

束流在270°偏转磁铁系统输运过程中的损失计算

李泉凤¹⁾ 孔巢城 郭冰琪 邢庆子

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 为计算医用加速器中束流经过270°偏转磁铁系统电子损失所造成的辐射剂量问题,将束流传输相应的计算公式和蒙特卡罗抽样方法相结合,在一阶近似条件下计算了电子在偏转系统中的输运过程,分析了不同初始条件对电子输运和电子损失的影响;模拟结果表明能散是产生电子损失的主要因素之一.计算得到了损失电子所处位置、能量和飞行方向等信息,把计算得到的信息作为蒙特卡罗程序的输入源,进一步计算出束流损失所产生的辐射剂量分布,从而能更完善地设计医用加速器照射头的屏蔽.文中给出在电子束初始半径为1mm、散角为5mrad、能散为10%条件下电子损失率为13.5%,损失电子主要是向加速器照射头部上方辐射出去.

关键词 270°偏转磁铁 束流输运 电子损失 蒙特卡罗抽样方法 运动轨迹跟踪

1 引言

医用驻波直线加速器能散较大,因此双聚焦、消色散的270°偏转磁铁系统在中高能医用加速器中是必不可少的重要部件.由于色散影响,电子在磁铁输运过程横向会散开;当色散过大时,则会发生电子碰到真空盒壁而损失的情况.根据计算和实际调机过程表明,电子的最大损失率可达到20%以上^[1, 2].损失的电子会打到真空盒壁或磁铁上,由于韧致辐射效应,产生大量的X射线,造成治疗主束外辐射剂量过大^[3].医用加速器辐射安全要求非主束方向X射线漏剂量率不得超过主束方向X射线最大吸收剂量率的0.1%^[4],因此,中、高能医用加速器照射头的屏蔽,必须同时考虑电子束打靶所产生的漏剂量率和经270°偏转磁铁系统束流损失所造成的辐射剂量影响.要计算束流损失引起的辐射剂量,关键是计算经270°偏转磁铁系统电子损失的具体状况,然而通用的束流输运计算软件无法确定损失电子的位置及方向等信息.本文采用蒙特卡罗抽样方法^[5, 6]确定输入电子束信息,用MATLAB编写程序跟踪每个电子在磁铁中的输运过程,可详细记录电子损失的位置与方向以及能量等

信息,这些信息可以直接应用于模拟程序以计算束流损失所产生的辐射剂量分布,从而能更完善地设计医用加速器照射头的屏蔽.下文将分别叙述处理问题的公式及方法,并给出不同初始条件下电子束流输运与损失状况的相应结果,为下步计算损失电子产生的辐射问题做好数据准备.

文中采用的这种方法同样适用于计算其他类型束流传输系统中的束流损失问题,以及损失电子产生的辐射问题.

2 电子束在270°偏转磁铁系统中的输运计算

2.1 电子束在270°偏转磁铁系统中的传输矩阵公式与初始电子束模型的蒙特卡罗抽样方法

2.1.1 270°偏转磁铁系统

实际计算的270°偏转磁铁系统^[7]如图1所示,其中 $\theta_1 = \theta_3 = 110^\circ$,场梯度 $n_1 = n_3 = 0$, $\theta_2 = 50^\circ$, $n_2 = -0.905$.

2006-11-01 收稿

1) E-mail: liquanfeng@tsinghua.edu.cn

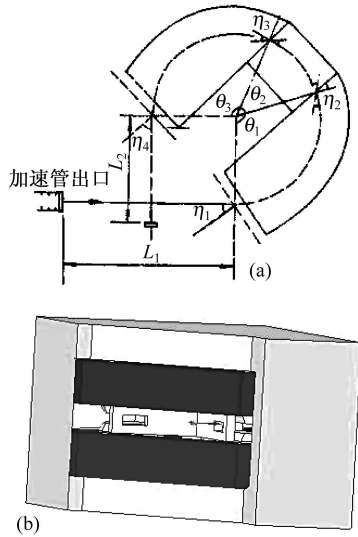


图1 270°偏转磁铁布局
(a) 磁极尺寸示意图; (b) 总体布局图.

2.1.2 电子束在270°偏转系统的传输计算公式

根据束流传输原理和相应的漂移空间、偏转磁铁、及边缘旋转角等元件的传输矩阵^[8], 可以给出电子束在如图1所示的270°偏转磁铁系统总的一阶束流传输矩阵公式. 下面仅给出 x 方向的传输矩阵.

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\rho_0} \tan \beta_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_x \phi_3 & \varepsilon_x^{-1} \rho_0 \sin \varepsilon_x \phi_3 & \rho_0 \varepsilon_x^{-2} (1 - \cos \varepsilon_x \phi_3) \\ -\frac{\varepsilon_x}{\rho_0} \sin \varepsilon_x \phi_3 & \cos \varepsilon_x \phi_3 & \varepsilon_x^{-1} \sin \varepsilon_x \phi_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_x \phi_2 & \varepsilon_x^{-1} \rho_0 \sin \varepsilon_x \phi_2 & \rho_0 \varepsilon_x^{-2} (1 - \cos \varepsilon_x \phi_2) \\ -\frac{\varepsilon_x}{\rho_0} \sin \varepsilon_x \phi_2 & \cos \varepsilon_x \phi_2 & \varepsilon_x^{-1} \sin \varepsilon_x \phi_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_x \phi_1 & \varepsilon_x^{-1} \rho_0 \sin \varepsilon_x \phi_1 & \rho_0 \varepsilon_x^{-2} (1 - \cos \varepsilon_x \phi_1) \\ -\frac{\varepsilon_x}{\rho_0} \sin \varepsilon_x \phi_1 & \cos \varepsilon_x \phi_1 & \varepsilon_x^{-1} \sin \varepsilon_x \phi_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\rho_0} \tan \alpha_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ \delta_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ 为动量分散, α , β 为边缘角, $\varepsilon_x = (1-n)^{1/2}$, ϕ 为偏转角, ρ_0 为偏转半径, L_1 , L_2 分别为漂移空间, x_0 , x'_0 分别为 x 方向的初始位移与散角. 由上述方程可得到在270°偏转磁铁系统中任意位置处 x 方向的偏移、散角和 δ . 将上述公式用MATLAB编成程序, 跟踪不

同初始状态下电子运动轨迹状态. 初始电子状态用蒙特卡罗方法抽样得到, 计算中假设电子初始状态(位置、散角和能量)为均匀分布, 计算程序的流程图如图2所示.

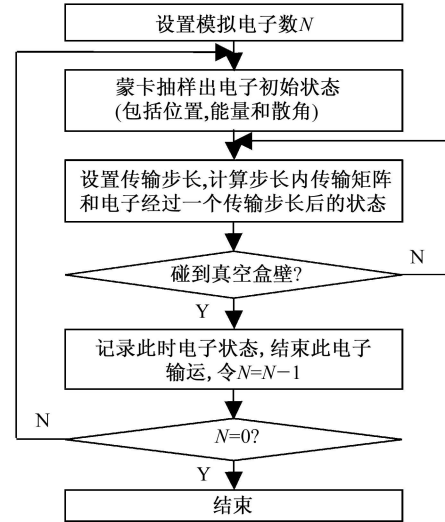


图2 粒子运输程序流程图

2.1.3 电子束初始条件的模型

电子束的初始条件, 能散等会影响束流在真空盒中的电子损失情况. 计算中假设束流中心能量为 E_0 , 能散为 $\Delta E/E_0$. 束斑内电子均匀分布, 且具有均一的散角.

2.2 不同初始条件下电子在270°偏转磁铁系统中的输运及丢失状况分析

假定传输系统中真空盒的内壁和外壁是两个不同同心圆, 外壁与电子标准轨道的距离为8mm, 而内壁与标准轨道的距离随位置不同而不同, 最小距离为8.5mm. 在此条件下, 利用束流传输相应的计算公式与蒙特卡罗抽样方法相结合的方法, 模拟计算不同初始状态下电子在磁铁系统中的运动轨迹, 分别在图3—6中给出, 图中上下两条线代表真空盒壁距离理想轨道的距离, 电子轨迹和此线相交即表示碰到真空盒壁而损失. 图3给出了电子在270°偏转磁铁中输运时, 当入射电子束斑直径变化, x , y 方向上偏离理想轨道的运动轨迹, 计算中假定初始散角为5mrad、能散为5%.

从图3中可看出束半径对 x 方向电子轨迹影响不大, 而对 y 方向运动轨迹影响较大, 在散角为5mrad、能散5%时, 半径大于2mm后开始有电子丢失现象. 图4给出初始散角变化对电子轨迹的影响, 计算中假定初始束流半径为1mm, 能散为5%.

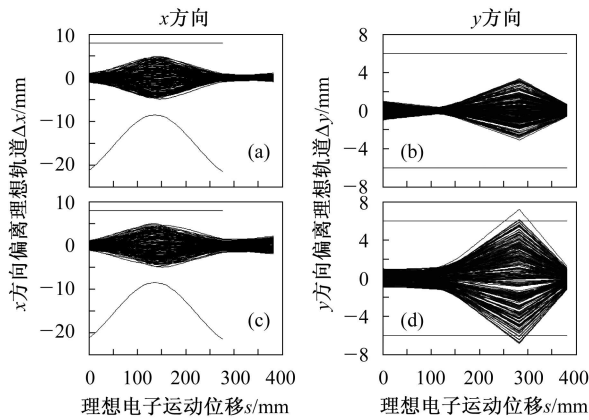


图 3 不同初始半径电子运动轨迹
(a), (b) 半径 1mm, 散角 5mrad, 能散 5%; (c), (d) 半径 2mm, 散角 5mrad, 能散 5%.

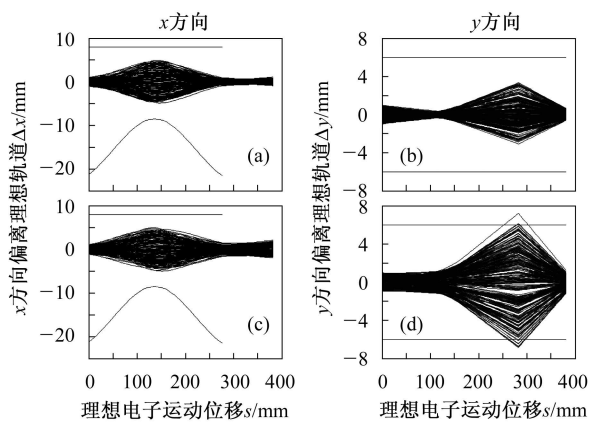


图 4 不同初始散角电子运动轨迹
(a), (b) 半径 1mm, 散角 3mrad, 能散 5%; (c), (d) 半径 1mm, 散角 10mrad, 能散 5%.

由图 4 中看出, 散角变化对 x 方向电子轨迹影响不大, 对 y 方向电子轨迹影响较大, 在束半径 1mm、能散 5% 时, 散角大于 10mrad 后开始有电子丢失现象. 图 5 给出入射电子束初始能散不同时的电子轨迹, 计算中假定初始束半径为 1mm, 散角为 5mrad.

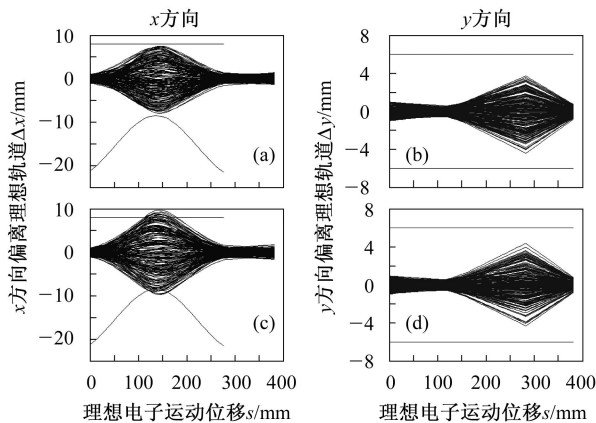


图 5 不同初始能散半径电子运动轨迹
(a), (b) 半径 1mm, 散角 5mrad, 能散 8%; (c), (d) 半径 1mm, 散角 5mrad, 能散 10%.

由图 5 中可以看出能散变化对 x 方向的束流包络影响较大, 对 y 方向影响不大. 能散是引起束流损失的主要因素, 能散大于 8% 开始有电子丢失现象, 能散为 10% 时丢失严重, 统计表明半径为 1mm, 散角为 5mrad, 能散为 10% 时损失电子达 13.5%. 由于加速器的束流进入磁铁入口不可能正好进入理想轨道上, 磁铁边缘场效应也会导致电子轨迹偏离理想轨道^[1]. 图 6 给出了半径为 1mm, 散角为 5mrad, 能散 8% 的束流入射偏离理想轨道时对电子的运输的影响.

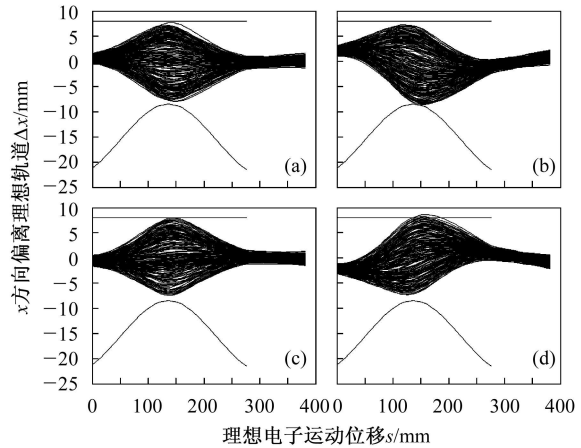


图 6 电子束中心入射偏离理想轨道的运动轨迹
(a) 入射偏离 $\Delta x = 0.5\text{mm}$; (b) 入射偏离 $\Delta x = 2\text{mm}$;
(c) 入射偏离 $\Delta x = -0.5\text{mm}$; (d) 入射偏离 $\Delta x = -2.5\text{mm}$.

从图 6 中可看出, 入射偏离理想轨道时也会引起束包络变化, 而导致电子碰到真空盒壁而丢失.

3 束流在 270° 偏转磁铁运输过程中损失的电子信息

根据上面的计算与分析, 电子束初始条件的变化及中心入射偏离理想轨道的运动都会产生束流损失, 能散是产生电子损失的主要因素. 为计算加速器头部束流损失产生的辐射剂量, 除了损失电子数量外, 还必须得到损失电子的能量、位置和运动方向等信息. 下面仅给出束流初始条件为束半径 1mm, 散角 5mrad, 能散 10% 时, 损失电子轨迹跟踪与统计计算的结果, 如图 7 所示.

图 7(a), (b) 表明, 多数损失电子的位置处在 $\Delta x = \pm 0.8\text{cm}$ 处, 即轰击在真空盒外壁及内壁距离标准轨道最小位置上, 图 7(c)—(f) 给出了损失电子

的飞行方向. 为了计算辐射剂量时与蒙特卡罗程序 MCNP 相配合, 电子飞行方向用方向余弦表示. 从图 7(c)—(f) 中可看出, 损失电子主要飞行方向 y 向的方向余弦在 -0.7 到 -1 之间, 即是与 y 轴成 135° 至 180°

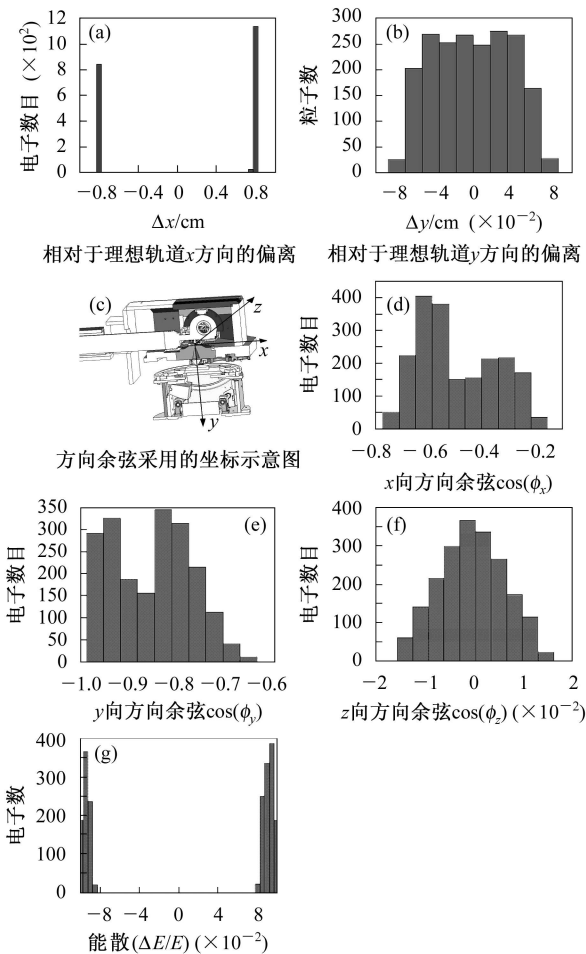


图 7 损失电子统计信息(统计2000个损失的电子)
(a),(b) 损失电子的坐标统计; (c)—(f) 损失电子的飞行方向; (g) 损失电子的能散($\Delta E/E$).

之间, 就是说电子主要向加速器照射头部上方飞去. 图 7(g) 中看出损失电子的能散大于 8%. 在图 8 中可形象地看到损失电子打到真空盒内外壁的情况.

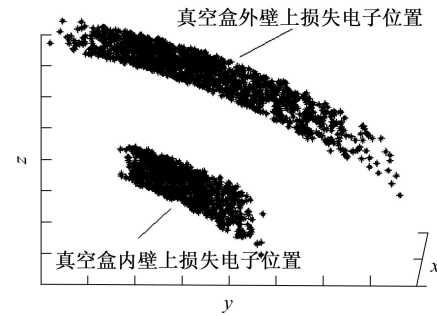


图 8 损失电子位置在真空盒上状况

4 小结

为了准确计算束流损失在医用加速器照射头部损失的电子, 本文分析计算了初始束流不同的束半径、散角、能散和入射偏离理想轨中心对电子输运过程和电子损失的影响, 模拟结果表明能散是产生电子损失的主要因素. 计算所得到的结果, 为进一步计算损失电子产生的辐射剂量及分布做好了数据准备, 可直接与蒙特卡罗 MCNP 程序相配合, 计算损失电子产生的辐射剂量分布, 可用于医用加速器照射头部的屏蔽设计. 计算给出束流初始半径 1mm, 散角 5mrad, 能散 10% 条件下电子损失率为 13.5%, 能量低的电子主要碰到真空盒内壁, 能量高的电子主要碰到真空盒外壁而损失, 损失电子主要向加速器照射头部上方辐射出去. 文中模拟计算所采用的方法为研究在束流传输系统中的电子损失问题以及损失电子产生的辐射问题提供了一种有效的手段.

参考文献(References)

- 1 WU Pin, LI Quan-Feng. J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.), 2000, **40**(10): 24—27 (in Chinese)
(吴频, 李泉凤. 清华大学学报, 2000, **40**(10): 24—27)
- 2 FANG Chun-Jiang. Application of Monte-Carlo Method in Medical Accelerator and Industrial CT. Master Dissertation of Tsinghua Univ., 2003 (in Chinese)
(方春江. 蒙特卡罗方法在医用加速器及工业CT中的应用[硕士学位论文]. 北京: 清华大学工程物理系, 2003)
- 3 GU Ben-Guang. Medical Accelerators. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
(顾本广. 医用加速器. 北京: 科学出版社, 2003)
- 4 GB 16369-1996 Radiological Health Standard for the Medical Electron Accelerators, 1996 (in Chinese)
(GB 16369-1996 医用电子加速器放射卫生防护标准, 1996)
- 5 XU Shu-Yan. Application of Monte-Carlo Method in Experimental Nuclear Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1996 (in Chinese)
(许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用. 北京: 原子能出版社, 1996)
- 6 PEI Lu-Cheng, WANG Zhong-Qi. Monte-Carlo Method and Its Applications. Beijing: Ocean Press, 1998 (in Chinese)
(裴鹿成, 王仲奇. 蒙特卡罗方法及其应用. 北京: 海洋出版社, 1998)
- 7 KONG Chao-Cheng. Radiation Physics Problem Calculation and Research of Electron Linear Accelerator. Master Dissertation of Tsinghua Univ., 2006 (in Chinese)
(孔巢城. 电子直线加速器中相关辐射物理问题的研究计算[硕

士学位论文]. 北京: 清华大学工程物理系, 2006)
8 XIA Hui-Qin, LIU Chun-Liang. Principles of the Beam
Transportation. Xi'an Jiaotong Univ. Press, 1991. 101—

125 (in Chinese)
(夏慧琴, 刘纯亮. 束流传输原理. 西安交通大学出版社, 1991.
101—125)

Calculation of the Beam Loss in the 270° Bending Magnet System of the Medical Accelerator

LI Quan-Feng¹⁾ KONG Chao-Cheng GUO Bing-Qi XING Qing-Zi

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The transportation process of the electron beam in the 270° bending magnet system of the medical accelerator is studied under the one-order approximation, and the influence of the initial condition to the beam transportation and loss is analyzed for the calculation of the radiation dose. The theory of the beam transportation, combined with the Monte Carlo sampling method is applied. The simulation result shows that the energy spread is the main factor resulted in the beam loss. The data on the position, energy and direction of the lost electrons obtained through the simulation can be supplied as input to deal with the radiation problem. The result gives that the loss rate of the electron beam is 13.5%, and the direction of the main loss is toward the upside of the irradiating head of the accelerator with the radius 1mm, angle spread 5mrad, and energy spread 10% of the initial beam.

Key words 270° bending magnet system, beam transportation, electron loss, Monte Carlo sampling method, tracing of the movement