

# 用于放射性核束设施驱动加速器的100MeV 强流质子回旋加速器\*

张天爵<sup>1)</sup> 李振国 储诚节 王修龙 周正和

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 中国原子能科学研究院得到批准建设HI-13串列加速器升级工程, 目前完成了该工程的初步设计. 文章报告主工艺设备——100MeV强流质子回旋加速器的设计方案、设计特点, 总体设计结果及主要技术指标、关键设备(离子源、轴向注入线、中心区、主磁铁、高频系统、引出系统、诊断系统等)的简要设计结果等.

**关键词** 强流回旋加速器 紧凑型磁铁 高频系统 束流动力学

## 1 引言

中国原子能科学研究院经国家批准立项建造北京HI-13串列加速器升级工程<sup>[1]</sup>. 该升级工程布局如图1所示. 100MeV回旋加速器和在线同位素分离系统将安装在串列加速器西侧的新建厂房中, 超导直线加速器将安装在现有的串列加速器大厅内. 由回旋加速器向南引出的质子束直接用于物理实验, 向北引出的质子束用于产生放射性核束, 提供束流强度高于 $10^6$ pps的约40种丰质子束和80种丰中子束.

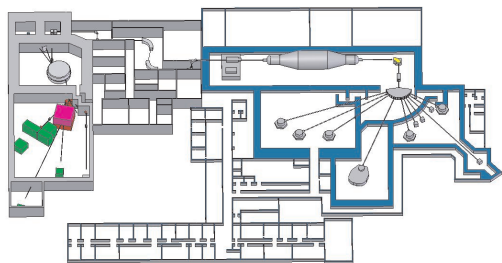


图1 HI-13串列加速器升级工程布局图

## 2 100MeV强流质子回旋加速器

作为前端加速器, 100MeV的质子回旋加速器能够提供75—100MeV, 200—500 $\mu$ A的质子束流. 对于最终能量不高于100MeV, 束流强度低于1mA的回旋

加速器, 选择紧凑型磁铁, 采用加速负氢、剥离引出的技术路线, 将使得加速器结构更小, 造价也更低. 这个前端加速器是一个四叶片固定场的回旋加速器, 两个高频腔安装在加速器磁场谷区之中. 该加速器有下面的特征: 1) 具有高调变度和低一次谐波. 2) 加速负氢离子, 采用剥离方式引出束流. 3) 外部离子源不但提供较高的束流强度, 而且使得回旋加速器有提供脉冲束的可能性. 4) 磁场峰值低于1.35T, 这保证了在整个加速区负氢离子的低剥离率. 5) 两个三角形的半波长高频腔安装在谷区中.

### 2.1 主要技术指标

表1 离子源、注入

| 离子源 |      | 注入  |       |
|-----|------|-----|-------|
| 类型  | 多峰场  | 能量  | ~40kV |
| 束流  | >5mA | 偏转板 | 螺旋型   |

表2 磁铁、线圈、电源

|      |        |       |         |
|------|--------|-------|---------|
| 扇数   | 4      | 磁轭内半径 | 2410mm  |
| 扇角度  | ~47°   | 磁轭外半径 | 3080mm  |
| 场峰值  | 1.35T  | 谷区间隙  | 1310mm  |
| 磁极半径 | 2000mm | 峰区间隙  | 50—60mm |
| 安匝数  | 80kAT  | 直流功率  | ~20 kW  |

表3 高频系统

|        |        |        |       |
|--------|--------|--------|-------|
| D盒数    | 2      | D盒角度   | 38°   |
| D盒电压-内 | 60kV   | D盒电压-外 | 120kV |
| 频率     | ~45MHz | 谐波模式   | 4     |

\* 国家自然科学基金(10125518)资助

1) E-mail: tjzhang@iris.ciae.ac.cn

## 2.2 基本的磁场和轨道计算

### 1) 基于平衡轨道的磁铁和束流动力学计算

主磁铁采用四个直边扇形结构的磁极, 材料采用 AISI 1008 钢. 通过调节扇形磁极两边的镶条, 可得到回旋加速器的等时场. 然而, 模拟计算显示在等时性磁场逐步逼近的过程中, 高能区的  $\nu_z$  迅速下降, 出现 Walkinshaw 共振, 为了避免引出区附近的 Walkinshaw 共振, 螺旋扇当然能够提供更强的轴向聚焦, 但是这将导致高频腔、束流诊断系统等研制变得复杂, 对于这台能量不是太高的 AVF 回旋加速器, 我们认为仍然可以采用直边扇形结构, 因此, 用非均匀峰区磁隙高度, 来调节改进轴向聚焦. 当峰区磁隙高度从中心区的 6cm 变化到引出区的 5cm 时, 并通过调节扇形磁铁两边的镶条得到了一个很好的等时场. 计算的相移限制在  $\pm 10^\circ$  内. 图 3 为相应的自由振荡频率. 从图中可以看出  $\nu_z$  是足够高的, 在引出区附近能够避免  $\nu_r = 2\nu_z$  共振.

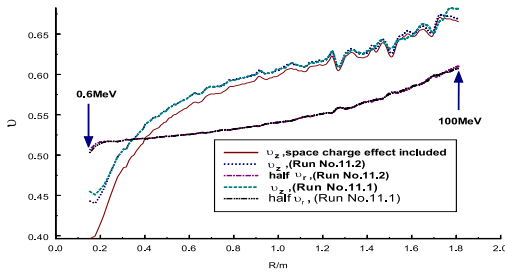


图 3 自由振荡频率

### 2) 轴向空间电荷效应的束流强度限制

对于这样一台宽相位接收度、剥离引出的紧凑型回旋加速器, 主要是考虑轴向空间电荷力对束流强度的限制. 基于完全圈重叠的假定, 得到:

$$i_{\text{limit}} = \Delta z v_z^2 \omega_0 \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi \Delta V}{2\pi Q_e},$$

式中  $\omega_0$  为轨道角频率,  $\Delta z$  为束流高度,  $\Delta V$  为圈能量增益,  $\Delta \Phi$  为相宽,  $Q_e$  单位电荷量, 计算结果表明: 轴向空间电荷限制比所设计的回旋加速器的束流强度, 即 200—500  $\mu\text{A}$  高得多. 即使在轴线聚焦较弱的中心区, 虽然我们在计算中没有计入中心区的电聚焦效应, 这样的束流强度的上限也高达 5mA. 这就提供了一个在这台 100MeV 回旋加速器建成之后升级束流强度的极大可能性. 空间电荷效应对  $\nu_z$  的影响, 由下式估算:

$$\Delta \nu_z = -\frac{1}{\beta} \frac{\hat{I}}{15.69 \times 10^6} \frac{R_\infty}{\epsilon_n \left( \sqrt{\frac{\nu_z}{\nu_R}} + 1 \right)}.$$

结果也在图 3 中给出.

### 3) 加速轨道的径向和轴向运动情况

加速轨道的跟踪结果表明, 对中束流和  $\pm 5\text{mm}$  不对中束流的垂直束包络能够限制在一个比较小的范围内, 直到引出区. 加速轨道的径向和轴向运动情况采用由中国原子能科学研究院修改过的程序 Goblin<sup>[2]</sup> 跟踪. 对于这样的紧凑型加速器, 人们更关心加速轨道的垂直运动情况, 我们研究了不同条件下的对中束流和  $\pm 5\text{mm}$  不对中束流的运动行为, 包括: 高频相位  $\phi_{\text{RF}} = 145^\circ, 150^\circ, 160^\circ, 170^\circ, 180^\circ, 190^\circ, 195^\circ$ ; 轴向位移  $z_0 = 0.3\text{cm}, 0.6\text{cm}, 1.0\text{cm}$ . 计算结果表明, 从 1MeV 到 100MeV 的垂直束包络被限制得足够小, 计算中加速电压假定平均为 65kV. 在加速轨道数值模拟中, 还研究了不同能量的静态相椭圆(径向和轴向), 包括能量  $E_0 = 1\text{MeV}, 11\text{MeV}, 51\text{MeV}, 100\text{MeV}$ , 位移  $z_0/x_0 = 0.3\text{cm}, 0.6\text{cm}, 1.0\text{cm}$ . 并从 1MeV 时的静态相椭圆开始, 进一步跟踪了 1MeV 到 100MeV 的加速轨道, 垂直束包络见图 4. 它再次表明加速轨道具有良好的轴向运动特性.

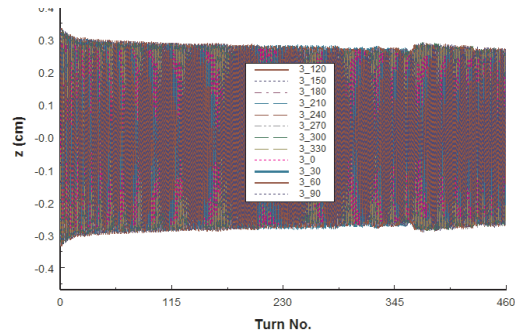


图 4 从能量为 1MeV 的轴向静态相椭圆开始跟踪的 12 条加速轨道的轴向运动

## 2.3 高频系统

### 1) 基本要求

高频频率: 42—46MHz(测磁后选定频率); 高频输出功率:  $2 \times 100\text{kW}$ ; 频率稳定度:  $\pm 5 \times 10^{-8}$ ; 电压稳定度:  $\pm 5 \times 10^{-4}$ ; 相位稳定度:  $\pm 0.3^\circ$ .

高频机与腔体之间通过  $50\Omega$  的同轴线传输, 采用电容耦合. D 电压沿半径逐渐上升, 中心区 60kV, 引出区 120kV. 高频系统的布局, 高频机、高频控制回路、传输线、匹配等, 见文献 [3] 详细描述.

### 2) 谐振腔

两个高频谐振腔将安装于相对的两个谷区之中, 腔体外形为类三角形的几何结构, 分别由两台高频机驱动. 高频谐振腔采用双内杆的结构. 高频谐振腔简化模型的一半如图 5 所示.

经过结构尺寸优化设计, 腔体的数值设计结果表明: 谐振频率为 44.68MHz, Q 值为 11140, Dee 电压分

布从中心区到引出区为 60kV 到 120kV, 一对腔体的总功率损耗为 50.4kW. 腔体的冷模试验已经完成, 测量了谐振频率和 Dee 电压分布, 数值模拟的结果与测量结果相差~1%.

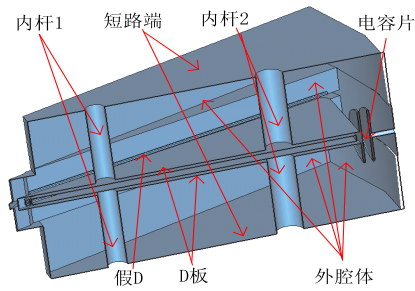


图 5 双内杆高频谐振腔木模实验结构图

## 2.4 其他关键设备

### 1) 离子源、注入线和中心区

注入系统包括两条轴向注入线: 第一条以高中性化程度的负氢束为注入束, 束流光学匹配以注入强流连续波束流为匹配目标; 第二条注入线以注入脉冲束为目标. 为了达到高平均流强, 中心区的高频接收度设计为  $\pm 20^\circ$ . 有关设计结果详见文献 [4,5].

### 2) 引出束流

双束流引出方式, 用两组剥离靶对称引出装置通

过剥离的方法引出束流. 引出系统包括: 剥离靶、定位与驱动系统、剥离膜更换系统. 设计研究的结果将另文发表.

### 3) 束流诊断系统及其他通用工程

束流诊断系统及其它通用工程, 如真空系统、控制系统、电源、水冷、气动等的初步设计, 详见单独的参考文献 [6].

## 3 结论

完成了一台紧凑型的 100MeV 强流质子回旋加速器的初步设计, 设计指标为能量: 75—100MeV 连续可调, 束流强度: 200—500mA, 可双向引出质子束. 研究结果还表明: 该加速器有望引出比 75MeV 能量更低的质子束以满足更多研究领域的需求, 且束流损失可控制在合理的范围内; 该加速器设计还为加速器建成后, 进一步提升束流强度提供了极大的可能性.

感谢方守贤、樊明武先生等加速器专家在项目论证过程中对紧凑型 100MeV 强流质子回旋加速器设计方案的建议. 感谢 TRIUMF 提供同类加速器的设计报告, 感谢 TRIUMF 的 Dr. Gerardo Dutto 和 PSI 的 Dr. Peter Sigg 的有益讨论和建议.

## 参考文献(References)

- 1 ZHANG Tian-Jue et al. A New Project of Cyclotron Based Radioactive Ion Beam Facility, Proceeding of the APAC, 2004
- 2 Milton B F. GOBLIN User Guide and Reference V3.3, TRI-CD-90-01, December 20, 1993
- 3 WANG X et al. Preliminary Design of a RF System for the 100MeV Cyclotron, ICC'2004
- 4 ZHANG Tian-Jue et al. Rev. of Sci. Instrum., 2004, **75**(5): 1854
- 5 ZHANG Tian-Jue et al. Rev. of Sci. Instrum., 2004, **75**(5): 1796
- 6 LI Z et al. General Engineering Considerations for the 100MeV Cyclotron, ICC'2004

# 100MeV High Intensity Proton Cyclotron as a Driving Accelerator for the Radioactive Ion Beam Facility<sup>\*</sup>

ZHANG Tian-Jue<sup>1)</sup> LI Zhen-Guo CHU Cheng-Jie WANG Xiu-Long ZHOU Zheng-He  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** China Institute of Atomic Energy (CIAE) has got the approval to build the BRIF, Beijing Radioactive Ion-beam Facility. At present, the basic design has been finished. In this paper, it is focusing to discuss the design of the main accelerator of the BRIF, 100MeV high intensity cyclotron. It includes the design strategy, design feature, the general design and the main technical specification, the brief design results of the crucial equipment (ion source, axial injection, central region, magnet, RF system, vacuum system, extraction, diagnosis system, control system, etc.)

**Key words** high intensity proton cyclotron, compact magnet, RF system, beam dynamics

<sup>\*</sup>Supported by National Natural Science Foundation of China (10125518)

1) E-mail: tjzhang@iris.ciae.ac.cn