

宽带同轴功率国家基准

刘欣萌^{1,2}, 彭喜元¹, 陈成仁²

(1. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要: 我国宽带同轴功率基准采用自动反馈单负载微量热计方案, 其中的工作标准是温度补偿式同轴热敏电阻功率座。借助量热技术准确测量在热敏电阻座中的射频功率损耗, 从而确定其有效效率。对在功率座壁上的射频功率损耗测量没有采用传统的热电堆方式, 而是采用热敏电阻功率座自身的温度补偿热敏电阻检测。这一方案具有响应时间快、灵敏度高和量热计结构简单等优点。本文详细介绍了我国宽带同轴功率国家基准的实现方法和不确定度评定, 并列举国际比对数据验证了基准的准确性。

关键词: 计量学; 功率测量; 功率标准; 微量热计

中图分类号: TM 933.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2560-04

National Coaxial Primary Standard for Broadband Power

LIU Xinmeng^{1,2}, PENG Xi-yuan¹, CHEN Cheng-ren²

(1. Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: A single load microcalorimeter with auto-feedback is constructed as the national coaxial primary standard for broadband power of China. A temperature compensated coaxial themistor mount is used as working standard inside. The effective efficiency of the working standard is calibrated from the RF power loss in the mount which is measured by a calorimetric method. The part of RF power loss in the mount wall is measured with the temperature compensation themistor in the mount instead of traditional thermal coupler method. The new method has advantages of short response time, high sensitivity and simple structure. Implement method and uncertainty analysis of the power standard is presented in detail. International comparison data and figures are also included for confirmation of the power standard accuracy.

Key words: metrology; power measurement; power standard; micro calorimeter

1 引言

近年来为满足电子计量测试的需要, 各国纷纷建立了自己的宽带同轴功率基准^[1-3], 大部分采用的是微量热计形式^[4,5], 微量热计的工作标准是直流替代型测辐射热式功率检波器, 这些检波器通称为测辐射热器座。我国新建立的宽带同轴功率基准也是采用微量热计形式, 包括 N 型同轴微量热计和相应的工作标准, 频率范围 0.01 GHz~18 GHz。宽带同轴功率基准采用自动反馈单负载微量热计方案, 工作标准是温度补偿式同轴热敏电阻座, 但对热敏电阻座壁上的射频功率损耗没有采用传统的热电堆检测^[1-3], 而是采用热敏电阻座自身的温度补偿热敏电阻作为检测单元, 控制热敏电阻座壁上的直流辅助加热功率, 使座壁的温度保持不变。这种方案具有响应时间快和量热计结构简单等优点^[6], 但热敏电阻座接头部分的损耗很难准确测量, 我国的宽带同轴功率基准采用特殊的连续加退射频功率的方法较好的解决了这一难题。

2 系统描述

微量热计对其内部工作标准所处位置的温度稳定性要求很高, 因此采用了双层控温筒的设计, 并在两个控温筒间加入隔热层, 结构示意图如图 1 所示, 在外罩内侧还敷设了一层泡沫塑料作为隔热层。为尽量减小通过射频输入传输线进行的热量交换, 输入接头与热敏电阻功率座之间的传输线采用的是由两个薄壁不锈钢构成的隔热传输线。控温筒的控温方式采用双金属丝配合四线电阻平衡电桥的设计, 加热与温度传感功能合二为一, 在系统稳定后, 热敏电阻功率座处的温度变化小于 0.001℃/小时。

整个基准的示意图如图 2 所示, 为了减少测量时间, 本基准采用了自动反馈的等温测量方案。其中工作标准是一个商品热敏电阻功率座, 有用于测量功率的热敏电阻 R_0 和用于温度补偿的热敏电阻 R_T 。 R_0 被直流平衡电桥偏置在 200Ω。在射频功率输入后, 由于射频功率的热替代作用, 加在 R_0 上的

直流功率会减小, 减小的这部分直流功率称为直流替代功率 P_{SLB} . R_T 与缠绕在功率座壁上的加热电阻 R_H 以及自动反馈放大器组成恒温系统, 用于保持功率座壁的温度恒定. R_T 被用作检测功率座壁的温度变化的传感器, 其工作点设置在 R_T 的线性工作区. 在射频功率输入后, 由于损耗在功率座壁上射频功率的热作用, 加在 R_H 上的直流加热功率会减小, 减小的这部分直流功率为 P_H .

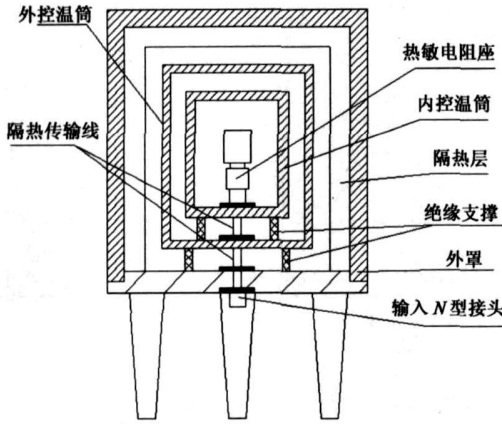


图 1 微量热计结构示意图

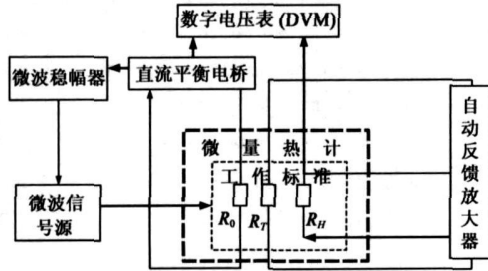


图 2 功率基准系统示意图

热敏电阻功率座的有效效率 η_e 定义为: 热敏电阻元件上的直流替代功率 P_{SLB} 与热敏电阻功率座吸收的射频功率 P_{NET} 之比:

$$\eta_e = \frac{P_{SLB}}{P_{NET}} \quad (1)$$

理想情况下, 功率座吸收的射频功率完全被反馈系统所补偿, 则有 $P_{NET} = P_{SLB} + P_H$,

$$\eta_e = \frac{P_{SLB}}{P_H + P_{SLB}} \quad (2)$$

3 工作原理

由于商品热敏电阻功率座结构复杂, 基准实际的工作原理要复杂的多. 用作工作标准的商品热敏电阻功率座的结构示意图如图 3 所示, 其中在输入端接头部分有较大的热容, 在接头和热敏电阻间还有一段有大热阻的隔热结构, 用于测量功率的热敏电阻 R_0 和用于温度补偿的热敏电阻 R_T 位于隔热结构之后. R_0 紧靠着隔热结构, 直接吸收入射的射频功率, 其所在的吸收段由纯铜镀金制成, 与均温块热接触良好, 可以看作均温块的一部分. R_T 被放置在紧靠吸收段的纯铜均温块中, 用来测量均温块的温度变化. 在均温块表面均匀缠绕了直

流加热电阻 R_H .

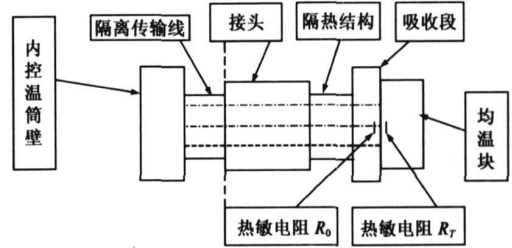


图 3 工作标准结构示意图

为方便表述, 将射频功率输入时在隔热结构和接头部分损耗的功率被称为 P_{W0} , 而将在吸收段损耗的功率被称为 P_{W1} , 理论分析和实验结果均表明 R_T 与 R_H 以及自动反馈放大器组成的恒温系统对它们的响应是不同的.

图 3 中接头左侧的内控温筒壁热容很大, 且被精密控温, 可以认为温度始终恒定; 而均温块的温度也在 R_T 与 R_H 以及自动反馈放大器组成的反馈系统作用下保持温度恒定. 因为内控温筒与接头间的隔热传输线与接头右侧的隔热结构有相同的导热系数, 根据传热学原理^[8]可以证明, 在隔热结构和接头部分的射频损耗被等分地传递到内控温筒和均温块上. 又由于隔热结构和接头部分的热容和热阻很大, 导致恒温系统需要很长时间才能完成对 P_{W0} 的补偿, 通过直流加热模拟测得稳定时间约为 45 分钟.

由于吸收段和均温块连接紧密, 热阻很小, 远小于其与隔热结构的热阻, 可以认为 P_{W1} 全部传递到均温块, 而且恒温系统对 P_{W1} 的稳定补偿时间很短, 实验结果表明小于 2 分钟.

由于恒温系统对 P_{W0} 和 P_{W1} 的响应不同, 为了分别求出 P_{W0} 和 P_{W1} 的值, 采用了特殊的测量方法: 连续加入和退掉射频功率的方法. 图 4 是加退射频功率的示意曲线, 每次加入和退掉射频功率的时间都是 2 分钟. 图 5 是加热电阻 R_H 上的直流加热补偿电压 U_H 相应的变换曲线, 由图 5 可见, 2 分钟内 U_H 已经完成对 P_{W1} 的补偿, 但由于 P_{W0} 的作用, U_H 仍在缓慢下降; 在连续加退 50 分钟后 U_H 已经完成对 P_{W0} 的补偿, 随后的变化仅是对 P_{W1} 的补偿.

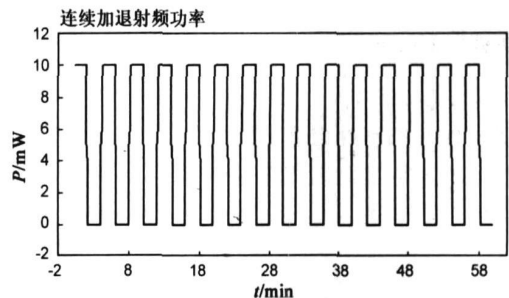


图 4 连续加退 10mW 射频功率的示意曲线

由传热学原理^[8]可以证明, 这样周期性的加退射频功率时, 其等效加热功率约为所加射频功率的一半. 据此可以计算 P_{W0} 和 P_{W1} 的值,

$$P_{W0} = \frac{U_{Hs}^2 - U_{He}^2}{4R_H} \quad (3)$$

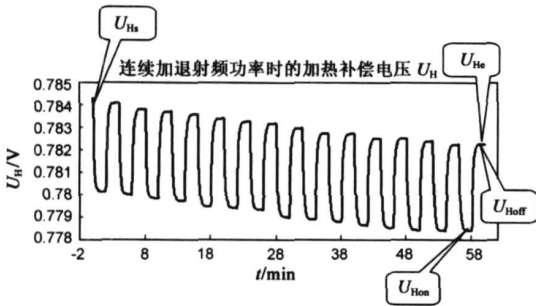


图 5 在 50MHz, 10mW 射频功率下的直流加热补偿电压输出曲线

$$P_{WI} = \frac{U_{Hoff}^2 - U_{Hon}^2}{R_H} \quad (4)$$

其中: 如图 5 所示, U_{Hs} 是连续加退射频功率过程开始前的 U_H , U_{He} 是连续加退射频功率过程结束时的 U_H , U_{Hoff} 是连续加退射频功率过程的最后一个加退周期的退掉射频功率时段末期 U_H 值, U_{Hon} 是连续加退射频功率过程的最后一个加退周期的加入射频功率时段末期 U_H 值。

热敏电阻功率座吸收的射频功率可表示为 $P_{NET} = P_{SUB} + P_{WO} + P_{WI}$, 故式(1)可改写为

$$\eta_e = \frac{P_{SUB}}{P_{SUB} + P_{WO} + P_{WI}} \quad (5)$$

式(5)就是工作标准有效效率的实际计算公式, 图 6 是根据式(5)计算得到的我国宽带同轴功率国家基准的工作标准的有效效率曲线。

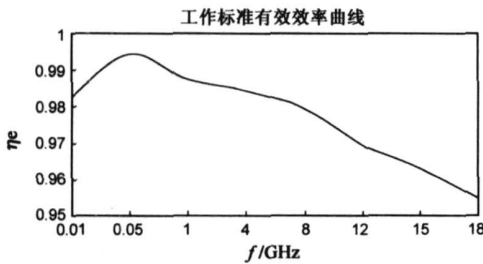


图 6 热敏电阻工作标准有效效率曲线

4 测量不确定度

由于 P_{SUB} 、 P_{WO} 和 P_{WI} 相互独立, 根据不确定度传播律, η_e 的 B 类相对标准不确定度 $u_{rB}(\eta_e)$ 如式(6)所示, 其中 $u_r(P_{SUB})$ 是 P_{SUB} 的相对标准测量不确定度, $u_r(P_{WO})$ 是 P_{WO} 的相对标准测量不确定度, $u_r(P_{WI})$ 是 P_{WI} 的相对标准测量不确定度。

$$\begin{aligned} u_{rB}^2(\eta_e) &= \left(\frac{P_{WO} + P_{WI}}{P_{SUB} + P_{WO} + P_{WI}} \right)^2 u_r^2(P_{SUB}) \\ &+ \left(\frac{P_{WO}}{P_{SUB} + P_{WO} + P_{WI}} \right)^2 u_r^2(P_{WO}) \\ &+ \left(\frac{P_{WI}}{P_{SUB} + P_{WO} + P_{WI}} \right)^2 u_r^2(P_{WI}) \\ &= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \end{aligned} \quad (6)$$

η_e 的相对合成标准不确定度 $u_{rC}(\eta_e)$ 表达式为,

$$u_{rC}(\eta_e) = \sqrt{u_{rB}^2(\eta_e) + u_{rA}^2(\eta_e)} \quad (7)$$

式中 $u_{rA}(\eta_e)$ 是 η_e 的 A 类相对标准测量不确定度。表 1 是根据上式计算的热敏电阻功率座在 18GHz 的有效效率测量不确定度数据, u_1 、 u_2 和 u_3 分别表示与 P_{SUB} 、 P_{WO} 和 P_{WI} 有关的测量不确定度分量。在 10MHz~ 18GHz 频率范围内, 最终计算得到的工作标准有效效率相对合成扩展不确定度 $U_{rC} \leq 0.5\%$, 扩展因子 k 为 2。

表 1 有效效率 η_e 的测量不确定度(18GHz)

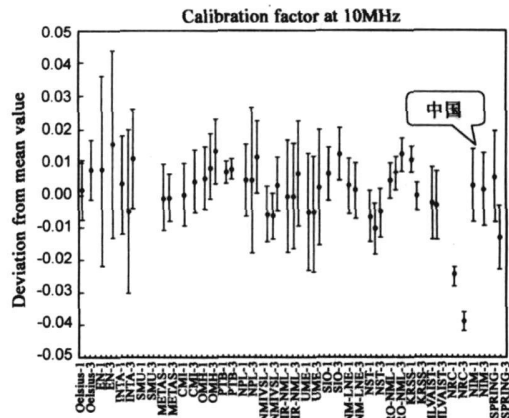
序号	相对标准不确定度		
	不确定度来源	类别	数值(%)
1	P_{SUB} 测量(u_1)	B	0.003
2	P_{WI} 测量(u_2)	B	0.086
3	P_{WO} 测量(u_3)	B	0.112
4	测量值离散 $u_{rA}(\eta_e)$	A	0.057
5	相对合成标准不确定度		0.152
6	相对合成扩展不确定度		0.312

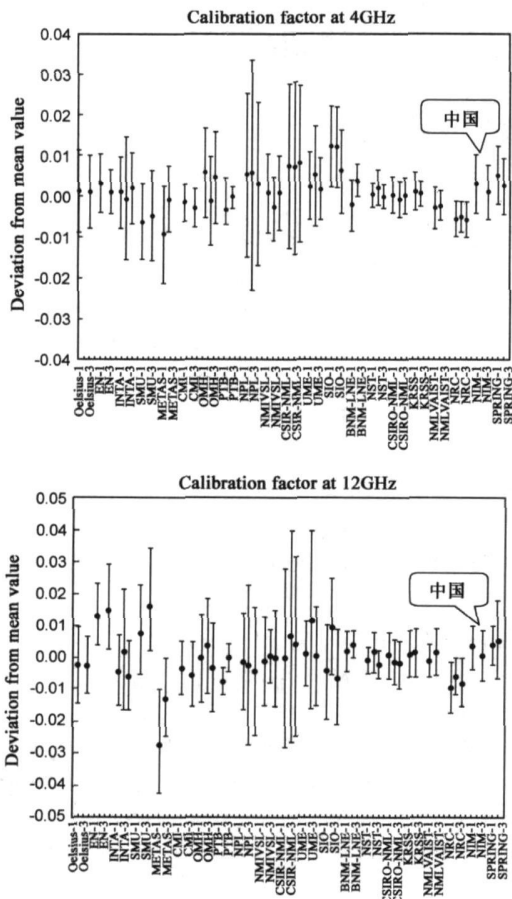
5 基准的验证

验证国家基准的最有效方法是参加国际比对, 通过与其他国家的基准测量结果进行比较, 可以检验我国基准与国际参考值的一致性, 以及不确定度评定的可靠性。为此本基准参加了国际计量局组织的 N 型同轴功率比对^[7]。这次比对由荷兰计量院主持, 参加的国家包括英、法、德、意等欧洲国家和美、加、中、韩、日、澳等亚太国家, 还包括南非, 共计 24 个国家。比对标准是 2 个 N 型同轴热敏电阻功率座, 要求各国测量其在 10MHz、50MHz、1GHz、4GHz、8GHz、12GHz、15GHz 和 18GHz 频率上的校准因子 K_c 。 K_c 与有效效率 η_e 的关系式如下,

$$K_c = (1 - |\Gamma|^2) \times \eta_e \quad (8)$$

下面是其中 3 个频率点的比对结果, 其中纵坐标是各国的校准因子测量结果与国际参考值的偏差, 该国际参考值是根据各国测量结果求出的, 横坐标是各国参比实验室的简称, 我国的简称是 NIM。NIM 和 NIM3 对应两个比对标准的测量结果, 误差棒是各国实验室给出的合成扩展测量不确定度, 扩展因子 k 为 2。





比对结果表明我国宽带同轴功率基准数据很接近国际平均值, 不确定度评定合理, 没有出现过大或过小的情况, 说明本基准是准确可靠的, 不确定度评定并没有遗漏主要的误差来源。

6 结论

宽带同轴功率基准是我国自行研制的国家射频和微波功率最高标准, 该基准通过对微量热计和工作标准的热分析, 大胆采用了不同于常规微量热计的自动反馈补偿设计, 并使用连续加退射频功率的方法在测量有效效率的同时直接测量了工作标准输入部分的功率损耗, 免去了单独测量这部分损耗的复杂结构。这一方案具有响应时间快、灵敏度高和量热计结构简单等优点, 并通过国际比对得到了验证。这一基准的建立满足了国内对(0.01GHz~18GHz)频段功率量值溯源的迫切需求。

参考文献:

- [1] U Stumper. New developments of RF and microwave power standards[J]. 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements[C]. Washington, D. C, USA: CPEM' 98 Digest, 1998. 296- 297.
- [2] Fred R Clague. A Calibration Service for Coaxial Reference Standards for Microwave Power[R]. Boulder: NIST Technical Note 1374, May 1995.
- [3] J T Ascroft. Developments in coaxial power standards at NPL[J]. IEEE Trans, 1999, IM- 48(2) : 647- 649.
- [4] Nak Sam Chung, Joon Shin, H Bayer, R Honighbaum. Coaxial and waveguide microcalorimeters for RF and microwave power standards[J]. IEEE Trans, 1989, IM-38(2) : 460- 464.
- [5] A Fantom. Radio Frequency and Microwave Power Measurement[M]. London, U. K: Peregrinus, IEEE Press, 1990.
- [6] R F Clark. The microcalorimeter as a national microwave power standard[A]. IEEE Procs[C]. IEEE, 1986, 74(1) : 102- 104.
- [7] Jan P M de Vreede. Final report of the comparison CCEM. RF-K8. CL: Calibration factor of the mistor mounts[J]. Metrologia, 2005, 42(10) : 1088- 1172.
- [8] 杨世铭, 等. 《传热学》第三版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 66- 80.

作者简介:



刘欣萌 男, 1974年3月生于辽宁省鞍山市, 现为哈尔滨工业大学博士研究生, 中国计量科学研究院信息电子所微波参数实验室助理研究员, 主要研究方向是微波阻抗和微波功率的计量测试理论和方法。

E mail: liuxm@nim. ac. cn



彭喜元 男, 1961年生于内蒙古自治区四子王旗, 博士, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授, 博士生导师, 主要研究方向为自动测试技术和智能故障诊断等。

E mail: pxy@hit. edu. cn