

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1386—2013

中功率计校准规范

Calibration Specification for
Medium Power Meters

2013-01-06 发布

2013-04-06 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

中功率计校准规范
Calibration Specification for
Medium Power Meters

JJF 1386—2013

归口单位：全国无线电计量技术委员会
主要起草单位：中国航天科工集团二院 203 所
参加起草单位：中国计量科学研究院
北京青云航空仪表有限公司

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：

杨绪军（中国航天科工集团二院 203 所）

侯海娇（中国航天科工集团二院 203 所）

参加起草人：

陈云梅（中国航天科工集团二院 203 所）

刘欣萌（中国计量科学研究院）

代明珍（北京青云航空仪表有限公司）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量特性	(1)
4 校准条件	(1)
4.1 校准环境条件	(1)
4.2 校准用设备	(1)
5 校准项目和校准方法	(3)
5.1 外观及工作正常性检查	(3)
5.2 直流功率校准	(3)
5.3 校准因子/射频功率校准	(5)
5.4 电压驻波比校准	(9)
6 校准结果表达	(10)
7 复校时间间隔	(10)
附录 A 校准记录格式	(11)
附录 B 校准证书内页格式	(13)
附录 C 测量结果不确定度评定实例	(15)
附录 D 水负载式中、大功率计校准	(20)

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—1999《测量不确定度评定与表示》编写。本规范是首次发布，主要针对频率范围为 1 MHz~40 GHz、功率范围为 0.1 W~500 W 的通过式和终端式中功率计的校准方法进行了规定。校准项目包括：直流功率、校准因子或射频功率和电压驻波比。并在附录中给出了采用交替比较法、传递标准法和直接测量法进行中功率计校准因子校准的测量不确定度评定实例。



中功率计校准规范

1 范围

本校准规范适用于频率范围为 1 MHz~40 GHz，功率范围为 0.1 W~500 W 的各种类型的射频和微波中功率计的校准。

2 概述

中功率计是用来测量微波信号功率的仪器，基于其接入系统方式的不同，可分为通过式和终端式两种类型。

通过式中功率计通常由小功率计和定向耦合器组成，利用定向耦合器旁臂耦合部分功率，经检测后指示出通过功率的量值。

终端式中功率计是一种可作为终端负载吸收功率，同时指示出功率量值的测量仪器。按测量原理可分为量热计式中功率计、热偶式中功率计等。

3 计量特性

直流功率范围：0.1 W~9 W；

校准因子测量不确定度：2.0%~9% ($k=2$)；

电压驻波比：大于 1.00。

注：以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

4 校准条件

4.1 校准环境条件

环境温度：(23±5)℃；

相对湿度：不大于 80%；

供电电源：电压 (220±11)V，频率 (50±1) Hz；

其他：周围无影响校准系统正常工作的机械振动和电磁干扰。

4.2 校准用设备

校准所用设备必须经过法定计量技术机构检定合格并在有效期内，或经注册校准实验室的校准，并在用户规定的建议复校时间间隔内。

校准用主要设备如下：

4.2.1 信号发生器

频率范围：1 MHz~40 GHz；

频率稳定度：优于 $1 \times 10^{-6}/5$ min；

幅度稳定度：优于 0.01 dB/5 min；

输出功率范围：-70 dBm~+20 dBm。

4.2.2 功率放大器

频率范围：1 MHz~40 GHz；

输出功率：0.1 W~500 W；

谐波抑制：小于-20 dBc；

输出电压驻波比：小于2.5。

4.2.3 标准中功率计

频率范围：1 MHz~40 GHz；

功率量程：0.1 W~500 W；

电压驻波比：小于1.3；

校准因子不确定度：1.5%~3.0% ($k=2$)。

4.2.4 稳幅器

功率稳定度：优于0.5%/5 min。

4.2.5 直流稳压电源

直流输出电压：0 V~30 V，连续可调；

直流输出电流：0 A~1 A；

纹波有效值：小于10 μ V。

4.2.6 直流电流表

测量范围：0 A~2 A，0.5级。

4.2.7 定向耦合器

频率范围：1 MHz~40 GHz；

耦合度：大于20 dB；

输出端电压驻波比：小于1.2。

4.2.8 数字多用表

测量范围：0.1 V~100 V；

直流电压最大允许误差： ± 5.1 mV；

电阻最大允许误差： ± 14 m Ω 。

4.2.9 功率计

频率范围：1 MHz~40 GHz；

功率范围：1 mW~100 mW；

校准因子不确定度：2.0%~3.0% ($k=2$)。

4.2.10 匹配负载

频率范围：1 MHz~40 GHz；

电压驻波比：小于1.3。

4.2.11 矢量网络分析仪

频率范围：1 MHz~40 GHz；

电压驻波比：小于1.1。

4.2.12 标量网络分析仪

频率范围：1 MHz~40 GHz；

电压驻波比：小于 1.2。

5 校准项目和校准方法

中功率计的校准项目见表 1。

表 1 校准项目

校准项目名称	类 型
外观及工作正常性检查	功能检查
直流功率	量值校准
校准因子/射频功率	量值校准
电压驻波比	量值校准

5.1 外观及工作正常性检查

5.1.1 被校中功率计应有说明书、原校准证书及全部配套附件。

5.1.2 被校中功率计的外观应完好，各开关、按键等应调节正常，仪表不应有影响电气性能的机械损伤。

5.1.3 被校中功率计通电后应正常工作，并按其技术说明书规定时间预热，预热后指示正常，零点稳定可调。

5.1.4 校准前，如中功率计具有内部自校准功能，则应首先运行仪器内部自校准。

5.2 直流功率校准

热偶式、干负载量热式中功率计需要进行直流功率校准，常用的校准方法有电流电压法和电阻电压法。

5.2.1 电流电压法

校准步骤如下：

a) 调准被校中功率计的零点，按图 1 连接校准设备；



图 1 电流电压法校准框图

b) 调节直流稳压电源电压输出，使被校中功率计指示在被校功率值上；

c) 待被校中功率计的示值稳定后，分别记录被校中功率计示值 P_u 、数字多用表示值 U 和电流表示值 I 于附录 A 中的表 A.1；

d) 按式 (1) 计算加到被校中功率计的直流功率 P_{DC} ：

$$P_{DC} = U \times I \quad (1)$$

式中：

P_{DC} ——加到被校中功率计的直流功率，W；

I ——电流表的示值，A；

U ——数字多用表的电压示值，V。

e) 按式 (2) 计算被校中功率计的示值 P_u 的引用误差，将其记录于附录 A 中的表 A.1：

$$\delta = \frac{P_u - P_{DC}}{S} \quad (2)$$

式中：

δ ——被校中功率计的引用误差；

P_u ——被校中功率计的示值，W；

S ——被校中功率计的量程，W。

f) 改变直流稳压电源电压输出，重复步骤 b)~e)，校准功率值应根据高、中、低原则在被校中功率计量程内至少选择三个点。

5.2.2 电阻电压法

校准步骤如下：

a) 调准被校中功率计的零点，按图 2 连接校准设备；



图 2 电阻测量框图

b) 数字多用表的电阻量程设置为自动量程，用四线电阻法测量被校中功率计的直流电阻，记录示值 R 于附录 A 中的表 A.2；

c) 按图 3 连接校准设备，选择直流功率校准值，根据高、中、低原则在被校中功率计量程内至少选择三个点，记录直流功率校准值 P_C 于附录 A 中的表 A.2；

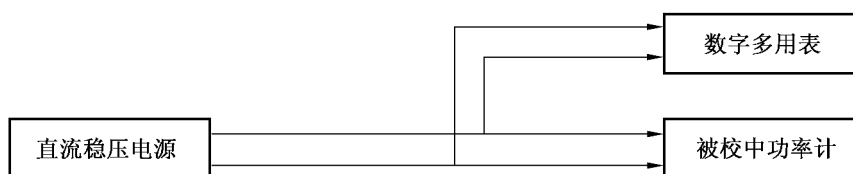


图 3 电阻电压法校准框图

d) 按式 (3) 计算直流功率所对应的电压值 U_C ，将其记录于附录 A 中的表 A.2：

$$U_C = \sqrt{P_C \times R} \quad (3)$$

式中：

R ——数字多用表的电阻示值， Ω ；

U_C ——电压计算值，V。

e) 根据计算得出的电压值 U_C 调节直流稳压电源的电压输出，用数字多用表测量输出电压值 U ，待被校中功率计的示值稳定后，记录被校中功率计的示值 P_u 、电压测量值 U 于附录 A 中的表 A. 2；

f) 按式 (4) 计算直流功率 P_{DC} ，将其记录于附录 A 中的表 A. 2：

$$P_{DC} = \frac{U^2}{R} \quad (4)$$

g) 按式 (2) 计算被校中功率计的示值 P_u 的引用误差，将其记录于附录 A 中的表 A. 2；

h) 改变直流稳压电源电压输出，重复步骤 e) ~ g)。

5.3 校准因子/射频功率校准

终端式中功率计的校准因子或射频功率采用交替比较法或传递标准法校准。通过式中功率计有两个端口（输入端口、输出端口），校准输出端口的校准因子或射频功率采用直接测量法校准；校准输入端口的校准因子或射频功率采用通过式中功率计输出端连接负载作为终端式中功率计来进行校准。

5.3.1 交替比较法

交替比较法是利用高一级的标准中功率计校准被校中功率计。

校准步骤如下：

a) 按图 4 连接校准设备；

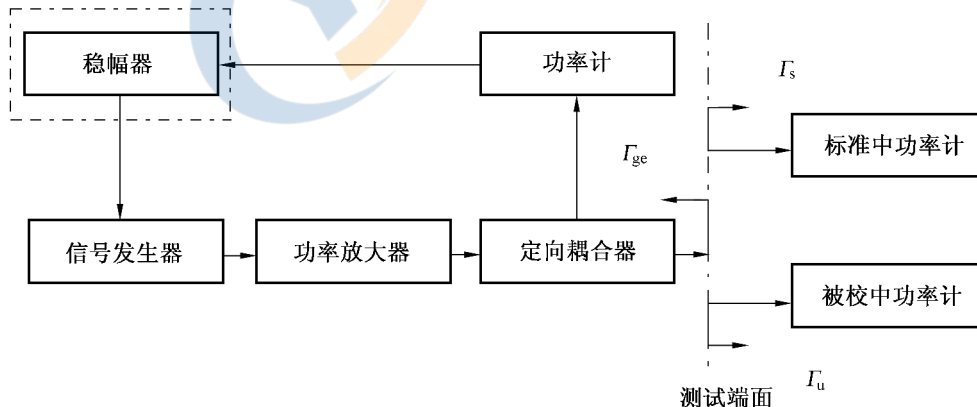


图 4 交替比较法校准框图

b) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，设置信号发生器的功率电平为最小值；

c) 按要求设置信号发生器的频率；

d) 将标准中功率计连接到测试端面；

- e) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“ON”位置；
- f) 逐渐调节信号发生器的功率电平、稳幅器的稳幅电平至稳幅状态，使标准中功率计示值达到选定值，记录标准中功率计示值 P_{bs} 于附录 A 中的表 A.3；
- g) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，从测试端面上断开标准中功率计，连接被校中功率计到测试端面；
- h) 设置信号发生器和功率放大器的射频开关到“ON”位置，保持稳幅状态，记录被校中功率计示值 P_{bu} 于附录 A 中的表 A.3；
- i) 按式 (5) 计算被校中功率计的校准因子：

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2} \quad (5)$$

式中：

K_u ——被校中功率计的校准因子；

K_s ——标准中功率计的校准因子；

P_{bu} ——被校中功率计示值，W；

P_{bs} ——标准中功率计示值，W；

$\frac{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2}$ ——失配因子，计算时视为 1；

Γ_{ge} ——等效源反射系数；

Γ_u ——被校中功率计反射系数；

Γ_s ——标准中功率计反射系数。

- j) 按式 (6) 计算入射到被校中功率计入射端的射频功率 P_i ：

$$P_i = \frac{P_{bs}}{K_s} \frac{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2} \quad (6)$$

k) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，设置信号发生器的功率电平为最小值，从测试端面上断开被校中功率计；

l) 重复步骤 d) ~k)，测量 3 次，分别计算被校中功率计校准因子 K_u 和射频功率 P_i 的平均值，数据记录于附录 A 中的表 A.3；

m) 改变信号发生器频率，重复步骤 d) ~l)，在被校中功率计频率范围内按高、中、低原则至少选择三个频率点。

5.3.2 传递标准法

传递标准是由定向耦合器和功率计组成，由高一级功率标准定标，确定出其校准因子 K_{cs} 。传递标准法是利用传递标准校准被校中功率计。

校准步骤如下：

- a) 按图 5 连接校准设备；

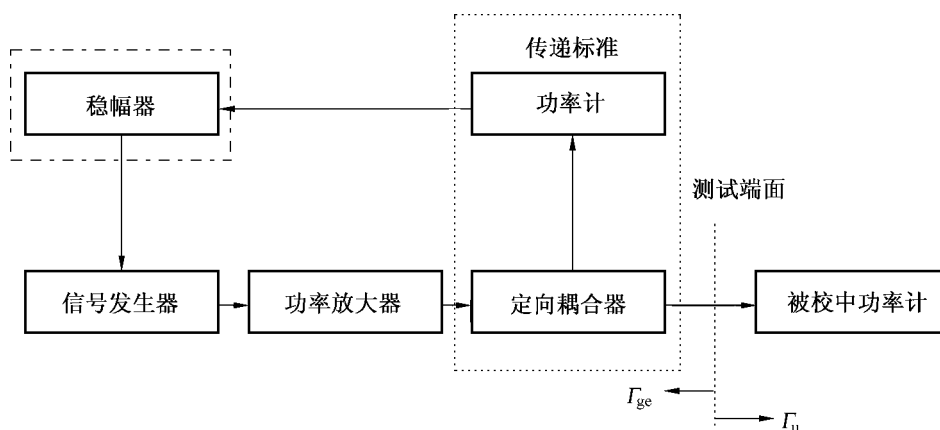


图5 传递标准法校准框图

- b) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，设置信号发生器的功率电平为最小值；
- c) 按要求设置信号发生器的频率；
- d) 将被校中功率计连接到测试端面；
- e) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“ON”位置；
- f) 逐渐调节信号发生器的功率电平、稳幅器的电平，使被校中功率计示值达到选定值，记录传递标准功率示值 P_{cs} 和被校中功率计示值 P_{bu} 于附录 A 中的表 A. 4；
- g) 按式 (7) 计算被校中功率计的校准因子：

$$K_u = K_{cs} \frac{P_{bu}}{P_{cs}} |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2 \quad (7)$$

式中：

K_u ——被校中功率计的校准因子；

K_{cs} ——传递标准的校准因子；

P_{bu} ——被校中功率计的示值，W；

P_{cs} ——传递标准的功率示值，W；

$|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2$ ——失配因子，计算时视为 1。

- h) 按式 (8) 计算入射到被校中功率计输入端面的射频功率 P_i ；

$$P_i = \frac{P_{cs}}{K_{cs}} \frac{1}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2} \quad (8)$$

- i) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，设置信号发生器的功率电平为最小值，从测试端面断开被校中功率计；

- j) 重复步骤 d) ~ i)，测量 3 次，分别计算被校中功率计校准因子 K_u 和射频功率 P_i 的平均值，数据记录于附录 A 中的表 A. 4；

- k) 改变信号发生器频率，重复步骤 d) ~ j)，在被校中功率计频率范围内按高、中、低原则至少选择三个频率点。

5.3.3 直接测量法

直接测量法是利用终端式中功率标准对被校通过式中功率计进行校准。

校准步骤如下：

a) 按图 6 连接校准设备；

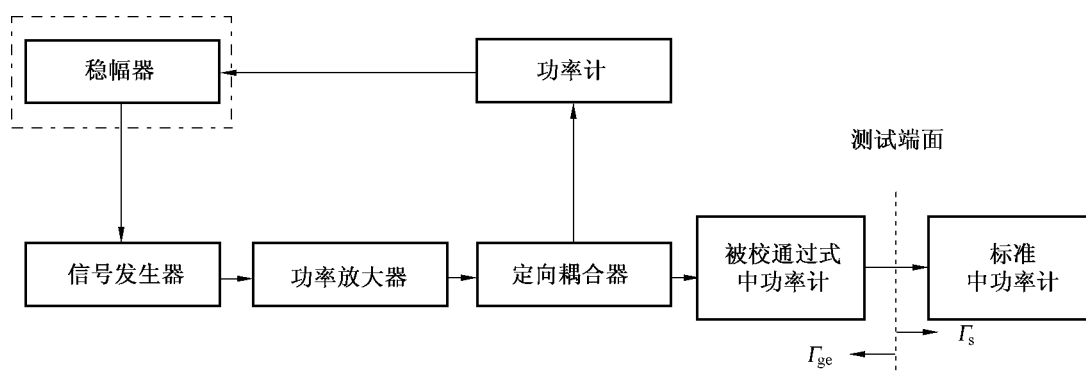


图 6 直接测量法校准框图

b) 设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，设置信号发生器的功率电平为最小值；

c) 按要求设置信号发生器的频率；

d) 将标准中功率计连接到测试端面，设置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“ON”位置；

e) 逐渐调节信号发生器的功率电平、稳幅器的电平，使被校中功率计示值达到选定值，分别记录标准中功率计示值 P_{bs} 和被校中功率计示值 P_{bu} 于附录 A 中的表 A.3；

f) 按公式 (9) 计算被校中功率计的校准因子 K_u ：

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{1}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2} \quad (9)$$

式中：

K_u ——被校中功率计的校准因子；

K_s ——标准中功率计的校准因子；

P_{bu} ——被校中功率计示值，W；

P_{bs} ——标准中功率计示值，W；

$\frac{1}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2}$ ——失配因子，计算时视为 1。

g) 按公式 (10) 计算入射到被校中功率计输出端面的射频功率 P_i ；

$$P_i = \frac{P_{bs}}{K_s} |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2 \quad (10)$$

h) 置信号发生器和功率放大器的射频输出开关到“OFF”位置，设置信号发生器的功率电平为最小值，从测试端面断开标准中功率计；

i) 重复步骤 d) ~ h)，测量 3 次，分别计算被校中功率计校准因子 K_u 和射频功率 P_i 的平均值，数据记录于附录 A 中的表 A.3；

j) 改变信号发生器频率，重复步骤 d) ~ i)，在被校中功率计频率范围内按高、中、低原则至少选择三个频率点。

5.4 电压驻波比校准

终端式中功率计需进行单端口的电压驻波比校准，校准框图如图 7 或图 8 所示；通过式中功率计则需校准输入端和输出端电压驻波比，可采用矢量网络分析仪进行二端口校准，校准框图如图 9 所示；通过式中功率计也可以在非校准端面连接负载，用单端口法分别校准两个端口。

根据校准因子/射频功率的校准频率，选择电压驻波比的校准频率。

5.4.1 标量网络分析仪法

校准步骤如下：

a) 按图 7 连接校准设备；

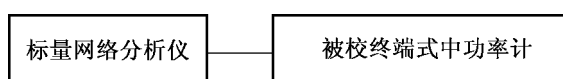


图 7 标量网络分析仪法校准框图

b) 选择标量网络分析仪测试通道及相应的设置参数；

c) 设置数据格式为电压驻波比（简称为 VSWR）；

d) 设置信号发生器的频率、功率电平，校准频率应能覆盖被校中功率计频率范围的高、中、低端；

e) 设置标量网络分析仪的平均次数；

f) 单端口校准标量网络分析仪；

g) 在测试端口连接被校中功率计，读取电压驻波比数据，将所得结果记录于附录 A 中的表 A. 5。

5.4.2 矢量网络分析仪法

校准步骤如下：

a) 终端式中功率计校准按图 8 连接校准设备，通过式中功率计按图 9 连接校准设备；



图 8 终端式中功率计矢量网络分析仪法校准框图

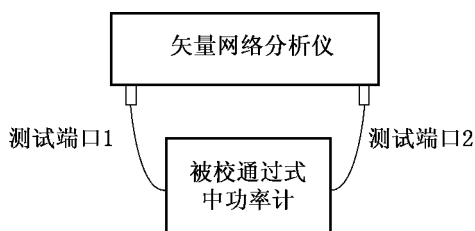


图 9 通过式中功率计矢量网络分析仪法校准框图

- b) 设置矢量网络分析仪测量参数为 S_{11} 或 S_{22} ；
- c) 设置数据格式为 VSWR；
- d) 设置矢量网络分析仪的扫描类型、频率、扫描点数、平均次数、中频带宽、功率电平；校准频率应能覆盖被校中功率计频率范围的高、中、低端；
- e) 分别连接短路器、开路器和标准负载于矢量网络分析仪的测试端口，进行单端口/全二端口校准；
- f) 连接被校中功率计于测试端口，读取电压驻波比数据，将所得结果记录于附录 A 中的表 A.5 或 A.6。

6 校准结果表达

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) 送校单位的名称和地址；
- 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说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

7 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，推荐为 12 个月。

附录 A

校准记录格式

表 A.1 电流电压法校准被校中功率计直流功率

功率量程 S/W	直流电压 U/V	直流电流 I/A	直流功率 P_{DC}/W	示值功率 P_u/W	引用误差 $\delta/\%$

表 A.2 电阻电压法校准被校中功率计直流功率

输入电阻：_____ Ω

功率量程 S/W	直流功率 设置值 P_C/W	直流电压 计算值 U_C/V	直流电压 测量值 U/V	直流功率 标准值 P_{DC}/W	功率计 示值 P_u/W	引用误差 $\delta/\%$

表 A.3 交替比较法/直接测量法校准被校中功率计校准因子或射频功率

频率：_____

标准中功率计的校准因子值 K_s ：_____

测量次数	标准中功率计示值 P_{bs}/W	被校中功率计示值 P_{bu}/W	校准因子 $K_u/\%$	射频功率 P_i/W
1				
2				
3				

校准因子平均值 $\bar{K}_u =$ 射频功率平均值 $\bar{P}_i =$

表 A.4 传递标准法校准被校中功率计校准因子或射频功率

频率: _____

传递标准的校准因子值 K_{cs} : _____

测量次数	传递标准功率示值 P_{cs}/W	被校中功率计示值 P_{bu}/W	校准因子 $K_u/\%$	射频功率 P_i/W
1				
2				
3				

校准因子平均值 $\bar{K}_u =$ 射频功率平均值 $\bar{P}_i =$

表 A.5 被校终端式中功率计电压驻波比

频率 GHz	电压驻波比 VSWR

表 A.6 被校通过式中功率计输入端电压驻波比

频率 GHz	输入端电压驻波比 VSWR	输出端电压驻波比 VSWR

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 中功率计直流功率

功率量程 S/W	直流功率 P_{DC}/W	示值功率 P_u/W	引用误差 $\delta/\%$	测量不确定度 $U/\%$

表 B.2 中功率计校准因子

频率 GHz	射频功率 P_i/W	校准因子 $K_u/\%$	测量不确定度 U

表 B.3 中功率计射频功率

频率 GHz	射频功率 P_i/W	测量不确定度 U

表 B.4 终端式中功率计电压驻波比

频率 GHz	电压驻波比 VSWR	测量不确定度 U

表 B.5 通过式中功率计电压驻波比

频率 GHz	输入端电压驻波比 VSWR	输出端电压驻波比 VSWR	测量不确定度 U

附录 C

测量结果不确定度评定实例

C.1 交替比较法校准因子的测量不确定度评定

校准因子测量不确定度评定时选择频率为 1 GHz，功率电平为 100 W。

C.1.1 测量方法

交替比较法是将标准中功率计和被校中功率计交替连接在等效信号源的输出端口来校准被校中功率计。

C.1.2 测量模型

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (\text{C.1})$$

式中：

K_u ——被校中功率计的校准因子；

K_s ——标准中功率计的校准因子；

P_{bu} ——被校中功率计示值，W；

P_{bs} ——标准中功率计示值，W；

M ——失配因子， $M = \frac{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2}$ ；

Γ_{ge} ——等效源反射系数；

Γ_u ——被校中功率计反射系数；

Γ_s ——标准中功率计反射系数。

C.1.3 不确定度来源

- 标准中功率计校准因子 K_s 引入的测量相对标准不确定度 $u(K_s)$ ；
- 标准中功率计示值功率 P_{bs} 引入的测量相对标准不确定 $u(P_{bs})$ ；
- 被校中功率计示值功率 P_{bu} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{bu})$ ；
- 失配引入的测量相对标准不确定度 $u(M)$ ；
- 接头连接重复性引入的测量相对标准不确定度 u_A 。

C.1.4 相对标准不确定度评定

- 标准中功率计校准因子 K_s 引入的测量相对标准不确定度 $u(K_s)$

标准中功率计校准因子由高一级标准中功率计定标，其相对扩展不确定度为 2.5%，按 B 类评定，视其为正态分布，包含因子 $k(K_s) = 2$ ，则

$$u(K_s) = \frac{0.025}{2} = 0.0125$$

自由度： $\nu_1 = \nu(K_s) \rightarrow \infty$ 。

- 标准中功率计示值功率 P_{bs} 引入的测量相对标准不确定 $u(P_{bs})$

标准中功率计示值功率 P_{bs} 的技术指标为：功率准确度 $\pm 0.5\%$ ，按 B 类评定，视其为均匀分布，包含因子 $k(P_{bs}) = \sqrt{3}$ ，则

$$u(P_{bs}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

自由度： $\nu_2 = \nu(P_{bs}) = 50$ 。

c) 被校中功率计示值功率 P_{bu} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{bu})$

被校中功率计示值功率 P_{bu} 的技术指标为：功率准确度 $\pm 0.5\%$ ，按 B 类评定，视其为均匀分布，包含因子 $k(P_{bu}) = \sqrt{3}$ ，则

$$u(P_{bu}) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

自由度： $\nu_3 = \nu(P_{bu}) = 50$ 。

d) 失配引入的测量相对标准不确定度 $u(M)$

由失配引入的测量相对扩展不确定度 $U(M) = 2 |\Gamma_{ge}| (|\Gamma_s| + |\Gamma_u|)$ 。等效信号源反射系数模值 $|\Gamma_{ge}|$ 为 0.03，标准中功率计的反射系数模值 $|\Gamma_s|$ 为 0.05，被校中功率计的反射系数模值 $|\Gamma_u|$ 为 0.06。按 B 类评定，视其为反正弦分布，包含因子 $k(M) = \sqrt{2}$ ，则

$$u(M) = \frac{0.0066}{\sqrt{2}} = 0.0047$$

自由度： $\nu_4 = \nu(M) = 50$ 。

e) 接头连接重复性引入的测量相对标准不确定度 u_A

按 A 类评定，经 3 次测量， $n=3$ ，则

$$s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0035$$

$$u_A = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = 0.0021$$

自由度： $\nu_5 = 3 - 1 = 2$ 。

C.1.5 标准不确定度分量一览表（表 C.1）

表 C.1

标准不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	相对标准不确定	自由度
$u(K_s)$	标准中功率计校准因子	B 类	正态	2	0.0125	∞
$u(P_{bs})$	标准中功率计示值功率	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029	50
$u(P_{bu})$	被校中功率计示值功率	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029	50
$u(M)$	失配	B 类	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0047	50
u_A	接头连接重复性	A 类			0.0021	2

C.1.6 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度用公式 (C.2) 计算：

$$u(K_u) = \sqrt{[u(K_s)]^2 + [u(P_{bs})]^2 + [u(P_{bu})]^2 + [u(M)]^2 + [u_A]^2} \quad (C.2)$$

$$u(K_u) = 0.0140 = 1.40\%$$

有效自由度按公式 (B.3) 计算:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{[u(K_u)]^4}{\frac{[u(K_s)]^4}{\nu_1} + \frac{[u(P_{\text{bs}})]^4}{\nu_2} + \frac{[u(P_{\text{bu}})]^4}{\nu_3} + \frac{[u(M)]^4}{\nu_4} + \frac{[u_A]^4}{\nu_5}} \quad (\text{C.3})$$

$$\nu_{\text{eff}} = 1\ 785$$

C.1.7 扩展不确定度

由 $\nu_{\text{eff}}=100$, 在 $p=95\%$ 情况下, 查 t 分布临界值, 得 $t_{0.95}=1.96$, 则扩展不确定度为

$$U_p(K_u) = t_p u(K_u) = 2.8\%$$

C.2 传递标准法校准因子的测量不确定度评定

校准因子测量不确定度评定时选择频率为 1 GHz, 功率电平为 8 W。

C.2.1 测量方法

传递标准法是利用传递标准直接对被校中功率计进行校准。

C.2.2 测量模型

传递标准法进行中功率计校准, 其校准因子用公式 (C.4) 计算:

$$K_u = K_{\text{cs}} \frac{P_{\text{bu}}}{P_{\text{cs}}} M \quad (\text{C.4})$$

式中:

K_u ——被校中功率计的校准因子;

K_{cs} ——传递标准的校准因子;

P_{bu} ——被校中功率计的示值, W;

P_{cs} ——传递标准功率示值, W;

M ——失配因子, $M = |1 - \Gamma_{\text{ge}} \Gamma_u|^2$ 。

C.2.3 不确定度来源

- 传递标准校准因子 K_{cs} 引入的测量相对标准不确定度 $u(K_{\text{cs}})$;
- 传递标准功率计示值功率 P_{cs} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{\text{cs}})$;
- 被校中功率计示值功率 P_{bu} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{\text{bu}})$;
- 失配引入的测量相对标准不确定度 $u(M)$;
- 接头连接重复性引入的测量相对标准不确定度 u_A 。

C.2.4 标准不确定度分量一览表 (表 C.2)

表 C.2

标准不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	相对标准不确定	自由度
$u(K_{\text{cs}})$	传递标准校准因子	B类	正态	2	0.008 5	∞
$u(P_{\text{cs}})$	传递标准功率计示值功率	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.002 9	50
$u(P_{\text{bu}})$	被校中功率计示值功率	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.002 9	50
$u(M)$	失配	B类	反正弦	$\sqrt{2}$	0.002 5	50
u_A	接头连接重复性	A类			0.001 4	2

其中,失配项 $u(M)$ 按公式 (C.5) 计算:

$$u(M) = 2 |\Gamma_{ge}| |\Gamma_u| \quad (\text{C.5})$$

C.2.5 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关,则合成相对标准不确定度按公式 (C.6) 计算:

$$u(K_u) = \sqrt{[u(K_{cs})]^2 + [u(P_{cs})]^2 + [u(P_{bu})]^2 + [u(M)]^2 + [u_A]^2} \quad (\text{C.6})$$

$$u(K_u) = 0.009\ 86 = 0.986\%$$

有效自由度按公式 (C.7) 计算:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{[u(K_u)]^4}{\frac{[u(K_{cs})]^4}{\nu_1} + \frac{[u(P_{cs})]^4}{\nu_2} + \frac{[u(P_{bu})]^4}{\nu_3} + \frac{[u(M)]^4}{\nu_4} + \frac{[u_A]^4}{\nu_5}} \quad (\text{C.7})$$

$$\nu_{\text{eff}} = 1\ 711$$

C.2.6 扩展不确定度

由 $\nu_{\text{eff}}=100$, 在 $p=95\%$ 情况下,查 t 分布临界值,得 $t_{0.95}=1.96$, 则扩展不确定度为

$$U_p(K_u) = t_p u(K_u) = 2.0\%$$

C.3 直接测量法校准因子的测量不确定度评定

校准因子测量不确定度评定时选择频率为 1 GHz, 功率电平为 100 W。

C.3.1 测量方法

直接测量法是利用终端式中功率标准对被校通过式中功率计进行校准。

C.3.2 测量模型

直接测量法进行通过式中功率计校准,其校准因子用公式 (C.8) 计算:

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (\text{C.8})$$

式中:

K_u —— 被校中功率计的校准因子;

K_s —— 标准中功率计的校准因子;

P_{bu} —— 被校中功率计示值, W;

P_{bs} —— 标准中功率计示值, W;

M —— 失配因子, $M = \frac{1}{|1 - \Gamma_{ge}\Gamma_s|^2}$ 。

C.3.3 不确定度来源

- 标准中功率计校准因子 K_s 引入的测量相对标准不确定度 $u(K_s)$;
- 标准中功率计示值功率 P_{bs} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{bs})$;
- 被校中功率计示值功率 P_{bu} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{bu})$;
- 失配引入的测量相对标准不确定度 $u(M)$;
- 接头连接重复性引入的测量相对标准不确定度 u_A 。

C.3.4 标准不确定度分量一览表 (表 C.3)

表 C.3

标准不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	相对标准不确定度	自由度
$u(K_s)$	标准中功率计校准因子	B类	正态	2	0.012 5	∞
$u(P_{bs})$	标准中功率计示值功率	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.002 9	50
$u(P_{bu})$	被校中功率计示值功率	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.002 9	50
$u(M)$	失配	B类	反正弦	$\sqrt{2}$	0.002 1	50
u_A	接头连接重复性	A类			0.001 9	2

其中，失配项 $u(M)$ 按公式 (C.9) 计算：

$$u(M) = 2 \left| \Gamma_{ge} \right| \left| \Gamma_s \right| \quad (\text{C.9})$$

C.3.5 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度按公式 (C.10) 计算：

$$u(K_u) = \sqrt{[u(K_s)]^2 + [u(P_{bs})]^2 + [u(P_{bu})]^2 + [u(M)]^2 + [u_A]^2} \quad (\text{C.10})$$

$$u(K_u) = 0.013 5 = 1.35\%$$

有效自由度按公式 (C.11) 计算：

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{[u(K_u)]^4}{\frac{[u(K_s)]^4}{\nu_1} + \frac{[u(P_{bs})]^4}{\nu_2} + \frac{[u(P_{bu})]^4}{\nu_3} + \frac{[u(M)]^4}{\nu_4} + \frac{[u_A]^4}{\nu_5}} \quad (\text{C.11})$$

$$\nu_{\text{eff}} = 3\ 369$$

C.3.6 扩展不确定度

由 $\nu_{\text{eff}}=100$ ，在 $p=95\%$ 情况下，查 t 分布临界值，得 $t_{0.95}=1.96$ ，则扩展不确定度为

$$U_p(K_u) = t_p u(K_u) = 2.7\%$$

附录 D

水负载式中、大功率计校准

水负载式中、大功率计在校准过程中应严格按照仪器使用说明书要求操作。

D.1 “功率校准”表的功率校准

校准步骤如下：

- a) 按图 2 连接数字多用表与功率传感器的加热电阻测试端；
- b) 数字多用表的电阻量程设置为自动量程，用四线电阻法测量加热电阻的阻值 R ；
- c) 接通“电源”和“校准”开关；
- d) 置“校准范围”开关到被校刻度功率挡位上；
- e) 按式 (D.1) 计算刻度功率 P 所对应的电压值 U ：

$$U = \sqrt{P \times R} \quad (\text{D.1})$$

f) 设置数字多用表的测量方式为交流电压，调整“功率校准”旋钮，使数字多用表显示为电压值 U ，记录“功率校准”表的示值 P_{du} ；

g) 转换“校准范围”开关，依次放到不同的刻度功率挡位上，重复步骤 d) ~ f)。

D.2 “高频功率”表的刻度校准

校准步骤如下：

- a) 接通“电源”开关；
- b) 设置“量程转换”开关，将“校准范围”转换开关置于相应的量程位置；
- c) 打开“校准”开关；
- d) 根据“校准范围”开关的位置，转动“功率校准”旋钮，使“功率校准”表调到满刻度；
- e) 调节水量调节器旋钮（粗调旋钮），使水流量最大；
- f) 缓缓地调节水量调节器旋钮（粗调旋钮），使“高频功率”表指示到满刻度的 $3/5$ ，以保证水有合适的流量；再调节“细调”旋钮，使“高频功率”表指示在满刻度；
- g) 调整“功率校准”旋钮以减小功率，使“功率校准”表指示到相应的功率刻度值 P_{dc} ，记录“高频功率”表的指示功率；
- h) 将“功率校准”旋钮调到最小位置，关闭“校准”开关；
- i) 依次改变面板上部“量程转换”开关位置，重复步骤 b) ~ h)。