

强流回旋加速器综合试验装置的设计与建造^{*}

张天爵¹⁾ 李振国 储诚节 姚红娟 葛涛 纪彬 钟俊晴

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 为了试验研究强流回旋加速器的整机设计技术,主磁铁、束流诊断等关键部件的设计与加工工艺技术,以完成100MeV回旋的设计验证,并为今后逐步提高流强创造试验条件,自2004年以来,陆续研究、设计、加工了一些关键部件,先后实验研究达到了单项技术指标;目前,已集成为一套强流回旋加速器的综合试验装置.本文报告该试验装置的设计与设备制造情况、磁场测量与垫补结果、10—15mA负氢离子源、高频腔和注入系统实验研究、内靶束流调试等工作.

关键词 强流 质子 回旋加速器 磁铁 束流诊断

1 引言

回旋加速器具有平均束流功率高、运行功耗低的特点.目前,PSI正在其质子束功率1.2MW的回旋加速器的基础上,改造高频系统,预计2007年底前后达到1.8MW^[1];加拿大TRIUMF的负氢回旋加速器的

平均束流功率也在逐渐提高.为试验研究强流回旋的一些先进技术,自2004年开始,在一些基础研究课题的支持下,我们陆续研究、设计、加工了一些关键部件,先后实验研究达到单项技术指标;并且,由于这些小型基础研究课题在研究内容的选择上考虑了回旋加速器的总体安排,使得在单项技术研究之后,目前已有条件集成为一套强流回旋加速器综合试验装置(示意图见图1),主要部件包括:13t的四扇叶精密主磁铁、25000AT励磁主线圈、70MHz高频谐振腔、10kW高频主功率源、真空系统、电源系统、气动系统、控制系统、水冷系统等.这些硬件设施2006年底已经全部完成到位,2007年4月主要安装完成,6月份开始调试离子源和轴向注入系统、中心区.本文将报告该试验装置的设计与设备制造情况、磁场测量与垫补结果、10—15mA负氢离子源、高频热实验和注入系统实验研究、内靶束流调试等工作.

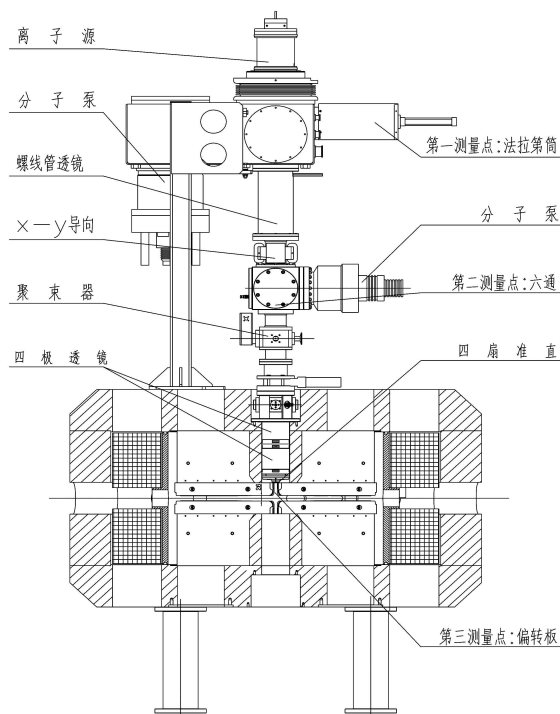


图1 强流回旋加速器综合试验装置总体布局示意图

2 总体设计

强流回旋加速器综合试验装置的设计定位既是一台可以将负氢离子加速到大约10MeV、剥离引出质子束的小型回旋加速器,也是一台强流回旋加速器的综合技术试验台架,用于试验100MeV回旋加速器的若干关键设计.其设计特点是:采用外部负氢离子源和全磁元件的轴向注入系统;四扇叶的主磁铁采用变气隙磁极结构以改善轴向聚焦力;垂直引出导线的主线圈使整机有更好的自屏蔽;结合类三角型和同轴线

2008-01-07 收稿

^{*} 国家自然科学基金(10125518)资助

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

型高频腔的特点设计异型铜制腔体以充分利用紧凑型主磁铁的谷区空间;引出系统为垂直插入式固定能量,可精密控制、剥离引出束流。

3 主磁铁与束流动力学

3.1 主磁铁设计

在磁铁设计时,选取峰值磁场为1.75T,扇形叶片角度为 54° ,偏心安装,磁极间气隙为2.4cm,且从半径 $r=26\text{cm}$ 之后,气隙随半径增加而逐渐减小,磁极的半径为45cm,同时考虑束流的引出和高速馈入、频率微调的位置,高频腔和螺旋偏转板的安装空间等,在三维数值模拟磁场分布的基础上重点研究加速特性和横向自由振荡频率的变化规律.主磁铁的下半部分结构图见图2.

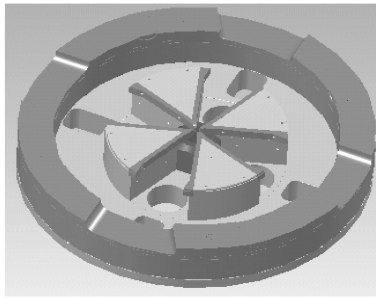


图2 强流回旋加速器综合试验装置主磁铁下半部结构

3.2 束流动力学计算结果

分别基于3D有限元分析和实验测量的磁场分布,用静态平衡轨道和加速轨道两种跟踪方式,计算加速过程中束流的等时性和横向运动的稳定性.图3和图4分别给出基于磁场测量数据的结果.

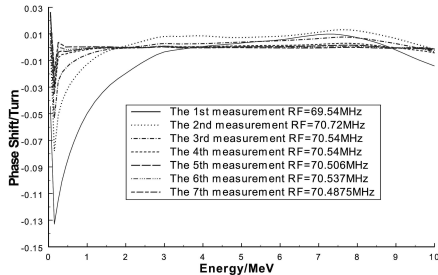


图3 各次测量磁场在最佳频率时的滑相

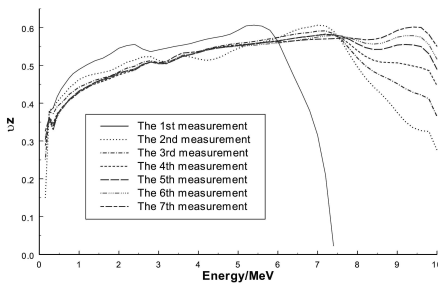


图4 轴向自由振荡频率

3.3 磁场测量与垫补

对于紧凑型、自屏蔽磁铁结构,测磁仪设计十分困难.通过多种实践尝试,最终采用驱动系统与定位反馈分离的方式,使磁场测量系统的角向旋转定位精度小于 10s .经7次磁场测量与垫补后,滑相控制在 $\pm 14^\circ$ 之内,轴向自由振荡频率高于0.5和Walkinshov共振线,分别见图3和图4.还实验研究一种针对一次谐波进行垫补的新方法,使得在中心区附近的一次谐波幅值由通常的35Gs降到12Gs,加速区域的一次谐波小于5Gs.可见变气隙磁极结构改善了高能端的轴向聚焦,新的谐波场垫补方法可有效垫补采用铸件引起的非理想场.

4 高频系统

高频系统由高频机、传输线系统、高频谐振腔三个部分构成.由高频信号源产生的高频信号,经过放大,通过带有正向、反向监测定向耦合器,经由3英寸高频硬馈管、通过耦合电容馈入到高腔中,为粒子加速提供高频功率,系统框图见图5.

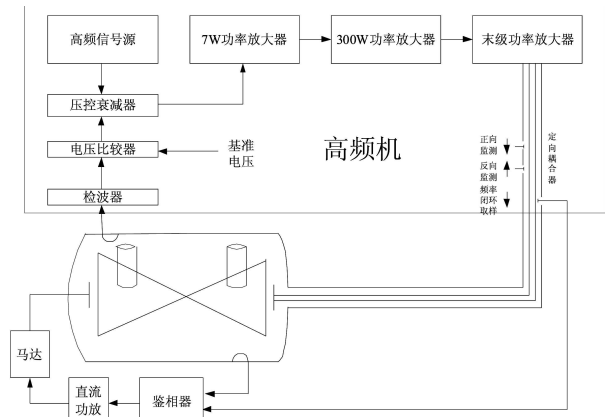


图5 高频系统框图

4.1 高频腔

在强流回旋加速器综合试验装置中,中心区模型物理设计和磁铁设计的结果表明,磁铁的谷区不再有足够的空间安放紧凑型回旋常用的类三角形腔体,如采用半波长同轴线型腔体,则主磁铁上下方会伸出较长的四根同轴线,为此,提出结合类三角形腔体和同轴等阻抗传输线于一体的结构,利用磁铁盖板上大孔位置,放腔体同轴线部分.高频腔的结构见图6,基本结构参数见表1(单位:cm).

表1 70MHz回旋加速器高频谐振腔的主要技术参数

三角形腔部分		同轴线部分	
角度	37.500	外导体半径	10.000
外半径	45.000	圆柱体高度	可根据频率调节
高度	31.300	内导体中心位置	32.000

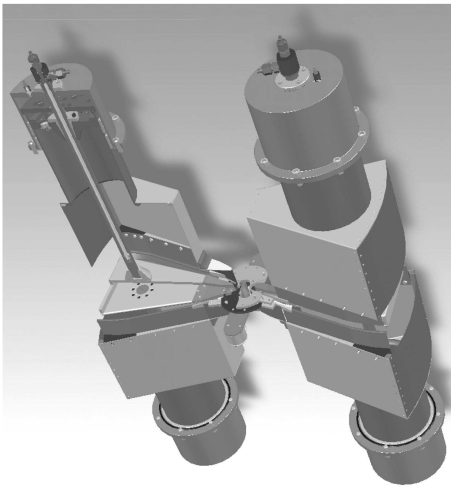


图 6 高频腔体示意图

4.2 高频机与高频闭环控制

高频发射机的放大系统包括高频信号源, 7W, 300W 固态中间级和由电子管(4CX15,000A)构成的末级, 可适应负载变化. 额定输出功率为 12.5kW, 频率为 $70\text{MHz} \pm 5\text{MHz}$, 系统频率稳定性为 $1 \times 10^{-6}/8\text{h}$, D 电压稳定性为 $5 \times 10^{-4}/8\text{h}$.

高频控制系统由幅度控制环和频率微调环组成. 由腔体取样得到的信号经过高频机辅助控制盒的检波线路, 所获得的电平与基准电压比较, 控制压控衰减器的输出, 从而决定中间驱动级的输入, 形成幅度闭环. 而由腔体取出的另一路信号与高频机末级腔的取样信号分别通过鉴相线路, 所获得的电平差经过直流功放放大通过步进马达驱动液压系统, 对腔体的谐振频率进行微调, 形成频率闭环.

5 束流的注入与引出系统

采用的外部负氢离子源于 2003 年调试成功. 该源由 10 组永久磁铁产生用于约束等离子体的多峰磁场最大强度为 5kG; 离子源束流引出系统由等离子体电极、吸极和地电极组成; 在地电极上还安装了一个小的圆形复合型 $x-y$ 导向磁铁, 以调整束流对中, 引出的直流束高于 10mA, 详见文献 [2]. 最近对绝缘环材料和电源系统进行了改进, 改善了离子源真空度提高了电源系统的稳定性.

轴向注入线长度为 200cm, 布局图如图 1 所示. 注入负氢束的能量为 30keV, 注入线采用的横向聚焦元件包括一个螺旋管透镜和一对四极磁铁, 为全磁聚焦元件以期获得较好的空间电荷效应中和率. 注入线光学匹配采用程序 TRANSPOTR^[3], 计算中考虑了空间电荷效应和主磁铁轴向磁场的影响.

中心区的高频相位接收度约 $\pm 20^\circ$, 结构见图 7, 详细设计结果见文献 [4].

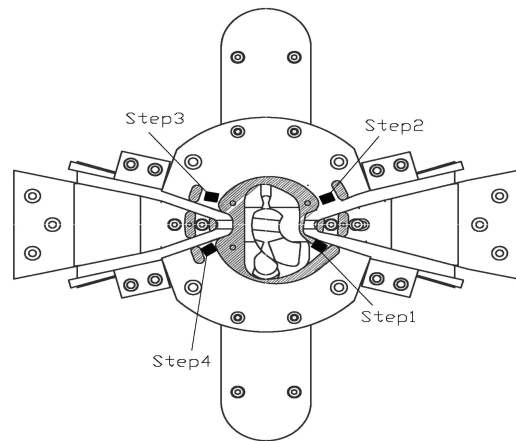


图 7 中心区结构及束流调试内靶位置示意图

束流引出系统包括三重可旋转更换的剥离膜及支架, 剥离靶和旋转驱动系统 3 部分. 由于引出束流能量固定, 为此, 将通常水平剥离靶结构改为沿磁极边缘垂直插入的结构, 控制靶杆机械转动, 高精度编码器反馈定位剥离膜角度, 精度好于 0.01° .

6 束流诊断系统与调束结果

束流诊断系统包括注入线上的离子源法拉第筒、六通的阻挡靶和荧光靶、四扇准直器、注入偏转板等, 见图 1; 以及中心区的多内靶 (见图 7)、径向靶和剥离引出靶.

束流调试主要分为两部分进行, 分系统调试和整机束流调试. 分系统调试主要包括真空系统、电气系统、电源系统、水冷系统、气动系统、控制系统调试. 2007 年 4 月, 分系统调试完成. 整机束流调试分为注入线、中心区和加速区.

注入线的束流调试测量点见图 1. 首先用法拉第筒调试离子源束流, 然后, 用小束流进行注入线调试, 注入线的主要设备有螺旋管透镜、第二 $x-y$ 导向磁铁、四极透镜等. 在注入线六通处加入一阻挡靶, 通过对螺旋管透镜等注入线部件的调试、匹配, 以在六通处获得最大束流为目标进行调试. 六通调试完成后, 撤掉该阻挡靶, 以上一步调试获得的各部件参数为依据, 以注入偏转板为束流接收器, 进行调试. 调试以偏转板前的四扇准直器上束流最小, 注入偏转板上束流最大为目标. 表 2 给出离子源束流为 0.70mA 时, 经过螺旋管透镜前的光栏将束流卡到 0.55mA 后, 注入线的调试结果.

表 2 注入线束流调试结果

离子源	注入线六通	四扇准直器	注入偏转板
0.7mA	0.55mA	0.01mA	0.53mA

注入偏转板和中心区调试分 4 步进行, 如图 7 所示, 在注入偏转板出口后、最初 4 个加速间隙附近的

4个位置分别加入一临时内靶,进行束流调试.在离子源束流为0.70mA时,偏转板出口处(位置1)获得约0.50mA的束流;高频输入功率为脉冲功率,D电压估算为40kV左右、未加聚束器的条件下,获得了30 μ A的平均束流.如考虑聚束器,通常平均流强增加1—2

倍.由上述实验数据可见,包括注入线和螺旋偏转板的总的直流注入效率约94%,离子源出口光栏卡束前,效率约75%;高频俘获相位约42°.目前,正在改进高频机,使D电压达到50kV的设计值,然后,用径向靶和剥离靶调试加速区束流.

参考文献(References)

- 1 Schmelzbach P A. XXXIV European Cyclotron Progress Meeting, 2005, Belgrade, Serbia and Montenegro
- 2 ZHANG Tian-Jue et al. Rev. of Sci. Instrum., 2004, **75**: 1854
- 3 Heighway E A, Hutcheon R M. Nucl. Instrum. Methods, 1981, **187**: 89
- 4 YAO Hong-Juan et al. Chin. Phys. C (HEP & NP), 2008, **32**(Supp. I): 53 (in Chinese)
(姚红娟等. 中国物理C, 2008, **32**(增刊 I): 53)

Test Stand Design and Construction for High Intensity Cyclotron Development^{*}

ZHANG Tian-Jue¹⁾ LI Zhen-Guo CHU Cheng-Jie YAO Hong-Juan
GE Tao JI Bin ZHONG Jun-Qing

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

Abstract In order to study the technology on cyclotron design, and to carry out researches on the crucial parts including the main magnet, beam diagnostics and engineering technology to accomplish the experimental verification of the 100MeV high intensity cyclotron and to pave the way for further increasing the current of the proton beam, a series of work has been done in succession since 2004, which highlights the research, design and fabrication of some of the critical parts. The technical requirement for each part has been reached consecutively. At present, all the work has been integrated into a set of comprehensive device, CRM Cyclotron, which is actually a test stand for high intensity cyclotron development. This report will lay emphasis on the following: the CRM Cyclotron design and fabrication of relevant equipment, magnetic field mapping and shimming, 10—15mA H- ion source, experimental research on RF cavity and injection system, beam commissioning on the internal target system, etc.

Key words high intensity, proton beam, cyclotron, magnet, beam diagnostics

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10125518)

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