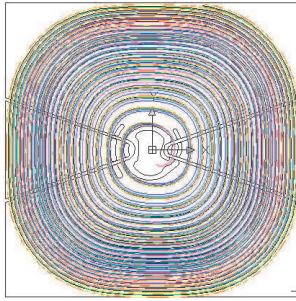


图 4 中心粒子在 60° 相位内的轨迹

为了检验各部分设计的合理性, 对旁轴粒子进行跟踪, 即注入系统匹配计算完成后给出偏转板出口处的束流相椭圆, 从相椭圆上选取 22 个点跟踪至加速 15 圈, 然后根据粒子的轨迹及轴向振荡来判断粒子被中

心区接受的情况. 结果为 1# 线 80% 粒子被接受时的相位接受度可达 50° , 即实际相位接受度为 40° ; 2# 线所有粒子被接受时的接受度为 40° .

4 结论

注入系统设计的 1# 线注入 8mA 的连续束流, 中心区高频相位接受度可达 40° , 因此可接收到的流强为 8/9mA, 即使考虑到传输过程中的损失仍然能够保证回旋加速器引出束流达到 $200\mu\text{A}$ 的设计指标. 并且 2# 线的设计使 CYCIAE100 具有了提供脉冲束的能力. 目前离子源和注入系统已经完成了机械结构设计.

参考文献(References)

- 1 ZHANG Tian-Jue et al. Review of Scientific Instruments, May 2004
- 2 Heighway E A, Hutcheon R M. Nucl. Instrum. Methods, 1981, **187**: 89
- 3 Milton B F, Pearson J B. TRI-DN-89-19, July 1998
- 4 Baartman R, YUAN D. EPAC'88, Rome, 1988, **2**: 949
- 5 Milton B F. TRI-DN-99-4, June 1 1999

Physics Design on the Axial Injection System and the Central Region of the 100MeV High Intensity Cyclone^{*}

YAO Hong-Juan^{1,2;1)} ZHANG Tian-Jue² JIA Xian-Lu² GUAN Feng-Ping²
WEI Su-Min² LÜ Yin-Long² LIN Yu-Zheng¹

1 (Department of Engineering Physics Tsinghua University, Beijing 100084, China)

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

Abstract A 100MeV high intensity cyclotron was designed to provide more than $200\mu\text{A}$ proton beam, and will provide pulse beam. The injection system has two considerations, which correspond to the 1# and 2# injection lines. The 1# line is designed to solve the DC beam injection using the neutralization with H-beam. For a high neutralization, the transverse focusing elements are all magnetic ones. The purpose of the 2# line is to provide pulse beam with certain intensity. It's difficult to build neutralization for the pulse beam, so the transverse focusing elements are all static electronic. The proper design for the structure of the two injection lines makes operation easy. Using computer program, including space charge effect calculations, we matched the injection optics for different neutralization degrees. The emphases of the calculations are getting 40° phase acceptance. The results calculated from the ion source to 15 turns acceleration show that the injection system designed for the 100MeV cyclotron can control the beam envelope efficiently and reduce the beam loss. The central region with the high RF phase acceptance makes the 100MeV machine have the ability of accelerating high intensity H^- beam.

Key words high intensity cyclotron, injection line, axial magnetic field, central region

^{*}Supported by National Natural Science Foundation of China (10125518)

1) E-mail: yhj03@mails.tsinghua.edu.cn