

同轴功率微量热计的研制

崔孝海 袁文泽 丁晟 刘潇蒙 刘锦文 赵巍 海兴芳

(中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 同轴功率微量热计是一种具有同轴接口的精密微波测量装置, 其基于量热测量原理可以实现微波功率的高精度、可溯源至 SI 单位的精密测量, 是目前国际上大部分国家计量院建立微波功率基准的装置。功率是微波的关键参数, 其准确测量是微波设备研制和应用的重要基础。我们团队研制的同轴功率微量热计包括同轴 N 型和 2.4mm 两种接口形式, 频率覆盖 DC~50GHz, 其中基于同轴 N 型微量热计已建立国家计量基准。目前已出口多套同轴功率微量热计装置到马来西亚、新加坡、香港等国家和地区计量院。

关键词 微量热计; 微波功率; 同轴功率传感器; 有效效率; 修正因子

中图分类号: TN98 **文献标识码:**

Development of Coaxial Power Microcalorimeter

CUI Xiaohai, YUAN Wenze, DING Sheng, LIU Xiaomeng, LIU Jinwen,

ZHAO Wei, HAI Xingfang

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Coaxial power microcalorimeter is a precision microwave measurement device with a coaxial interface. Based on the principle of calorimetric measurement, it can achieve high-precision and traceable-to-SI-unit measurement of microwave power. It is currently the apparatus used by the metrology institutes of most countries internationally to establish microwave power standards. Power is a key parameter of microwaves, and its accurate measurement is an important basis for the development and application of microwave equipment. Our team has developed two types of coaxial power microcalorimeters, including coaxial N-type and 2.4mm interfaces, covering frequencies from DC to 50GHz. A national power primary standard has been established based on the coaxial N-type microcalorimeter. Currently, several sets of coaxial power microcalorimeters have been exported to metrology institutes in countries and regions such as Malaysia, Singapore, and Hong Kong.

Keywords: Microcalorimeter; Microwave Power; Coaxial Power Sensor; Effective Efficiency; Correction Factor

1 背景介绍

微波技术对于无线通信、航空航天、雷达导航、气象遥感、临床医学等领域有着广泛而深远的影响, 涉及国民经济和人民生活的方方面面。比如在航天领域, 飞船与卫星的控制、重要信息的传递、探测数据的传送都离不开微波技术的应用; 在气象领域, 微波技术的应用为大气探测和气象预报提供有力手段; 在广播电视领域, 信息的快速传播离不开微波技术的发展和运用。

功率参数是衡量微波产品、装备、系统性能的关键指标, 例如在通信领域, 地面通信需要依据准确的功率量值来确定基站、终端设备辐射指标; 卫星通信中有效载荷装备需要

依据精确的功率测量来确定星载系统的关键性能指标。功率参数是微波最基本、最重要的参数之一，其准确测量对微波仪器设备的设计、生产、测试、应用各环节都具有重要作用，是发展尖端科学技术、提高电子产品质量以及确定装备技术指标的基础^[1-3]。除此之外，功率参数也是电场强度等其他多个微波参数的溯源源头，对其进行准确测量具有重要作用。

在微波功率测量领域，同轴功率传感器因其宽带、可靠、易连接等特性成为微波功率测量领域常见的功率传感器，随着微波技术的迅猛发展，特别是无线通信、测试仪器仪表等领域都对同轴功率传感器的计量校准提出了更高的要求。同轴功率微量热计基于量热测量原理可以将微波功率溯源至 SI 单位，具有极高的测量精度和优秀的测量稳定性，是国家功率基准的核心装置。同轴功率微量热计作为微波功率精密测量装置主要应用于微波功率传感器的计量校准及微波功率的精密测量领域。

2 同轴微量热计

2.1 测量原理与系统组成

微量热计直接测量的是同轴功率传感器的有效效率^[4,5]。有效效率的定义为：

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

P_{IND} 定义为功率传感器加入射频信号时的功率计读出功率， P_{NET} 定义为功率传感器实际吸收的功率（也称为净功率）。 η_e 表示了功率传感器读出功率和实际吸收功率的比值。在功率测量过程中，信号源给微量热计加入微波信号，功率计直接显示当前功率传感器的指示值，但是由于功率传感器内部传输线损、传感元件的不一致性、传感器功率反射等原因，传感器测量显示的指示值与实际吸收的微波功率并不完全相等。

根据能量守恒定律，当功率传感器吸收功率后，能量会以热量的形式表现出来，微量热计则是通过测量功率传感器热量的变化来测量功率传感器实际吸收的功率。

同轴功率微量热计测量系统通常由微量热计装置、信号源、功率计、功率传感器、电压表等组成（图 1）。微量热计是基准量热的主要装置（图 2），由铜桶、参考环、隔热传输线、热电堆及防水电缆连接器等部件组成。使用时用桶盖密封，放入恒温水槽中，恒温水槽具有良好的温度稳定性。在测量过程中，信号源，纳伏表和功率计由自动测量软件控制（图 3），自动进行测量、数据分析和不确定度评定。

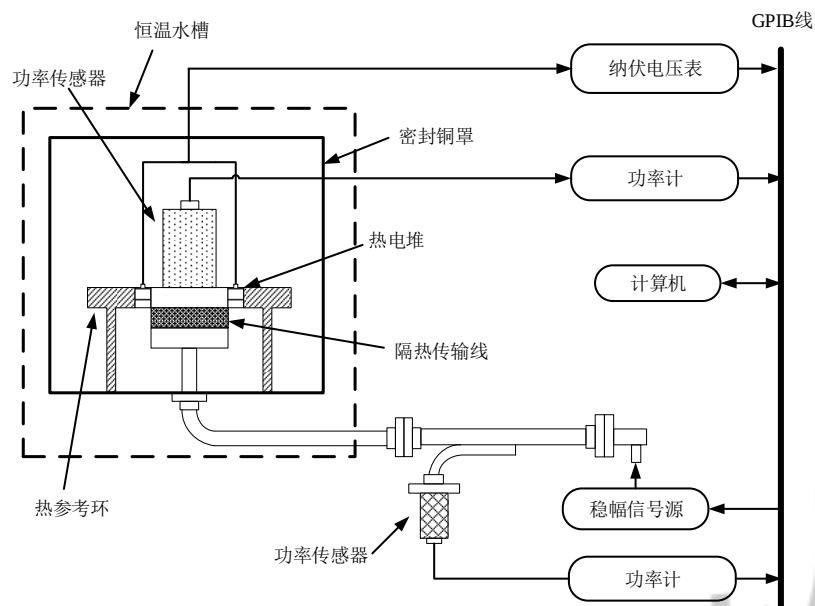


图 1 同轴微量热计测量系统



图 2 同轴微量热计

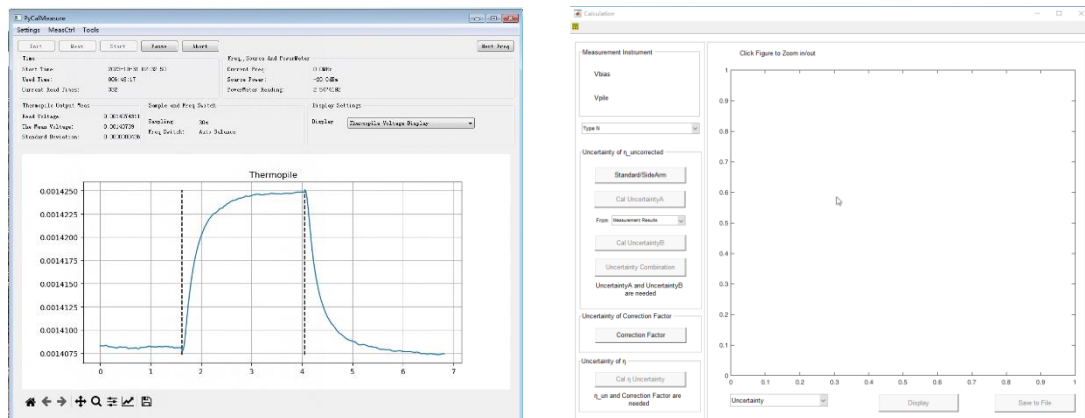


图 3 自动测量和不确定度评定软件

2.2 修正因子定标方法

同轴微量热计中采用隔热传输线来提高功率测量时的灵敏度，但是隔热传输线自身的功率损耗同样也会对温度测量产生影响，同时功率传感器内不同位置的功率损耗和对量热的贡献也都不同，这些因素都会导致测量误差产生，因此需要对这些因素产生的影响进行修正，这就是修正因子。在同轴微量热计测量中通常隔热传输线损耗的影响是最大，对于微量热计传输线的损耗评定测量^[6-8]，一般采用开路器和短路器方式，即在端口制造近似全反射，来单独评价其影响，但在同轴微量热计测量中“开路与短路”方法存在着反射系数测量不准、发热分布不均匀、中心导体温升测量不准等缺点。本案例中采用镜像对称的修正因子定标方法，研制了微量热计对称定标结构（图 4），即用两个完全一样的微量热计镜像对称连接，通过传输损耗实验，准确测量了微量热计中的传输线的损耗贡献。同时本案例在波导功率微量热计的基础上提出波导同轴组合体均值测量方法，经过波导基准定标后的波导功率传感器连接波同转换器，形成同轴接口的传感器组合体。传统的通过波同转换器散射参数测量来得到组合体有效效率的方法因为测量不确定度大无法满足要求，本案例采用组合体均值测量方法，即通过阻抗调配器连接组合体来调整组合体输入端等效源反射系数，通过调配器的相位在 $0\sim 360$ 度变化来得到组合体的功率均值，克服了组合体散射参数测量不准引起的失配影响，从而得到准确的功率值^[9,10]。通过同轴镜像对称的修正因子定标和波导同轴组合体均值测量方法解决了同轴微量热计修正因子的定标难题。



图 4 同轴微量热计镜像对称定标结构

3 案例应用意义

3.1 同轴功率量值传递体系

本案例中同轴微量热计已作为核心装置建立国家同轴功率基准装置，形成的测量能力通过国家计量体系向通信、航天、气象、广播、军事等领域的科研院所、重点企业、计量机构提供量值溯源，保障了功率量值的准确、有效、一致，也以同轴功率基准测量能力为基础，支撑其他微波参数的计量能力的发展。同时形成的测量能力为新加坡、泰国等国家计量院提供量值溯源服务，为一带一路沿线国家的量值准确提供有力保障。

3.2 国际应用

本案例中同轴微量热计装置性能指标先进，在中国、新加坡和香港的同轴功率国际比对中取得功率量值等效一致，测量不确定度水平处于领先水平。新加坡计量院、马来西亚计量院和香港计量院已采购多套同轴微量热计作为功率基准装置，保障了这些国家和地区的功率量值溯源需求。

参考文献

- [1] 崔孝海, 李勇, 张淑溢, 等. 毫米波WR-15(50~75GHz)国家功率的研制[J], 计量学报, 2014, 35(4):378-381
- [2] 袁思昊, 刘欣萌, 黄辉. 110 GHz可溯源的On wafer GaAs基Multi-TRL校准标准件研制 [J] . 计量学报, 2019, 40(5):760-764.
- [3] 张杰, 宋振飞, 李君, 等. 基于里德堡原子的微波功率精密测量 [J] . 计量学报, 2019, 40(5):749-754.
- [4] 李勇, 崔孝海, 孙伟杰.WR-22微波功率基准工作原理及其不确定度[J].计量技术, 2014,4:18-20
- [5] Y. Huang, W. Yuan, X. Cui, Y. S. Meng, and Y. Li, WR-42 Waveguide Microcalorimeter for Thermistor Mount Calibration[C]. CPEM 2018, Paris, France
- [6] X. Cui, T. P. Crowley, Comparison of experimental techniques for evaluating the correction factor of a rectangular waveguide micro-calorimeter[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2011, 60(7):2690–2695
- [7] X. Cui, Y. S. Meng, Y. Li, Y. Zhang, Y. Shan, An improved design and simplified evaluation technique for waveguide micro-calorimeter[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2016, 65(6):1450–1455
- [8] 崔孝海, 李勇, 孙伟杰.毫米波国家功率基准及其国际关键比对[J].空间电子技术, 2013, 4:94-95
- [9] J. Ding, S. Ma, W. Yuan, J. Liu, C. Jia and X. Cui, "A New Method for Measuring Calibration Factors of Microwave Power Transfer Standard," 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Nanjing, China, 2021, pp. 1-3
- [10] 袁文泽. 一种确定组合体校准因子的方法:CN202110447221.3[P]. 2023-10-31.