

文章编号: 1007-4627(2014)01-0032-05

用于硼中子俘获治疗的 FFAG 加速器 Lattice 设计

王坤^{1, 2}, 宋明涛¹, 张金泉¹, 盛丽娜¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究设计了一种用于硼中子俘获治疗 (BNCT) 的紧凑型固定磁场交变梯度 (FFAG) 加速器。首先采用 FFAG 加速器磁铁的线性简化模型, 计算确定了加速器的基本结构参数; 再用 WINAGILE 程序进行了磁聚焦结构的设计和优化, 得到了 Beta 函数、色散函数、包络函数及工作点等; 采用 MAD 程序对设计结果进行了复算, 并对两种程序的计算结果作了进一步的对比分析; 最后采用 ZGOUBI 程序进行非线性磁场下粒子追踪。FFAG 加速器的超周期为 6, 能量为 11 MeV, 场指数 k 为 1.9, 周长为 11.1795 m, 结构紧凑。分析结果表明, 优化设计的 FFAG 加速器达到了预期的设计目标。

关键词: FFAG; Lattice; 硼中子; 硼中子俘获治疗

中图分类号: TL503.1; TL593 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.032

1 引言

随着物理学、生物医学以及治疗装置技术的发展, 放射性治疗已和手术治疗、化学治疗一起成为治疗恶性肿瘤的三大主要手段。硼中子俘获治疗 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) 是将具有肿瘤选择性的含硼药物注入人体, 待含硼药物富集在肿瘤组织后, 用中子照射肿瘤部位, 利用中子与硼发生核反应产生的 α 粒子, 杀死肿瘤细胞的一种放射性治疗方法。BNCT 和其它放疗方法相比, 具有治疗局域性更好和肿瘤部位剂量更大等特点, 受到越来越多的关注^[1]。

BNCT 的关键技术是设计一种安全可靠经济的、可以放置在医院的紧凑型中子源。目前, 国际上多采用小型核反应堆作为 BNCT 的中子源, 但因该装置高昂的建造维护费用和严格的监管程序, 很难在医院普及^[1]。近年来, 随着基于加速器的中子源 (Accelerator-Based Neutron Source, ABNS) 技术的不断发展, ABNS 能够满足 BNCT 对中子产额以及中子穿透深度的要求, 并以其较低的建造维护费用和便捷安全稳定的运行方式, 很有可能成为医院普及使

用的 BNCT 中子源。其中固定磁场交变梯度 (Fixed Field Alternating Gradient, FFAG) 加速器, 具有较大的接受度和较小的色品, 非常有利于循环利用质子束流打靶产生中子, 一旦技术完全成熟, 则将成为医院 BNCT 中子源的主要选择。

FFAG 加速器的基本原理是 20 世纪 50 年代提出的^[2]。日本 KEK 在 2000 年建成了世界上首台原理验证型质子 FFAG 加速器, 从此之后, FFAG 加速器进入新的发展阶段, 现有的 FFAG 项目有日本 KEK 的 150 MeV FFAG 项目, 日本京都大学的 FFAG-ADSR 项目, 日本大阪大学的 PRISM 项目, 日本 KURRI 的 ERIT 项目, 英国的 EMMA 项目, 美国 BNL 的 AGS 项目和法国的 RACCAM 项目等^[3]。

本文介绍用于 BNCT 的紧凑型 FFAG 加速器的物理设计。首先给出 FFAG 加速器磁铁的线性简化模型, 然后采用 WINGAGILE 程序进行紧凑型等比型 FFAG 加速器的基本结构尺寸和磁聚焦结构的优化设计, 利用 MAD 程序进行复算, 最后采用 ZGOUBI 程序进行非线性磁场下 FFAG 加速器的粒子追踪, 为

收稿日期: 2013-03-27; 修改日期: 2013-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10905078)

作者简介: 王坤(1987-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 从事加速器技术与应用研究; E-mail: wangkun@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

下一步的 FFAG 磁铁和高频系统等设计奠定基础。

2 FFAG 加速器及其线性简化模型

FFAG 加速器中磁场随平均半径的变化可用下式来表示^[4]:

$$B(r, \theta) = B_i \left(\frac{r}{r_i} \right)^n F(\vartheta), \quad (1)$$

其中: B_i 是 r_i 处的磁场; r 是自加速器中心的半径; i 表示动量; r_i 是不同动量的半径; n 是磁场指数。

根据 n 值的不同, FFAG 加速器分为以下 2 种: 若 n 值为常数, 则称为等比型 FFAG 加速器; 若 n 值随半径变化, 则称为非等比型 FFAG。不同的 F 值, 对应于不同的 FFAG 类型: 若 $F(\vartheta) = 1$, 则为直边扇型 FFAG 加速器; 若 $F(\vartheta) = F\left(\theta - h \ln \frac{r}{r_i}\right)$, 则为螺旋扇型 FFAG 加速器, 其中 θ 为方位角。

应用式 (1) 描述的磁场, 若满足以下 2 个条件, 则可以导出 FFAG 加速器的零色品特性^[4]:

$$\left. \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{K}{K_0} \right) \right|_{\vartheta = \text{const.}} = 0, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial p} \right|_{\vartheta = \text{const.}} = 0, \quad (3)$$

其中: p 是动量; K 是局部曲率; K_0 是平均曲率; ϑ 是总的方位角。

FFAG 加速器的理想轨道不同于同步加速器的直线段和圆弧段的组合, 而更像直边扇回旋加速器。虽然 FFAG 加速器的闭轨计算需要通过数值积分来获得, 但是其聚焦特性如相移和 Beta 函数等可以由磁铁的线性简化模型算出^[5]。

在 FFAG 加速器磁铁的线性简化模型中, 假定 F 磁铁和 D 磁铁的曲率不变。其中, 常规偏转磁铁 (轨

道向内偏转) 提供水平聚焦, 故称为聚焦 F 磁铁, 倒转极性则称为散焦 (D) 磁铁。假设磁铁沿粒子轨道方向的线性梯度不变, 每块 FFAG 磁铁都可以看作是一块同时包含二极场和四极场的组合磁铁。此外, 边缘聚焦也提供了垂直方向的聚焦力。图 1 为 FFAG 加速器磁铁的线性简化模型示意图^[5]。

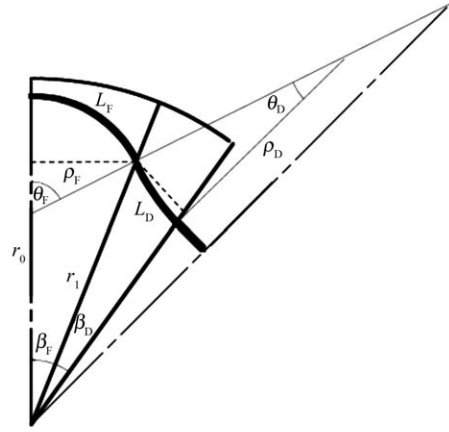


图 1 FFAG 加速器半块 triplet 示意图

其中: β_F 是 F 磁铁张角的一半; θ_F 是二极磁铁 F 的偏转角度; ρ_F 是二极磁铁 F 的偏转半径; r_0 、 r_1 是 FFAG 加速器的轨道半径; L_F 是二极磁铁 F 弧长的一半。如果给定一组 FFAG 加速器的几何参数 β_F , β_D , θ_F 和 r_0 , 就可以根据式 (4)、(5) 和 (6) 得出线性简化模型的其他几何参数^[6], 以此为基础便可使用同步加速器设计程序 WINAGILE^[7] 和 MAD^[8] 程序进行 FFAG 加速器的物理设计。

$$\frac{\rho_F}{r_0} = \frac{\tan \beta_F}{\sin \theta_F + (1 - \cos \theta_F) \tan \beta_F}, \quad (4)$$

$$r_1 = \frac{\rho_F \sin \theta_F}{\sin \beta_F}, \quad (5)$$

$$\frac{\rho_D}{\rho_F} = \frac{\sin \theta_F}{\sin \beta_F} \left[\frac{\sin(\pi/N - \beta_F) - \cos(\pi/N - \beta_F) \tan(\pi/N - \beta_F - \beta_D)}{\sin(\theta_F - \pi/N) - [1 - \cos(\theta_F - \pi/N)] \tan(\pi/N - \beta_F - \beta_D)} \right]. \quad (6)$$

3 FFAG 加速器设计

用于 BNCT 的 FFAG 加速器的设计目标必须满足治疗对束流的要求, 中子通量大于 $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大质子束能量小于 15 MeV。如果质子束能量大

于 15 MeV, 就会超过快中子产生氚的散裂反应能量阈值, 增加辐射剂量和中子慢化难度并影响治疗效果^[9]。当中子通量为 $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 假设一周长为 10 m 的 FFAG 加速器, 在环内 10 MeV 轨道上的 10^{11} 个质子形成的循环束流强度可以达到 70

mA^[10]。等比型 FFAG 加速器相较于非等比型具有零色品和较大的接受度等优点，故选择等比型直边扇 FFAG 加速器。基本设计思路为：从离子源产生 30 KeV 负氢离子，经过由 RFQ 和 DTL 组成的直线注入器加速到能量 11 MeV 后，剥离成质子束注入到 FFAG 加速器，并打内靶(Be)产生中子，进行 BNCT 研究。FFAG 加速器的注入能量和引出能量均为 11 MeV，加速器主要用于储存质子束循环打靶^[11]。高频用于补偿质子打靶的能量损失，循环利用质子束流，以提高中子通量。图 2 为 BNCT-FFAG 整个系统的平面示意图。

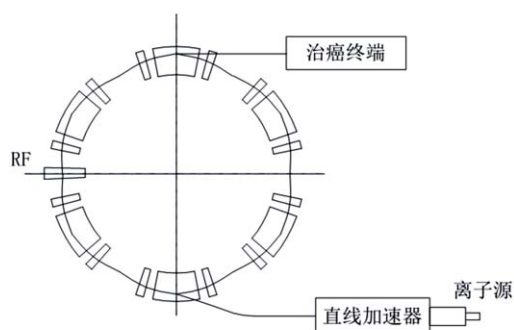


图 2 BNCT-FFAG 平面示意图

由 FFAG 加速器的线性简化模型计算得到磁场、漂移节长度、F/D 结构值以及压缩因子等参数的取值范围，在此基础上采用 WINAGILE 程序进行磁聚焦结构的设计和优化。整个装置由 6 台 F 磁铁、12 台 D 磁铁、12 条短直线节和 6 条长直线节组成，其中 6 条长直线节用于注入组件、束诊组件、高频腔体、真空泵和内靶 Be 等的安装。图 3 为 FFAG 加速器的磁聚焦结构布局图，表 1 为磁聚焦结构的基本设计参数。图 4 为磁聚焦结构的 Beta 函数和色散函数。根据注入、内靶和高频腔的设计及安装位置对束流的要求，设计的 Beta 函数在长直线节中间位置形成小的束腰。

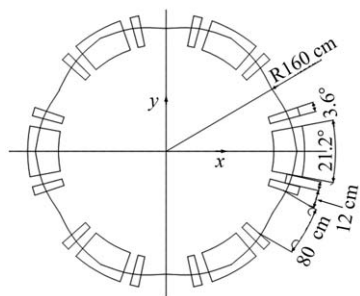


图 3 FFAG 加速器磁聚焦结构布局图

表 1 FFAG 加速器磁聚焦结构设计参数

参数	设计值
磁铁类型	DFD
场指数k	1.90
全环周长/m	11.1795
曲率半径F/m	0.39
磁场F/T	1.22
最大磁场梯度/T/m	1.44
F/2 弯转角度/(°)	10.6
D 弯转角度/(°)	3.6
长直线节/m	0.8
超周期	6
能量/MeV	11
轨道半径/m	1.6
曲率半径D/m	-0.39
磁场D/T	-1.21
真空孔径/mm	700(H)×80(V)
张角/(°)	F/2: 45 D: -15
工作点	1.80/2.45
短直线节/m	0.12

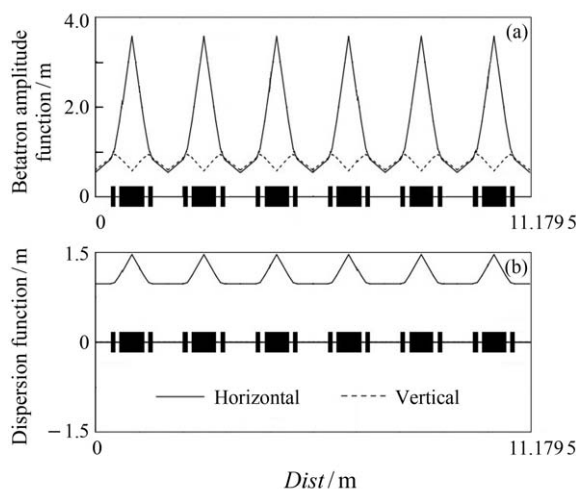


图 4 FFAG 加速器磁聚焦结构的 Beta 函数和色散函数图

束流接受度是所有加速器设计关注的一个重要参数，设计的 FFAG 加速器的束流接受度为 $100 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，动量分散为 0.5%。图 5 为 FFAG 加速器磁聚焦结构水平和垂直的接受度包络。

采用 MAD 程序将上述 FFAG 加速器的优化结果进行复算，计算结果同 WINAGILE 程序基本一致。表 2 为 FFAG 加速器磁聚焦结构设计参数对比。

日本 KURRI 的 ERIT 项目同样采用了 FFAG 加速器作为 BNCT 的中子源，该项目在 2008 年完成了

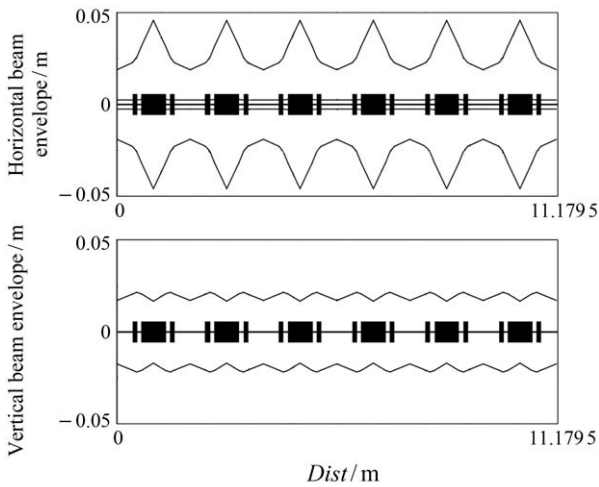


图 5 FFAG 加速器磁聚焦结构的包络函数

表 2 FFAG 加速器磁聚焦结构设计参数对比

参数	WIN 设计值	MAD 设计值
全环周长/m	11.179 5	11.179 495
Γ	1.079	1.079 380
水平工作点	1.80	1.80
垂直工作点	2.45	2.45
水平最大 Beta/m	3.583	3.583 237
垂直最大 Beta/m	0.947	0.947 836
水平最大色散/m	1.471 1	1.471 096
垂直最大色散/m	0	0

加速器的建造和安装, 并于当年出束, 其高频系统运行稳定, 束流寿命达到并超过理想的 500 圈, 粒子打内靶后的横向发射度增长与理论符合较好。将本论文设计方案与 ERIT 方案^[12]进行对比, 本论文的 FFAG 磁聚焦系统具有更为紧凑的结构, 有利于降低工程造价。表 3 为 BNCT-FFAG 与 ERIT 2 种方案的参数比较。

表 3 BNCT-FFAG 与 ERIT 2 种方案参数比较

参数	BNCT-FFAG	ERIT
加速粒子	质子	质子
能量/MeV	11	11
超周期	6	8
磁铁类型	DFD	DFD
轨道半径/m	1.6	2.35
场指数 k	1.90	1.92
F/D 结构值	3	3
水平工作点	1.80	1.76
垂直工作点	2.45	2.22
磁场最大值/T	1.22	0.9

ZGOUBI 程序^[13]可以模拟非线性磁场下粒子的轨迹, 并可以进行粒子的多圈追踪。为了得到更为准确的 FFAG 加速器磁聚焦结构设计, 本文采用 ZGOUBI 程序对 FFAG 加速器进行粒子追踪, 计算了非线性磁场下 FFAG 加速器的磁场分布和粒子轨道。图 6 为 FFAG 加速器单组 triplet 非线性磁场图, 图 7 为在非线性磁场下 FFAG 加速器磁聚焦结构的粒子追踪结果, 其中: s 为粒子纵向运动方向; Y 为粒子横向运动的径向方向; Z 为粒子横向运动方向且与 Y 方向垂直; B_z 为 Z 方向的磁场强度。在硬边磁场近似下, WINAGILE 程序和 ZGOUBI 程序计算结果一致。

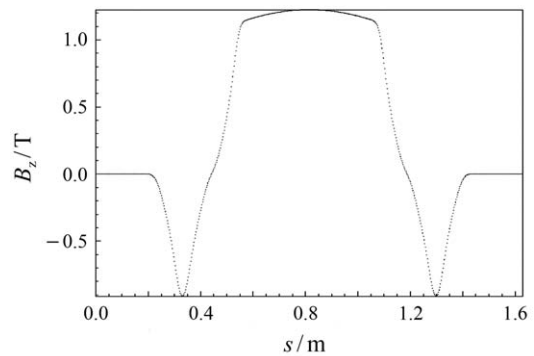


图 6 FFAG 加速器单组 triplet 非线性磁场图

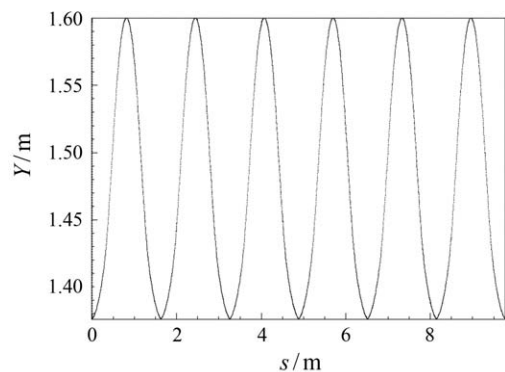


图 7 非线性磁场下 FFAG 加速器磁聚焦结构粒子追踪

4 结论与展望

本文首先介绍了 FFAG 加速器的线性简化模型, 利用 WINAGILE 程序进行了磁聚焦结构的设计和优化, 采用 MAD 程序对设计结果进行了复算, 完成了用于硼中子俘获治疗的紧凑型 FFAG 加速器的物理设计, 分析了 Beta 函数、色散函数和包络函数等设计结果, 最后采用 ZGOUBI 程序进行了非线性磁场

下粒子追踪, FFAG 加速器的超周期为 6, 能量为 11 MeV, 场指数 k 为 1.9, 分析结果表明了 FFAG 加速器的 Lattice 设计达到了预期的设计目标, 并有继续优化的空间。计划下一步将进行 FFAG 磁铁二维和三维设计以及注入引出系统和高频系统等设计。

参考文献:

- [1] LUO Junyi, HE Jiahuan. Radiation Protection Bulletin, 2010, **30**(2): 26. (in Chinese)
(罗军益, 何佳恒. 辐射防护通讯, 2010, **30**(2): 26.)
- [2] MORI Y. Nucl Instr and Meth A, 2006, **562**: 591.
- [3] MACHIDA S. Status of FFAG Developments[C]// Proceedings of APAC2007. India: Indore, 2007, **A12**: 21.
- [4] MACHIDA S, FOREST E. Beam Optics and Dynamics of FFAG Accelerators[C]// MARTI F. Cyclotrons and Their Applications 2001, Sixteenth International Conference. USA: Institute of Physics, 2001: 204.
- [5] MACHIDA S. Nucl Instr and Meth A, 2003, **503**: 322.
- [6] MACHIDA S, MORI Y, UENO R. Beam Optics design of an FFAG Synchrotron[C]// Proceedings of EPAC2000. Austria: Vienna, 2000: 557.
- [7] BRYANT J P. WinAGILE[EB/OL]. [2012-05-01]. <http://bryant.home.cern.ch/bryant/>.
- [8] GROTE HANS, ISELIN F. MAD[EB/OL]. [2012-05-01]. <http://mad.web.cern.ch/mad/>.
- [9] USEUGI T, MORI Y, HORII H, *et al.* FFAGs for the ERIT and ADS Projects at KURRI[C]// Proceedings of EPAC08. Italy: Genoa, 2008: 1013.
- [10] OKABE K, MORI Y, MUTO M. An Intense Neutron Source with Emittance Recovery Internal Target(ERIT) Using Ionization Cooling[C]// Proceedings of EPAC08. Italy: Genoa, 2008: 3512.
- [11] OKABE K, MORI Y, ISHI Y, *et al.* Study of FFAG-ERIT Neutron Source[C]// Proceedings of IPAC10, Japan: Kyoto, 2010: 418.
- [12] OKABE K, MORI Y, MUTO M. Recent Studies of the FFAG-ERIT System for BNCT[C]// Proceedings of PAC09. Canada: Vancouver, 2009: 5047.
- [13] MEOT F, VALERO S. ZGOUBI[EB/OL]. [2012-05-01]. https://oraweb.cern.ch/pls/hhh/code_website_disp_code?code_name=Zgoubi.

Lattice Design of a FFAG Accelerator for Boron Neutron Capture Therapy

WANG Kun^{1, 2, 1)}, SONG Mingtao¹, ZHANG Jinqun¹, SHENG Lina¹

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

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

Abstract: A compact FFAG accelerator for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) has been designed. Firstly, a linear simplified magnet model has been applied to calculate the basic parameters of FFAG accelerator; Then the WINAGILE program is used to design and optimize the lattice, as well as to obtain the critical parameters such as the Beta functions, the dispersion functions, the envelopes and the tunes; Also, the MAD program is used to check the design scheme; Finally, the ZGOUBI program is used to simulate the particles movement in the nonlinear magnetic field. The super period of the FFAG accelerator is 6. The energy is 11 MeV and the field index k is 1.9. The structure is compact with the circumference of 11.1795 m. The results show that this optimized design has achieved the proposal object.

Key words: FFAG; Lattice; Boron Neutron; BNCT

Received date: 27 Mar. 2013; **Revised date:** 10 Apr. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10905078)

1) E-mail: wangkun@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>