

基于水吸收剂量校准因子的高能光子束 和电子束吸收剂量测定指南

Absorbed dose determination in high-energy photon beams and electron beams
based on standards of absorbed dose to water

国家癌症中心/国家肿瘤质控中心
2021-12-19 发布

目 次

前言	I
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 吸收剂量测定的人员要求和设备要求	1
4.1 人员要求	1
4.2 设备要求	2
5 基于水吸收剂量校准因子的高能光子束吸收剂量测定	2
5.1 剂量学设备要求	2
5.2 射线质的选择和测量要求	3
5.3 参考条件下吸收剂量的测定方法	4
5.4 工作级电离室交叉校准方法	7
5.5 吸收剂量测定的不确定度分析	7
6 基于水吸收剂量校准因子的高能电子束吸收剂量测定	8
6.1 剂量学设备要求	8
6.2 射线质的选择和测量要求	9
6.3 参考条件下吸收剂量的测定方法	10
6.4 工作级电离室交叉校准方法	11
6.5 吸收剂量测定的不确定度分析	17
7 用户条件下测量时的注意事项和主要影响量的修正	18
7.1 用户条件下测量时的注意事项	18
7.2 温度气压修正	19
7.3 静电计校准因子	19

7.4 极化效应修正.....	19
7.5 复合效应修正.....	20
图1 高能光子束 $TPR_{20,10}$ 的测量示意图	3
表1 电离室剂量计的计量性能要求.....	2
表2 高能光子束水吸收剂量测定的参考条件.....	4
表3 不同射线质 $TPR_{20,10}$ 的高能光子束中不同型号指形电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）	5
表4 在水模体参考深度处测定高能光子束吸收剂量的不确定度评估.....	8
表5 高能电子束 R_{50} 的测量参考条件.....	9
表6 高能电子束水吸收剂量测定的参考条件.....	10
表7 不同射线质 R_{50} 的高能电子束中不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）	13
表8 不同射线质 R_{50} 的高能电子束中不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 高能电子束中校准, Q_{int} 取 $7.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）	15
表9 在水模体参考深度处测定高能电子束吸收剂量的不确定度评估（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）	17
表10 在水模体参考深度处测定高能电子束吸收剂量的不确定度评估（基于电离室在 高能电子束中校准）	18
表11 脉冲式辐射场中使用双电压法计算 k_s 的拟合系数.....	20

前 言

本指南按照 GB/T 1.1-2009 给出的规划起草。

本指南由国家肿瘤质控中心提出。

本指南由国家肿瘤质控中心归口。

本指南项目申请单位四川省肿瘤医院·电子科技大学医学院附属肿瘤医院感谢放疗质控专家委员会委员及主审在指南审定过程中提供的专家意见（名单在下方列出，其中委员排名不分先后）；感谢张新高级工程师 [瓦里安医疗器械贸易（北京）有限公司] 和何海青编辑（《中华放射肿瘤学杂志》编辑部）对指南稿件编排规范给予的专业意见；感谢指南起草小组成员在指南起草过程中付出的努力；感谢放疗质控专家委员会秘书处 在指南征集、修订、印刷发布过程中的付出；感谢维斯安（上海）医疗器械有限公司给予指南印刷工作的支持。

本指南主要起草人：

郎锦义、王 培、姚杏红、黎 杰、康盛伟、唐 斌、廖雄飞、杨 凤：四川省肿瘤医院·电子科技大学医学院附属肿瘤医院

胡银祥：贵州医科大学附属医院

徐志勇：上海市胸科医院·上海交通大学附属胸科医院

尹 勇：山东省肿瘤医院

陈 利：中山大学肿瘤防治中心

本指南审定人：

王 坤（主审）：中国计量科学研究院

于 洪：辽宁省肿瘤医院

王 平：天津市肿瘤医院

王小虎：中国科学院近代物理研究所/兰州重离子医院

王若峥：新疆医科大学附属肿瘤医院

王建华：河南省肿瘤医院

王绿化：中国医学科学院肿瘤医院深圳医院

邓小武：中山大学肿瘤防治中心
卢冰：贵州医科大学附属医院/贵州省肿瘤医院
兰胜民：山西省肿瘤医院
曲宝林：解放军总医院第一医学中心
朱小东：广西医科大学附属肿瘤医院/广西医科大学附属武鸣医院
朱广迎：中日友好医院
朱远：中国科学院大学附属肿瘤医院（浙江省肿瘤医院）
刘士新：吉林省肿瘤医院
刘孟忠：中山大学肿瘤防治中心
许青：复旦大学附属肿瘤医院
折虹：宁夏医科大学总医院肿瘤医院
李光：中国医科大学附属第一医院
李宝生：山东省肿瘤医院
李晔雄：中国医学科学院肿瘤医院
吴永忠：重庆大学附属肿瘤医院
吴君心：福建省肿瘤医院
何侠：江苏省肿瘤医院
张大昕：哈尔滨医科大学附属第一医院
张福泉：北京协和医院
陈凡：青海大学附属医院/青海大学附属肿瘤医院
陈明：中山大学肿瘤防治中心
郁志龙：内蒙古医科大学附属医院
金晶：中国医学科学院肿瘤医院深圳医院/中国医学科学院肿瘤医院
夏云飞：中山大学肿瘤防治中心
夏廷毅：空军特色医学中心
钱立庭：中国科学技术大学附属第一医院
郭小毛：复旦大学附属肿瘤医院
席许平：湖南省肿瘤医院
韩春：河北医科大学第四医院

谢丛华：武汉大学中南医院

潘建基：福建省肿瘤医院

戴建荣：中国医学科学院肿瘤医院

引 言

随着放射治疗的发展,我国已进入精准放疗时代,对放疗设备传递的剂量准确度提出了更高的要求,也对外照射射束的吸收剂量测定精度提出了更高的要求。之前,基于空气比释动能/照射量校准因子的吸收剂量测定规程中,需要使用众多的转换因子和修正因子,使得吸收剂量测定时引入了较大的不确定度。相比而言,基于水吸收剂量校准因子的吸收剂量测定规程中,电离室校准的条件和用户射束中测量的条件相似,校准因子已经考虑了电离室的个体差异,从而减小了电离室个体差异引起的吸收剂量测定不确定度;标准实验室也可以更方便地测定电离室的能量依赖性,从而减小了射线质引起的吸收剂量测定不确定度。此外,进行吸收剂量计算时,无需量的转换计算,物理概念更简单,计算公式更简化,进一步降低了吸收剂量测定过程中引入误差的风险。因而,基于水吸收剂量校准因子来进行吸收剂量测定具有较大的优势。

因国内最新水吸收剂量校准规范(《放射治疗用电离室剂量计水吸收剂量校准规范》)主要参考 IAEA TRS-398 建立放疗剂量量值体系,本指南也主要参考 IAEA TRS-398 来制订,旨在为国内医疗机构(指南中称用户)基于水吸收剂量校准因子测定外照射高能光子束和高能电子束的吸收剂量提供指导,指南中的吸收剂量测定条件和 k_Q 因子不适用于螺旋断层放疗系统。

基于水吸收剂量校准因子的高能光子束和电子束吸收剂量测定指南

1 范围

本指南规定了医用直线加速器高能射束基于水吸收剂量校准因子的吸收剂量测定方法及相关要求。

本指南适用于以下两种医用直线加速器射束的吸收剂量测定：

(1) 由能量范围 1MeV~50MeV 的电子束产生的高能光子束 ($TPR_{20,10}$ 范围为 0.50~0.84)，不包括螺旋断层放疗系统产生的高能光子束；

(2) 能量范围 3MeV~50MeV 的高能电子束 (R_{50} 范围为 1~20 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

2 规范性引用文件

下列引用文件对于本指南的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

JJG 912-2010 治疗水平电离室剂量计检定规程

YY/T 0976-2016 医用电气设备放射治疗用电离室剂量计

JJF 1743-2019 放射治疗用电离室剂量计水吸收剂量校准规范

IAEA TRS-398 Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy

3 术语和定义

JJG 912-2010、YY/T 0976-2016、JJF 1743-2019 界定的术语和定义适用于本文件。

4 吸收剂量测定的人员要求和设备要求

4.1 人员要求

吸收剂量测定应由持有《放射人员工作证》《大型医用设备上岗合格证》或《全国医用设备使用人员业务能力考评合格证》的医学物理师来负责，该医学物理师应在省级三甲及以上医院经过半年以上的放疗物理专业培训，并取得合格证书。进行吸收剂量测定的物理师应接受过专门针对吸收剂量测定的培训，且熟悉剂量计系统和加速器的性能，能正确操作剂量计系统、水箱系统和加速器系统。

4.2 设备要求

用于吸收剂量测定的剂量计，应为电离室型剂量计。电离室剂量计系统的主要计量性能指标应符合表 1 的要求。用于加速器吸收剂量测定的电离室剂量计必须按照国家计量检定规程进行定期检定和校准，并在校准有效期内使用。

吸收剂量测定过程中使用的温度计，要求测量范围为 $0^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，最小分度值不大于 0.2°C ；气压计，要求测量范围为 $86\text{kPa}\sim 106\text{kPa}$ ，最小分度值不大于 0.1kPa 。

表 1 电离室剂量计的计量性能要求

项目	参考级剂量计	工作级剂量计
测量重复性	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.5\%$
示值非线性	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.5\%$
长期稳定性	$\pm 0.5\%/年$	$\pm 1.0\%/年$
辐照后漏电流	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$
零点漂移	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$
零点位移	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$
电离室旋转影响	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.5\%$

5 基于水吸收剂量校准因子的高能光子束吸收剂量测定

5.1 剂量学设备要求

5.1.1 电离室

推荐使用指形电离室来测定高能光子束的吸收剂量，无论是在标准实验室校准时，还是在用户射束中测量时，指形电离室的测量参考点位于电离室中心轴上的空腔体积中心。指形电离室应在参考射线质 Q_0 中校准后，或用已在参考射线质 Q_0 中校准过的指形电离室交叉校准后才可用于测定吸收剂量。

5.1.2 模体和防水套

推荐使用水模体测定高能光子束的吸收剂量，水模体的大小范围应在测量深度、射野的四个方向上向外延伸至少 5cm ，最大测量深度处向下延伸至少 5cm ，一般要求不小于 $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 。

对于横向射束，可以使用塑料模体测量。计算电离室测量时的放置深度时，应用模体的等效水厚度，用公式 $t_{win}\cdot\rho_{pl}$ 来计算，其中 t_{win} 为模体的厚度， ρ_{pl} 为模体的物理密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)，比如常用的塑料模体材质 PMMA 和聚乙烯的物理密度分别为 $\rho_{PMMA}=1.19\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $\rho_{polystyrene}=1.06\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

对于不防水的电离室，测量时应该使用 PMMA 材质的防水套，厚度应不超过 1.0 mm。电离室室壁和防水套之间应有 0.1~0.3 mm 的空隙，使电离室空腔内的气压易于平衡。进行吸收剂量测定时，应使用与电离室校准时相同的防水套，如果没有相同的防水套，则需使用材质相同且厚度相近的防水套。

5.2 射线质的选择和测量要求

医用直线加速器产生的高能光子束的射线质 Q 通常可以用水模体中的组织模体比 ($TPR_{20,10}$ ，即源到探头的距离 100 cm、射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 时，水模体中 20 cm 深度和 10 cm 深度的吸收剂量比值)、 $PDD(10)_x$ (源皮距 100 cm、射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 时，10 cm 深度的百分深度剂量)、 d_{80} (源皮距 100 cm、射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 时，80% 深度剂量对应的深度) 来表示。本指南选择 $TPR_{20,10}$ 来表示高能光子束的射线质 Q ，是因为 $TPR_{20,10}$ 是一个比值，不仅是衡量光子束在最大剂量深度之后近似指数衰减的指标，也能有效消除入射束中电子污染对射线质的影响，有效消除测量时电离室摆位误差对射线质的影响。指形电离室和平行板电离室都可以用来测量 $TPR_{20,10}$ ，测量时保持源到电离室的距离 (SCD) 100 cm 不变，电离室参考点所在平面的射野大小为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ，参考点所在的深度分别为 10 cm 和 20 cm。高能光子束 $TPR_{20,10}$ 测量的示意图如图 1 所示。

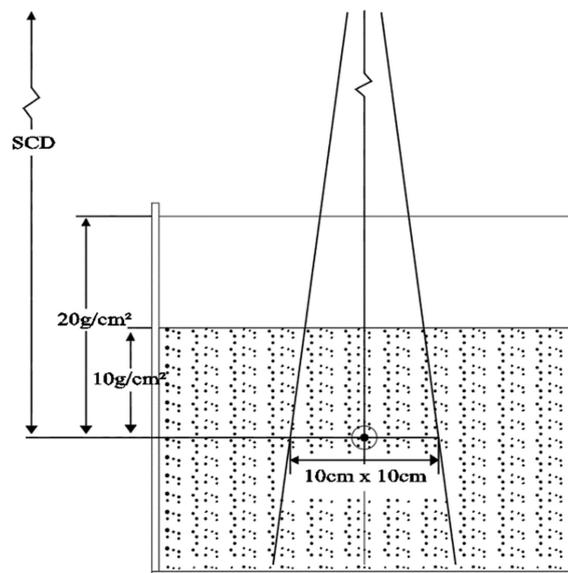


图 1 高能光子束 $TPR_{20,10}$ 的测量示意图

$TPR_{20,10}$ 也可以由 $PDD_{20,10}$ 通过公式 (1) 计算得到：

$$TPR_{20,10} = 1.2661 \cdot PDD_{20,10} - 0.0595 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$PDD_{20,10}$ ——源皮距 (SSD，源到模体表面的距离) 100 cm、射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 时，水模体中 20 cm 深度和 10 cm 深度的百分深度剂量 (PDD) 比值。

采集 PDD 曲线时，扫描方向应从水底往水面方向，以减小扰动效应。

5.3 参考条件下吸收剂量的测定方法

5.3.1 吸收剂量测定的参考条件

水吸收剂量测定的参考条件如表 2 所示。

表 2 高能光子束水吸收剂量测定的参考条件

影响量	参考值或参考指标
模体材料	水
电离室类型	指形电离室
测量深度 z_{ref}	$TPR_{20,10} < 0.7$, $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (或 $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$) $TPR_{20,10} \geq 0.7$, $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$
电离室参考点	位于指形电离室中心轴上的空腔体积中心
电离室参考点放置的位置	位于测量深度 z_{ref}
SSD 或 SAD	100 cm^a
射野大小	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}^b$
^a 一般为 SSD 摆位, 对于必须按 SAD 摆位来测定参考吸收剂量的情况, 有时 SAD 达不到 100 cm 的条件, 应按照国家实际加速器的 SAD 摆位来测定吸收剂量 ^b 一般指 SSD 摆位条件下模体表面的射野大小, 对于按 SAD 摆位的情况, 指模体中测量深度处电离室层面的射野大小, 即加速器等中心层面的射野大小	

5.3.2 参考条件下吸收剂量的测定方法

参考条件下测定射线质为 Q 的高能光子束的吸收剂量, 计算公式为:

$$D_{W,Q} = M_Q \cdot N_{D,W,Q_0} \cdot k_{Q,Q_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中,

$D_{W,Q}$ ——射线质 Q 的高能光子束在水模体参考深度 z_{ref} 处的吸收剂量, 单位为戈瑞 (Gy);

M_Q ——在射线质 Q 中经过修正后的电离室剂量计读数 (应经温度气压、静电计不同、复合效应和极化效应的修正, 详见第 7 节), 单位为 rdg (读数或指示值) 或库仑 (C);

N_{D,W,Q_0} ——剂量计在标准实验室参考射线质 Q_0 中校准的水吸收剂量校准因子, 单位为 Gy/C 或 Gy/ rdg ;

k_{Q,Q_0} ——电离室的射线质修正因子, 用于修正电离室在用户射线质 Q 和参考射线质 Q_0 中测量的响应差异。

当参考射线质为 $^{60}\text{Co} \gamma$ 射线时, 用户射线质 Q 中各种不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 如表 3 所示, k_{Q,Q_0} 为以 $TPR_{20,10}$ 为函数的计算值。对于不防水的电离室, 计算时统一使用了 0.5 mm 的 PMMA 防水套, 不大于 1 mm 的防水套对 k_{Q,Q_0} 的影响不超过 0.1% 。表 3 中未给出的 k_{Q,Q_0} 值可用内插法计算得到。

表 3 不同射线质 $TPR_{20,10}$ 的高能光子束中不同型号指形电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）

电离室型号	射线质 $TPR_{20,10}$														
	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84
Capintec PR-05P mini	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.998	0.996	0.994	0.991	0.987	0.983	0.975	0.968	0.960	0.949
Capintec PR-05 mini	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.998	0.996	0.994	0.991	0.987	0.983	0.975	0.968	0.960	0.949
Capintec PR-06C/G Farmer	1.001	1.001	1.000	0.998	0.998	0.995	0.992	0.990	0.988	0.984	0.980	0.972	0.965	0.956	0.944
Exradin A2 Spokas	1.001	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.996	0.994	0.992	0.989	0.986	0.979	0.971	0.962	0.949
Exradin T2 Spokas	1.002	1.001	0.999	0.996	0.993	0.988	0.984	0.980	0.977	0.973	0.969	0.962	0.954	0.946	0.934
Exradin A1 mini Shonka	1.002	1.002	1.001	1.000	1.000	0.998	0.996	0.994	0.991	0.986	0.982	0.974	0.966	0.957	0.945
Exradin T1 mini Shonka	1.003	1.001	0.999	0.996	0.993	0.988	0.984	0.980	0.975	0.970	0.965	0.957	0.949	0.942	0.930
Exradin A12 Farmer	1.001	1.001	1.000	1.000	0.999	0.997	0.994	0.992	0.990	0.986	0.981	0.974	0.966	0.957	0.944
Far West Tech IC-18	1.005	1.003	1.000	0.997	0.993	0.988	0.983	0.979	0.976	0.971	0.966	0.959	0.953	0.945	0.934
FZH TK 01	1.002	1.001	1.000	0.998	0.996	0.993	0.990	0.987	0.984	0.980	0.975	0.968	0.960	0.952	0.939
Nuclear Assoc 30-750	1.001	1.001	1.000	0.999	0.998	0.996	0.994	0.991	0.988	0.984	0.979	0.971	0.963	0.954	0.941
Nuclear Assoc 30-749	1.001	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.994	0.992	0.989	0.984	0.980	0.972	0.964	0.956	0.942
Nuclear Assoc 30-744	1.001	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.994	0.992	0.989	0.984	0.980	0.972	0.964	0.956	0.942
Nuclear Assoc 30-716	1.001	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.994	0.992	0.989	0.984	0.980	0.972	0.964	0.956	0.942
Nuclear Assoc 30-753 Farmer shortened	1.001	1.000	1.000	0.999	0.998	0.996	0.994	0.992	0.989	0.985	0.980	0.973	0.965	0.956	0.943
Nuclear Assoc 30-751 Farmer	1.002	1.002	1.000	0.999	0.997	0.994	0.991	0.989	0.985	0.981	0.977	0.969	0.961	0.953	0.940
Nuclear Assoc 30-752 Farmer	1.004	1.003	1.001	1.000	0.998	0.996	0.993	0.991	0.989	0.985	0.981	0.974	0.967	0.959	0.947
NE 2515	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.994	0.991	0.988	0.984	0.980	0.975	0.967	0.959	0.950	0.937
NE 2515/3	1.005	1.004	1.002	1.000	0.998	0.995	0.993	0.991	0.989	0.986	0.982	0.975	0.969	0.961	0.949
NE 2577	1.005	1.004	1.002	1.000	0.998	0.995	0.993	0.991	0.989	0.986	0.982	0.975	0.969	0.961	0.949
NE 2505 Farmer	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.994	0.991	0.988	0.984	0.980	0.975	0.967	0.959	0.950	0.937
NE 2505/A Farmer	1.005	1.003	1.001	0.997	0.995	0.990	0.985	0.982	0.978	0.974	0.969	0.962	0.955	0.947	0.936
NE 2505/3, 3A Farmer	1.005	1.004	1.002	1.000	0.998	0.995	0.993	0.991	0.989	0.986	0.982	0.975	0.969	0.961	0.949
NE 2505/3, 3B Farmer	1.006	1.004	1.001	0.999	0.996	0.991	0.987	0.984	0.980	0.976	0.971	0.964	0.957	0.950	0.938
NE 2571 Farmer	1.005	1.004	1.002	1.000	0.998	0.995	0.993	0.991	0.989	0.986	0.982	0.975	0.969	0.961	0.949
NE 2581 Farmer	1.005	1.003	1.001	0.998	0.995	0.991	0.986	0.983	0.980	0.975	0.970	0.963	0.956	0.949	0.937
NE 2561 / 2611 Sec Std	1.006	1.004	1.001	0.999	0.998	0.994	0.992	0.990	0.988	0.985	0.982	0.975	0.969	0.961	0.949
PTW 23323 micro	1.003	1.003	1.000	0.999	0.997	0.993	0.990	0.987	0.984	0.980	0.975	0.967	0.960	0.953	0.941

表 3 不同射线质 $TPR_{20,10}$ 的高能光子束中不同型号指形电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）（续）

电离室型号	射线质 $TPR_{20,10}$														
	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84
PTW 23331 rigid	1.004	1.003	1.000	0.999	0.997	0.993	0.990	0.988	0.985	0.982	0.978	0.971	0.964	0.956	0.945
PTW 23332 rigid	1.004	1.003	1.001	0.999	0.997	0.994	0.990	0.988	0.984	0.980	0.976	0.968	0.961	0.954	0.943
PTW 23333	1.004	1.003	1.001	0.999	0.997	0.994	0.990	0.988	0.985	0.981	0.976	0.969	0.963	0.955	0.943
PTW 30001/30010 Farmer	1.004	1.003	1.001	0.999	0.997	0.994	0.990	0.988	0.985	0.981	0.976	0.969	0.962	0.955	0.943
PTW 30002/30011 Farmer	1.006	1.004	1.001	0.999	0.997	0.994	0.992	0.990	0.987	0.984	0.980	0.973	0.967	0.959	0.948
PTW 30004/30012 Farmer	1.006	1.005	1.002	1.000	0.999	0.996	0.994	0.992	0.989	0.986	0.982	0.976	0.969	0.962	0.950
PTW 30006/30013 Farmer	1.002	1.002	1.000	0.999	0.997	0.994	0.990	0.988	0.984	0.980	0.975	0.968	0.960	0.952	0.940
PTW 31002 flexible	1.003	1.002	1.000	0.999	0.997	0.994	0.990	0.988	0.984	0.980	0.975	0.968	0.960	0.952	0.940
PTW 31003 flexible	1.003	1.002	1.000	0.999	0.997	0.994	0.990	0.988	0.984	0.980	0.975	0.968	0.960	0.952	0.940
PTW 31006 PinPoint	1.004	1.003	1.001	0.999	0.998	0.995	0.992	0.989	0.985	0.980	0.974	0.966	0.959	0.951	0.940
PTW 31014 PinPoint	1.004	1.003	1.001	0.999	0.998	0.995	0.992	0.989	0.985	0.980	0.975	0.967	0.959	0.952	0.941
SNC 100700-0 Farmer	1.005	1.004	1.001	0.999	0.998	0.995	0.992	0.989	0.986	0.981	0.976	0.969	0.962	0.954	0.943
SNC 100700-1 Farmer	1.007	1.006	1.003	1.001	0.999	0.997	0.995	0.993	0.990	0.986	0.983	0.976	0.969	0.961	0.951
Victoreen Radocon III 550	1.005	1.004	1.001	0.998	0.996	0.993	0.989	0.986	0.983	0.979	0.975	0.968	0.961	0.954	0.943
Victoreen Radocon II 555	1.005	1.003	1.000	0.997	0.995	0.990	0.986	0.983	0.979	0.975	0.970	0.963	0.956	0.949	0.938
Victoreen 30-348	1.004	1.003	1.000	0.998	0.996	0.992	0.989	0.986	0.982	0.978	0.973	0.966	0.959	0.951	0.940
Victoreen 30-351	1.004	1.002	1.000	0.998	0.996	0.992	0.989	0.986	0.983	0.979	0.974	0.967	0.960	0.952	0.941
Victoreen 30-349	1.003	1.002	1.000	0.998	0.996	0.992	0.989	0.986	0.983	0.980	0.976	0.969	0.962	0.954	0.942
Victoreen 30-361	1.004	1.003	1.000	0.998	0.996	0.992	0.989	0.986	0.983	0.979	0.974	0.967	0.960	0.953	0.942
Scdx-Wellhöfer CC01	1.002	1.002	1.002	1.001	1.000	0.999	0.996	0.994	0.991	0.986	0.981	0.972	0.964	0.956	0.944
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	1.001	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.995	0.992	0.989	0.984	0.979	0.970	0.962	0.953	0.941
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	1.001	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.995	0.993	0.989	0.985	0.980	0.972	0.964	0.955	0.943
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	1.001	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.995	0.993	0.989	0.985	0.980	0.972	0.964	0.955	0.943
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	1.001	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.995	0.993	0.989	0.985	0.980	0.972	0.964	0.955	0.943
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28	1.001	1.001	1.001	1.000	0.999	0.997	0.995	0.993	0.990	0.985	0.980	0.972	0.964	0.955	0.943
Scdx-Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer	1.003	1.002	1.001	0.999	0.998	0.995	0.993	0.990	0.986	0.981	0.976	0.968	0.960	0.952	0.940
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	1.005	1.004	1.002	1.000	0.998	0.997	0.995	0.992	0.989	0.985	0.981	0.973	0.966	0.958	0.947

临床中常用水模体中最大吸收剂量深度 Z_{max} 或其他深度处的吸收剂量, 可由参考深度 z_{ref} 处的吸收剂量和中心轴 PDD (SSD 摆位条件) 或 TPR (SAD 摆位条件) 计算得到。

5.4 工作级电离室交叉校准方法

未在标准实验室参考射束中校准的电离室 (工作级电离室) 可以用已在标准实验室参考射束 Q_0 中校准的电离室 (参考电离室) 进行交叉校准。交叉校准时, 把工作级电离室和参考电离室放置在水模体中的同一参考深度 z_{ref} 进行测量。则工作级电离室的水吸收剂量校准因子按公式 (3) 计算:

$$N_{D,W,Q_0}^{field} = \frac{M_{ref}}{M_{field}} \cdot N_{D,W,Q_0}^{ref} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中,

M_{ref} 和 M_{field} ——参考电离室和工作级电离室经过修正后的剂量计读数 (应经温度气压、静电计不同、复合效应和极化效应的修正, 详见第 7 节);

N_{D,W,Q_0}^{field} 和 N_{D,W,Q_0}^{ref} ——工作级电离室和参考电离室在射线质 Q_0 中的水吸收剂量校准因子。

测量时, 建议使用外置监测电离室来消除加速器输出量的变化对读数的影响, 监测电离室应放置在参考深度 z_{ref} 层面且在水平方向上与射束中心轴距离 3~4 cm, 则 M_{ref} 和 M_{field} 分别替换为它们与外置监测电离室读数 M_{em} 比值的平均值 $\overline{M_{ref}/M_{em}}$ 和 $\overline{M_{field}/M_{em}}$ 。

得到 N_{D,W,Q_0}^{field} 后, 可以代入公式 (4) 计算参考点处的吸收剂量:

$$D_{W,Q} = M_Q^{field} \cdot N_{D,W,Q_0}^{field} \cdot k_{Q,Q_0}^{ref} \quad \dots\dots\dots (4)$$

注意式 (4) 中为参考电离室的射线质修正因子 k_{Q,Q_0}^{ref} , 而非工作级电离室的射线质修正因子 k_{Q,Q_0}^{field} 。

5.5 吸收剂量测定的不确定度分析

当用户使用本单位参考剂量计测定水吸收剂量时, 引起吸收剂量测定不确定度的物理量或程序分为两步来考虑。第一步, 用户参考剂量计在标准实验室校准得到水吸收剂量校准因子 $N_{D,W}$ 过程中带来的不确定度; 第二步, 用参考剂量计校准用户射束过程中带来的不确定度, 包括在水模体中参考点处测量带来的不确定度和运用计算的 k_{Q,Q_0} 值带来的不确定度。合成标准不确定度为各个步骤不确定度的平方和的正平方根值。

高能光子束吸收剂量校准的不确定度评估如表 4 所示。如果参考电离室在次级标准实验室 (SSDL) 中的 ^{60}Co γ 射线中校准, 且使用计算的 k_{Q,Q_0} 值, 吸收剂量校准的总合成标准不确定度为 1.5% 左右。如

果参考电离室在初级标准实验室（PSDL）中的⁶⁰Co γ射线中校准，且使用计算的 k_{Q,Q_0} 值，总合成标准不确定度降低不明显，因为校准时的不确定度主要由计算的 k_{Q,Q_0} 值引起。如果 PSDL 直接测量得到用户参考电离室的 k_{Q,Q_0} 值，则总合成标准不确定度可降到 1.2%左右。如果采用交叉校准的工作级电离室来测量，则总合成标准不确定度将增加 0.2%左右。

表 4 在水模体参考深度处测定高能光子束吸收剂量的不确定度评估

（基于电离室在⁶⁰Co γ射线中校准）

物理量或程序	相应标准不确定度 (%)
第一步：次级标准实验室（SSDL）中	
次级标准剂量计在初级标准实验室（PSDL）校准 $N_{D,r}$	0.5
次级标准剂量计的长期稳定性	0.1
用户剂量计在 SSDL 校准 $N_{D,r}$	0.4
第一步的合成标准不确定度	0.6
第二步：用户高能光子束中	
用户剂量计的长期稳定性	0.3
测量参考条件设置	0.4
用户剂量计读数 M_0	0.6
影响量修正因子 k_i	0.4
射线质修正因子 k_{Q,Q_0} (计算值)	1.0 ^a
第二步的合成标准不确定度	1.4
$D_{w,Q}$ 总合成标准不确定度 (第一步+第二步)	1.5
^a 如果用户电离室的 k_{Q,Q_0} 是在 PSDL 中测量所得，则其相应标准不确定度约为 0.7%	

6 基于水吸收剂量校准因子的高能电子束吸收剂量测定

6.1 剂量学设备要求

6.1.1 电离室

测定高能电子束的吸收剂量时，推荐使用平行板电离室，对射线质 $R_{50} < 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($E_0 < 10 \text{ MeV}$) 的电子束，必须使用平行板电离室。平行板电离室应在标准实验室中的电子束中校准，或在用户电子束中进行交叉校准。平行板电离室的测量参考点位于入射窗内表面的几何中心。对射线质 $R_{50} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($E_0 \geq 10 \text{ MeV}$) 的电子束，可以使用指形电离室校准吸收剂量。指形电离室的测量参考点位于电离室中心轴上的空腔体积中心往上（射束方向） $0.5r_{cyl}$ 的位置（ r_{cyl} 为指形电离室的空腔半径）。

6.1.2 模体和防水套

推荐使用水模体测定高能电子束的吸收剂量，水模体的大小范围应在测量深度、射野的四个方向上向外延伸至少 5 cm，最大测量深度处向下延伸至少 5 cm，一般要求不小于 30cm×30 cm×30 cm。

对于横向射束，可以用塑料模体测量，计算电离室测量时的放置深度时，应该使用模体的等效水厚度，计算方法同 5.1.2。

对于不防水的平行板电离室，测量时应该使用 PMMA 材质的与室壁匹配的防水套，在空腔前后的室壁厚度应不超过 1.0 mm。若使用指形电离室，PMMA 防水套厚度也应不超过 1.0 mm。电离室室壁和防水套之间应有 0.1~0.3 mm 空隙，使电离室空腔内的气压易于平衡。进行吸收剂量测量时，应使用与电离室校准时相同或材质相同且厚度相近的防水套。

6.2 射线质的选择和测量要求

医用直线加速器产生的高能电子束的射线质 Q 用 R_{50} 来表示，即水模体中电子束深度吸收剂量的半值深度。测量 R_{50} 的参考条件如表 5 所示，当射线质 $R_{50} \leq 7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($E_0 \leq 16\text{MeV}$) 时，模体表面的参考射野不小于 10 cm×10 cm；当射线质 $R_{50} > 7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($E_0 > 16\text{MeV}$) 时，模体表面的参考射野不小于 20 cm×20 cm。如果某一小于 20 cm×20 cm 的射野与 20 cm×20 cm 射野的 R_{50} 值差别小于 $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，则射线质 $R_{50} > 7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时也可以用此射野来测量 R_{50} 。

推荐使用平行板电离室来测量电子束的射线质 R_{50} 。 $R_{50} \geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($E_0 \geq 10\text{MeV}$) 时，也可以用指形电离室测量。除电离室外，也可以用其他探头来测量 R_{50} （如电子束专用的半导体探头或金刚石探头等）。

表 5 高能电子束 R_{50} 的测量参考条件

影响量	参考值或参考指标
模体材料	$R_{50} \geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，水 $R_{50} < 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，水或塑料模体
电离室类型	$R_{50} \geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，平行板电离室或指形电离室 $R_{50} < 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，平行板电离室
电离室参考点	平行板电离室，入射窗内表面的几何中心 指形电离室，中心轴上的空腔体积中心以上 $0.5r_{cyl}$
SSD	100 cm，或 ^a
模体表面的射野大小	$R_{50} \leq 7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时，不小于 10 cm×10 cm $R_{50} > 7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时，不小于 20 cm×20 cm，或 ^b
^a 对用于术中放疗的可移动式电子直线加速器，SSD（源到限光筒末端的距离）为 50 cm。 ^b R_{50} 值的变化小于 $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时，可用此小于 20 cm×20 cm 的射野。	

须注意的是，使用电离室测量时，得到的是水模体中电子束深度电离量的半值深度 $R_{50,ion}$ 。则深度吸收剂量的 R_{50} 可由公式（5）计算得到：

$$R_{50}=1.029R_{50,ion}-0.06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}(R_{50,ion}\leq 10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2})$$

$$R_{50}=1.059R_{50,ion}-0.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}(R_{50,ion}> 10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2})$$

..... (5)

6.3 参考条件下吸收剂量的测定方法

6.3.1 吸收剂量测定的参考条件

电子束水吸收剂量测定的参考条件如表 6 所示。测量的参考深度 z_{ref} 由公式（6）计算：

$$z_{ref}=0.6R_{50}-0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$$

..... (6)

射线质 $R_{50}<4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}(E_0<10\text{MeV})$ 时，参考深度 z_{ref} 接近最大吸收剂量深度 z_{max} ，射线质 $R_{50}\geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}(E_0\geq 10\text{MeV})$ 时， z_{ref} 稍大于 z_{max} 。测量深度使用参考深度 z_{ref} 显著减小了电离室校准因子用于不同加速器射束吸收剂量测定的差异，尤其是平行板电离室。但是使用指形电离室在大于 z_{max} 的参考深度 z_{ref} 测定吸收剂量时，指形电离室的空腔扰动效应带来的不确定度会稍大一些，对于 $R_{50}=5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}(E_0 \text{ 约 } 12 \text{ MeV})$ 的电子束，不确定度最大，将增加 0.3% 左右。

表 6 高能电子束水吸收剂量测定的参考条件

影响量	参考值或参考指标
模体材料	$R_{50}\geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，水 $R_{50}< 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，水或塑料模体
电离室类型	$R_{50}\geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，平行板电离室或指形电离室 $R_{50}< 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，平行板电离室
参考深度 z_{ref}	$0.6R_{50}-0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$
电离室参考点（置于 z_{ref} 处）	平行板电离室，入射窗内表面的几何中心 指形电离室，中心轴上的空腔体积中心以上 $0.5r_{cyl}$
SSD	100 cm，或 ^a
模体表面射野大小	10cm×10cm，或用于输出因子归一的射野，两者中取较大者
^a 对用于术中放疗的可移动式电子直线加速器，SSD（源到限光筒末端的距离）为 50 cm。	

6.3.2 参考条件下吸收剂量的测定方法

参考条件下，在深度 z_{ref} 测定射线质为 Q 的高能电子束的吸收剂量 $D_{W,Q}$ ，按公式（7）计算：

$$D_{W,Q} = M_Q \cdot N_{D,W,Q_0} \cdot k_{Q,Q_0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中，

M_Q ——经过修正后的剂量计读数（应经温度气压、静电计不同、复合效应和极化效应的修正，详见第7节）；

N_{D,W,Q_0} ——电离室在标准实验室参考射线质 Q_0 中校准的水吸收剂量校准因子；

k_{Q,Q_0} ——电离室的射线质修正因子。

当参考射线质为 ^{60}Co γ 射线时，用户射线质 Q 中各种不同电离室的 k_{Q,Q_0} 如表7所示，表中的 k_{Q,Q_0} 为以 R_{50} 为函数的计算值，表中未给出的 k_{Q,Q_0} 值可用内插法计算得到。

临床中常用水模体中最大吸收剂量深度 Z_{max} 处的吸收剂量，可由参考深度 z_{ref} 处的吸收剂量和中心轴 PDD（SSD 摆位条件）计算得到。

6.4 工作级电离室交叉校准方法

6.4.1 工作级电离室交叉校准方法

工作级电离室可以用已在标准实验室参考射束 Q_0 中校准过的参考电离室进行交叉校准，比较典型的例子是用已在 ^{60}Co γ 射线中校准过的指形电离室在用户高能电子束中交叉校准平行板电离室。校准时，推荐使用射线质 $R_{50} > 7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} (E_0 > 16 \text{ MeV})$ 的高能电子束，参考电离室和工作级电离室的测量参考点都放置在水模体中参考深度 z_{ref} 处进行测量。设交叉校准所用的射线质为 Q_{cross} ，则工作级电离室的水吸收剂量校准因子 $N_{D,W,Q_{cross}}^x$ 由公式（8）计算：

$$N_{D,W,Q_{cross}}^x = \frac{M_{Q_{cross}}^{ref}}{M_{Q_{cross}}^x} \cdot N_{D,W,Q_0}^{ref} \cdot k_{Q_{cross},Q_0}^{ref} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$M_{Q_{cross}}^{ref}$ 和 $M_{Q_{cross}}^x$ ——分别为参考电离室和工作级电离室经过修正后的剂量计读数（应经温度气压、静电计不同、复合效应和极化效应的修正，详见第7节）。

N_{D,W,Q_0}^{ref} ——参考电离室在射线质 Q_0 中校准的水吸收剂量校准因子。

k_{Q_{cross},Q_0}^{ref} ——参考电离室的射线质修正因子。

测量时，建议使用外置监测电离室来消除加速器输出量的变化对读数的影响，监测电离室应放置在测量深度 z_{ref} 层面且在水平方向上与射束中心轴距离 3~4cm，则 $M_{Q_{cross}}^{ref}$ 和 $M_{Q_{cross}}^x$ 分别替换为平均值

$\overline{M_{Q_{cross}}^{ref}/M_{Q_{cross}}^{em}}$ 和 $\overline{M_{Q_{cross}}^x/M_{Q_{cross}}^{em}}$ 。通常，参考电离室是在 ^{60}Co γ 射线中校准的，此时的 k_{Q_{cross},Q_0}^{ref} 由表 7 查得。如果 Q_0 为高能电子束， k_{Q_{cross},Q_0}^{ref} 则由公式 (9) 推算得到：

$$k_{Q_{cross},Q_0}^{ref} = k_{Q_{cross},Q_{int}}^{ref} / k_{Q_0,Q_{int}}^{ref} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中， $k_{Q_{cross},Q_{int}}^{ref}$ 和 $k_{Q_0,Q_{int}}^{ref}$ 由表 8 查得。

6.4.2 工作级电离室交叉校准后的应用

工作级电离室交叉校准得到 $N_{D,W,Q_{cross}}^x$ 后，用于测定射线质为 Q 的高能电子束水吸收剂量时，由公式(10)计算：

$$D_{W,Q} = M_Q^x \cdot N_{D,W,Q_{cross}}^x \cdot k_{Q,Q_{cross}}^x \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中， $k_{Q,Q_{cross}}^x$ 由公式(11)计算：

$$k_{Q,Q_{cross}}^x = k_{Q,Q_{int}}^x / k_{Q_{cross},Q_{int}}^x \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中， $k_{Q,Q_{int}}^x$ 和 $k_{Q_{cross},Q_{int}}^x$ 由表 8 查得。如果电离室是在标准实验室中的电子束 Q_{cross} 中校准的，也可以使用上述方法计算吸收剂量。

表 7 不同射线质 R_{50} 的高能电子束中不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）

电离室型号	射线质 R_{50} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)																
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0	13.0	16.0	20.0
Plane-parallel chambers																	
Attix RMI 449	0.953	0.943	0.932	0.925	0.919	0.913	0.908	0.904	0.900	0.896	0.893	0.886	0.881	0.871	0.859	0.849	0.837
Capintec PS-033	-	-	0.921	0.920	0.919	0.918	0.917	0.916	0.915	0.913	0.912	0.908	0.905	0.898	0.887	0.877	0.866
Exradin P11	0.958	0.948	0.937	0.930	0.923	0.918	0.913	0.908	0.904	0.901	0.897	0.891	0.885	0.875	0.863	0.853	0.841
Holt (Memorial)	0.971	0.961	0.950	0.942	0.936	0.931	0.926	0.921	0.917	0.913	0.910	0.903	0.897	0.887	0.875	0.865	0.853
NACP/Calcam	0.952	0.942	0.931	0.924	0.918	0.912	0.908	0.903	0.899	0.895	0.892	0.886	0.880	0.870	0.858	0.848	0.836
Markus	-	-	0.925	0.920	0.916	0.913	0.910	0.907	0.904	0.901	0.899	0.894	0.889	0.881	0.870	0.860	0.849
Roos	0.965	0.955	0.944	0.937	0.931	0.925	0.920	0.916	0.912	0.908	0.904	0.898	0.892	0.882	0.870	0.860	0.848
Cylindrical chambers																	
Capintec PR06C (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.916	0.914	0.912	0.911	0.909	0.906	0.904	0.899	0.891	0.884	0.874
Exradin A2 (Spokas)	-	-	-	-	-	-	0.914	0.913	0.913	0.913	0.912	0.911	0.910	0.908	0.903	0.897	0.888
Exradin T2 (Spokas)	-	-	-	-	-	-	0.882	0.881	0.881	0.881	0.880	0.879	0.878	0.876	0.871	0.865	0.857
Exradin A12 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.921	0.919	0.918	0.916	0.914	0.911	0.909	0.903	0.896	0.888	0.878
NE 2571 (Guarded Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.918	0.916	0.915	0.913	0.911	0.909	0.906	0.901	0.893	0.886	0.876
NE 2581 (Robust Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.899	0.898	0.896	0.894	0.893	0.890	0.888	0.882	0.875	0.868	0.859
PTW 30001/30010 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.911	0.909	0.907	0.905	0.904	0.901	0.898	0.893	0.885	0.877	0.868
PTW 30002/30011 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.916	0.914	0.912	0.910	0.909	0.906	0.903	0.897	0.890	0.882	0.873
PTW 30004/30012 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.920	0.918	0.916	0.915	0.913	0.910	0.907	0.902	0.894	0.887	0.877

表7 不同射线质 R_{50} 的高能电子束中不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值（基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准）（续）

电离室型号	射线质 R_{50} ($\text{g} \cdot \text{cm}^2$)																
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0	13.0	16.0	20.0
PTW 30006/30013 Farmer	-	-	-	-	-	-	0.911	0.909	0.907	0.906	0.904	0.901	0.898	0.893	0.885	0.878	0.868
PTW 31002/31003 (flexible)	-	-	-	-	-	-	0.912	0.910	0.908	0.906	0.905	0.901	0.898	0.893	0.885	0.877	0.867
PTW 31006 PinPoint	-	-	-	-	-	-	0.928	0.924	0.921	0.918	0.915	0.910	0.905	0.896	0.885	0.876	0.865
PTW 31014 PinPoint	-	-	-	-	-	-	0.929	0.925	0.922	0.919	0.916	0.910	0.905	0.897	0.886	0.876	0.865
Scdx-Wellhöfer CC01	-	-	-	-	-	-	0.942	0.938	0.935	0.932	0.929	0.923	0.918	0.909	0.898	0.889	0.878
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	-	-	-	-	-	-	0.928	0.925	0.922	0.920	0.918	0.913	0.910	0.902	0.893	0.884	0.874
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	-	-	-	-	-	-	0.920	0.918	0.917	0.915	0.913	0.910	0.907	0.902	0.894	0.886	0.877
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	-	-	-	-	-	-	0.920	0.918	0.917	0.915	0.913	0.910	0.907	0.902	0.894	0.886	0.877
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	-	-	-	-	-	-	0.920	0.918	0.917	0.915	0.913	0.910	0.907	0.902	0.894	0.886	0.877
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28 Farmer shortened	-	-	-	-	-	-	0.920	0.918	0.916	0.914	0.913	0.910	0.907	0.902	0.894	0.886	0.877
Scdx- Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer							0.914	0.912	0.911	0.909	0.907	0.904	0.902	0.896	0.889	0.881	0.872
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	-	-	-	-	-	-	0.920	0.918	0.916	0.914	0.913	0.910	0.907	0.902	0.894	0.887	0.877
Victoreen 30-348	-	-	-	-	-	-	0.910	0.908	0.906	0.903	0.902	0.898	0.895	0.888	0.880	0.872	0.862
Victoreen 30-351	-	-	-	-	-	-	0.906	0.904	0.902	0.901	0.899	0.896	0.893	0.888	0.880	0.873	0.864
Victoreen 30-349	-	-	-	-	-	-	0.899	0.898	0.897	0.896	0.895	0.893	0.891	0.888	0.881	0.875	0.866

表 8 不同射线质 R_{50} 的高能电子束中不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值 (基于电离室在 高能电子束中校准, Q_{int} 取 $7.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

电离室型号	射线质 R_{50} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)																
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0	13.0	16.0	20.0
Plane-parallel chambers																	
Attix RMI 449	1.078	1.068	1.055	1.047	1.040	1.034	1.028	1.023	1.019	1.014	1.010	1.003	0.997	0.986	0.972	0.961	0.948
Capintec PS-033	-	-	1.016	1.015	1.014	1.013	1.012	1.010	1.009	1.007	1.006	1.002	0.998	0.990	0.978	0.968	0.955
Exradin P11	1.078	1.068	1.055	1.047	1.04	1.034	1.028	1.023	1.019	1.014	1.010	1.003	0.997	0.986	0.972	0.961	0.948
Holt (Memorial)	1.078	1.068	1.055	1.047	1.040	1.034	1.028	1.023	1.019	1.014	1.010	1.003	0.997	0.986	0.972	0.961	0.948
NACP/Calcam	1.078	1.068	1.055	1.047	1.040	1.034	1.028	1.023	1.019	1.014	1.010	1.003	0.997	0.986	0.972	0.961	0.948
Markus	-	-	1.038	1.032	1.028	1.024	1.020	1.017	1.014	1.011	1.008	1.003	0.997	0.988	0.976	0.965	0.952
Roos	1.078	1.068	1.055	1.047	1.04	1.034	1.028	1.023	1.019	1.014	1.010	1.003	0.997	0.986	0.972	0.961	0.948
Cylindrical chambers																	
Capintec PR06C (Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.001	0.999	0.993	0.984	0.976	0.966
Exradin A2 (Spokas)	-	-	-	-	-	-	1.003	1.003	1.002	1.002	1.002	1.001	0.999	0.996	0.991	0.984	0.975
Exradin T2 (Spokas)	-	-	-	-	-	-	1.003	1.003	1.002	1.002	1.002	1.001	0.999	0.996	0.991	0.984	0.975
Exradin A12 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.002	0.998	0.993	0.984	0.976	0.965
NE 2571 (Guarded Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.001	0.999	0.993	0.984	0.976	0.966
NE 2581 (Robust Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.001	0.999	0.993	0.984	0.976	0.966
PTW 30001/30010 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.013	1.010	1.008	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.976	0.965
PTW 30002/30011 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.013	1.010	1.008	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.976	0.965
PTW 30004/30012 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	1.013	1.010	1.008	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.976	0.965

表8 不同射线质 R_{50} 的高能电子束中不同型号电离室的 k_{Q,Q_0} 计算值 (基于电离室在 高能电子束中校准, 计算时 Q_{int} 取 $7.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$) (续)

电离室型号	射线质 R_{50} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)																
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0	13.0	16.0	20.0
PTW 30006/30013 Farmer	-	-	-	-	-	-	1.013	1.010	1.008	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.976	0.965
PTW 31002/31003(flexible)	-	-	-	-	-	-	1.014	1.011	1.009	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.983	0.974	0.964
PTW 31006 PinPoint	-	-	-	-	-	-	1.023	1.019	1.015	1.012	1.009	1.003	0.997	0.988	0.976	0.965	0.953
PTW 31014 PinPoint	-	-	-	-	-	-	1.023	1.019	1.015	1.012	1.009	1.003	0.997	0.988	0.976	0.965	0.953
Scdx-Wellhöfer CC01	-	-	-	-	-	-	1.023	1.019	1.015	1.012	1.009	1.003	0.997	0.988	0.976	0.965	0.953
Scdx-Wellhöfer CC04/IC04	-	-	-	-	-	-	1.018	1.015	1.012	1.009	1.007	1.002	0.998	0.990	0.980	0.970	0.959
Scdx-Wellhöfer CC08/IC05/IC06	-	-	-	-	-	-	1.013	1.011	1.009	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.975	0.965
Scdx-Wellhöfer CC13/IC10/IC15	-	-	-	-	-	-	1.013	1.011	1.009	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.975	0.965
Scdx-Wellhöfer CC25/IC25	-	-	-	-	-	-	1.013	1.011	1.009	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.975	0.965
Scdx-Wellhöfer FC23-C/IC28 Farmer shortened	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.002	0.998	0.993	0.984	0.976	0.965
Scdx-Wellhöfer FC65-P/IC69 Farmer	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.002	0.998	0.993	0.984	0.976	0.965
Scdx-Wellhöfer FC65-G/IC70 Farmer	-	-	-	-	-	-	1.012	1.010	1.008	1.006	1.005	1.002	0.998	0.993	0.984	0.976	0.965
Victoreen 30-348	-	-	-	-	-	-	1.015	1.013	1.010	1.008	1.006	1.002	0.998	0.991	0.982	0.973	0.962
Victoreen 30-351	-	-	-	-	-	-	1.013	1.010	1.008	1.007	1.005	1.002	0.998	0.992	0.984	0.976	0.965
Victoreen 30-349	-	-	-	-	-	-	1.008	1.006	1.005	1.004	1.003	1.001	0.999	0.995	0.988	0.980	0.971

6.5 吸收剂量测定的不确定度分析

指形电离室和平行板电离室在参考深度 z_{ref} 处测定高能电子束吸收剂量的不确定度评估如表 9 和表 10 所示, 注意指形电离室只能用于 $R_{50} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的高能电子束吸收剂量测定。表 9 是基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准的吸收剂量测定不确定度评估。表 10 是基于电离室在射线质 $R_{50}(7 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2})(E_0, 16 \sim 23 \text{ MeV})$ 的高能电子束中校准的吸收剂量测定不确定度评估。如果测量时使用塑料模体, 则吸收剂量的总合成标准不确定度会略有增加。如果 k_{Q,Q_0} 值不是计算值, 而是在标准实验室测量所得, 则吸收剂量的总合成标准不确定度会有所降低。

表 9 在水模体参考深度处测定高能电子束吸收剂量的不确定度评估

(基于电离室在 ^{60}Co γ 射线中校准)

物理量或程序	相应标准不确定度 (%)	
	指形电离室	平行板电离室
用户电离室类型		
射线质范围	$R_{50} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
第一步: 次级标准实验室 (SSDL) 中		
次级标准剂量计在 PSDL 校准 $N_{D,ref}$	0.5	0.5
次级标准剂量计的长期稳定性	0.1	0.1
用户剂量计在 SSDL 校准 $N_{D,ref}$	0.4	0.4
第一步的合成标准不确定度	0.6	0.6
第二步: 用户高能电子束中		
用户剂量计的长期稳定性	0.3	0.4
测量参考条件设置	0.4	0.6
用户剂量计读数 M_Q	0.6	0.6
影响量修正因子 k_i	0.4	0.5
射线质修正因子 k_{Q,Q_0} (计算值)	1.2	1.7
第二步的合成标准不确定度	1.5	2.0
$D_{w,Q}$ 总合成标准不确定度 (第一步+第二步)	1.6	2.1

表 10 在水模体参考深度处测定高能电子束吸收剂量的不确定度评估

(基于电离室在高能电子束中校准)

物理量或程序	相应标准不确定度(%)	
	指形电离室	平行板电离室
用户电离室类型		
射线质范围	$R_{50} \geq 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$
第一步：标准实验室 (PSDL) 中		
用户剂量计在 PSDL 校准 $N_{D,w}$	0.7	0.7
第一步的合成标准不确定度	0.7	0.7
第二步：用户高能电子束中		
用户剂量计的长期稳定性	0.3	0.4
测量参考条件设置	0.4	0.6
用户剂量计读数 M_Q	0.6	0.6
影响量修正因子 k_i	0.4	0.5
射线质修正因子 k_{Q,Q_0} (计算值)	0.9	0.6
第二步的合成标准不确定度	1.3	1.2
$D_{w,Q}$ 总合成标准不确定度 (第一步+第二步)	1.4	1.4

7 用户条件下测量时的注意事项和主要影响量的修正

7.1 用户条件下测量时的注意事项

- a) 测量前应检查：电离室、静电计、线缆和接头是否损坏；电离室与静电计是否匹配正确；剂量计参数设置是否与校准证书上所列的参数设置相同。
- b) 测量前，应确保剂量计的稳定性。建议使用前：将剂量计和模体放置在测量环境下足够长时间以使其与测量环境温度平衡；提前 15~30 分钟打开静电计电源开关以确保剂量计系统达到稳定；连接剂量计系统后，对电离室预照射 2~5 Gy 使其在介质中达到电荷平衡。当改变电离室的极化电压时，一定要等剂量计系统稳定后才开始测量，有些剂量计系统需要近 20 分钟才能重新达到稳定，具体时长参考剂量计的说明书。
- c) 照射前后都应测量剂量计的漏电流，漏电流不应超过预期测量电流的 0.1% (或不超过 0.1 pA 或 0.3 mGy/min)。有的情况，比如小体积电离室在低剂量率下照射时，漏电流会大一点，需要修正漏电流的影响。漏电流大于预期测量电流 1% 的电离室不应用于吸收剂量测定。

- d) 测量相对剂量时, 建议使用监测电离室来修正加速器输出量变化带来的影响, 特别是在交叉校准和改变极化电压测量时尤为重要。监测电离室最好放置在模体中, 与测量电离室同一深度且相距约 3~4 cm。如果监测电离室放置在空气中, 需要修正温度变化的影响。
- e) 测定吸收剂量时, 建议修正温度气压、静电计不同、极化效应、复合效应等影响量带来的影响, 测量方法见 7.2、7.3、7.4、7.5 小节所示。

7.2 温度气压修正

本指南列表中的电离室都是与大气相通的, 电离室空腔中的空气质量会随着大气的温度、气压和湿度变化。标准实验室校准时一般使用的参考相对湿度为 50%, 测量时的相对湿度在 20%~80%之间时, 不需要修正湿度的影响。温度、气压修正因子 $k_{T,P}$ 用于修正用户环境与校准环境不同对电离室响应的影响, 计算公式为:

$$k_{T,P} = \frac{(273.2 + T) \cdot P_0}{(273.2 + T_0) \cdot P} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中,

P 和 T ——测量时电离室空腔中的气压和温度,

P_0 和 T_0 ——校准时的气压和温度 (一般取 101.3kPa, 20℃)。

电离室空腔中的温度可用模体中的温度替代, 而非模体周围空气中的温度。在水中测量时, 防水套须和大气相通, 以确保电离室空腔内的气压与大气压能快速达到平衡。

7.3 静电计校准因子

当电离室和静电计分开校准时, 标准实验室会分别给出它们的校准因子, 静电计的校准因子为 k_{elec} 。当电离室和静电计一起校准时, 静电计校准因子 k_{elec} 为 1。

7.4 极化效应修正

大多数电离室在高速光子束的极化效应可以忽略不计。在带电粒子束中, 尤其是电子束中, 电离室的极化效应不可忽略。电离室的极化效应修正因子 k_{pol} 用于修正电离室极化电压的极性改变对电离室响应的影响, 可用正反电压法来测量, 计算公式为:

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中,

M_+ 、 M_- ——正、反极性时的剂量计读数，

M ——测定吸收剂量所用的极化电压（应与电离室校准时所用极化电压相同）时的剂量计读数。

改变电离室的极化电压极性时，须等剂量计稳定之后再测量。测量时，需使用外置监测电离室来修正加速器输出量变化带来的影响。

7.5 复合效应修正

复合效应修正因子 k_s 用于修正由于正、负电荷复合导致的电荷收集不完全对电离室响应的影响。目前临床中使用的电子直线加速器产生的高能光子束和高能电子束一般为脉冲辐射场，可以使用双电压法来测量电离室的复合效应修正因子。设测定吸收剂量所用的极化电压为 V_1 ，取小于 V_1 的极化电压 V_2 ，且 $V_1/V_2 \geq 3$ 。则电离室的复合效应修正因子 k_s 可由公式（14）计算：

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \dots\dots\dots (14)$$

式中，

M_1 、 M_2 ——极化电压 V_1 和 V_2 时的剂量计读数，

a_0 、 a_1 、 a_2 ——脉冲辐射场中的电离室复合效应拟合系数，如表 11 所示。测量时，需使用外置监测电离室来修正加速器输出量变化带来的影响。

在脉冲辐射场中，电离室的复合效应修正因子依赖于加速器每脉冲的剂量，当给定剂量率的脉冲速率增大或者剂量率增大时，复合效应修正因子也将增大，在高剂量率的高能电子束（如：用于术中放疗的可移动式电子直线加速器）中尤为明显。

表 11 脉冲辐射场中使用双电压法计算 k_s 的拟合系数

极化电压比值	脉冲辐射场		
	a_0	a_1	a_2
V_1/V_2			
2.0	2.337	-3.636	2.299
2.5	1.474	-1.587	1.114
3.0	1.198	-0.875	0.677
3.5	1.080	-0.542	0.463
4.0	1.022	-0.363	0.341
5.0	0.975	-0.188	0.214



国家癌症中心/国家肿瘤质控中心指南
基于水吸收剂量校准因子的高能光子束
和电子束吸收剂量测定指南

NCC/T-RT 002-2021

*

开本 880×1230 1/16 字数 13 千字
2021 年 12 月第一版 2021 年 12 月第一次印刷