

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1884-2020

# 10 kHz~100 MHz 电磁场探头 校准规范

**Calibration Specification for Electromagnetic Field Probes** 

from 10 kHz to 100 MHz

2020-11-26 发布

2021-05-26 实施

## 国家市场监督管理总局发布

学兔兔 www.bzfxw.com 标准下载

JJF 1884—2020

## 10 kHz~100 MHz 电磁场探头

# 校准规范

**Calibration Specification for Electromagnetic** 

Field Probes from 10 kHz to 100 MHz

归 口 单 位:全国无线电计量技术委员会
 主要起草单位:中国计量科学研究院
 参加起草单位:广州计量检测技术研究院
 辽宁省计量科学研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

### 本规范主要起草人:

- 刘 潇 (中国计量科学研究院)
- 李 渤 (中国计量科学研究院)
- 孔雨聆(中国计量科学研究院)

### 参加起草人:

沈仁怡(广州计量检测技术研究院)

郝 松 (辽宁省计量科学研究院)

-	

录

引言	(]])
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 场传感器	(1)
3.2 场探头	(1)
3.3 电场探头	(1)
3.4 磁场探头	(1)
3.5 读出装置	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 测量标准及其他设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(5)
8 校准结果表达	(8)
9 复校时间间隔	(9)
附录 A 原始记录格式	(10)
附录 B 校准证书内页格式	(13)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(16)

# 引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1—2012 《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范参考 IEEE 1309—2013《IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz》中相关条款进行编写。主要针对频率范围为 10 kHz~100 MHz 的电磁场探头校准方法进行了规定。校准项目包括:电场强度、磁场强度、磁感应强度和各向同性。并在附录中给出了测量的不确定度评定示例。

本规范为首次发布。



### 10 kHz~100 MHz 电磁场探头 校准规范

#### 1 范围

本规范规定了 10 kHz~100 MHz 频段的电磁场探头(含电场探头、磁场探头,简称场探头)的校准方法,适用于电磁兼容检测等领域中使用的场探头的校准。其他类型的场探头(除天线外)亦可参考使用。

#### 2 引用文件

本规范引用了下列文件:

IEEE Std 1309—2013 9 kHz~40 GHz 电磁场探头和传感器(除天线外)的校准 [IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz]。

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。

#### 3 术语和计量单位

3.1 场传感器 field sensor

一个用以测量电场或者磁场的电小尺寸设备,不含电子器件,并应尽可能小地扰动 被测场。理论上其传输函数(输出信号和输入电磁场的比值)可以通过其测得的物理参 数和材料电特性得到。

3.2 场探头 field probe

包含一个场传感器或若干个场传感器组合及二极管检波器、电阻、放大器等电子器件。用以测量某一媒质中的射频场分量,并应尽可能小地扰动被测场。理论上场探头的 输出不能通过简单地测量其物理参数得到。场探头包含电场探头和磁场探头。

3.3 电场探头 E-field probe

可测量电场强度 E (单位为 V/m) 的场探头。

3.4 磁场探头 H-field probe

可测量磁场强度  $\overline{H}$  (单位为 A/m) 或者磁感应强度  $\overline{B}$  (单位为 Wb/m<sup>2</sup> 或者 T) 的场探头。

注: 1 Wb/m<sup>2</sup>=1 T=10<sup>6</sup>  $\mu$ T。

3.5 读出装置 readout device

采集场探头的输出信号并将其转化为可读信号输送给数据采集分析仪的电子装置。

4 概述

场探头通常分无源和有源两种:无源场探头包括场传感器、二极管检波器和高阻传

输线三部分,见图1(a);有源场探头包括场传感器、检波器、电阻和放大器,见图1(b)。 电小尺寸的场传感器用于探测空间中某一位置的场分量,检波器将射频信号转换为等比 例的直流或者低频交流信号,检波后的电流经平衡高阻传输线或电阻、放大器、光缆输 出给数据处理和显示电路。将场探头和读出装置相连,即可通过显示单元读取空间某一 位置的电磁场场强数值。



图 1 场探头的基本结构示意图

场探头根据待测参数的不同分为电场探头和磁场探头,也有些场探头将二者集成在 一起。电场探头的场传感器通常由三个相互正交的偶极子天线组成,而磁场探头的场传 感器通常由三个相互正交的环天线组成,如图2所示。



Y JK Z

(a) 电场探头中正交布置的偶极子天线

(b) 磁场探头中正交布置的环天线

图 2 场探头中采用正交布置的场传感器

场探头广泛用于电磁兼容、通信、电视和广播发射系统、医疗设备、电力发电等领 域的电磁场测量。

5 计量特性

场探头的计量特性见表 1。

JJF 1884—2020

计量特性	场强范围	频率范围	最大允许误差
电场强度	1 V/m~100 V/m	10 kHz~100 MHz	$\pm 1.5~\mathrm{dB}$
磁感应强度	0.1 $\mu$ T $\sim$ 100 $\mu$ T	10 kHz~300 kHz	$\pm 1.5~\mathrm{dB}$
磁场强度	0.015 A/m~0.5 A/m	10 kHz~100 MHz	$\pm 1.5 \mathrm{dB}$
各向同性	电场强度: 10 V/m~100 V/m 磁感应强度: 1 μT~100 μT 磁场强度: 0.05 A/m~0.5 A/m	10 kHz~100 MHz	$\pm 1.5~\mathrm{dB}$

表 1 场探头的计量特性

注:

1 具体可以测量的频段和场强范围取决于采用的测量标准及配套设备,不限于表中数值。

2 场强频率响应和线性可以通过测量的场强得到,各向同性可以通过在0°~360°之间不同的 角度处测量场强并计算得到。本规范暂未涉及另外3个频域计量特性和时域计量特性。

注:以上技术指标不作合格性判别,仅提供参考。

### 6 校准条件

- 6.1 环境条件
- 6.1.1 环境温度: (23±5)℃。
- 6.1.2 相对湿度: ≤80%。
- 6.1.3 电源要求: (220±22) V, (50±1) Hz。

6.1.4 周围无影响正常校准工作的电磁干扰和机械振动,使用的亥姆霍兹线圈需要远 离大面积金属(即磁性)表面。

- 6.2 测量标准及其他设备
- 6.2.1 信号发生器
   频率范围:10 kHz~100 MHz;
   频率最大允许误差:±1×10<sup>-5</sup>;
   最大输出电平:大于0 dBm。
- 6.2.2 横电磁波(TEM)小室
  - 频率范围: DC~100 MHz;
  - 端口驻波:小于1.2;
  - 时域阻抗: 49 Ω~50.5 Ω;
  - 芯板与顶板(或底板)的距离:大于场探头直径的三倍。
- 6.2.3 亥姆霍兹线圈
  - 频率范围: DC~300 kHz;

线圈直径:应大于场探头直径的两倍。

6.2.4 功率计

频率范围: 10 kHz~100 MHz;

功率范围: -30 dBm~20 dBm。

6.2.5 定向耦合器 频率范围: 300 kHz~100 MHz; 耦合系数: 15 dB~50 dB; 耦合系数最大允许误差: ±2%; 方向性:大于 20 dB。 6.2.6 衰减器 频率范围: 10 kHz~100 MHz; 衰减值: 20 dB~50 dB; 衰减值的最大允许误差:±5%; 平均功率:大于150W。 6.2.7 射频毫伏表 频率范围: 10 kHz~300 kHz; 电压范围: 1 mV~100 V; 最大允许误差: ±3.5%。 6.2.8 取样电阻 频率范围: 10 kHz~300 kHz; 额定功率: ≥40 W; 电阻值: 1 Ω~100 Ω; 电阻值最大允许误差:±1%。 6.2.9 功率放大器 频率范围: 10 kHz~100 MHz; 额定功率: ≥40 W; 谐波抑制: >20 dB。 6.2.10 大功率负载 频率范围: 10 kHz~100 MHz;

额定功率:≥150 W。

### 7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目如表2所示。

表 2 校准项目表

序号	校准项目	适用对象
1	外观及工作正常性检查	电场探头、磁场探头
2	电场强度	电场探头
3	磁场强度	磁场探头
4	磁感应强度	磁场探头
5	各向同性	电场探头、磁场探头

#### 7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

场探头的外观应完好,不应有影响电气性能的机械损伤,配套附件齐全。开启场探头,场探头与读出装置连接正常,按技术说明书规定时间预热。如场探头具有自校准功能,运行自校准功能。将检查结果记录在附录 A 表 A.1 中。

7.2.2 电场强度

a) 按照图 3 (a) 或图 3 (b) 中的方式连接设备。



(b) 衰减器方式 (10 kHz~100 MHz)

图 3 用 TEM 小室进行场探头校准原理图 (10 kHz~100 MHz)

b)将场探头放入 TEM 小室上半部分(或下半部分)的中心位置。场探头开关开 启,设定信号发生器频率为场探头的校准起始频率点。

c)设置信号发生器的输出幅度,使得 TEM 小室中上半部分(或下半部分)的中 心位置场强为期望的标准场强值,该标准场强值通过式(1)计算:

$$E = \frac{\sqrt{P_{\text{net}}Z_0}}{d} \tag{1}$$

式中:

*E*——电场强度, V/m;

 $P_{\text{net}}$ —— 馈入 TEM 小室中的净功率, W;

 $Z_0$ ——TEM 小室的特性阻抗实部,  $\Omega$ ;

d——芯板距离顶板或者底板的高度, m。

其中图 3 (a) 定向耦合器方式净功率  $P_{net}$ ,可以由定向耦合器的系数  $C_{fwd}$  (端口 2 和端口 3 的功率比值) 和  $C_{rev}$  (端口 2 和端口 4 的功率比值)、功率计读数  $P_1$  和  $P_2$  通过公式 (2) 计算:

$$P_{\text{net}} = C_{\text{fwd}} P_1 - C_{\text{rev}} P_2 \tag{2}$$

图 3 (b) 衰减器方式净功率  $P_{net}$ ,可以由衰减器的衰减值  $A_{att}$ 和功率计读数 P 通过公式 (3) 计算:

$$P_{\rm net} = A_{\rm att} P \tag{3}$$

d) 在附录 A 表 A.2 中记录此时场探头示值和功率计读数值。

e)改变信号发生器频率到下一个频率点,重复c)到e),直至完成所有预设置的 校准频率点,至少测量5个不同的频率点,得到场强频率响应。

f) 设定信号发生器频率为工作频段内的某一频率。

g)设置信号发生器的输出电平,使得场强发生装置中心场强为第一个期望的标准场强值,该标准场强值通过公式(1)计算。

h) 在附录 A 表 A.2 中记录此时场探头示值和功率计读数值。

i)改变信号发生器输出电平使场强发生装置中心场强为下一个标准场强值,重复
 h),直至完成所有预设置的标准场强值,至少测量5个不同的标准场强值,得到场强
 线性。

j)将标准场强值除以场探头示值得到校准因子,填入附录 A 表 A.2 中。

7.2.3 磁场强度

a) 按照图 3 (a) 或图 3 (b) 中的方式连接设备。

b)将场探头放入 TEM 小室上半部分(或下半部分)的中心位置。场探头开关开 启,设定信号发生器频率为被校场探头的校准起始频率点。

c) 按照 7.2.2 (c) 中的步骤计算得到电场强度 E 的数值,根据式(4) 计算标准 场强值 H:

$$H = \frac{E}{\eta} \tag{4}$$

式中:

*H*——磁场强度, A/m;

 $\eta$ ——波阻抗,自由空间中为 120  $\pi$ ,  $\Omega$ 。

d) 在附录 A 表 A.3 中记录此时场探头示值和功率计读数值。

e)改变信号发生器频率到下一个频率点,重复 c)到 d),直至完成所有预设置的 校准频率点,至少测量 5 个不同的频率点,得到场强频率响应。

f) 设定信号发生器频率为工作频段内的某一频率。

g)设置信号发生器的输出电平,使得场强发生装置中心场强为第一个期望的标准场强值,该标准场强值通过公式(4)计算。

h) 在附录 A 表 A.3 中记录此时场探头示值和功率计读数值。

i)改变信号发生器输出电平使场强发生装置中心场强为下一个标准场强值,重复h),直至完成所有预设置的标准场强值,至少测量5个不同的标准场强值,得到场强线性。

j)将标准场强值除以场探头示值得到校准因子,填入附录 A 表 A.3 中。

7.2.4 磁感应强度

a) 设备连接如图 4 所示。



图 4 用亥姆霍兹线圈进行场探头校准原理图 (10 kHz~300 kHz)

注:选取合适的亥姆霍兹线圈可以将上限频率扩展到1MHz。

b)将场探头放入亥姆霍兹线圈的中心位置。场探头开关开启,设定信号发生器频率为场探头的校准起始频率点。

c)设置信号发生器的输出幅度,使亥姆霍兹线圈的中心位置场强为期望的标准场 强值,该标准磁感应强度值通过式(5)计算:

$$B = \frac{0.715\ 5\mu NI}{r} = \frac{0.715\ 5\mu NU}{rR}$$
(5)

式中:

B——磁感应强度,T;

 $\mu$ ——磁导率,真空磁导率为4 $\pi \times 10^{-7}$  H/m;

N——线圈匝数;

I——流经线圈的电流,通过测量取样电阻 R 两端的电压 U 计算得到, A;

r-----线圈半径, m;

R——取样电阻值,  $\Omega$ ;

U——取样电阻 R 两端的电压, V。

d) 在附录 A 表 A.4 中记录此时场探头示值、射频毫伏表读数值和取样电阻值。

e)改变信号发生器频率到下一个频率点,重复 c)到 d),直至完成所有预设置的 校准频率点,至少测量 5 个不同的频率点,得到频率响应。

f) 设定信号发生器频率为工作频段内的某一频率。

g)设置信号发生器的输出电平,使得场强发生装置中心磁感应强度值为第一个期望的标准场强值,该标准场强值通过式(5)计算。

h) 在附录 A 表 A.4 中记录此时场探头示值和射频毫伏表读数值。

 i)改变信号发生器输出电平使场强发生装置中心场强为下一个标准磁感应强度值, 重复h),直至完成所有预设置的标准场强值,至少测量5个不同的标准场强值,得到 线性响应。 j)将标准场强值除以场探头示值得到校准因子,填入附录 A 表 A.4 中。

7.2.5 各向同性

a)设备连接如图3(a)或者图3(b)或者图4所示。

b)将场探头放入场发生装置的指定中心位置,调整场探头方向使其一个振子与入射电场矢量方向相同。可以通过将场探头手柄沿立方体的对角线放置实现,如图2
 (a)。如果场传感器不是由三个正交阵子构成,应参考实际应用情况选择旋转轴。

c)场探头开关开启。调节信号发生器频率为被校场探头的第一个校准频率。

d) 设置信号发生器的输出电平,使得场强发生装置中心场强为期望的标准场强 值,该标准场强值通过式(1)~(5) 计算,将标准场强值记录在附录 A 表 A.5 中。

e)根据预先选择的频率和标准场强值,将场探头按照步进方式完整地旋转 360°以 得到最大和最小响应值。记录在附录 A 表 A.5 中。

f) 改变信号发生器频率到下一个频率点,重复上述操作 d) 和 e) 直到获得全部所 需频率和预设标准场强值的数据为止。

g) 搜索每一频率和场强对应的记录值,找到最小值和最大值,利用公式(6) 计 算确定场探头的各向异性响应 A,从而表征出场探头的各向同性±A。

$$A = 20 \lg \left[ \frac{S_{\text{max}}}{\sqrt{S_{\text{max}} S_{\text{min}}}} \right]$$
(6)

式中, S<sub>max</sub>和 S<sub>min</sub>分别是实测场强幅度值的最大值和最小值。

#### 8 校准结果表达

场探头校准后,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和应用有关时,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;
- 1) 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;
- 8

- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- 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

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定,推荐为1年。



### 附录 A

### 原始记录格式

### 表 A.1 外观及工作正常性检查

检查结果
------

频率 kHz	功率计读数值 dBm	标准场强值 V/m	场探头示值 V/m	校准因子	不确定度 dB
10					
50				(P)	
100				1 an	
500				<u>e</u>	
1 000			200	)	
5 000					
10 000			Q,		
50 000					
100 000					
		10			
		30			
		50			
		80			
		100			

表 A.2 场探头的电场强度

#### JJF 1884—2020

频率 kHz	功率计读数值 dBm	标准场强值 A/m	场探头示值 A/m	校准因子	不确定度 dB
10					
50					
100					
500					
1 000					
5 000					
10 000					
50 000					
100 000				ST.	
		0.05		1 Ch.	
		0.10		0	
		0.20	axis's	>.	
		0.30	RS		
		0.40			
		0.50			

表 A.3 场探头的磁场强度

### 表 A. 4 场探头的磁感应强度

频率	射频毫伏表	电阻值	标准场强值	场探头示值	<b>坊</b> 淮 田 乙	不确定度
kHz	读数值/V	Ω	μΤ	μΤ	仅1世四 1	dB
10						
30						
50						
80						
100						
300						
			1			
			5			
			10			
			50			
			100			

### JJF 1884—2020

频率/kHz	标准场强值	相对起始位置的角度/(°)	场探头示值
		0	
		10	
		20	
		÷	
		340	
		350	
		360	

J. Con

#### 表 A.5 场探头的各向同性

最大场强 S <sub>max</sub> :	
最小场强 S <sub>min</sub> :	
各向异性 A:	

### 附录 B

### 校准证书内页格式

### B.1 场探头的电场强度

### a)频率响应

频率 kHz	标准场强值 V/m	场探头示值 V/m	校准因子	不确定度 U (k=2) dB
10				
50				
100				
500			A	
1 000	20		100	
5 000			PN	
10 000		1945	SN -	
50 000		100		
100 000				
b) 线性响应				

b) 线性响应

频率 kHz	标准场强值 V/m	场探头示值 V/m	校准因子	不确定度 U (k=2) dB
	10			
	30			
	50			
	80			
	100			

### B.2 场探头的磁场强度

### a)频率响应

频率 kHz	标准场强值 A/m	场探头示值 A/m	校准因子	不确定度 U (k=2) dB
10				
50				
100				
500				
1 000	0.15			
5 000	-			
10 000	-		42	
50 000	-			
100 000			30	
b)线性响应			N.	

### b) 线性响应

频率 kHz	标准场强值 A/m	场探头示值 A/m	校准因子	不确定度 U (k=2) dB
	0.05			
	0.10			
	0.20			
	0. 30			
	0.40			
	0.50			

- B.3 场探头的磁感应强度
  - a)频率响应

频率 kHz	标准场强值 μT	场探头示值 μT	校准因子	不确定度 U (k=2) dB
10				
30				
50				
80				
100				
300				

b) 线性响应

频率 kHz	标准场强值 µT	场探头示值 μT	校准因子	不确定度 U (k=2) dB
	1	010	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
	5	1095		
	10	<u> </u>		
	50			
	100			

•

### B.4 场探头的各向同性

频率/kHz	标准场强值	各向同性/dB	不确定度 <i>U</i> ( <i>k</i> =2) /dB

#### 附录C

### 主要项目校准不确定度评定示例

- C.1 亥姆霍兹线圈法
- C.1.1 测量模型及不确定度传播律
- C.1.1.1 测量模型 磁感应强度 B 可以表示为

$$B = \frac{0.715\ 5\mu NU}{rR}$$
(C.1)

式中:

 $\mu$ ——磁导率,真空磁导率为 $4\pi \times 10^{-7}$  H/m。

C.1.1.2 合成标准不确定度计算公式

$$u_{c}^{2}(B) = c_{1}^{2}u^{2}(F) + c_{2}^{2}u^{2}(N) + c_{3}^{2}u^{2}(U) + c_{4}^{2}u^{2}(r) + c_{5}^{2}u^{2}(R)$$
(C. 2)

其中 F 为系数 0.715 5。

灵敏系数  $c_i$  为:

$$c_{1} = \frac{\partial B}{\partial F} = \frac{\mu NU}{rR};$$

$$c_{2} = \frac{\partial B}{\partial N} = \frac{0.715 \ 5\mu U}{rR};$$

$$c_{3} = \frac{\partial B}{\partial U} = \frac{0.715 \ 5\mu N}{rR}, \ \mu T/V;$$

$$c_{4} = \frac{\partial B}{\partial r} = -\frac{0.715 \ 5\mu NU}{r^{2}R}, \ \mu T/m;$$

$$c_{5} = \frac{\partial B}{\partial R} = -\frac{0.715 \ 5\mu NU}{rR^{2}}, \ \mu T/\Omega.$$

鉴于测量模型表达式的形式,也可以采用如下相对标准不确定度合成方法

 $u_{\text{crel}}^{2}(H) = u_{\text{crel}}^{2}(F) + u_{\text{crel}}^{2}(N) + u_{\text{crel}}^{2}(U) + (-1)^{2}u_{\text{crel}}^{2}(r) + (-1)^{2}u_{\text{crel}}^{2}(R) \quad (C.3)$ 式中:

u<sub>crel</sub> (F) ——系数 0.715 5 引入的相对标准不确定度分量。

C.1.2 标准不确定度分量的评定

a) 由系数 0.715 5 截断误差引入的相对标准不确定度分量 u<sub>crel</sub>(F)小于 0.006%。

b) 线圈的环匝数 N 引入的相对标准不确定度分量 u<sub>crel</sub> (N),认为手册中给出的 匝数为准确值,因此该项分量的不确定度忽略不计。

c) 由射频毫伏表测量电压U引入的不确定度 $u_{crel}(\delta H_{vr})$ 

射频毫伏表测量电压 U 引入的不确定度主要由两部分组成,一是电压修正因子 C<sub>0</sub>,二是由分辨力引入的不确定度。

1) 射频毫伏表电压修正因子 C<sub>0</sub>

电压表探头修正因子的不确定度从校准证书得来,见表 C.1。

表 C.1 电压修正因子 C<sub>0</sub> 引入的不确定度分量

频率	校准因子	标准不确定度/%
100 kHz	0.996	0.014

2) 射频毫伏表电压测量分辨力

射频毫伏表电压分辨力为小数点后四位有效数字(V),最大误差±0.5 mV,满足 均匀分布。U<sub>rel</sub>=0.5 mV/5 V=0.01%。因此由射频毫伏表分辨力引入的不确定度分量 见表 C.2。

表 C.2 射频毫伏表分辨力引入的不确定度分量

频率	最大偏差/%	概率分布	包含因子 <i>k</i>	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
100 kHz	0.01	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.006

d) 线圈尺寸 r 测量不准确引入的相对标准不确定度  $u_{crel}(\delta H_c)$ 

用卷尺测量两个线圈的半径 r1、r2和间距 s 时,测量不确定度由读数的重复性不确定 度 u(x) 和卷尺刻度误差引入的不确定度 u(l) 根据  $u = \sqrt{u^2(l) + u^2(x)}$  计算。重复测量

$$10 \ x, u(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n} \left(x_{k} - \frac{\sum_{k=1}^{n} x_{k}}{n}\right)}{n(n-1)}}, n = 10, \text{ 根据校准证书上卷尺刻度的误差,得到}$$
  
 $u(l) = 3 \times 10^{-5} \text{ m, 合成标准不确定度} u_{c}(r_{1}) = 0.00006 \text{ m, } u_{c}(r_{2}) = 0.00006 \text{ m,}$   
 $u_{c}(s) = 0.00007 \text{ m, 对于包含概率} p = 0.95, k = 2, 相对不确定度分别为 0.014\%, 0.014\% n 0.033\%, 两线圈间距的最大允许误差为±1.19%, 而线圈绕线的直径相对
于线圈半径可以忽略不计。查表 C.3, 由线圈几何尺寸不理想引入的不确定度  $u_{crel}(\delta H_{c}) = 1\%$ 。需要注意的是,这里包含了线圈半径引起的  $u_{crel}(r)$ ,不再重复考虑该 项分量。$ 

表 C.3 线圈几何尺寸对磁场的影响

尺寸	$\varepsilon^{a} = 1 \frac{0}{0}$	$\epsilon = 2 \frac{0}{0}$	$\epsilon = 5\%$		
$r_1$	5 %	10%	25%		
$r_2$	5 %	10%	25%		
$r_1 + r_2$	2.5%	5 %	12.5%		
\$	1.66%	3. 33 %	8.33%		
<sup>a</sup> ε磁场不确定度。					

e) 取样电阻校准不确定度  $u_{crel}$  (R)

从取样电阻的校准证书中得到,取样电阻测量值不确定度为 0.5% (k=2)。 测量过程中一些其他非理想因素所导致的影响量,包括:

f) 线圈场均匀性引入的不确定度  $u_{crel}(\delta H_u)$ 

表 C.4 给出了场探头和线圈尺寸相对关系对场均匀性的影响。待测场探头最大尺寸为 13 cm,由于 $\frac{13 \text{ cm}}{2 \times 0.3}$ =21.67 cm,因此线圈直径要大于 43.4 cm,由于使用线圈直

径为 42 cm,因此最大允许误差取  $\pm 2\%$ ,  $u_{crel}(\delta H_u) = 2\%/\sqrt{3} = 1.16\%$ 

表 C.4 场探头/线圈尺寸相对关系对场均匀性的影响

场均匀性	1 %	2 %	5 %	10%
x/r	0.3	0.4	0.5	0.6
y/r	0.3	0.4	0.4	0.5

g)场探头放入亥姆霍兹线圈中导致场发生变化引入的不确定度 u<sub>crel</sub>(δH<sub>i</sub>)

记录放入场探头前后空载和加载电流变化,见表C.5,计算得到该项不确定度。

表 C.5 放入场探头线圈电流的变化

频率	电流变化/%	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	相对标准不确定度/%
100 kHz	0.039	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.023

h) 由场探头定位误差引入的不确定度  $u_{crel}(\delta H_p)$ 

将场探头放置的位置前后、左右各移动 1.4 cm,根据磁场变化得到由定位误差引 入的不确定度分量,见表 C.6。

表 C.6 定位误差引入的不确定度分量

频率	电流变化/%	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
100 kHz	2	均匀	$\sqrt{3}$	1	1.16

i) 环境影响引入的不确定度  $u_{crel}(\delta H_e)$ 

对于亥姆霍兹线圈,其工作环境附近应尽量避免大面积的金属。由于距离有限,近 处金属的影响根据测量得到,见表 C.7。

表 C.7 环境对测量结果的影响

频率	最大偏差/%	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
100 kHz	3.49	均匀	$\sqrt{3}$	1	2.01

i) 测量重复性

将系统断开后重新连接,测量 10 次,计算得到实验标准差  $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}} = 0.59\%$ 。

C.1.3 合成标准不确定度

在不确定度分量中,四个对结果影响较大的分量为线圈几何尺寸、场均匀性、场探 头定位误差和环境影响。其中一个分量为正态分布,另外三个为均匀分布,而且大小比 较接近,因此这四项的合成标准不确定度接近正态分布,其余分量较小,因此这些分量 的合成标准不确定度接近正态分布。认为各分量不相关,以 100 kHz 为例,其合成标 准不确定度见表 C.8。

不确定度来源或输入量 x <sub>i</sub>	最大允许误差 MPE 或不确定 度 U/%	概率 分布	包含 因子 <i>k</i>	灵敏 系数 c <sub>i</sub>	影响量 u (x <sub>i</sub> )的 相对标准不 确定度/%
公式系数 F	0.006	正态	5.	1	0.006
射频毫伏表 δH <sub>vr</sub> : 射频毫伏表电压修正因子	0.014	正态	5	1	0.014
射频毫伏表电压测量分辨力	$\pm 0.01$	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.006
线圈几何尺寸 ôH。	1	正态		1	1
取样电阻 R	<mark>0. 5</mark>	正态	2	-1	0.25
场均匀性 δΗ "	$\pm 2$	均匀	$\sqrt{3}$	1	1.16
场探头放入引起畸变 δH <sub>i</sub>	$\pm 0.039$	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.023
定位误差 δH <sub>p</sub>	$\pm 2$	均匀	$\sqrt{3}$	1	1.16
环境影响 δH <sub>e</sub>	$\pm$ 3. 49	均匀	$\sqrt{3}$	1	2.01
测量重复性 δH <sub>r</sub>	0.59	正态		1	0.59
相对合则	2.86				
相对合	成标准不确定度 u。	:			0.25dB

表 C.8 100 kHz 不确定度分量汇总表

C.1.4 扩展不确定度

取 k=2,相对扩展不确定度为:

$$U = k u_{c} = 0.5 \text{ dB}(k = 2)$$

- C.2 TEM 小室法
- C.2.1 测量模型及不确定度传播律
- C.2.1.1 测量模型

TEM 小室中磁场强度 H 表达式为

$$H = \frac{\sqrt{P_{\text{net}}Z}}{d\eta} \tag{C.4}$$

C.2.1.2 合成标准不确定度计算公式

$$u_{c}^{2}(H) = c_{1}^{2}u^{2}(P_{net}) + c_{2}^{2}u^{2}(Z) + c_{3}^{2}u^{2}(d) + c_{4}^{2}u^{2}(\eta)$$
(C. 5)

灵敏系数  $c_i$  为:

$$c_{1} = \frac{\partial H}{\partial P_{\text{net}}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z}{P_{\text{net}}}} \frac{1}{d\eta} , \text{ A/ (m \cdot W);}$$

$$c_{2} = \frac{\partial H}{\partial Z} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_{\text{net}}}{Z}} \frac{1}{d\eta} , \text{ A/ (m \cdot \Omega);}$$

$$c_{3} = \frac{\partial H}{\partial d} = -\frac{\sqrt{P_{\text{net}}Z}}{d^{2}\eta} , \text{ A/m}^{2};$$

$$c_{4} = \frac{\partial H}{\partial \eta} = -\frac{\sqrt{P_{\text{net}}Z}}{d\eta^{2}} , \text{ A/ (m \cdot \Omega).}$$

鉴于测量模型表达式的形式,也可以采用如下相对标准不确定度合成方法:

$$u_{\text{crel}}^{2}(H) = \left(\frac{1}{2}\right)^{2} u_{\text{crel}}^{2}(P_{\text{net}}) + \left(\frac{1}{2}\right)^{2} u_{\text{crel}}^{2}(Z) + (-1)^{2} u_{\text{crel}}^{2}(d) + (-1)^{2} u_{\text{crel}}^{2}(\eta)$$
(C. 6)

TEM 小室校准系统主要不确定度分量包括净功率计算的不确定度、TEM 小室几何特性及内部电磁特性引入不确定度。

C.2.2 标准不确定度分量评定

a) 净功率的不确定度

净功率 
$$P_{\text{net}} = \frac{C_2 M_3}{C_0 C_1 M_2} P_r$$
 (C.7)

式中, C<sub>1</sub> 为定向耦合器耦合端 3 和输入端 1 的功率比; C<sub>2</sub> 为定向耦合器输出端 2 和输入端 1 的功率比; P<sub>1</sub> 为功率计传感器探头读数; 功率计传感器探头校准因子 C<sub>0</sub> 定 义为

修正因子 M

$$M = \frac{\text{理想匹配负载吸收功率}}{\text{实际负载吸收功率}} = \frac{|1 - \Gamma_{\rm L} \Gamma_{\rm G}|^2}{(1 - |\Gamma_{\rm G}|^2)}$$
(C.9)

式中:

 $\Gamma_{\rm L}$ 为负载反射系数;  $\Gamma_{\rm G}$ 为源反射系数。对于端口 2 和端口 3,修正因子分别为  $M_2$ 和  $M_3$ 。需要说明的是对于 2 端口的修正因子  $M_2$ ,将定向耦合器方向性影响考虑在 内,使用有效源反射系数。

1) 定向耦合器  $C_1$ 和  $C_2$ 的测量不确定度分量  $u_{crel}$  ( $C_1$ ) 和  $u_{crel}$  ( $C_2$ )

使用 S 参数标准对定向耦合器的耦合系数和传输系数进行测量,针对使用的定向 耦合器,出具的报告中给出其测量不确定度如表 C.9 所示。

表 C.9 定向耦合器 C<sub>1</sub>和 C<sub>2</sub>的测量不确定度

	频率范围	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的相对标准 不确定度/%
$C_1$	1 MHz	2.0	正态	2	-0.5	1.0
$C_2$	1 MHz	2.0	正态	2	0.5	1.0

2) 定向耦合器输出端口修正因子  $M_2$  和耦合端口修正因子  $M_3$  的不确定度分量  $u_{crel}$  ( $M_2$ ),  $u_{crel}$  ( $M_3$ )

在净功率计算公式中,通过使用修正因子 M<sub>2</sub> 和 M<sub>3</sub> 考虑定向耦合器输出端和耦合 端连接面上的失配情况。这里取 M<sub>2</sub>/2 和 M<sub>3</sub>/2 作为修正因子的不确定度。

表 C.10 定向耦合器输出端口 M<sub>2</sub> 的测量不确定度

频率	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	0.54	U 型	$\sqrt{2}$	-0.5	0.38

表 C. 11 定向耦合器耦合端口 M<sub>3</sub> 的测量不确定度

频率	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	0.24	U 型	$\sqrt{2}$	0.5	0. 17

3) 功率传感器校准因子  $C_0$  的不确定度  $u_{crel}$  ( $C_0$ ) 和线性  $C_1$  的不确定度分量  $u_{crel}$  ( $C_1$ )

功率传感器校准因子 C。由功率传递标准给出,其报告中给出的不确定度如表 C.12 所示,功率传感器线性 C<sub>1</sub> 从厂家出厂报告上得到,如表 C.13 所示。

表 C. 12 功率传感器校准因子 C<sub>0</sub> 的测量不确定度

频率	C。分散区间半宽 %	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度 /%
1 MHz	1.0	正态	2	-0.5	0.5

表 C.13 功率传感器线性不确定度

频率	最大偏差/dB	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	0. 02	均匀	$\sqrt{3}$	0.5	0.27

净功率不确定度如表 C.14 所示,由于三个最大分量为正态分布,合成标准不确定 度接近正态分布。

JJF 1884—2020

不确定度来源或输入量 x <sub>i</sub>	最大允许误差 MPE 或不确定 度 U/%	概率 分布	包含 因子 <i>k</i>	灵敏 系数 c <sub>i</sub>	影响量 u (x <sub>i</sub> )的 相对标准 不确定度/%
净功率的不确定度 P <sub>net</sub>					
功率传感器校准因子 C。	1	正态	2	-0.5	0.5
定向耦合器耦合系数 C1	2	正态	2	-0.5	1.0
定向耦合器传输系数 C2	2	正态	2	0.5	1.0
定向耦合器输出端修正因子 M2	$\pm 0.54$	U 型	$\sqrt{2}$	-0.5	0.38
定向耦合器耦合端修正因子 M <sub>3</sub>	$\pm 0.24$	U 型	$\sqrt{2}$	0.5	0.17
功率传感器线性 C1	$\pm 0.46$	均匀	$\sqrt{3}$	0.5	0.27
相对合成标	0.79				

表 C.14 净功率不确定度

b) TEM 小室阻抗实部引入的不确定度  $u_{\text{crel}}$  (Z)

利用时域反射分析仪测量 TEM 小室的特性阻抗,考虑 TEM 小室场探头放入后特性阻抗变化,在中心点附近为 50.2 Ω。从校准证书上得到使用时域反射分析仪测量阻抗的不确定度如表 C.15 所示。

表 C. 15 阻抗实部的测量不确定度

频率	不确定度 %	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	2	正态	2	0.5	1

c) 芯板高度引入的不确定度  $u_{\text{crel}}(d)$ 

采用手持式激光测距仪测量 TEM 小室下半部分高度,重复测量 10 次,测量平均 值 0.447 7 m,测量平均值的实验标准差为 0.153 mm。考虑到激光测距仪综合测距的 不确定度为 0.3 mm (k=2),因此芯板高度测量的标准不确定度为 $\sqrt{0.153^2+0.15^2} = 0.214$  mm,相对标准不确定度约为 0.05%。

d) 波阻抗  $\eta$  引入的不确定度  $u_{crel}$  ( $\eta$ )

在计算公式中,使用的波阻抗为 377 Ω,波阻抗的最大允许误差为±1 Ω,得到不确定度如表 C.16 所示。

表 C.16 波阻抗 η 的不确定度

分散区间半宽/%	概率分布	包含因子/k	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
0.27	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.16

测量过程中一些其他非理想因素所导致的影响量,包括:

e) TEM 小室内电磁场分布不理想引入的不确定度

1) 由 TEM 小室内测试区域附近场均匀性引入的不确定度分量 u<sub>crel</sub> (δH<sub>u</sub>)

在 TEM 小室测试横截面上,以测试点为中心。采用实验方法测量±6.5 cm 空间 区域内的场均匀性,见图 C.1。使用一个小场探头,认为其尺寸足够小,由其本身的影 响可以忽略。因此对于直径小于等于 13 cm 的待测场探头,由场均匀性引入的不确定度 分量结果如表 C.17 所示。



图 C.1 均匀性测试位置点分布

	EC. 17	场均匀性引入的不确定度
--	--------	-------------

频率	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子 <i>k</i>	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	1.04	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.60

2) 由 TEM 小室内驻波引入的不确定度分量  $u_{crel}(\delta H_v)$ 

采用一个小的场探头,认为其自身影响可以忽略,在 TEM 小室中心位置的沿传播 方向±40 cm 范围内每隔 10 cm 测量一点,根据测量结果绘制 TEM 小室内沿轴向方向 的场强分布,得到由驻波引入的不确定度分量如表 C.18 所示。

表 C.18 由驻波引入的不确定度

频率	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子 <i>k</i>	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	1.71	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.99

3) 由于场探头放入 TEM 小室引起的场强变化引入的不确定度分量  $u_{crel}$  ( $\delta H_i$ )

用一个小场探头测量没有放入和放入场探头后场强的变化,通过场强变化来评估场 探头放入后对 TEM 小室中原有场的扰动情况,见表 C.19。

表 C.19 场探头放入引起场强变化的不确定度

频率	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子 <i>k</i>	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	2.57	均匀	$\sqrt{3}$	1	1.48

f) 场探头卡具引入的不确定度  $u_{crel}$  ( $\delta H_q$ )

理想的卡具并不存在,放置在 TEM 小室中必然会对其中的电磁场有干扰。在测量 TEM 小室的特性阻抗以及内部电磁场特性时已经将夹具影响考虑在内,因此这里不重 复计算。 g) 场探头定位引入的不确定度  $u_{crel}$  ( $\delta H_p$ )

将场探头位置在±2 cm 范围变化,测量得到由场探头定位不准引入的相对不确定 度分量见表 C. 20。

频率 f	分散区间半宽 %	概率分布	包含因子 <i>k</i>	灵敏系数	影响量的 相对标准不确定度/%
1 MHz	4.49	均匀	$\sqrt{3}$	1	2.59

表 C.20 场探头定位引入的不确定度

h) 测量重复性

将系统断开后重新连接,测量 10 次,计算得到实验标准差  $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}} =$ 

0.47%.

C.2.3 合成标准不确定度

在 TEM 小室探头校准系统中,四个结果影响较大的分量为场探头定位误差、场探 头与标准场的相互作用、TEM 小室内驻波和测量区域场均匀性。这四个分量都呈现均 匀分布,而且大小比较接近,这四项的合成标准不确定度接近正态分布,其余分量多为 正态分布,除了个别较小的分量外,量值差别不大,这些分量的合成标准不确定度接近 正态分布,因此合成标准不确定度接近正态分布,各分量不相关,其合成标准不确定度 见表 C.21。

	最大 <mark>允</mark> 许误差		包含	灵敏	影响量 u (x <sub>i</sub> )的
不确定度来源或输入量 x <sub>i</sub>	MPE 或不确	概率分布	因子	系数	相对标准不确定度
	定度 U/ %		k	C <sub>i</sub>	0/0
净功率的不确定度 P <sub>net</sub>	1. 58	正态	2	1	0.79
TEM 小室阻抗实部 Z	2	正态	2	0.5	1
芯板高度 d	0.05	正态		-0.5	0.05
波阻抗 η	$\pm$ 0.27	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.16
TEM 小室内电磁场分布不理想		+4 /		1	0.00
场均匀性 δH <sub>u</sub>	$\pm 1.04$	피기	√3		0.60
驻波 δH <sub>v</sub>	$\pm 1.71$	均匀	$\sqrt{3}$	1	0.99
场探头放入引起场的变化 δH <sub>i</sub>	$\pm 2.57$	均匀	$\sqrt{3}$	1	1.48
场探头定位 δΗ <sub>p</sub>	$\pm 4.49$	均匀	$\sqrt{3}$	1	2.59
测量重复性 δH <sub>r</sub>	0.47	正态		1	0.47
相对合成标	3. 37				
相对合成	0.30 dB				

表 C. 21 1 MHz 不确定度分量汇总表

C. 2.4 扩展不确定度
 取 k=2,相对扩展不确定度为:
 U=ku<sub>c</sub>=0.6 dB (k=2)

