

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.11.002

医学放射物理

## 乳腺非介入管电压影响因素研究

董风华, 张晓栋, 董文龙, 杨建, 范杰  
中国测试技术研究院, 四川 成都 610021

**【摘要】目的:**参照 IEC 61676 标准, 研究随着管电压的增加, 距离、过滤条件和阳极角等影响因素在两种乳腺辐射场(Mo/Mo 和 W/Rh)中的改变引起 Fluke X2 和 RTI piranha 657 两类非接入测量仪器测量结果的变化及差异。**方法:**利用介入法测量确定管电压稳定性, 在两种乳腺辐射场情况下改变距离、过滤条件和阳极角进行非介入管电压测量, 根据测量结果计算两种辐射场和两类仪器测量结果的变化趋势, 并用蒙特卡罗模拟获得两种辐射场条件下因为过滤变化达到仪器的计数比值差异( $R$ 值变化率)并分析原因。**结果:**在 W/Rh 辐射场下, 即使距离和阳极角差异较大、过滤条件发生微小变化, 对两类仪器测量结果的影响符合 IEC 61676 的要求, 都在 0.5 kV 以内; 但是在 Mo/Mo 辐射场下, 同样过滤条件变化引起的两类仪器测量结果差异较大, 其中 Fluke X2 测量结果最大变化甚至达到了 1.6 kV。**结论:**当对乳腺非介入管电压测量仪器进行校准时, 各个实验室应该考虑确立统一的校准距离、球管阳极角和过滤要求作为重要的参考条件, 特别是在 Mo/Mo 辐射场下对过滤的限制异常重要, 以减少对非介入管电压平均峰值电压测量结果的影响, 保证各个校准实验室间结果的一致性, 提高可比性; 建议进行乳腺非介入管电压测量的时候尽量不使用平均峰值电压来反应测量结果, 而应使用实用峰值电压。

**【关键词】**非介入; 管电压; 乳腺摄影; 过滤; 平均峰值电压; 实用峰值电压

**【中图分类号】**R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)11-1325-08

### Factors influencing non-invasive tube voltage measurement for mammography

DONG Fenghua, ZHANG Xiaodong, DONG Wenlong, YANG Jian, FAN Jie

National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China

**Abstract: Objective** To study the variations and differences of Fluke X2 and RTI piranha 657 measurement results caused by the changes of distance, filtering conditions and anode angle in two kinds of radiation fields (Mo/Mo and W/Rh) with the increase of tube voltage according to IEC 61676 standard. **Methods** The stability of tube voltage was determined by an intrusive method. The distance, filtering conditions and anode angle were changed for the non-invasive measurement of tube voltage in two kinds of radiation fields. According to the measurement results, the change trends of the measurement results obtained by two kinds of instruments in two kinds of radiation fields were calculated, and the counting ratio difference (change rate of  $R$  value) of the instrument due to the filtering conditions change in two kinds of radiation fields was obtained by Monte Carlo simulation. **Results** In W/Rh radiation field, even if distance and anode angle differed greatly and filtering conditions changed slightly, their effects on the measurement results of two kinds of instruments met the requirements of IEC 61676 and were within 0.5 kV. However, in Mo/Mo radiation field, the measurement difference of the two kinds of instruments caused by the same filtering conditions changes was relatively larger, especially the maximum change of Fluke X2 measurement results which even reached 1.6 kV. **Conclusion** When calibrating the non-invasive tube voltage measuring instrument, a unified calibration distance, the anode angle of the bulb tube and the filtering conditions should be considered as important reference conditions in each laboratory, especially the limitation of filtering is extremely important in Mo/Mo radiation field, so as to reduce the effect on the non-invasive measurement of the average kilovolt peak of tube voltage, ensure the consistency of the results among the calibration laboratories, improving comparability. It is suggested that in the non-invasive tube voltage measurement for mammography, practical peak voltage instead of average kilovolt peak should be used to reflect the measurement results.

**Keywords:** non-invasive; tube voltage; mammography; filtration; average kilovolt peak; practical peak voltage

**【收稿日期】**2021-06-05

**【基金项目】**国家计量技术法规项目(计量2019-42号)

**【作者简介】**董风华, 工程师, 从事医学计量及辐射剂量工作, E-mail: Dongfenghua86@126.com

**【通信作者】**范杰, 副研究员, 主要从事辐射剂量工作, E-mail: fjj\_2021@163.com

### 前言

乳腺 X 射线的管电压性能非常重要, 它既决定了射线的穿透能力, 对辐射剂量影响较大, 又对乳腺诊断品质有重要影响<sup>[1-4]</sup>。目前乳腺 X 射线的管电压测

试方法主要有两种<sup>[5-6]</sup>:一是介入式测试方法,使用高精度的分压箱和数字采集单元对X射线的高压发生器直接进行电压采集,得到相当精确的电压结果;二是非介入式测试方法,主要由非介入管电压表或者多参数剂量仪(包含管电压测量功能),通过至少两个探测器阵列在乳腺X射线辐射场内测量相应的数据计算能谱曲线从而得到较为精确的平均峰值电压(Kilovolt Peak, kVp)或实用峰值电压(PPV);随着探测器技术及算法的改进,这种方式已经是现场测试最为主要的方法,其原理见图1。由于非介入式测试方法自身的测量特点,使其测量结果除了受到高压发生器影响外,还受到测量仪器标准数据精度、探测器响应能力、算法及辐射场等因素影响。基于上述研究背景,笔者认为有必要参照IEC61676标准中的影响量,考虑实际使用中测量条件容易发生改变或出现差异的情况,研究在一定管电压范围内,Mo/Mo和W/Rh两种辐射场(能谱差异)情况下,距离、过滤条件和阳极角变化(能谱的变化)对测量结果的影响,以及Fluke X2(以下简称X2)和RTI piranha 657(以下简称657)两类测量设备测量结果的差异。

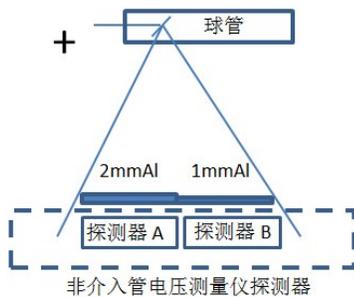


图1 非介入管电压仪器测试原理

Fig.1 Test principle of non-invasive tube voltage measuring instrument

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

**1.1.1 标准实用峰值电压测量系统** 由介入式高频高压分压器及高速数字采集器构成,经过计量校准,直流电压分压比10 000:1,直流电压分压比误差为±1%,可测频率范围为0~1 MHz,采样速率1 MHz/s。

**1.1.2 乳腺辐射源** 乳腺辐射源由X射线高压发生器和X射线管组成。球管靶材有两种:Mo和W;过滤材料:0.025 mm Rh、1 mm Al、0.025 mm Rh、0.4 mm Al、0.5 mm Al、0.7 mm Al、0.05 mm Ag、0.075 mm Ag和0.06 mm Mo等。实验中只采用两种市场上应用最广泛的靶材与过滤材料组合产生的辐射场:Mo/0.032 mm Mo(以下简称Mo/Mo)和W/0.05 mm Rh(以下简称W/Rh),并用叠加高纯度(0.05~2.00 mm)铝片测定第一半值层<sup>[7-10]</sup>,测量示意图见图2。Mo/Mo符合IEC 61267要求,W/Rh测量结果见表1。

**1.1.3 乳腺非介入管电压测量仪器** 选用国内最为常见的两家公司的产品:福禄克公司的X2和RTI公司的657,其中X2测量结果为kVp,用高于峰值信号33%的所有样本平均值计算得到,显示分辨率为0.1 kV;657测量结果为PPV,按照IEC 61676中定义计算得到,显示分辨率为0.01 kV。两套仪器均经过计量校准。

**1.1.4 蒙特卡罗软件** 使用蒙特卡罗软件模拟实际球管条件,并生成过滤条件变化情况下达到测量仪器的能谱,并计算达到不同探测器的总计数,方便定性分析实验结果。

### 1.2 方法

**1.2.1 测试方法** 通过标准实用峰值电压测量系统介入光机初级电路直接得到管电压结果,确定光机稳定性符合传递辐射场的建立,其短期变化不影响结

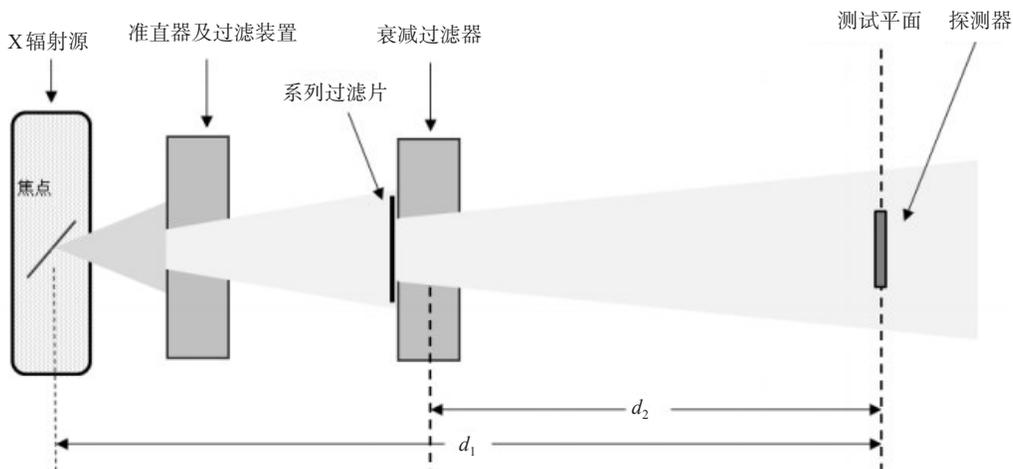


图2 半值层和非介入管电压测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of half-value layer and non-invasive tube voltage measurement

表1 W/Rh 辐射质测量结果

Tab.1 Measurements of radiation quality in W/Rh

管电压/kV	半值层/mm Al
25	0.50
28	0.54
30	0.56
35	0.60
40	0.64
45	0.68

果<sup>[11]</sup>;分压器、高速数字采集器与光机初级电路采用特殊设计的专用接头按照图3进行连接。

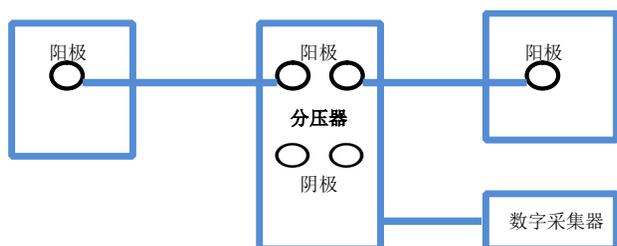


图3 介入式测量连接示意图

Fig.3 Connection diagram of intrusive measurement

将X2或657分别放置于乳腺辐射源产生的辐射场中测试平面的几何中心位置,如图2所示,分别在Mo/Mo和W/Rh情况下,选取恒定的电流时间积,在下列条件变化情况下进行曝光,每个电压点测量3次

表2 介入式管电压测量结果

Tab.2 Measurement results of tube voltage by intrusive method

标称电压/kV	标准实用峰值电压测量系统读数/kV			读数平均值/kV	标准偏差/%
	第1次	第2次	第3次		
20	19.993	19.995	19.996	19.992	0.183
25	24.894	24.896	24.896	24.895	0.115
30	29.864	29.866	29.865	29.865	0.100
35	29.855	29.855	29.856	29.855	0.058

## 2.2 蒙特卡罗仿真能谱曲线

达到探测器A的总计数与达到探测器B的总计数之比为R值,它的准确性是非介入测量管电压仪器测量管电压的关键<sup>[12]</sup>。假设图1中A和B两个探测器前端过滤分别为经典的1 mm Al和2 mm Al,为了较直观地表现两种辐射场能谱的差异和条件改变后能谱的变化,本研究以过滤变化条件为例,用蒙特卡罗程序完成与实验条件相同的仿真:(1)管电压为

求平均值。

(1)距离变化:考虑到IEC 61676中非介入管电压表的参考测量距离、厂家说明和乳腺剂量测量常规距离,笔者选取3种焦室距(FDD),分别为40、50和60 cm,设置常用管电压为20~35 kV,分别记录两类仪器测量结果。

(2)过滤条件变化:由于过滤片的厚度受到加工及测量精度的影响,难以控制,笔者参考IEC 61267建立乳腺辐射场的半值层要求( $\pm 0.02$  mm Al),在已有过滤情况下,附加一定厚度铝片,使得过滤条件发生微小变化(附加0.01~0.04 mm Al,能在20~39 kV的管电压范围内使半值层增加0.006~0.020 mm Al),FDD为50 cm,分别记录两类仪器测量结果。

(3)阳极角变化:由于阳极角属于球管的特性,无法进行现场改变,已经建立的辐射场中只有W靶具有两个阳极角可供选择( $10^\circ$ 和 $16^\circ$ ),因此本实验只能在W/Rh中进行,设置管电压为20~35 kV,FDD为50 cm,分别记录两类仪器测量结果。

1.2.2 统计学方法 采用Excel 2010进行数据处理与数据拟合作图。

## 2 结果

### 2.1 光机稳定性

通过标准实用峰值电压测量系统介入光机初级电路直接得到管电压的标准偏差都在0.19%以内(表2),说明光机稳定性符合传递辐射场的建立。

25~35 kV时W/Rh和Mo/Mo达到A和B两个探测器的能谱(计数),图4为管电压为35 kV时的能谱图;(2)在(1)其他条件不变的情况下,在W/Rh出束口附加不同厚度的Al片,达到A和B两个探测器的能谱(计数),图5为管电压为35 kV时的能谱图;(3)在(1)其他条件不变的情况下,在Mo/Mo出束口附加不同厚度的Al片,达到A和B两个探测器的能谱(计数),图6为管电压35 kV时的能谱图。

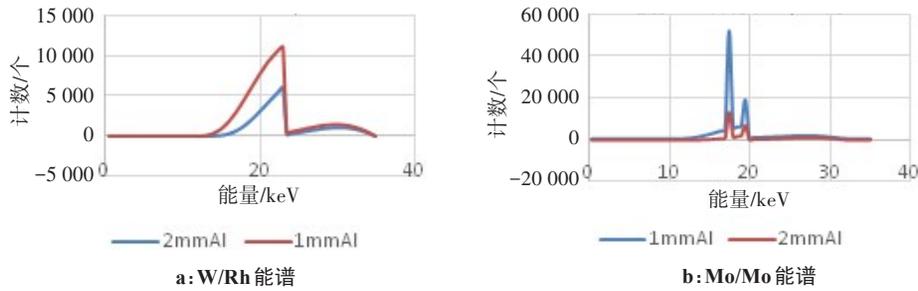


图4 W/Rh和 Mo/Mo 辐射场 35 kV 情况下达到两个探测器的能谱(计数)

Fig.4 Energy spectrum (count) of two detectors in W/Rh and Mo/Mo at 35 kV

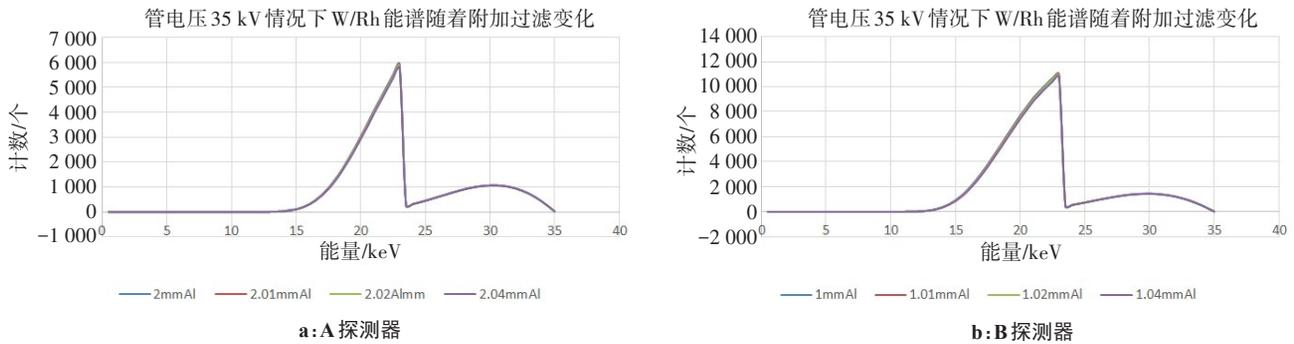


图5 W/Rh 辐射场在出束口附加不同厚度的 Al 片, 达到 A 和 B 探测器的能谱(计数)

Fig.5 In W/Rh with different thickness of Al plates attached at the beam exit, the energy spectrum (count) to reach detectors A and B

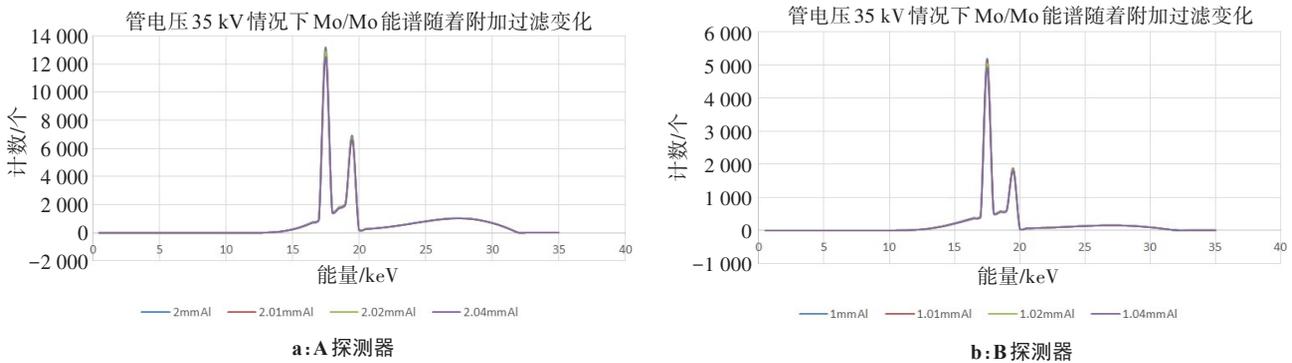


图6 Mo/Mo 辐射场在出束口附加不同厚度的 Al 片, 达到 A 和 B 探测器的能谱(计数)

Fig.6 In Mo/Mo with different thickness of Al plates attached at the beam exit, the energy spectrum (count) to reach detectors A and B

计算模拟得到的各个设定条件下达到探测器的能谱,以无附加过滤情况下的  $R$  值为参考,发现在低管电压的时候  $R$  值变化率非常小(比如 20 kV),随着管电压增加,  $R$  值变化率随着附加过滤的增加而变大;在同一管电压条件下 Mo/Mo 辐射场中  $R$  值变化率比 W/Rh 大,能达到 1% 左右(比如 35 kV);同时能谱的变化主要源自于其中低能段。

### 2.3 距离变化的影响

不同 FDD 下管电压测量结果见表 3、表 4。以 FDD 为 40 cm 时管电压的测量结果为基值,以 FDD 为自变量,以 FDD 为 40~60 cm 时管电压的测量结果与基值的差为因变量,绘图,结果见图 7~10。

从图 7~10 可以看出在标称值 20~35 kV 范围内,随着管电压增加,两类仪器测量结果随着距离增加整体趋势是变大的,但是 20 kV 时候基本上不发生变化, FDD 为 40 与 50 cm 时测量结果变化很小(0.2 kV 以内); Mo/Mo 在 35 kV 情况下 X2 测量结果增大了 0.5 kV, 变化最大,而同一情况下 657 测量结果只增大了 0.2 kV, 两类仪器测量结果最大变化在 0.5 kV 以内(含 0.5 kV)。

### 2.4 过滤条件变化的影响

测量结果见表 5、表 6。FDD 为 50 cm, 以不附加 Al 片情况下的测量结果为基值, 以添加 Al 片厚度为自变量, 以添加不同厚度 Al 片时的测量结果与基值的差为因变量, 绘图, 结果如图 11~14 所示。

表3 Mo/Mo 辐射场在不同FDD下的测量结果(kV)

Tab.3 Measurement results in Mo/Mo under different FDD (kV)

FDD	标称值	Fluke X2峰值电压	RTI piranha 657 实用峰值电压
40 cm	20	20.0	19.84
	25	24.8	25.11
	30	29.9	30.27
	35	34.6	35.40
50 cm	20	20.0	19.84
	25	24.9	25.15
	30	30.1	30.33
	35	34.7	35.49
60 cm	20	20.0	19.85
	25	25.1	25.14
	30	30.3	30.33
	35	35.1	35.60

表4 W/Rh 辐射场在不同FDD下的测量结果(kV)

Tab.4 Measurement results in W/Rh under different FDD (kV)

FDD	标称值	Fluke X2峰值电压	RTI piranha 657 实用峰值电压
40 cm	20	19.8	19.84
	25	24.6	24.67
	30	29.4	29.46
	35	34.5	34.31
50 cm	20	19.8	19.85
	25	24.5	24.61
	30	29.5	29.49
	35	34.5	34.40
60 cm	20	19.8	19.86
	25	24.6	24.73
	30	29.7	29.62
	35	34.6	34.51

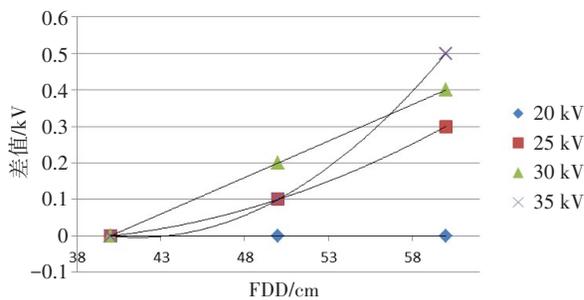


图7 Mo/Mo 辐射场下 Fluke X2 管电压测量

Fig.7 Tube voltage measurement of Fluke X2 in Mo/Mo

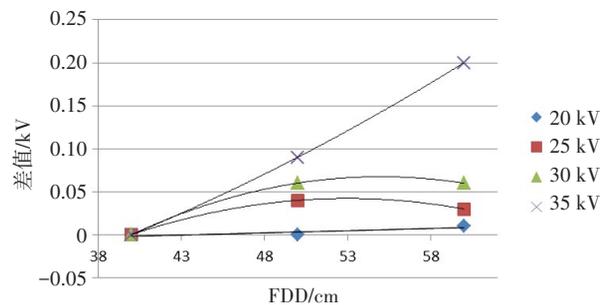


图8 Mo/Mo 辐射场下 RTI piranha 657 管电压测量

Fig.8 Tube voltage measurement of RTI piranha 657 in Mo/Mo

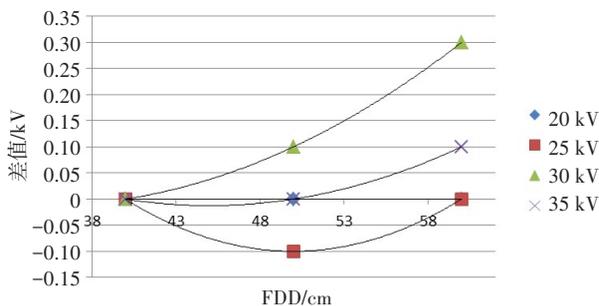


图9 W/Rh 辐射场下 Fluke X2 管电压测量

Fig.9 Tube voltage measurement of Fluke X2 in W/Rh

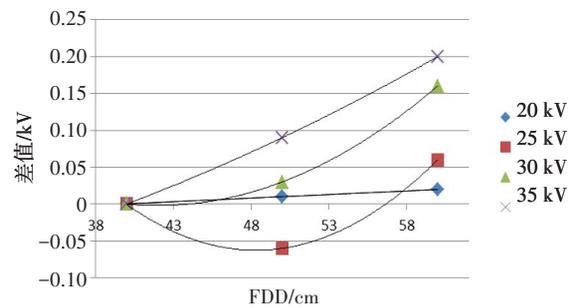


图10 W/Rh 辐射场下 RTI piranha 657 管电压测量

Fig.10 Tube voltage measurement of RTI piranha 657 in W/Rh

从图11~14可以看出在标称值20~39 kV 范围内,随着管电压增加,差值随着附加过滤增加整体趋势变大,管电压为20 kV时基本上不发生变化。Mo/Mo 情况下,附加0.02和0.04 mm 厚度Al片Fluke X2测量结果变化大于0.5 kV,最大增加值为1.6 kV;而同一情况下RTI piranha 657测量结果最大增加值为0.52 kV。W/Rh 情况下,附加0.04 mm 厚度Al片Fluke X2测量结果增加值最大为0.5 kV,RTI piranha 657增加值最大为0.27 kV。

### 2.5 阳极角变化的影响

测量结果列于表7。以阳极角10°情况下管电压测量结果为基值,以标称管电压为自变量,以阳极角16°情况下的测量结果与基值的差作因变量,绘图,结果如图15、图16所示。

从图15、图16可以看出在标称值20~35 kV 范围内,随着管电压增加,两类仪器测量结果随着标称管电压的增大,整体趋势相反,管电压为20 kV时候X2

表5 Mo/Mo 辐射场下附加过滤测量影响(kV)

Tab.5 Effects of additional filter on measurement in Mo/Mo (kV)

仪器	标称值	不添加Al	附加0.01 mm Al	附加0.02 mm Al	附加0.04 mm Al
Fluke X2	20	20.0	20.0	19.9	19.9
	25	25.0	25.1	25.2	25.3
	30	30.2	30.3	30.5	30.8
	35	34.8	35.1	35.4	35.8
	39	38.2	38.7	39.0	39.8
RTI piranha 657	20	19.96	19.98	19.98	20.02
	25	24.63	24.67	24.77	24.88
	30	29.87	29.93	30.04	30.19
	35	34.85	34.97	35.06	35.26
	39	38.40	38.53	38.67	38.92

表6 W/Rh 辐射场下附加过滤测量影响(kV)

Tab.6 Effects of additional filter on measurement in W/Rh (kV)

仪器	标称值	不添加Al	附加0.01 mm Al	附加0.02 mm Al	附加0.04 mm Al
Fluke X2	20	19.8	19.8	19.9	19.9
	25	24.5	24.7	24.8	24.8
	30	29.5	29.6	29.6	29.7
	35	34.5	34.6	34.7	34.9
	39	38.1	38.3	38.4	38.6
RTI piranha 657	20	19.85	19.85	19.86	19.89
	25	24.61	24.73	24.75	24.89
	30	29.49	29.56	29.61	29.84
	35	34.41	34.49	34.55	34.68
	39	38.16	38.26	38.29	38.43

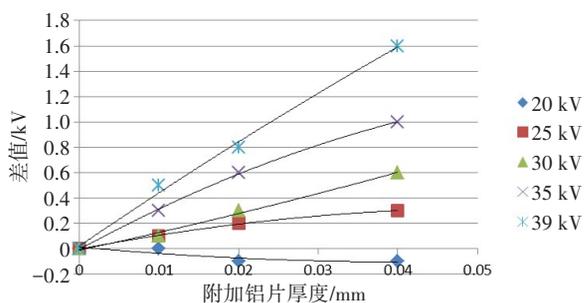


图11 Mo/Mo 辐射场下 Fluke X2 管电压测量

Fig.11 Tube voltage measurement of Fluke X2 in Mo/Mo

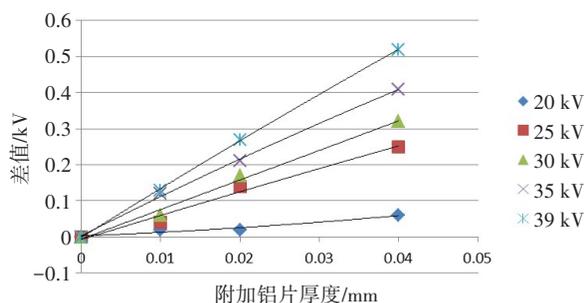


图12 Mo/Mo 辐射场下 RTI piranha 657 管电压测量

Fig.12 Tube voltage measurement of RTI piranha 657 in Mo/Mo

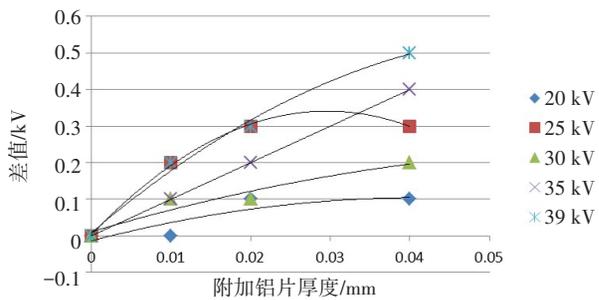


图13 W/Rh 辐射场下 Fluke X2 管电压测量

Fig.13 Tube voltage measurement of Fluke X2 in W/Rh

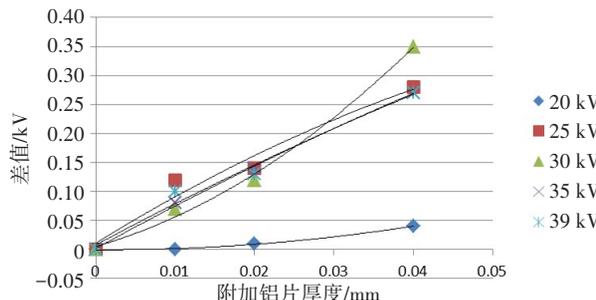


图14 W/Rh 辐射场下 RTI piranha 657 管电压测量

Fig.14 Tube voltage measurement of RTI piranha 657 in W/Rh

表7 阳极角变化测量影响

Tab.7 Effect of anode angle on measurement

仪器	标称值/kV	10°	16°
Fluke X2	20	19.9	19.9
	25	24.6	24.5
	30	29.4	29.1
	35	34.6	34.1
RTI piranha 657	20	19.85	19.96
	25	24.63	25.02
	30	29.55	30.02
	35	34.49	37.94

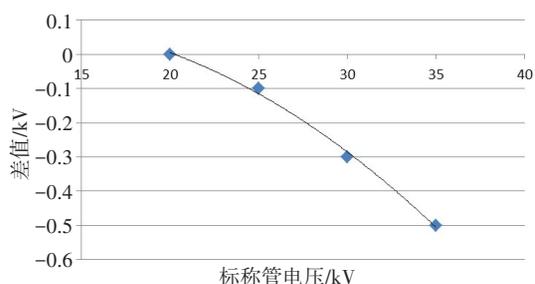


图15 W/Rh 辐射场下 Fluke X2 管电压测量

Fig.15 Tube voltage measurement of Fluke X2 in W/R

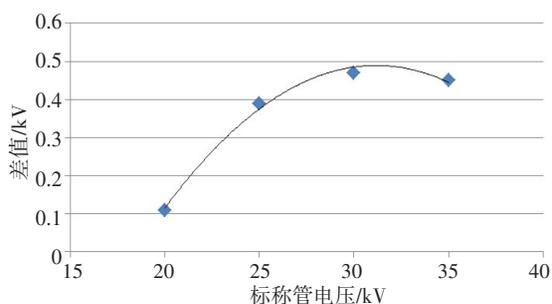


图16 W/Rh 辐射场下 RTI piranha 657 管电压测量

Fig.16 Tube voltage measurement of RTI piranha 657 in W/Rh

测量值不变,而657则增大0.11 kV。在阳极角相差6°的情况下,两种仪器测量结果最大变化依然在0.5 kV以内(含0.5 kV)。

### 3 讨论

从根本上来讲,距离、阳极角和过滤改变,其实就是辐射场达到测量仪器各探测器能谱或者总计数的改变,只不过能谱或者总计数改变的方式不一样。在距离实验中距离的改变会造成空气路径改变。由于乳腺辐射源的管电压较低受到空气减弱影响相比于普通诊断X光机大,并且能谱中低能部分受到影响较高能部分大,同时测量仪器探测器前的过滤厚度不一样(比如1 mm Al和2 mm Al),因此达到相应探测器的射线强度的比值( $R$ 值)就会发生相应变化以

至于测量结果出现变化;同理,球管的阳极角不一样,其能谱和平均能量存在差异,造成测量数据 $R$ 值的改变,从而影响测量结果;两类仪器测量结果变化趋势相反跟其修正参数、仪器里面探测器自身前端过滤材料(得到来自能谱平滑前端不同区域的测量数据)、材料厚度和刻度数据的精度有关;从 $R$ 值与管电压的函数关系可知<sup>[12]</sup>,随着管电压增加, $R$ 值变化率增大,测量到的管电压也会增大,这种情况同样适用于乳腺管电压;两类测量仪器测量结果变化趋势一致。但是同样条件下X2比657变化更为明显,超出了IEC61676的要求,除了跟测量仪器采用的探测器前过滤材料及厚度比值、标准数据的精度有关外,有一个比较重要的因素在于两类仪器采用不同的测量模型,X2由于测量的是kVp,受到采样阈值设置的影响,只选取了部分波形数据计算,导致其并不能很好地反应实际管电压值<sup>[13]</sup>,而657测量的是PPV,对整个管电压波形数据进行计算,能较好地反映实际管电压值;当然两类仪器测量结果的显示分辨率也是一个不可忽视的因素。

同时我们应该看出两种辐射场在同一种条件变化中,对同一类仪器的测量结果影响也是不一样的,Mo/Mo辐射场影响大于W/Rh辐射场,这跟两种辐射场产生的能谱特性相关,Mo/Mo辐射场能谱主要贡献来源于Mo的吸收峰,而W/Rh辐射场则是以韧致辐射贡献为主<sup>[14]</sup>,从蒙特卡罗仿真得到的能谱图也可以明显观察到这一点。Mo/Mo辐射场中 $R$ 值变化率比W/Rh中大,因此在Mo/Mo中测量到的结果肯定也会比W/Rh中变化的更大。

此外我们应当注意的是测量仪器自身参与测量管电压的各个探测器之间屏蔽材料实际的屏蔽效果。在20 kV时候,在两种辐射场中两类仪器测量结果几乎都不会随着距离、阳极角和过滤条件改变而发生变化,说明条件改变并未使得辐射场对测量仪器产生变化的响应,另外20 kV的射线能量特别低,其照射到测量仪器时产生的散射线能够很好地被测量仪器中探测器间的屏蔽材料所屏蔽,但是随着管电压增加,射线辐射质变硬,屏蔽材料屏蔽效果变差,造成几个探测器之间计数的溢出,因而也会影响计算结果,这个需要更进一步的论证。

### 4 总结

作为对20~150 kV能量段X射线诊断仪器管电压溯源体系的补充,建立实验室传递辐射场对乳腺非介入管电压测量仪器进行管电压校准时,应该考虑确立统一的校准距离(比如按照IEC 61676确定为40 cm)、球管阳极角(比如选择同一厂家同一型号的

球管),这样有利于降低对非介入测量仪器结果的影响;过滤材料和过滤厚度难以精准测量,可以通过总过滤条件和半值层,甚至第二半值层和同质系数来加以限制,也能降低其对非介入测量仪器结果的影响,这一点在Mo/Mo情况下,被校准仪器采用kVp表达结果的时候应特别值得注意;建议进行乳腺非介入管电压测量的时候尽量不使用kVp来反应测量结果,而应使用PPV;当然此次研究并没有涉及非介入管电压测量设备探测器探测效率、一致性和探测器之间散射等自身影响因素进行展开,尚需生产厂家提供具体参数;此外辐射场只考虑了市场上乳腺机中临床应用最为常见的靶材和过滤组合。

### 【参考文献】

- [1] 国家市场监督管理总局. 医用乳腺X射线辐射源: JIG 1145-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Medical X-ray radiation source for mammographic equipment: JIG 1145-2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [2] 国家卫生健康委员会. 医用X射线诊断设备质量控制检测规范: WS 76-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
National Health Commission of the People's Republic of China. Specification for testing of quality control in medical X-ray diagnostic equipment: WS 76-2020[S]. Beijing: Standard Press of China, 2021.
- [3] International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment-Part 2-45: particular requirements for the basic safety and essential performance of mammographic X-ray equipment and mammographic stereotactic devices: IEC 60601-2-45[S]. Geneva: IEC, 2011.
- [4] 赵红兰, 马红, 路欣, 等. 不同管电压对乳腺数字X线摄影辐射剂量和图像质量的影响[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(10): 921-925.  
ZHAO H L, MA H, LU X, et al. Influences of different tube voltages on the dose and image quality of a full field digital mammography [J]. Chinese Journal of Radiology, 2013, 47(10): 921-925.
- [5] 杨建, 侯新生, 郑永明, 等. 基于非介入式X射线管电压测量的研究[J]. 中国测试技术, 2008, 34(5): 110-112.  
YANG J, HOU X S, ZHENG Y M, et al. Study on voltage measurement of X-ray tubes based on non-intrusive [J]. China Measurement & Testing Technology, 2008, 34(5): 110-112.
- [6] 王玉龙, 吴金杰, 姚馨博, 等. 乳腺X射线机管电压介入式研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(5): 430-432.  
WANG Y L, WU J J, YAO X B, et al. Study on voltage interposition of mammographic X-ray tube [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(5): 430-433.
- [7] International Electrotechnical Commission. Medical diagnostic X-ray equipment-radiation conditions for use in the determination of characteristics: IEC 61267-2005[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [8] International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment-dosimetric instruments used for non-invasive measurement of X-ray tube voltage in diagnostic radiology: IEC 61676-2009 [S]. Geneva: IEC, 2009.
- [9] 廖振宇, 吴金杰, 王玉龙, 等. 医用乳腺X射线参考辐射场的建立[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(1): 19-22.  
LIAO Z Y, WU J J, WANG Y L, et al. The equipment establishing for medical mammography [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(1): 19-22.
- [10] 郭思明, 刘莹, 吴金杰. 乳腺X射线基准装置半值层的测量[J]. 计量学报, 2018, 39(3): 410-413.  
GUO S M, LIU Y, WU J J. Half value layer measurement of mammography X-ray standard [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(3): 410-413.
- [11] 廖振宇. 诊断X射线参考辐射场的测量与研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.  
LIAO Z Y. The measurement and research of reference radiation field for diagnostic X-ray [D]. Hengyang: University of South China, 2017.
- [12] 薛永库, 杨国山, 周红梅, 等. 用非介入法检测诊断X射线机的管电压和曝光时间[J]. 中国辐射卫生, 2001, 10(4): 193-196.  
XUE Y K, YANG G S, ZHOU H M, et al. Noninvasive method on the measurement of the tube voltage and exposure time of diagnostic X-ray machine [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2001, 10(4): 193-196.
- [13] 白玫. X线发生器实际峰值电压和平均峰值电压对比研究[J]. 医疗卫生装备, 2010, 31(6): 104-105.  
BAI M. Comparative study of actual peak voltage and average peak voltage of X-ray generator [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2010, 31(6): 104-105.
- [14] 赵士庵, 尉可道, 欧向明. 医用诊断X射线的能量分布和能量表达[J]. 中国医学装备, 2013, 10(2): 8-12.  
ZHAO S Y, WEI K D, OU X M. Energetic distribution and expression for diagnostic X-rays [J]. China Medical Equipment, 2013, 10(2): 8-12.
- [15] AGAZAR M, PERRILLAT D, SAADEDDINE H. Study of non-invasive instruments for the measurement of pulsed X-ray high voltage tube [C]//19th International Congress of Metrology, 2019, 02002: 1-6.
- [16] 李论. X射线自由空气电离室修正因子的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
LI L. The research for correction factor of X-ray free air ionization chamber [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [17] 曹琴琴, 金川, 任翔, 等. 透射型X射线管靶材的分析与评价[J]. 中国辐射卫生, 2013, 22(1): 15-17.  
CAO Q Q, JIN C, REN X, et al. Analysis and estimate of target parameter in transmission X-ray tube [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2013, 22(1): 15-17.
- [18] 陈飏, 陈春晖, 高林峰, 等. X射线床旁摄影场所电离辐射水平和防护效果研究[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28(2): 135-138.  
CHEN B, CHEN C H, GAO L F, et al. A field research on the ionizing radiation level and protective effect in X-ray bedside radiography [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2019, 28(2): 135-138.
- [19] 薛茹, 鞠金欣, 陈尔东. 医疗照射防护中有关放射诊断的放射卫生标准现状分析[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28(3): 262-266.  
XUE R, JU J X, CHEN E D. Status analysis of radiological health standards about medical radiation protection for radiological diagnosis [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2019, 28(3): 262-266.
- [20] 吕雅竹, 郭彬, 李德红, 等. 诊断X射线能谱影响因素的模拟与分析[J]. 计量学报, 2020, 41(8): 1023-1025.  
LÜ Y Z, GUO B, LI D H, et al. Simulation and analysis of factors affecting diagnostic X-ray energy spectrum [J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(8): 1023-1025.

(编辑: 薛泽玲)