

文章编号: 1007-4627(2010)04-0043-05

HIRFL-CSR 电子冷却束流位置测量系统*

李国宏^{1,2}, 杨晓东^{1, #}, 冒立军¹, 李杰^{1,2}, 晏太来¹, 马晓明¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 高效率的电子冷却过程, 要求电子束与离子束位置平行且重叠。为了同时测量电子束与离子束的位置, 在 HIRFL-CSR 电子冷却装置上研发了以容性圆筒形极板为感应电极的束流位置探测系统。系统测量束流通过探针时产生的脉冲感应信号, 并进行傅里叶变换得到频谱信号, 分析 4 个不同电极上频谱信号强度获取束流的位置信息。测量结果表明, 该束流位置探测系统测量准确, 为定量研究储存环离子累积和电子冷却过程与两种束流相对位置及角度的依赖关系提供了条件。

关键词: 电子冷却; 容式位置探针; 冷却效率

中图分类号: TL503.91 **文献标识码:** A

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR)^[1] 由主环 (CSRm) 和实验环 (CSRc) 组成, 每个环有一套电子冷却装置。图 1 给出了 CSRm 电子冷却装置结构图。电子冷却是通过以相同平均速度运动的离子束与强流电子束的库仑碰撞将离子束的

横向振荡与纵向振荡能量转移到电子束, 从而降低储存环中离子束横向发射度和纵向动量散度、提高束流品质目的的方法^[2]。CSRm 电子冷却装置能够提供能量低于 35 keV、最大流强 3 A 的准直性及单色性很好的电子束流, 用于冷却能量低于 64 MeV/ u 的重离子束。

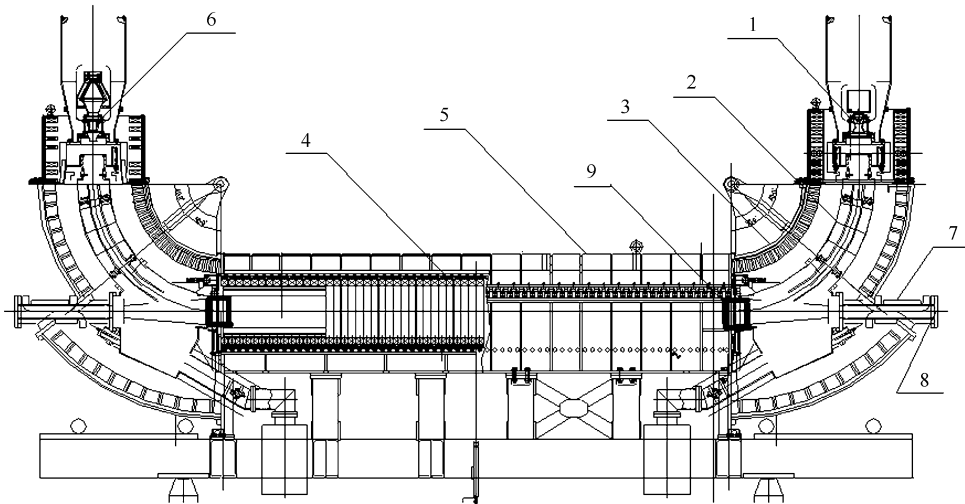


图 1 CSRm 电子冷却装置

1 电子枪, 2 静电偏转板, 3 弯曲螺线管, 4 冷却段螺线管, 5 盖板, 6 收集器, 7 校正二极铁, 8 真空管道, 9 束流位置探针。

* 收稿日期: 2009-03-24; 修改日期: 2009-03-31

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10635090, 10975166, 10905083)

作者简介: 李国宏(1977-), 男(汉族), 甘肃兰州人, 在职硕士研究生, 从事加速器物理及电子冷却技术研究; E-mail: ligh@imp-cas.ac.cn

通讯联系人: 杨晓东, E-mail: yangxd@impcas.ac.cn

CSR_m 电子冷却装置的冷却作用使重离子束的横向尺寸显著缩小, 为束流重复注入提供空间, 从而实现重离子束流的累积。累积增益取决于电子冷却过程的冷却时间 τ ^[3]:

$$\tau = C \frac{A_i}{Q_i} \frac{\beta_i^4 \gamma_i^5}{\eta_{ec} j_e^2} (\theta_i^2 + \theta_e^2)^{3/2}, \quad (1)$$

其中, Q_i 和 A_i 为离子的电荷态和质量数, β_i 和 γ_i 为相对论因子, θ_i 和 θ_e 为冷却段内离子束和电子束相对于储存环真空管道中心轴的张角, η_{ec} 为冷却段长度和储存环周长的比值, j_e 为电子束密度。装置冷却段内离子束与电子束的相对位置决定了两者之间的夹角, 进而影响束流的冷却时间。据此, 在 CSR_m 的电子冷却装置上建立了用于同时测量电子束和离子束位置的测量系统, 测量各种校正线圈对电子束和离子束位置的影响, 优化装置运行中束流的相对位置, 提高对重离子束的冷却效率。

2 测量系统结构

在电子冷却装置冷却段两端各装有一套圆筒形束流位置探针(如图 2(a)所示), 每套探针由 4 个彼此绝缘、电学特性相同的圆筒形极板组成。极板由半径 100 mm、长度 80 mm 和壁厚 1 mm 的圆筒形不锈钢材料沿对角面对称切割而成, 并按照相对于束流的上下左右关系对称安装在真空管道内。因为极板为圆筒形且沿对角面对称切开, 所以有较大的感应面积, 感应灵敏度高, 线性度好。当束团通过时, 极板可等效为一电流源(如图 2(b)所示), 探针极板上产生感应电荷, 进而产生极板对地的电压, 该电压受带电粒子与极板之间距离的影响^[4]:

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{R}{1 + i\omega RC} I(t) \\ &= \frac{1}{\beta c} \frac{1}{C} \frac{A}{\pi a} \frac{i\omega RC}{1 + i\omega RC} I_{\text{beam}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, βc 为束流速度, A 为极板面积, a 为带电粒子与极板距离, I_{beam} 为束流流强, R 为等效电阻, C 为等效电容。

通过测量不同位置极板对地电压, 计算得到束流位置:

$$x = 2R \frac{U_{\Delta}}{U_{\Sigma}} = 2R \frac{V_{\text{Right}} - V_{\text{Left}}}{V_{\text{Right}} + V_{\text{Left}} + V_{\text{Up}} + V_{\text{Down}}}, \quad (3)$$

$$y = 2R \frac{U_{\Delta}}{U_{\Sigma}} = 2R \frac{V_{\text{Up}} - V_{\text{Down}}}{V_{\text{Right}} + V_{\text{Left}} + V_{\text{Up}} + V_{\text{Down}}}, \quad (4)$$

其中, V_{Left} , V_{Right} , V_{Up} , V_{Down} 分别为左、右、上、下极板感应电压, R 为圆筒形极板半径, x 为束流水水平方向位置, y 为束流垂直方向位置。

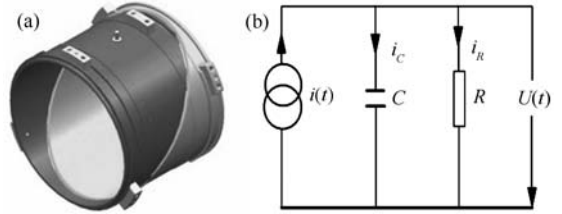


图 2 圆筒形探针结构及等效电路图^[4]

束流测量系统如图 3 所示, 包括前置放大器、数据采集卡以及电子束调制、离子束测量触发、计算机(数据处理软件)系统。前置放大器选用 PET 公司 P/N AM-4A-000110-11030N 型宽带放大器, 对探针极板感应的弱信号进行线性放大, 之后送入 60 MS/s 实时采样率、12 位垂直分辨率的 PXI-5105 8 通道高精度数字化仪进行数据采集, 通过软件对数据进行傅里叶变换、频谱信号强度分析获得束流位置信息。

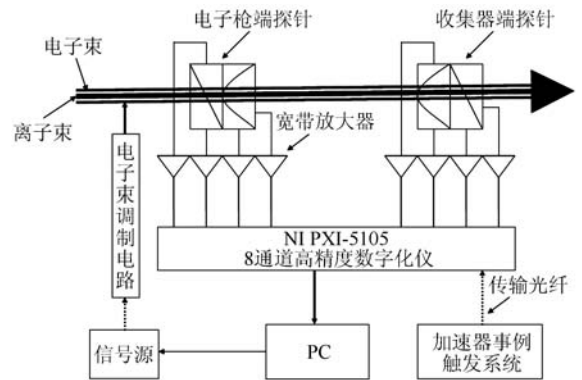


图 3 电子冷却束流位置测量系统

由于容式位置探针只能感应束团信息, 故不能测量直流电子束在极板上的感应信号; 而且冷却过程中直螺线管冷却段内电子束与离子束同时存在, 电子束和离子束流强相差 3 个量级, 使得电子束和离子束团感应极板上的信号叠加, 时域信号分析不能得出电子束与离子束团信息。为此, 位置测量时需要对电子束进行频率调制, 通过傅里叶变换将探针极板上感应的时域信号转换为频域信号, 频谱

中不同的频率信号表示电子束、离子束团的不同感应信号。调制方法是在电子枪端对电子束发射控制极电源进行频率调制,调制频率要求区别于离子束团的回旋频率,以便于后期分析频谱信号。根据离子束团在 CSR_m 回旋频率范围为 0.2—1.6 MHz 的条件,系统选择由外部信号源提供的频率为 3 MHz 的正弦信号作为调制信号。频谱分析时 3 MHz 频率信号为电子束感应信号,相应能量的离子回旋频率信号为离子束团感应信号。针对各极板上束流频率信号强度,按照公式(3)和(4)获得束流位置信息。为了防止电子枪端 35 kV 高压对调制信号的电磁干扰,外部调制信号转换为光信号经光纤传送到调制模块^[5]。

离子束测量触发系统的触发信号使用储存环加速腔产生的回旋频率信号或者加速器事例触发系统提供的事例触发脉冲,触发脉冲经光纤传送到高精度数据采集卡触发数据采集,以保证离子束团位置测量同步。

3 测量系统测试

由于位置探针已安装于电子冷却段真空管道

内,系统不能进行实验室离线测试,为了检查测量系统的准确性,需要进行电子束校正线圈偏移能力的在线测试。校正线圈是沿电子束运动方向安装在电子束真空管道四周的 22 组线圈,参数不同的线圈对电子束有不同的偏移能力。其中 4 组线圈(CX1, CX2, CY1, CY2)在电子枪区域对电子束进行偏移;6 组线圈(CX3, CX4, CX5, CY3, CY4, CY5)在电子枪端弯曲螺线管区域对电子束进行偏移;2 组线圈(CX6, CY6)在直螺线管冷却段区域对电子束进行偏移;CX 表示电子束水平方向的线圈,CY 表示电子束垂直方向的线圈。

测量系统测量线圈在不同电流下电子束的位置,进而统计、拟合获得相应线圈的实验偏移能力。通过比较线圈理论偏移能力和实验偏移能力的差别,判断测量系统位置测量的准确性。图 4 给出了电子束水平(a)和垂直方向(b)的线圈 CX6 和 CY6 在不同电流下电子束位置测量和偏移能力线性拟合结果。表 1 给出了部分校正线圈理论偏移能力、实验偏移能力和它们的偏差量。结果表明,线圈理论偏移能力和实验偏移能力差别小于 0.5 mm/A,即测量系统有较好的位置测量准确性。

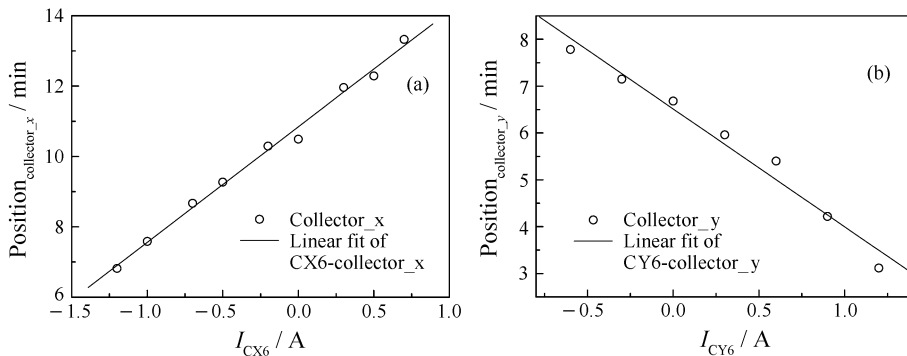


图 4 校正线圈校正能力实验结果

表 1 校正线圈校正能力

校正线圈	理论偏移能力 /(mm/A)	实验偏移能力 /(mm/A)	偏差量 /(mm/A)
CX3	1.62	1.41	0.21
CY3	0.27	0.37	0.10
CX4	0.85	1.14	0.29
CY4	0.32	0.34	0.02
CX5	1.27	1.23	0.04
CY5	0.51	0.42	0.09
CX6	3.08	3.29	0.21
CY6	2.97	2.53	0.44

4 束流位置在线测量

图 5 给出了主环 C^{4+} 离子多次多圈注入方式(MMI)下,离子束在 7—25 —175 MeV/u 的加速过程中一个注入、累积、加速周期流强结构图。首先离子在 7.0 MeV/u 经过持续 9.5 s 的注入冷却累积至 110 μA ;接着进行高频捕获(a 点)、第一次加速,离子束能量提高到 25 MeV/u,流强达到 180 μA ;然后进行第二次高频捕获(b 点)、加速,12.5 s 时刻加速结束(c 点),这时离子束能量提高到 175

MeV/u, 流强达到 400 μA ; 最后束流储存 2 s 后慢引出。每个周期中离子束在高频捕获、加速过程中, 离子束团回旋频率改变, 探针极板上感应信号频谱发生改变, 位置信息可获得。电子束感应信号在 3 MHz 调制频率有类似频谱信号, 电子束位置信息也可获得。具体束流位置数据见表 2, X 表示水平方向, Y 表示垂直方向。

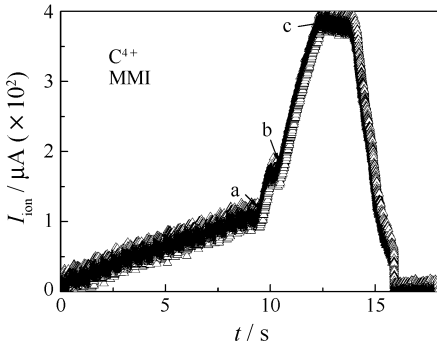


图 5 C⁴⁺ 离子 MMI 加速周期流强结构

表 2 CSRm C⁴⁺ 离子累积加速周期束流位置

粒子种类	Gun(电子枪)		Collector(收集器)	
	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm
e	9.99	2.32	-7.91	5.56
Ion ^a	7.60	-13.37	-7.00	-5.69
Ion ^b	7.63	-13.85	-9.80	-5.35
Ion ^c	7.99	-14.23	-11.39	-5.36

根据表 2 的数据计算可知, 在电子冷却装置 4 m 长的冷却段内电子束与离子束存在夹角, 水平方向电子束与离子束夹角为 0.825 mrad, 垂直方向电子束与离子束夹角为 1.025 mrad, 垂直方向离子束比电子束低大约 11 mm(如图 6 所示)。由于电子束在冷却段内的直径为 59 mm, 电子束能够包裹离子束, 这时电子束对离子束仍有高的冷却效率。当然, 通过电子冷却装置内的校正线圈以及储存环内的校正磁铁可分别对电子束和离子束进行位置调节, 最终使得离子束与电子束相互平行且束流中心位置重合。

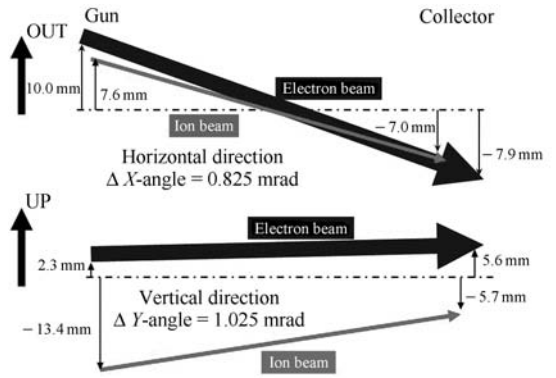


图 6 冷却段电子与离子束流中心位置示意图

5 结论

电子冷却段束流位置测量系统可以获取感应极板上同时存在的电子束、离子束信号, 并将混合信号进行傅里叶变换转换为频谱信号加以区分, 从而获得相应时刻电子束和离子束的位置关系。校正线圈偏移能力测试结果说明该系统测量结果准确; 借助于该系统可以优化离子累积过程和电子冷却过程, 为定量研究储存环离子累积和电子冷却过程与两种束流相对位置及角度的依赖关系提供了条件。

参考文献 (References):

- [1] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2002, **A488**: 11.
- [2] Yang X D, Parkhomchuk V V. High Power Laser and Particle Beams, 2000, **12**(6): 771(in Chinese).
(杨晓东, Parkhomchuk V V. 强激光与粒子束, 2000, **12**(6): 771.)
- [3] Xia G X, Xia J W, Liu W, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(8): 809(in Chinese).
(夏国兴, 夏佳文, 刘伟等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(8): 809.)
- [4] Strehl P. Beam Instrumentation and Diagnostics. Berlin Heidelberg: Springer, 2006, 155—211.
- [5] Bekhtenev E. Problems of Atomic Science and Technology, 2006, (46): 108.

A Beam Position Monitor System for Electron Cooler in HIRFL-CSR^{*}

LI Guo-hong^{1, 2}, YANG Xiao-dong^{1, #}, MAO Li-jun¹, LI Jie^{1, 2}, YAN Tai-lai¹, MA Xiao-ming¹

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The efficient electron cooling requires that the ion beam and electron beam are parallel and overlapped. In order to measure the positions of ion beam and electron beam simultaneously, a beam position monitor system is developed for the HIRFL-CSR electron cooler device, which probe consists of four capacitive cylinder linear-cut poles. One can get the both beam positions from the picking up signals of four poles by using Fourier transform(FFT) method. The measurement results show that the beam position monitor system is accurate. This system is suitable for investigating the relation between electron cooling processing and the angle of ion beam and electron beam.

Key words: electron cooling; capacitive position probe; cooling efficiency

* **Received date:** 24 Mar. 2009; **Revised date:** 31 Mar. 2009

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10635090, 10975166, 10905083)

Corresponding author: Yang Xiao-dong, E-mail: yangxd@impcas.ac.cn