

蒙特卡罗模拟双环双散射体质子束流扩展*

鞠志萍, 曹午飞, 刘小伟
(中山大学理工学院, 广东 广州 510275)

摘要: 束流扩展是研究大体积深度肿瘤的基础, 利用 Monte Carlo 多粒子模拟软件 Fluka, 计算质子经过双环双散射体后束流分布特性, 在束流扩展半径相同的条件下, 与解析计算相比较。结果表明: Fluka 计算得到的第一散射体的厚度小于解析计算得到的结果, 散射膜薄的条件下二者符合好于散射膜厚的条件。束流扩展半径随着两个散射体厚度的增加而增大, 束流利用率先增加后减小, 最大值是 27%。

关键词: 蒙特卡罗; 质子治疗; 束流扩展; 束流横向分布

中图分类号: R144.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2010) 02-0013-04

Monte Carlo Simulation of Dual-Ring Double Scattering Method for Proton Beam Spreading

JU Zhiping, CAO Wufei, LIU Xiaowei

(School of Physics & Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Beam spreading is the foundation of proton therapy with large area and depth tumour. The characteristics of proton lateral beam distribution for dual-ring double scattering system are investigated using Monte Carlo multi-particle transport code Fluka and the results are compared with analytical computation, when the same radius of beam spreading is considered. It is found that the first scatterer is thinner than the results obtained from analytical computation and they are coincided better with thin-foil than thick-foil. For dual-ring double scattering system, as the thickness of foils increase, the radius of beam spreading increase, but the efficiency of beam use increase firstly and then decrease, the maximum value is about 27%.

Key words: Monte Carlo; proton therapy; beam spreading; lateral beam distribution

质子治疗束流配送系统中, 被动束流扩展方法由于简单、安全、可靠的特点而得到广泛应用^[1-6]。被动束流双散射体方法是将从加速器引出的束流经过两个散射体后扩展成均匀分布的束流, 均匀分布的束流可以保证病灶的每个部分都接受相同的剂量照射。单膜散射法只能在较窄的照射野中得到均匀性满足临床要求的束流分布。双散射体方法就是在改进单膜散射法这些缺点的基础上发展起来的。

被动束流双散射体方法可以分为三种: 挡光器

双散射体方法、仿形双散射体方法和双环双散射体方法。挡光器双散射体方法由 Koehler 等^[7]提出, 它的原理是在第二个散射体前面放置一个阻止柱或阻止环来有效扩展束流, 这种方法需要相对较长的形成距离。仿形散射体方法采用一个高斯型的散射体和一个补偿器, 通过二者结合保证有相同的能量损失, 但是这种散射体对材料的加工提出很高的要求。双环双散射体方法是由 Takada^[8]提出, 此方法与前面提到的两种方法相比的优势是有较短的形成距离和较高的束流利用率。本文利用 Monte Carlo

* 收稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10675175)

作者简介: 鞠志萍 (1979 年生), 女, 博士研究生; 通讯作者: 刘小伟;; E-mail: stslxw@mail.sysu.edu.cn

多粒子模拟软件 Fluka^[9], 计算质子经过双环双散射体后的束流分布特性, 在束流扩展半径相同的条件下, 与解析计算相比较。

1 模型和方法

图 1 是双环双散射体系统的几何结构示意图。第一散射体是高密度物质 Pb, 厚度是 d_1 , 第一散射体到测量平面的距离定义为形成距离 L 。当入射质子束经过第一个散射体后, 在测量平面上得到类高斯的束流分布^[10], 因此第二个散射体为双环结构。其中内盘为高密度物质 Pb, 厚度为 d_2 , 外环是低密度物质 Al, 厚度为 d_3 。内盘半径为 a , 在测量平面上的投影为 A 。第一散射体到第二散射体的距离为 L_1 , 第二散射体到测量平面的距离为 L_2 。通过调节内盘、外环的厚度, 保证二者的能量损失一致, 可以在测量平面上得到均匀的束流分布。其中, 束流利用率定义为 $\eta = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R F(r) dr}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(r) dr}$, $F(r)$ 是双环双散射体的束流分布函数。束流分布的均匀性 $U = \pm \frac{1}{2} \frac{\max F(r) - \min F(r)}{\max F(r)}$ [11]。

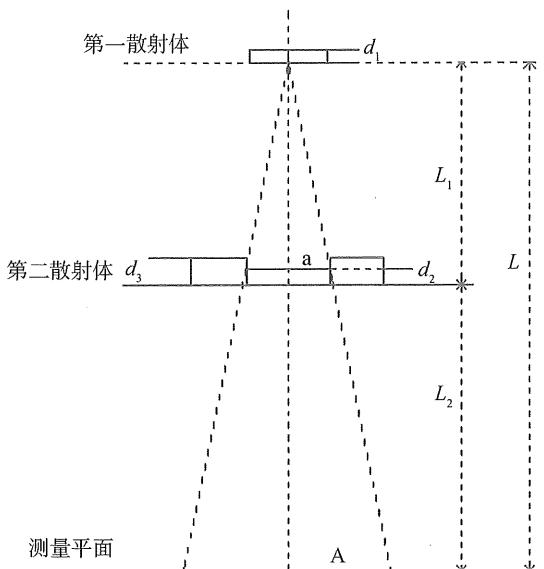


图 1 双环双散射体结构示意图

Fig. 1 Arrangement of scatterers of the dual-ring double scattering method

本文利用 Monte Carlo 多粒子模拟软件 Fluka2008. 3. 1^[9], 计算笔束 (忽略束流截面的大小) 经过双环双散射体系统在测量平面上的束流分布

特性。质子的截止能量设为 100 MeV, 计算分 5 个循环, 每个循环产生 1×10^7 , 可以保证统计误差小于 1%。

2 结果与讨论

2.1 束流的横向分布

为了计算质子经过双环双散射体系统后的束流横向分布特性, 入射质子能量设为 230 MeV, 其中 $a = 0.213 \text{ A}$, $L = 300 \text{ cm}$, $L_1 = 71 \text{ cm}$, $L_2 = 229 \text{ cm}$ 。表 1 是束流扩展半径与膜厚的关系, 其中 R 表示束流分布均匀性为 $\pm 2.5\%$ 时的束流扩展半径, η 表示束流扩展半径所对应的束流利用率。在相同束流扩展半径的条件下, 第一行的值是解析计算^[11]的结果, 第二行的值是 Fluka 模拟的结果。从表 1 的结果可以看出, 束流扩展半径随着散射膜厚度的增加而增大, 平均的能量损失也增大。Fluka 模拟的结果表示, 束流利用率先增大后减小, 最大值是 27%。这是由于散射膜越厚, 散射本领越强。同时膜厚的增大, 被吸收掉的质子也越多。

从表 1 中第一个散射膜的厚度可以看出, Fluka 模拟的结果小于解析计算的结果, 二者的差距随着膜厚的增加而增大。这是由于解析计算依据质子经过散射膜后分布为高斯型的假设, 这样物理图像比较清晰, 处理起来比较方便。但是随膜的增大, 高斯模型是不成立的。计算单膜散射法和阻止柱双散射体方法得到同样的结论^[10]。

表 1 双散射体厚度与束流扩展半径的关系

Tab. 1 The relationship between the thickness of scatterers and R

R/cm	d_3 /cm	d_2 /cm	d_1 /cm	Energy lost/MeV	η /%
15.0	3.09	1.14	0.62	44.8	
	3.09	1.14	0.43	39.26	23.12
12.5	2.2	0.81	0.44	31.9	
	2.2	0.81	0.34	28.26	24.26
10.0	1.46	0.53	0.29	21.0	
	1.46	0.53	0.24	18.68	25.6
7.5	0.85	0.31	0.17	12.3	
	0.85	0.31	0.14	10.87	26.88
5.0	0.4	0.15	0.08	5.8	
	0.4	0.15	0.07	5.1	27.08
2.5	0.11	0.04	0.02	1.6	
	0.11	0.04	0.02	1.4	26.98

2.2 形成距离的改变对横向束流分布的影响

根据表 1 中的输入参数 $d_1 = 0.07 \text{ cm}$, $d_2 = 0.15 \text{ cm}$, $d_3 = 0.4 \text{ cm}$, 分别改变形成距离为 200 cm, 250 cm, 300 cm, 350 cm, 400 cm, 450 cm, 500 cm, 计算得到测量平面上束流的横向分布, 并按最大值归一, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 形成距离的改变对束流分布均匀性的影响很大。只有 $L = 300 \text{ cm}$ 时, 束流宽展半径为 5 cm, 并满足束流

分布均匀性为 $\pm 2.5\%$ 的要求。

2.3 液体散射体取代固体散射体

双散射体方法获得束流分布的均匀性对束流中心线与第二个散射体的中心轴线是否一致非常敏感。当束流中心线与第二个散射体的中心轴线有 1 mm 的不吻合时, 则在测量平面上其束流分布会产生 $\pm 7\%$ 的非均匀度^[12]。余建国等^[11]提出用液体散射体代替固体散射体, 由于液体具有流动性, 只需要注入或吸出液体就能改变散射体厚度, 不需要更换散射体, 也不需要校准第二个散射体的中心位置。

表 2 是用 Hg 代替 Pb 做第一散射体和第二散射体的内盘材料, 外环分别用 Al、Br、 H_2O 做散射体材料, 计算得到的散射体厚度与束流扩展半径的关系。其中 ΔE_1 、 ΔE_2 、 ΔE_3 分别表示第一散射体、第二散射体内盘和外环的平均能量损失。从表 2 中 ΔE_2 、 ΔE_3 的值可以看出, Al 做第二散射体外环材料与内盘能量损失相差很小。因此, 在 Hg 做内盘材料时, Al 做外环材料是合适的。而 Br、 H_2O 做外环材料时, 与内盘的能量损失相差甚大, 在 Hg 做内盘材料时, Br、 H_2O 不适合做外环材料。计算结果说明, 用液体散射体取代固体散射体在理论上是可行的。

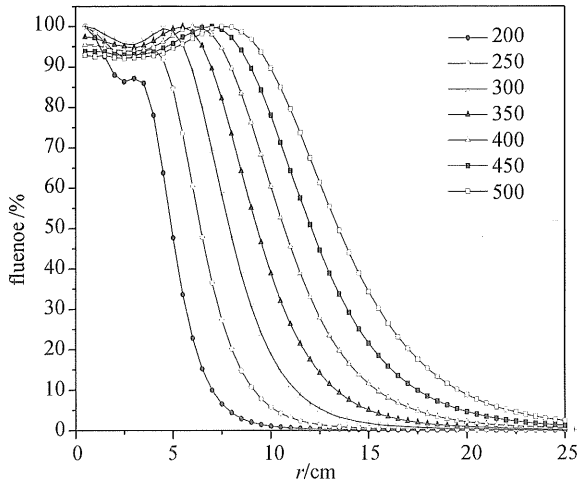


图 2 束流的横向分布

Fig. 2 The lateral distribution of beam

表 2 液体双散射体厚度与束流扩展半径的关系

Tab. 2 The relationship between the thickness of liquor scatterer and R

R/cm	d_1 /cm	d_2 /cm	material	d_3 /cm	ΔE_3 /MeV	ΔE_2 /MeV	ΔE_1 /MeV
15.0	0.36	0.95	Al	3.09	27.76		
			Br	1.3	10.81	28.21	10.35
			H_2O	12.6	56.18		
12.5	0.27	0.675	Al	2.2	19.59		
			Br	0.9	7.42	19.76	7.75
			H_2O	8.8	38.1		
10.0	0.2	0.44	Al	1.46	12.83		
			Br	1.46	4.88	12.75	5.69
			H_2O	1.46	25.87		
7.5	0.125	0.26	Al	0.85	7.38		
			Br	0.35	2.81	7.43	3.5
			H_2O	3.6	2.81		
5.0	0.059	0.126	Al	0.4	3.41		
			Br	0.17	1.32	3.54	1.6
			H_2O	1.73	7.08		
2.5	0.02	0.033	Al	0.11	0.87		
			Br	0.046	0.87	0.86	0.5
			H_2O	0.046	0.87		

2.4 与单膜散射法和阻止柱双散射法的比较

通过 Monte Carlo 计算, 得到单膜散射法的束流利用率为 5%^[10], 单阻止柱双散射体方法的束流利用率为 17%, 而双环双散射体方法的束流利用率为 27%。双环双散射体方法的束流利用率明显提高。单膜散射法通常用来扩展半径为 2 cm 以下的束流, 双散射体方法可以用来扩展半径为 10 cm 以下的束流, 是单膜散射法的 5 倍。双环双散射体方法的形成距离仅为 300 cm, 比单阻止柱双散射体方法小, 便于安装在转动机架架上。因此, 双环双散射体方法是被动散射体方法中比较好的方法。

3 结 论

利用 Monte Carlo 方法, 计算双环双散射体方法的束流分布。结果表明: 随着膜厚的增加, 由 Fluka 计算得到第一个散射体的厚度和平均能量损失与解析计算的结果相差越来越大。这种差别是由于解析计算过程中做了一些近似造成的。此外, 用液体散射体取代固体散射体在理论上是可行的。双环双散射体方法优于单膜散射法和挡光器双散射体方法。

参考文献:

- [1] FONTENOT J D, NEWHAUSER W D, TITT U. Design tools for proton therapy nozzles based on the double-scattering foil technique [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2005, 116: 211 - 215.
- [2] SMITH A R. Proton therapy [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51: R491 - R504.
- [3] JONES D T L, SCHREUDER A N, SYMONS J E, et al. Proton therapy at iThemba LABS [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2004, 71: 983 - 984.
- [4] POLF J C, HARVEY M C, TITT U, et al. Initial beam size study for passive scatter proton therapy I. Monte carlo verification [J]. *Medical Physics*, 2007, 34: 4213 - 4218.
- [5] POLF J C, HARVEY M C, SMITH A R, et al. Initial beam size study for passive scatter proton therapy II. Changes in delivered depth dose profiles [J]. *Medical Physics*, 2007, 34: 4219 - 4222.
- [6] HERAULT J, IBORRA N, SERRANO B, et al. Monte Carlo simulation of a proton therapy platform devoted to ocular melanoma [J]. *Medical Physics*, 2005, 32: 910 - 919.
- [7] KOEHLER A M, SCHNEIDER R J, SISTERTSON J M. Flattening of proton dose distributions for large-field radiotherapy [J]. *Medical Physics*, 1977, 4: 297 - 301.
- [8] TAKADA Y. Dual-ring double scattering method for proton beam spreading [J]. *Japan Journal Applied Physics*, 1994, 33: 353 - 359.
- [9] FERRARI A, SALA P R, FASSO A, et al. A multi-particle transport code Fluka [M]. CERN European Organization for Nuclear Research, 2005.
- [10] 鞠志萍, 曹午飞, 刘小伟. 质子散射角分布的蒙特卡罗模拟 [J]. *物理学报*, 2009, 58: 174 - 177.
- [11] 余建国, 郁庆长. 质子治疗装置的束流扩展研究 [J]. *高能物理与核物理*, 1997, 21: 851 - 859.
- [12] 郁庆长, 罗正明. 质子治疗技术基础 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 100 - 103.
- [17] YANG S, HO C, LEE C. HBP: improvement in BP algorithm for an adaptive MLP decision feedback equalizer [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2006, 53 (3): 240 - 244.
- [18] 张雨浓, 陈扬文, 刘巍, 等. 改造前向神经网络结构以求网络权值直接确定——Jacobi 正交基神经网络实例 [J]. *自动化与信息工程*, 2008, 29(1): 1 - 5.
- [19] ZHANG Y, LI W, YI C, et al. A weights-directly-determined simple neural network for nonlinear system identification [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2008: 455 - 460.
- [20] 张雨浓, 刘巍, 易称福, 等. Legendre 正交基前向神经网络的权值直接确定法 [J]. *大连海事大学学报*, 2008, 34 (1): 32 - 36.
- [21] 邹阿金, 张雨浓. 基函数神经网络及应用 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2009.
- [22] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [23] WANG J. Recurrent neural networks for computing pseudoinverses of rank-deficient matrices [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1997, 18(5): 1479 - 1493.

(上接第 7 页)