

JJF (皖)

安徽省地方计量技术规范

JJF (皖) 71—2019

微波治疗仪校准规范

Calibration Specification for Microwave Therapy Equipment

2019-01-30 发布

2019-03-15 实施

安徽省市场监督管理局 发布

微波治疗仪校准规范
Calibration Specification for
Microwave Therapy Equipment



归口单位：安徽省市场监督管理局
主要起草单位：安徽省计量科学研究院
参加起草单位：亳州市计量检查测试所
安徽省第二人民医院

本规范委托安徽省计量科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

刘永杰（安徽省计量科学研究院）

张 杰（安徽省计量科学研究院）

参加起草人：

曹 俊（安徽省计量科学研究院）

郑四顺（安徽省计量科学研究院）

王家伟（安徽省计量科学研究院）

乔 婧（亳州市计量检查测试所）

许坤明（安徽省第二人民医院）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 术语	(1)
3.2 计量单位	(2)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 工作频率	(2)
5.2 微波功率	(2)
5.3 设备外壳辐射泄漏	(2)
5.4 无用辐射	(3)
5.5 治疗时间	(3)
5.6 电压驻波比	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 校准用设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 常规检查	(4)
7.2 校准方法	(5)
8 校准结果表达	(7)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A 微波治疗仪校准原始记录格式	(9)
附录 B 微波治疗仪校准证书内页格式	(11)
附录 C 微波治疗仪不确定度评定示例	(13)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012 《测量不确定度的评定与表示》编写，主要参考了 GB 9706.6—2007 《医用电气设备 第 2 部分：微波治疗设备安全专用要求》、YY 0838—2011 《微波热凝设备》和 YY 0899—2013 《医用微波设备附件的通用要求》等技术规范。

本规范为首次发布。

微波治疗仪校准规范

1 范围

本规范适用于工作频率范围为 0.3GHz~3GHz、输出功率不大于 250W、具有连续波输出功能的微波理疗、微波热凝和微波热疗等微波治疗仪的仪器的校准，其他类型的微波治疗仪可参照执行。不适用于其附件穿刺测温针的校准。

2 引用文件

本规范引用了以下文件：

GB9706.6—2007 医用电气设备第 2 部分：微波治疗设备安全专用要求

YY 0838—2011 微波热凝设备

YY0899—2013 医用微波设备附件的通用要求

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于该规范；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。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 微波治疗仪 microwave therapy equipment

利用工作频率 0.3GHz~30GHz 的微波辐射能量治疗疾病的设备，常见设备包括微波理疗设备，微波热凝设备和微波热疗设备。

3.1.2 微波治疗仪附件 accessories of microwave therapy equipment

为完成治疗目的，与医用微波治疗仪配合使用的附件，包括输出线缆、转接器、辐射器、热凝器、穿刺测温针等。

3.1.3 辐射器 radiator

辐射器是有方向性的天线。例如，带有反射器的双电极、偶极子、喇叭天线或者单极振子等用于对患者局部施加微波能。

3.1.4 热凝器 ablation/coagulation applicator

能够使微波能量在局部组织中传输并使组织产生凝固的器件。

3.1.5 无用辐射 unwanted radiation

辐射到患者身上及空间中非治疗用的微波能量。

3.1.6 电压驻波比 voltage standing wave ratio; VSWR

传输路径上，相邻的最大电压与最小电压幅度的比值。

3.2 计量单位

3.2.1 功率的单位及符号

计量单位：瓦特，符号：W。

3.2.2 时间的单位及符号

计量单位：分或秒，符号：min 或 s。

3.2.3 微波辐射的单位及符号

单位：毫瓦每平方厘米，符号： mW/cm^2 。

4 概述

微波治疗仪是利用微波在人体产生的热对患者的病变部位进行辐射，从而达到治疗的目的。主要由控制单元、灯丝电源、阳极电源、磁控管、微波输出 (即辐射器或热凝器)等组成 (见图 1)。

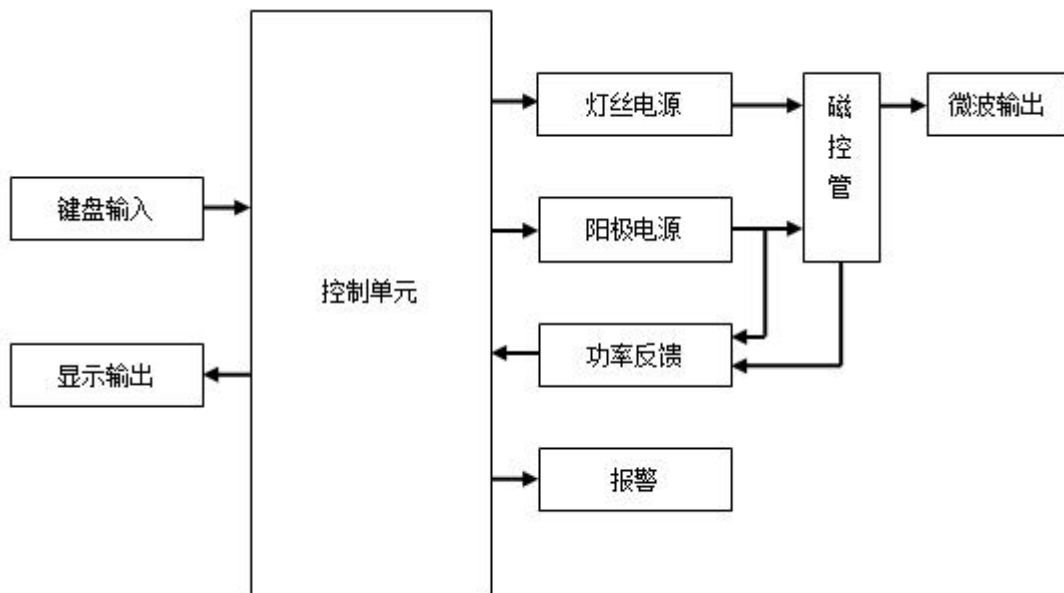


图 1 微波治疗仪结构

5 计量特性

5.1 工作频率

最大允许误差： $\pm 10\%$ ；

5.2 微波功率

最大允许误差： $\pm 30\%$ ；

5.3 设备外壳辐射泄漏

$\leq 10\text{mW}/\text{cm}^2$ ；

5.4 无用辐射

$\leq 10 \text{ mW/cm}^2$;

5.5 治疗时间

最大允许误差: $\pm 1 \text{ min}$;

5.6 电压驻波比

≤ 3.0 。

注: 以上指标不用于合格性判别, 仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度: $(5 \sim 40) \text{ }^\circ\text{C}$;

6.1.2 相对湿度: $(20 \sim 80) \%$;

6.1.3 电源电压及频率: $(220 \pm 22) \text{ V}$, $(50 \pm 1) \text{ Hz}$;

6.1.4 周围无影响正常校准工作的机械振动和电磁场干扰;

6.1.5 开机预热: 预热时间一般不少于 15min, 若产品说明书有明确规定, 按厂家规定预热时间进行。

6.2 校准用设备

校准用设备及辅助设备见表 1。

表 1 校准用设备及辅助设备

设备名称	测量范围	参考指标
微波功率计	频率范围: 10MHz~3GHz 功率范围: 覆盖微波治疗仪最大输出功率	校准因子不确定度: 2%~3% ($k=2$)
频谱分析仪	频率范围: 10MHz~3GHz 功率范围: 覆盖微波治疗仪最大输出功率	频率最大允许误差: $\pm 1\%$

表 1 (续)

衰减器 ^①	频率范围：10MHz~3GHz 最大输入功率：覆盖微波治疗仪 最大输出功率 衰减值：满足微波功率计或者频谱分析仪输入功率需要	衰减最大允许误差（修正后）：±0.5 dB； 电压驻波比：<1.2
定向耦合器 ^①	频率范围：10MHz~3GHz 最大输入功率：覆盖微波治疗仪 最大输出功率 耦合度：满足微波功率计或者频谱分析仪输入功率需要	耦合度最大允许误差（修正后）：±0.5 dB； 主输出端口的电压驻波比： <1.2
网络分析仪	频率范围：10MHz~3GHz 阻抗：50Ω 电压驻波比：1.0~5.0	电压驻波比测量不确定度： $U=0.1 (k=2)$
微波漏能仪	功率密度：(0~10)mW/cm ² 覆盖微波治疗仪工作频率	功率密度最大允许误差： ±2.75 dB
秒表	(0~3600)s	日差：±0.5 s/d
匹配负载	频率：10MHz~3GHz 最大输入功率：250W 阻抗：50Ω	电压驻波比：<1.3
体模 ^②	/	/

注：1. 定向耦合器和衰减器二选一即可。

2. 体模是用于测试模拟患者的模拟装置，是由低损耗材料制成的圆柱体形容器，其直径为 20 cm，高为 50 cm，内充有 9g/L 的氯化钠 (NaCl) 溶液。

7 校准项目和校准方法

7.1 常规检查

7.1.1 被校微波治疗仪应带有维持正常工作的所必要的附件。

7.1.2 被校微波治疗仪各部分应完好无损，无影响正常工作的机械损伤。

7.1.3 被校微波治疗仪接入校准装置后能正常工作。

7.2 校准方法

7.2.1 输出频率

频谱分析仪使用前进行自校。如图 2 所示取下微波治疗仪功率输出端的辐射器或凝固器，将微波治疗仪功率输出端接入衰减器输入端，并将衰减器输出端接入频谱分析仪。打开微波治疗仪，合适选取一常用治疗功率。工作稳定后，调节频谱分析仪参数，使波形稳定显现。从频谱分析仪上观察波形所处的工作频率，分别测量不同设定频率下的微波输出频率，填入表 A.1，并建议参照式 (1) 计算工作频率的示值误差。

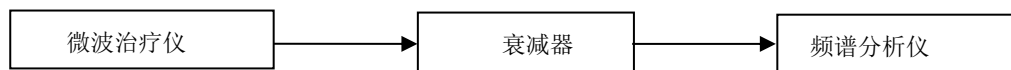


图 2 微波治疗仪工作频率测量示意图

$$\delta_j = \frac{f_0 - f_s}{f_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

δ_j —工作频率示值误差，%；

f_0 —微波治疗仪工作频率值，MHz；

f_s —频谱分析仪测量值，MHz。

7.2.2 微波功率

方法一：

微波功率计进行调零和自校准，然后按图 3 连接仪器，卸下微波治疗仪功率输出端辐射器或者热凝器，将微波治疗仪功率输出端口接入衰减器输入端，然后将微波功率计接到衰减器的输出端，最后启动微波治疗仪。在微波治疗仪额定输出功率的 10%~100% 范围内均匀取 5 个点，分别记录这 5 个功率点的微波功率计的测量值，填入表 A.2，并建议参照式 (2) 计算输出功率示值误差。

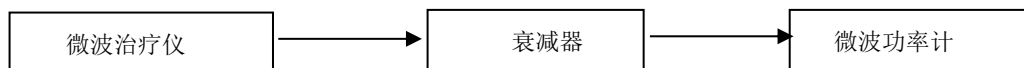


图3 衰减器法微波功率测量示意图

$$\delta_j = \frac{P_{0j} - P_j \cdot 10^{\frac{A_j}{10}}}{P_j \cdot 10^{\frac{A_j}{10}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

δ_j —微波功率示值误差, %;

P_{0j} —微波治疗仪功率设定值, W;

P_j —微波功率计测量值, W;

A_j —衰减器的衰减值或定向耦合器的耦合度, dB。

方法二:

微波功率计使用前进行调零和自校准,按照图4所示卸下微波治疗仪功率输出端的辐射器或者热凝器,将定向耦合器输入端和微波治疗仪功率输出端口连接,然后将微波功率计接到定向耦合器的耦合端口,定向耦合器的输出端口接匹配负载。然后,启动微波治疗仪,在其额定输出功率的10%~100%范围内均匀取5个点,分别记录这5个功率点的微波功率计的测量值,填入表A.2,并建议参照式(2)计算示值误差。

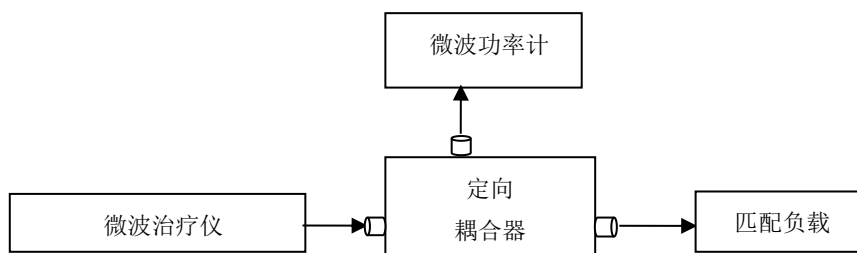


图4 定向耦合器法微波功率测量示意图

7.2.3 设备外壳辐射泄漏

将微波治疗仪功率输出端口接上匹配负载,然后设定到额定功率输出状态。工作稳定后,用微波漏能仪在距设备外表面5cm的任意点测量微波功率密度,

取其最大值即为被检微波治疗仪外壳辐射泄漏，填入表 A.3。

7.2.4 无用辐射

设备首先在匹配负载下工作，将微波治疗仪设定到 100W 或者各辐射器的额定功率上，两者取较小值。在这个功率级上用各个辐射器依次替换匹配负载。将体模放置于辐射器或凝固探头正前方 25 cm 处，启动微波治疗仪输出微波功率，在辐射器或凝固探头正前方 1 m 或正后方 25 cm 内，用微波漏能仪测量无用辐射，所得的最大值即为被检微波治疗仪无用辐射，填入表 A.4。

7.2.5 治疗时间

将微波治疗仪输出端口接上匹配负载，设置输出功率为 20 W（或其他常用输出功率），治疗时间为 30min（或微波治疗仪的最大设置时间）。波治疗仪开始工作的同时计时，待其计时完成同时按下电子秒表，记下读数，填入表 A.5，治疗时间的示值误差建议参照式（3）计算。

$$\delta_t = t_0 - t \quad (3)$$

式中：

δ_t —治疗时间示值误差，min；

t_0 —治疗时间的测量值，min；

t —微波治疗仪治疗时间设定值，min。

7.2.6 辐射器或凝固器的电压驻波比

网络分析仪使用前先设置频率等参数，然后使用校准件进行自校准。体模按照厂家说明书中规定置于辐射器或凝固器前方，将辐射器或凝固器输出线缆连接至网络分析仪，逐个替换输出线缆另一端的辐射器或凝固器，读取网络分析仪数值，将所读取的电压驻波比最大值填入表 A.6。

8 校准结果表达

微波治疗仪校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；

- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的, 因此, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔, 建议为 1 年。

附录 A

微波治疗仪校准原始记录格式

校准证书号:

共 页 第 页

委托方: _____ 委托方地址: _____

器具名称: _____ 制造单位: _____

型号/规格: _____ 器具编号: _____ 准确度: _____

被校仪器状态(完好“√”): _____ 校准前: _____ 校准后: _____

校准依据: _____ 环境温度: _____℃ 相对湿度: _____%

标准器名称	型号规格	准确度	出厂编号	有效期	备注

表 A.1 工作频率

标称频率	实测频率

表 A.2 微波功率

微波治疗仪额定输出功率 P: _____ W		
输出设定	输出功率 W	实测功率 W

表 A.3 外壳设备辐射泄露

外壳设备辐射泄露测量值: _____ mW/cm ²	
<input type="checkbox"/> > 10mW/cm ²	<input type="checkbox"/> ≤ 10mW/cm ²

表 A.4 无用辐射

无用辐射测量值: _____ mW/cm ²	
<input type="checkbox"/> > 10 mW/cm ²	<input type="checkbox"/> ≤ 10mW/cm ²

表 A.5 治疗时间

时间设定值	实测值

表 A.6 电压驻波比

电压驻波比测量值: _____	
<input type="checkbox"/> > 3	<input type="checkbox"/> ≤ 3

校准员: _____ 核验员: _____ 校准日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

校准地点: 本院 _____ 现场 _____

附录 B

微波治疗仪校准证书内页格式

1 工作频率

标称频率	实测频率	不确定度 U , $k=2$

2 微波功率

微波治疗仪额定输出功率 P: _____ W			
输出设定	输出功率 W	实测功率 W	不确定度 U , $k=2$

3 外壳设备辐射泄露

外壳设备辐射泄露测量值: _____ mW/cm ²	
<input type="checkbox"/> > 10mW/cm ²	<input type="checkbox"/> ≤ 10mW/cm ²
不确定度 $U= (k=2)$	

4 无用辐射

无用辐射测量值: _____ mW/cm² > 10 mW/cm² ≤ 10 mW/cm²不确定度 $U= (k=2)$

5 治疗时间

时间设定

实测值

不确定度 $U= (k=2)$

6 电压驻波比

电压驻波比测量值: _____

 > 3 ≤ 3不确定度 $U= (k=2)$

本证书所列校准结果均可溯源至复现 (SI) 单位的中国国家计量基准。

校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF1059 (等同于 ISO GUM) 的要求。

敬告:

1. 被校准仪器修理后, 应立即进行校准。
2. 在使用过程中, 如对被校准仪器的技术指标产生怀疑, 请重新校准。
3. 根据客户要求和校准文件的规定, 通常情况下 12 个月校准一次。

附录 C

微波治疗仪不确定度评定示例

本附录对微波治疗仪的部分校准结果进行不确定度评定。根据各个校准项目的不同，分别讨论不确定度的评定计算方法。

C.1 微波功率

校准条件：采用衰减器、微波功率计对微波治疗仪的输出功率进行校准。

C.1.1 测量模型（对数模型）

$$\Delta P = P_X - (P_N + P_A)$$

式中：

ΔP —测量误差，W；

P_X —被校微波治疗仪输出功率值，W；

P_N —微波功率计显示值，W；

P_A —衰减器的衰减值或定向耦合器的耦合度，dB。

C.1.2 计算各分量标准不确定度

根据实际的校准环境，在微波治疗仪输出微波功率测量中，影响测量结果的不确定度来源主要有以下几个因素：

- (1) 微波功率计校准因子引入的不确定度；
- (2) 衰减器-电缆的频率响应引入的不确定度；
- (3) 失配引入的不确定度；
- (4) 衰减器衰减值误差引入的不确定度；
- (5) 由重复测量引入的校准结果的不确定分量。

C.1.2.1 微波功率计校准因子引入的不确定度 $u(P_{N1})$ ；

微波功率计的技术指标中，其功率校准因子的不确定度为 2%~3% ($k=2$)，本次测量过程选取的微波功率计校准因子的不确定度为 3%，属于正态分布，自由度 ∞ ，B 类，包含因子为 2，则：

$$u(P_{N1})=3\%/2=1.5\%\approx 0.07\text{dB}$$

C.1.2.2 衰减器-电缆的频率响应引入的不确定度 $u(P_{N2})$ ；

整个衰减器-电缆链路连接在网络分析仪上进行校准，得到其 0.3GHz~3GHz 的频率响应曲线。频率响应曲线标准偏差为 0.10dB，网络分析仪的测量不确定

度为 0.04dB。因此得到衰减器-电缆的频率响应引入的不确定度认为是正态分布，自由度 ∞ ，B类，包含因子为 2，则

$$u(P_{N2}) = 0.10\text{dB} + 0.02\text{dB} = 0.12\text{dB}$$

C.1.2.3 失配引入的不确定度 $u(P_T)$;

微波功率计的输出端口的电压驻波比 $<1.5:1$ 。使用网络分析仪对衰减器的 S_{11} (输出端口反射系数)进行测量，其最大 VSWR=1.17:1。因此，微波治疗仪和衰减器之间由失配引起的影响 ΔA ：

$$\Delta A = \left[1 - \left(\frac{1.17 - 1}{1.17 + 1} \right) \times \left(\frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right) \right]^{-2} - 1 = 3.1\%$$

按反正弦估算，自由度 ∞ ，B类，包含因子为 $\sqrt{2}$ ，则

$$u(P_T) = 3.1\% / \sqrt{2} = 2.2\% \approx 0.10\text{dB}$$

C.1.2.4 衰减器衰减误差引入的不确定度 $u(P_A)$;

衰减器的技术指标中最大允许误差为 $\pm 0.5\text{dB}$ ，由衰减器误差引入的不确定度认为是均匀分布，自由度 ∞ ，B类，包含因子为 $\sqrt{3}$ ，则

$$u(P_A) = 0.5\text{dB} / \sqrt{3} \approx 0.29\text{dB}$$

C.1.2.5 由重复测量引入的校准结果的不确定分量 $u(P_X)$;

采用实验标准偏差来表征，用 A 类评定方法评定，测量数据如下（微波治疗仪输出功率 100W，衰减器衰减 50dB）：

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 /dB	0.08	0.10	0.09	0.06	0.04	0.06	0.05	0.08	0.05	0.05

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 0.02\text{dB}$$

由重复性引入的标准不确定度为

$$u(P_X) = s = 0.02\text{dB}$$

C.1.3 标准不确定度一览表（见表 C.1）

表 C.1 微波功率的校准不确定度评定

标准不确定分量	不确定度来源	标准不确定度值/dB	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)/\text{dB}$	自由度
$u(P_{N1})$	校准因子	0.07	1	0.07	∞
$u(P_{N2})$	频率响应	0.12	1	0.12	∞
$u(P_{\Gamma})$	失配	0.10	1	0.10	∞
$u(P_A)$	衰减值误差	0.29	1	0.29	∞
$u(P_X)$	测量重复性	0.02	1	0.02	9

C.1.4 合成标准不确定度

灵敏度系数 $c_i = 1$ ，各影响量相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{c_{N1}^2 u^2(P_{N1}) + c_{N2}^2 u^2(P_{N2}) + c_{\Gamma}^2 u^2(P_{\Gamma}) + c_A^2 u^2(P_A) + c_X^2 u^2(P_X)} \approx 0.34\text{dB}$$

C.1.5 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \infty$$

C.1.6 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} \times u_c = 2 \times u_c = 0.68\text{dB}$$

$$U = 0.68\text{dB} \quad (k = 2)$$

C.2 设备外壳辐射泄露

校准条件：用 ML-91 型微波漏能仪对微波治疗仪的外壳辐射泄露进行直接测量。

C.2.1 测量模型

$$Y = X_N$$

式中：

Y —被测微波治疗仪外壳辐射泄漏的估计值， mW/cm^2 ；

X_N —微波漏能仪的示值， mW/cm^2 。

C.2.2 计算各分量标准不确定度

根据实际的校准环境，在使用微波漏能仪直接测量外壳辐射泄漏时，影响测量结果的不确定度来源主要有以下几个因素：

- (1) 接收天线（探头）瞄准偏差引入的不确定度；
- (2) 微波漏能仪测量误差引入的不确定度；
- (3) 测量环境影响引入的不确定；
- (4) 由重复测量引入的校准结果的不确定分量。

C.2.2.1 接收天线（探头）瞄准偏差引入的不确定度 $u(x_{N1})$;

由于测量条件控制不严或者天线相位中心难以精确定位，导致接收天线的实际指向与理论指向存在一定偏差，偏离主轴引入的误差区间半宽为

$$\Delta G = G(\theta_0) - G(\theta_{\Delta\beta})$$

横向偏移 5mm，偏离主轴角度可估算认为

$$\arctan \frac{5}{50} \approx 0.1^\circ$$

根据接收天线技术参数得到 $\Delta G = 0.2\text{dB} = 4.5\%$ ，估计偏离主轴引入的误差在量程范围内为线性，ML-91 型微波漏能仪 $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 量程引入的绝对误差最大值为

$$\Delta = 4.5\% \times 200\mu\text{W}/\text{cm}^2 = 9\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

认为其概率服从矩形分布，自由度 ∞ ，B 类，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(x_{N1}) = \frac{9\mu\text{W}/\text{cm}^2}{\sqrt{3}} \approx 5.20\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

C.2.2.2 微波漏能仪显示误差引入的不确定度 $u(x_{N2})$;

ML-91 型微波漏能仪的技术指标中，指示器在额定电压下满量程显示误差不大于 $\pm 1.5\%$ ，那么 $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 量程引入的绝对误差为

$$\Delta = 1.5\% \times 200\mu\text{W}/\text{cm}^2 = 3\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

认为其概率服从矩形分布，自由度 ∞ ，B 类，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(x_{N2}) = \frac{3\mu\text{W}/\text{cm}^2}{\sqrt{3}} \approx 1.74\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

C.2.2.3 测量环境影响引入的不确定度 $u(x_{N3})$

微波功率密度测量通常是在微波暗室或室外开阔场地中开展，测量环境影响会引入一定的不确定度。但是在设备摆放现场测量中，存在着其它设备的干扰叠加、反射面的反射等因素。因此可在被测设备周边摆放吸波材料或者通过架高方式。假设采取措施后测量环境被抑制在 $\pm \delta_p$ dB 范围以内，取相对复杂环境下的经验值 $\delta_p = 0.5\text{dB} = 10.87\%$ ，那么 $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 量程引入的绝对误差最大值为

$$\Delta = 10.87\% \times 200\mu\text{W}/\text{cm}^2 \approx 21.8\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

认为其概率服从三角分布，自由度 ∞ ，B 类，包含因子 $k = \sqrt{6}$ ，则

$$u(x_{N3}) = \frac{21.8\mu\text{W}/\text{cm}^2}{\sqrt{6}} \approx 8.90\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

C.2.2.4 由重复测量引入的校准结果的不确定分量 $u(y)$

采用实验标准偏差来表征, 用 A 类评定方法评定。10 次重复测量数据如下:

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	50.8	68.7	70.1	55.2	50.8	78.1	48.6	56.2	61.6	57.7

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 9.22\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

由重复性引入的标准不确定度为

$$u(y) = s = 9.22\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

C.2.3 标准不确定度一览表 (见表 C.2)

表 C.2 外壳辐射泄露的校准不确定度评定

标准不确定分量	不确定度来源	标准不确定度值/ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i) / \mu\text{W}/\text{cm}^2$	自由度
$u(x_{N1})$	瞄准偏差	5.20	1	5.20	∞
$u(x_{N2})$	显示误差	1.74	1	1.74	∞
$u(x_{N3})$	环境影响	8.90	1	8.90	∞
$u(y)$	测量重复性	9.22	1	9.22	9

C.2.4 合成标准不确定度

灵敏度系数 $c_i = 1$, 各影响量相互独立, 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{c_{N1}^2 u^2(x_{N1}) + c_{N2}^2 u^2(x_{N2}) + c_{N3}^2 u^2(x_{N3}) + c_y^2 u^2(y)} \approx 14\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

C.2.5 有效自由度

$$v_{\text{eff}} = \infty$$

C.2.6 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} \times u_c = 2 \times u_c = 28\mu\text{W}/\text{cm}^2$$

$$U = 28\mu\text{W}/\text{cm}^2 \quad (k = 2)$$

