



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2077—2023

微波功率电桥校准规范

Calibration Specification for Microwave Power Bridges



2023-10-12 发布

2024-04-12 实施

国家市场监督管理总局 发布

微波功率电桥校准规范

Calibration Specification for
Microwave Power Bridges

JJF 2077—2023

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

中国计量科学研究院

参加起草单位：西安空间无线电技术研究所

本规范主要起草人：

杨绪军（中国航天科工集团二院 203 所）

陈云梅（中国航天科工集团二院 203 所）

李 勇（中国计量科学研究院）

参加起草人：

刘 挺（中国航天科工集团二院 203 所）

袁文泽（中国计量科学研究院）

蔡小宏（西安空间无线电技术研究所）



目 录

引言	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 概述.....	(1)
4 计量特性.....	(1)
5 校准条件.....	(1)
5.1 校准环境条件.....	(1)
5.2 校准用设备.....	(1)
6 校准项目和校准方法.....	(2)
6.1 外观及工作正常性检查.....	(2)
6.2 温度控制功能检查.....	(2)
6.3 直流偏置功率.....	(3)
6.4 惠斯通电桥替代功率.....	(3)
6.5 自平衡电桥替代功率.....	(4)
7 校准结果表达.....	(5)
8 复校时间间隔.....	(6)
附录 A 原始记录格式	(7)
附录 B 校准证书内页格式	(8)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(9)

引 言

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》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。



微波功率电桥校准规范

1 范围

本规范适用于微波功率惠斯通电桥和自平衡电桥的校准。

2 引用文件

本规范无引用文件。

3 概述

微波功率电桥（简称功率电桥）按其工作原理可分为惠斯通电桥和自平衡电桥，其功率测量可以通过直流功率变化量来描述，直流功率的变化量被称作替代功率，替代功率与功率座吸收的高频或微波功率成正比。

4 计量特性

a) 直流偏置功率：30 mW。

注：直流偏置功率通常在 29.3 mW~30.7 mW。

b) 惠斯通电桥替代功率：0.5 mW~10 mW；

最大允许误差： $\pm(0.1\% \times P + 5 \mu\text{W})$ 。

c) 自平衡电桥替代功率：0.5 mW~10 mW；

最大允许误差： $\pm(0.05\% \times P + 0.5 \mu\text{W})$ 。

注：

1 以上技术指标不作为符合性判定，仅提供参考。

2 P 为替代功率。

5 校准条件

5.1 校准环境条件

a) 环境温度： $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ ；

b) 相对湿度： $\leq 80\%$ ；

c) 供电电源：电压 $(220 \pm 11) \text{V}$ ，频率 $(50 \pm 1) \text{Hz}$ ；

d) 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，校准时环境温度变化不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

5.2 校准用设备

5.2.1 数字电压表（2台）

直流电压测量范围：1 V~10 V；

输入电阻：不小于 10 M Ω ；

直流电压最大允许误差： $\pm 0.00085\%$ 。

5.2.2 纳伏表

直流电压测量范围：1 mV~100 mV；

最大允许误差：±(0.004%~0.008%)。

5.2.3 电阻（2个）

电阻：100 Ω；

最大允许误差：±0.01%。

5.2.4 1 Ω 电阻

测量不确定度： 1×10^{-4} ($k=2$)。

5.2.5 热敏功率座

频率范围：9 kHz~2 GHz；

功率范围：0.1 mW~10 mW；

电压驻波比：小于 1.20。

5.2.6 信号发生器

频率范围：9 kHz~2 GHz；

输出功率：1 mW~10 mW；

接头类型：N 型。

6 校准项目和校准方法

功率电桥校准项目见表 1。

表 1 校准项目列表

序号	校准项目名称
1	外观及工作正常性检查
2	温度控制功能检查
3	直流偏置功率
4	惠斯通电桥替代功率
5	自平衡电桥替代功率

6.1 外观及工作正常性检查

a) 被校功率电桥应有说明书及全部配套附件；

b) 被校功率电桥的外观应完好，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；

c) 被校功率电桥通电后应正常工作，具有内部自检功能的应能通过自检。

6.2 温度控制功能检查

a) 按图 1 连接校准设备；

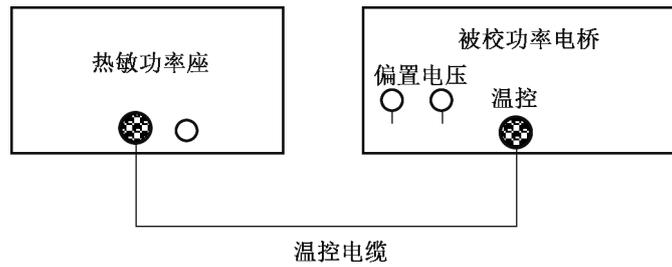


图 1 温度控制功能检查连接示意图

- b) 设置功率电桥 A 桥 (B 桥) 工作电阻为 $200\ \Omega$ ；
 c) 被校功率电桥对热敏电阻座预热 $1\ \text{h}\sim 2\ \text{h}$ ，观察被校功率电桥的温度控制显示状态，记录于附录 A 中的表 A.1。

6.3 直流偏置功率

- a) 按图 2 连接校准设备；

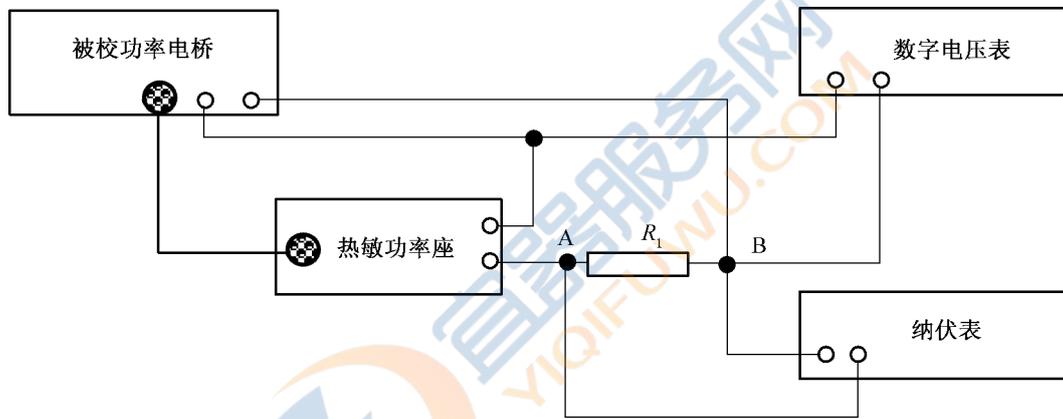


图 2 直流偏置功率校准连接示意图

- b) 设置数字电压表的电压测量方式为 DC、量程自动，读取数字电压表的电压 V_0 ，和纳伏电压表的电压 V_{ab} ，记录于附录 A 中的表 A.2；
 c) 按公式 (1) 计算直流偏置功率 P_b ，记录于附录 A 中的表 A.2。

$$P_b = \frac{V_0 V_{ab}}{R_1} \quad (1)$$

式中：

- P_b ——直流偏置功率，mW；
 V_0 ——数字电压表电压值，V；
 V_{ab} ——纳伏表电压值，mV；
 R_1 —— $1\ \Omega$ 电阻校准值， Ω 。

6.4 惠斯通电桥替代功率

- a) 按图 3 连接校准设备；

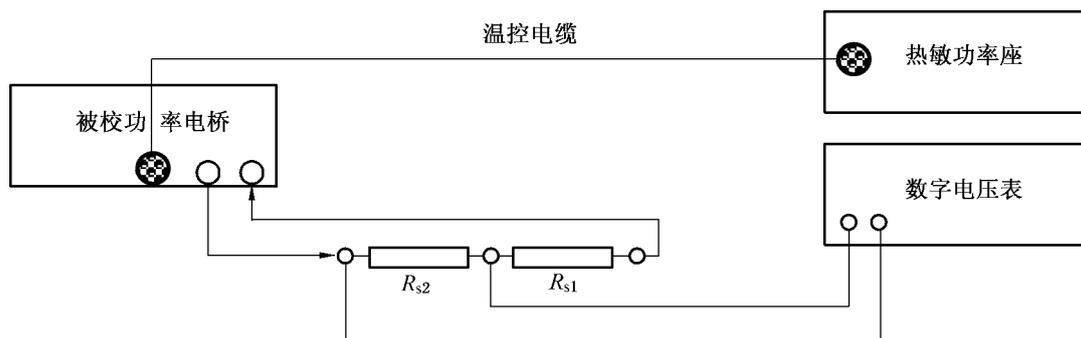


图3 惠斯通电桥直流替代功率校准连接示意图

b) 设置被校功率电桥的射频开关为“关”状态，数字电压表的电压测量方式为DC、量程自动；

c) 通过调节被校功率电桥的直流替代功率使数字电压表的读数 V_1 在 $(1.224\ 74\ \text{V} \pm 10\ \mu\text{V})$ 之间，记录 V_1 于附录 A 中的表 A.3 中；

d) 设置被校功率电桥的射频开关为“开”状态，被校功率电桥的直流替代功率为 $0.5\ \text{mW}$ ；

e) 记录数字电压表的读数 V_2 值于附录 A 中的表 A.3 中，按公式 (2) 计算直流替代功率 P_s ，并计算结果记录于附录 A 中的表 A.3 中；

$$P_s = (V_1^2 - V_2^2) \frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_{s1} \times R_{s2}} \quad (2)$$

式中：

P_s ——直流替代功率，W；

V_1 ——被校功率电桥射频开关为“关”状态时，数字电压表电压值，V；

V_2 ——被校功率电桥射频开关为“开”状态时，数字电压表电压值，V；

R_{s1} —— $100\ \Omega$ 电阻 s1 电阻值， Ω ；

R_{s2} —— $100\ \Omega$ 电阻 s2 电阻值， Ω 。

f) 按照附录 A 表 A.3 中功率量程值改变被校功率电桥的直流替代功率，重复步骤 e)，直至完成全部功率值测试。

6.5 自平衡电桥替代功率

a) 按图 4 连接校准设备。

b) 设置数字电压表和纳伏表的电压测量方式为 DC、量程自动，信号发生器信号输出为“关”状态，被校功率电桥校准因子设置为“1.000”。

c) 读取纳伏表测量值 $V_{\text{AB-DC}}$ 和数字电压表 1 电压测量值 $V_{\text{RF-OFF}}$ ；记录于附录 A 中的表 A.4 中。

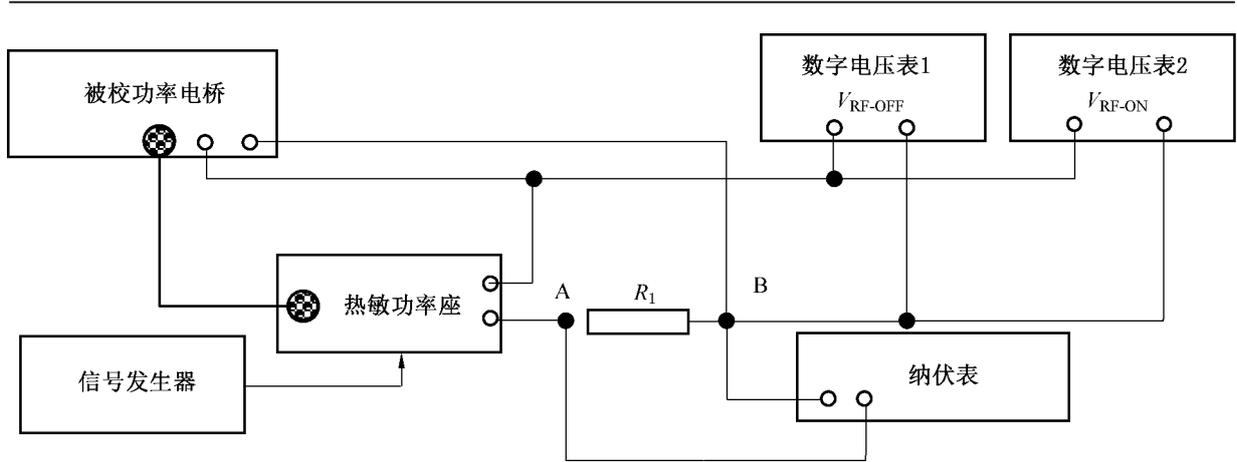


图4 自平衡电桥直流平衡电阻测量连接示意图

d) 电桥直流平衡电阻 R_{DC} 可按公式 (3) 计算:

$$R_{DC} = 0.001 \times \frac{R_1 V_{RF-OFF}}{V_{AB-DC}} \quad (3)$$

式中:

R_{DC} ——电桥直流平衡电阻的电阻值, Ω ;

R_1 ——1 Ω 电阻的校准值, Ω ;

V_{AB-DC} ——1 Ω 电阻两端电压, 纳伏表电压读数, mV;

V_{RF-OFF} ——数字电压表 1 电压测量值, V。

e) 信号发生器信号输出为“开”状态, 输出频率为 50 MHz, 输出功率为 0.5 mW。

f) 读取数字电压表 2 的电压 V_{RF-ON} 和被校功率电桥的指示值 P_0 , 记录于附录 A 中的表 A.4 中。

g) 按公式 (4) 计算替代功率 P_s , 将计算结果记录于附录 A 中的表 A.4。

$$P_s = \frac{V_{RF-OFF}^2 - V_{RF-ON}^2}{R_{DC}} = \frac{V_{RF-OFF}^2 - V_{RF-ON}^2}{R_1} \cdot \frac{V_{AB-DC}}{V_{RF-OFF}} \quad (4)$$

式中:

P_s ——直流替代功率测量值, 单位 W;

V_{RF-ON} ——信号发生器输出“开”时, 数字电压表 2 电压测量值, V。

h) 按照附录 A 表 A.4 中功率设置值, 改变信号发生器的输出功率, 重复步骤 d) ~ f), 直至完成全部功率值测试。

7 校准结果表达

微波功率电桥校准后, 出具校准证书。校准证书应至少包含以下信息:

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

8 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 温控功能检查

温控功能检查	是否正常

表 A.2 直流偏置功率

数字电压表的电压值 V_0/V	纳伏电压表的电压值 V_{ab}/mV	直流电阻 R_1/Ω	偏置功率 P_b/mW	偏置功率 $U_{rel} (k=2)$

表 A.3 惠斯通电桥替代功率

功率量程 mW	直流电压 V_1/V	直流电压 V_2/V	直流电阻 R_{s1}/Ω	直流电阻 R_{s2}/Ω	替代功率 P_s/mW	替代功率 $U_{rel} (k=2)$
0.5						
1						
2						
...						
10						

表 A.4 自平衡电桥替代功率

功率设置值 mW	电桥指示功率 P_0/mW	直流电阻 R_1/Ω	直流电压 V_{AB-DC}/mV	直流电压 V_{RF-OFF}/V	直流电压 V_{RF-ON}/V	替代功率 P_s/mW	替代功率 $U_{rel} (k=2)$
0.5							
1							
2							
...							
10							

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 温控功能检查

温控功能检查	是否正常

表 B.2 直流偏置功率

偏置功率 P_b/mW	$U_{rel} (k=2)$

表 B.3 惠斯通电桥替代功率

功率量程 mW	替代功率测量值 P_s/mW	替代功率不确定度 $U_{rel} (k=2)$
0.5		
1		
2		
...		
10		

表 B.4 自平衡电桥替代功率

功率指示值 P_o/mW	替代功率测量值 P_s/mW	替代功率不确定度 $U_{rel} (k=2)$
0.5		
1		
2		
...		
10		

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 直流偏置功率测量的不确定度评定

C.1.1 测量模型

选择自平衡功率电桥作为被测对象，用数字电压表、标准电阻和纳伏表测量功率电桥的直流替代功率，测试连接图如图 2 所示。用公式 (C.1) 计算直流偏置功率。

$$P_b = \frac{V_0 V_{ab}}{R_1} \quad (\text{C.1})$$

式中：

P_b ——直流偏置功率，mW；

V_0 ——数字电压表电压值，V；

V_{ab} ——纳伏表电压值，mV；

R_1 ——1 Ω 电阻校准值， Ω 。

表达式为电压和电阻的乘积形式，采用相对不确定度表示，则灵敏系数为：

$$c_{r1} = \frac{\partial P_b}{\partial V_0} = 1 \quad (\text{C.2})$$

$$c_{r2} = \frac{\partial P_b}{\partial R_1} = -1 \quad (\text{C.3})$$

$$c_{r3} = \frac{\partial P_b}{\partial V_{ab}} = 1 \quad (\text{C.4})$$

C.1.2 不确定度来源

- a) 数字电压表测量不准引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 1 Ω 电阻测量不准引入的不确定度分量 u_2 ；
- c) 纳伏表测量不准引入的不确定度分量 u_3 ；
- d) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{(D)}$ 。

C.1.3 标准不确定度分量评定

- a) 数字电压表测量不准引入的不确定度分量 u_1

某数字电压表在测量 V_0 时， V_0 为 2.408 24 V，直流电压最大允许误差为 $\pm 0.000 85\%$ ，测量不确定度按 B 类评定方法，测量结果服从均匀分布，包含因子 $k_1 = \sqrt{3}$ ，则相对标准不确定度分量 u_1 为：

$$u_1 = c_{r1} \frac{\Delta V_0 / V}{k_1} = \frac{8.5 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \approx 4.908 \times 10^{-6}$$

- b) 1 Ω 电阻测量不准引入的不确定度分量 u_2

1 Ω 电阻测量不确定度为 $1 \times 10^{-4} \Omega$ ， $k_2 = 2$ ，引入的相对标准不确定度分量 u_2 为：

$$u_2 = c_{r2} \frac{\Delta R / R}{k_2} = -1 \times \frac{1 \times 10^{-4}}{2} = -5 \times 10^{-5}$$

c) 纳伏表电压测量不准引入的不确定度分量 u_3

某纳伏表在测量 V_{ab} 时, V_{ab} 为 12.529 9 mV, 直流电压相对最大允许误差为 $\pm 0.004 4\%$, 按测量不确定度 B 类评定方法, 测量结果服从均匀分布, 包含因子 $k_3 = \sqrt{3}$, 则相对标准不确定度分量 u_3 为:

$$u_3 = c_{r3} \frac{\Delta V_{ab}/V_{ab}}{k_3} = \frac{4.4 \times 10^{-5}}{\sqrt{3}} \approx 2.54 \times 10^{-5}$$

d) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{(D)}$

测量重复性引入的不确定度按 A 类方法评定。用数字电压表测量功率电桥的偏置功率, 独立测量 10 次, 数据见表 C.1, 按贝塞尔公式 (C.5) 计算其实验标准偏差。

$$s_n(P_b) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{bi} - \overline{P_b})^2} \quad (\text{C.5})$$

表 C.1 独立测量 10 次数据

测量次数	偏置功率 P_b/mW
1	30.212
2	30.211
3	30.220
4	30.211
5	30.209
6	30.209
7	30.210
8	30.212
9	30.213
10	30.210
$s_n(P_b)$	0.003 2
$u_{(D)}$	0.011%

C.1.4 标准不确定度分量表

表 C.2 为不确定度分量一览表。

表 C.2 不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
u_1	数字电压表测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	4.91×10^{-6}
u_2	1 Ω 电阻测量不准	B 类	正态	2	5.00×10^{-5}
u_3	纳伏表测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	2.54×10^{-5}
$u_{(D)}$	测量重复性	A 类	——	——	0.011%

C.1.5 合成相对标准不确定度

假设各不确定度分量相互无关，根据不确定度传播律，合成相对标准不确定度为：

$$u_{\text{crel}}(P_b) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_{(D)}^2} \approx 0.012\%$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展相对不确定度为： $U_{\text{rel}}(P_b) = 2u_{\text{crel}}(P_b) = 0.024\%$

C.2 惠斯通电桥替代功率测量的不确定度评定

C.2.1 测量模型

用数字电压表和 $100\ \Omega$ 电阻测量惠斯通电桥直流替代功率，测试连接图如图 3 所示。用公式 (C.6) 计算替代功率。

$$P_s = (V_1^2 - V_2^2) \frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_{s1} \times R_{s2}} \quad (\text{C.6})$$

式中：

P_s ——直流替代功率，W；

V_1 ——被校功率电桥射频开关为 OFF 状态时，数字电压表电压值，V；

V_2 ——被校功率电桥射频开关为 ON 状态时，数字电压表电压值，V；

R_{s1} —— $100\ \Omega$ 电阻 s1 电阻值， Ω ；

R_{s2} —— $100\ \Omega$ 电阻 s2 电阻值， Ω 。

替代功率 $1\ \text{mW}$ 时， V_1 和 V_2 分别为 $0.001\ 247\ 5\ \text{mW/V}$ 和 $0.001\ 204\ \text{mW/V}$ ，则灵敏系数分别为：

$$c_1 = \frac{\partial P_s}{\partial V_1} = 2V_1 \left(\frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_{s1} \times R_{s2}} \right) = 40V_1 = 0.048\ 99\ (\text{mW/V}) \quad (\text{C.7})$$

$$c_2 = \frac{\partial P_s}{\partial V_2} = -2V_2 \left(\frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_{s1} \times R_{s2}} \right) = -40V_2 = -0.048\ 16\ (\text{mW/V}) \quad (\text{C.8})$$

$$c_3 = \frac{\partial P_s}{\partial R_{s1}} = -(V_1^2 - V_2^2) \frac{1}{R_{s1}^2} = -\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{10\ 000} \approx -5 \times 10^{-6}\ (\text{mW}/\Omega) \quad (\text{C.9})$$

$$c_4 = \frac{\partial P_s}{\partial R_{s2}} = -(V_1^2 - V_2^2) \frac{1}{R_{s2}^2} = -\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{10\ 000} \approx -5 \times 10^{-6}\ (\text{mW}/\Omega) \quad (\text{C.10})$$

C.2.2 不确定度来源

- 数字电压表测量不准引入的不确定度分量 u_1 、 u_2 ；
- $100\ \Omega$ 电阻不准引入的不确定度分量 u_3 、 u_4 ；
- 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{(D)}$ 。

C.2.3 标准不确定度分量评定

- 数字电压表测量不准引入的不确定度分量 u_1 、 u_2

数字电压表在测量 V_1 、 V_2 时，直流电压 $10\ \text{V}$ 挡的指标为 $\pm 8.5 \times 10^{-6}$ ，电压 $1.224\ 74\ \text{V}$ 时为 $\pm 1.04 \times 10^{-5}$ ，电压 $1.204\ 12\ \text{V}$ 时为 $\pm 1.02 \times 10^{-5}$ ，按测量不确定度 B 类评定方法，测量结果服从均匀分布，包含因子 $k_1 = k_2 = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u_1 = c_1 \frac{\Delta V_1}{k_1} = 0.048\ 99 \times \frac{1.04 \times 10^{-5}}{\sqrt{3}} \approx 2.94 \times 10^{-7}\ (\text{W}) = 2.94 \times 10^{-4}\ (\text{mW})$$

$$u_2 = c_2 \frac{\Delta V_2}{k_2} = -0.048\ 16 \times \frac{1.02 \times 10^{-5}}{\sqrt{3}} \approx -2.89 \times 10^{-7} \text{ (W)} = -2.89 \times 10^{-4} \text{ (mW)}$$

b) 100 Ω 电阻不准引入的不确定度分量 u_3 、 u_4

100 Ω 电阻的指标为 $\pm 1 \times 10^{-4}$ ，按测量不确定度 B 类评定方法，测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = -u_4 = c_3 \frac{\Delta R_{s1}}{k_3} = -5 \times 10^{-6} \times \frac{100 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \approx -2.89 \times 10^{-8} \text{ (W)} = -2.89 \times 10^{-5} \text{ (mW)}$$

c) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{(D)}$

测量重复性引入的不确定度按 A 类方法评定。用数字电压表测量功率电桥的直流替代功率，独立测量 10 次，数据见表 C.3，按贝塞尔公式计算其实验标准偏差。

表 C.3 独立测量 10 次数据

测量次数	直流替代功率 P_s /mW
1	0.998 0
2	0.998 5
3	0.997 5
4	0.999 2
5	0.998 4
6	0.999 0
7	0.996 8
8	0.999 0
9	0.998 9
10	0.998 5
平均值	0.998 38
$u_{(D)}$	0.000 76

C.2.4 标准不确定度分量表

标准不确定度分量表见表 C.4。

表 C.4 标准不确定度分量表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	灵敏系数 c	变量值	标准不确定度分量/mW
u_1	数字电压表测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	48.99/(mW/V)	1.224 74/V	2.94×10^{-4}
u_2	数字电压表测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	48.16/(mW/V)	1.204 12/V	-2.89×10^{-4}
u_3	100 Ω 电阻 1 不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	-0.005/(mW/ Ω)	100/ Ω	-2.89×10^{-5}
u_4	100 Ω 电阻 2 不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.005/(mW/ Ω)	100/ Ω	-2.89×10^{-5}
$u_{(D)}$	测量重复性	A 类	——	——	——	——	7.6×10^{-4}

C.2.5 合成标准不确定度

数字电压表采用同一台，假设强相关，其合成标准不确定度用代数和表示；100 Ω 电阻 R_{s1} 和 R_{s2} 带来的不确定度相互无关，根据不确定度传播律，合成标准不确定度为：

$$u_c(P_s) = \sqrt{(u_1 + u_2)^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_D^2} \approx 0.000\ 959 \text{ (mW)}$$

C.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，替代功率 1 mW 时，扩展不确定度为： $U(P_s) = 2u_c(P_s) = 0.002 \text{ (mW)}$

则相对扩展不确定度为： $U_{\text{rel}}(P_s) = 0.002 \text{ mW}/1 \text{ mW} = 0.2\%$

C.3 自平衡电桥替代功率的不确定度评定

C.3.1 测量模型

用数字电压表和 1 Ω 电阻配合测量自平衡电桥直流替代功率，测试连接图如图 4 所示。用公式 (C.11) 计算替代功率。

$$P_s = \frac{V_{\text{RF-OFF}}^2 - V_{\text{RF-ON}}^2}{R_1} \cdot \frac{V_{\text{AB-DC}}}{V_{\text{RF-OFF}}} = \frac{V_{\text{AB-DC}}}{R_1} \left(V_{\text{RF-OFF}} - \frac{V_{\text{RF-ON}}^2}{V_{\text{RF-OFF}}} \right) \quad (\text{C.11})$$

式中：

P_s ——直流替代功率测量值，W；

$V_{\text{RF-ON}}$ ——信号发生器输出“开”时，数字电压表电压测量值，V；

$V_{\text{RF-OFF}}$ ——信号发生器输出“关”时，数字电压表电压测量值，V；

R_1 ——1 Ω 电阻值，Ω；

$V_{\text{AB-DC}}$ ——1 Ω 电阻两端电压，纳伏表电压读数，V。

替代功率 1 mW 时， $V_{\text{RF-OFF}}$ 为 2.449 48 V， $V_{\text{RF-ON}}$ 约为 2.408 24 V， $V_{\text{AB-DC}}$ 为 0.012 V，1 Ω 电阻为 1.000 01 Ω，则灵敏系数为：

$$c_1(V_{\text{RF-OFF}}) = \frac{\partial P_s}{\partial V_{\text{RF-OFF}}} = \frac{V_{\text{AB-DC}}}{R_1} \left(1 + \frac{V_{\text{RF-ON}}^2}{V_{\text{RF-OFF}}^2} \right) \approx 0.023\ 6 \quad (\text{C.12})$$

$$c_2(V_{\text{RF-ON}}) = \frac{\partial P_s}{\partial V_{\text{RF-ON}}} = -2V_{\text{RF-ON}} \frac{1}{R_1} \cdot \frac{V_{\text{AB-DC}}}{V_{\text{RF-OFF}}} \approx -0.023\ 6 \quad (\text{C.13})$$

$$c_3(V_{\text{AB-DC}}) = \frac{\partial P_s}{\partial V_{\text{AB-DC}}} = \frac{V_{\text{RF-OFF}}^2 - V_{\text{RF-ON}}^2}{R_1 V_{\text{RF-OFF}}} \approx 0.081\ 79 \quad (\text{C.14})$$

$$c_4(R_1) = \frac{\partial P_s}{\partial R_1} = -\frac{V_{\text{RF-OFF}}^2 - V_{\text{RF-ON}}^2}{R_1^2} \cdot \frac{V_{\text{AB-DC}}}{V_{\text{RF-OFF}}} \approx -0.000\ 98 \quad (\text{C.15})$$

C.3.2 不确定度来源

- 数字电压表测量不准引入的不确定度分量 u_1 、 u_2 ；
- 纳伏表测量不准引入的不确定度分量 u_3 ；
- 1 Ω 电阻不准引入的不确定度分量 u_4 ；
- 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{(D)}$ 。

C.3.3 标准不确定度分量评定

- 数字电压表测量不准引入的不确定度分量 u_1 、 u_2

$V_{\text{RF-OFF}}$ 为 2.449 48V， $V_{\text{RF-ON}}$ 为 2.408 24V 时，数字电压表直流电压的指标为

$\pm 8.5 \times 10^{-6}$ ，即 $\Delta V_{\text{RF-OFF}} = 0.000\ 020\ 8\ \text{V}$ ， $\Delta V_{\text{RF-ON}} = 0.000\ 020\ 5\ \text{V}$ ，按测量不确定度 B 类评定方法，测量结果服从均匀分布，包含因子 $k_1 = k_2 = \sqrt{3}$ ，则有：

$$u_1 = c_1 \frac{\Delta V_{\text{RF-OFF}}}{k_1} = 0.023\ 6 \times \frac{0.000\ 020\ 8}{1.732} \approx 2.84 \times 10^{-7}\ (\text{W}) = 2.84 \times 10^{-4}\ (\text{mW})$$

$$u_2 = c_2 \frac{\Delta V_{\text{RF-ON}}}{k_1} = -0.023\ 6 \times \frac{0.000\ 020\ 5}{\sqrt{3}} \approx -2.79 \times 10^{-7}\ (\text{W}) = -2.79 \times 10^{-4}\ (\text{mW})$$

b) 纳伏表测量不准引入的不确定度分量 u_3

纳伏表在测量 $V_{\text{AB-DC}}$ 时，直流电压的指标为 $\pm 0.004\ 4\%$ ，即 $\Delta V_{\text{AB-DC}} = 0.000\ 000\ 528\ \text{V}$ ，按测量不确定度 B 类评定方法，测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u_3 = c_3 \frac{\Delta V_{\text{AB-DC}}}{k_4} = 0.081\ 8 \times \frac{0.000\ 000\ 528}{\sqrt{3}} \approx 2.49 \times 10^{-8}\ (\text{W}) = 2.49 \times 10^{-5}\ (\text{mW})$$

c) $1\ \Omega$ 电阻不准引入的不确定度分量 u_4

$1\ \Omega$ 电阻校准结果的测量不确定度为： 1×10^{-4} ， $k = 2$ ，则

$$u_4 = c_4 \frac{\Delta R_1}{k_5} = -0.000\ 98 \times \frac{0.000\ 1}{2} = -4.9 \times 10^{-8}\ (\text{W}) = -4.9 \times 10^{-5}\ (\text{mW})$$

d) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{(D)}$

测量重复性引入的不确定度按 A 类方法评定。用数字电压表测量功率电桥的直流替代功率，独立测量 10 次，数据见表 C.5，按贝塞尔公式计算其实验标准偏差。

表 C.5 独立测量 10 次数据

测量次数	直流替代功率 P_s/mW
1	0.999 0
2	0.998 9
3	0.999 1
4	0.999 4
5	0.998 9
6	0.999 0
7	0.998 8
8	0.999 0
9	0.998 9
10	0.998 7
平均值	0.999 0
$u_{(D)}$	0.000 189

C.3.4 标准不确定度分量表

标准不确定度分量一览表见表 C.6。

表 C.6 标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	灵敏系数 c	变量	标准不确定度分量/mW
u_1	数字电压表 1 测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.023 6/(mW/V)	2.449 48/V	2.84×10^{-4}
u_2	数字电压表 2 测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	-0.023 6/(mW/V)	2.408 24/V	-2.79×10^{-4}
u_3	纳伏表测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.081 79/(mW/V)	0.012/V	2.49×10^{-5}
u_4	1 Ω 电阻不准	B 类	正态	2	-0.000 98/(mW/ Ω)	1/ Ω	-4.90×10^{-5}
$u_{(D)}$	测量重复性	A 类	——	——	——	——	1.89×10^{-4}

C.3.5 相对合成标准不确定度

采用两个数字电压表分别测 $V_{\text{RF-OFF}}$ 和 $V_{\text{RF-ON}}$ ， u_1 、 u_2 不相关，标准不确定度采用各项分量绝对值代数和。数字电压表、纳伏表测量不准、1 Ω 电阻不准相互无关，根据不确定度传播律，合成标准不确定度为：

$$u_c(P) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_{(D)}^2} = 0.000\ 444 \text{ (mW)}$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，替代功率 1 mW 时扩展不确定度为： $U(P_s) = 2u_c(P) = 0.000\ 9 \text{ (mW)}$

则相对扩展不确定度为： $U_{\text{rel}}(P_s) = 0.000\ 9 \text{ mW}/1 \text{ mW} = 0.09\%$