

## 医用直线加速器机房迷路改进设计研究

王武<sup>1</sup>, 李旭浩<sup>2</sup>, 金献测<sup>2</sup>

1. 温州医科大学附属第一医院医学工程处, 浙江 温州 325000; 2. 温州医科大学附属第一医院放化疗科, 浙江 温州 325000

**【摘要】**在原有医用直线加速器机房基础上,依据NCRP151报告,对加速器机房迷路进行改进,从而改变门口屏蔽厚度,使到达门口的剂量降低至合理剂量范围内,消除公众对辐射的恐惧心理。经改进设计发现,直接延长迷路达到24.4 m时,射线到达门口的辐射剂量为20.00  $\mu\text{Sv}/\text{week}$ ;改成90°拐弯延长迷路4.42 m时,射线到达门口的辐射剂量为19.60  $\mu\text{Sv}/\text{week}$ ;改成180°拐弯延长迷路2.7 m时,射线到达门口的辐射剂量为18.53  $\mu\text{Sv}/\text{week}$ 。改成180°拐弯迷路和90°拐弯迷路不仅可以减少迷路的延长距离,在造价上相对于传统安装的铅门也有优势。总之,医用直线加速器机房的迷路使用180°角拐弯延长法可最大程度降低有效剂量,并获得较高的性价比。

**【关键词】**直线加速器机房设计;辐射防护;迷路;辐射剂量计算

**【中图分类号】**R318; TU28

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)05-0501-05

### Improvement of linear accelerator treatment room maze

WANG Wu<sup>1</sup>, LI Xuhao<sup>2</sup>, JIN Xiance<sup>2</sup>

1. Department of Medical Engineering, the First Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325000, China; 2. Department of Radiotherapy and Chemotherapy, the First Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325000, China

**Abstract:** The purpose of this study is to improve the design of a linear accelerator treatment room maze based on NCRP151 report, so as to change the thickness of shielding door, decreasing the radiation dose at the gate and eliminating the public panic on radiation. The calculations after improvements reveal that the radiation dose at the gate is 20.00  $\mu\text{Sv}/\text{week}$  when the direct extension length of maze reaches 24.4 m; that the radiation dose at the gate is 19.60  $\mu\text{Sv}/\text{week}$  for a maze with an extension length of 4.42 m and a 90° bend; and that the radiation dose at the gate is 18.53  $\mu\text{Sv}/\text{week}$  for a maze with an extension length of 2.7 m and a 180° bend. The mazes with 90° and 180° bends not only decrease the necessary extension length, but also reduce the cost for gate and maze construction. In a conclusion, a linear accelerator treatment room maze with an extension of 180° bends can minimize the effective dose and achieve a high cost-effectiveness.

**Keywords:** linear accelerator treatment room design; radiation protection; maze; irradiation dose calculation

### 前言

癌症是全球主要公共卫生问题之一,约占全部死亡人口的四分之一<sup>[1-2]</sup>。随着肿瘤发病率的上升和人们对个人健康的重视,放射治疗被越来越多人熟知,它是一种利用电离辐射对肿瘤区域发射高能射

线杀死癌细胞,并尽量避免伤害正常细胞的疗法<sup>[3-4]</sup>。高能射线具有较强的穿透能力,在放射治疗中占重要地位<sup>[5-6]</sup>,因此,对治疗机房的剂量控制和设计需要严格要求。机房中的迷路设计不仅影响迷路外墙剂量,同时也要考虑到机房设计成本。很多研究报告表明,延长迷路和设置弯折能够降低迷路内的剂量<sup>[7-10]</sup>。本研究的目的是对原有的加速器迷路进行改造,使到达门口的剂量降低至合理剂量范围内。

### 1 材料与方法

#### 1.1 医用直线加速器

Elekta Synergy 医用直线加速器,其主要性能指标:10 MV X射线,X射线泄漏辐射率0.1%,在等中心处的最大辐射野40 cm×40 cm。

**【收稿日期】**2018-12-20

**【基金项目】**国家自然科学基金(11675122);温州市重大科技专项(2018ZY016)

**【作者简介】**王武,工程师,研究方向:医学工程设备管理和维修,E-mail:1123097608@qq.com;李旭浩,研究方向:放疗技术,E-mail:billy07@wzhospital.cn

**【通信作者】**金献测,博士,正高级工程师,研究方向:医学物理和放射治疗物理,E-mail:jinx1979@hotmail.com

### 1.2 加速器机房

撤除屏蔽门,对机房迷路进行改进设计。加速器机房位于地下一层,机房平面示意图见图1,其墙体为普通混凝土。直线加速器治疗中心为机房的正中心。

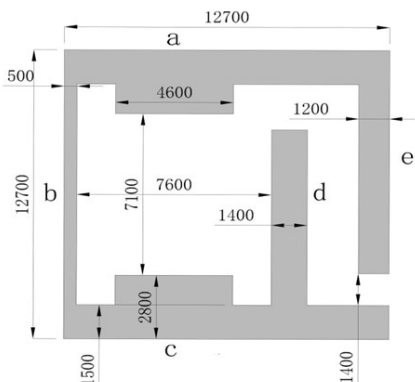


图1 典型机房平面示意图(mm)

Fig.1 Plan of a typical linear accelerator treatment room (mm)

### 1.3 迷路出口辐射剂量计算方法

根据NCRP151报告<sup>[1]</sup>,迷路门口处的泄漏和散射辐射总和( $H_{tot}$ )由以下几部分组成:①主束通过主屏蔽墙主墙a散射到防护门处的当量剂量 $H_s$ ;②直线加速器机头泄漏辐射一次散射的当量剂量 $H_{ls}$ ;③主束通过患者体表散射产生的当量剂量 $H_{ps}$ ;④射线直接穿过迷路内墙d的泄漏辐射当量剂量 $H_{LT}$ :

$$H_{tot} = fH_s + H_{ls} + H_{ps} + H_{LT} \quad (1)$$

其中, $f$ 的值为0.34。

### 1.4 迷路改进方案和门口辐射剂量计算

1.4.1 直接延长迷路 如图2所示,直接延长迷路可用以下公式计算得出。

(1)计算主射线通过主屏蔽墙主墙a后,散射至迷路外墙e,最后到达门口处的当量剂量 $H_s$ :

$$H_s = \frac{W \cdot U_c \cdot a_0 \cdot A_0 \cdot a_z \cdot A_z}{(d_h \cdot d_r \cdot d_z)^2} \quad (2)$$

其中, $A_0$ 为散射面积, $A_0 = 2.62 \text{ m}^2$ ;  $a_0$ 为 $A_0$ 的散射系数, $a_0 = 0.0021$ (10 MV,反射角 $75^\circ$ );  $A_z$ 为迷路内口投影到迷路外墙的横截面面积, $A_z = 7.67 \text{ m}^2$ ;  $a_z$ 为 $A_z$ 的反射系数, $a_z = 0.08$ (0.5 MV,反射角 $75^\circ$ );  $d_h$ 为放射源至 $A_0$ 的垂直距离, $d_h = 4.55 \text{ m}$ ;  $d_r$ 为 $A_0$ 中心沿主束散射方向经过迷路内墙边缘到迷路中线的距离, $d_r = 6.25 \text{ m}$ ;  $d_z$ 为迷路到测量点的距离, $d_z = (x - 3.53) \text{ m}$ ; 医院每周工作5天,每天有100名患者,每个患者平均接受2 Gy的剂量,故工作量 $W = 5 \times 100 \times 2 = 1000 \text{ Gy/week}$ ;  $U_c$ 为利用因子,根据考察区域被有用射线照射的情况进行取

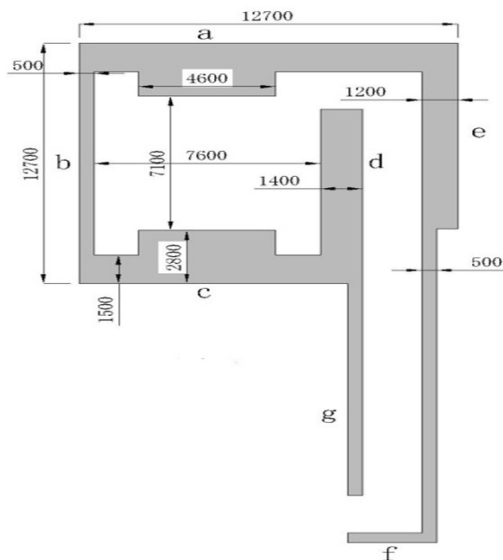


图2 直接延长迷路方案设计和计算参数(mm)

Fig.2 Design of a maze with a direct extension and calculation parameters (mm)

值,一般取1/4。

(2)加速器机头漏射至墙a的副墙,散射到达门口处的当量剂量 $H_{ls}$ :

$$H_{ls} = \frac{L_f \cdot W_L \cdot U_c \cdot a_1 \cdot A_1}{(d_{ls} \cdot d_{zz})^2} \quad (3)$$

其中, $L_f$ 为机头泄漏辐射率,一般取0.1%;  $W_L$ 为漏射区的工作量;  $a_1$ 为机头泄漏辐射至 $A_1$ 的反散射系数, $a_1 = 0.0038$ (10 MV,反射角 $0^\circ$ );  $A_1$ 为迷路入口可见面积, $A_1 = 9.72 \text{ m}^2$ ;  $d_{ls}$ 为放射源至 $A_1$ 中心点的距离, $d_{ls} = 8.52 \text{ m}$ ;  $d_{zz}$ 为 $A_1$ 中心点至测量点的距离。

(3)主束通过患者体表,散射至墙a副墙,最后到达门口处的当量剂量 $H_{ps}$ :

$$H_{ps} = \frac{a(\theta) \cdot W \cdot U_c \cdot \left(\frac{F}{400}\right) \cdot a_1 \cdot A_1}{(d_{sca} \cdot d_{sec} \cdot d_{zz})^2} \quad (4)$$

其中, $a(\theta)$ 为 $\theta$ 角时的散射比例, $a(\theta) = 0.00135$ (10 MV,反射角 $45^\circ$ );  $a_1$ 为机头泄漏辐射至 $A_1$ 的反散射系数, $a_1 = 0.22$ (0.5 MV,反射角 $45^\circ$ );  $A_1$ 为迷路入口可见面积, $A_1 = 6.57 \text{ m}^2$ ;  $F$ 是患者中点处的野面积,为 $1600 \text{ cm}^2$ ;  $d_{sca}$ 为源到散射计算点距离, $d_{sca} = 1 \text{ m}$ ;  $d_{sec}$ 为散射点到 $A_1$ 的距离, $d_{sec} = 7.87 \text{ m}$ 。

(4)射线直接穿过迷路内墙d的泄漏辐射当量剂量 $H_{LT}$ 。

根据迷路内墙c外关心位置(垂直墙面外30 cm处)算出辐射量,它由散射和漏射两部分组成。

①考虑散射所需要的主防护因子 $B_p$ :

$$B_p = \frac{p \cdot d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2 \cdot 400}{a \cdot W \cdot T \cdot F} \quad (5)$$

其中,  $p$  为防护的目标比例,  $d_{sec}$  为散射点到测量点的距离,  $d_{sca}$  为源到散射计算点距离, 其中  $d_{sec} = 3.8 + 1.4 + 1 + 0.3 = 5.5$  m,  $d_{sca} = 1$  m,  $F = (40 \times 40)$  cm<sup>2</sup>,  $a$  为被散射的比例,  $a = 0.000 381$  (10 MV, 散射角 90°),  $T = 1/4$ 。所需要的防护墙厚度  $S$ , 通过计算  $S = n \cdot TVL$ , 其中 TVL 为十分之一值层, 代表当特定辐射能量或能谱的 X 射线辐射、 $\gamma$  射线辐射窄束通过规定物质时, 比释动能率、照射量率或吸收剂量率减小到无该物质时所测量值的十分之一的规定物质的厚度<sup>[11]</sup>。  $n = \log(1/B)$ , 其中  $B$  为透射因子, 故得  $S = 50.38$  cm。

② 从漏射线考虑的防护因子  $B_l$ :

$$B_l = \frac{1\ 000p \cdot d_{sec}^2}{W \cdot T} \quad (6)$$

所需要的防护材料厚度  $S = TLV_1 + (n - 1) \cdot TLV_e$ 。其中  $TLV_1$  是第一个十分之一值层厚度,  $TLV_e$  是每一个额外十分之一值层厚度。故  $S = 85.10$  cm。

结果  $B_p = 0.001\ 59$ ,  $B_f = 0.002\ 42$ 。

由于二者相差大于一个十分之一值层厚度, 则取较大数值为次级屏蔽厚度<sup>[8]</sup>。故至少需要迷路内墙  $c$  厚度 85.10 cm, 但实际厚度为 140 cm, 所以不用考虑漏射和散射线, 直接从迷路内墙穿过到达门口。

故当直接延长迷路达到 24.4 m 时, 射线到达门口的辐射剂量为 20.00  $\mu$ Sv/week。

**1.4.2 90°角拐弯延长迷路** 如图3所示, 进行90°角拐弯延长迷路设计, 其门口散射计算过程如下所示。

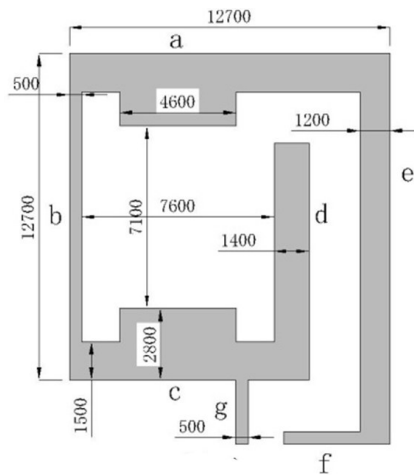


图3 90°角转弯迷路设计方案(mm)  
Fig.3 Design of a maze with a 90° bend (mm)

(1) 计算主射线通过主屏蔽墙主墙  $a$  后, 散射至迷路外墙  $e$ , 再经过延长迷路的  $f$  墙反射, 最后到达门口处的当量剂量  $H_s$ :

$$H_s = \frac{W \cdot U_c \cdot a_0 \cdot A_0 \cdot a_z \cdot A_z \cdot a_3 \cdot A_3}{(d_h \cdot d_r \cdot d_z \cdot d_4)^2} \quad (7)$$

其中,  $a_0 = 0.002\ 1$  (10 MV, 反射角 75°),  $a_z = a_3 = 0.08$  (0.5 MV, 反射角 75°),  $A_0 = 3.31$  m<sup>2</sup>,  $A_z = 4.11$  m<sup>2</sup>,  $A_3 = 9.80$  m<sup>2</sup>,  $d_h = 4.55$  m,  $d_r = 6.26$  m,  $d_z = 9.95$  m,  $d_4 = (x - 3.63)$  m。

(2) 加速器机头漏射至墙  $a$  副墙, 再经过拐弯处的  $f$  墙散射到达门口处的当量剂量  $H_{ls}$ :

$$H_{ls} = \frac{L_f \cdot W_L \cdot U_c \cdot a_1 \cdot A_1 \cdot a_2 \cdot A_2}{(d_{ls} \cdot d_{zz} \cdot d_3)^2} \quad (8)$$

其中,  $L_f = 0.001$ ,  $a_1 = 0.005\ 1$  (10 MV, 反射角 0°),  $W_L$  是漏射区的工作量,  $a_2 = 0.015$  (0.5 MV, 反射角 45°),  $A_1 = A_2 = 9.42$  m<sup>2</sup>,  $d_{ls} = 8.52$  m,  $d_{zz} = 12.25$  m,  $d_3 = (x - 3.49)$  m。

(3) 主束通过患者体表, 散射至墙  $a$  副墙, 再经过拐弯处的  $g$  墙散射, 最后到达门口处的当量剂量  $H_{ps}$ :

$$H_{ps} = \frac{a(\theta) \cdot W \cdot U_c \cdot \left(\frac{F}{400}\right) \cdot a_1 \cdot A_1 \cdot a_2 \cdot A_2}{(d_{sca} \cdot d_{sec} \cdot d_{zz} \cdot d_4)^2} \quad (9)$$

其中,  $a(\theta) = 0.001\ 35$  (10 MV, 反射角 45°),  $F = 1\ 600$  m<sup>2</sup>,  $a_1 = a_2 = 0.22$  (0.5 MV, 反射角 45°),  $A_1 = A_2 = 9.42$  m<sup>2</sup>,  $d_{sca} = 1$  m,  $d_{sec} = 7.87$  m,  $d_{zz} = 12.25$  m,  $d_4 = (x - 3.49)$  m。

故当 90° 拐弯延长迷路 4.42 m 时, 射线到达门口的辐射剂量为 19.60  $\mu$ Sv/week。

**1.4.3 180°角拐弯延长迷路** 如图4所示, 进行180°角拐弯延长迷路方案, 其门中散射剂量计算如下所示。

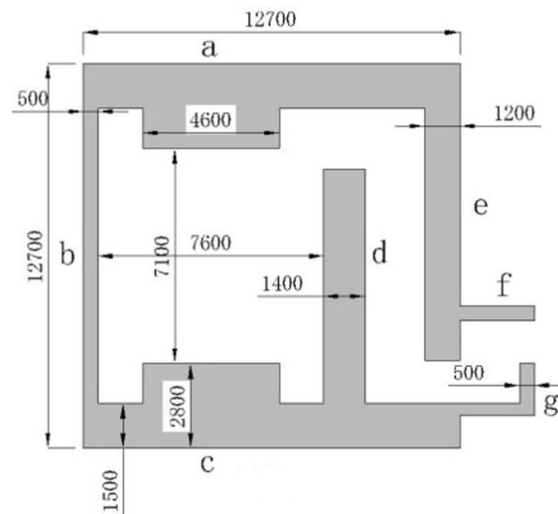


图4 180°拐弯延长迷路方案(mm)  
Fig.4 Design of a maze with a 180° bend (mm)

(1) 计算主射线通过主屏蔽墙主墙  $a$  后, 散射至迷路外墙  $e$ , 再经过拐弯处  $c$  副墙的反射, 最后到达门口处的当量剂量  $H_s$ :

$$H_s = \frac{W \cdot U_c \cdot a_0 \cdot A_0 \cdot a_z \cdot A_z \cdot a_3 \cdot A_3}{(d_h \cdot d_r \cdot d_z \cdot d_4)^2} \quad (10)$$

其中,  $a_0=0.0021$  (10 MV, 反射角  $75^\circ$ ),  $a_2=a_3=0.08$  (0.5 MV, 反射角  $75^\circ$ ),  $A_0=3.31 \text{ m}^2$ ,  $A_2=4.11 \text{ m}^2$ ,  $A_3=8 \text{ m}^2$ ,  $d_h=4.55 \text{ m}$ ,  $d_r=6.26 \text{ m}$ ,  $d_z=7.57 \text{ m}$ ,  $d_4=(x-1.4) \text{ m}$ 。

(2) 加速器机头漏射至墙 a 副墙, 再经过拐弯处的 c 副墙散射到达门口处的当量剂量  $H_{ls}$ :

$$H_{ls} = \frac{L_f \cdot W_L \cdot U_c \cdot a_1 \cdot A_1 \cdot a_2 \cdot A_2}{(d_{ls} \cdot d_{zz} \cdot d_3)^2} \quad (11)$$

其中,  $L_f=0.001$ ,  $a_1=0.0038$  (10 MV, 反射角  $0^\circ$ ),  $a_2=0.015$  (0.5 MV, 反射角  $45^\circ$ ),  $A_1=10.54 \text{ m}^2$ ,  $A_2=9.78 \text{ m}^2$ ,  $d_{ls}=8.52 \text{ m}$ ,  $d_{zz}=9.7 \text{ m}$ ,  $d_3=(x-1.4) \text{ m}$ 。

(3) 主束通过患者体表, 散射至墙 a 副墙, 再经过拐弯处的 c 副墙散射, 最后到达门口处的当量剂量  $H_{ps}$ :

$$H_{ps} = \frac{a(\theta) \cdot W \cdot U_c \cdot \left(\frac{F}{400}\right) \cdot a_1 \cdot A_1 \cdot a_2 \cdot A_2}{(d_{sca} \cdot d_{sec} \cdot d_{zz} \cdot d_4)^2} \quad (12)$$

其中,  $a(\theta)=0.00135$  (10 MV, 反射角  $45^\circ$ ),  $F=1600 \text{ m}^2$ ,  $a_1=a_2=0.22$  (0.5 MV, 反射角  $45^\circ$ ),  $A_1=10.54 \text{ m}^2$ ,  $A_2=9.78 \text{ m}^2$ ,  $d_{sca}=1 \text{ m}$ ,  $d_{sec}=7.87 \text{ m}$ ,  $d_{zz}=9.7 \text{ m}$ ,  $d_4=(x-1.4) \text{ m}$ 。

故当  $180^\circ$  拐弯延长迷路 2.7 m 时, 射线到达门口的辐射剂量为  $18.53 \mu\text{Sv/week}$ 。

按照计算所得迷路延长距离从短到长依次是  $180^\circ$  拐弯迷路、 $90^\circ$  拐弯迷路、直接延长迷路。

## 2 造价估算

### 2.1 不延长, 安装铅门

按上述方法算出到达门口辐射的剂量为  $202.35 \mu\text{Sv/week}$ , 周剂量限值为  $20 \mu\text{Sv/week}$ , 透射因子  $B$ :

$$B = \frac{20}{202.35} = 0.099 \quad (13)$$

所需铅的厚度  $X_L$ :

$$X_L = \text{TVL} \cdot \log(1/B) \quad (14)$$

5 mm 铅当量的  $4 \text{ m}^2$  铅门市场价为 20 000 元。

### 2.2 直接延长迷路

迷路比之前增加了 14.7 m, 延长的两侧墙体和顶, 因为处于地下室, 且位于延长迷路段, 原来顶部厚度足够。墙需要混凝土的厚度  $X_c = \text{TVL} \cdot \log(1/B) = 11.9 \text{ cm}$ , 安全起见, 延长迷路的墙体都按照 50 cm 来计算。所需要的体积  $V(\text{m}^3)$ :

$$V = 14.7 \times 4 \times (0.5 + 0.5) = 58.8 \quad (15)$$

浙江省 2017 年第一季度 32.5 强度等级混凝土价格  $1 \text{ m}^3$  单价为 375 元, 人工费 208 元/d, 故总费用 =  $58.8 \times 375 + 208 = 22\,258$  元。

### 2.3 $90^\circ$ 角拐弯延长迷路

迷路比之前增加了 4.42 m, 延长的一侧墙体, 因为处于地下室, 且位于延长迷路段, 原来顶部厚度足够。所需要的体积  $V(\text{m}^3)$ :

$$V = (4.42 - 1.4 + 2.5 + 2) \times 4 \times 0.5 = 15.04 \quad (16)$$

浙江省 2017 年第一季度 32.5 强度等级混凝土价格  $1 \text{ m}^3$  单价为 375 元, 人工费 208 元/d。故总费用 =  $15.04 \times 375 + 208 = 5\,848$  元。

### 2.4 $180^\circ$ 角拐弯延长迷路

迷路比之前增加了 2.7 m, 延长的一侧墙体, 因为处于地下室, 且位于延长迷路段, 原来顶部厚度足够。所需要的体积  $V(\text{m}^3)$ :

$$V = (2.7 - 1.4 + 2 + 2.5) \times 4 \times 0.5 = 11.6 \quad (17)$$

浙江省 2017 年第一季度 32.5 强度等级混凝土价格  $1 \text{ m}^3$  单价为 375 元, 人工费 208 元/d。故总费用 =  $11.6 \times 375 + 208 = 4\,558$  元。

故  $90^\circ$  角拐弯延长迷路和  $180^\circ$  角拐弯延长迷路相对于传统安装铅门有价格优势。

## 3 结论与讨论

加速器机房迷路按直接延长、 $90^\circ$  角拐弯延长、 $180^\circ$  角拐弯延长 3 种方法, 分别延长 24.4、4.42、2.7 m 后, 射线到达门口的辐射剂量符合剂量控制水平。该医用直线加速器机房的迷路使用  $180^\circ$  角拐弯延长法可最大程度降低有效剂量, 并获得较高的性价比。

当今社会随着肿瘤发病率的逐年提高, 放疗在肿瘤治疗中的应用越来越多, 它给人们带来巨大利益的同时也存在潜在的危害, 做好放射防护变得十分重要<sup>[12-13]</sup>。辐射防护的基本任务是在保护环境, 保障从事辐射的工作人员, 以及他们后代安全和健康的前提下, 进行有必要的辐射照射工作<sup>[14-15]</sup>。

本设计基于 Z 型迷路机房进行改造, 目前一般认为在屏蔽辐射方面的作用 Z 型迷路优于 L 型迷路<sup>[16-17]</sup>。对于不同方向改变迷路设计计算方法基本一致, 主要差异在于散射线和漏射线经过屏蔽墙的碰撞次数和角度, 在医用直线加速器能量确定的基础上, 迷路门口的辐射剂量和迷路的走向、长度、宽度和内墙厚度等因素相关<sup>[18-19]</sup>。这次设计主要考虑迷路的长度和走向的变化, 来改变门口辐射的水平。

在屏蔽材料的选择上, 一般优先选择混凝土, 若机房空间有限时, 则可采用主屏蔽墙体加铅材料, 将混凝土与铅混合使用。改建机房时, 铅材料既能很好地满足屏蔽要求又能节约空间, 但成本会相对偏高, 总体符合辐射防护最优化原则<sup>[20-22]</sup>。

在本研究的设计改进方案中未考虑中子等因素, 只适用于 X 线  $\leq 10 \text{ MV}$  的加速器, 只考虑漏射和

散射的总和 $H_{Tot}$ ,来计算门口所需屏蔽材料的厚度或者计算延长迷路使门口辐射剂量达到规定剂量范围内所需的长度。预算价格不精确,实际会略有差异。

## 【参考文献】

- [1] MILLER K D, SIEGEL R L, LIN C C, et al. Cancer statistics, 2016 [J]. CA Cancer J Clin, 2016, 66(1): 7-30.
- [2] CHEN W, ZHENG R, BAADE P D, et al. Cancer statistics in China, 2015[J]. CA Cancer J Clin, 2016, 66(2): 115-132.
- [3] DÖRR W, GABRYŚ D. The principles and practice of re-irradiation in clinical oncology: an overview[J]. Clin Oncol (R Coll Radiol), 2018, 30(2): 67-72.
- [4] Intensity Modulated Radiation Therapy Collaborative Working Group. Intensity-modulated radiotherapy: current status and issues of interest [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2001, 51(4): 880-914.
- [5] JACOBS M, BOERSMA L, DEKKER A, et al. What is the impact of innovation on output in healthcare with a special focus on treatment innovations in radiotherapy? A literature review[J]. Br J Radiol, 2017, 90(1079): 20170251.
- [6] KOUGIOUMTZOPOULOU A, ZYGOGIANNI A, LIAKOULI Z, et al. The role of radiotherapy in bone metastases: a critical review of current literature[J]. Eur J Cancer Care (Engl), 2017, 26(6): 12724.
- [7] 中华人民共和国卫生部. 放射治疗机房的辐射屏蔽规范第2部分: 电子直线加速器放射治疗机房: GBZ/T 201.2-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
The Minister of Health of the People's Republic of China. Radiation shielding requirements for radiotherapy room-Part 2: radiotherapy room of electron linear accelerators: GBZ/T201.2-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [8] 李鑫. 医用电子直线加速器机房迷路最优化设计研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.  
LI X. Optimal maze design for linear accelerator[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [9] KIM S. Gamma radiation transmission along the multibend mazes[J]. Appl Radiat Isot, 2016, 114: 45-49.
- [10] 李雪琴, 陈栋梁, 彭建亮, 等. 电子直线加速器机房中子辐射屏蔽估算与评价[J]. 中国职业医学, 2014, 41(5): 518-521.  
LI X Q, CHEN D L, PENG J L, et al. Calculation and evaluation on the shielding of neutron irradiation in electron linear accelerator rooms [J]. China Occupational Medicine, 2014, 41(5): 518-521.
- [11] National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities [ R ]. NCRP Report No.151. Bethesda: NCRP, 2005.
- [12] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.  
HU Y M. Radiation oncology physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999.
- [13] HENRIQUES S. IAEA radiation protection initiatives [J]. Health Phys, 2015, 108(2): 295.
- [14] KASE K R. Twelfth Annual Warren K. Sinclair keynote address-the influence of the NCRP on radiation protection in the United States: guidance and regulation[J]. Health Phys, 2016, 110(2): 127-145.
- [15] 王鹏程. 放射物理与辐射防护[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.  
WANG P C. Radiology physics and radiation protection [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016.
- [16] 曹磊, 张文艺, 刘柏群, 等. 医用加速器机房迷路最优化设计的初步探讨[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2007, 27(3): 263-264.  
CAO L, ZHANG W Y, LIU B Q, et al. Initial investigation on the optimal maze design for linear accelerator [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2007, 27(3): 263-264.
- [17] AL-AFFAN I A, HUGTENBURG R P, BARI D S, et al. Dose reduction of scattered photons from concrete walls lined with lead: implications for improvement in design of megavoltage radiation therapy facility mazes[J]. Med Phys, 2015, 42(2): 606-614.
- [18] 李海亮, 梁红日, 朱建国, 等. 有用线束朝向迷路内墙的加速器机房辐射屏蔽计算[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2013, 33(4): 427-430.  
LI H L, LIANG H R, ZHU J G, et al. Radiation protection calculation on the maze with primary radiation exposure in a linear accelerator room [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2013, 33(4): 427-430.
- [19] 阳先毅. 医用电子直线加速器老机房改建辐射防护最优化研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.  
YANG X Y. Reconstruction of a linear accelerator room for optimal radiation protection [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016.
- [20] 姜文华, 孙健, 王冠, 等. 15 MV 医用电子直线加速器机房屏蔽设计防护效果评估[J]. 中国职业医学, 2015, 42(3): 322-325.  
JIANG W H, SUN J, WANG G, et al. Protection effect assessment of the shielding of 15 MV medical electron linear accelerator[J]. China Occupational Medicine, 2015, 42(3): 322-325.
- [21] AL-AFFAN I A, EVANS S C, QUTUB M, et al. A novel technique to optimise the length of a linear accelerator treatment room maze without compromising radiation protection[J]. J Radiol Prot, 2018, 38(1): 48-60.
- [22] SØRENSEN T H, OLSEN K J, BEHRENS C F. Radiation protection of linac bunkers. A user-friendly approach[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2015, 165(1-4): 503-505.

(编辑:薛泽玲)