

10MeV 质子等时性回旋加速器的设计研究

王兵¹⁾ 王义芳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 给出 10MeV 质子等时性回旋加速器的等时性磁场设计, 中心区的设计以及加速后最终的束流品质, 该加速器可作为正电子断层扫描装置的配套设备, 用于生产中短寿命放射性同位素等. 它沿半径方向只用一套线圈励磁, 等时性磁场的建立完全由磁极形状决定. 中心区的设计满足了轨道中心化的要求, 并给出较大的横向和纵向接受度, 以获得足够的束流强度. 经过 172 圈加速后, 最终的束流品质满足要求.

关键词 10MeV 质子等时性回旋加速器 等时性磁场 中心区

1 引言

我们设计的 10MeV 质子加速器是一台径向扇(托马斯型)等时性回旋加速器. 它可作为正电子断层扫描装置(PET)的配套设备, 用于生产中短寿命放射性同位素等. 该加速器用一套径向插入的冷阴极 PIG 离子源提供 H^- 离子, 加速后的离子采用剥离引出的方法得到 10MeV 的质子束. 它的加速系统由两个张角

30° 的 Dee 盒构成, 高频频率为 42MHz, 二次谐波加速. 10MeV 质子加速器的磁铁系统由一个环柱形的磁轭、4 块直边扇块及一套励磁线圈组成, 扇块张角为 57° , 如图 1 所示.

2 等时性磁场计算及分析

10MeV 质子加速器采用深谷结构和环柱形磁轭, 具有结构紧凑和一定的自屏蔽功能. 它只有一套励磁线圈, 沿半径不再放置其他的垫补线圈, 等时性磁场的获得由磁铁的形状来决定. 在选定了合适的磁铁系统参数后, 根据对磁场计算结果的等时性分析, 我们采用优化扇块边缘形状的方法, 来获得加速 10MeV 质子所需的等时性磁场. 10MeV 质子加速器磁铁系统的主要参数见表 1.

表 1 磁铁参数

磁极直径	磁铁高	扇块数	扇角	山间距	谷间距
800mm	120cm	4	57°	30mm	620mm

使用 Mafia 程序计算得到它的三维磁场分布^[1]. 根据磁铁系统的对称性, 在计算时, 只需计算磁铁系统的八分之一区域的磁场分布, 再由磁场的对称性, 得到整个磁铁区域的场分布. 图 2(a) 是计算时使用的磁铁系统八分之一模型. 图 2(b) 是计算得到的中心平面八分之一区域的两维磁场分布.

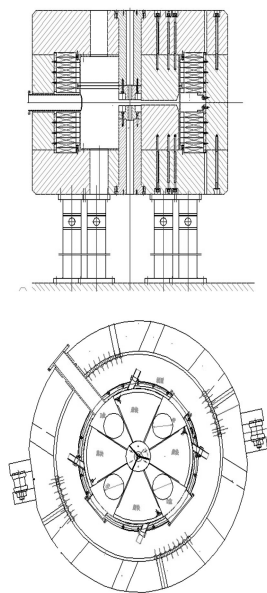


图 1 10MeV 质子加速器磁铁系统

2005 - 01 - 24 收稿

1) E-mail: wangbing301@hotmail.com

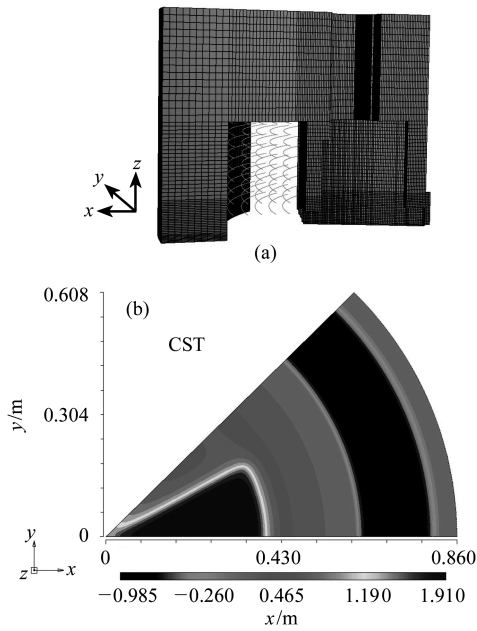


图 2 (a)计算时使用的八分之一模型, (b)中心平面八分之一区域的两维磁场分布

由 Mafia 程序计算的三维磁场分布可得到中心平面的两维磁场 $B(r, \theta)$ 分布^[2]:

$$B_{\text{iso}}(r) = B_{\text{so}} \frac{1 + \sigma(r)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{c}r\right)^2 [1 + \sigma(r)]^2}}, \quad (1)$$

其中

$$\sigma \approx -\frac{1}{(1+G)(N^2-1)} \left(F^2 + \frac{r}{2} \frac{dF^2}{dr} \right),$$

$$F^2(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[B(r, \theta) - \bar{B}(r)]^2}{[\bar{B}(r)]^2} d\theta,$$

$$\bar{B}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B(r, \theta) d\theta,$$

$$G = \frac{r}{\bar{B}(r)} \frac{d\bar{B}(r)}{dr},$$

$$B_{\text{so}} = \frac{m\omega}{q}. \quad (2)$$

由(1)式可计算与 $B(r, \theta)$ 对应的理论等时场 $B_{\text{iso}}(r)$. 其中 ω 为高频角频率, c 为光速, $N=4$ 扇块数, m 为粒子质量, q 为粒子电荷量. 按计算得到的磁场和理论等时场的差, $dB = \bar{B}(r) - B_{\text{iso}}(r)$ 确定对磁铁形状的修正.

该加速器只用一套线圈励磁, 要使计算得到的磁场和理论等时场相符合, 必须对磁铁扇的形状进行优化. 我们利用在扇块两边不同半径处切去不同厚度的铁板来修正中心平面的二维磁场分布, 图 3 给出两个扇边修正的例子. 修正后, 重复上述过

程, 再次计算中心平面的磁场分布 $B(r, \theta)$ 及其对应的理论等时场 $B_{\text{iso}}(r)$, 比较计算场和理论等时场的差 $dB = \bar{B}(r) - B_{\text{iso}}(r)$, 确定下一步的磁铁修正方案. 经过几次迭代, 使计算场和理论等时场的差达到要求的精度. 图 3(a) 是在半径为 0.15m 至 0.225m 之间, 扇块两边切 8.2mm 厚铁板的平均场和扇块两边切 8.6mm 厚铁板的平均场的差; 图 3(b) 是在半径为 0.25m 至 0.4m 之间, 扇块两边切 7.8mm 厚铁板的平均场和扇块两边切 8.2mm 厚铁板的平均场的差.

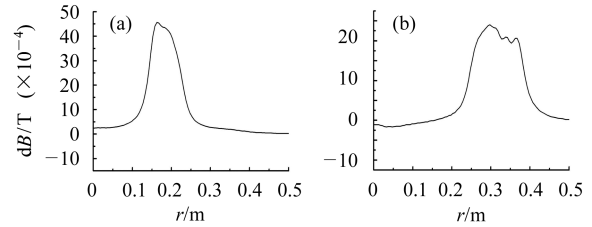


图 3 扇边切不同厚度铁块对平均场贡献的差
详细说明见正文.

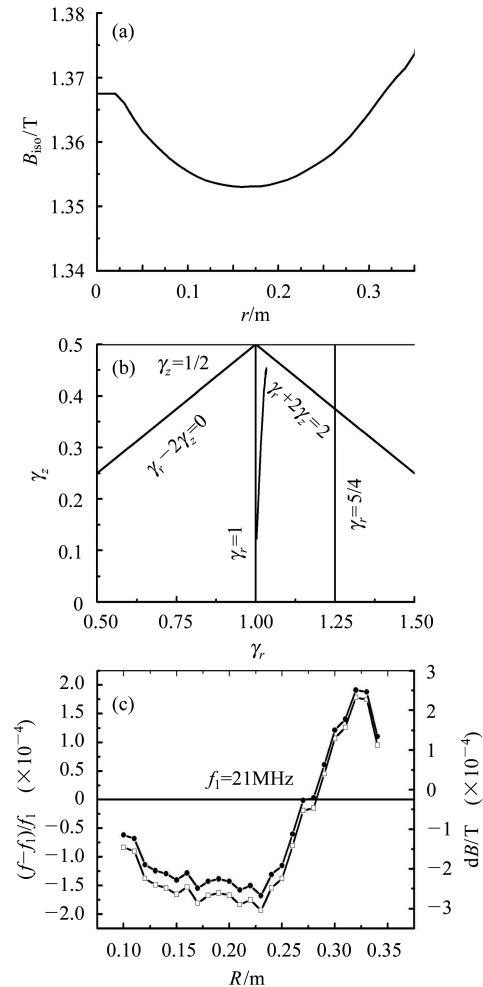


图 4 (a)10MeV H^- 的理论等时场; (b)工作路线; (c)不同半径处, 粒子回旋频率与设计值的相对误差(\square), 与频率误差对应的磁场误差(\bullet)

磁铁形状的修正全部完成后, 得到加速 10MeV H^- 的计算场及理论等时场. 在理论等时场下, 计算不同半径处粒子的平衡轨道, 得到粒子的回旋频率 f , 和设计的粒子回旋频率 $f_1 = 21\text{MHz}$ 相比, 计算结果显示理论等时场的等时性好于 0.2% ($\left| \frac{f - f_1}{f_1} \right| < 0.2\%$). 图 4(a) 为加速 10MeV H^- 的理论等时场 $B_{iso}(r)$ 沿半径的分布, 图 4(b) 为工作路线图. 图 4(c) 为不同半径处, 粒子回旋频率与设计值的相对误差及对应的磁场误差.

通过轨道计算, 得到计算场下的等时性分析, 结果见图 5. 计算场的等时性好于 3% ($\left| \frac{f - f_1}{f_1} \right| < 3\%$). 在加速区, 计算场和理论等时场的差小于 $\pm 10^{-3}\text{T}$, 满足了加速粒子的要求. 中心区的计算场和理论等时场差别较大, 这部分的计算场需进一步优化.

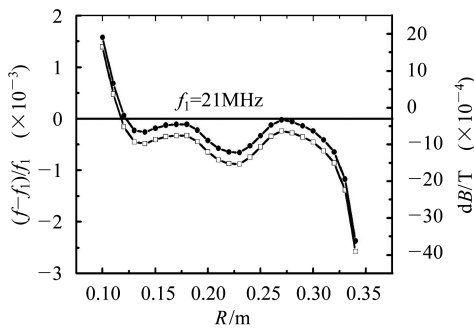


图 5 不同半径处, 粒子回旋频率与设计值的相对误差(□)和磁场误差 $dB(r) = \bar{B}(r) - B_{iso}(r)$ 值(●)

3 中心区设计^[3]

10MeV 质子加速器的加速系统由两个张角为 30° 的 Dee 盒构成, 放在相对的两个谷中. 高频频率为 42MHz, 二次谐波加速, 设计的高频电压为 30kV. 中心区的设计要保证: 1) 粒子在中心区获得足够的能量, 以绕过内离子源. 2) 粒子轨道在中心区的中心化较好. 轨道中心和机器中心的偏离较小, 以获得好的束流品质, 有利于粒子在大半径的加速. 3) 要有足够大的纵向(注入相宽)和横向(径向和轴向)接受度, 保证束流强度达到设计值.

通过对中心区电场及束流动力学的计算, 反复优化中心区高频电极形状, 得到的中心区高频电极形状及中心粒子的轨道见图 6(a). 中心粒子加速一圈后, 在离子源方位, 轨道的圈间距约为 15mm, 为离子源的设计留下足够的空间. 从离子源引出的粒子加速 6 圈,

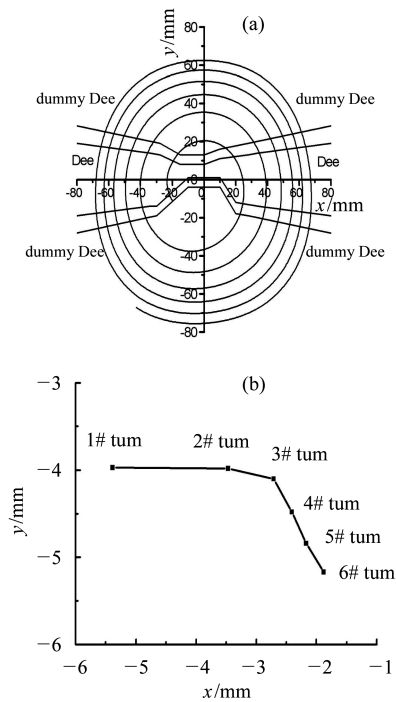


图 6 (a)中心区电极形状及中心粒子轨道; (b)中心粒子轨道中心运动

中心粒子的轨道中心和机器中心的偏离小于 6mm, 如图 6(b) 所示. 该加速器的设计束流强度为 $30\mu\text{A}$, 在冷阴极 PIG 离子源提供足够的流强后, 需要中心区有足够大的接受度, 能接受尽可能多的离子, 同时还要保证较好的束流品质. 因此对可接受粒子的定义为: 在加速 6 圈的过程中, 可接受的粒子在径向与中心粒子的偏离小于 $\pm 7\text{mm}$, 在轴向与中心粒子的偏离小于 $\pm 6\text{mm}$. 中心粒子的注入相位为 165° , 可接受粒子的注入相位范围为 $155^\circ - 170^\circ$. 通过多粒子跟踪, 得到的径向接受度和轴向接受度见图 7. 在采用内离子源的情况下, 径向接受度约为 $520\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 轴向接受度约为 $5390\text{mm}\cdot\text{mrad}$. 因此径向和轴向的运动对束流强度影响不大, 决定束流强度的关键因素是可接受的注入高频相位宽度, 设计值为 15° .

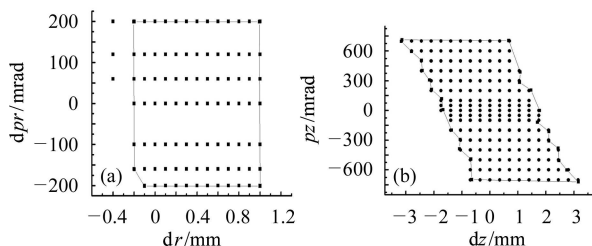


图 7 (a)径向和(b)轴向接受度

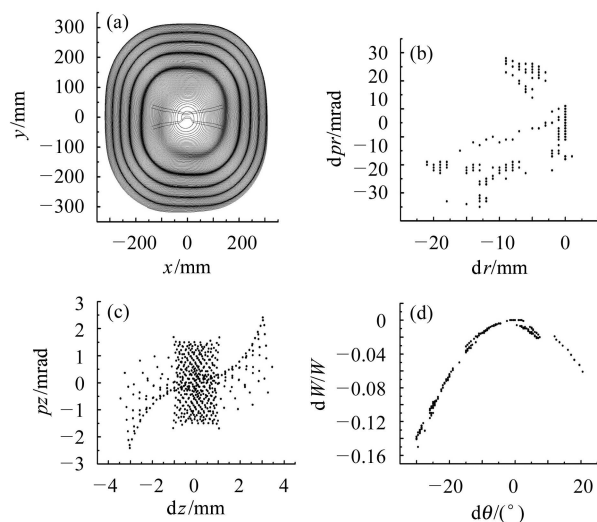


图 8 (a)中心粒子加速轨道, 束流在谷中心的径向(b), 轴向(c)和纵向(d)发射度

中心粒子经过172圈加速, 能量为10.016MeV. 中心粒子加速轨道见图8(a). 在上述接受度内的粒子, 加速172圈, 无粒子损失. 束流加速172圈后, 在谷中心的发射度见图8. 束流能散在-16%到2%之间, 径向发射度约为660mm·mrad, 轴向发射度约为35mm·mrad. 由于10MeV质子加速器主要用于生产中短寿命放射性同位素, 上述束流品质可以满足要求.

4 结论

通过对等时场垫补和粒子在中心区的运动进行计算, 确定了磁极和中心区高频电极形状. 束流动力学计算结果表明, 这套设计能满足获得用于生产中短寿命放射性同位素的10MeV质子束流要求.

参考文献(References)

- 1 The MAFIA Collaboration. MAFIA User's Guide. CST GmbH, Darmstadt, Germany, 1998
- 2 Garren A A. Nucl. Instrum. Methods, 1962, **18**, **19**: 309—322
- 3 Bellomo G. Proceedings on the 12th International Conference on Cyclotrons and their Applications. Singapore: World Scientific, 1989

Design Study on a 10MeV Proton Isochronous Cyclotron

WANG Bing¹⁾ WANG Yi-Fang

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

Abstract The design of the isochronous magnet field and central region for 10MeV proton isochronous cyclotron has been studied. There is only one set of exciting coil, and the isochronous magnet field is mainly determined by the shape of magnet pole. The designed central region provides an enough large acceptance at the exit of PIG source for having a large beam current. The centering of the orbits is also permitted. The beam qualities are presented after 172 turn acceleration with the beam energy of 10MeV. The proton beam delivered by this cyclotron can be used in Positron Emission Tomography(PET) and so on.

Key words 10MeV proton cyclotron, isochronous field, central region