

用 EGS4 分析 9 MeV 行波直线 加速器屏蔽系统

李泉凤 邹开颜

(清华大学工程物理系, 北京, 100084)

采用了国际上广泛使用的 Monte Carlo 模拟计算程序 EGS4 对海关集装箱检测系统用加速器屏蔽系统进行了辐射模拟分析, 与实际测试数据进行分析、比较, 解释了特殊剂量分布的原因, 提出了系统改进的参考方案。

关键词 EGS4 屏蔽系统 准直锥 漂移聚焦段

中图法分类号 TL 53

随着加速器的广泛应用, 要求对辐射物理问题有全面、清晰的了解。用解析法和经验公式法已满足不了这一需要。由于计算机的发展, Monte Carlo 法(随机抽样方法)提供了良好地模拟计算的理论工具。

EGS4 (Electron Gamma Shower, Version 4.0) 是模拟辐射物理问题进行屏蔽计算的通用程序。利用它对海关集装箱检测系统的加速器屏蔽与准直系统进行模拟计算, 对辐射剂量分布的数据进行分析、比较, 提出改进方案。

1 EGS4 程序

EGS4^[1]是由美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)、日本高能物理国家实验室(KEK)和加拿大国家研究所(NRCC)联合推出的一套模拟电子和光子在物质中输运过程的通用MC计算程序系统, 它揭示了电子和光子在物质中的输运规律, 提供了理论分析和模拟研究的工具。该程序具有通用性、灵活性, 被广泛应用于高能、低能物理和医学物理。由于其可靠程度高, 被直接用于实验对照, 同时在计算时模拟大量粒子, 使其统计误差小于3%。

EGS4 程序系统由 PEGS4 (Preprocessor for EGS4) 和 EGS4 两部分组成。PEGS4 用来生成 EGS4 所需要的关于介质的数据文件, 它单独执行。

用 EGS4 进行模拟计算, 要编写 1 个主程序(MAN)、1 个几何关系处理子程序(HOW-FAR)和 1 个记录结果子程序(AUSGAB)。在主程序中首先对一些变量进行必要的初始化和一些其他操作, 然后调用 EGS4 系统子程序(HATCH), 从介质数据文件中读取截面数据和必

要的参数,并作必要的处理,最后再调用 EGS4 的粒子跟踪程序(SHOW ER),完成 1 个或多个粒子历程的跟踪,在 SHOW ER 的执行过程中,EGS4 频繁调用用户写的 HOW FAR 和 AUS-GAB 子程序以完成粒子空间几何关系的处理和结果的记录。

2 9MeV 行波直线加速器屏蔽系统

2.1 9MeV 行波直线加速器系统

9MeV 行波直线加速器是海关大型货物快速检测系统的一部分。海关货物检测系统主要包括产生强穿透本领的高能 X 射线源、高分辨率大型 X 射线阵列探测器及图像处理系统 3 部分。直线加速器用于加速电子打靶产生韧致辐射,X 射线束被准直器准直成薄的扇面状。为了使加速器打靶束流形成小束斑,加速器主要由 5 部分组成:电子枪、加速管、漂移聚焦段、靶室和屏蔽系统。各部分相对位置示于图 1,其中,后两部分在 z 方向实际上是重叠的。

2.2 屏蔽系统与准直锥的设计

为了配合阵列探测器和图像系统工作,要求束流靶点为小束斑,打靶后射线要进行准直和屏蔽。为此,在加速器尾部加上了漂移聚焦系统,屏蔽系统与漂移聚焦的具体结构示于图 2。设图中靶处为原点,x、y 分别表示屏蔽层在此坐标中的位置, D_v 表示铅罩真实厚度, θ 为粒子出射方向与 z 轴的夹角。

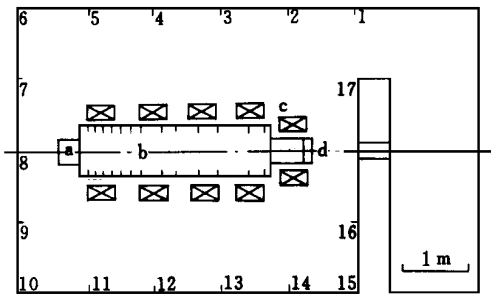


图 1 加速器部件相对位置示意图

Fig 1 Schematic illustrating of components position of accelerator

a——电子枪; b——加速管;
c——漂移聚焦段; d——钨靶

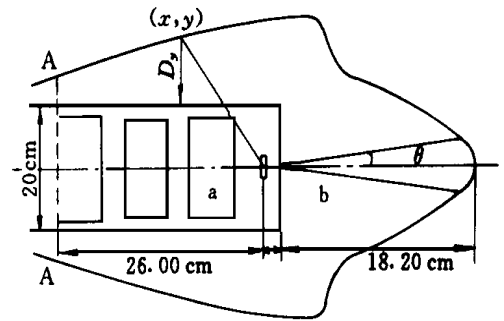


图 2 屏蔽系统简图

Fig 2 Scheme of shielding system

a——四极透镜; b——铅罩
A-A——实际屏蔽的位置

(1) 设计要求

1) 束流能量为 9MeV,打靶流强为 150mA,轰击重金属钨靶,X 射线剂量率大于 $40 \text{ Gy} \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 2) 准直锥全角 30° ; 3) 从防护设计的具体要求,以及保证无干扰的信号和清晰的图像,在 X 射线的非应用方向,即准直锥以外的方向,X 射线的剂量率应为 0 方向的 1/1000。根据经验公式和查曲线^[2],可以算得各特征方向

表 1 屏蔽层特征方向厚度坐标

Table 1 The thickness of the shielding in different angles

$\theta/^\circ$	x/cm	y/cm	D_v/cm
0	19.70	0.0	
15	17.48	4.68	
90	0.00	21.58	11.58
120	- 11.47	19.86	9.86
149	- 26.00	15.95	5.95

的屏蔽层厚度。设计结果列于表 1。

(2) 实际测量结果

按上述要求设计的屏蔽系统,在加速器正常工作、出束状态下,进行了 X 射线的剂量分布测量,相应于图 1 中所示位号 1—17,测得的 X 射线剂量分布分别为 75.24、107.31、75.24、68.01、57.62、38.79、46.33、242.81、43.85、50.85、47.24、63.95、120.41、107.76、81.11、161.96、227.45 mGy (测量时间为 30 min,距靶 1 m 处加速器输出剂量率为 38.386 Gy/m in)。

结合实际测量结果,根据图 1,输出剂量率和各区的剂量分布基本满足设计要求。但在漂移聚焦段处,剂量率比别处明显偏大。这可能是后向的屏蔽层厚度不够,也可能是漂移段粒子损失产生了额外韧致辐射谱。用经验公式显然已无法研究此问题。为此,研究了在漂移段是否有粒子损失的情况。

3 电子束流输运分析

从加速管出口到四极透镜有一漂移段,经过聚焦成小束斑,在聚束过程中束流可能丢失,打在壁上产生韧致辐射剂量,有必要对这段的电子运动进行模拟,看是否需对屏蔽提出要求。

在四极透镜和自由漂移空间中,带电粒子在 x 、 y 方向上的运动可表示为:

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = R_x \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = R_y \begin{pmatrix} y_0 \\ y_0' \end{pmatrix}, R_x, R_y \text{ 是传输矩阵}^{[3]}。$$

由以上各传输矩阵,只要知道 z_0 处粒子的 x_0, x_0', y_0, y_0' , 就可算出 z 处粒子的横向位置和散角。利用 LNE-ACC/PC^[4] 程序给出电子束的半包络初始高度 r_{0x}, r_0 。束流束心 r 和 r' 都服从高斯分布。知道分布函数和粒子的 r_0, r_0' , 用 Monte Carlo 法来模拟电子束的初始情况,再利用传输矩阵法,可给出距漂移聚焦段入口不同距离 l 处的电子束的运动情况。结果示于图 3。

由图 3 数据可知,在漂移聚焦段中粒子主要在 $l = 12—18$ cm 之间丢失,丢失率为 5%。在四极透镜的位置上,粒子主要在第 1 和第 2 透镜之间丢失,与测量结果的 (2) 区、(14) 区基本吻合。反常剂量率可能是此处产生的额外 X 射线所致。

4 应用 EGS4 进行模拟计算与测试数据对比分析

4.1 原有屏蔽系统的模拟计算

实际屏蔽铅罩的几何模型结构示于图 4。

图 4 中 1—14 号直线坐标分别是: $z_1 = 0.0$ cm, $z_2 = 4.0$ cm, $z_3 = 10.0$ cm, $z_4 = 12.5$ cm, $z_5 = 22.5$ cm, $z_6 = 23.15$ cm, $z_7 = 25$ cm, $z_8 = 25.35$ cm, $z_9 = 25.45$ cm, $z_{10} = 27$ cm, $z_{11} = 31$ cm, $z_{12} = 31.5$ cm, $z_{13} = 37$ cm, $z_{14} = 45$ cm; a—j 号圆柱半径分别为: $r_a = 0.5$ cm, $r_b = 2.5$ cm, $r_c = 3$ cm, $r_d = 5$ cm, $r_e = 10$ cm, $r_f = 14$ cm, $r_g = 15.5$ cm, $r_h = 18$ cm, $r_i = 20$ cm, $r_j = 21.6$ cm。

只考虑屏蔽系统对粒子剂量率的影响,模拟在屏蔽范围内粒子与物质的相互作用,忽略不在此范围内的加速管的反射等影响,把粒子未到达屏蔽区前的区域整个认为是 (1) 区,其余 (2)—(155) 区的定义示于图 4。

入射条件:束斑直径为 2 mm,粒子为高斯分布;总能量 $E = 9.511$ MeV;平行 z 轴入射。

利用 EGS4 模拟粒子在屏蔽系统中的运动,记录光子在各区的能量和相对概率密度,可以求得工作区的剂量率、非工作区的相对剂量率以及光子与能量、角度、半径的关系。计算结果

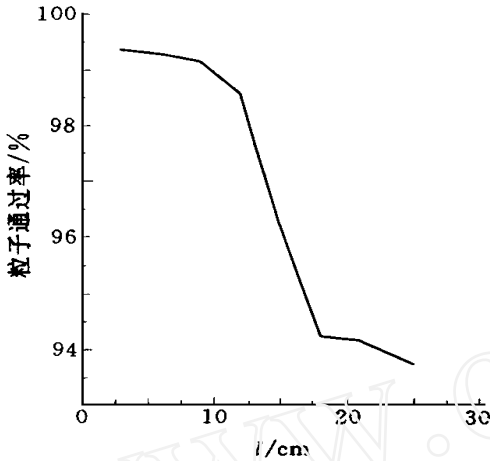


图3 漂移聚焦段位置与粒子丢失率的关系

Fig 3 The relationship between the loss of particles and the distance

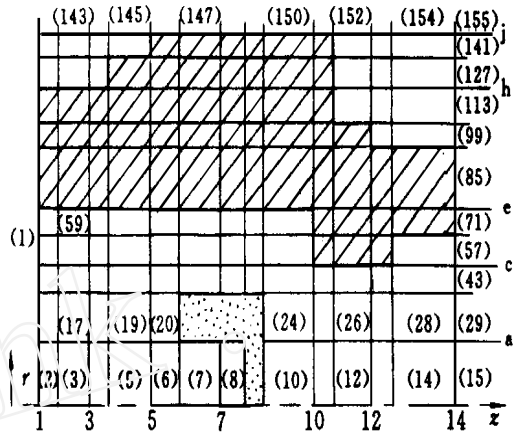


图4 屏蔽系统的几何模型

Fig 4 Geometry model of shielding system
——Pb; ——Cu; ——W

为: 在 0 方向, 距靶 1 m 处, 剂量率 $D = 40.13 \text{ Gy}$ 。图 4 所示 (15)、(71)、(85)、(99)、(113)、(127)、(141)、(142)、(143)、(144)、(145)、(146)、(147)、(150)、(151)、(153)、(154) 各非应用区的相对剂量率分别为 100.0000 %、3.8390 %、0.0327 %、0.0101 %、0.0064 %、0.0062 %、0.0045 %、0.0169 %、0.0187 %、0.0212 %、0.0569 %、0.3083 %、0.1797 %、0.1033 %、0.0773 %、0.1022 %、0.0462 %。

从以上数据可看出, 粒子出射方向与 z 轴的夹角 θ 约为 90° 时, 对 X 射线的屏蔽没有达到 $1/1000$ 。其中 (71) 区在几何模型中没有考虑在 y 轴方向铅块的屏蔽, 实际上, 铅块在 y 轴只开了 1 个 10 mm 的狭缝, (71) 区可达到屏蔽的要求。所以, 整个系统有待改进。

4.2 漂移聚焦段粒子丢失对辐射的影响

假定 5 % 丢失的粒子都从 (59) 区入射到管壁上, 入射角从 $0^\circ - 90^\circ$ 随机分布。则这 5 % 粒子在 (142)、(143)、(144)、(145) 区产生的额外剂量率分别为: 0.0664 %、0.0870 %、0.170 %、0.0137 %。可以看到, 丢失的粒子在漂移聚焦段确实产生了较大的剂量率, 解释了 (2) 区、(14) 区的反常剂量率分布。

4.3 准直锥的重新设计

从以上数据可看出, 在光子与入射电子的倾角较大时, 屏蔽略显不够, 应考虑漂移聚焦段粒子丢失对辐射剂量的贡献, 用 EGS4 重新设计参数。

尺寸改为: $r_j = 22.8 \text{ cm}$, $r_h = 19 \text{ cm}$ 。

在电子入射方向, 距靶 1 m 处, 粒子剂量率 $D = 45.150 \text{ Gy}$ 。

其余各区剂量分布示于表 2 (包括 5 % 丢失粒子产生的剂量率)。由表 2 看出, 改进后的屏蔽系统能更好地满足要求。

表 2 改进后的各非应用区的剂量分布

Table 2 The distribution of dose in the unapplied zones after improving

区域	相对剂量率/%	区域	相对剂量率/%
(15)	100.0000	(144)	0.0987
(71)	3.2670	(145)	0.0400
(85)	0.0236	(147)	0.0880
(99)	0.0024	(150)	0.0957
(127)	0.0038	(151)	0.0419
(141)	0.0039	(153)	0.0273
(142)	0.0481	(154)	0.0325
(143)	0.0779		

本工作主要计算屏蔽系统对剂量分布的影响,但由于辐射剂量的实际分布还受到各种仪器、墙壁等反散射的影响,所以与计算结果不完全相符合,进一步的工作还有待以后完成。

5 结论

EGS4 不受材料、几何结构的限制,且全面考虑电子的多次散射、二次电子产生等物理过程,对辐射的研究可以给出全面、精确的解,同时利用不同辅助程序包,可直观给出韧致辐射谱图,是研究屏蔽问题的 1 个良好、方便的理论工具。

参 考 文 献

- 1 Nelson WR, Bielajew AF, Rogers DWO, et al The EGS4 Code System. SLAC-report-265. Stanford University: SLAC. 1985
- 2 NCRP-report-No 51. Washington DC20014 1977. 91
- 3 魏开焜 带电束流传输理论 北京: 科学出版社, 1986 20
- 4 汪富生 Line-ACC/PC 程序 清华大学工程物理系资料 1994

USING EGS4 TO ANALYZE THE SHIELDING SYSTEM OF 9M eV TRAVELLING WAVE LINEAR ACCELERATOR

Li Quanfeng Zou Kaiyan

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

ABSTRACT

EGS4 code, a general known Monte Carlo computer simulation package, is introduced in this paper. The application of EGS4 to simulate the radiation dose distribution of the accelerator shielding system for a large object radiation inspecting system (LORIS) is described in the paper. The results obtained by EGS4 are compared with the experiment. Explanation of exceptional dose distribution is given. A new design feature is presented.

Key words EGS4 Shielding system Collimator Drift-focused section