

文章编号: 1007-4627(2012)01-0062-05

HITFiL 中能束运线的纵向匹配

谢修瑾^{1, 2}, 宋明涛¹, 郝焕锋¹, 王贤武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: 基于中国科学院近代物理研究所正在研制的兰州重离子治疗专用装置(HITFiL)的参数和指标, 对从回旋加速器到同步加速器之间中能传输段的纵向束流匹配过程进行了模拟分析。根据主加速器的注入要求, 在束运线上采用了散束器以降低束流动量分散, 从理论上分析了中能传输段末端可能实现的最小动量分散和达到最小动量分散的条件, 讨论了散束效果与初始动量分散、束团相宽和漂移长度的关系。并利用 MathCAD 程序对束团在束运线上的纵向运动进行了跟踪模拟, 使用 PBO-Lab 程序进行了验算, 得到了当散束器射频电压为 102 kV 时, 末端动量分散为最小值 2.764×10^{-4} 。进一步提出了中能传输段的基本参数, 也为下一步的优化设计提供了基础。

关键词: HITFiL; 散束器; 能散; 纵向运动; 束流匹配

中图分类号: TL56; TL593 **文献标志码:** A

1 引言

重离子放疗以其在物理学、生物学和临床医学方面的优势, 成为继传统的电子或 X 射线放疗之后的一种更有效的新型放疗手段, 越来越受到人们关注。在日本、德国和美国等发达国家, 重离子放疗已逐渐结束实验阶段, 正逐步进入医疗体系。在我国, 由中国科学院近代物理研究所承担研制的兰州重离子治疗专用装置(Heavy Ion Therapy Facility in Lanzhou, 简称 HITFiL)正在设计和施工中^[1]。

另一方面, 从加速器技术发展前沿看, 近年来, 国际上新型加速器的建造除了呈现大型化、高能化和强流化的特点(如 LHC)之外, 也呈现出小型化、高效化、商业化的特点。建造小型化专用医疗加速器具有现有大型科研加速器所无法比拟的高效率和低成本等优势, 因而受到世界各国广泛重视。如, 德国的 GSI、日本的 NIRS、意大利的 CNAO^[2] 等一系列专用医疗加速器已经相继投入使用。

HITFiL 由一台回旋加速器和一台同步加速器组成, 离子源产生的 $^{12}\text{C}^{5+}$ 离子, 首先在回旋加速器中被预加速到 7 MeV/u, 然后通过长约 19 m 的束运线注入同步加速器中, 注入流强约为 $10 \text{ e}\mu\text{A}$ 。在束运线中, 通过一个散束器(debuncher)对粒子的纵向相空间分布进行调制, 以降低束流的能散, 从

而满足主加速器的注入要求^[3]。本文从理论方面分析了中能传输段末端可能实现的最小动量分散和达到最小动量分散的条件, 讨论了散束效果与初始动量分散、束团相宽和漂移长度的关系, 并利用 MathCAD 程序对束团在束运线上的纵向运动进行了跟踪模拟, 使用 PBO-Lab 进行验算。

2 束线布局

HITFiL 的中能束运线由 8 台四极磁铁和 3 台二极铁组成, 见图 1。束流从回旋加速器引出以后首先经三组合四极透镜传输, 再经 3 台二极磁铁导向和另外 5 台四极磁铁匹配注入同步加速器中。在第 6 和第 7 台四极铁之间设置散束器以减小束流能散。其中, 散束器主要设计参数如表 1。同时, 同步加速器对注入束流的要求见表 2。

表 1 散束器主要设计参数

名称	指标
高频频率/MHz	31.02
散束器谐波数	3
前漂移节长度/m	13.2
后漂移节长度/m	6.17

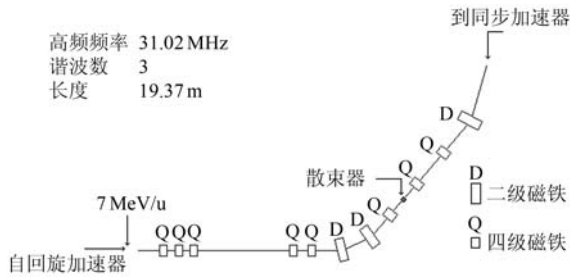


图 1 HITFiL 中能束运线磁聚焦结构示意图

表 2 同步加速器对注入束流的要求

名称	指标
能量/(MeV/u)	7
流强/ $e\mu\text{A}$	8~11
动量分散	5×10^{-3}
发射度/ $(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$	25

3 理论分析

设 Z 为一般粒子偏离理想粒子或中心粒子的纵向距离, $\Delta p/p$ 为一般粒子与理想粒子的动量偏差。在 $Z-\Delta p/p$ 相空间中, 束流的 Sigma 矩阵为^[4]

$$\sigma_z = \epsilon \begin{bmatrix} \beta_z & -\alpha_z \\ -\alpha_z & \gamma_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 ϵ 为纵向发射度, α_z , β_z 和 γ_z 是束团的纵向 Twiss 参数。Sigma 矩阵沿着束运线的传递满足:

$$\sigma_z(s_1) = M(s_0:s_1) \cdot \sigma_z(s_0) \cdot M^T(s_0:s_1), \quad (2)$$

其中: $M(s_0:s_1)$ 为从 s_0 到 s_1 的传输矩阵; $M^T(s_0:s_1)$ 是 $M(s_0:s_1)$ 的转置矩阵。

散束器可以看作一个同步相位为 90° 的高频腔, 忽略空间电荷效应的影响, 其传输矩阵为^[5]

$$M_{\text{Debuncher}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{2\pi \sin \phi_s q E_0 T L}{\beta^3 \gamma m_0 c^2 \lambda}, \quad (4)$$

其中: f 表示元件的束流光学焦距; ϕ_s , λ , q 和 m_0 分别是同步相位、高频波长、粒子的电荷和静止质量; β 和 γ 是相对论因子; 有效腔压 $E_0 T L$ 为加速场 E_0 , 渡越时间因子 T 和间隙长度 L 的乘积。

类似地, 漂移节的传输矩阵表示为^[5]

$$M_{\text{Drift}} = \begin{bmatrix} 1 & l' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: l' 是漂移节的长度; γ 是相对论因子; l 是在粒子坐标系中的有效漂移长度。由此, 整个中能段纵向传输矩阵可以表示为

$$M_{\text{Total}} = M(l_2) \cdot M(f) \cdot M(l_1) \\ = \begin{bmatrix} 1 - \frac{l_2}{f} & l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{l_1}{f} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 l_1 和 l_2 分别为散束器之前和之后的漂移节长度。所以, 有:

$$\gamma_z(s_1) = \frac{2(f - l_1)}{f^2} \alpha_z(s_0) + \\ \frac{1}{f^2} \beta_z(s_0) + \frac{(f - l_1)^2}{f^2} \gamma_z(s_0). \quad (7)$$

由此, 可以计算得到束流在同步加速器入口处的动量分散 $\Delta p/p$:

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_1 = \left(\frac{\Delta p}{p}\right)_0 \left\{ \frac{1}{\gamma_z(s_0)} \left[\frac{2(f - l_1)}{f^2} \alpha_z(s_0) + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{f^2} \beta_z(s_0) + \frac{(f - l_1)^2}{f^2} \gamma_z(s_0) \right] \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

其中: $(\Delta p/p)_0$ 表示回旋加速器出口处的动量分散; $(\Delta p/p)_1$ 表示同步加速器入口处的动量分散。

当

$$f = \frac{\gamma_z(s_0) l_1^2 + \beta_z(s_0) - 2\alpha_z(s_0) l_1}{\gamma_z(s_0) l_1 - \alpha_z(s_0)}$$

时, $(\Delta p/p)_1$ 取得最小值:

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{1_{\min}} = \\ \frac{(\Delta p/p)_0}{\sqrt{[\gamma_z(s_0) l_1^2 + \beta_z(s_0) - 2\alpha_z(s_0) l_1] \gamma_z(s_0)}}, \quad (9)$$

其中 $\gamma_z(s_0) l_1^2 + \beta_z(s_0) - 2\alpha_z(s_0) l_1$ 为散束器所在位置的束团相宽。束团相宽越宽, 散束效果越好, 但是在实际设计中, l_1 的长度受到空间的限制, 不可能无限长。同时, 过宽的束团相宽也会导致由高频波形引起的非线性效应。

利用 $\beta_z(s_0) \gamma_z(s_0) - \alpha_z^2(s_0) = 1$, 化简后可得:

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{1_{\min}} = \frac{(\Delta p/p)_0}{\sqrt{[\gamma_z(s_0)l_1 - \alpha_z(s_0)]^2 + 1}}, \quad (10)$$

当 $l_1 = \alpha_z(s_0)/\gamma_z(s_0)$ 时, $(\Delta p/p)_{1_{\min}}$ 取极大值 $(\Delta p/p)_0$, 此时没有动量压缩效应。在实际中, l_1 总是取足够大, 所以有:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{1_{\min}} &\approx \frac{(\Delta p/p)_0}{\gamma_z(s_0)l_1 - \alpha_z(s_0)} \\ &\approx \frac{(\Delta p/p)_0}{\gamma_z(s_0)l_1} = \frac{\epsilon}{(\Delta p/p)_0 l_1}. \end{aligned} \quad (11)$$

可见, 在 l_1 足够大的时候, 最终动量分散与初始动量分散和漂移长度成反比。

HITFiL 的引出束流纵向相空间参数如表 3 所列。根据以上的分析可得, 当 $f = 20.549 \text{ m}$, 即 $E_0 TL = 0.102 \text{ MV}$ 时, $(\Delta p/p)_{1_{\min}}$ 取得最小值 2.764×10^{-4} 。

表 3 回旋加速器引出束流纵向相空间参数

名称	指标
纵向发射度 / ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	18.35
$\alpha_z(s_0)$	-3.301
$\beta_z(s_0)$ / (m/rad)	25.648
$\gamma_z(s_0)$ / (rad/m)	0.464
动量分散	2.6×10^{-3}

4 模拟计算

使用 MathCAD 对回旋加速器引出的粒子进行追踪, 共计追踪 4 467 个宏粒子。首先由每一个粒子的磁刚度和回旋相位得到相应的初始能量和相位^[6-7], 并统计给出均方根发射度, 如图 2 所示。

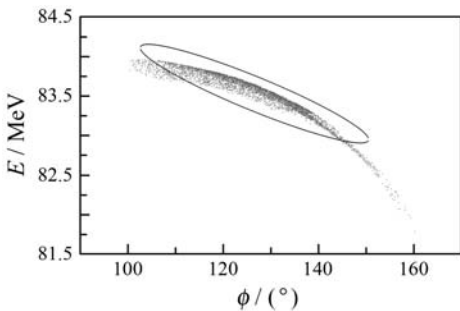


图 2 初始的相椭圆

从式(11)可以看出, 纵向发射度越大, 散束器的散束效果越差。因此, 为了提高散束效率, 有必

要选择尽可能小的纵向发射度。图 2 中偏离中心较远的粒子数量很少, 仅占总粒子数的 8%, 但它们导致纵向发射度大幅度的增加, 因此有必要进行粒子的选择。通过舍去相椭圆之外的粒子并重新统计剩余粒子的相椭圆, 得到如图 3 所示。

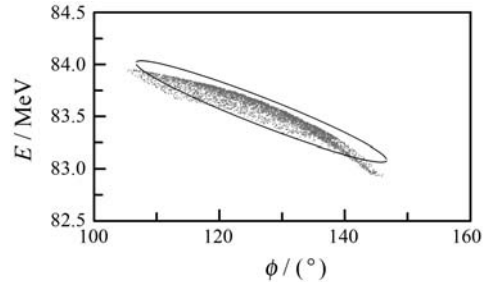


图 3 筛选后的相椭圆

将以上数据由 $(\phi-E)$ 空间转换到 $(Z-\Delta p/p)$ 空间:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\Delta E}{E}, \quad (12)$$

$$Z = -\frac{\beta\lambda\phi}{2\pi}, \quad (13)$$

得到的相图如图 4 中 I 所示。计算漂移节的传输矩阵, 并由此计算粒子相点的变换和 Sigma 矩阵的传递, 算出经过漂移节后粒子的分布和相椭圆, 有图 4 中 II 所示。假定散束器的射频电压为未知量, 计算主加速器入口处 Sigma 矩阵, 以 γ 取最小值为条件, 结果与理论计算得出的射频电压值相同, 由此可得经过散束器后的粒子分布和相椭圆, 如图 4 中 III 所示。

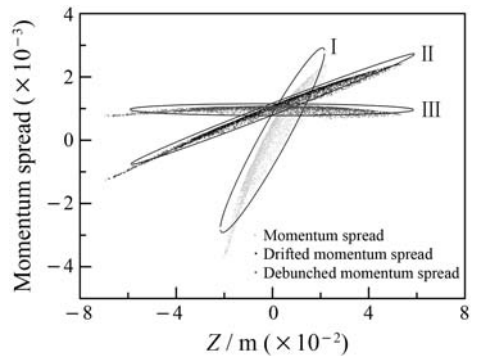


图 4 漂移、散束后的相图

以上相图可看出, 经过散束器以后, 相椭圆被成功地转换成类正椭圆^[8], 也就是动量分散最小的情况。同步加速器入口处的束流参数如表 4 所示。

表 4 同步加速器入口束流纵向相空间参数

名称	指标
发射度/ $(\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$	18.35
$\alpha_z(s_1)$	-3.171×10^{-3}
$\beta_z(s_1)/(\text{m}/\text{rad})$	189.816
$\gamma_z(s_1)/(\text{rad}/\text{m})$	5.268×10^{-3}
动量分散	2.764×10^{-4}

图 5 给出了由束运线计算软件 PBO-Lab 计算的结果。左侧为回旋加速器引出束流相图, 右侧为同步加速器入口处相图。根据 PBO-Lab 的拟合结果^[9], 散束器的射频电压应为 103.5 kV, 与 MathCAD 得到的计算结果略有差异, 其原因是因为用 MathCAD 进行计算时只考虑纵向运动, 忽略了纵向运动和横向运动的耦合。

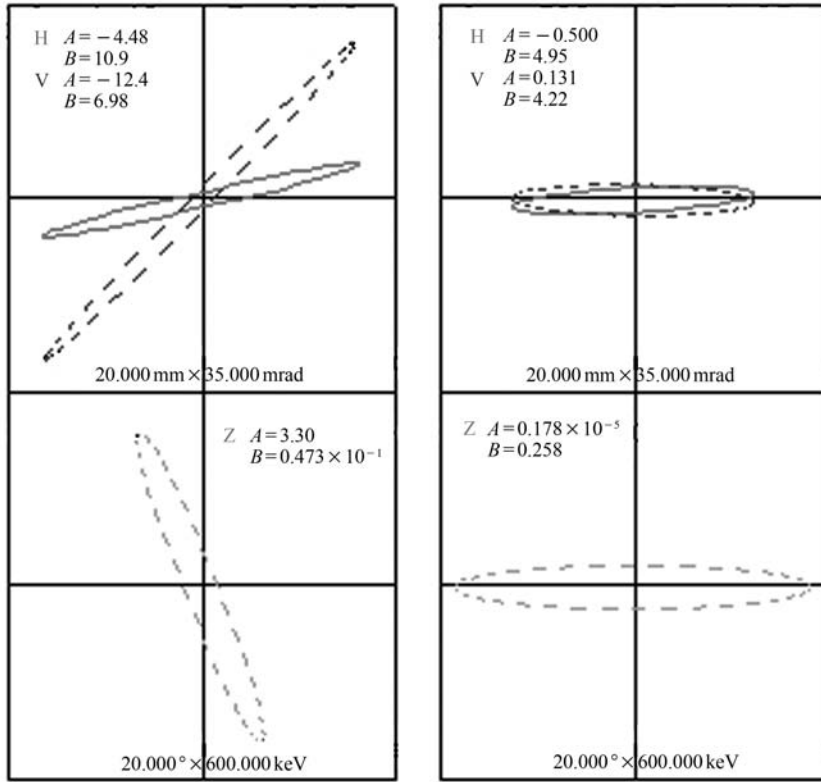


图 5 相椭圆的变换

5 结论

根据上面的分析和计算, HITFiL 中能束运线纵向匹配的物理设计工作已经基本完成。进一步的工作包括高频腔波形非线性的影响、聚束器长度的影响、空间电荷和尾场效应以及误差分析等仍然需要进一步深入研究。此外, 有关腔体腔型、尺寸和加工工艺等技术方面依然有待于进一步的研究。

参考文献 (References):

[1] XIAO Guoqing, ZHANG Hong, LI Qiang, *et al.* Nuclear Physics Review, 2007, **24**(2): 185 (in Chinese).

(肖国青, 张红, 李强, 等. 原子核物理评论, 2007, **24**(2): 185.)

[2] MARCO Pullia. Status Report on CNAO//Proceeding of EPAC08. Genova, CNAO, 2008, 246.

[3] SONG Mingtao, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* Nuclear Physics Review, 2001, **18**(2): 116(in Chinese). (宋明涛, 詹文龙, 魏博文, 等, 原子核物理评论, 2001, **18**(2): 116.)

[4] LEE S Y. Accelerator Physics. Bloomington: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004, 47-73.

[5] TOMOHIRO O, MASANORI I. Nucl Instr and Meth, 2007, **A581**(3): 606.

[6] WANG Bin, HAO Huanfeng, ZHANG Jinquan. Design and Construction Progress of a 7 MeV/u Cyclotron//YUAN Youjin. Proceedings of Cyclotron 2010, Lanzhou, IMPCAS, 2010, 328.

- [7] HAO Huanfeng, YAO Qinggao, WANG Bin. Extraction System of a Compact Cyclotron//YUAN Youjin. Proceedings of Cyclotron 2010, Lanzhou, IMPCAS, 2010, 299.
- [8] POSOCCO P A, PISENT A, RONCOLATO C. Status of Linac Beam Commissioning for the Italian Hadron Therapy Center CNAO//Proceedings of HIAT09. Venice, CNAO, 2009, 188.
- [9] VORMANN H, SCHLITT B, CLEMENTE G. Status of the Linac Components for the Italian Hadrontherapy center CNAO//Proceedings of EPAC08. Genoa, CNAO, 2008, 1833.

Longitudinal Matching of HITFiL in MEBT

XIE Xiu-cui^{1, 2, 1)}, SONG Ming-tao¹, HAO Huan-feng¹, WANG Xian-wu¹

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

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

Abstract: Based on the parameters of the Middle Energy Beam Transport (MEBT) of the Heavy Ion Therapy Facility in Lanzhou (HITFiL), which is now under design and construction at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences (IMPCAS), a debuncher will be used to reduce the momentum spread for the injection requirement of the synchrotron according to the injection demand of the synchrotron. Both analytical model and tracking simulation with MathCAD are used for the choice of debuncher's parameters. The conclusion shows that the effective cavity voltage of the debuncher is 102 kV and the minimum final momentum spread is 2.764×10^{-4} .

Key words: HITFiL; debuncher; momentum spread; longitudinal movement; beam matching