

强流回旋加速器中心区模型试验装置上 偏转板和中心区技术研究

姚红娟^{1,2;1)} 吕银龙¹ 张天爵¹ 李振国¹ 贾先禄¹
管锋平¹ 王振辉¹ 林军¹ 林郁正²

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 中心区模型试验装置是进行强流回旋加速器关键技术研究的实验平台. 本文介绍了为该试验装置所设计的偏转板和中心区, 包括物理设计的考虑、数控加工技术及安装精度的控制技术. 由于电磁场的相互作用粒子在偏转板中的的轨迹为螺旋线, 其电极形状复杂, 加工采用四轴联动以上的数控机床完成. 为满足束流动力学的需要, 中心区的电极结构比较复杂而且不规则, 表面光洁度要求高, 另外尺寸和安装位置精度要求严格. 中心区曲面电极结构由三轴联动加工中心加工完成, 中心区地电极与高频D板头部的电极间隙非常重要, 在安装过程中, 制作了专用的“电极间隙通止规”控制电极间隙精度在 $\pm 0.05\text{mm}$.

关键词 强流回旋加速器 螺旋偏转板 中心区

1 引言

强流回旋加速器中心区综合试验装置是为中国原子能科学院的大型科研工程北京放射性核束装置的驱动加速器CYCIAE-100进行实验验证而设计的. 它是一台磁极为直边扇、能量可调的回旋加速器, 四次谐波加速 H^- 离子, 双向剥离引出质子束, 引出最大能量约为 10MeV . 中心区综合试验装置采用外部离子源, 轴向注入系统将束流垂直注入到回旋加速器内部. 偏转板和中心区是轴向注入系统的重要组成部分, 偏转板的作用是进行 90° 偏转将垂直方向注入的离子偏转到水平面上, 由中心区的加速结构及高频电压对束流进行加速.

2 物理设计的考虑

中心区综合试验装置采用螺旋静电偏转板, 主要优点在于体积小, 设计中可供选择的调节参数较多. 而它的主要缺点是电极形状复杂, 不易加工. 同时其传输特性比较复杂, 相空间在三个投影方向上互相耦合. 设计的过程中需要考虑空间布局、发射度增长的控制及与中心区的匹配等问题. 中心区是束流在回旋

加速器中前几圈运动的区域, 其设计直接影响引出束流的品质.

2.1 螺旋静电偏转板

偏转板的设计要考虑试验装置的相关参数如磁铁镶条头部的空间位置, 注入能量等, 首先确定偏转板的高度, 然后采用数值模拟的方法跟踪粒子的轨迹, 调节参数 A 和 k' 以满足中心区匹配点的要求和将束流偏转到中心平面地要求($z=0, Pz=0$). 中心轨迹的跟踪采用CASINO^[1]程序, 偏转板的电极结构的计算及三维电场的计算分别采用程序INFLECTOR^[2]和RELAX3D^[3].

中心区试验装置上螺旋静电偏转板的基本参数如表1所示, 参考粒子的轨道见图1.

表1 中心区试验装置上偏转板的基本参数表

	数值
注入能量	30keV
电极实际高度 h	29mm
电偏转半径 A	33mm
倾斜参数 k'	0
电极间隙	8mm
电极宽度	16mm
电压	$\pm 7.05\text{kV}$
偏转板入口旋转角度	260°

2008-01-07 收稿

1) E-mail: yaohongjuan@gmail.com

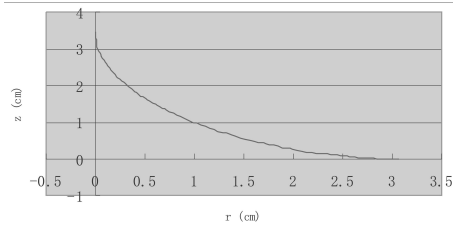


图 1 参考粒子在偏转板中的轨道($r = \sqrt{x^2 + y^2}$)

2.2 中心区对中技术

研究在回旋加速器中心区由磁场和电场共同作用下的离子轨迹行为是非常重要的, 以此为基础选择最佳束流注入条件和设计磁极与电极以获得最佳束流品质, 保证束流是对中的。

束流对中技术的关键是寻找加速平衡轨道(AEO). 选择中心相位从10MeV反向跟踪至低能量, 调节初始的径向位置和动量(即 r 和 Pr), 使加速轨道相对静态平衡轨道的偏移 x 和 Px 最小化, 得到的轨道即是AEO. 反向跟踪AEO至第一个加速间隙, 确定注入点; 调整偏转板参数使注入的束流与中心区的要求相匹配, 通过多次迭代得到参考粒子的对中轨道. 中心区设计的基本思路可参见文献[4], 这里介绍的主要是对中技术。

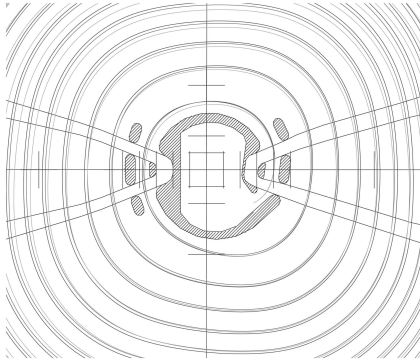


图 2 中心区参考粒子在 40° 相宽内的轨迹

测磁垫补完成后选定的高频频率为70.49MHz, 对应等时性磁场场强为11.57kG, 高频Dee盒电压为50kV, 四个加速间隙. 采用CYCLONE^[5]进行轨迹跟踪给出中心粒子的运动情况, 图2给出了 40° 相位接收度范围内的中心粒子束流轨迹. 中心区试验装置的中心区轨道对中误差约为3mm, 这种误差可以很容易的通过调谐线圈进行校正。

3 数控加工技术

3.1 偏转板的加工

粒子在螺旋静电偏转板中受到电场和中心区磁场的相互作用, 其轨迹为螺旋线, 电极形状也因此变成螺旋线型, 因此其加工必须采用四轴联动以上数控机

床. 根据中心轨道和偏转板电极四条边界的数据及电极高度等, 计算电极曲面的形状数据, 再通过程序(程序的算法参见文献[6])将曲面数据转换为数控机床的刀具轨迹数据, 即工件的旋转角度, 铣刀的轴向和横向运动偏移量, 将数据输入四轴联动数控机床即可完成偏转板电极曲面的加工。

加工材料为紫铜, 偏转板的加工要求表面粗糙度不大于1.6mm, 加工完成后所有外露表面抛光至0.8mm.

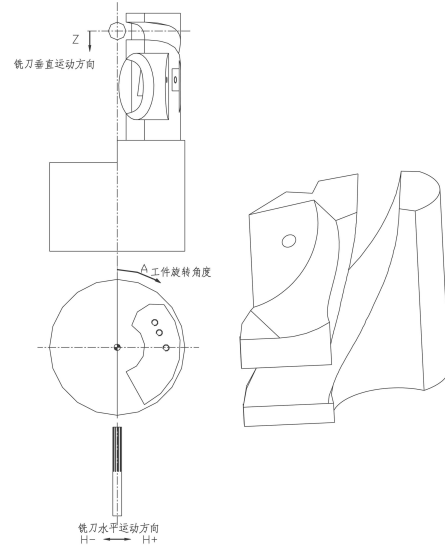


图 3 螺旋静电偏转板加工图

3.2 中心区的加工

综合试验装置的中心区物理设计完成后, 将需要的电极结构二维图形及轴向分层的尺寸提供给机械设计人员, 以此为基础进行三维结构设计. 机械设计完成后, 给出复杂电极结构的关键位置的坐标点, 由三轴联动数控加工中心完成曲面电极结构的加工, 表面粗糙度要求不大于0.8mm, 加工后抛光。

中心区加工的材料与偏转板相同, 采用紫铜. 由于中心区上下两个法兰要求平行度不超过0.01mm, 法兰平面采用研磨加工方法, 既保证了单个零件的精度, 也保证了中心区安装后的位置精度。

4 安装精度控制

为满足束流动力学的需要, 要求对偏转板和中心区的安装精度进行严格控制, 特别是中心区. 中心区的电极结构比较复杂、不规则, 连接部件比较多而且需要和高频腔的Dee盒(包括假地和D板)进行连接. 物理设计要求Dee盒头部的安装, 加速间隙精度要控制在0.1mm内, 要求在高频连接螺丝处有调节量, 以保证头部和间隙的安装精度; 与高频D板连接弹簧片处, 上腔体落下压到中心区, 保证留有0.1—0.2mm的

调节余量, 即不能压死。

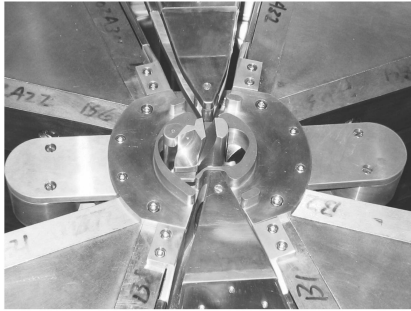


图 4 偏转板和中心区安装完成后的照片

加工完成后将各零件分步组装, 分别为偏转板的组装、中心区上、下法兰与磁铁的连接固定、Dee 盒头部的组装等, 组装后检查相邻面是否光滑过渡, 所有锐边倒钝. 修正各部位的配合处, 使其光滑过渡。

为严格控制中心区地电极与高频 D 板头部的电极

间隙精度, 在安装过程中, 制作了专用的“电极间隙通止规”, 用于控制间隙的尺寸, 最后达到的间隙精度为 $\pm 0.05\text{mm}$, 满足物理提出的精度要求. 安装工作在本实验室由内部人员进行, 安装完成后的偏转板和中心区如图 4 所示。

5 结论

用于中心区综合试验装置的螺旋静电偏转板和中心区的物理设计、加工及安装工作均已完成. 对中心区设计中的对中技术、螺旋偏转板和中心区的数控加工技术及安装精度控制技术进行了详细的介绍, 并给出了最终的结果. 基于实际测磁的磁场数据, 中心区的束流轨道对中误差约为 3mm . 偏转板和中心区安装后加速间隙的精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内, 满足束流动力学的物理需求。

参考文献(References)

- 1 Milton B F, Pearson J B. TRI-DN-89-19, July 1998
- 2 Milinkovic L. TRI-DN-89-21, September 1992
- 3 Cost C J, Jones F W. RELAX3D, TRIUMF internal report TRI-CD-88-01 (1988)
- 4 YAO Hong-Juan et al. HEP & NP, 2006, **30**(Supp. I): 141 (in Chinese)
(姚红娟等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(Supp. I): 141)
- 5 Milton B F. TRI-DN-99-4, June 1 1999
- 6 ZHANG Tian-Jue et al. Atomic Energy Science and Technology, 1996, **30**(5): 399 (in Chinese)
(张天爵等. 原子能科学技术, 1996, **30**(5): 399)

Technical Study for Inflector and Central Region of High Intensity Central Region Model Cyclotron

YAO Hong-Juan^{1,2;1)} LÜ Yin-Long¹ ZHANG Tian-Jue¹ LI Zheng-Guo¹ JIA Xian-Lu¹
GUAN Feng-Ping¹ WANG Zhen-Hui¹ LIN Jun¹ LIN Yu-Zheng²

¹ (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

² (Department of Engineering Physics Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The central region model (CRM) cyclotron is the experimental platform for the key technology study of a high intensity beam cyclotron. In this paper we introduce the spiral inflector and central region designed for the CRM cyclotron, including the physical design, the numerical control machining and the installation precision control techniques. The shape of electrodes is complex, and machining with a strict tolerance must be done by a numerical control machine tool with the number of its axles no less than 4. The electrodes of central region were finished by using 3-axle machine tools. The size of gaps between the ground and Dee tip is very important, a special device was made to guarantee the installation precision, and the error of gaps was controlled within $\pm 0.05\text{mm}$.

Key words high intensity cyclotron, spiral inflector, central region