



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

外照射光子放疗虚拟源建模方法 及其在剂量验证中的临床应用

答辩人：徐遥

导 师：徐榭 教授、 裴曦 副教授

时 间：2021年5月24日



1 背景介绍



2 材料与方法



3 结果与讨论



4 总结与展望

1 背景介绍 剂量验证 (QA)

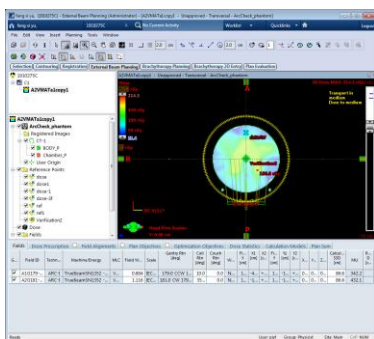
基于测量的QA

计划移植

摆位照射

获取剂量

剂量比较



基于模体CT图像
无法反映人体异质性



人工操作
费时费力

图1.8 Eclipse计划移植

图1.9 ArcCheck摆位

使用剂量计算来代替测量？

基于计算的QA

计划导出

病人CT与计划

剂量计算

剂量比较

1 背景介绍

第三方剂量验证软件

国外商业软件

- SciMoCa
- MiM SureCalc
- Mobius3D
- CloudMC
- DoseCHECK

MD Anderson测试了337例病例¹

- Mobius3D发现18例错误
- 基于测量的QA仅发现1例

ArcherQA

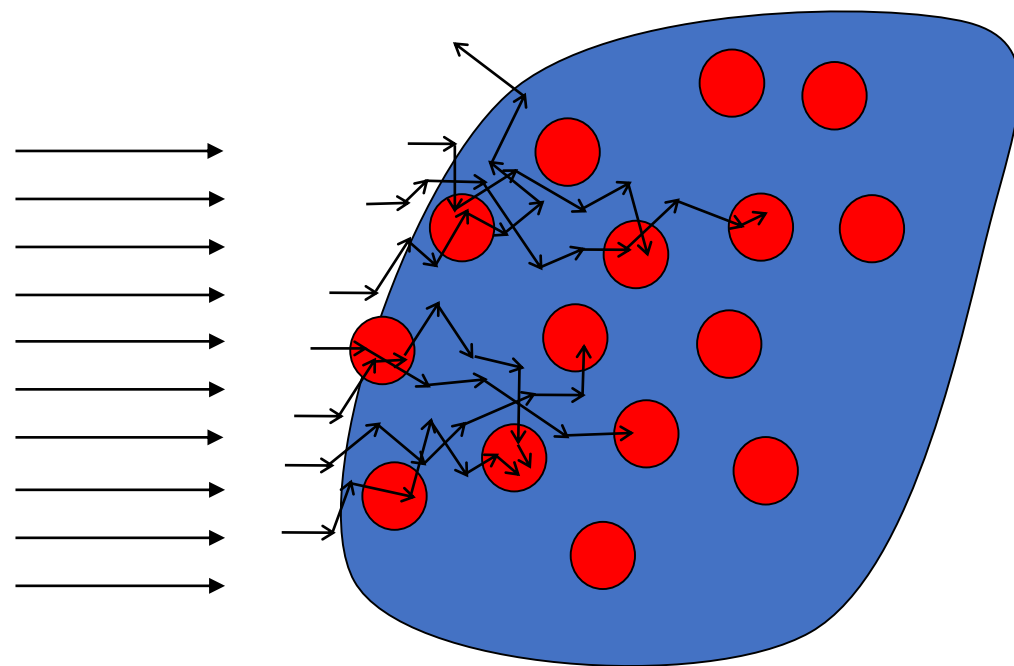
- 自主知识产权，国产化从0到1
- 涵盖主流放疗设备
- 支持CPU+GPU异构计算
- C#编写界面，C++编写底层算法
- 与安徽慧软公司合作产业化

[1]Kry, et al.2019. Medical Physics 46(8): 3700–3708.

1 背景介绍 蒙特卡罗算法

- 源于美国核武器研究的“曼哈顿计划”（1940 - ）
- 基于概率统计理论，利用随机数求解问题
- 可用于求解玻尔兹曼输运方程，实现剂量计算

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) + \hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t) \\ = \int dE' \int d\Omega' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \cdot \hat{\Omega}) \psi(\vec{r}, \hat{\Omega}', E', t) + S(\vec{r}, \hat{\Omega}, E, t)$$



蒙特卡罗方法是剂量计算的金标准，但太耗时间

1 背景介绍 蒙特卡罗剂量引擎ARCHER

ARCHER (Accelerated Radiation-transport Computations in Heterogeneous EnviRonments) [1-3]

- 起始于2009年
- 支持CPU、GPU与MIC等多种处理器
- 支持光子、电子与质子输运
- 速度数百倍于通用蒙特卡罗剂量软件
- 加速器建模尚不完善

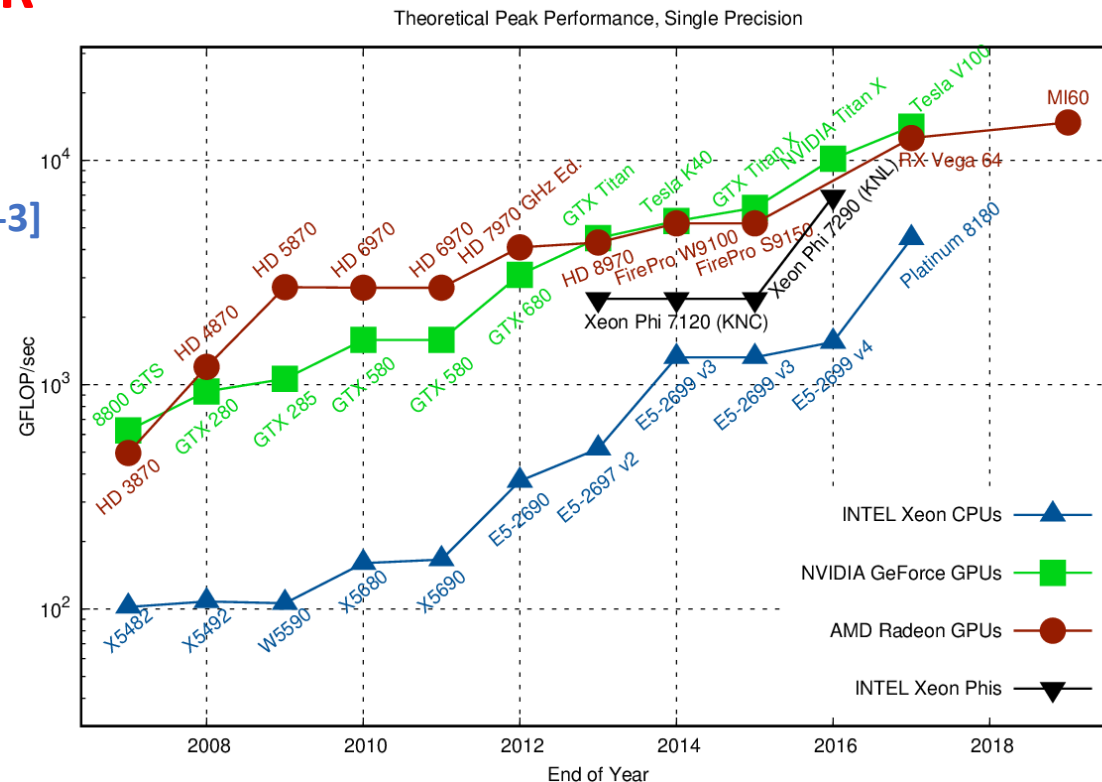


图1.6 CPU 与 GPU 单精度浮点计算能力的发展

- GPU相对CPU的优势逐渐扩大
- CPU+GPU已成为业界关注的异构计算平台

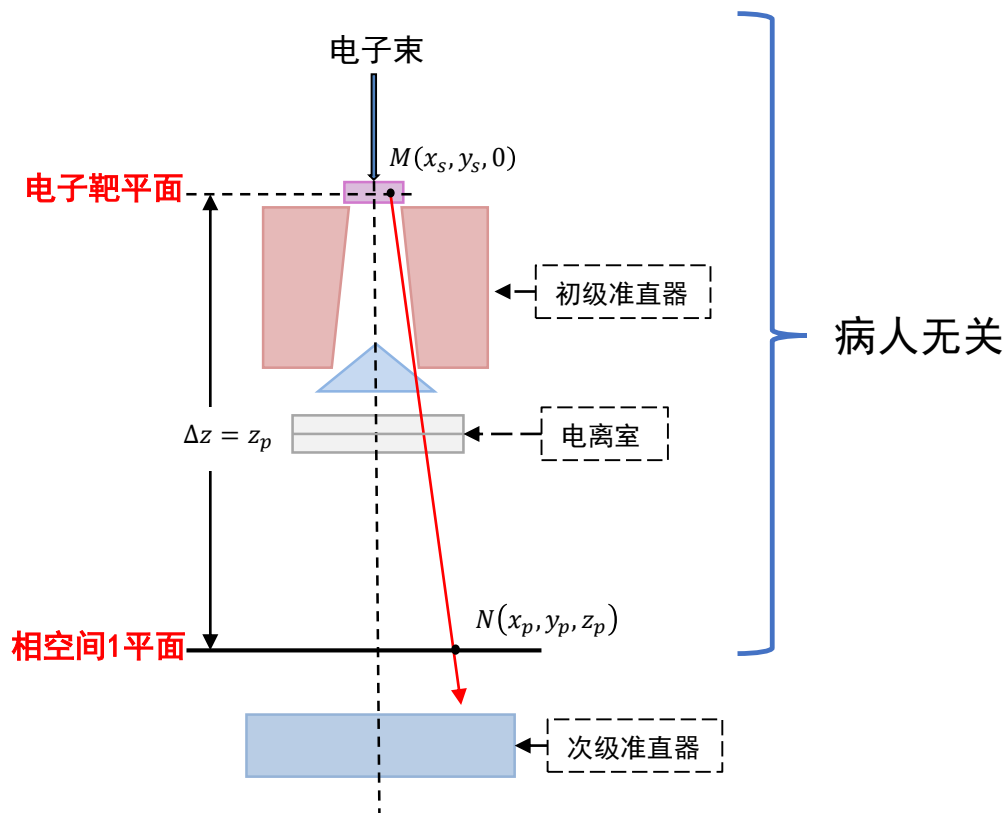
[1] L. Su, "Development and Application of a GPU-Based Fast Electron-Photon Coupled Monte Carlo Code for Radiation Therapy.", Rensselaer Polytechnic Institute, 2014.

[2] T. Liu, "Development of ARCHER — a Parallel Monte Carlo Radiation Transport Code — for x-Ray CT Dose Calculations using GPU and Coprocessor Technologies.", Rensselaer Polytechnic Institute, 2014.

[3] H. Lin, "GPU-Based Monte Carlo Source Modeling and Simulation for Radiation Therapy Involving Varian Truebeam Linac.", Rensselaer Polytechnic Institute, 2018.

1 背景介绍

医用电子加速器与相空间



电子束轰击电子靶生成初级光子

初级光子与其他部件反应生成次级光子、电子与正电子

- 相空间1平面以上部分与病人无关
- 厂商进行完整蒙特卡罗模拟
- 在相空间1平面收集并存储粒子 → 相空间文件

种类	能量	位置			速度方向		
		x	y	z	u	v	w
t	E						

旋转对称 ↓ $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2} = 1$

r θ

图2.1 加速器机头病人无关部分示意图¹

[1] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 原子能出版社, 1999.

1 背景介绍

虚拟源

相空间是粒子的集合

- 难以修改参数
- 占用大量存储

参数化

几何结构

粒子性质

FakeBeam¹

虚拟源²

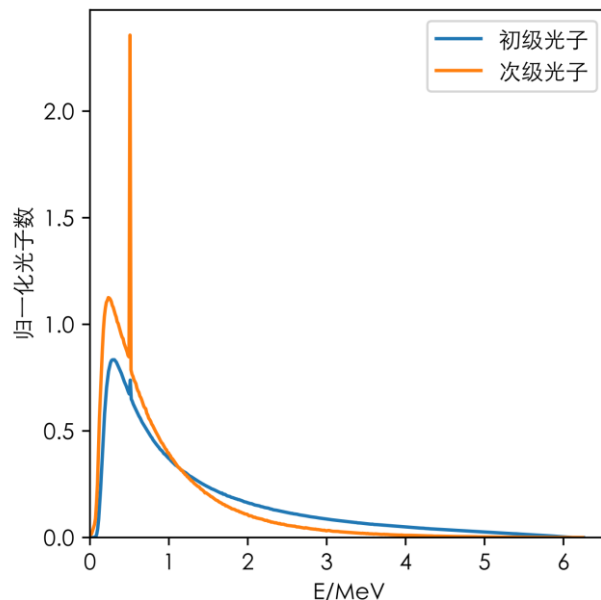


图2.5(a) 能量分布图

$$P_{pri}(E) = \begin{cases} w_o & , E_{cut} \leq E \leq E_{min} \\ \left(\frac{E}{E_{max}}\right)^{-b_{pri}} - 1.0 & , E_{min} \leq E \leq E_{max} \end{cases}$$

$$P_{sec}(E) = \begin{cases} w_s & , E_{cut} \leq E \leq E_{min} \\ e^{-b_{sec}E} - e^{-b_{sec}E_{max}} & , E_{min} \leq E \leq E_{max} \end{cases}$$

Sikora拟合初级与次级光子能谱所用公式²

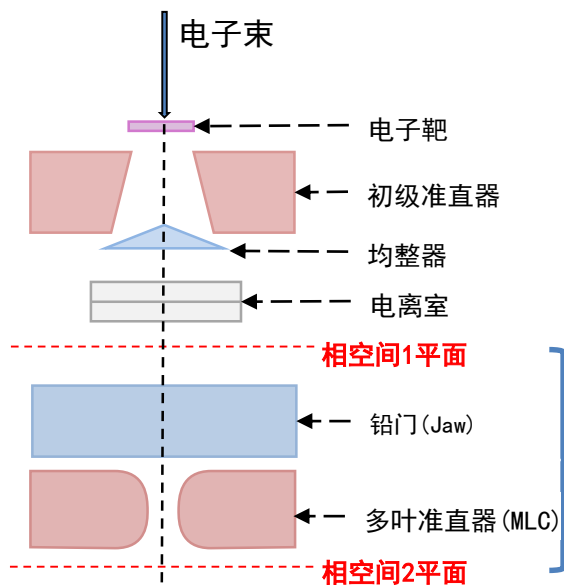
- FakeBeam需要知道大量加速器设计细节
- Sikora的虚拟源方法需要**手动**调整参数

[1] RODRIGUEZ M et al. Physics in Medicine and Biology, IOP Publishing, 2015, 60(11): N219–N229.

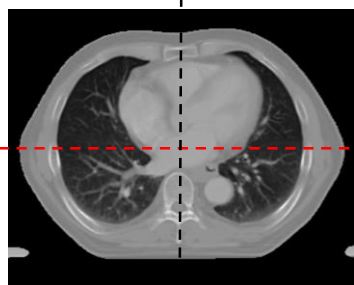
[2] SIKORA M P. The University of Bergen, 2011.

1 背景介绍

机头附件



机头附件



等中心平面

加速器照射病人

如何控制射野形状?

- 铅门(JAW)
形成矩形野
- 多叶准直器(MLC)
形成不规则野



MLC运行过程示意¹

[1] <https://www.holy-cross.com/find-a-service-or-specialty/cancer-care/treatments-and-specialties/radiation-oncology/truebeam>

1 背景介绍 如何定量比较剂量分布？

DTA



剂量差异



$$\Gamma(\vec{r}_e, \vec{r}_r) = \sqrt{\frac{r^2(\vec{r}_e, \vec{r}_r)}{\Delta d^2} + \frac{\delta^2(\vec{r}_e, \vec{r}_r)}{\Delta D^2}} \quad (1.1)$$

$$\gamma(r_r) = \min\{\Gamma(\vec{r}_e, \vec{r}_r)\} \forall \{r_e\} \quad (1.2)$$

伽马指数(Gamma Index)¹

- 结合了剂量差异和DTA(distance to agreement)
- DTA阈值 Δd
- 剂量差异阈值 ΔD

- $\gamma(r_r) < 1$ 则通过测试
- 剂量差异阈值3%，DTA阈值为2mm，伽马通过率>95%
- 排除无临床意义的低剂量区(10%剂量阈值)

1 背景介绍

研究目的与研究任务

研究目的

研究外照射光子放疗虚拟源的建模方法, 将其集成 ArcherQA 中并进行临床测试

研究任务

任务1 构建加速器虚拟源模型, 并利用实验测量数据进行模型参数自动优化

任务2 研究机头附件的建模和光子输运快速计算方法

任务3 集成到ArcherQA 蒙特卡罗框架中, 并开展临床放疗计划验证

2 材料与方法

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ Varian TrueBeam 6MV相空间

表2.2 相空间各成分占比

	初级光子	次级光子	电子	正电子
粒子数	82.72%	16.50%	0.74%	0.04%
能量	88.18%	11.23%	0.55%	0.04%

- 初级光子
- 次级光子
- 污染电子

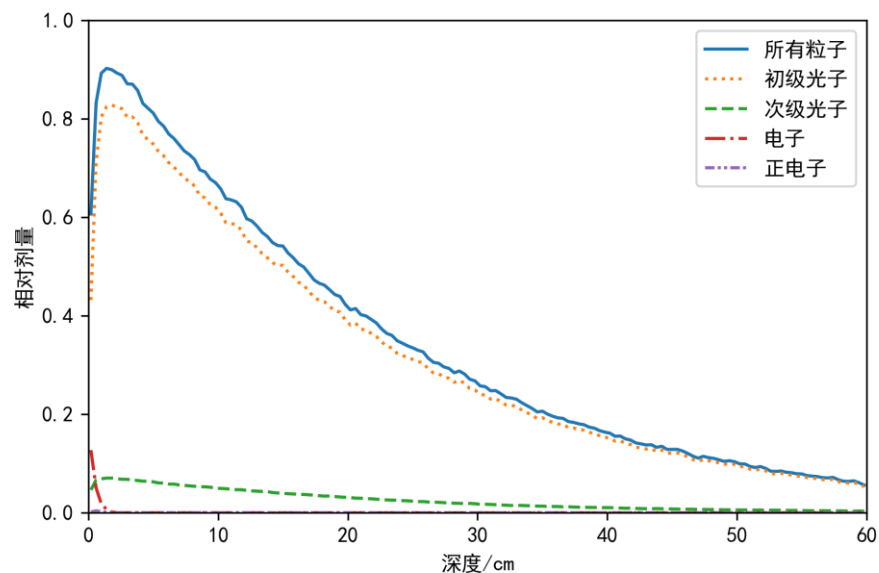


图2.6(a)相空间各成分水箱中心轴深度剂量

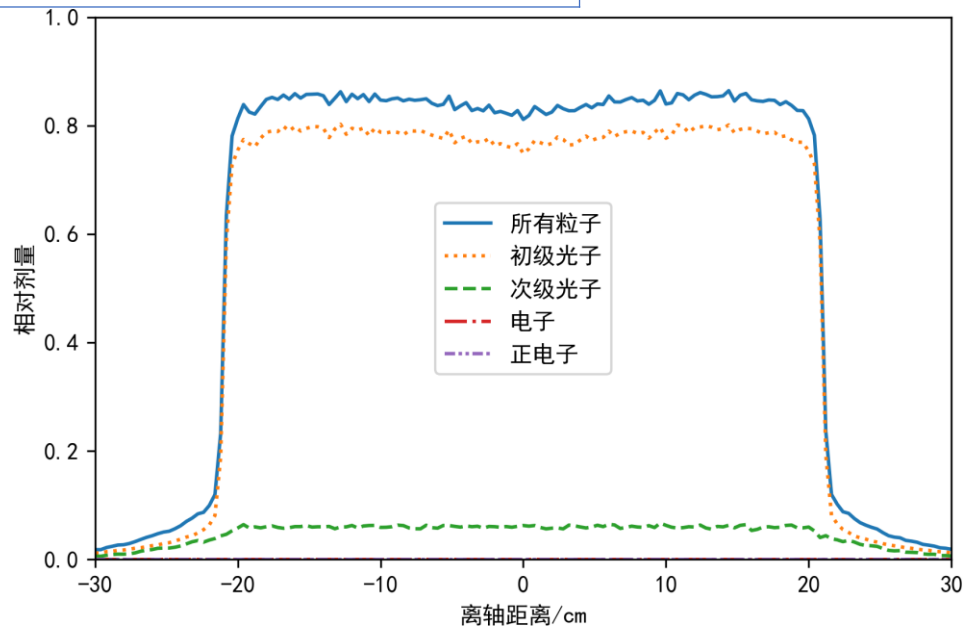


图2.6(b)相空间各成分深度5cm处横向剂量

2 材料与方法

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ 相空间环

虚拟源是粒子能量、位置与速度方向的概率密度函数

$$P(t, E, r, \theta, u, w) = \sum \sum \sum P_{t,i,j}(t, E, r, \theta, u, w)$$

全相空间概率密度 相空间环概率密度函数的叠加

$$P_{t,i,j}(t, E, r, \theta, u, w) = \underbrace{w_{t,i,j} g(E) g(r) g(\theta)}_{\text{均匀分布}} p_{t,i,j}(u, w | E, r, \theta) \quad (2.7)$$

均匀分布

$$\text{粒子数占比} \quad w_{t,i,j} = \frac{N(\text{PSR}_{t,i,j})}{\sum \sum \sum N(\text{PSR}_{t,i,j})} \quad (2.9)$$

$$\text{速度方向分布} \quad p_{t,i,j}(u, w | E, r, \theta)$$

如何求解?

在相空间环 $\text{PSR}_{t,i,j}$ 中，粒子满足：

- 种类均为 t
- $i\Delta E \leq E \leq (i+1)\Delta E$
- $j\Delta r \leq r \leq (j+1)\Delta r$

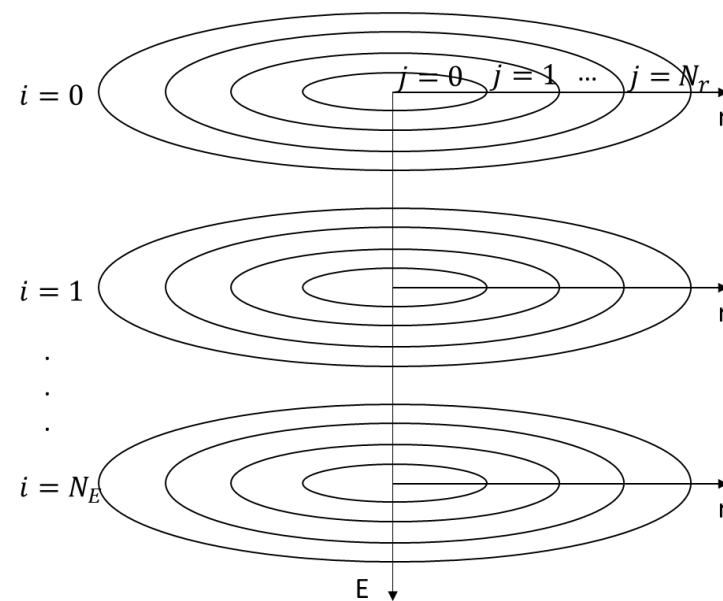


图2.7 相空间环的划分

2 材料与方法

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ 初级光子源速度方向 $p_{t,i,j}(u, w|E, r, \theta)$

已知粒子属于相空间环 $\text{PSR}_{t,i,j}$ 且 t 为初级光子，如何生成速度方向 (u, v, w) ?

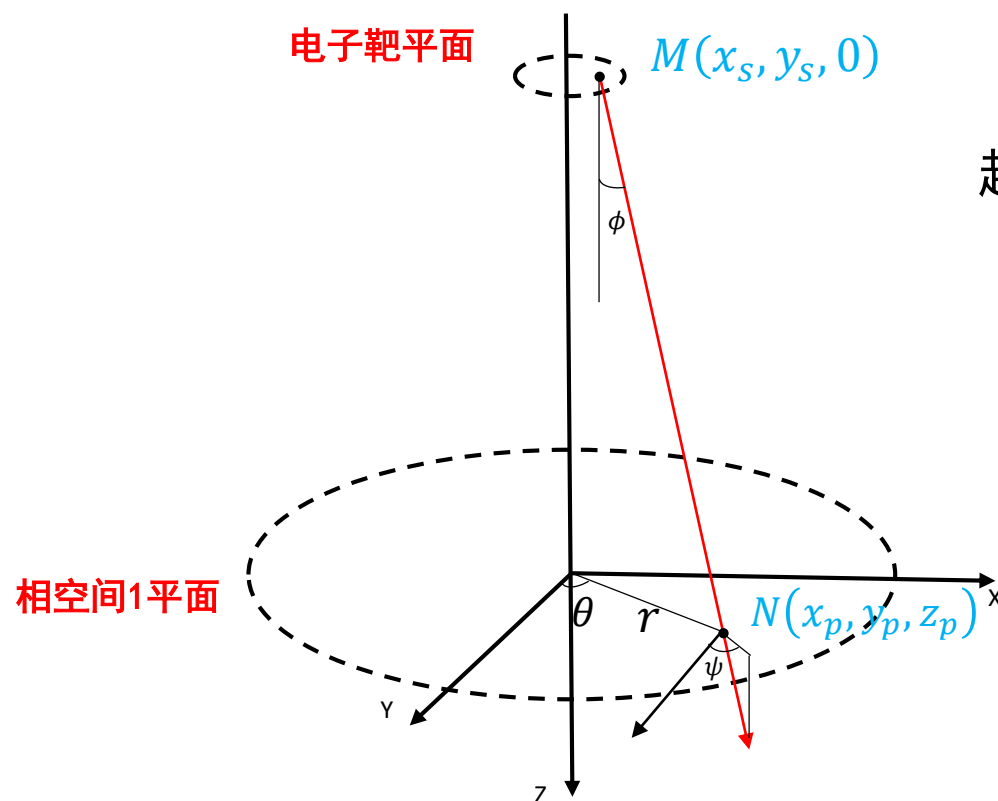


图 2.2 虚拟源坐标系设置

初级光子在电子靶产生，**匀速直线运动**到相空间1平面

起点 $M(x_s, y_s, 0)$ 服从高斯分布 $h(x_s, y_s) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{x_s^2 + y_s^2}{\sigma^2}\right]\right)$

- 终点 $N(x_p, y_p, z_p)$
- 在 $j\Delta r$ 与 $(j+1)\Delta r$ 之间**均匀**采样 r
 - 在 0 与 2π 之间**均匀**采样 θ

$$x_p = r \sin \theta$$

$$y_p = r \cos \theta$$

$M(x_s, y_s, 0)$ 与 $N(x_p, y_p, z_p)$ 的连线即为速度方向

2 材料与方法

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ 求解相空间权重 $w_{t,i,j}$

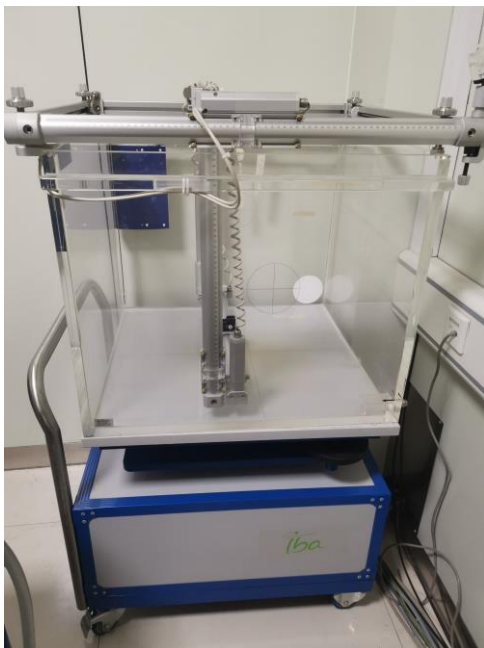


图 2.10(a) 二代蓝水箱实物

加权求和

$$\min \left\| d_m - \sum_t \sum_i \sum_j w_{t,i,j} d_{t,i,j} \right\|^2 \quad (2.31)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_t \sum_i \sum_j w_{t,i,j} = 1 \quad (2.32)$$

$$w_{t,i,j} > 0 \quad (2.33)$$

郑大一附院提供测量数据

- 能量分布主要影响深度剂量
- 位置分布主要影响横向剂量
- 电子只对水箱表面有影响

水箱测量数据必须足够丰富！

- d_m 为测量得到的水箱数据
- $d_{t,i,j}$ 为相空间环 $\text{PSR}_{t,i,j}$ 对水箱的剂量贡献
- 典型二次规划问题，采用CVXOPT软件包求解

2 材料与方法

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ 采样方法

计算机能高效率产生服从**均匀分布**的随机数

已知概率密度函数 $f(x)$ ，如何生成符合 $f(x)$ 的随机数？

逆分布采样 ✕

求解累积分布函数 $\int_{-\infty}^x f(t)dt$

1. 随机生成服从 $[0,1]$ 区间上均匀分布的变量 U
2. $F^{-1}(U)$ 即是所求变量

难以应用与虚拟源采样

- 处理高斯分布时，要求误差函数 $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 的反函数
- 难以处理离散形式的概率密度函数

Box-Muller采样 ✓

1. 随机生成服从 $[0,1]$ 区间上均匀分布的变量 U_1 与 U_2
2. 计算 $M = \sqrt{-2\ln U_1} \cos(2\pi U_2)$ (2.18)
3. 计算 $N = \sqrt{-2\ln U_1} \sin(2\pi U_2)$ (2.19)
4. 得到两个服从高斯分布的变量 M, N

接受拒绝采样 ✓

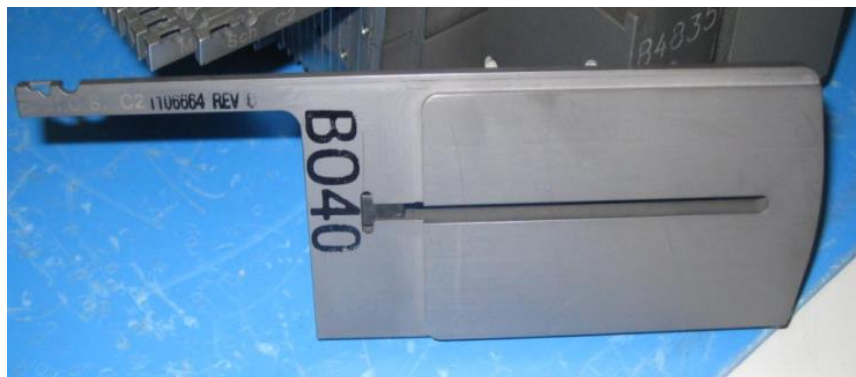
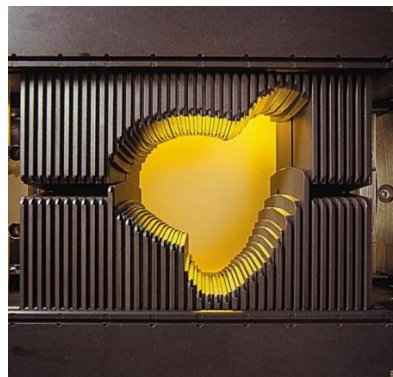
辅助分布 G 和常数 c , $cg(x) \geq f(x)$ 对于任意 x 成立

1. 生成服从辅助分布 G 的 K
2. 生成服从 $[0, 1]$ 区间上的均匀分布的 U
3. 如果 $U \leq f(K)[cg(K)]^{-1}$ ，则接受 K ，否则返回步骤1

2 材料与方法

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 多叶准直器(MLC)建模



- 忽略沟槽 (tongue & groove)
- 材料设为95%钨合金

Millennium 120 多叶准直器 (varian.com)

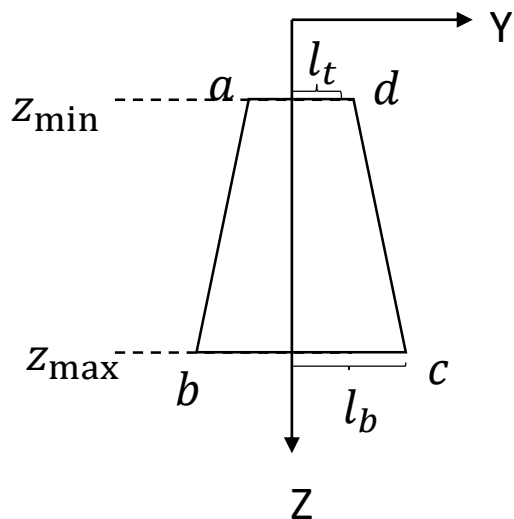


图2.14(a) 多叶准直器垂直于运动方向截面

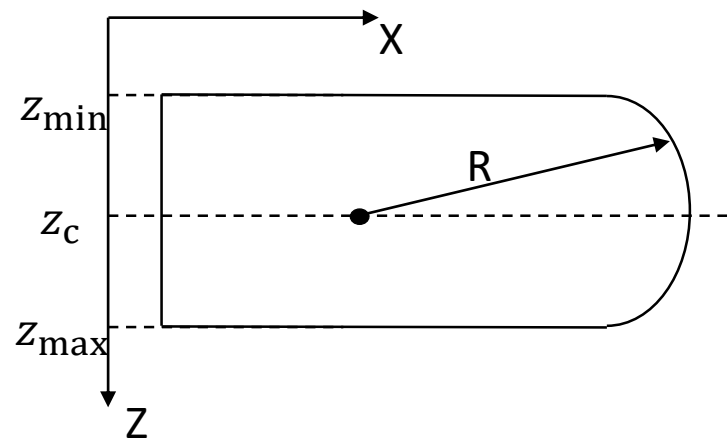


图2.15(a) 多叶准直器模型沿运动方向截面

2 材料与方法

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 衰减系数

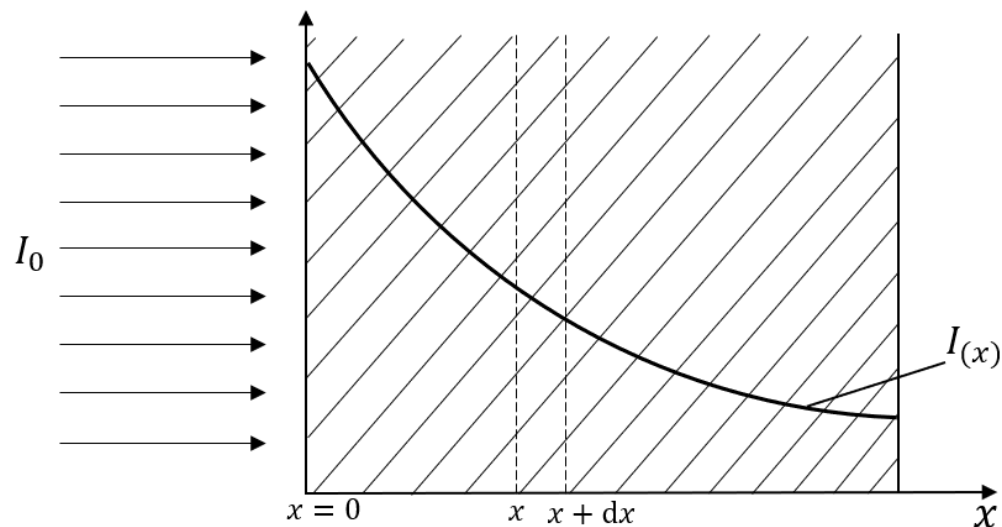


图1.4 单能平行窄束光子在靶内的衰减¹

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma N x} \quad (1.3)$$

线性衰减系数 $\mu = \sigma N$

质量衰减系数 $\frac{\mu}{\rho}$ 与光子**能量E**和靶的**材料**有关

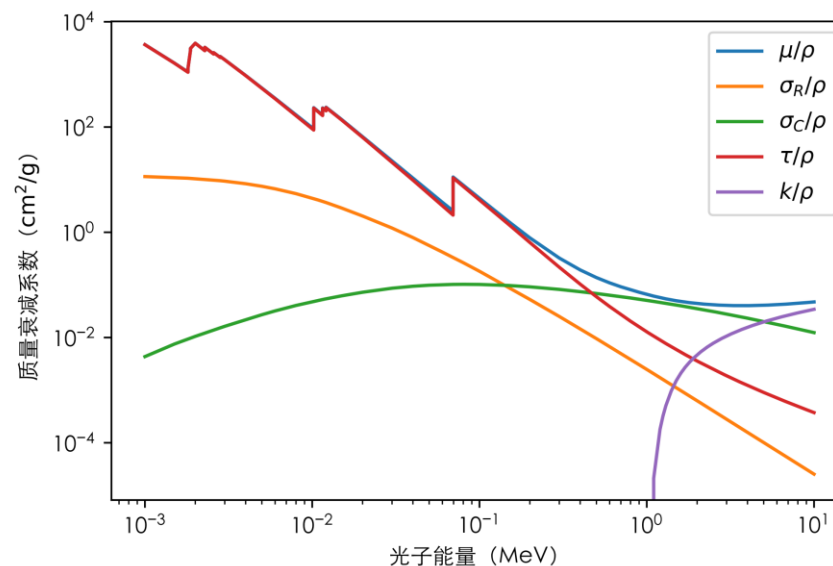


图1.5 钨的质量衰减系数

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{k}{\rho} + \frac{\sigma_R}{\rho} \quad (1.5)$$

- 光电效应 τ/ρ
- 康普顿散射 σ/ρ
- 电子对生成 k/ρ
- 瑞利散射 σ_R/ρ

[1] 谢仲生, 吴宏春, 张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 原子能出版社, 2004.

[2] BERGER M J, HUBBELL J H. 1987. XCOM: Photon cross sections on a personal computer

2 材料与方法

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 光子输运快速计算

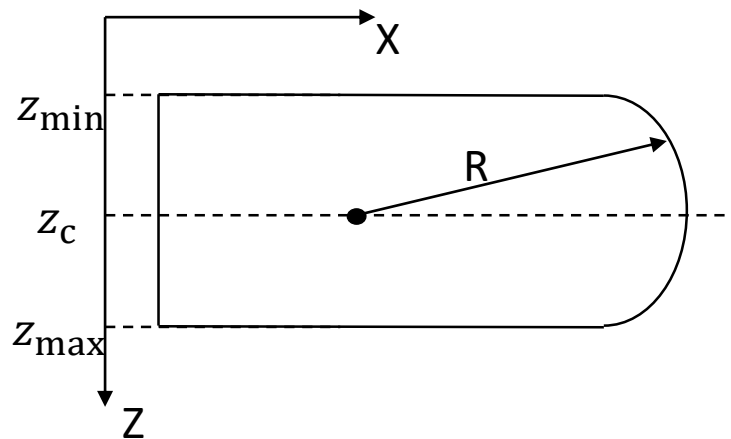


图2.15(a) 多叶准直器模型沿运动方向截面

1. 计算光子在MLC叶片中的穿行距离 t
2. 根据光子能量 E 查询衰减系数 $\mu(E)$
3. 根据 t 和 $\mu(E)$ 计算粒子的统计权重

$$w_f = w_i e^{-\mu(E)t}$$

电子采用“一触即死”策略

2 材料与方法

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 多叶准直器(MLC)模型验证

与郑大一附院合作，使用胶片测量 **Agility 160 MLC**

5对连续开启叶片 交错开闭叶片 5对连续关闭叶片

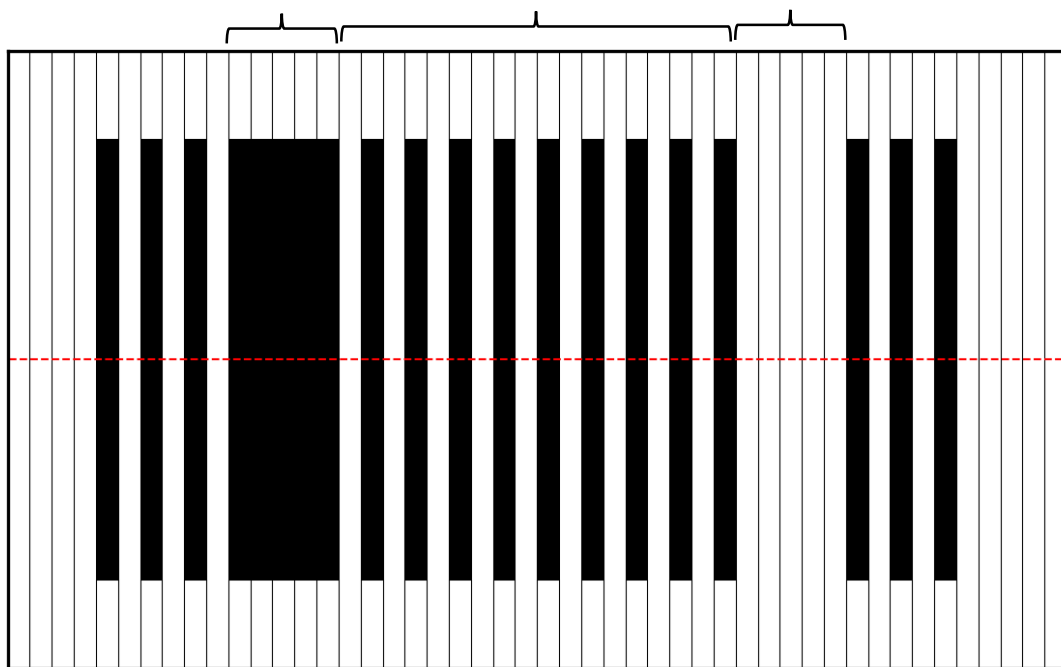


图2.20 静态MLC测试例题^[1]
黑色部分为开野，红色虚线为剂量曲线位置

- 10片 $30 \times 30 \times 1\text{cm}^3$ 固体水
- 胶片放置于水深5cm处
- 胶片型号为EBT-3

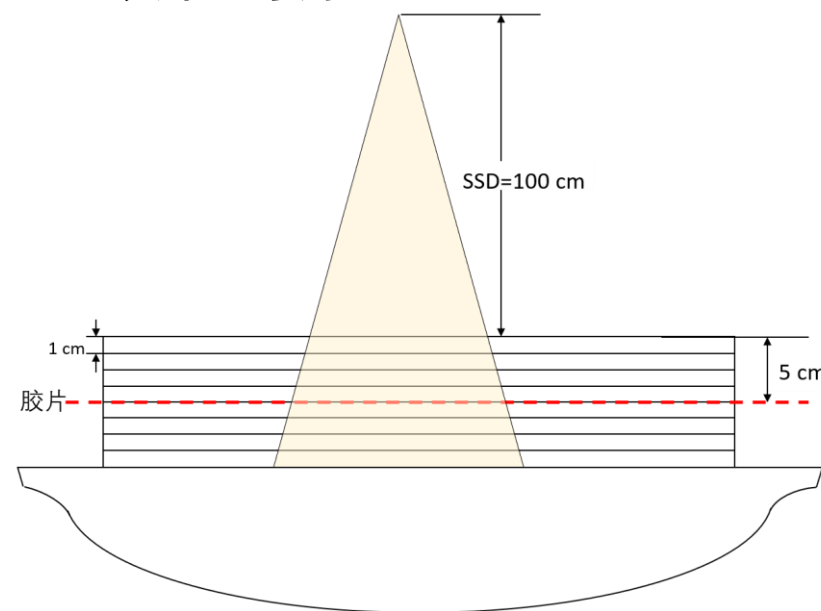


图2.21 (a) 胶片测量设置

[1]Sara Gholampourkashi et al. 2019. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 20 (1): 55–67.
<https://doi.org/10.1002/acm2.12485>.

2 材料与方法

任务3 集成与测试

➤ 蒙特卡罗计算框架

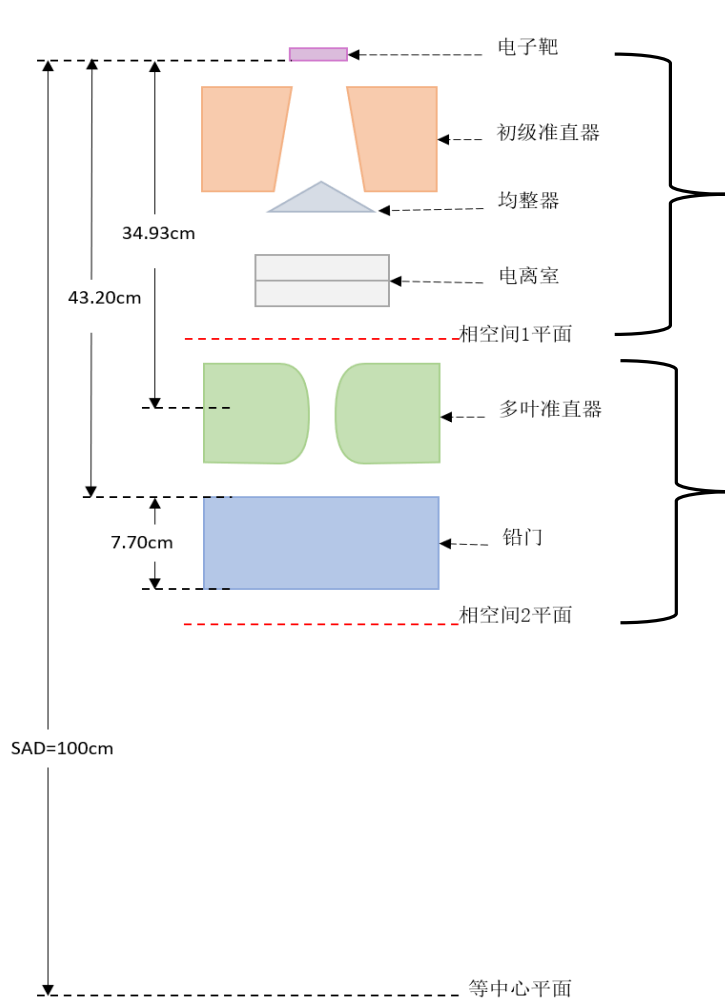


图2.12(a) Elekta Axesse

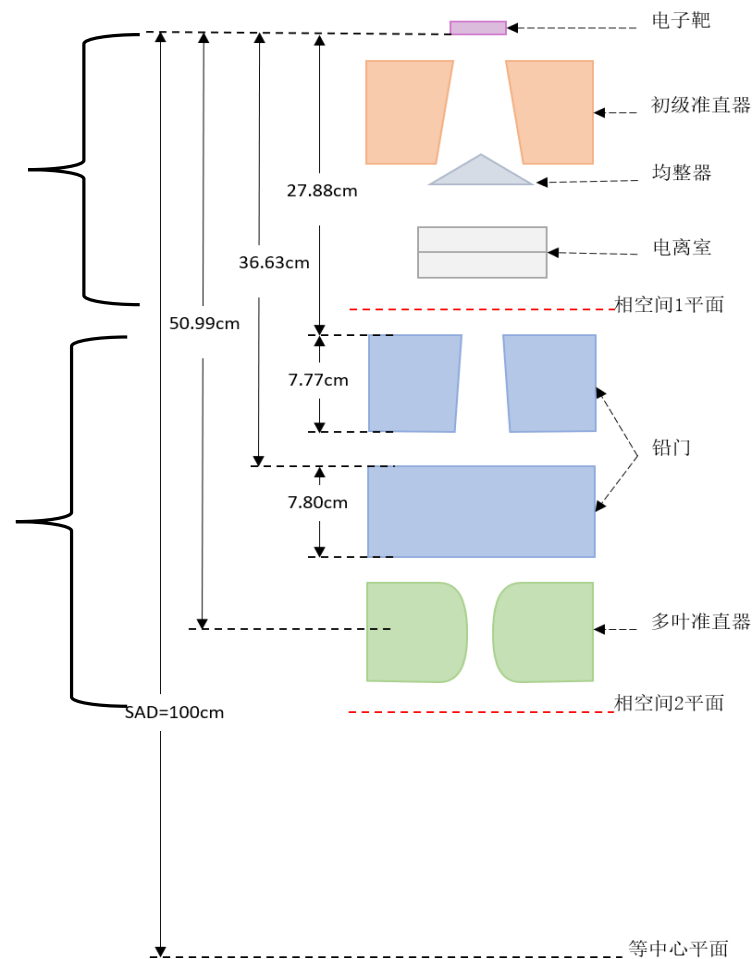
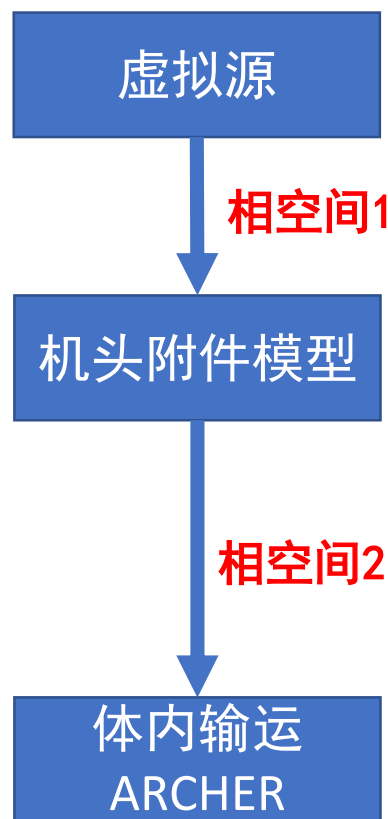
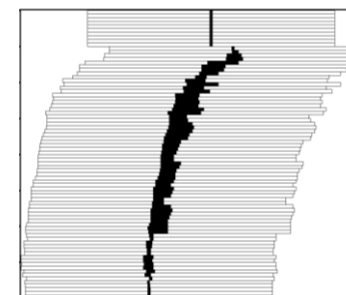


图2.12(b) Varian TrueBeam

- 子野形状 (Subfield Shape)
- 模体信息 (Phantom Information)



2 材料与方法

任务3 集成与测试

➤ 基于CT创建模体

表2.3 不同CT值对应的材料与密度¹

CT值范围	材料名	密度范围
[-1024, -974)	AIR700ICRU	[0.001, 0.044)
[-974, -724)	LUNG700ICRU	[0.044, 0.302)
[-724, 101)	ICRUTISSUE700ICRU	[0.302, 1.101)
[101, 1976]	ICRPBONE700ICRU	[1.101, 2.088)

- Archer现在使用了4种材料
- 材料的截面和步长数据由DPM生成

1. material.x定义材料的元素组成

2. predpm生成Archer可以读取的格式

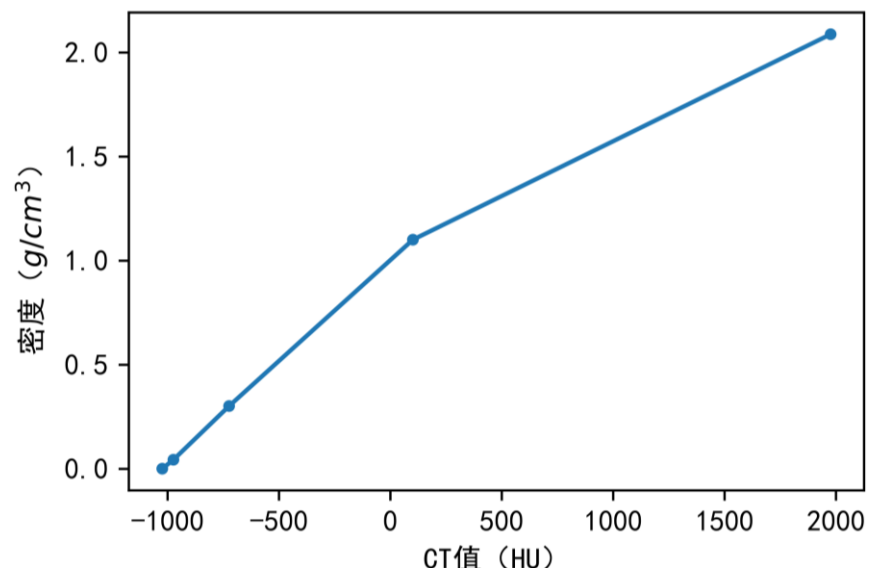


图2.23 CT值与质量密度关系曲线

[1] WALTERS B R B, ROGERS D W O. DOSXYZnrc users manual[J]. NRC Report PIRS 794 (rev B), 2004.

2 材料与方法

任务3 集成与测试

➤ 机头附件模型初始化

描述MLC叶片位置的方法有两种：

- 叶片尖端在等中心平面上的投影位置 x_{tip} **计算野**
- 叶片端面在等中心平面上的投影位置 x_{end} **灯光野**

TPS剂量计算采用 x_{tip} ，导出为RTPlan文件时采用 x_{end} ¹

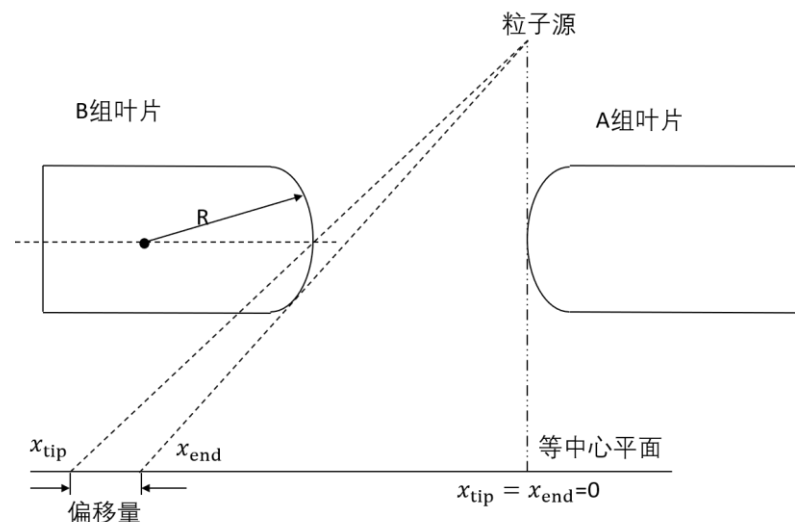


图2.24 多叶准直器叶片端面切线投影与尖端投影

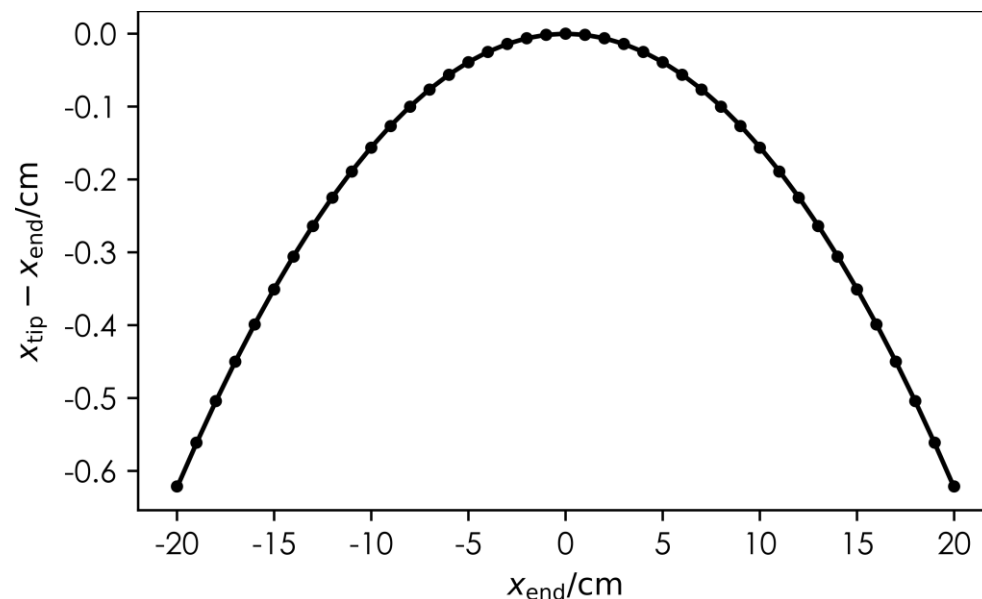


图2.25 Varian HD120叶片尖端偏移量LPO

$$LPO(x) = x_{tip} - x_{end} = a x^2 \quad (2.63)$$

[1] Chen et al. Journal of Applied Clinical Medical Physics 16(5): 322–332.

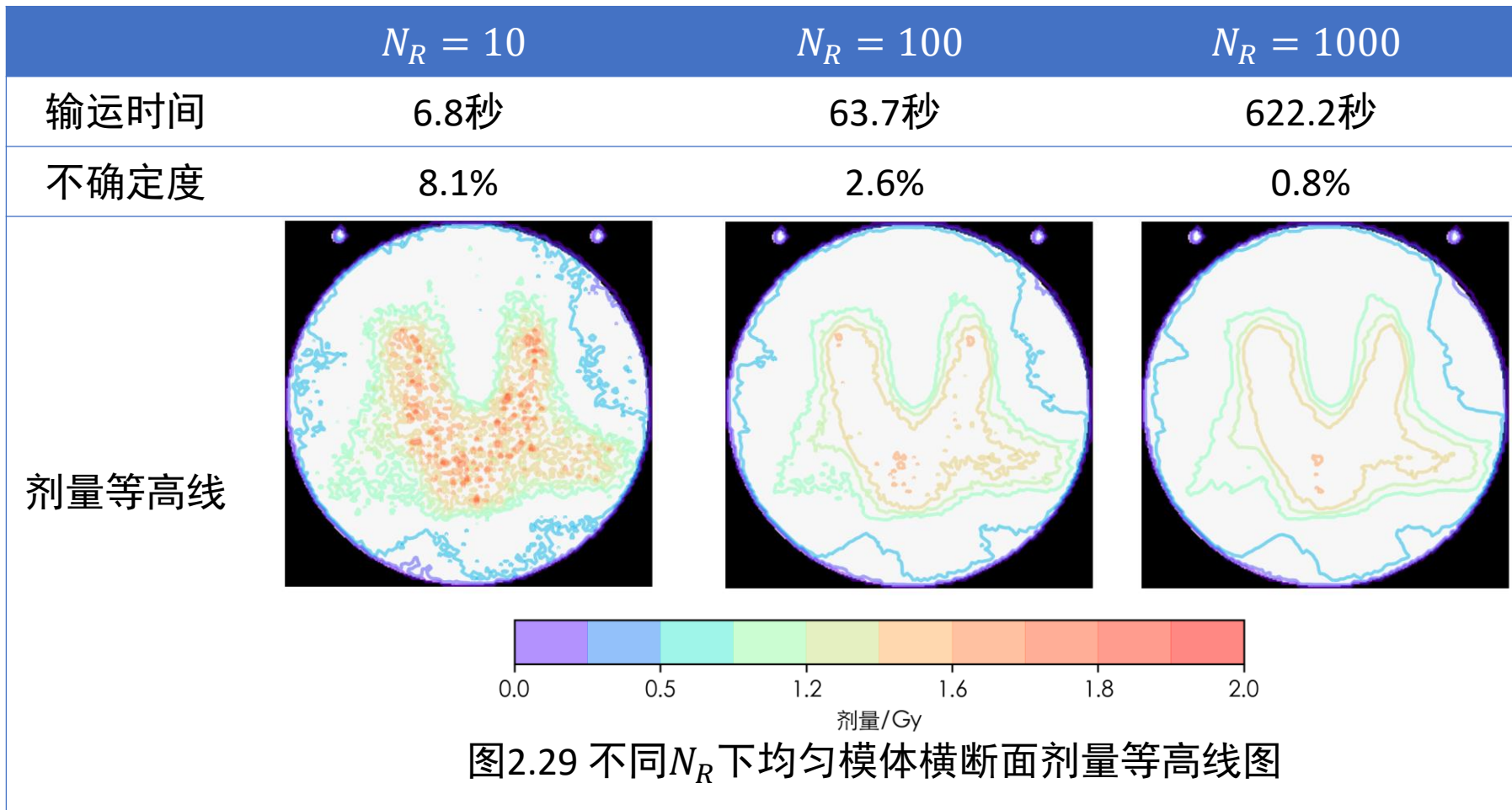
2 材料与方法

任务3 集成与测试

➤ 剂量平滑化

临床VMAT计划照射均匀模体

重复使用相空间2粒子 N_R 次



如何获取清晰的剂量分布？

蛮力提升 N_R 非常不经济

- 输运时间与 N_R 成正比
- 不确定度与 $\sqrt{N_R}$ 成反比

引入剂量平滑化方法

2 材料与方法

任务3 集成与测试

采用共轭梯度法优化

➤ 剂量平滑化

定量评价一维剂量分布 $\{d_i\}$ 的不平滑程度

剂量平滑目标函数

$$\min f(\{d_i\}) = w_s \sum_i \frac{|2d_i - d_{i-1} - d_{i+1}|}{[1 + 1/4(d_{i-1} - d_{i+1})]^{3/2}} + w_r \sum_i \left(\frac{d_i - \bar{d}_i}{\sigma_i} \right)^2$$

曲率和

函数曲率

$$\kappa(x) = \frac{|d''|}{(1 + d'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.66)$$

离散曲率

$$\kappa_i = \frac{|2d_i - d_{i-1} - d_{i+1}|}{\left[1 + \frac{1}{4(d_{i-1} - d_{i+1})} \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.67)$$

惩罚项

- \bar{d}_i 为初始剂量分布
- σ_i 为不确定度

防止 $\{d_i\}$ 被优化为常数

w_s 与 w_r 分别为函数曲率和惩罚项的权重

2 材料与方法

任务3 集成与测试

➤ 共轭梯度法

$$\min f(x)$$

迭代公式

$$x_{k+1} = x_k + \lambda_k d_k \quad (2.76) \quad \text{从 } x_0 \text{ 开始逐步逼近最优解}$$

搜索方向

$$d_k = \begin{cases} -\nabla f(x_k) & , k = 0 \\ -\nabla f(x_k) + \beta_k d_{k-1} & , k > 0 \end{cases} \quad (2.77) \quad \text{结合PRP与DY方法来计算 } \beta_k^1$$

搜索步长

$$\text{设 } \Phi(\lambda_k) = f(x_k + \lambda_k d_k)$$

非精确线搜索查找 λ_k 满足 **Wolfe条件**²

$$\Phi(\lambda_k) \leq \Phi(0) + c_1 \lambda_k \Phi'(\lambda_k) \quad (2.80a)$$

$$\Phi'(\lambda_k) \geq c_2 \Phi'(0) \quad (2.80b)$$

[1] DAI Y H. 2011. Nonlinear Conjugate Gradient Methods[M/OL].

[2] WOLFE P. 1969. SIAM Review, 11(2): 226-235.

3 结果与讨论

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ Varian TrueBeam

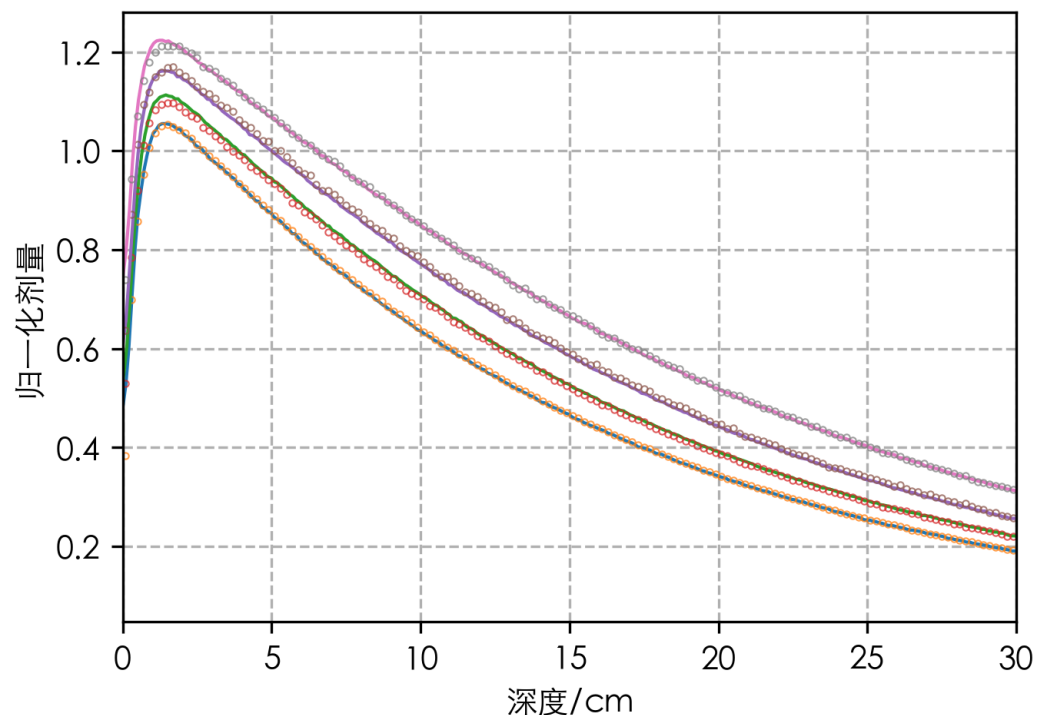


图3.1 中心轴深度剂量

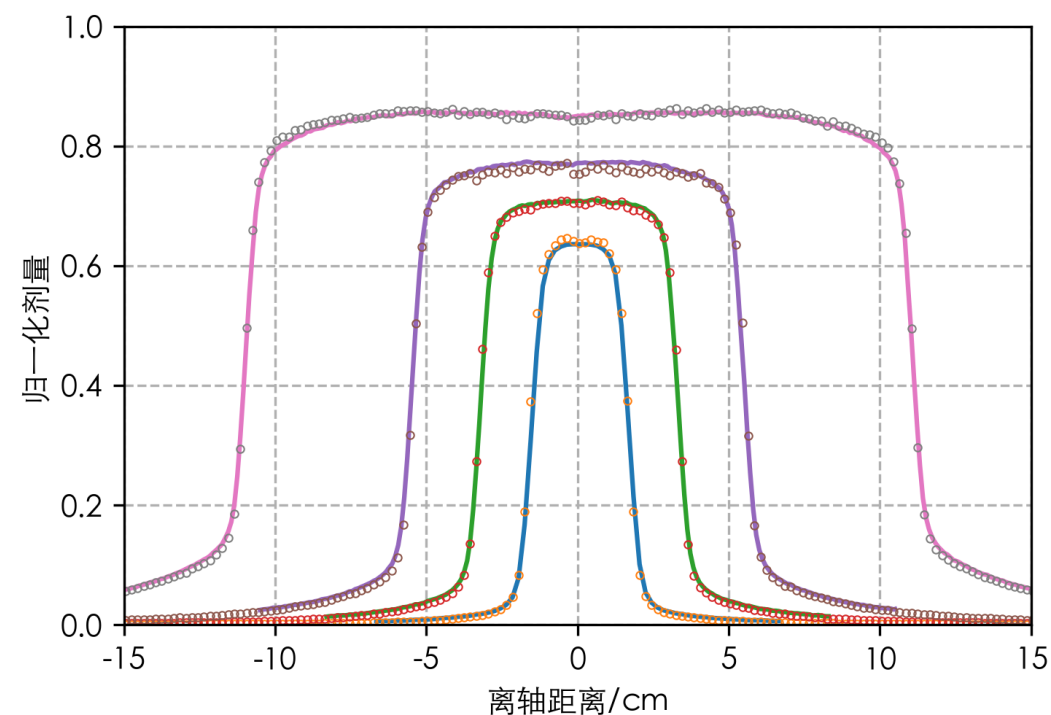
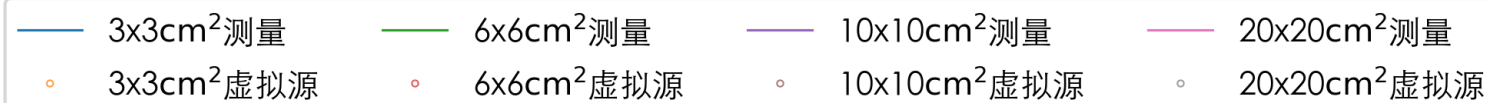


图3.3(b) 深度10cm处横向剂量曲线



虚拟源和测量水箱剂量曲线对比
以10 × 10cm²开野5cm深度处的剂量为单位1

3 结果与讨论

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ Eletka Axesse

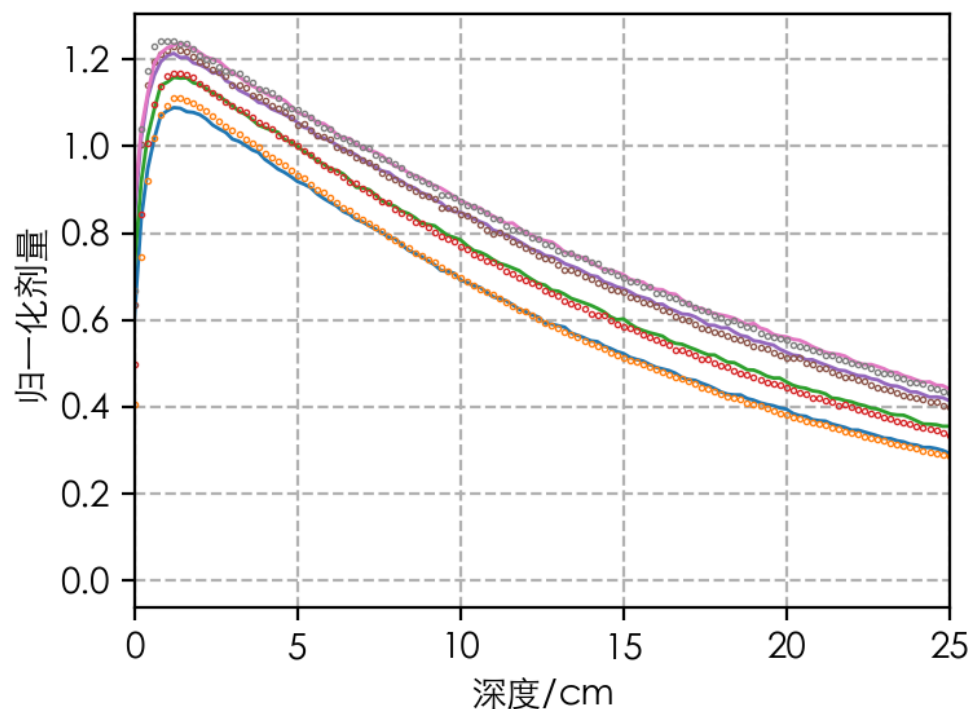


图3.5 中心轴深度剂量

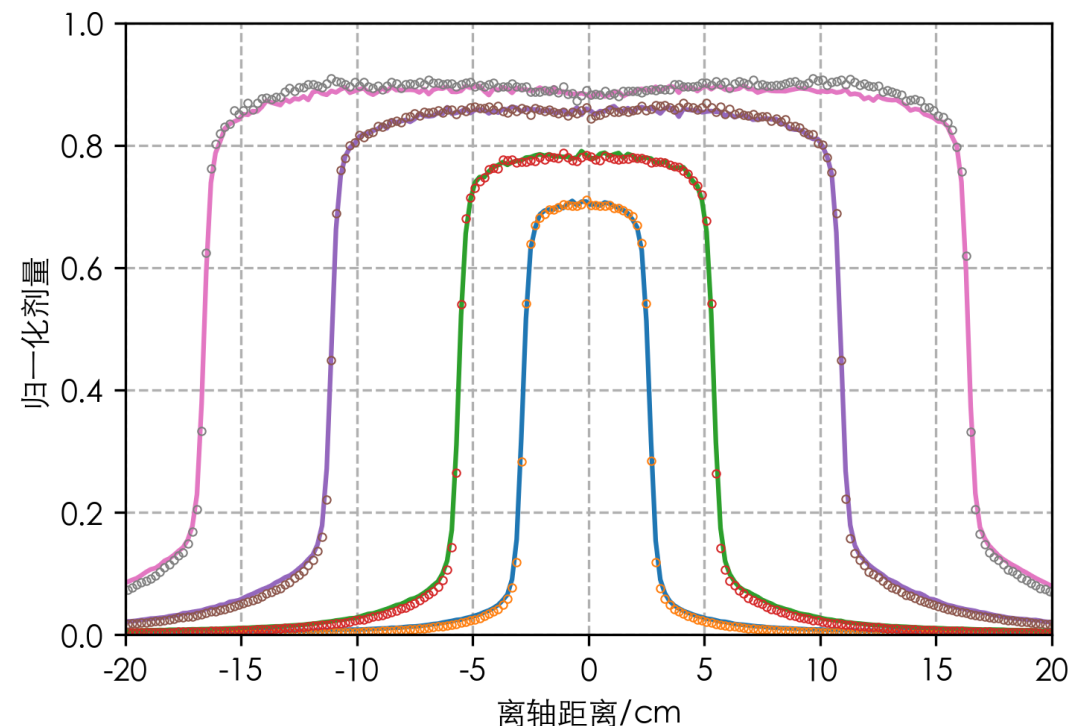


图3.7(b) 深度10cm处横向剂量曲线



虚拟源和测量水箱剂量曲线对比
以 $10 \times 10\text{cm}^2$ 开野5cm深度处的剂量为单位1

3 结果与讨论

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ 初级光子源 σ

初级光子空间位置标准差 σ 会影响横向剂量半影区

- σ 越小半影越陡峭
- 小野对 σ 更加敏感

需要比 $3 \times 3\text{cm}^2$ 更小野的数据

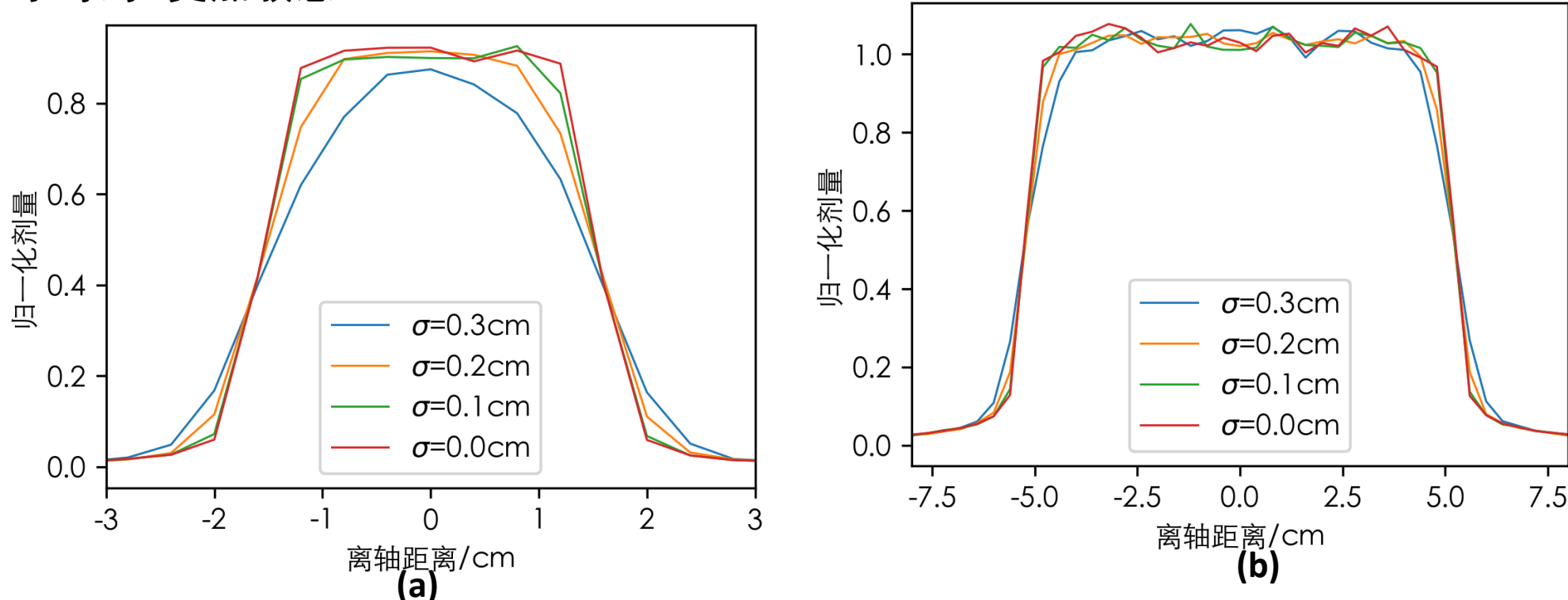


图3.36 不同初级光子源空间位置标准差 σ 下, 虚拟源在5cm深度处横向剂量
(a) $3 \times 3\text{cm}^2$ 开野, (b) $10 \times 10\text{cm}^2$ 开野

3 结果与讨论

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 多叶准直器(MLC)胶片测量

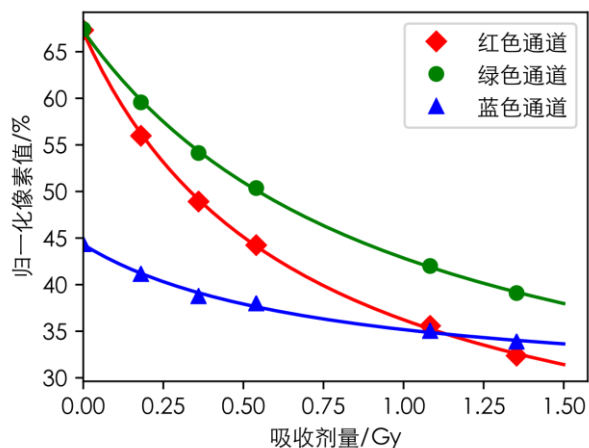


图3.9胶片剂量响应曲线

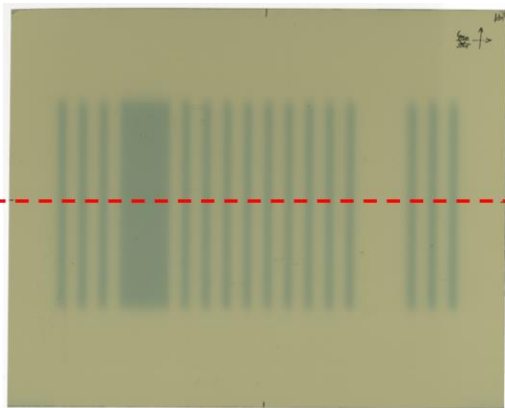


图3.10(a)胶片扫描图片

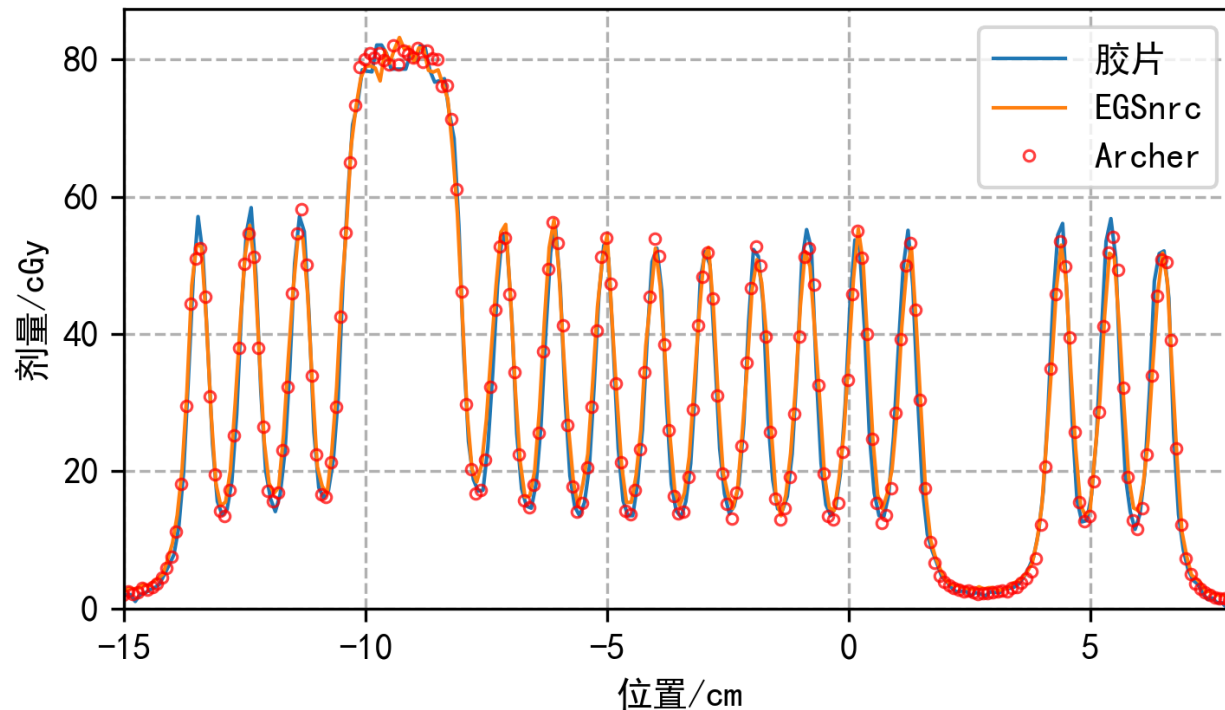
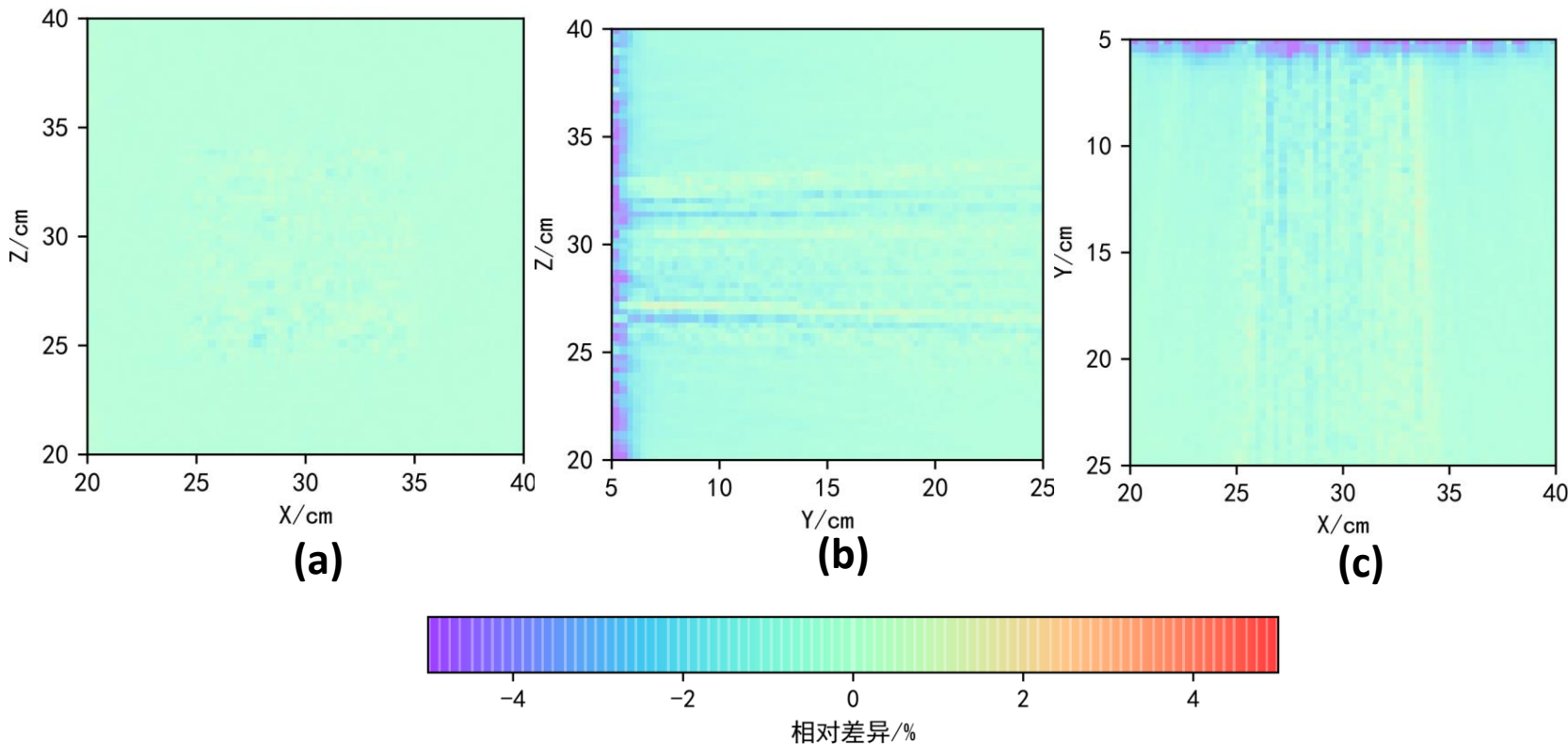


图3.12 ArcherQA、EGSnrc计算和胶片测量的剂量曲线对比

3 结果与讨论

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 多叶准直器(MLC)三维水箱



EGSnrc 截止能量

- PCUT=0.01MeV
- ECUT=0.7MeV

- 水箱表面, Archer低于EGSnrc约4%
- 其余部位差距在1%以内
- 三维2mm/2%伽马通过率为99.4%

图3.14 Archer、EGSnrc二维剂量差异: (a)冠状面, (b)矢状面, (c)横断面

3 结果与讨论

任务2 机头附件建模和光子输运

➤ 多叶准直器(MLC)三维水箱

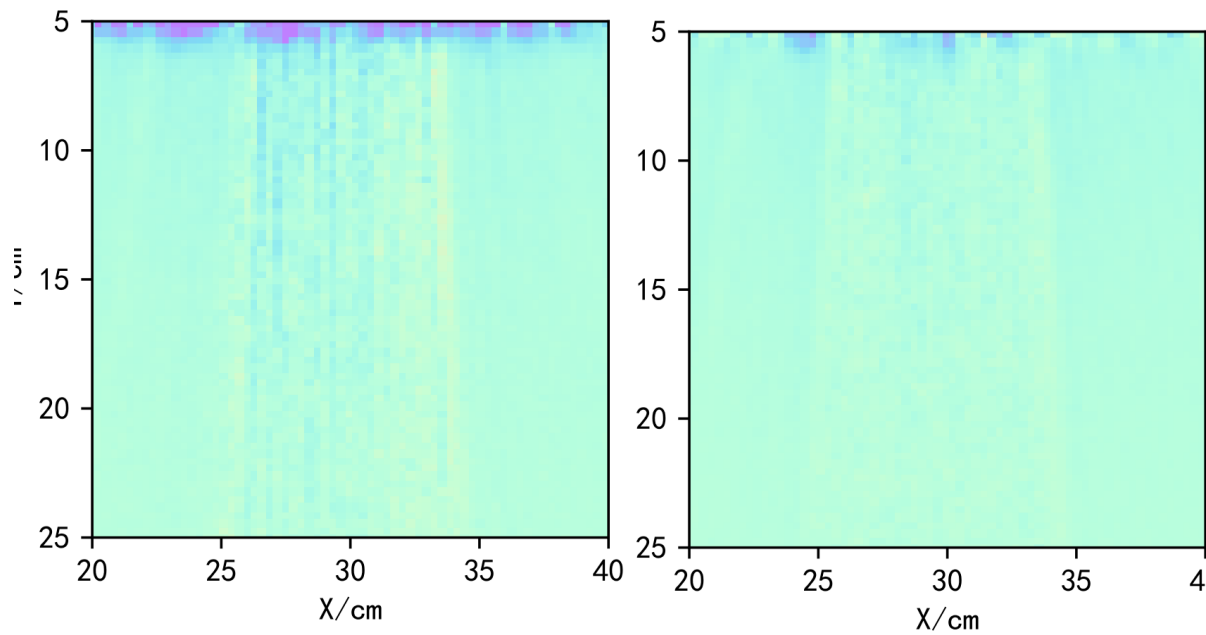
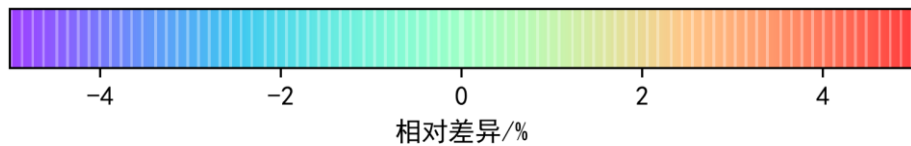


图3.14(c) ECUT=0.7MeV

图3.38(c) ECUT=100MeV



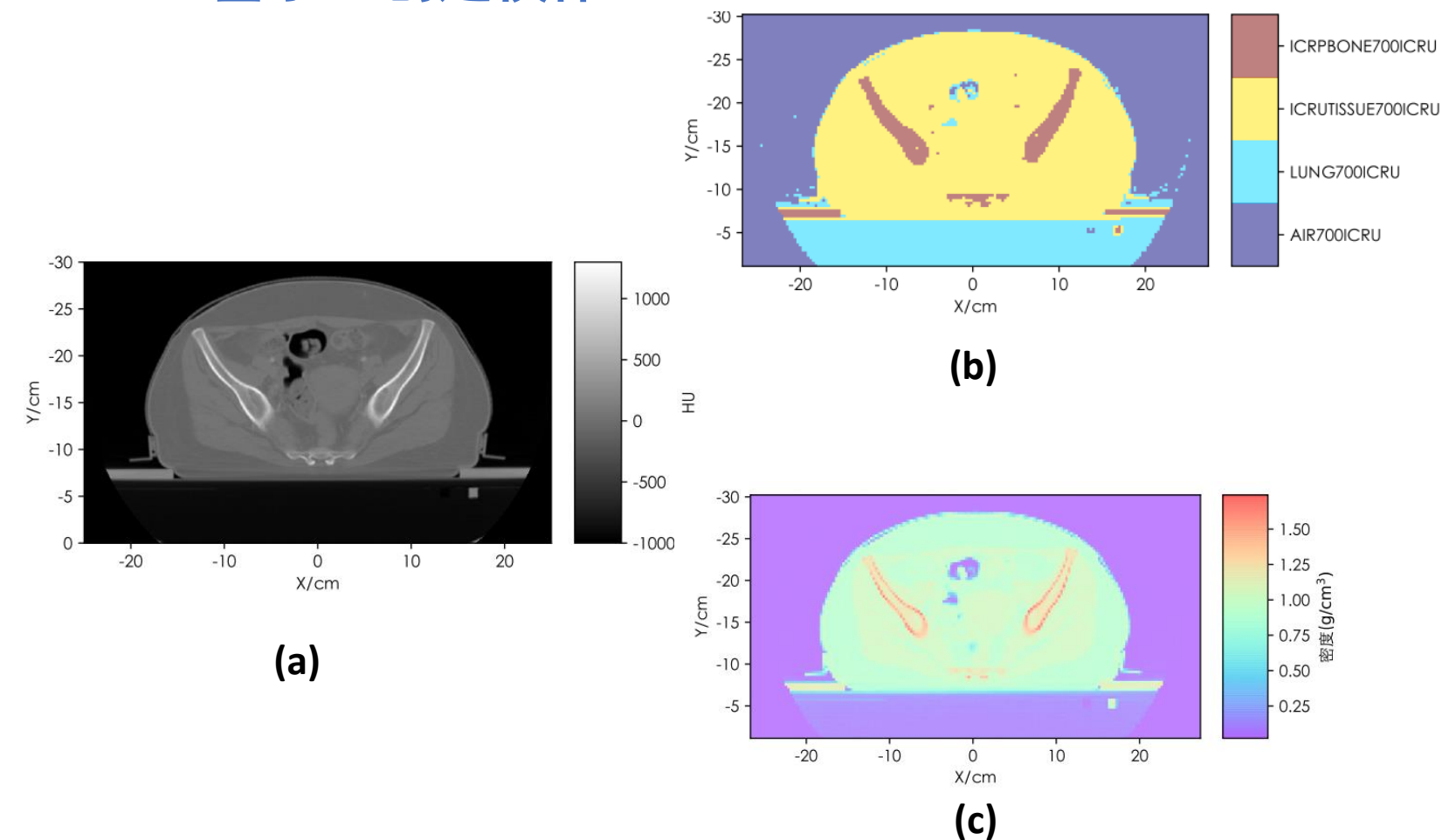
Archer、EGSnrc二维剂量差异

- ECUT=100MeV次级电子立即沉积
- Archer与ECUT=100MeV的差异较小,
- Archer与EGSnrc剂量差异主要由次级电子引起

2结果与讨论

➤ 基于CT创建模体

任务3 集成与测试



- CT床板的密度在 0.1g/cm^3 左右
- 治疗床板的密度在 0.03g/cm^3 左右

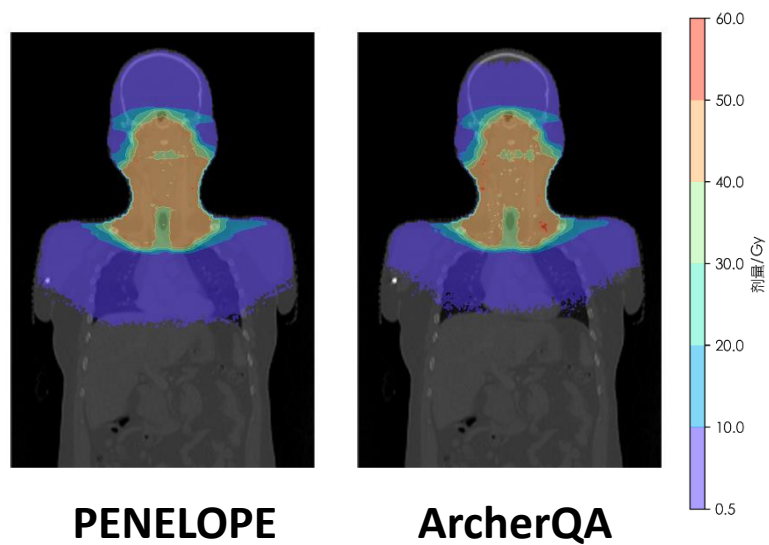
需要替换模体中床板的密度！

图3.21 基于 CT 创建的病人模体：(a) HU 值 (b) 材料编号 (c) 密度

3 结果与讨论

任务3 集成与测试

➤ ArcherQA VS PENELOPE



PENELOPE

ArcherQA

图 3.34 冠状面剂量分布图

表 3.7 伽马测试通过率

ROI	2mm/2%
BODY	95.6%
PTV	93.3%
R_Lung	98.3%
L_Lung	96.1%
Esophagus	94.9%

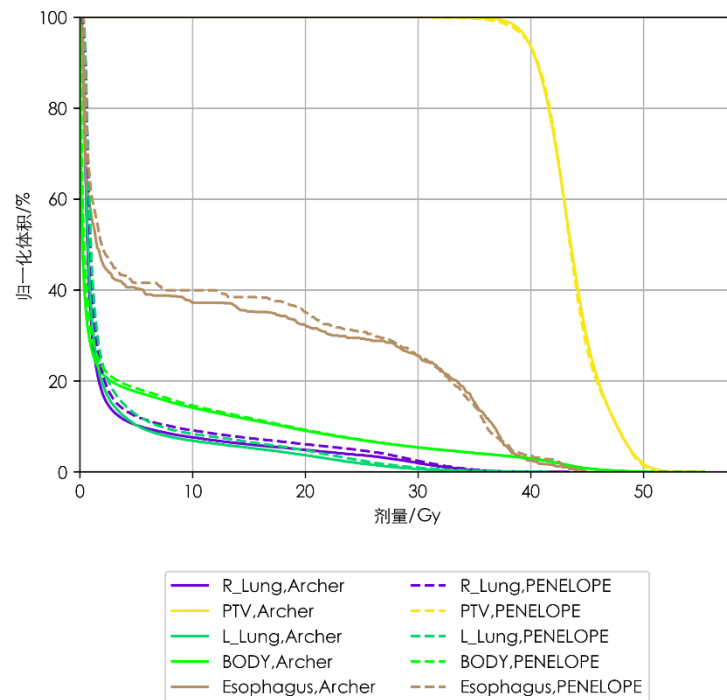


图3.35 DVH图

	处理器	时间
ArcherQA	NVIDIA Titan V	82秒
PENELOPE	Intel i9 7960x	2小时22分

3 结果与讨论

任务3 集成与测试

➤ ArcherQA VS 商业TPS

- 郑大一附院提供了头颈部、胸部与腹部各10个病例
- 使用瓦里安 Eclipse设计了瓦里安 TrueBeam 加速器的VMAT计划
- 使用医科达 Monaco设计了医科达 Axesse加速器的VMAT计划
- ArcherQA计算了商业TPS导出的VMAT计划并进行伽马测试

表3.12 ArcherQA与Eclipse的平均伽马通过率

部位	2mm/2%	2mm/3%
头颈部（AXB算法）	95.2%	98.1%
头颈部	92.9%	96.4%
胸部	95.4%	98.1%
腹部	96.0%	98.6%

表3.19 ArcherQA与Monaco的平均伽马通过率

部位	2mm/2%	2mm/3%
头颈部	89.0%	94.7%
胸部	85.6%	92.1%
腹部	89.0%	93.4%

3 结果与讨论

任务3 集成与测试

性能分析

- Eclipse计算集群由12个节点组成 (2 × Intel E5 2620 V3)
- Archer使用i9 7960x + Titan V

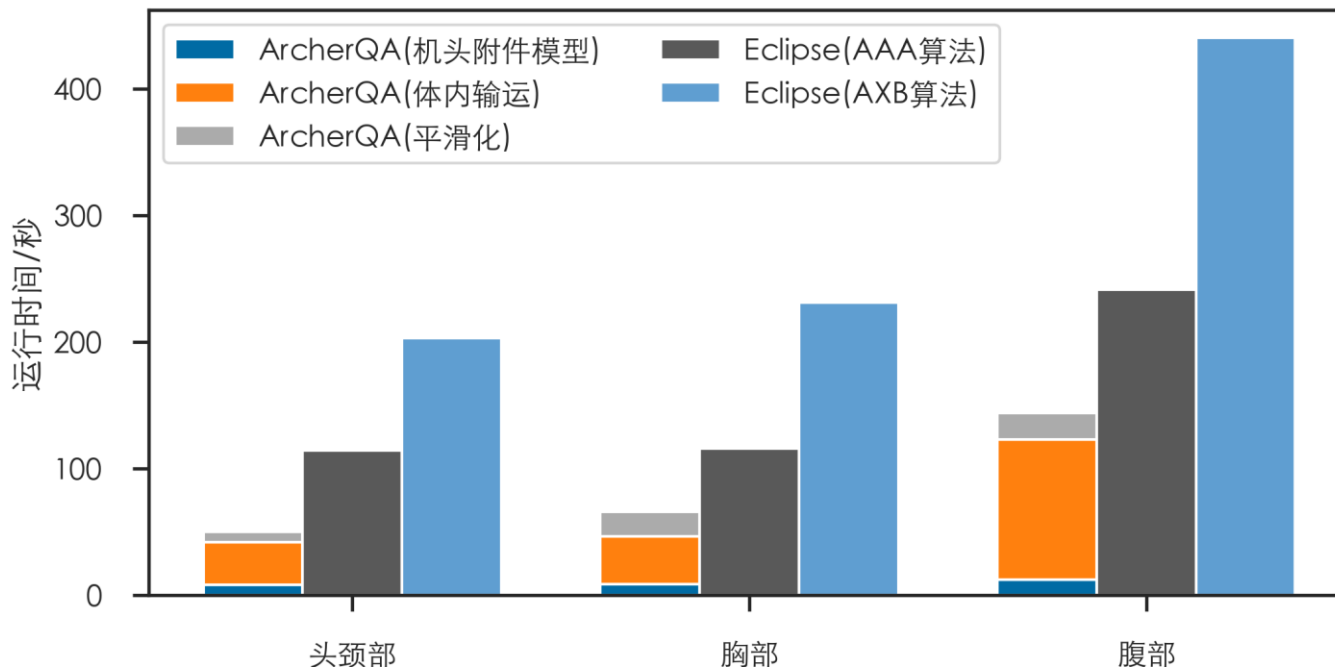


图3.42 Archer 与 Eclipse 计算时间对比图

表3.21 ArcherQA临床VMAT病例平均运行时间(秒)

	机头附件模型	体内输运	平滑化	总时间
头颈部	8.4	33.4	8.3	50.1
胸部	8.8	37.4	19.4	65.5
腹部	12.2	110.9	20.6	143.7

表3.22 Eclipse临床VMAT病例平均运行时间(秒)

	AAA算法	AXB算法
头颈部	114	203
胸部	116	231
腹部	241	440

3 结果与讨论

任务3 集成与测试

➤ Monaco参数优化

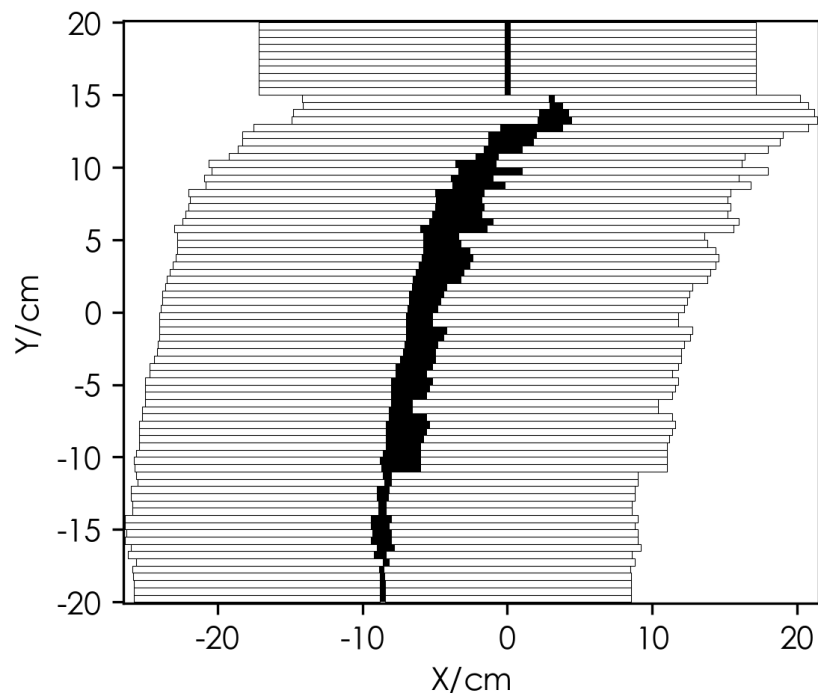


图3.52 临床 VMAT 子野测试例题

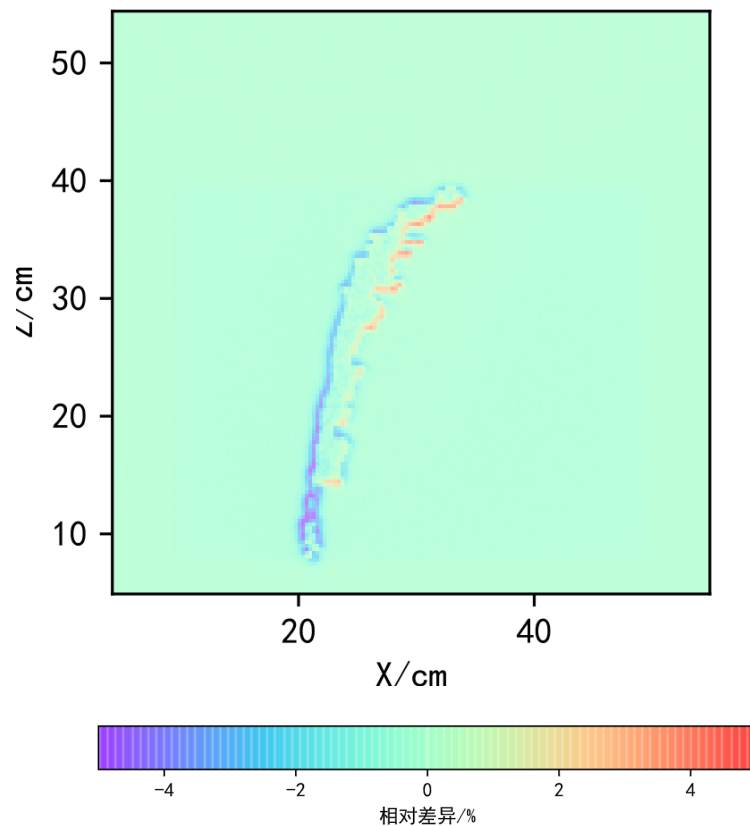


图3.54(a) Archer、Monaco冠状面差异

- 中心剂量一致
- 轮廓剂量差距可达5%
- Monaco小野计算不准确

3 结果与讨论

任务3 集成与测试

➤ ArcherQA VS PENELOPE

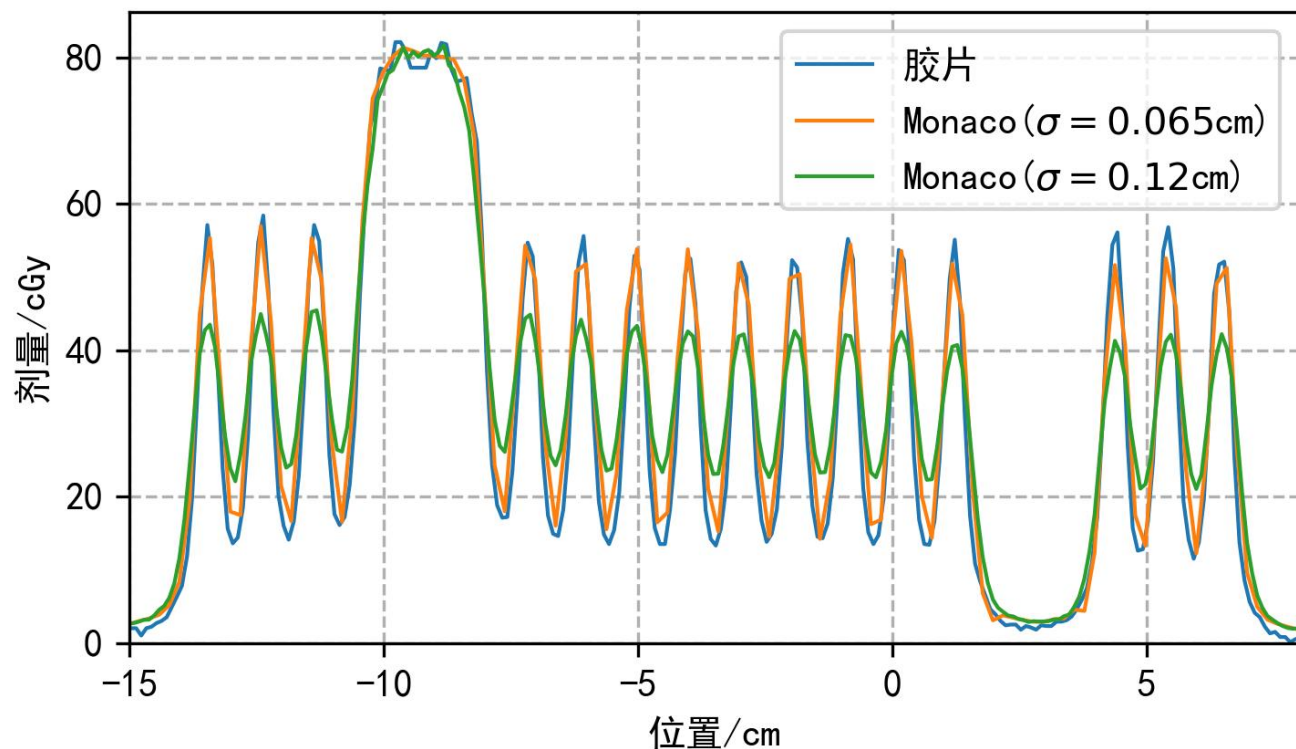


图3.55 Archer、Monaco计算和胶片测量的中心轴剂量曲线对比

- Monaco的峰值要明显低于胶片而谷值要明显高于胶片
- 郑大一附院Monaco配置文件中 $\sigma=0.12\text{cm}$
- ArcherQA虚拟源配置文件 $\sigma = 0.065\text{cm}$
- 将 σ 改成 0.065cm 后，Monaco的剂量曲线能与胶片测量结果相吻合

3 结果与讨论

➤ Monaco空腔测试

$20 \times 20 \text{cm}^2$ 开野

射束方向

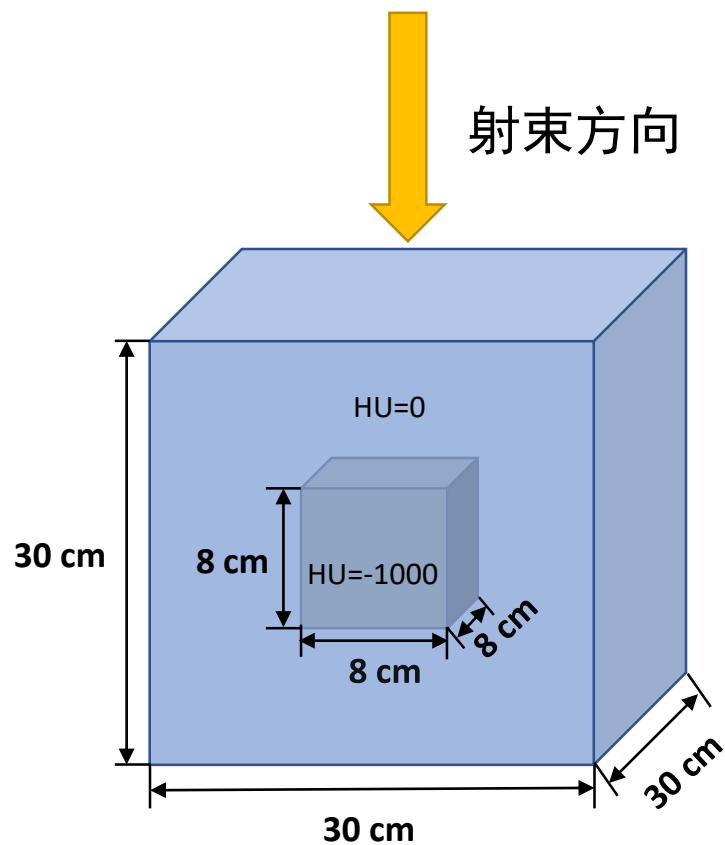
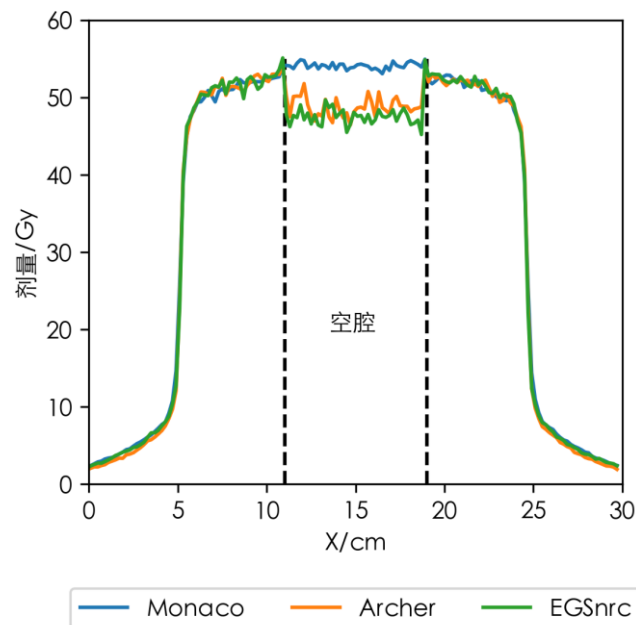
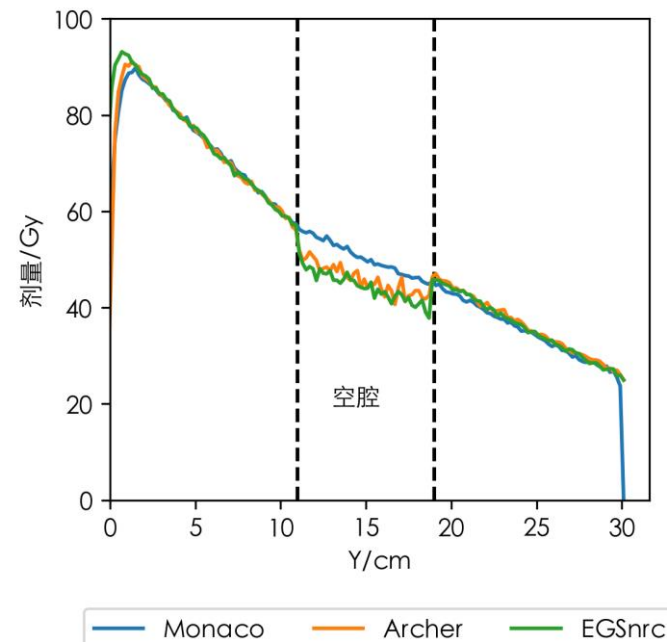


图3.49 体内空腔测试例题

任务3 集成与测试



(a)



(b)

图 3.50 体内空腔测试例题 Archer、EGSnrc 与 Monaco 结果对比
(a) 横向剂量 (b) 深度剂量

- Archer与EGSnrc在空腔处的剂量**低于**周围
- Monaco空腔处的剂量**高于**周围

Monaco在空腔处的剂量反常升高

4 总结

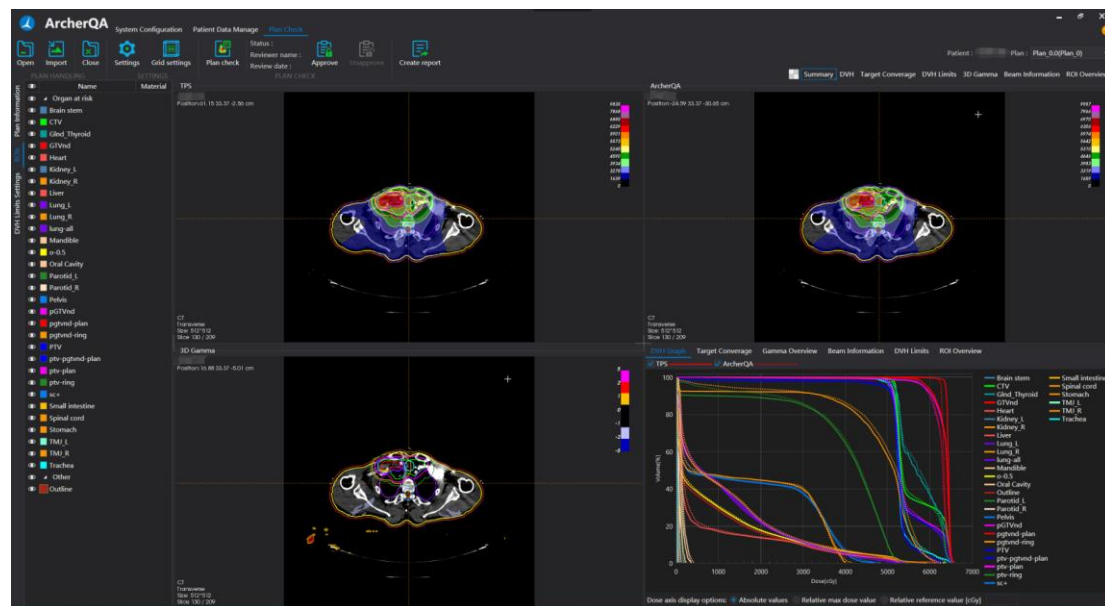
➤ 本课题完成了如下三个任务：

- ✓ 任务一完成了加速器虚拟源模型的构建并利用实验测量数据进行模型参数自动优化
- ✓ 任务二完成了机头附件的建模和光子输运快速计算方法
- ✓ 任务三集成到 ArcherQA 蒙特卡罗框架中并开展临床验证

4 总结

➤ 本课题的创新点在于：

1. 国际领先,国内第一次报道自主知识产权蒙特卡罗剂量验证软件



ArcherQA主界面

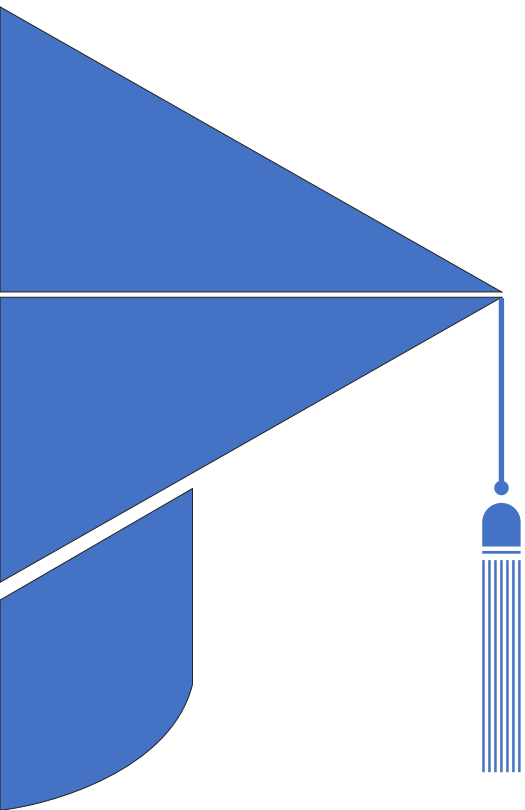
2. 研究了虚拟源和相空间文件的优缺点，实现了多种机型的自动调整，进行了大量临床验证

4.2 展望

- 进一步提升虚拟源的可扩展性，支持更多加速器和模式
- 读取加速器日志文件，实现治疗后的剂量验证

致谢

- 感谢各位老师在这五年间对我的指导
- 感谢父母对我的支持与理解
- 感谢各位评委老师的耐心听取



3 结果与讨论

任务1 虚拟源模型与自动优化

➤ 虚拟源性能

Varian TrueBeam 6MV相空间文件

- 总计 4.6×10^7 个粒子
- 文件大小为1.42GB

初级光子	次级光子	污染电子
38405461	7660974	343109

- 虚拟源生成耗时5秒

Intel i9 7960x (16核心32线程)

- 读取相空间文件耗时2秒

Intel P4500(最大读取速度3000MB/s)

虚拟源的优势不在于性能而在于可调试！