

文章编号: 1007-4627(2001)02-0105-04

螺线管磁场缺陷对电子束横向温度的影响^{*}

杨晓东, 宋明涛, 夏佳文, 张文志, 原有进, 魏宝文

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 分析了直螺线管磁场缺陷的来源, 考虑了电子束的空间电荷作用, 采用数值方法模拟计算了磁场缺陷对电子束横向温度的影响, 获得了电子冷却装置中直螺线管磁场的均匀性要求. 结果表明, 当相对磁场缺陷小于 1×10^{-3} 时, 影响可以被忽略.

关键词: 电子冷却; 磁场误差; 横向温度

中图分类号: TL501.5 **文献标识码:** A

1 引言

建造中的兰州重离子加速器冷却储存环 HIRFL-CSR^[1]由两个储存环组成, 主环 CSRm 用于离子束的累积、加速, 实验环 CSRe 用于内靶实验, 作为高精度、高分辨率的探测器. 电子冷却装置^[2,3]为关键部件.

电子冷却^[4]为一种改善储存环中离子束品质的有效方法, 冷却过程基于以相同平均速度运动的冷电子束与离子束在储存环的一段长度内相互重叠, 由于库仑作用将温度较高的离子能量转移到低温的电子束上, 从而降低离子束在以平均速度运动的坐标系中的速度分散, 降低离子束的发射度及动量分散.

在电子冷却储存环中, 电子束的温度是一个非常重要的参数^[5]. 温度反映了电子束在以平均速度运动的坐标系中电子束的速度分散. 从冷却时间的公式^[6]中可以得知: 对于给定的离子, 冷却时间依赖于两个重要参数, 即: 冷却段长度和电子密度. 冷却段长度在储存环中是给定的, 电子密度受到电子枪的影响, 而空间电荷作用又引起了温度的升高, 这又限制了可使用的电流密度. 从冷却力的公式^[6]中可以看出, 在高相对速度情况下, 冷却力与电子横向温度 T_{\perp} 无关; 在低相对速度下, 纵向冷却力正比于 T_{\perp}^{-1} , 横向冷却力正比于 $T_{\perp}^{-3/2}$.

绝热加速^[7]后, 电子的横向温度与电子枪热温

度相同, 大约为 0.1 eV. 而纵向温度被压缩, 大约为 0.1 meV.

在电子冷却装置中, 采取恒定场聚焦原理^[8]来维持、约束电子束, 不致使电子束由于空间电荷作用而发散. 用于聚焦的恒定磁场是由矩形截面的铜导线按照一定的螺距及方向绕制而成的螺线管产生的. 在绕制过程中, 铜导线可能会出现位置偏差, 这些偏差会引起磁场的缺陷. 分析磁场缺陷的来源, 研究磁场缺陷对电子束横向温度的影响, 可以获得电子冷却装置中直螺线管磁场的均匀性要求.

电子束的温度强烈地依赖于电子冷却装置中的电磁场分布, 电子的横向温度由阴极温度、电源的不精确度、电极的几何以及磁场决定, 具体反映在加速过程中电子所感受到的径向电场、空间电荷场以及磁场的不均匀性.

单个电子在均匀磁场中运动, 电子的横向能量将保持不变, 电子围绕磁力线作螺旋线运动. 在强流情况下, 电子束自身的电场是一个不可忽略的量. 由于空间电荷场 E_{sp} 指向径向, 而约束电子束的磁场 B 指向电子前进方向, 产生 $E_{sp} \times B$ 漂移, 即电子束像一个刚体一样慢慢转动. 电子的横向速度为绕着束轴的慢旋转和绕着磁力线快旋转的矢量和, 电子束的横向能量是快运动和慢运动两项的贡献. 在一个独立的螺旋线轨道的各处, 快旋转的速度方向是变化的, 而慢旋转的速度方向始终是一致的. 慢旋转的速度随着电流的增大和约束磁场的减小而

收稿日期: 2000-11-08; 修改日期: 2001-03-09

* 基金项目: 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 项目

作者简介: 杨晓东(1966-), 男(汉族), 甘肃天水人, 博士, 副研究员, 从事加速器物理及技术研究.

增大, 随着纵向速度的增加而减小. 即特定能量、流强的电子束, 只有升高磁场才能降低这个速度.

2 直螺线管磁场缺陷分析

直螺线管是由中空的矩形截面铜导线按照一定的螺距及方向绕成的. 对于一个实际的螺线管而言, 在制作过程中各种偏差都可能出现, 这种误差是非常复杂的问题. 从对称性来分析, 可分为对称情况和非对称情况. 对于非对称的情况, 必须得用三维磁场计算程序计算, 而最终的误差则由细致的磁场测量得到^[9,10].

3 理论分析^[11]

从单电子运动方程出发,

$$\begin{cases} \frac{1}{\beta\gamma} \frac{d}{dZ} \left(\beta\gamma \frac{dr}{dZ} \right) + \frac{\omega^2}{4} \left(1 - \frac{M^2}{B_z^2 r^4} \right) r \\ = \frac{eE_r}{\beta^2 \gamma m c^3} - \frac{eB_\theta}{\beta \gamma m c^2} \\ \gamma m r^2 \dot{\theta} + \frac{eB_z r^2}{2c} = e \int_u^z r E_\theta dt + \frac{eM}{2c}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, β 和 γ 为相对论因子, m 和 e 为电子的质量和电荷, c 为光速, E 和 B 为电场和磁场, r 为径向坐标, θ 为角向坐标, Z 为纵向坐标, ω 为回旋频率, M 为运动积分.

忽略电子束的空间电荷作用, 纵向磁场不均匀在电子束边缘产生的横向速度为

$$\frac{v_\perp}{v_\parallel} = \frac{\omega\alpha}{2} \left\{ \left[\omega \int_{z_0}^{z^*} \frac{\Delta B(\chi)}{B} \cos(\omega(Z^* - \chi)) d\chi \right]^2 + \left[\frac{\Delta B(Z^*)}{B} - \omega \int_{z_0}^{z^*} \frac{\Delta B(\chi)}{B} \sin(\omega(Z^* - \chi)) d\chi \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

假设扰动为余弦半波形状时,

$$\Delta B(Z) = \frac{\Delta B}{2} \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{Z}{\Delta} \right) \right], \quad (3)$$

可以得出横向速度的解析解为

$$\frac{v_\perp}{v_\parallel} \leq \pi \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\Delta B}{2} \frac{\sin(\pi\Delta/\lambda)}{1 - (\Delta/\lambda)^2}, \quad (4)$$

其中, λ 为拉摩波长, Δ 为扰动长度, α 为电子束半径.

相应的横向温度为

$$k_B T = \frac{1}{2} m c^2 (\beta\gamma)^2 \left(\frac{\pi\alpha}{\lambda} \frac{\Delta B}{B} \right)^2 \left[\frac{\sin(\pi\Delta/\lambda)}{1 - (\Delta/\lambda)^2} \right]^2. \quad (5)$$

可以看出, 电子的横向温度与电子的纵向速度、磁场扰动相对强度以及磁感应强度有关. (5) 式中中方括号内的项为

$$F(\zeta) = \frac{\sin\pi\zeta}{1 - \zeta^2}, \quad (6)$$

其中 $F(\zeta)$ 为形状因子, 它随自变量 ζ 衰减得很快.

图 1 为形状因子的变化规律. 它表明当磁场扰动长度 Δ 远远大于电子在该磁场中的拉摩波长 λ 时, 即 $\Delta/\lambda \gg 1$, 电子将绝热地通过该扰动, 由于磁场缺陷引起的电子横向温度可以忽略.

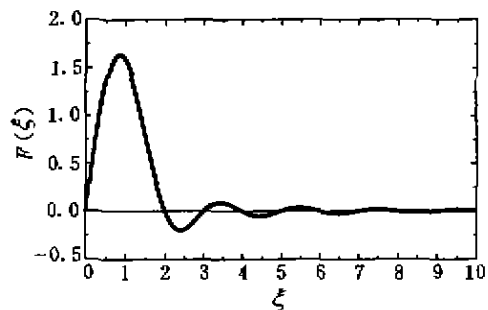


图 1 形状因子的变化规律

文献[12]给出了一个数值结果, 当 $\Delta=0.6$ m, $\Delta B/B=8\%$ 和电子动能小于 165 keV 的情况下, 通过扰动后电子横向温度低于 0.14 eV.

4 模拟计算结果和讨论

首先用 POISSON 程序计算由于导线的各种位置偏差引起的磁场误差的幅度及形状. 结果表明这些扰动造成的磁场误差不是理想的半波余弦形式, 而是单个理想线圈或多个线圈组合的形式. 在实际的螺线管中, 磁场是由每一匝线圈产生的磁场的叠加, 对于特定的螺线管, 存在一个最小半径, 也就是说, 扰动的长度不可能很短. 由 POISSON 程序计算获得相对磁场扰动强度, 再用一定间距、施加不同的电流值的理想线圈或线圈组合来获得误差最相近的形状及幅值.

用四阶龙格-库塔法分别计算了等电位空间不同能量、不同流强以及不同初始条件下单个线圈形状的扰动对电子束横向温度的影响. 图 2 为扰动前

后电子横向能量随电子动能的变化规律, 电子动能决定电子在磁场中的拉摩波长, 对于固定的扰动, 动能越大, 图 3 为不同电流下, 扰动前后电子横向能量随基础磁场的变化规律. 对于固定的扰动, 磁场越强, 拉摩波长越短, Δ/λ 越大, 引起的横向能量变化越小. 同时由于电流增大, 电子束慢旋转的速度增大, 电子横向能量增大. 图 4 为不同电流下, 电子横向温度随扰动强度的变化, 可以看出, 当扰动强度小于 1×10^{-3} , 对横向温度的影响可以忽略. 图 5 为不同扰动方向下, 电子横向能量随半径的变化规律. 综合起来, 扰动方向、空间电荷作

用在不同径向位置造成的横向能量变化是不同的. 图 6 为电子横向能量随扰动位置的变化, 对于一个固定位置、固定强度的扰动, 单个电子初始的横向速度方向不同, 扰动的的影响不同; 反过来, 如果固定电子初始的横向速度方向, 改变扰动位置, 电子将以不同的方式通过扰动区域, 由此引起的电子横向能量变化呈振荡形式.

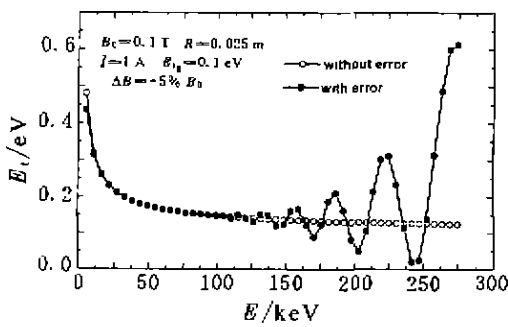


图 2 扰动前后电子横向能量随电子动能的变化

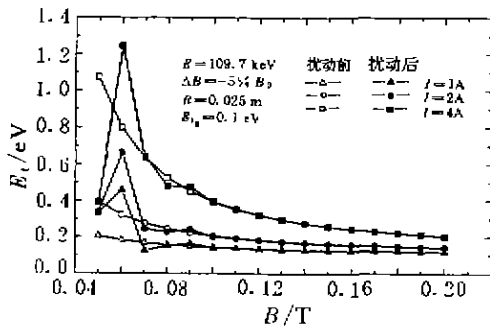


图 3 不同电流下扰动前后电子横向能量随磁场的变化

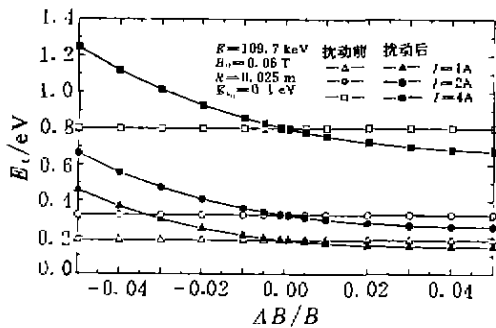


图 4 不同电流下电子横向能量随扰动强度的变化

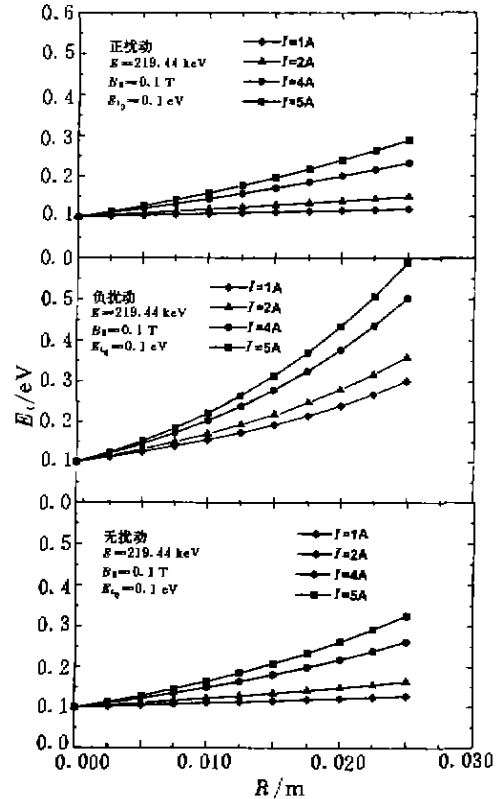


图 5 不同扰动情况下电子横向能量随半径的变化

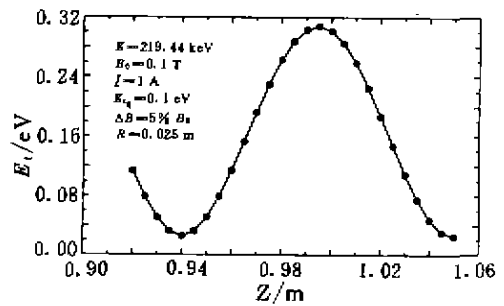


图 6 电子横向能量随扰动中心相对位置的变化

5 结论

磁场扰动会引起电子束横向温度的变化. 电子束能量越高, 影响越大; 磁场越小, 影响越大; 电子束电流越大, 影响越大. 扰动的形状、位置以及

电子束的初始条件对横向温度也有影响. 扰动对电子束横向温度的影响随电子所处的径向坐标减小而减小. 这个结果与第 3 节中理论分析结果在变化趋势上是一致的, 考虑了空间电荷作用后, 横向能量变化的绝对值不同于理论分析.

概括起来可以归纳到一点, 当扰动对于某种能量的电子而言是绝热变化时, 其对横向温度没有影响. 即使在较高动能、低磁场情况下, 扰动小于 1×10^{-3} 时对横向温度的影响可以忽略.

参 考 文 献:

- [1] Bosser J. Electron Cooling [R]. In: CAS CERN Accelerator School Fifth Advanced Accelerator Physics Course, CERN 95-06 Vol. II Geneva Switzerland, Editor Turner. S 22 November 1995; 673-730.
- [2] Meshkov I N. Physics and Technique of Electron Cooling [R]. RIKEN-AF-AC-2. January, 1997.
- [3] 杨晓东, 宋明涛, 夏佳文, 等. 电子束的绝热展开[J]. 高能物理与核物理, 2000, 24(12): 1179-1184.
- [4] Schemöller T, Zwicknagel G, Toepffer C. Numerical Simulation of the Adiabatic Acceleration of Electron Beams[J]. Nucl Instr & Meth, 2000, A441: 50-53.
- [5] 赵国骏, 凌宝京, 薛坤兴 编. 电子光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [6] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子冷却储存环工程[J]. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 35-38.
- [7] 饶亦农, 夏佳文, 原有进, 等. 电子冷却[J]. 核物理动态, 1995, 12(3): 27-30.
- [8] 饶亦农, 夏佳文, 原有进, 等. HIRFL-CSR 电子冷却系统[J]. 核物理动态, 1996, 13(1): 16-18.
- [9] Derissen W, Maier R, Pfister U, et al. Technical Features and Final Electron Beam Tests of the COSY Electron Cooler and First Proton Beam Cooling [C]. In: Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Montreux, Switzerland, October 1993, Editor: Bosser J. CERN 94-03; 317-321.
- [10] Sedlacek M, Bergmark T, Gajewski K, et al. Design and Construction of the CELSIUS Electron Cooler [C]. In: Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Montreux, Switzerland; 1993, 10. Editor: Bosser J. CERN 94-03; 235-239.
- [11] Kudelainen V I, Meshkov N I, Salimov R A. The Electron Beam Device for Heavy Particle Cooling Experiments[M]. Preprint 72-70 Novosibirsk 1970; Translated in CERN 77-08, Geneva Switzerland, 1977, 4.
- [12] 饶亦农, 夏佳文, 原有进, 等. HIRFL-CSR 电子冷却装置上的横向电子束温度[J]. 高能物理与核物理, 1996, 20(4): 369-375.

Influence of Magnetic Imperfection on Transverse Temperature of Electron Beam*

YANG Xiao-dong, SONG Ming-tao, XIA Jia-wen, ZHANG Wen-zhi
YUAN You-jin, WEI Bao-wen

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

Abstract: In order to obtain the tolerance requirement for the magnetic field homogeneity of the solenoids in electron cooling device, the source of the magnetic imperfection and its influence on the transverse temperature of electron beam were investigated by means of numerical simulation, and taking the space charge effect of electron beam into account. The calculated result shows that the influence of the imperfection of magnetic field will be negligible when the relative magnetic field perturbation is less than 1×10^{-3} .

Key words: electron cooling; magnetic field imperfection; transverse temperature

* Foundation item: National Scientific Project HIRFL-CSR