

# 强流回旋加速器综合试验装置的磁场测量与垫补

钟俊晴<sup>1)</sup> 吕银龙 殷治国 张天爵 储诚节 王川 王振辉 邢建升 李振国  
林军 葛涛 吴隆诚 安世忠 姚红娟 贾先禄 魏素敏 邹俭 王峰 蔡红茹

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 强流回旋加速器综合试验装置的主体是一台紧凑型回旋加速器, 加速器主磁铁材料的不均匀性, 磁铁加工和安装的非理想因素将引起中心平面的磁场的非理想分布, 因此有必要对其中心平面的磁场进行测量和垫补. 本文主要讲述该综合试验装置的霍尔感应磁场测量系统的设计和使用; 通过磁场测量数据分析进行镶条的再加工, 最终实现对等时性磁场和束流的纵向聚焦的垫补; 研究与实践了一种对磁场一次谐波进行垫补的方法, 垫补的结果满足了设计的要求.

**关键词** 回旋加速器 磁场测量系统 一次谐波 磁场垫补

## 1 引言

中国原子能科学研究院正在设计和建造的串行加速器升级工程<sup>[1]</sup>要求在现有的串行加速器前端建造一台100MeV紧凑型直边扇形回旋加速器, 引出质子离子束流强为200 $\mu$ A, 能量范围为75—100MeV. 对于设计和建造这样一台强流回旋加速器, 主要的挑战是如何克服强流带来的诸多问题, 而中心区是提高流强的瓶颈, 某些关键技术存在一定的盲区, 需要做预先研究与实验验证, 因此, 先建造了一台与100MeV回旋加速器结构相近、引出能量低、渐变气隙的强流回旋加速器综合试验装置用于各种部件的实验验证和强流束的引出实验. 该试验装置主要由主磁铁系统, 真空系统, 高频系统, 离子源注入系统和束流引出系统等构成, 强流回旋加速器综合试验装置的整体见图1. 其中, 主磁铁由4对磁极、上下盖板和磁轭组成, 磁极间的气隙为非均匀气隙, 气隙高度为2.3—2.6cm.

强流回旋加速器综合试验装置的磁场测量和垫补目标是: 磁场满足等时性要求, 束流的积分滑相控制在 $\pm 20^\circ$ 内; 一次谐波垫补后, 在束流引出区附近和中心区附近的一次谐波场幅值小于15Gs, 在其它半径幅值小于5Gs.

## 2 试验装置的磁场测量和垫补

### 2.1 磁场测量仪简述

强流回旋加速器综合试验装置的磁场测量系统主

要包含有: 旋转横梁, 步进电机与控制卡, 涡轮蜗杆, 角度编码器, 霍尔探头, 特斯拉计, 传动轴和定位轴等, 磁场测量仪的总体图见图2.

综合试验装置的磁场测量仪的角度位置精度要求控制在16s之内, 而径向位置精度要求控制在0.6mm.

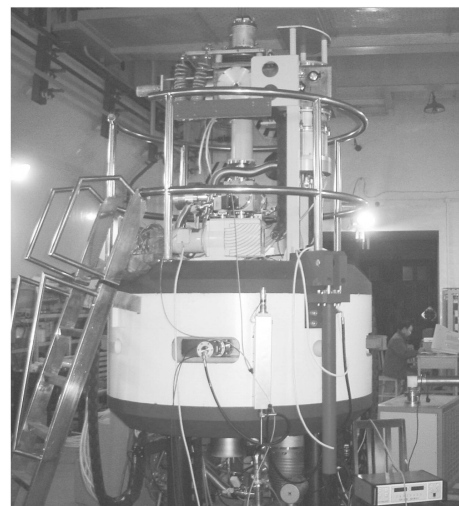


图1 强流回旋加速器综合试验装置的整体图

磁场测量系统的精度主要由霍尔探头的精度和机械系统的定位精度决定, 测量工具选用Group3公司的数字特斯拉计和MPT-141型霍尔探头, 探头的测量精度为万分之一. 测磁系统的主要误差来源是机械系统的定位精度, 在定位霍尔探头的两个自由度(周向和径向)中, 周向定位采用闭环控制, 驱动系统与定位

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: zhongjunqing123@hotmail.com

系统分开, 霍尔探头安装在旋转臂上, 旋转臂与定位轴通过定位销形成刚性连接, 角度编码器安装在定位轴的底端, 使其能够准确反映旋转臂的角度位置, 且在反复多次的磁场测量过程中定位轴保持不动, 解决了测磁过程中零点恒定的问题, 使每次测磁数据之间具有可比性. 径向位置的定位由于磁极间气隙小, 无法利用光栅定位, 只能采用精密试块定位, 径向位置的精度由精密试块的安装精度决定.

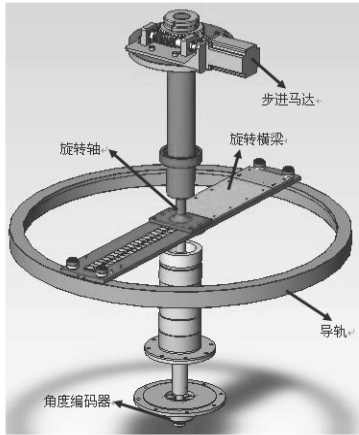


图 2 磁场测量仪

## 2.2 磁场的测量和垫补

中心平面的磁场测量采用极坐标取点方式对中心平面的磁场进行测量, 磁场测量点为: 在半径方向每间隔 20mm 测量一组, 在角度方向每隔  $2^\circ$  测量一组. 磁场测量的第一圈从加速器中心点处开始, 最后一圈的半径为 460mm.

因为磁场测量的数据大, 有必要在测量过程中对数据的合理性进行检查, 可通过计算机图形学手段将磁场数据显示在屏幕上进行检查、判断. 磁场测量完成后, 通过实际磁场下的束流轨道运动跟踪, 获得该次测量磁场的最大频率、最佳频率、束流的最小相移、等时场的偏移量以及纵向聚焦频率<sup>[2]</sup>等数据. 结合镶条垫补量与磁场的增量的关系给出镶条的加工量.

综合试验装置的磁场测量和垫补过程共经历了 7 次磁场的测量和 6 次的磁场垫补, 最终中心平面的磁场基本满足等时场的要求, 束流的积分滑相控制在  $\pm 14^\circ$  之间. 磁场的等时场垫补和纵向聚焦垫补的结果分别见图 3(a)、图 3(b).

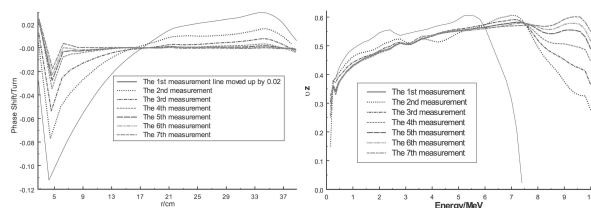


图 3 (a) 等时场垫补的结果; (b) 轴向聚焦的垫补结果

## 2.3 一次谐波的垫补

在进行第五次等时场垫补完成后, 磁场的一次谐波幅值见图 4 中实线所示.

### 2.3.1 一次谐波垫补方法的研究

从图 4 的实线可知在中心区附近和引出区附近一次谐波的幅值都超出了设计的要求, 因此需要研究有效的垫补方法, 以减小磁场的一次谐波. 我们考虑通过垫补相对磁极的镶条来实现, 但是必须与等时场的垫补同时进行<sup>[3]</sup>, 以免破坏中心平面磁场的等时性.

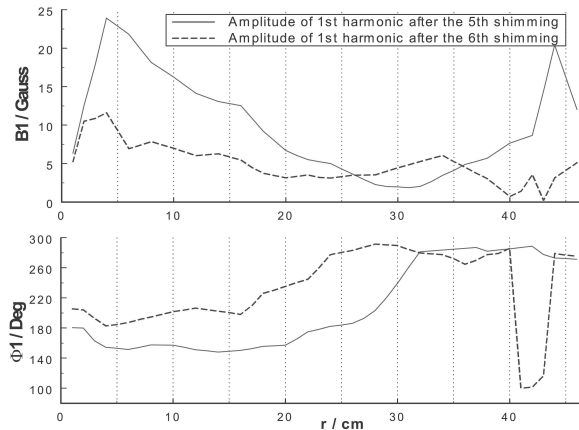


图 4 主磁场一次谐波的幅值和相位

通过对综合试验装置中心平面磁场的数值模拟, 可以近似得到单位角宽度对平均磁场的贡献:

$$B(r) = 250.29 - 1.95 \times r. \quad (1)$$

当在半径  $r$  处存在的一次谐波幅值为  $H_1$ , 且在峰区, 相位为  $\vartheta$  时, 则需要垫补的镶条共四根, 分别在峰区所在的两个磁极中, 其中的两根见图 5. 各个镶条的垫补量为:

$$\begin{aligned} d\alpha_1 &= -\frac{4 \times H_1 \times (\alpha_2 - \vartheta)}{(\alpha_2 - \alpha_1) \times B(r)} \times K, \\ d\alpha_2 &= -\frac{4 \times H_1 \times (\vartheta - \alpha_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1) \times B(r)} \times K, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $K$  为垫补因子, 值的范围在 0 到 1 之间. 而相对磁极的两个镶条的垫补量为  $-d\alpha_1$  和  $-d\alpha_2$ .

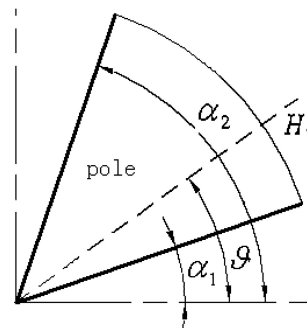


图 5 峰区谐波垫补方法

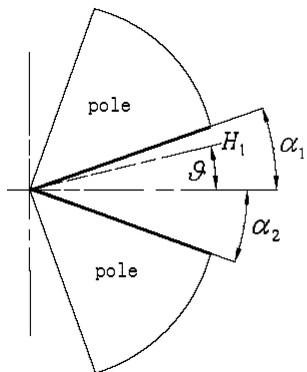


图6 谷区谐波垫补方法

当在半径  $r$  处存在的一次谐波幅值为  $H_1$ , 且在谷区, 相位为  $\vartheta$  时, 则需要垫补的镶条共四根, 分别分布在四个磁极中, 其中的两根见图6. 各个镶条的垫补量为

$$\begin{aligned} d\alpha_1 &= -\frac{4 \times H_1 \times (\alpha_2 + \vartheta)}{(\alpha_2 + \alpha_1) \times B(r)} \times K, \\ d\alpha_2 &= -\frac{4 \times H_1 \times (\vartheta + \alpha_1)}{(\alpha_2 + \alpha_1) \times B(r)} \times K, \end{aligned} \quad (3)$$

而相对磁极的两个镶条的垫补量为  $-d\alpha_1$  和  $-d\alpha_2$ .

### 2.3.2 一次谐波的垫补结果

通过对不同半径的垫补因子的选择, 将得出四条一次谐波的镶条垫补量的曲线, 虽然, 其中的两条在数值上表现出来的是需要在镶条上增加磁铁, 但是在最后的镶条的精加工时, 将等时场垫补的垫补量与一次谐波的垫补量相叠加, 这样就基本消除了镶条上增加磁铁的要求. 一次谐波的垫补结果如图4中虚线所示.

## 3 结论

在磁场测量系统的设计中, 采用驱动系统与定位系统分离的方式, 大大提高了磁场测量角度的精度, 测量结果表明: 角度位置精度达到了  $10s$  以内, 径向精度达到  $0.2mm$  之内. 经过多次的磁场测量和垫补后, 中心平面的磁场分布满足了等时性的要求, 束流的积分滑相控制在  $\pm 14^\circ$  之间. 通过对一次谐波垫补的方法研究和实践, 使得垫补后的一次谐波在中心区附近幅值小于  $15Gs$ , 在其它半径小于  $5Gs$ , 满足了设计的要求, 同时也验证了这种垫补方法的正确性.

### 参考文献(References)

- 1 ZHANG Tian-Jue et al. ICCTA, 2004. 497—502
- 2 Gordon M M. Particle Accelerators, 1984. 39—62
- 3 Kleeven W et al. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2001, 600(1): 348—350

## Mapping System, Magnetic Measurement and Shimming in CRM Cyclotron

ZHONG Jun-Qing<sup>1)</sup> LÜ Yin-Long YIN Zhi-Guo ZHANG Tian-Jue CHU Cheng-Jie WANG Chuan  
WANG Zhen-Hui XING Jian-Sheng LI Zhen-Guo LIN Jun GE Tao WU Long-Cheng  
AN Shi-Zhong YAO Hong-Juan JIA Xian-Lu WEI Su-Min  
ZOU Jian WANG Feng CAI Hong-Ru

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

**Abstract** The Central Region Model (CRM) is a compact  $H^-$  cyclotron. Because of the intrinsic asymmetry of the magnet, its machining and assembly are very complicated. To guarantee the magnet field distribution, it is necessary to measure and shim the magnetic field. This paper presents a study on the design and use of the mapping system based on the Hall Effect and the re-machining of shimming bars after analyzing the magnetic field measurement data to achieve the isochronous field and good vertical focusing frequency. The method to effectively reduce the amplitude of the 1st harmonic by shimming bars is also introduced.

**Key words** cyclotron, mapping system, first harmonic, magnetic field shimming

Received 7 January 2008

1) E-mail: zhongjunqing123@hotmail.com