

230 MeV医用回旋加速器主磁铁的设计

王焱

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年10月14日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

质子治疗作为一种新的肿瘤放射治疗手段有着比常规 γ 射线和X射线治疗定位更精准、正常组织受损更小、治疗适应症更广、并发症少等优点。而加速器是质子治疗系统最重要的设备之一, 因此对加速器做相关设计研究具有重要的实际意义。磁铁是回旋加速器的关键部件, 磁铁的设计直接关系到加速器的工作性能, 磁铁设计的各项内容是密切相关的, 本设计过程基于磁路原理, 可根据所需的具体要求来选择基本的电磁参数并以此计算出主磁铁的几何结构参数。本文以用于质子治疗的230 MeV回旋加速器的主磁铁为例, 介绍了常规的医用回旋加速器设计流程, 应用有限元分析软件ANSYS对主磁铁进行了二维下的磁场分析, 得到了主磁铁的磁场分布, 仿真结果表明设计的主磁铁在峰区中平面的磁密能达到1.72 T, 在谷区中平面磁密能达到0.2 T, 可满足对粒子的加速。

关键词

Maxwell, 电磁仿真, 回旋加速器, 质子治疗仪, 放疗

Design of 230 MeV Main Magnet for Medical Cyclotron

Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 14th, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

Proton therapy, as a new radiotherapy method for tumor, has the advantages of more accurate localization, less damage to normal tissue, wider indications and fewer complications than conventional γ -ray and X-ray therapy. The accelerator is one of the most important equipment in proton therapy system, so it is of great practical significance to design and study the accelerator. Magnet

is a key part of cyclotron, the design of magnet is directly related to the working performance of the accelerator, the content of magnet design is closely related, this design process is based on the principle of magnetic circuit, according to the specific requirements to select the basic electromagnetic parameters and calculate the main magnet geometric structure parameters. In this paper, used for proton therapy of 230 MeV cyclotron magnet as an example, the main conventional medical cyclotron design process is introduced, the application of finite element analysis software ANSYS under the main magnet in the two-dimensional magnetic field analysis, the main magnet of the magnetic field distribution, the simulation results show that the design of the main magnet in the peak district in the plane of flux density can reach 1.72 T, In the valley region, the plane magnetic density can reach 0.2 T, which can meet the acceleration of particles.

Keywords

Maxwell, Electromagnetic Simulation, Cyclotron, Proton Therapy Apparatus, Radiotherapy

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

质子是带 1 个正电荷的粒子，是原子核的组成部分。用于医学的质子来源于氢(H_2)，氢电离后成为质子(H^+)，经同步或回旋加速器加速到近光速后应用于治疗各种疾病。质子束的最大特征是它进入人体内形成的尖锐的 Bragg 峰，在形成峰之前的平坦段称为坪(Plateau)，峰后则是一个突然减弱陡直的尾。由于 Bragg 峰太尖，所以可将它扩展后形成与肿瘤大小吻合的扩展 Bragg 峰(Spread Out Bragg Peak, SOBP) [1]。对于小肿瘤，可以根据它在体内的深度选择质子能量，使 Bragg 峰落在肿瘤位置上；对于较大的肿瘤，可以通过调整质子的能量使 Bragg 峰展宽到与肿瘤厚度相当。这样质子几乎不杀伤肿瘤后面和侧面的正常组织，对肿瘤前面的正常组织损伤也较小。作为癌症最有效的治疗手段之一，质子治疗以其独特的对人体正常组织的保护性和对病灶肿瘤细胞杀伤的精确性成为放射疗法的主要研究趋势，质子加速器是质子治疗系统中的核心装置。质子治疗加速器的能量要求在 70~250 MeV 之间，相应于穿透软组织或水 3~40 cm 的深度，束流强度则要求在 nA 量级。由于质子射程取决于质子的能量，因此质子治疗过程中要求质子的能量能够连续调节。

目前世界上的质子治疗仪加速器分为三种：直线加速器、同步加速器和回旋加速器，由于回旋加速器其占地小、部件少、运行便捷、束流稳定的优点广为应用，质子治疗回旋加速器又分为紧凑型回旋加速器和分离扇型回旋加速器。一台完整的回旋加速器主要由磁铁系统、高频系统、离子源、束流引出系统、束流诊断系统、靶系统、真空系统、冷却系统构成[2]，其中磁铁系统是回旋加速器中最主要的部件之一，他的作用是提供带电粒子在所控制的轨道中做圆周运动所需要的磁场强度，由磁铁、线圈、电源等设备组成。

本文主要基于磁路原理对 230 MeV 医用紧凑型回旋加速器的磁铁系统进行设计。

2. 基本电磁参数的选择

磁铁形状选型：回旋加速器一般选用图示的方框型，粒子的运动平面是水平的，结构简单，真空室暴露出来的部分较少，粒子源及粒子引出设备安装调试方便。

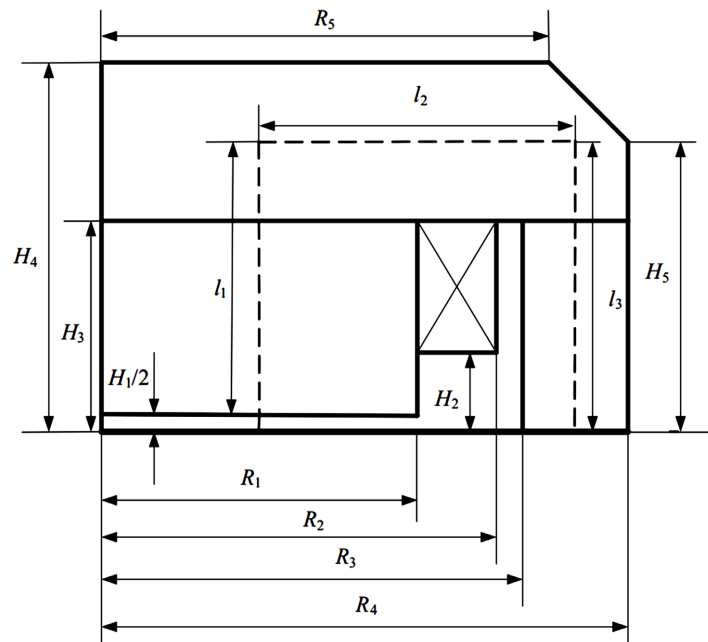


Figure 1. Schematic diagram of structure of box magnet
图 1. 方框型磁铁结构示意图

根据其竖直水平对称特性，取四分之一的模型结构为研究对象，图中各个参数及意义： R_1 为磁极半径， H_1 为气隙高度， R_2 为线圈外径距中心轴的距离， R_3 为磁轭内半径， R_4 为磁轭外半径， H_2 为线圈到中平面的距离， H_3 为磁极上部到中平面的距离， H_4 为上盖板到中平面的距离， R_5 和 H_5 分别为除去导角的盖板半径和磁轭高度。

磁铁材料选择：对于回旋加速器的材料要求饱和磁感应强度高、矫顽力小、磁时效性小、磁导率高 [3]，这里选用 10 号钢 ($C = 0.07\%$)。

气隙高度及磁峰区初始角的选择：参考 IBA 公司 235 Mev 质子回旋加速器的参数 [4]，气隙高度 H_1 选为 0.08 m，初始峰区角 $\alpha = 54^\circ$ 。

磁场中平面平均磁感应强度 B 、磁密峰值 B_H 及磁密谷值 B_V 的选择：在磁刚度 BR 一定的情况下， $R \propto 1/B$ ，而 R 越大，体积 V 越大，因此，要使磁铁小型化，应选择尽可能大的 B 。而回旋加速器的磁场在粒子加速过程中提供一个相当大的洛仑兹力，这个力有可能将粒子（一般为 H）的电子剥离 [5]。为了在较高能量时将束流损失限制在合理范围内， B 应低于 1.3 T，且如果工作在近饱和区，要耗费很大的励磁功率，这里我们初步选择 B 为 1.0 T [6]。又根据 B 、 B_H 、 B_V 之间的关系：

$$B = \frac{\alpha}{90} B_H + \left(1 - \frac{\alpha}{90}\right) B_V \quad (1)$$

可以初步选取峰区磁密 $B_H = 1.7 \text{ T}$ ，谷区磁密 $B_V = 0.1 \text{ T}$ 。

电流密度 J 的选择：综合考虑能耗成本、冷却方式等各种因素，电流密度 J 初步取为 1.5 A/mm^2 [7]。磁极利用系数 ξ 取为 0.86、线圈窗口的高和宽的比值 λ 取为 1.5、导体有效截面与线圈窗口总面积的比值 η 取为 0.67 [7]。

3. 主磁铁结构尺寸及其他电磁参数的计算

1) 磁钢度 BR 计算：由相对论原理、质能方程和质子在加速器中的运动方程式 [7]：

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0}{m}\right)^2} \quad (2)$$

$$W = mc^2 - m_0c^2 \quad (3)$$

$$v = qBr/m \quad (4)$$

可以计算出磁钢度:

$$BR = \frac{mv}{q} = \frac{m_0c \sqrt{\left(1 + \frac{W}{m_0c^2}\right)^2 - 1}}{q} = 2.43 \text{ T} \cdot \text{m} \quad (5)$$

式中 W 为质子的最终动能, 即 230 Mev, q 为质子所带电荷(H^+), 即 1.602117×10^{-19} 库仑, m_0 为质子的静止质量, 值为 1.672648×10^{-27} 。

2) 电压参考频率 f 计算: 加速器主磁铁在一个圆周内采用 4 块磁极, 即质子加速区也有四个, 则加速电压得参考频率为质子回旋频率的 4 倍, 即:

$$f = 4f_1 = \frac{2qB}{\pi m} = 5.1 \times 10^7 \text{ Hz} \quad (6)$$

3) 根据磁刚度可以计算出磁极半径 R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{\xi} \frac{BR}{B} = \frac{R}{\xi} = 2.83 \text{ m} \quad (7)$$

4) 中心磁感应强度 B_0 的计算: 根据等时性要求和相对论下质子的基本运动方程可以得到:

$$B_0 = B \sqrt{1 - \frac{(\pi R_1 f)^2}{4c^2}} = 0.65 \text{ T} \quad (8)$$

5) 根据中心磁感应强度 B_0 可以求出离散半径 $r(i)$ 上的平均磁密 $B(i)$:

$$B(i) = \frac{B_0}{\sqrt{1 - \frac{[\pi R(i) f]^2}{4c^2}}} \quad (9)$$

6) 将(9)式带入(1)式可以求出每一半径 $r(i)$ 处得磁极角度 $\alpha(i)$:

$$\alpha(i) = \frac{90B_0}{\left(\sqrt{1 - \frac{(\pi R_1 f)^2}{4c^2}} - B_v \right) (B_H - B_v)} \quad (10)$$

7) 其他结构参数的计算:

H_2 由经验公式求得:

$$H_2 = 0.4R_1 + H_1 = 1.212 \quad (11)$$

假定磁轭内半径与线圈外半径的距离之差为 R_{23} , R_{23} 的值由经验公式可得:

$$R_{23} = 0.0342857R_1 = 0.0977 \quad (12)$$

H_3 的值可参照图 1 由 R_3 表示出来:

$$H_3 = (R_3 - R_{23} - R)\lambda + H_2 \quad (13)$$

R_4 和 H_4 均由经验公式得到[7]:

$$H_4 = 0.012\alpha R_1 + H_3 \quad (14)$$

$$R_4 = \sqrt{\frac{R_1^2}{0.9} + R_3^2} \quad (15)$$

根据全电流定律:

$$\sum HL = NI \quad (16)$$

根据图 1 分析, 该磁路分四段, 即 l_1 , l_2 , l_3 和气隙段, l_1 段的磁感应强度为峰区磁密 BH , 长度为 $\frac{H_4 + H_3 - H_1}{2}$; l_2 段的磁感应强度由经验公式取为 $\frac{B_H R_1 \alpha}{180(H_4 - H_3)}$, 长度为 $\frac{R_4 + R_3 - R_1}{2}$; l_3 段的磁感应强度按经验公式取为 $0.9 BH$, 长度为 $\frac{H_4 + H_3}{2}$; 气隙段的磁感应强度为峰区磁密 BH , 长度为 $H_1/2$; 根据 10 号钢的磁化曲线可以求出各段磁路的磁场强度。

励磁安匝数的表达式为[8]:

$$NI = \lambda \eta J (R_3 - R_{23} - R_1)^2 \quad (17)$$

由式(17)和(16)可以解出: $R_3 = 3.76 \text{ m}$

由 R_3 的值进而求得其他值。

4. 根据设计参数建立磁铁模型

设计参数计算结果(表 1):

Table 1. Structural parameters of the main magnet model

表 1. 主磁铁模型结构参数

| 参数 | 数值(m) |
|-------|-------|
| R_1 | 2.83 |
| R_2 | 3.662 |
| R_3 | 3.76 |
| R_4 | 5.8 |
| R_5 | 4.98 |
| H_1 | 0.08 |
| H_2 | 1.212 |
| H_3 | 2.46 |
| H_4 | 4.29 |
| H_5 | 3.49 |

在 AnsysMaxwell 中建立主磁铁的 2D 有限元模型(1/2)如图 2 所示[9]。图中, 区域 A1 为磁极峰区(若为谷区模型时则为空气), A2 盖板, A3 为磁轭, A4 为线圈, A5 为空气, A6 为气隙。

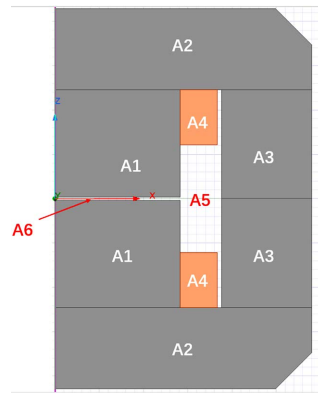


Figure 2. 2D model of main magnet (peak)
图 2. 主磁铁 2D 有限元模型(峰区)

对模型添加 Balloon 边界条件，对线圈区域加载激励条件，初始电流密度取 $1.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。主磁铁峰区和谷区模型的磁力线分布如图 3(a)和图 3(b)所示：

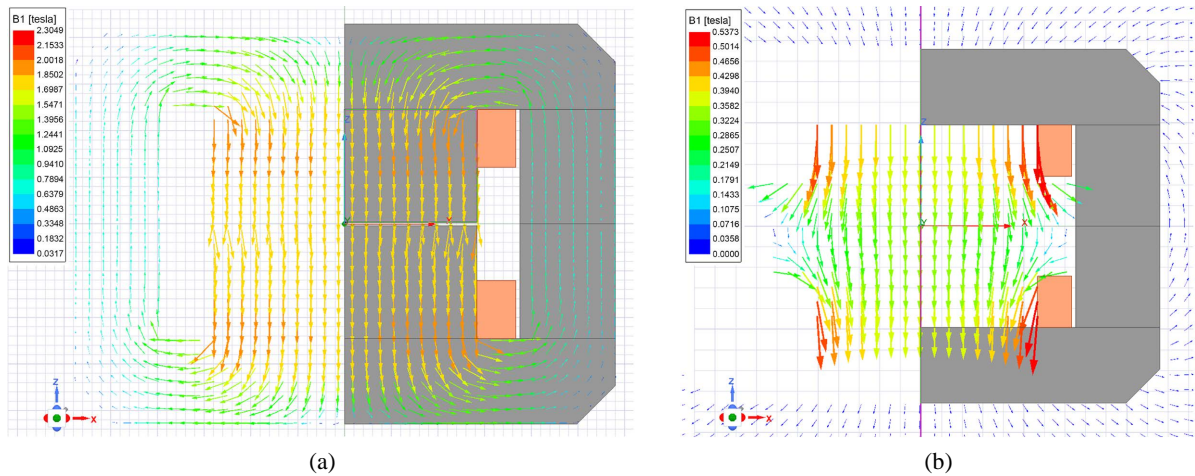
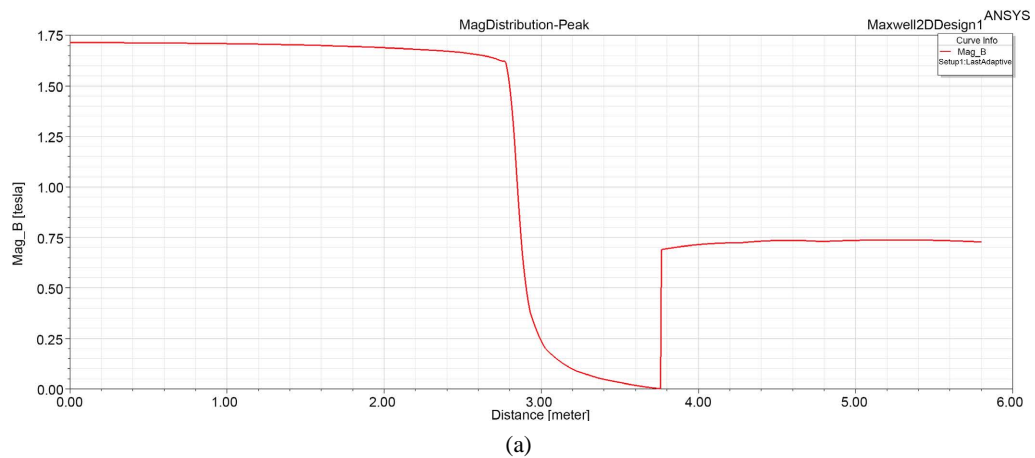


Figure 3. (a) Magnetic field line distribution in peak region; (b) Magnetic field line distribution in valley region
图 3. (a) 峰区磁力线分布；(b) 谷区磁力线分布

峰区和谷区中平面沿径向的磁场分布如图 4(a)和图 4(b)所示：



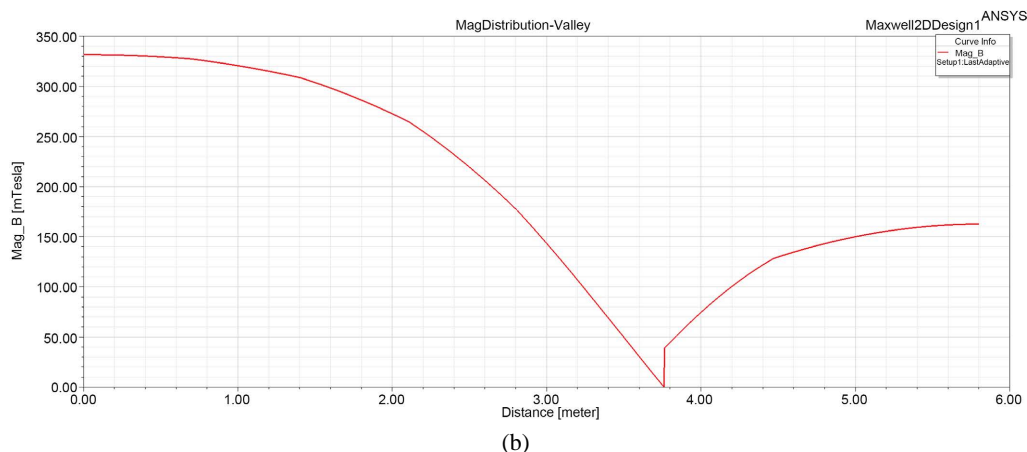


Figure 4. (a) Mid-planar magnetic field distribution in peak region; (b) Mid-planar magnetic field distribution in valley region
图 4. (a) 峰区中平面磁场分布; (b) 谷区中平面磁场分布

由图 2 和图 3 可以看出, 主磁铁峰区中平面上的平均磁场为 1.72 T 左右, 谷区中平面的平均磁场为 0.2T 左右, 与设计值相差不大。

5. 结论

1) 本文通过磁路原理设计了 230 MeV 质子治疗仪回旋加速器主磁铁的主要结构和电磁参数, 为后续对磁场的优化设计和电动力学计算奠定了基础。

2) 应用有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对设计的主磁铁建立了 2D 的有限元模型。

3) 通过 ANSYS Maxwell 软件对设计的主磁铁进行了电磁场计算, 计算结果表明: 在磁铁峰区中平面磁通密度能达到 1.72 T 左右, 在谷区中平面上磁通密度能达到 0.2 T 左右, 均满足设计要求。

参考文献

- [1] 李昌义, 胡振志, 王鹏飞, 苏文博. 250 MeV 回旋加速器主磁铁系统用 DT4 锻件制造技术研究[J]. 大型铸锻件, 2022(3): 1-3.
- [2] 何正中, 李宁, 廖光星, 肖国有. 医用回旋加速器的临床应用综述[J]. 中国医疗设备, 2022, 37(4): 149-153.
- [3] 杜洋, 何小中, 赵良超, 张罡, 马超凡, 张森. 7 MeV 医用回旋加速器磁铁的物理设计[J]. 核电子学与探测技术, 2021, 41(6): 998-1004.
- [4] 王胜龙, 王川, 张天爵, 吕银龙, 安世忠. 50 MeV 负氢回旋加速器主磁铁设计研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(9): 1681-1686.
- [5] 陈思富, 黄子平, 石金水. 带电粒子加速器的基本类型及其技术实现[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(4): 1-2.
- [6] 闫岩. 超导回旋加速器主磁场设计及运行稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [7] 余锡文. 质子治疗回旋加速器主磁铁设计研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] 高国强. 紧凑型回旋加速器主磁铁设计[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [9] 王川, 李明, 张东昇, 尹蒙, 杨建俊, 崔涛, 吕银龙, 安世忠, 张天爵. 230 MeV 超导质子回旋加速器主磁铁磁场计算[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2015(1): 190-191.