

CSR 电子冷却段磁场造成闭轨畸变及校正*

刘勇^{1,1)} 冒立军^{1,2} 殷达钰^{1,2} 周雪梅^{1,2} 武军霞^{1,2} 杨晓东¹ 夏佳文¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 电子冷却的应用提高了重离子储存环的束流品质, 也为重离子储存环的运行带来了新的课题. 电子冷却段的横向磁场在引导约束强流电子束的同时也不可避免影响了多次经过的离子轨道. 为了保证束流的安全运行, 必须将离子轨道的畸变部分限制在局部范围, 并保证轨道畸变量对储存环接收度的影响可以容忍. 讨论在建的兰州重离子储存环 HIRFL-CSR 电子冷却段磁场及其造成闭轨畸变和校正方案.

关键词 电子冷却 闭轨畸变 校正

1 引言

电子冷却技术引入重离子储存环为要求高品质束流的核物理研究特别是为放射性束物理提供了前所未有的工具. 正在建造的兰州重离子冷却储存环 HIRFL-CSR^[1] 在世界上首次实现空心电子束^[2], 预期可以实现更强的电子束及冷却效率.

电子冷却的原理是使平均速度一致的电子束与离子束混和并进行热交换使之冷却. 在电子冷却段的主要部分电子束与离子束是共存的. 为了约束用于冷却的强流电子束并引导其偏入和偏出离子轨道, 电子冷却段建立了较强磁场. 该磁场也同时作用于离子束. 冷却段横向磁场造成离子轨道的畸变; 冷却段纵向磁场引起离子水平及竖直方向运动耦合效应. 本文讨论冷却段横向磁场的作用.

离子束以百万量级的次数通过电子冷却段, 因而对冷却段磁场非常敏感. 如果不加以校正, 冷却段横向磁场在全环造成不可容忍的轨道畸变. 环形加速器的闭轨畸变是不可能完全消除的, 唯一的办法是用造凸轨法将闭轨畸变限于一个局部范围.

2 电子冷却段磁场的描述

电子冷却段磁场主要由一段长直螺线管

(solenoid) 及其两端的弯曲螺线管 (toroid) 建立. 在长直螺线管电子束和离子束中心轨道重合. 两段弯曲螺线管部分有静电偏转板或偏转磁铁将电子束偏入及偏出离子轨道. 电子束中心轨道沿三段螺线管的轴线, 也就是中心磁力线的方向; 离子轨道穿过弯曲螺线管的一部分 (如图 1: A_1B_1 及 B_2A_2).

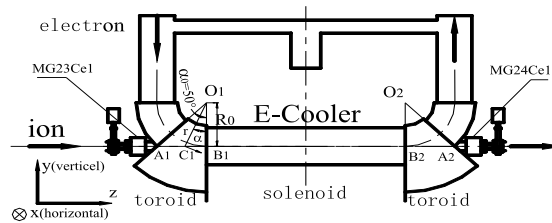


图 1 CSR 电子冷却装置示意图

忽略场误差, 离子感受到的磁场来自以下方面: 纵向 (z 方向) 场来自弯曲螺线管磁场 z 分量及长螺线管; y 方向磁场来自弯曲螺线管磁场竖直分量; 若电子束由磁场偏转则存在 x 方向磁场 (由电子磁刚度决定). CSR 电子冷却装置的弯曲螺线管总偏转角为 90° , 影响离子轨道部分 $\alpha_0 = 50^\circ$, 中心偏转半径 $R_0 = 1.25\text{m}$, 中心磁场为 B_{t0} . 考虑离子轨道上 C_1 点的磁场, 角度 $\angle B_1O_1C_1 = \alpha$, 距离 $|O_1C_1| = r$. 根据安培定律弯曲螺线管在半径为 r 处的磁场 (切向) 为

* 国家大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环项目及所长基金 (SZ041307) 资助

1) E-mail: y.liu@impcas.ac.cn

$$B_t(r) = \frac{B_{t0}R_0}{r}, \quad (1)$$

其纵向及横向分量为

$$B_z = B_{t0} \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

$$B_y = B_{t0} \cos \alpha \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

电子束若由磁场偏转则有,

$$B_x = B\rho|_e \frac{1}{R_0}. \quad (4)$$

其中 $B\rho|_e$ 为电子的磁刚度. CSR 电子冷却装置的弯曲螺线管外侧各设计有一个校正二极磁铁以补偿弯曲螺线管垂直方向的磁场, 目前该校正二极磁铁与弯曲螺线管串连供电, 其安匝数设计使校正铁对离子轨道的水平踢轨量(积分场)与弯曲螺线管的贡献量大小一致方向相反. 另外 CSR 采用静电偏转板来偏转电子, 电场位于离子轨道之外. 因此冷却段理想的水平方向磁场为零.

HIRFL-CSR 电子冷却装置的“长直螺线管”段磁场为保持相当高的平行度, 其磁场由 68 个线圈串联产生, 每个线圈在支架上的角度可独立调节. 安装前, 测量所有线圈的磁轴与系统几何中心之间的夹角(磁轴偏角), 通过调整使得每个线圈的磁轴偏角小于 1×10^{-3} ; 安装时, 根据场叠加原理, 将磁轴偏角相反的线圈相邻放置, 以抵消磁场的部分横向分量; 安装后, 根据沿冷却段几何轴线磁轴偏角的测量结果, 反复微调线圈在支架上的角度, 最终获得平行度好于 1×10^{-4} 的冷却段纵向磁场.

根据电子冷却全段中心轨道磁场测量数据可以计算实际磁场引起的闭轨畸变及相应的校正量. 本文计算所用的 CSRm 电子冷却全段中心轨道磁场测量结果是在最高场(0.15T)的半幅值下, 即直螺线管电流 95A, 弯曲螺线管电流 390A.

3 横向磁场引起闭轨畸变及其校正

CSR 冷却装置建造前已对其横向磁场及引起的闭轨进行了分析估算. 磁刚度为 $B\rho|_i$ 的离子经一段长为 dz 横向磁场为 B 的距离, 轨道将偏转一个角度 dA , 结合图 1 所示的几何关系有

$$dA = \frac{B}{B\rho|_i} dz = \frac{B}{B\rho|_i} R \cdot \sec^2 \alpha \cdot d\alpha, \quad (5)$$

由式(4)及(5)可以分别得到弯曲螺线管横向磁场 B_y 及电子束偏转磁场 B_x 对离子的偏角,

$$B_y : \int dA_y = \frac{B_{t0}R_0}{B\rho|_i} (-\ln(\cos \alpha)), \quad (6)$$

$$B_x : \int dA_x = \frac{B\rho|_e}{B\rho|_i} \frac{z}{R_0}. \quad (7)$$

类似地可以得到弯曲螺线管纵向磁场的积分场

$$B_z : \int dA_z = \frac{B_{t0}R_0}{B\rho|_i} \alpha. \quad (8)$$

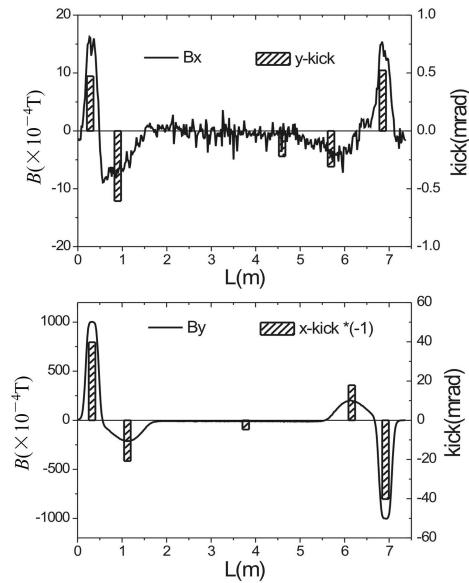


图 2 (a) CSRm 电子冷却段水平方向磁场测量值及等效踢轨量; (b) CSRm 电子冷却段垂直方向磁场测量值及等效踢轨量.

对于给定其磁场分布的任意一段距离, 可以近似将其等效为一组由横向踢轨磁铁和直螺线管组成的输运线. 最简单的等效输运线由三段直螺线管和两个横向踢轨磁铁组成. 为使误差最小, 横向踢轨磁铁的位置应在其对应磁场的中心,

$$\bar{z} = \int B \cdot z dz / \int B dz. \quad (9)$$

可计算出理想弯曲螺线管段 B_y 和 B_x 中心分别在

$$\bar{z}|_{B_y} = B_{t0} \cdot R_0^2 \int_0^{\alpha_0} \tan^2 \alpha d\alpha / \int_0^{L_0} B_y dz = R_0 \frac{\tan \alpha_0 - \alpha_0}{-\ln(\cos \alpha_0)}, \quad (10)$$

$$\bar{z}|_{B_x} = B_x \int z dz / B_x \int dz = \frac{1}{2} L_0 = \frac{1}{2} R_0 \tan \alpha_0. \quad (11)$$

由以上公式可以得到各等效元件的参数, 输入光学计算程序 MAD 等就可以计算冷却段的传输特性.

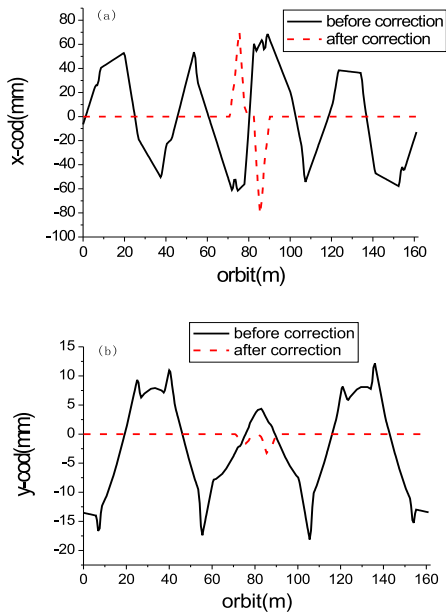


图3 (a) CSR_m电子冷却段磁场引起水平方向闭轨畸变及校正; (b) CSR_m电子冷却段磁场引起竖直方向闭轨畸变及校正.

将测量得到的CSR冷却段实际磁场应用以上方法,由磁场的零点及对称性为依据将长7.4m的冷却段分为5段,每段各有3段螺线管和两个踢轨磁铁,可以得到电子冷却段的等效束流传输线.图2分别绘出横向两个方向磁场及其等效的踢轨位置和大小,束流以7MeV/u的 C_{12}^{6+} 为例.电子冷却段的两侧在水平竖直各有两对校正磁铁使得闭轨基本仅存在于电子冷却及附近有限区域.校正前后的闭轨量对比如图3.校正后的闭轨量完全可以由冷却段部分区间的特殊结构容纳.

4 结论

本文对CSR_m注入能量下电子冷却段磁场及其引起的闭轨基本进行了分析并得到了校正方案,使闭轨畸变局域化并限制于有限区间.

参考文献(References)

- 1 XIA Jia-Wen et al. Nucl. Instr. & Methods, 2002, **A488**: 11—25
- 2 XIA Guo-Xing et al. Nucl. Instr. & Methods, 2003, **A508**: 239

COD by Magnetic Field in Electron-Cooling Section and Correction at CSR^{*}

LIU Yong^{1;1)} MAO Li-Jun^{1,2} YIN Da-Yu^{1,2} ZHOU Xue-Mei^{1,2}
WU Jun-Xia^{1,2} YANG Xiao-Dong¹ XIA Jia-Wen¹

1 (Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Application of electron-cooling upgrades the quality of ion beams in the storage rings and brings new problems. The transverse magnetic field distorts the ion orbit while guiding the intense electron beam. The closed-orbit distortion should be and can be localized and controlled well inside the ring acceptance. This paper deals with the field in the e-cool section and concomitant COD of ion orbit and shows the correction scheme.

Key words electron-cooling, closed-orbit distortion (COD), correction

^{*}Supported by HIRFL-CSR Project and IMP Director's Fund (SZ041307)

1) E-mail: y.liu@impcas.ac.cn