

磁铁边缘场对注入束流的影响*

原有进 吴军丽 王宜国 徐向阳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

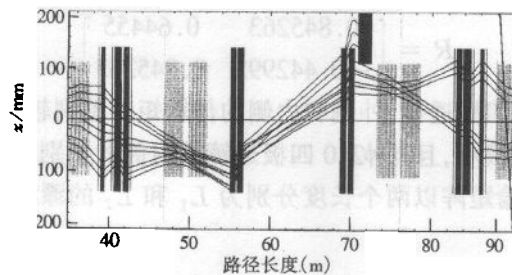
摘要 在兰州重离子加速器冷却储存环工程(HIRFL-CSR)实验环的注入设计过程中,通过对束流在侧面边缘场作用下运动的反向数值跟踪,得到注入束流通过二极磁铁和四极透镜边缘场的传输矩阵,并同理想场对束流的作用进行了比较.通过改变注入束流中心轨道及对磁铁的重新设计,将磁铁边缘场对注入束流的影响减小到可以控制的范围.

关键词 磁铁边缘场 传输矩阵 束流光学效应

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)由主环、实验环及束流传输线组成.主环用于束流累积、同步加速和制备.从主环引出的束流经过束运线时,可以对其进行进一步剥离,或打外靶产生次级束流.实验环利用重离子束进行高精度的物理实验^[1].

由束流传输线来的次级束流,其束流品质很差,横向发射度为 $25\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$,动量分散达 $\pm 1\%$.为了能够将此束流注入到实验环中,要求注入点消色散,这样才能使注入束流在注入通道的尺寸较小,从而降低对踢轨磁铁的要求.由于注入点区域空间所限,为了满足实验的要求,实验环采用C型磁铁,这使得注入通道不可避免地受到二极磁铁边缘场的影响.图1为实验环束流单圈注入轨道和包络的计算结果.



实验环束流单圈注入轨道和包络计算

1999-11-08 收稿

* 国家重大科学工程基金资助

为了使实验环保留满足实验要求的接受度,再加上注入束流发射度大的原因,注入束流还会受到四极透镜边缘场的影响.

2 四极透镜侧面边缘场的影响

理想四极透镜的磁场强度是线性的,而实际情况下,四极透镜的边缘场和内部场的磁

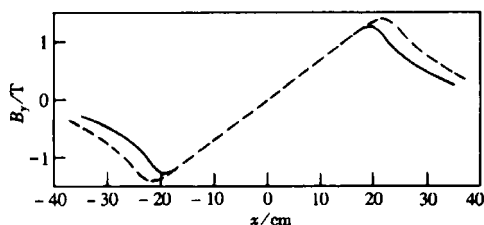


图 2 四极透镜 B_y 沿 x 方向分布

— $\phi 240$ 四极透镜, - - $\phi 270$ 四极透镜.

场梯度并不相同.束流从四极透镜穿过时,由于二级场分量的影响,中心轨道不为直线,而且磁场梯度的变化也不是线性的,因而四极透镜边缘场的聚焦强度不宜由某一点的聚焦强度代替.我们采用二维磁铁设计计算的磁场分布结果(见图 2),并处理为中心平面的场分布.

离子从四极透镜入口到出口的运动轨迹,可以通过数值计算的方法得到.取注入束流由储存环逆注入方向进入四极透镜时,中心离子的相空间坐标 $(x_0, x'_0) = (15.2492\text{cm}, 0.065078\text{rad})$ 作为初始条件进行跟踪,可以得到中心轨道.由于中心轨道内外两侧的聚焦强度不同,对内外两侧,分别计算其正弦和余弦离子的轨迹(见图 3),通过其在四极透镜出口处的相空间末坐标,可以计算出线性近似下内外两侧的束流传输矩阵.

对 $\phi 240$ 四极透镜,计算结果为:

$$R_{\text{外}} = \begin{bmatrix} 0.882134 & 0.649578 \\ -0.310336 & 0.872186 \end{bmatrix}, \quad R_{\text{内}} = \begin{bmatrix} 0.848996 & 0.649010 \\ -0.426524 & 0.869786 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

对 $\phi 270$ 四极透镜,计算结果为:

$$R_{\text{外}} = \begin{bmatrix} 0.85196 & 0.645961 \\ -0.419263 & 0.850348 \end{bmatrix}, \quad R_{\text{内}} = \begin{bmatrix} 0.845835 & 0.64585 \\ -0.439858 & 0.850046 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

理想四极透镜的传输矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.845263 & 0.64455 \\ -0.442993 & 0.845263 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

可以看出,对 $\phi 240$ 四极透镜,外侧和内侧的传输矩阵差别较大,而对 $\phi 270$ 四极透镜,内外侧的传输矩阵差别很小,且与 $\phi 240$ 四极透镜的内侧的差别也很小.

将(1),(2)式的传输矩阵以两个长度分别为 L_1 和 L_2 的漂移节和一个标准四极透镜代替:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos kl & \frac{1}{k} \sin kl \\ -k \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

这样就可以用标准束流传输程序对束流进行计算.图 3 给出了不同传输矩阵作用下,束流包络的计算结果.从图中可以看出,采用 $\phi 240$ 四极透镜,对外侧束流包络的影响很大.在磁铁设计时应选择 $\phi 270$ 四极透镜,或通过设计使四极透镜场分布与之接近.

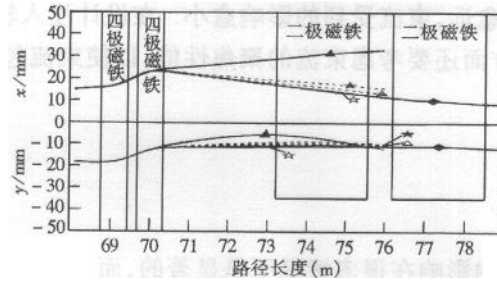


图 3 离子通过四极透镜边缘场的束流包络

◆: 理想轨道; △, ▲: $\phi 240\text{mm}$ 四极透镜; ★, ☆: $\phi 270\text{mm}$ 四极透镜;
☆, △: 注入轨道内侧; ★, ▲: 注入轨道外侧.

3 二极磁铁边缘场的影响

C 型二极磁铁在其开口方向的磁场强度下降缓慢(见图 4). 束流从二极磁铁边缘穿过, 受到二极场分量的偏转作用、梯度场的聚焦作用和高阶场作用. 我们采用二维磁铁设计计算的磁场分布结果, 经过处理得到中心平面的场分布(见图 5).

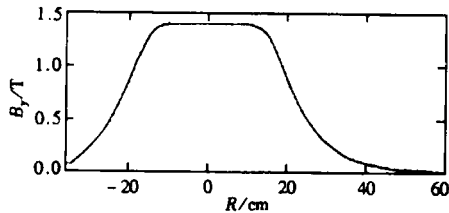


图 4 二极磁铁 B_y 沿半径方向分布

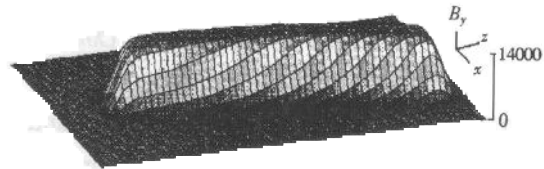


图 5 二极磁铁 B_y 中心平面分布

注入束流由储存环逆注入方向进入二极磁铁时, 中心离子的相空间坐标不同, 受到的偏转和聚焦作用不同. 采用与四极透镜相同的方法, 可以得到传输矩阵并以漂移节和标准四极透镜代替.

图6给出了在不同初始条件下, 束流包络的计算结果. 从图中可以看出, 束流进入二

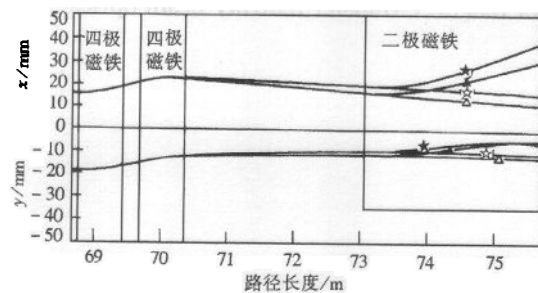


图 6 通过二极磁铁边缘场的束流包络

★, ▲: $(x_0, x'_0, z_0) = (19.40442\text{cm}, 0.074016\text{rad}, -50\text{cm})$; ★, ☆: 通过 $\phi 270$ 四极透镜边缘场;
☆, △: $(x_0, x'_0, z_0) = (27.04543\text{cm}, 0.099455\text{rad}, -50\text{cm})$; ▲, △: 通过理想四极透镜.

极磁铁时距离中心轨道愈远,束流受到的影响愈小.在设计注入轨道时,一方面要考虑降低对硬件的要求,另一方面还要考虑束流的聚焦性能,以使束流包络不至于过大而导致传输困难.

4 结论

磁铁边缘场对束流的影响在很多情况下是显著的,而且由于边缘场的非线性,其影响就更趋于复杂,所以,要尽量避免磁铁边缘场的影响.在加速器设计时,可以通过轨道优化设计和磁铁优化设计来减小其影响.

参考文献 (References)

- 1 XIA Jia-Wen, YUAN You-Jin et al. Preliminary Design of HIRFL-CSR Project, Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, 1999 (in Chinese)
(夏佳文,原有进等.兰州重离子加速器冷却储存环工程初步设计,中国科学院近代物理研究所,1999)

The Influence of the Edge Field of Magnets on Beam Injection *

YUAN You-Jin WU Jun-Li WANG Yi-Guo XU Xiang-Yang
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Because of the large emittance and momentum spread of injection beam, the edge field of magnets will affect beam optic property during injection into the experimental ring of HIRFL-CSR (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou-Cooling Storage Ring). The influence of edge field is probed in this paper by numeric tracking of particles through it. The influence is reduced to tolerable range by modifying injection central orbit and field distribution of the magnet.

Key words edge field of magnet, transfer matrix, beam optics

Received 8 November 1999

* Supported by HIRFL-CSR Project, Lanzhou, China