

中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 1024—2007

脉冲功率计

Pulse Power Meters

四川质安高电压工程技术研究中心

2007-02-28 发布

2007-05-28 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

脉冲功率计检定规程

Verification Regulation of
Pulse Power Meters

JJG 1024—2007

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2007 年 2 月 23 日批准，并自 2007 年 5 月 28 日起施行。

归口单位：全国无线电计量技术委员会

起草单位：中国航天科工集团二院 203 所

本规程委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规程起草人：

杨绪军（中国航天科工集团二院 203 所）

许传忠（中国航天科工集团二院 203 所）

四川质安高电压工程技术研究中心

目 录

1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量性能要求	(1)
3.1 频率范围	(1)
3.2 功率测量范围	(1)
3.3 功率敏感器的校准因子	(1)
3.4 功率敏感器的电压驻波比	(1)
3.5 脉冲响应	(1)
3.6 功率敏感器的线性度	(1)
3.7 功率计校准源的输出功率电平	(1)
4 通用技术要求	(1)
4.1 外观标志	(1)
4.2 其他要求	(1)
5 计量器具控制	(1)
5.1 检定条件	(1)
5.2 检定项目及检定方法	(3)
5.3 检定结果的处理	(8)
5.4 检定周期	(8)
附录 A 检定记录格式	(9)
附录 B 主要项目测量不确定度评定	(11)

脉冲功率计检定规程

1 范围

本规程适用于各种脉冲功率计的首次检定、后续检定和使用中检验。

2 概述

脉冲功率计是一种用来测量脉冲功率的测量器具。脉冲功率计是由脉冲功率敏感器和功率指示器组成。其工作原理是将脉冲功率转换成直流（音频）功率，由指示器指示。

3 计量性能要求

3.1 频率范围：10MHz~18GHz

3.2 功率测量范围：-30dBm~+20dBm

3.3 功率敏感器的校准因子 K

3.4 功率敏感器的电压驻波比 S ：<1.89

3.5 脉冲响应：

上升时间 t_r ：<200ns；

下降时间 t_f ：<200ns。

3.6 功率敏感器的线性度 L ：<10%

3.7 功率计校准源的输出功率电平

功率电平允许误差极限：±5%。

4 通用技术要求

4.1 外观标志

脉冲功率计上应具有仪器名称、仪器型号、制造厂、仪器出厂序号及电源要求。

4.2 其他要求

4.2.1 功率计的开关、旋钮、按键、输入输出端口应有明确识别标志。

4.2.2 仪器送检时附件应齐全，要备有仪器使用说明书，后续检定还需有前次检定的检定证书。

5 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检验。

5.1 检定条件

5.1.1 检定用设备

检定所用设备必须经过计量技术机构检定合格，并在有效期内。

5.1.1.1 信号发生器

频率范围：10MHz~18GHz；

- 频率稳定度：优于 $1.5 \times 10^{-4}/10\text{min}$ ；
幅度稳定度：优于 $0.5\%/10\text{min}$ ；
脉冲调制：采用外调制；
输出功率范围： $-70\text{dBm} \sim +20\text{dBm}$ 。
- 5.1.1.2 脉冲产生器
频率范围： $100\text{Hz} \sim 5\text{kHz}$ 或以上；
上升时间（下降时间）： $\leq 2\text{ns}$ 。
- 5.1.1.3 隔离器
频率范围： $10\text{MHz} \sim 18\text{GHz}$ ；
驻波系数： ≤ 1.1 ($10\text{MHz} \sim 18\text{GHz}$)。
- 5.1.1.4 矢量网络分析仪
频率范围： $10\text{MHz} \sim 18\text{GHz}$ ；
测量电压驻波比允许误差极限： $\pm 5\%$ 。
- 5.1.1.5 驻波测试桥
频率范围： $10\text{MHz} \sim 18\text{GHz}$ ；
电压驻波比： < 1.06 。
- 5.1.1.6 功率座
频率范围： $10\text{MHz} \sim 18\text{GHz}$ ；
功率量程： $10\mu\text{W} \sim 200\text{mW}$ ；
电压驻波比： < 1.3 ；
最大允许误差： $\pm 2.1\%$ 。
- 5.1.1.7 功率座
注：用于功率参考电平的标准，常用热敏电阻座。
频率范围： $10\text{MHz} \sim 18\text{GHz}$ ；
功率量程： $10\mu\text{W} \sim 10\text{mW}$ ；
电压驻波比： < 1.3 ；
最大允许误差： $\pm 1.1\%$ 。
- 5.1.1.8 功率指示器
注：作为标准功率指示器，常用 HP432C 或其他具有类似功能的指示器。
允许误差极限： $\pm 0.5\%$ 。
- 5.1.1.9 功分器
频率范围： $\text{DC} \sim 18\text{GHz}$ ；
插入损耗： 8.5dB 。
- 5.1.1.10 数字电压表
最大有效位：6 位半；
允许误差极限： $\pm 0.002\%$ （直流电压 10V 挡）。
- 5.1.1.11 步进衰减器
频率范围： $\text{DC} \sim 18\text{GHz}$ ；

衰减精度：0.2dB/10dB。

5.1.2 检定环境条件

5.1.2.1 温度： $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

5.1.2.2 相对湿度： $\leq 80\%$ 。

5.1.2.3 供电电源：电压 $(220 \pm 10)\text{V}$ ，频率 $(50 \pm 1)\text{Hz}$ 。

5.1.2.4 其他：周围无影响检定系统正常工作的机械振动和电磁干扰。

5.2 检定项目及检定方法

5.2.1 检定项目见表 1。

表 1 检定项目一览表

项目名称	首次检定	后续检定	使用中检验
外观及工作正常性检查	+	+	-
功率传感器的电压驻波比	+	+	-
功率传感器的校准因子	+	+	-
脉冲响应上升时间及下降时间	+	+	-
功率传感器的线性度	+	+	-
功率计校准源的输出功率电平	+	+	+

注：1. “+”为应检项目，“-”为可不检项目；
2. 修理后检定项目与首次检定项目不同；
3. 检定时以被检功率计说明书的技术要求为准。

5.2.2 所有检定用设备均需按各自技术说明书规定的时间预热。

5.2.3 外观及工作正常性检查

5.2.3.1 外观及附件

用目视法检查被检脉冲功率计的外观及附件，其结果应符合第 4 条的规定。

注：下面叙述的被检脉冲功率计包括被检功率传感器和被检功率指示器。

5.2.3.2 工作正常性检查

将被检功率传感器和与之配合使用的指示器连接，通电预热后指示器显示正常。有自检功能的，应能通过自检，并按说明书规定用内部的功率参考源对被检功率传感器进行功率校准，检查其状态是否正常。

5.2.4 功率传感器的电压驻波比 S

5.2.4.1 按图 1 连接仪器，测量被检功率传感器的反射系数；

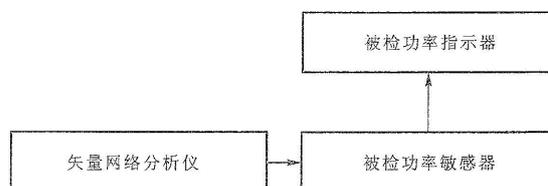


图 1 电压驻波比的检定框图

5.2.4.2 根据被检功率传感器的工作频率范围设置矢量网络分析仪的测量频率点，并用标准件（短路器、开路器、负载）校准矢量网络分析仪；

5.2.4.3 按公式（1）计算被检功率传感器的电压驻波比 S ：

$$S = \frac{1 + |\Gamma_u|}{1 - |\Gamma_u|} \quad (1)$$

式中： S ——被检功率传感器的电压驻波比；

Γ_u ——被检功率传感器的反射系数 Γ 。

将测量结果记录于附录 A2.1。

5.2.5 功率传感器的校准因子 K

5.2.5.1 传递标准法

传递标准法是由一个高方向性的单定向耦合器或功分器和一个高精度的功率计组成的装置，与信号发生器组成一个负反馈的稳幅系统。该标准装置中的标准功率座是经过上一级标准量值传递得到的，并确定出该系统的校准系数 K_c ，然后用于校准被检功率传感器。

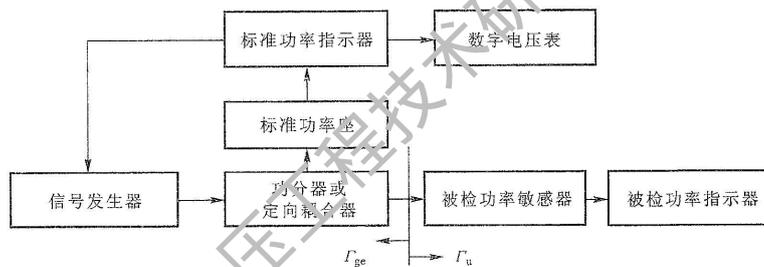


图2 传递标准法的校准因子检定框图

- 按图 2 连接仪器，并根据仪器说明，对所需预热仪器进行通电加热；
- 将信号发生器的输出频率设置成所需的测量频率，并且其输出幅度被设置为被检功率指示器所能正常显示的值；
- 读取标准功率指示器的示值 P_{bc} 和主臂上被检功率指示器的示值 P_{bu} ；
- 按式（2）计算被检功率传感器的校准因子 K_u ：

$$K_u = K_c \times \frac{P_{bu}}{P_{bc}} \times |1 - \Gamma_{gc} \Gamma_u|^2 \quad (2)$$

式中： K_u ——被检功率传感器的校准因子；

K_c ——传递标准功率系统的校准因子；

P_{bc} ——标准功率指示器的功率指示值，mW；

P_{bu} ——被检功率指示器的功率指示值，mW；

$|1 - \Gamma_{gc} \Gamma_u|^2$ ——作为失配项处理，计算时视为 1。

将计算结果记录于附录 A2.1。

5.2.5.2 交替比较法

交替比较法是利用高一级的标准功率座校准被检功率敏感器。

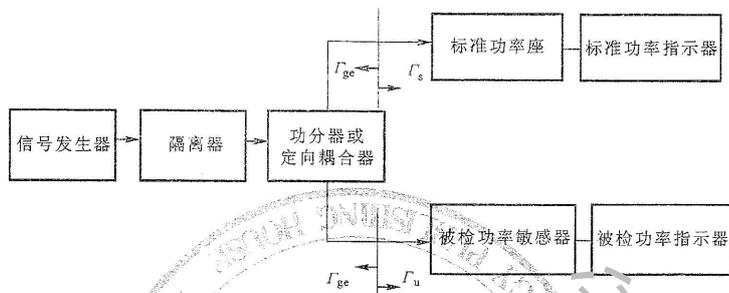


图3 交替比较法的校准因子检定框图

- 按图3连接仪器，并按仪器要求加电预热；
- 将标准功率座接在与信号发生器相连接的功分器的一个输出端；
- 将被检功率敏感器接在与信号发生器相连接的功分器的另一个输出端；
- 将信号发生器的输出频率设置成所需测量频率，并且其输出幅度被设置为被检功率指示器所能正常显示的值；
- 保持信号发生器输出功率不变，分别读出标准功率指示器指示值 P_{bs} 和被检功率指示器指示值 P_{bu} ；
- 按式(3)计算被检功率敏感器的校准因子 K_u 。

$$K_u = K_s \times \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \times \frac{|1 - \Gamma_{gc} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{gc} \Gamma_s|^2} \quad (3)$$

式中：
 K_u ——被检功率敏感器的校准因子；
 K_s ——标准功率座的校准因子；
 P_{bu} ——被检功率指示器的功率指示值，mW；
 P_{bs} ——标准功率指示器的功率指示值，mW；

$\frac{|1 - \Gamma_{gc} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{gc} \Gamma_s|^2}$ ——失配项，计算时视为1。

将计算结果记录于附录 A2.1。

5.2.6 上升时间和下降时间

- 按图4连接仪器，并按仪器要求加电预热；

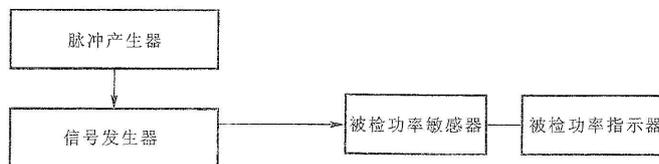


图4 上升时间和下降时间的检定框图

5.2.6.2 设置信号发生器的频率在所需要的测量频率，其输出功率电平在所需要的测量功率电平；

5.2.6.3 设置脉冲产生器的重复周期为 1ms，上升时间为小于或等于 2ns，幅度为 0.5V，占空比为 50%；

5.2.6.4 设置被检脉冲功率计的频率与信号发生器的频率一致，改变被检功率计的扫速，使其波形显示一个周期，并通过被检功率计的参数测量功能，在脉冲功率计上分别读出不同视频带宽下的上升时间和下降时间；

5.2.6.5 选择不同的测量功率电平，重复上述步骤，分别测出不同功率电平下的上升时间和下降时间。

将测量结果记录于附录 A2.2。

5.2.7 功率敏感器的线性度 L

按图 5 连接仪器，并按仪器要求进行加电预热。

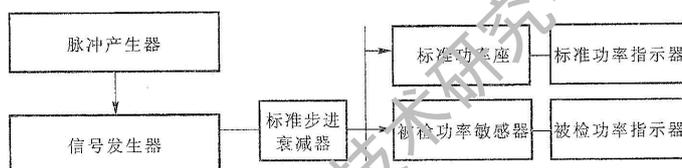


图 5 功率敏感器的线性度检定框图

首先将标准步进衰减器衰减值置为 0dB，此时记录标准功率计和被校脉冲功率计的读数分别为 P_1 和 R_1 ，然后将标准步进衰减器衰减值置另一个值（一般为 10dB），此时记录标准功率计和被校脉冲功率计的读数分别为 P_2 和 R_2 ，其线性度 L 表示式为：

$$L = \left[\frac{R_1/R_2}{P_1/P_2} - 1 \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中： R_1, R_2 ——被校脉冲功率计功率指示器读数，mW；

P_1, P_2 ——标准功率计功率指示器读数，mW。

分别测量在脉冲和连续波模式下的被检功率敏感器的线性度。

5.2.7.1 脉冲模式

a. 设置信号发生器的输出频率为所需要的测量频率，并且其输出电平为所需要的测量功率电平，同时将信号发生器的脉冲调制方式设置为外调制；

b. 设置脉冲产生器的输出重复频率、脉冲宽度及幅度为所需的测量状态；

c. 设置标准功率计的频率与信号发生器的频率一致；

d. 设置被检功率计的测量模式为脉冲测量模式，其频率与信号发生器的频率一致；

e. 分别记录标准功率指示器和被检功率指示器的功率示值；

f. 选择不同的测量功率电平，重复上述 a~e 步骤，按公式（4）计算线性度；

g. 根据说明书的技术指标判断测量数据是否满足要求。

将测量结果记录于附录 A2.3。

5.2.7.2 连续波模式

- a. 设置信号发生器的输出频率为所需要的测量频率，并且其输出电平为所需要的测量功率电平，同时将信号发生器的脉冲调制方式关掉；
- b. 设置脉冲产生器的输出状态为“关”；
- c. 设置标准功率计的频率与信号发生器的频率一致；
- d. 设置被检功率计的测量模式为连续波测量模式，其频率与信号发生器的频率一致；
- e. 分别记录标准功率指示器和被检功率指示器的功率示值；
- f. 选择不同的测量功率电平，重复上述 a~e 步骤，按公式 (4) 计算线性度；
- g. 根据说明书的技术指标判断测量数据是否满足要求。

将测量结果记录于附录 A2.3。

5.2.8 功率计校准源的输出

- 5.2.8.1 按图 6 连接仪器，并将功率指示器后面板的 V_{comp} 中心端接到数字电压表的正端，以及后面板的 V_{H} 中心端接到数字电压表的负端；

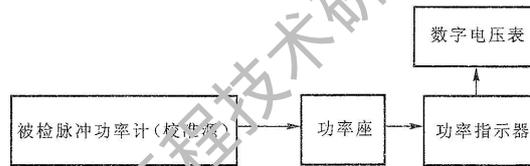


图 6 功率计校准源的输出功率电平检定框图

- 5.2.8.2 按仪器要求进行加电预热；
- 5.2.8.3 在功率指示器上进行调零操作；
- 5.2.8.4 设置被检脉冲功率计校准源的输出功率状态为 OFF，此时记录数字电压表读数 V_0 ；
- 5.2.8.5 设置被检脉冲功率计校准源的输出功率状态为 ON，此时记录数字电压表读数 V_1 ；
- 5.2.8.6 将与数字电压表负端相连接的功率指示器 V_{H} 的连接线断开，直接将功率指示器后面板的 V_{comp} 连接到数字电压表的电压输入端，此时记录数字电压表读数 V_{comp} ；
- 5.2.8.7 按公式 (5) 计算被检脉冲功率计校准源的输出功率 P_0 ：

$$P_0 = \frac{2V_{\text{comp}}(V_1 - V_0) + V_0^2 - V_1^2}{4RK} \quad (5)$$

式中： P_0 ——被检脉冲功率计校准源的输出功率；

V_{comp} ——第 f 步记录值；

V_1 ——第 e 步记录值；

V_0 ——第 d 步记录值；

R ——标准功率计的工作电阻 200Ω ;

K ——与被检功率计校准源输出频率相同的标准功率座的校准因子。

5.2.8.8 若被检脉冲功率计校准源有不同的输出电平，重复上述步骤。

将计算结果记录于附录 A2.4。

5.3 检定结果的处理

按本规程要求检定合格的脉冲功率计，出具检定证书；检定不合格的，出具检定结果通知书，并注明不合格项目。检定证书与检定结果通知书的内容同附录 A。

5.4 检定周期

脉冲功率计的检定周期为 1 年，修理后应重新检定。



附录 A

检定记录格式

A1 外观及工作正常性检查；

A2 被检脉冲功率计项目：

A2.1 校准因子及电压驻波比或反射系数

射频频率/GHz	标称值/(%)	校准值/(%)	误差/(%)	电压驻波比
校准因子的测量不确定度：_____				
电压驻波比的测量不确定度：_____				

A2.2 上升时间和下降时间

校准电平：_____		
触发电平：_____		
视频带宽：_____		
测量次数	标准输出信号上升时间 t_n /ns	被检脉冲功率计上升时间 t_n /ns
1		
2		
3		
被检脉冲功率计上升时间平均值 \bar{t}_n = _____		
上升时间 t_n 的测量不确定度：_____		

A2.3 功率计敏感器的线性度

测量模式 (连续波/脉冲)：_____				
校准电平/dBm	最小值/dB	CH ₁ /dB	CH ₂ /dB	最大值/dB
功率敏感器的线性测量不确定度：_____				

A2.4 功率计校准源的输出功率电平

校准电平/mW	最小值/mW	校准值/mW	最大值/mW

检定员：_____ 核验员：_____ 检定日期：_____

四川质安高电压工程技术研究中心

附录 B

主要项目测量不确定度评定

B1 脉冲功率计校准因子的测量不确定度分析及评定

B1.1 测量方法及数学模型

用脉冲功率标准装置测量被校的脉冲峰值功率计，连续波状态下标准功率计测出的功率为标准功率 P_{bs} ；脉冲调制状态下，被测的脉冲功率计读取的功率值为 P_{bu} ，由此可以计算被校脉冲峰值功率计的校准系数 K_u 。计算公式见式 (B1)。

$$K_u = K_s \times \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \times A \times M \quad (B1)$$

式中： P_{bu} ——被校脉冲功率计的直流替代功率，mW；

P_{bs} ——标准功率计的直流替代功率，mW；

K_s ——标准功率座的校准系数；

K_u ——被校脉冲功率计的校准系数；

A ——脉冲调制信号与连续波信号幅度比例系数，即脉冲幅度修正因子

$$A = \frac{1}{|1 - \Gamma_{gc} \Gamma_s|^2};$$

M ——失配因子。 $M = |1 - \Gamma_{gc} \Gamma_u|^2$ ，其中 Γ_{gc} 为等效信号源反射系数， Γ_u 为被校脉冲功率计的反射系数。

为了分析方便，将 M （失配因子）项作为独立变量处理。因 (B1) 式中的各输入量 P_{bu} 、 P_{bs} 、 K_s 、 A 、 M 是非相关量，根据不确定度传播律， K_u 测量的相对合成不确定度 $u(K_u)$ 可表示为：

$$u(K_u) = \sqrt{[u(K_s)]^2 + [u(P_{bs})]^2 + [u(P_{bu})]^2 + [u(A)]^2 + [u(M)]^2 + [u(D)]^2} \quad (B2)$$

B1.2 不确定度来源及其评定

B1.2.1 标准功率座校准因子 K_s 引入的测量相对标准不确定度 $u(K_s)$

标准功率座的校准系数可直接溯源到小功率标准，其扩展不确定度 $U(K_s) = 1.0\% \sim 1.5\%$ 。由此引入的不确定度分量按 B 类进行评定，其包含因子一般情况下取 $k = 2$ 。因此， K_s 测量相对标准不确定度 $u(K_s)$ 为：

$$u(K_s) = \frac{U(K_s)}{2} = 0.5\% \sim 0.75\% \quad (B3)$$

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

B1.2.2 标准功率座直流替代功率 P_{bs} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{bs})$

标准功率座的直流替代功率 P_{bs} 是由标准功率计 432C 指示的，其技术指标为：功率测量准确度 $\pm 0.5\%$ 。因此， P_{bs} 测量相对扩展不确定度为 $U(P_{bs}) = 0.5\%$ 。由此引入的不确定度分量按 B 类进行评定， P_{bs} 的测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，

其相对标准不确定度 $u(P_{\text{bs}})$ 为:

$$u(P_{\text{bs}}) = \frac{U(P_{\text{bs}})}{\sqrt{3}} = 0.29\% \quad (\text{B4})$$

技术说明书给出的指标可信度为 90%，自由度 $\nu_2 = \nu(P_{\text{bs}}) = 50$ 。

B1.2.3 被校脉冲功率计直流替代功率 P_{bu} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{\text{bu}})$

由技术说明书得知，被校脉冲功率计的直流替代功率测量准确度为 $\pm 0.5\%$ 。因此， P_{bu} 测量相对扩展不确定度为 $U(P_{\text{bu}}) = 0.5\%$ 。由此引入的不确定度分量按 B 类进行评定， P_{bu} 的测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，其相对标准不确定度 $u(P_{\text{bu}})$ 为:

$$u(P_{\text{bu}}) = \frac{U(P_{\text{bu}})}{\sqrt{3}} = 0.29\% \quad (\text{B5})$$

技术说明书给出的指标可信度为 90%，自由度 $\nu_3 = \nu(P_{\text{bu}}) = 50$ 。

B1.2.4 脉冲调制信号和连续波信号幅度比较不准引入的相对标准不确定度分量 $u(A)$

脉冲调制信号和连续波信号幅度比较不准引入的不确定度分量按 B 类进行评定。两路信号幅度基本相同，无线性和频响问题，因此两路信号的一致性可以到达 0.5%。假定测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，其相对标准不确定度 $u(A)$ 为:

$$u(A) = \frac{U(A)}{\sqrt{3}} = 0.29\% \quad (\text{B6})$$

技术说明书给出的指标可信度为 90%，自由度 $\nu_4 = \nu(A) = 50$ 。

B1.2.5 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 $U(M) = 2|\Gamma_{\text{a}}\Gamma_{\text{u}}|$ ，按 B 类评定， M 的可能值服从反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ 。测量得出的等效信号源反射系数为 0.05，被校脉冲功率计的反射系数为 0.05~0.16，其相对标准不确定度 $u(M)$ 为:

$$u(M) = \frac{U(M)}{\sqrt{2}} = 0.35\% \sim 0.92\% \quad (\text{B7})$$

技术说明书给出的技术指标可信度为 90%，自由度 $\nu_5 = \nu(M) = 50$ 。

B1.2.6 接头连接重复性等随机因素引入的测量相对标准不确定度 $u(D)$

接头连接重复性引入的标准不确定度分量进行 A 类评定。在测量 1GHz、8GHz、18GHz 分别进行重复性实验（测量次数 ≥ 6 ），结果见下表。

$$u(D) = s_n(x) = \frac{S_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (\text{B8})$$

表 B1 重复性测试数据 (%)

频率/GHz \ 第 n 次	1	10	18
1	100.1	95.18	92.91
2	99.86	95.06	92.84

表 B1 (续)

频率/GHz	1	10	18
第 n 次			
3	99.57	94.77	92.56
4	99.57	94.67	92.49
5	99.76	94.96	92.82
6	99.96	94.96	92.96
平均值	99.80	94.93	92.76
$S_n(x)$	0.2129	0.1867	0.1925
$s_n(x)$	0.0869	0.0762	0.0786

接头连接重复性等随机因素引入的测量相对不确定度 $u(D) < 0.001$ 。自由度 $\nu_6 = \nu(D) = 6 - 1 = 5$ 。

B1.2.7 合成标准不确定度

表 B2 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	灵敏系数	自由度
$u(K_s)$	标准功率座校准因子	A类	正态	2	0.005~0.0075	1	∞
$u(P_{bs})$	标准功率座直流替代功率	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029	-1	50
$u(P_{bu})$	被检脉冲功率计直流替代功率	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029	1	50
$u(A)$	脉冲与连续波一致性	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029	1	50
$u(M)$	失配	B类	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0035~0.0092	1	50
$u(D)$	接头连接重复性	A类			0.001	1	5

各不确定度分量不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u(K_v) = \sqrt{[u(K_s)]^2 + [u(P_{bs})]^2 + [u(P_{bu})]^2 + [u(A)]^2 + [u(M)]^2 + [u(D)]^2} \\ = 0.80\% \sim 1.29\% \quad (\text{B9})$$

有效自由度:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{[u(K_v)]^4}{\frac{[u(K_s)]^4}{\nu_1} + \frac{[u(P_{bs})]^4}{\nu_2} + \frac{[u(P_{bu})]^4}{\nu_3} + \frac{[u(A)]^4}{\nu_4} + \frac{[u(M)]^4}{\nu_5} + \frac{[u(D)]^4}{\nu_6}} \\ = 194 \sim 550 \quad (\text{B10})$$

B1.2.8 扩展不确定度

当取置信概率为 95% 时, 有效自由度在 194~550 之间的, k 值取 $k=2$, 则校准因

子的扩展不确定度为:

$$U(K_0) = k \cdot u(K_0) = 1.6\% \sim 2.6\% \quad (\text{B11})$$

B2 脉冲功率传感器 Γ 的测量不确定度分析

B2.1 测量方法及数学模型

用网络分析仪测量被测件的反射系数, 通过网络分析仪输出装置给出测量结果 A , 则实际测量结果 y 的表达式为:

$$y = A + \Delta A \quad (\text{B12})$$

式中: ΔA ——修正值, 在该项测试中 $\Delta A = 0$ 。

反射系数的误差分析数学模型为:

$$\Delta \Gamma = \Gamma_x - \Gamma_0$$

式中: Γ_x ——网络分析仪的反射系数读数值;

Γ_0 ——被测件的反射系数标准值。

灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial \Gamma_x} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial \Gamma_0} = -1$$

标准不确定度:

$u_1 = |c_1| u(\Gamma_x) = u(\Gamma_x)$, 即网络分析仪对测量不确定度的贡献;

$u_2 = |c_2| u(\Gamma_0) = u(\Gamma_0)$, 即被测件对测量不确定度的贡献。

B2.2 脉冲功率传感器 Γ 的测量不确定度的来源

网络分析仪剩余源匹配引入的测量不确定度 $u_{11}(\Gamma_x)$;

网络分析仪的校准后的反射频响引入的测量不确定度 $u_{12}(\Gamma_x)$;

网络分析仪剩余方向性引入的测量不确定度 $u_{13}(\Gamma_x)$;

对网络分析仪进行校准所用的校准件误差引入的测量不确定度 $u_{14}(\Gamma_x)$;

被测器件的连接重复性引入的测量不确定度 $u_2(\Gamma_0)$ 。

B2.3 脉冲功率传感器 Γ 的标准不确定度评定

B2.3.1 网络分析仪引入的标准不确定度 u_1

B2.3.1.1 $u_{11}(\Gamma_x)$ 的评定

频率为 50MHz 时:

网络分析仪的源端 Γ 为 0.00316, 由此引入的不确定度 B 类评定, 取 $k = \sqrt{2}$ (反正弦分布), 则:

$$u_{11}(\Gamma_x) = \frac{0.00316}{1.414} = 0.002$$

自由度: $\nu_{11} \rightarrow \infty$

频率为 18GHz 时:

网络分析仪的源端 Γ 为 0.00562, 由此引入的不确定度 B 类评定, 取 $k = \sqrt{2}$ (反正

弦分布), 则:

$$u_{11}(\Gamma_x) = \frac{0.00562}{1.414} = 0.004$$

自由度: $\nu_{11} \rightarrow \infty$

B2.3.1.2 $u_{12}(\Gamma_x)$ 的评定

网络分析仪校准后的反射频响是由网络分析仪引起的, 对网络分析仪进行反射校准后, 接上校准过的短路器, 其反射系数模值与 1 的差为反射频响所引入的误差, 频率的变化对它的影响不大, 其最大值为 0.004, 由此引入的不确定度 B 类评定, 取 $k = \sqrt{3}$ (均匀分布), 则:

$$u_{12}(\Gamma_x) = \frac{0.002}{1.732} = 0.0012$$

自由度: $\nu_{12} \rightarrow \infty$

B2.3.1.3 $u_{13}(\Gamma_x)$ 的评定

频率为 50MHz 时, 网络分析仪的方向性为 -50dB, 用反射系数表示为 0.00316; 频率为 18GHz 时, 网络分析仪的方向性为 -45dB, 用反射系数表示为 0.00562, 由此引入的不确定度 B 类评定, 取 $k = \sqrt{3}$ (均匀分布), 则:

频率为 50MHz 时:

$$u_{13}(\Gamma_x) = \frac{0.00158}{1.732} = 0.0009$$

自由度: $\nu_{13} \rightarrow \infty$

频率为 18GHz 时:

$$u_{13}(\Gamma_x) = \frac{0.00281}{1.732} = 0.0016$$

自由度: $\nu_{13} \rightarrow \infty$

B2.3.1.4 $u_{14}(\Gamma_x)$ 的评定

对网络分析仪进行反射校准后, 接上校准过的匹配负载, 频率为 50MHz 时, 回波损耗最差的点为 -50dB, 用反射系数表示为 0.00316; 频率为 18GHz 时, 回波损耗最差的点为 -42dB, 用反射系数表示为 0.00794, 由此引入的不确定度 B 类评定, 取 $k = \sqrt{2}$ (反正弦分布), 则:

频率为 50MHz 时:

$$u_{14}(\Gamma_x) = \frac{0.00316}{1.414} = 0.0022$$

自由度: $\nu_{14} \rightarrow \infty$

频率为 18GHz 时:

$$u_{14}(\Gamma_x) = \frac{0.00794}{1.414} = 0.0054$$

自由度: $\nu_{14} \rightarrow \infty$

B2.3.1.5 计算 u_1

频率为 50MHz 时:

$$\begin{aligned} u_1 &= u(\Gamma_x) = \sqrt{u_{11}^2(\Gamma_x) + u_{12}^2(\Gamma_x) + u_{13}^2(\Gamma_x) + u_{14}^2(\Gamma_x)} \\ &= \sqrt{(0.002)^2 + (0.0012)^2 + (0.0009)^2 + (0.0022)^2} \\ &= 0.003 \end{aligned}$$

自由度:

$$\nu_1 = \frac{u^4(\Gamma_x)}{\frac{u_{11}^4}{\nu_{11}} + \frac{u_{12}^4}{\nu_{12}}} \rightarrow \infty$$

 $\nu_1 \rightarrow \infty$

频率为 18GHz 时:

$$\begin{aligned} u_1 &= u(\Gamma_x) = \sqrt{u_{11}^2(\Gamma_x) + u_{12}^2(\Gamma_x) + u_{13}^2(\Gamma_x) + u_{14}^2(\Gamma_x)} \\ &= \sqrt{(0.004)^2 + (0.0012)^2 + (0.0015)^2 + (0.0054)^2} \\ &= 0.007 \end{aligned}$$

自由度:

$$\nu_1 = \frac{u^4(\Gamma_x)}{\frac{u_{11}^4}{\nu_{11}} + \frac{u_{12}^4}{\nu_{12}}} \rightarrow \infty$$

 $\nu_1 \rightarrow \infty$ B2.3.2 被测器件的连接重复性引入的标准不确定度 u_2

$u_2(\Gamma_0)$ 的评定被测器件的连接重复性引入的不确定度 A 类评定, 重复取十次, 得到的结果列入表 B3。

表 B3

序号	Γ_{0i}	$\Gamma_{0i} - \bar{\Gamma}_0 = O_i$	O_i^2
1	0.04762	-0.00002	0.0000000004
2	0.04765	0.00001	0.0000000001
3	0.04770	0.00006	0.0000000036
4	0.04754	-0.00010	0.0000000100
5	0.04765	0.00001	0.0000000001
6	0.04757	-0.00007	0.0000000049
7	0.04773	0.00009	0.0000000081
8	0.04775	0.00011	0.0000000121
9	0.04758	-0.00006	0.0000000036
10	0.04764	0.00000	0.0000000000
$\bar{\Gamma}_x$		0.04764	
$\sum O_i^2$		0.0000000429	

由重复性的测量值 A 类评定接头连接重复性引入的不确定度, 计算得:

$$\begin{aligned} u_2(\Gamma_0) &= \sqrt{\sum O_i^2 / (n - 1)} \\ &= \sqrt{0.0000000429 / (10 - 1)} \\ &= 0.00006 \end{aligned}$$

自由度: $\nu_2 = 10 - 1 = 9$

B2.3.3 网络分析仪测量反射系数误差的不确定度分量一览表
频率为 50MHz 时:

表 B4

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度	灵敏系数	自由度
$u_{11}(\Gamma_x)$	源端反射	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.002	1	∞
$u_{12}(\Gamma_x)$	反射频响	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0012	1	∞
$u_{13}(\Gamma_x)$	方向性	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0009	1	∞
$u_{14}(\Gamma_x)$	剩余失配	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0022	1	∞
$u_2(\Gamma_0)$	被测件	A	正态		0.00006	-1	9

频率为 18GHz 时:

表 B5

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度	灵敏系数	自由度
$u_{11}(\Gamma_x)$	源端反射	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0040	1	∞
$u_{12}(\Gamma_x)$	反射频响	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0028	1	∞
$u_{13}(\Gamma_x)$	方向性	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0040	1	∞
$u_{14}(\Gamma_x)$	剩余失配	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0054	1	∞
$u_2(\Gamma_0)$	被测件	A	正态		0.00006	-1	9

B2.3.4 脉冲功率敏感器反射系数的合成标准不确定度

$u(\Gamma_x)$ 和 $u(\Gamma_0)$ 独立不相关, 则合成标准不确定度为

频率为 50MHz 时:

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \\ &= \sqrt{(0.003)^2 + (0.00006)^2} \\ &= 0.003 \end{aligned}$$

有效自由度:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2}} \rightarrow \infty$$

频率为 18GHz 时:

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \\ &= \sqrt{(0.007)^2 + (0.00006)^2} \\ &= 0.007 \end{aligned}$$

有效自由度:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2}} \rightarrow \infty$$

B2.3.5 脉冲功率敏感器反射系数的扩展不确定度

由 $\nu \rightarrow \infty$, 在 $p = 95\%$ 情况下, 查 t 分布临界值, 得 $t_{0.95} = 1.96$, 扩展不确定度为:

频率为 50MHz 时:

$$U_p(y) = t_p u_c(y) = 1.96 \times 0.007 = 0.014$$

频率为 18GHz 时:

$$U_p(y) = t_p u_c(y) = 1.96 \times 0.007 = 0.014$$

B2.3.6 反射系数的测量结果报告

经 10 次重复测量取均值: $\bar{\Gamma}_x = 0.048$

在 $k_p = 1.96$, $p = 95\%$ 时, 测量结果为:

频率为 50MHz 时:

$$U_p(y) = 0.006$$

反射系数测量结果: $y = 0.048 \pm 0.006$ 。

频率为 18GHz 时:

$$U_p(y) = 0.014$$

反射系数测量结果: $y = 0.048 \pm 0.014$ 。

B3 脉冲功率计功率敏感器功率线性度的测量不确定度分析

B3.1 标准功率座直流替代功率 P_{bs} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{\text{bs}})$

标准功率座的直流替代功率 P_{bs} 是由标准功率计 432C 指示的, 其技术指标为: 功率测量准确度 $\pm 0.5\%$ 。因此, P_{bs} 测量相对扩展不确定度为 $U(P_{\text{bs}}) = 0.5\%$ 。由此引入的不确定度分量按 B 类进行评定, P_{bs} 的测量结果服从均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其相对标准不确定度 $u(P_{\text{bs}})$ 为:

$$u(P_{\text{bs}}) = \frac{U(P_{\text{bs}})}{\sqrt{3}} = 0.29\% \quad (\text{B13})$$

技术说明书给出的技术指标可信度为 90%, 自由度 $\nu_1 = 50$ 。

B3.2 被校脉冲功率计直流替代功率 P_{bu} 引入的测量相对标准不确定度 $u(P_{\text{bu}})$

由技术说明书得知, 被校脉冲功率计的直流替代功率测量准确度为 $\pm 0.5\%$ 。因此, P_{bu} 测量相对扩展不确定度为 $U(P_{\text{bu}}) = 0.5\%$ 。由此引入的不确定度分量按 B 类进行

评定, P_{bu} 的测量结果服从均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其相对标准不确定度 $u(P_{bu})$ 为:

$$u(P_{bu}) = \frac{U(P_{bu})}{\sqrt{3}} = 0.29\% \quad (\text{B14})$$

技术说明书给出的技术指标可信度为 90%, 自由度 $\nu_2 = 50$ 。

B3.3 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 $U(M) = 2|\Gamma_{gs}\Gamma_u|$, 按 B 类评定, M 的可能值服从反正弦分布, 包含因子 $k = \sqrt{2}$ 。测量得出的等效信号源反射系数为 0.05, 被校脉冲功率计的反射系数为 0.05~0.09, 其相对标准不确定度 $u(M)$ 为:

$$u(M) = \frac{U(M)}{\sqrt{2}} = 0.35\% \sim 0.63\% \quad (\text{B15})$$

技术说明书给出的技术指标可信度为 90%, 自由度 $\nu_3 = 50$ 。

B3.4 接头连接重复性等随机因素引入的测量相对标准不确定度 $u(D)$

接头连接重复性引入的标准不确定度分量进行 A 类评定。接头连接重复性等随机因素引入的测量相对不确定度 $u(D) < 0.001$, 自由度 $\nu_4 = \nu(D) = 6 - 1 = 5$ 。

B3.5 合成标准不确定度

各不确定度分量不相关, 则合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned} u(K_u) &= \sqrt{[u(P_{gs})]^2 + [u(P_{bu})]^2 + [u(M)]^2 + [u(D)]^2} \\ &= 0.55\% \sim 0.75\% \end{aligned} \quad (\text{B16})$$

有效自由度:

$$\begin{aligned} \nu_{\text{eff}} &= \frac{[u(K_u)]^4}{\frac{[u(P_{gs})]^4}{\nu_1} + \frac{[u(P_{bu})]^4}{\nu_2} + \frac{[u(M)]^4}{\nu_3} + \frac{[u(D)]^4}{\nu_4}} \\ &= 92 \sim 504 \end{aligned} \quad (\text{B17})$$

B3.6 扩展不确定度

当取置信概率为 95% 时, 有效自由度在 92~504 之间的, k 值取 $k = 2$, 则功率敏感器功率线性度的扩展不确定度为:

$$\begin{aligned} U(K_u) &= k \cdot u(K_u) \\ &= 1.1\% \sim 1.5\% \end{aligned}$$

中华人民共和国
国家计量检定规程

脉冲功率计

JJG 1024—2007

国家质量监督检验检疫总局发布

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

880 mm×1230 mm 16开本 印张1.5 字数27千字

2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷

印数1—2 000

统一书号 155026—2249

四川质安高压工程技术研究中心