

高灵敏度等时性回旋加速器束流相位测量系统*

郑建华¹⁾ 刘巍 王义芳 王延谋 马维年 尹炎 宋海宏

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了兰州重离子加速器(HIRFL)束流相位测量装置. 该装置基于双平衡混频原理, 采用了高频信号混频滤波技术, 具有较高的测量灵敏度. 通过安装在加速器中的容性感应探针探测等时性回旋加速器束流相位历程, 在调束中获取等时场信息并对磁场进行优化, 从而提高引出束流强度和束流品质是非常重要的. 该装置通过等时场相位优化实验, 检验了相位测量数据的可靠性, 测量精度达到 $\pm 0.5^\circ$.

关键词 HIRFL 相位测量 混频滤波 等时场 束流品质

1 引言

兰州重离子加速器(HIRFL)是一个有两级加速的组合式等时性回旋加速器系统. 它的注入器是一台 K 值为 69 的螺旋扇回旋加速器(SFC), 主加速器是一台 K 值为 450 的分离扇回旋加速器(SSC). 对于一个等时性回旋加速器来说, 要获得最佳引出束流, 等时场的优化是重要的条件之一, 而束流相对加速电场的高频(HF)相位的变化则灵敏地反映了等时场的失调情况. 在SFC和SSC分别设计安装了平板型无源容性感应相位探针, 采用高频混频滤波测量技术, 研制了等时性回旋加速器束流相位测量装置. 相位探测的频率范围覆盖了HIRFL的粒子加速频率, 即 5.5—16.5MHz, 测量灵敏度为 $5\mu\text{V}$, 即当束流强度为 10nA 时也能测得足以分辨的束流信号. 相位测量精度可达到 $\pm 0.5^\circ$.

2 测量原理

HIRFL束流相位测量系统是利用双平衡混频原理把相位探针上感应的信号转换成与束流相位相关联的直流电压信号, 其测量原理如下:

加速频率为 ω_d 的束流脉冲信号用傅里叶级数可表示为

$$u(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\omega_d t + \varphi_n), \quad (1)$$

其中 A_n 和 φ_n 分别为第 n 次谐波分量的幅度和相位. 安装在加速器中心的容性感应相位探针不仅感应束流信号, 同时也感应高频电压干扰信号. 一般束流信号对于干扰信号的信噪比随着谐波次数的增加而增加, 但束流信号的强度则随着谐波次数的增加而减弱. 因此, 权衡束流强度和信噪比两个因素, 我们选取信噪比较高的二次谐波分量作为束流相位测量信号, 即

$$u_2(t) = A_2 \cos(2\omega_d t + \varphi_2). \quad (2)$$

为了便于信号处理, 需要把束流信号转变成频率固定的相位信号, 使系统测量与加速频率无关. 首先采用混频方法, 选取频率分别为 ω_m 和加速频率的二倍频 $2\omega_d$ 的信号,

$$u_m(t) = A_m \cos(\omega_m t), \quad (3)$$

$$u_{2d}(t) = A_{2d} \cos(2\omega_d t). \quad (4)$$

作为参考信号, 第一步两参考信号混频,

$$u_{md}(t) = A_m \cos(\omega_m t) + A_{2d} \cos(2\omega_d t). \quad (5)$$

2006 - 07 - 11 收稿

* 兰州重离子加速器国家实验室资助

1) E-mail: zjh@impcas.ac.cn

在混频电路输出端通过谐振回路使其谐振在差频 $\omega_m - 2\omega_d$ 上, 选出差频信号与束流相位测量信号 $u_2(t)$ 作第二次混频, 经过一个中心频率为 ω_m 的窄带滤波器, 选取 ω_m 使之满足

$$\omega_m - 4\omega_d \ll \omega_m. \quad (6)$$

在窄带滤波器的输出端得到一个频率固定的相位信号, 其幅值为 A'_2 , 与束流感应信号的二次谐波分量的幅值有关:

$$u'_2(t) = A'_2 \cos(\omega_m t + \varphi_2), \quad (7)$$

该信号与加速频率 ω_d 无关, 但反映了束流相位大小, 分别与束流相位严格相差 90° 的固定频率参考信号 $u_m(t)$ 相关联, 滤去所有高频分量, 得到两个正交直流电压分量:

$$a = \frac{1}{2} A'_2 A_m \cos \varphi_2, \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{2} A'_2 A_m \sin \varphi_2, \quad (9)$$

由此可以得到束流相位

$$\varphi_{\text{beam}} = \varphi_2 = \arctg \frac{b}{a}. \quad (10)$$

3 系统硬件

相位测量系统的硬件主要包括拾取束流信号的相位探针、相位信号测量处理系统以及计算机信号获取处理系统.

3.1 相位探针

基于国际上许多加速器实验室的研究经验^[1, 2], 电容性感应探针是等时性回旋加速器相位探针的最佳选择. 电容性感应相位探针以加速器中心平面为对称, 沿径向等距离地安装在加速器中, 每个探针包括一个铜板制成的电极引出束流信号, 其感应信号电压正比于束流脉冲的电荷数, 电极外围设计有两层屏蔽, 一方面作为电极的保护不被束流轰击, 同时也作为减少高频信号干扰的屏蔽. 在注入器 SFC 中安装了 6 套相位探针, 电极尺寸为 $50\text{mm} \times 100\text{mm}$, 两极板间距离为 35mm ; 在主加速器 SSC 中安装了 15 套相位探针, 电极尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$, 两极板间距离为 40mm , 相位探针沿径向的安装位置覆盖了从小半径到大半径整个加速区, 其相位测量结果可以充分反映等时场的状态.

探针的等效电路^[3]可表示为一个电流源驱动一个电阻与探针电容并联的负载, 其特性阻抗为 50Ω (如

图 1). 探针上感应的束流信号是通过双屏蔽同轴电缆引出加速器, 真空屏蔽采用了专用的 SMA 同轴密封插座, 以保证加速器的高真空要求.

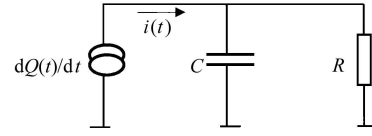


图 1 容性感应探针的等效电路图

3.2 测量及信号处理

基于上述束流相位测量原理构成了如图 2 所示的束流相位测量装置. 探针上感应的束流信号经过严格测量的等长度双屏蔽同轴电缆, 使得探针上、下电极上感应到的相位相同的束流信号相互叠加, 而相位相反的高频干扰信号则相互抵消, 提高了感应束流信号与干扰信号的信噪比^[4]. 一对探针同时被 RF 同轴切换器选通, 并通过功率分配器相加. 为了保证系统的可靠性, 选用了串话量小于 -70dB 的 VAS-316D 同轴切换器, 消除了道与道之间的相互干扰, 将信号馈送到前置放大器经放大、滤波对信号进行预处理, 提取信噪比较高的二次谐波分量, 然后与另一路来自高频参考信号 RF 和晶振信号源的差频信号在混频器中进行混频, 产生与晶振频率相等的包含待测束流相位的信号. 最后与晶振信号源的另一路信号一起通过鉴相器输出决定束流相位信号的两个正交直流电压分量 $A \sin \varphi$ 和 $A \cos \varphi$, 从而测得束流相位.

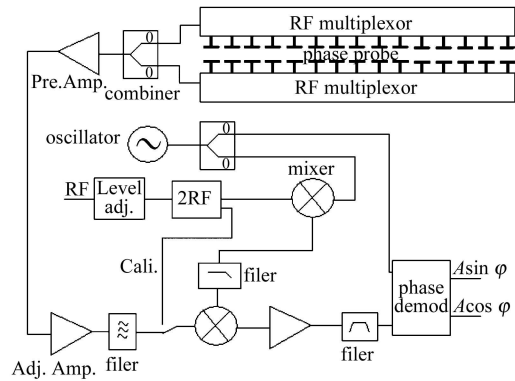


图 2 束流相位测量装置结构框图

4 系统软件

为了保证系统测量精度, 提高系统的易操作性和易扩展性, 并能适应多任务的控制要求, 利用可视化软件编程技术, 采用 VC++ 开发了基于 Windows 操作平台的系统控制软件. 利用面向对象的设计方法, 根

据模块开放闭合原理,设计了具有总线结构的模块化系统控制软件.各模块之间相互独立,它们通过在数据总线上传递数据和在控制总线上相互发送消息来进行联系.这使得软件在运行时可以随时响应用户的要求.图3为系统软件设计结构.

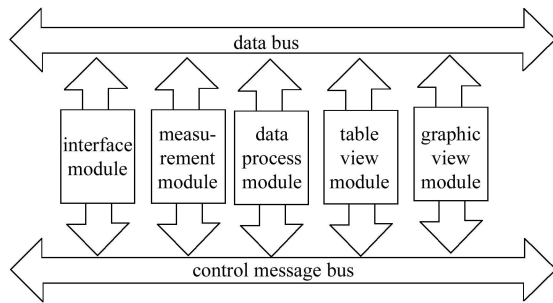


图3 系统软件设计结构

该系统软件具有SFC和SSC及束运线相位自动测量、手动测量和系统自检等功能,相位信息不仅可用图形显示也可用数字显示,相位信号通常是通程序控制,扫描所有探针获取束流信号,扫描的相位历程可以被显示为图形及数据^[5].任何一个探针也可以被分别选择进行测量,并且所选探针的相位可以被连续测量显示,便于对测量数据进行可靠性分析.

5 测量结果及分析

HIRFL束流相位测量系统在完成安装调试并投入运行后,不断对硬件及软件系统改进完善,先后在HIRFL系统的注入器SFC和主加速器SSC上,利用Ar, C, O, N和S等多种粒子不同能量的束流进行了相位测量实验,其结果都能正确给出加速器磁场与束流相位的关系.系统测量灵敏度是相位探针尺寸、束流脉冲和束流强度的函数,由于相位探针临近加速器高频腔体,加速电压对相位探针引起的强信号干扰制约了系统测量灵敏度.在束流强度大于100nA的相位测量精度好于0.5°.在束流强度比较弱时,许多系统误差使得绝对相位测量很难,但通过在软件处理中采用本底扣除的方法,在5—10nA束流强度范围可以实现不同相位探针之间的相位差测量.

束流相位测量对于获取束流强度的最大动态范围和改善等时场是非常重要的.图4(a, b)分别给出了改

进设计后的束流相位测量系统在加速器机器研究和调束中加速氩离子和碳离子时对SSC磁场进行等时场优化前和优化后测量的束流相位变化结果.优化前在15套相位探针上测量的束流相位差比较大,说明磁场的等时性较差.根据各相位探针测得的束流相位,改变相应半径的等时性线圈电流,调整磁场参数后重新测量各相位探针上的相位.如此经过若干次迭代,使各相位探针上测量的束流相位尽量趋于一致,等时场得到了优化.从图4(a, b)可以看出经过等时场优化后束流相位差减小,测量的最大相位差小于7°,从而提高了加速器的束流强度和引出效率.在2006年1月主加速器SSC引出的25MeV/u氩离子调束时束流强度达到1.5 μ A,总效率超过50%,达到了运行17年以来的最好结果.

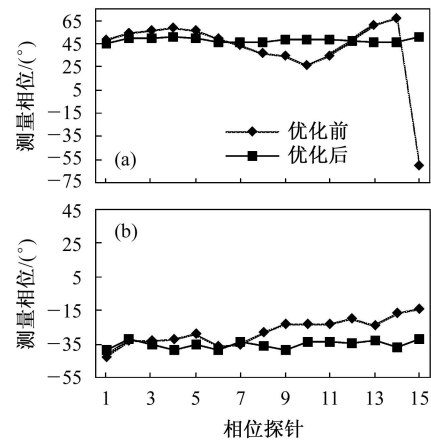


图4 氩离子(a)和氧离子(b)等时场优化前后束流相位变化测量结果

6 结束语

目前HIRFL束流相位测量系统已经投入运行,配合加速器机器研究和运行调束,对SSC主加速器等时场进行了优化,取得了很好的结果,从大量的测量结果分析中证明了束流相位测量数据可靠,重复测量误差小于 $\pm 0.5^\circ$,测量精度达到了预期设计要求.这为兰州重离子加速器的改进提供了重要的束流诊断依据.目前,线圈电流的调节还是手动的,耗时比较长,将来采用合理的算法实现等时性的自动优化后,会大大提高等时场优化效果,并节约大量调束时间.

参考文献(References)

- 1 Brautigam W et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1979, **NS-26**(2): 2375—2378
- 2 Gustafsson J. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1993, **A335**: 417—423
- 3 ZHENG Jian-Hua. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, **24**(6): 657 (in Chinese)
- 4 Hiroro Yamazaki. Anti-interface Technology of Electronic Circuit. Beijing: Science Press, 1989 (in Chinese)
(山崎弘郎. 电子电路的抗干扰技术. 北京: 科学出版社, 1989)
- 5 ZHENG Jian-Hua. Development of Beam Diagnostic System for HIRFL. Proceedings of the 1997 International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Beijing, 1997. 3—7

High Sensitivity Beam Phase Measurement System for Isochronous Cyclotron^{*}

ZHENG Jian-Hua¹⁾ LIU Wei WANG Yi-Fang WANG Yan-Mou
MA Wei-Nian YIN Yan SONG Hai-Hong

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The beam phase measurement system in the HIRFL is introduced. Based on the double-balanced mixer principle using rf-signal mixing and filtering techniques, a stable and sensitive phase measurement system has been developed. The phase history of the ion beam is detected by using a set of capacitive pick-up probes installed in the cyclotron. The phase information of the measurement is necessary for tuning to obtain a optimized isochronous magnetic field which induces to maximize the beam intensity and to optimize the beam quality. The result of the phase measurement is reliable and the accuracy reaches $\pm 0.5^\circ$.

Key words HIRFL, phase measurement, mixer and filter, isochronism of magnetic field, beam quality

Received 11 July 2006

* Supported by National Laboratory of Heavy Ion Accelerator Research Facility in Lanzhou

1) E-mail: zjh@impcas.ac.cn