

# 基于束流线源模型自由电子激光器主体墙的屏蔽设计

徐玉海 夏晓彬 王光宏 徐加强  
(中国科学院上海应用物理研究所 张江园区 上海 201204)

**摘要** 在建的大连自由电子激光(Dalian Coherent Light Source, DCLS)是我国第一个开工建设的四代光源,也将是全球唯一可调波极紫外自由电子激光器。本文采用蒙特卡罗程序 FLUKA,建立了电子束流线源均匀模型(均匀电子固定角度发射),对 DCLS 注入器段的主体墙厚度做了屏蔽设计,计算中引入方差减小技巧,以降低计算结果的统计误差;并将基于束流线源模型的蒙特卡罗计算结果与基于经验公式的 Shiled11 软件的计算结果做了比较。结果表明,基于束流线源模型的蒙特卡罗计算结果与基于经验公式的 Shiled11 软件的计算结果吻合较好;主体墙外的剂量主要是由中子贡献,95%以上的中子剂量是由巨共振中子贡献。因此,基于电子束流线源模型的蒙特卡罗方法适用于电子直线加速器的主体墙的横向屏蔽设计。

**关键词** FLUKA, Shiled11, 束流线源模型, 屏蔽设计, 大连自由电子激光(Dalian Coherent Light Source, DCLS)  
**中图分类号** TL508 **DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.060101

自由电子激光以其波长连续可调、峰值功率和平均功率高、频谱范围广、相干性好、偏振强等特点,成为现代科学研究越来越重要的工具。德国的 FLASH 软 X 射线自由电子激光、美国 SLAC 的 LCLS 硬 X 射线自由电子激光、日本的 SACLA 硬 X 射线自由电子激光分别于 2006 年、2009 年、2011 年顺利完成建设、安装及调试工作,标志着激光领域迎来了“四代光源时代”<sup>[1]</sup>。2012 年 1 月,中国科学院上海应用物理研究所自由电子激光研究团队在国际上率先实现 HGHG 自由电子激光大范围波长连续可调<sup>[2]</sup>。2012 年 3 月 12 日,总预算达 1.4 亿元的国家重大科研仪器设备专项“基于可调极紫外相干光源的综合实验研究装置”在大连正式启动<sup>[3]</sup>。中国科学院上海应用物理研究所是主要承建方。大连自由电子激光(Dalian Coherent Light Source, DCLS)将成为国际上唯一一套工作在 50–150 nm 区间且波长可调的全相干高亮度的自由电子激光器。DCLS 直线加速器主要参数为:束流标高 1.3 m;最高重复频率 50 Hz;标称电荷量 0.5 nC;最高电荷量 1 nC;标称能量 0.3 GeV;最高能量 0.4 GeV。

DCLS 装置主体结构包括注入器段、主加速器段、波荡器段、诊断光束线站。电子在各区段输运时,电子的空间电荷效应会增大束流的发散度,偏

离束流中心而形成束晕粒子,束晕粒子在振幅很大时,很容易丢失在器壁上,引起束流损失;在脉冲运行模式下,瞬态束流负载效应也会引起粒子丢失;束流准直误差也会引起束流损失。束流损失不仅限制了束流的提高,而且带来了辐射屏蔽等方面的一系列问题,高能电子加速器正常运行时,损失的电子( $E > 10$  MeV)与加速器结构材料(如真空管、支撑结构)相互作用,产生的光子与加速器材料发生光核反应产生中子,在屏蔽层外形成泄漏剂量率,对工作人员甚至公众带来直接的放射性危害。严格控制粒子损失率是降低辐射屏蔽设计难度、减小加速器隧道感生放射性的有效途径,电子加速器的感生放射性远小于质子或重离子加速器<sup>[4]</sup>。本文主要讨论由于电子束流损失引起的主体墙屏蔽问题。

## 1 屏蔽设计方法

对于直线加速器主体墙的屏蔽设计,各研究组都在创建自己的一套模型、程序和方法学。国际上普遍采用半经验的分析方法和蒙特卡罗方法,半经验方法很大程度上依赖于设计者的主观经验,可对蒙特卡罗计算进行简单验证。随着计算机技术的进步和蒙特卡罗算法的改进,蒙特卡罗程序可以解决复杂几何结构的屏蔽问题,并得到高精度的计算结

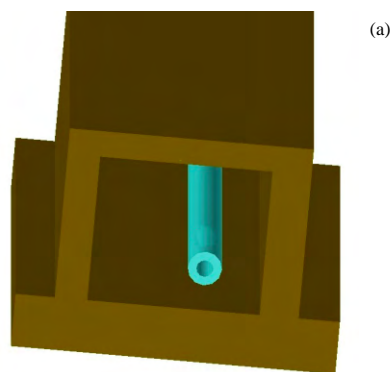
国家自然科学基金(No.21127902)资助

第一作者:徐玉海,男,1985年出生,2012年于哈尔滨工程大学获硕士学位,助理研究员,研究领域为粒子加速器屏蔽设计与剂量学研究

通讯作者:夏晓彬, E-mail: xi Xiaobin@sinap.ac.cn

收稿日期:2013-10-23,修回日期:2014-03-27

果, 是半经验公式无法比拟的。本文研究基于束流线源模型解决电子直线加速器主体屏蔽设计的问题。针对加速器束流损失引起的辐射问题, 通过 FLUKA 程序的 Source 文件建立起电子束流线源模型, 并用 Shiled11 程序对其进行验证。Shiled11 程序<sup>[5]</sup>是由 SLAC 的 Jenkins 和 Nelson 在 19 世纪 70 年代前期编写开发的, 后得到了改进, 最新版本编写于 2005 年。Shiled11 程序基于电子束打靶实验测得的辐射剂量数据并融合了 Jenkins 公式<sup>[6]</sup>, 是适用于高能电子加速器的屏蔽计算的专用程序。FLUKA<sup>[7]</sup>是由意大利国立核物理研究所开发的一个计算粒子输运和粒子与物质相互作用的通用计算工具, 同 EGS、MCNP、GEANT 以及 MORSE 程序等类似, 是常用的蒙特卡罗模拟程序, 用于模拟中子、光子和电子等粒子在物质中传输问题。



## 2 束流线源模型

自由电子激光对电子束流的品质要求非常苛刻, 因此 DCLS 采用光阴极微波电子枪。微波电子枪将阴极直接放在微波腔的端部, 阴极发射的电子在强微波场的作用下迅速被加速到数兆电子伏, 以降低电子的束流损失率和发射度, 因此计算时注入器段假设束流损失率为 1%。

### 2.1 加速器几何模型

对加速器进行等效简化: 用内径 3 cm、厚度 1 cm 的铁圆柱管道代替加速腔、支撑部件、调频器、冷却系统等加速器结构部件, 管道内填充真空; 电子束简化为直线; 屏蔽层由左侧墙、右侧墙、顶板三部分组成, 分别填充密度为  $2.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的混凝土。加速器简化几何模型的轴向截面示意图和 3D 图见图 1。

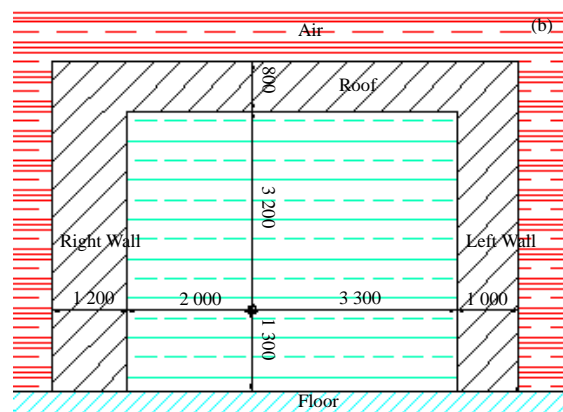


图 1 加速器简化几何模型 (a) 3D 图, (b) 轴向截面示意图  
Fig.1 Simplified geometric mode for DCLS tunnel. (a) 3D diagram, (b) Axial cross section diagram

在 FLUKA 中建立几何模型时, 引入方差减小技巧, 将主体墙由内向外划分许多区域, 对粒子由内向外分别赋予倍增的区域重要性, 使其在区域边界分裂, 以有效降低计算结果的统计误差。

### 2.2 束流线源模型

发射角较大的电子被刮束器、吸收器剔除掉, 来获得高品质的电子束。电子偏离束流中心线的角度取  $1^\circ$ , 电子均匀打在管壁上。这时, 等效靶的厚度为  $1 \text{ cm}/\tan 1^\circ = 57.47 \text{ cm}$ , 与 Shield11 软件中靶的厚度 30.48 cm 相近。束流线源模型示意图见图 2。

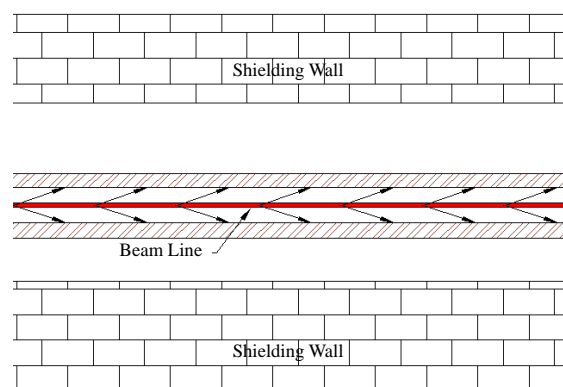


图 2 束流线源模型示意图  
Fig.2 Line-source sampling physical model based on FLUKA.

FLUKA 的粒子束描述命令卡不能对束流线源模型进行描述，因此需要利用基于 FORTRAN 言的 SOURCE 文件来描述电子束的束流损失。SOURCE 文件包括两个核心部分：一是电子的出射方向的均匀抽样；二是电子位置的均匀抽样。通过函数 FLRNDM 产生一个 0-1（不包括 1）的浮点小数实现电子抽样。电子抽样物理模型如下：

$$\begin{cases} \text{位置抽样} \begin{cases} x=R \cdot \cos(2\pi\phi_1) \\ y=R \cdot \sin(2\pi\phi_1) \\ z=z_1+(z_2-z_1)\phi_2 \end{cases} \\ \text{方向抽样} \begin{cases} \mu=\sin\theta \cdot \cos(2\pi\phi_1) \\ \nu=\sin\theta \cdot \sin(2\pi\phi_1) \\ \omega=\cos\theta \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $(x, y, z)$  和  $(\mu, \nu, \omega)$  分别为电子抽样位置坐标和发射方向的余量； $\phi_1$  和  $\phi_2$  为随机数； $R$  为

电子抽样的圆柱面半径； $z_1$  和  $z_2$  为电子抽样的最大  $Z$  轴坐标和最小  $Z$  轴坐标； $\theta$  为相对束流中心线的电子抽样角度。

### 2.3 束流长度对计算结果的影响

在用基于束流线源模型做计算时，线源的中心对应主体墙外的剂量可能并不是最大剂量，最大剂量点的位置与线源的长度有关系。因此，利用上述建立的束流线源模型进行了计算，取主体墙长度 25 m，电子发射角（电子发射方向与束流中心线的夹角） $1^\circ$  打在管壁上，电子能量为 130 MeV。屏蔽设计目标是使年剂量不高于 5 mSv，年工作时间取 2000 h，取 2 倍的安全系数，因此需要使主体墙外的周围剂量率小于  $1.25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ；左侧墙和右侧墙居留因子取 1，顶板居留因子取 1/4。束流长度与主体墙外剂量的关系见图 3。

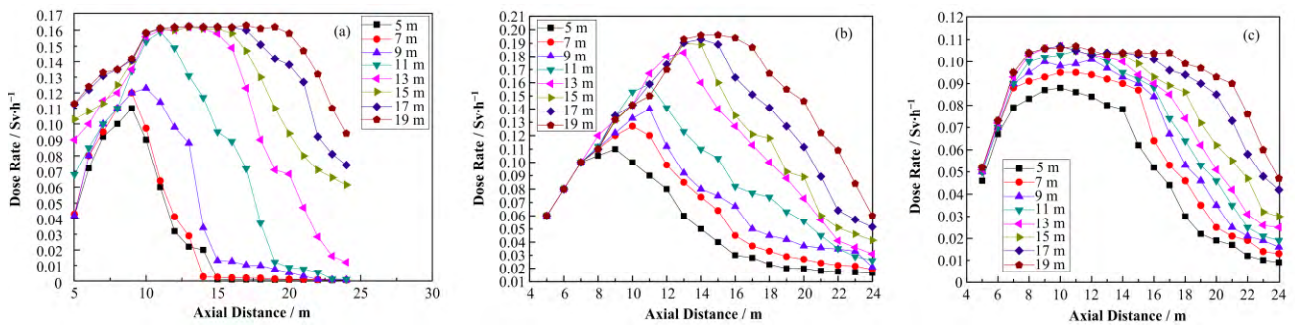


图 3 顶板外(a)、左墙外(b)和右墙外(c)周围剂量率随轴向距离的变化  
Fig.3 Changes of dose rate outside of roof (a), left wall (b) and right wall (c) with the axial distance.

对于顶板，当线源长度 13 m 时，墙外的剂量率变化非常缓慢，并已出现剂量平台；对于左侧墙，当线源长度 15 m 时，墙外最大剂量率已接近剂量平台区，当线源长度 17 m，已出现剂量率平台区；对于右侧墙，由于其距离束流中心线较近，剂量平台当线源长度 7 m 时就出现了，最大剂量平台在线源长度 11 m 时出现。考虑计算时间，线源的长度取 17 m。图 4 为线源长度为 17 m 时的剂量率分布图。

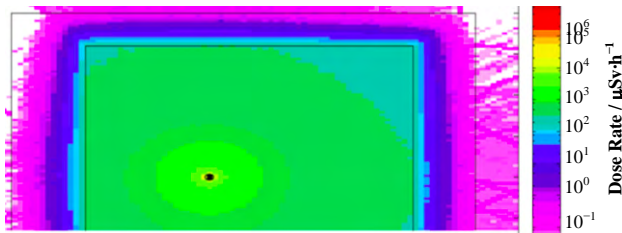


图 4 线源长度为 17 m 时的剂量率分布（正视图）  
Fig.4 Dose rate distribution for 17 m line beam (front view).

### 3 数据分析及结论

利用 SHIELD11 软件对上述屏蔽问题进行了计算，其计算结果与基于 FLUKA 程序计算的结果吻合较好，两者比较见表 1。

通过比较发现，对于加速器横向屏蔽设计，SHIELD11 要比基于束流线源模型的 FLUKA 设计保，两者计算结果最大相差小于 15%，因此基于束流线源模型适用于电子直线加速器的主体墙横向屏蔽设计。用 FLUKA 的 AUXSCORE 卡计算了主体墙外光子和中子的剂量贡献。结果表明，主体墙外次级光子对剂量率的贡献率左墙为 30.70%，右墙为 23.50%，顶墙为 4.00%；主体墙外中子对剂量率的贡献率左墙为 47.04%，右墙为 34.00%，顶墙为 95.03%。主体墙外各分群中子剂量率贡献见表 2，可见中子的剂量主要是由能量较低的巨共振中子贡

献, 伪核中子的中子剂量贡献只占很少的一部分, 高能中子无剂量率贡献。分群中子剂量贡献率表明, 加速器隧道外的辐射监测应该采用较低能量响应范围的中子固定监测仪器。

表 1 FLUKA 和 SHIELD11 的屏蔽计算结果  
Table 1 Comparison of calculation results between FLUKA and SHIELD11.

注入器段墙体 Wall of the injection section	右侧墙 Right wall	左侧墙 Left wall	顶板 Roof
墙体厚度 Thickness of wall	1.2 m	1.0 m	0.8 m
距束流中心线距离 Distance to beam center	2.0 m	3.3 m	3.2 m
剂量率 FLUKA Dose rate of FLUKA	0.104 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	0.195 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	0.162 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
剂量率 SHIELD11 Dose rate of SHIELD11	0.12 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	0.205 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	0.184 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
剂量率 FLUKA/ 剂量率 SHIELD11 Dose rate of FLUKA/ dose rate of SHIELD11	0.866 7	0.95	0.88

表 2 主体墙外中子剂量贡献率

Table 2 Contribution rate to neutron dose out of shielding walls.

中子剂量率贡献率 Contribution rate to neutron dose	左墙 Right wall	右墙 Left wall	顶板 Roof
巨共振中子 $E \leq 30 \text{ MeV}$ Giant-Resonance neutron	96.00%	97.82%	95.50%
伪核中子 30 MeV $< E \leq 140 \text{ MeV}$ Quasi-deuteron neutron	4.00%	2.18%	4.50%
高能中子 $E > 140 \text{ MeV}$ High energy neutron	0	0	0

该线源模型已成功用于 DCLS 注入器段前端墙、防护门及道的屏蔽设计。在对加速器主体做横向屏蔽计算时, 电子能量是单一的, 而在对注入器前端做屏蔽设计时, 电子能量沿束流输运方向逐渐增加, 且前端区的电子能量较低, 利用经验公式做屏蔽计算时, 合理的辐射源项难以寻找, 所以通过线源模型尽量真实再现电子能量的变化情况, 找到较合理的辐射源项。图 5 为注入器前端几何模型在 FLUKA 中实现的一面图和剂量率分布图。其计算结果与经验公式吻合较好。

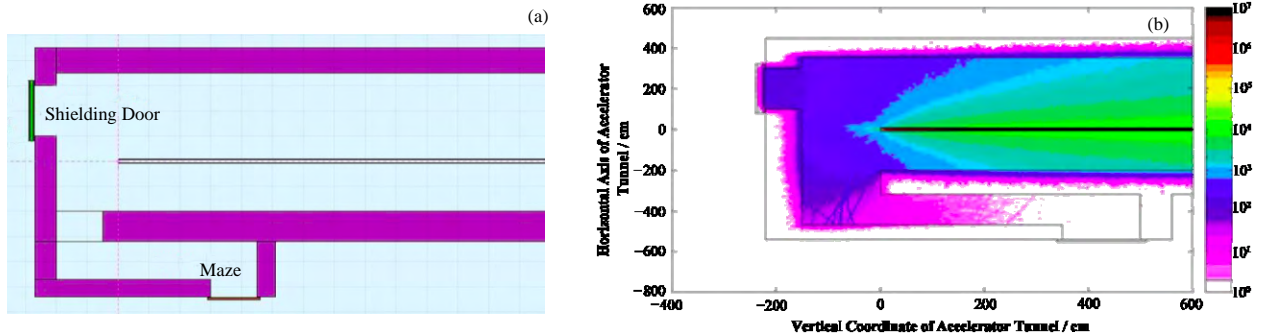


图 5 注入器段前端部分在 FLUKA 中的实现(a)和剂量率分布图(b)  
Fig.5 Geometry (a) and dose rate distribution (b) of particle injector section in FLUKA.

## 参考文献

- Emma P, Akre R, Arthur J, *et al.* First lasing and operation of an angstrom-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 641–647
- Zhao Z T, Wang D, Chen J H, *et al.* First lasing of an echo-enabled harmonic generation free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6: 360–363
- 陈 . 我国巨资建国际唯一波长可调极紫外自由电子激光[N]. 中国科学报, 2012-03-15 B1 综合  
CHEN Huanhuan. The only free electron laser with tunable extreme-ultraviolet wavelength on the international will be established with huge investment in China[N]. China Science Daily, 2012-03-15 B1 integrated columns
- Yoshihiro Asano. Characteristics of radiation safety for synchrotron radiation and X-ray free electron laser facilities[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2011, 146(1–3): 115–118
- Nelson W R, Jenkins T M. The SHIELD11 computer code[M]. Stanford: SLAC-Report-737, 2005
- Jenkins T M. Neutron and photon measurements through concrete from a 15 GeV electron beam on a target-comparison with models and calculations[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1979, 159: 159–265

- 7 Ferrari A, Sala P R, Fasso A, *et al.* Fluka: a multi-particle transport code[M]. Geneva: European Organisation for Nuclear Research, 2011

## Shielding design of free electron laser's main wall based on the line-source sampling physical model

XU Yuhai XIA Xiaobin WANG Guanghong XU Jiaqiang

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Zhangjiang Campus, Shanghai 201204, China)

**Abstract Background:** Dalian Coherent Light Source (DCLS) which is under construction is the first fourth-generation light source in China, and the only free electron laser with adjustable ultraviolet waves in the world.

**Purpose and Methods:** By adopting the FLUKA code, a cylinder-tunnel geometric model and a line-source sampling physical model are constructed to calculate the thickness of shielding walls in the section of injector. The difference is discussed by comprehensive comparison of calculation results based on FLUKA and SHIELD11. **Results:** The results based on the FLUKA coincide with that based on SHILED11. The dose out of shielding walls is mainly comprised by the dose of neutron, and the dose of Giant-Resonance accounts for more than 95% of neutron dose. **Conclusion:** Line-source sampling physical model constructed based on Monte Carlo method can be used in shielding design of electron accelerator's main walls.

**Key words** FLUKA, Shiled11, Line-source sampling physical model, Shielding design, Dalian Coherent Light Source (DCLS)

CLC TL508