

微波功率测量的热等效误差

刘欣萌^{1,2}, 彭喜元¹

(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: 本文提出了热敏电阻功率传感器在功率测量时的传热模型, 得出了传感器有效效率和热导、热容的关系表达式. 定义了换热差异给微波功率测量带来的热等效误差. 详细分析了热等效误差的来源, 提出了该误差的表达式, 最后给出了消除该项误差的办法.

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 (2008) 02-0371-05

Thermal Equivalence Error of Microwave Power Measurement

LIU Xinmeng^{1,2}, PENG Xiyuan¹

(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 heat transfer model is given for thermistor mount in power measurement procedure. A relational expression of effective efficiency with thermal capacitance and thermal conductance is derived from the model. A microwave power measurement error, which is from heat exchange difference, is defined as thermal equivalence error. The thermal equivalent error is analyzed in detail and its analytic expression is derived. Methods are suggested to eliminate this error at last.

Key words: metrology; power measurement; power standard; microcalorimeter

1 引言

世界各国的微波功率基准通常采用量热的方法定标. 由于微量热计既有量热计高准确度的特点, 又有热敏电阻式功率计响应时间快, 测量方便等优点, 所以被广泛采用, 如德国 PTB 的功率基准^[1]、美国 NIST 的同轴和波导功率基准^[1, 3]、韩国的波导功率基准^[4]等均采用微量热计.

微量热计用热敏电阻功率座作为量热计负载, 借助于量热计技术, 精确测量热敏电阻功率座的有效效率, 其有效效率可以用下式表示^[5]

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{sub}}}{P_{\text{net}}} \quad (1)$$

其中: P_{sub} 为打开和关闭微波功率输入时热敏电阻上的直流功率差, 称为直流替代功率, 分母 P_{net} 是损耗在功率座中的总的微波功率.

一直以来, 有效效率被看作热敏电阻座自身的固有特性, 与热敏电阻座的使用条件无关. 基于这一特点, 热敏电阻座才被用作工作标准, 在微量热计中测量得到其

有效效率, 再将该值用于微波功率测量. 但实际的测量数据和理论分析均表明有效效率与热敏电阻座自身及其所连接的传输线的换热特性(亦称热传递特性)有关.

本文用热导和热容描述了微量热计定标过程和功率测量过程中的热传递, 提出了有效效率和换热特性的关系表达式, 定义了由此带来的热等效误差, 并根据分析结果给出了消除该项误差的办法.

2 真有效效率

热敏电阻座的效率是描述热敏电阻功率座损耗特性的物理量, 表示式如下^[5]:

$$\eta = \frac{P_{\text{TRF}}}{P_{\text{net}}} \quad (2)$$

其中: P_{TRF} 是热敏电阻吸收的微波功率. 如果不考虑功率座泄漏的微波功率^[1, 3], 那么 $P_{\text{net}} = P_{\text{loss}} + P_{\text{TRF}}$, P_{loss} 代表损耗在功率座内壁上的微波功率.

比较式(1)和(2)可以看出, 效率的定义只与热敏电阻功率座结构有关, 有效效率的定义不只与热敏电阻座的特性有关, 还依赖于直流替代功率.

图 1 给出了某商用热敏电阻功率座在输入 10mW 微波功率后的直流偏置功率变化. 由图可知, 热敏电阻的直流偏置功率从 19.17mW 开始下降, 在 12 分钟时为 19.14mW, 相应的直流替代功率增加了约 29μW; 40 分钟后热敏电阻的直流偏置功率基本不再下降, 约为 19.115mW, 直流替代功率又增加了约 25μW. 若假设热敏电阻座 A 吸收了 10mW 的高频和微波功率, 根据式 (1), 座 A 的有效效率在高频和微波功率输入第 12 分钟和第 40 分钟时, 相对于开始时刻分别增加了 0.29% 和 0.54%.

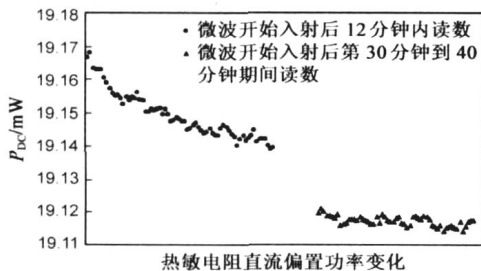


图 1 热敏电阻直流偏置功率随时间的变化

这无疑给功率测量带来了很大的混乱, 因为无法判断何时的有效效率是正确的. 实际上, 重新考察式 (1) 和 (2) 可以发现, 混乱的来源是直流替代功率的定义. 式 (1) 和式 (2) 中的 P_{sub} 应为加入微波功率时热敏电阻上对微波功率的直流替代功率.

为区别于一直采用的式 (1), 本文定义了真有效效率:

$$\eta_{eff} = \frac{P_{RFsub}}{P_{net}} \quad (3)$$

其中 η_{eff} 代表真有效效率, P_{RFsub} 为加入微波功率时热敏电阻上对微波功率的直流替代功率.

因为热敏电阻的替代效率定义为^[5]

$$\eta_{sub} = \frac{P_{RFsub}}{P_{TRF}} \quad (4)$$

其中 η_{sub} 代表替代效率.

这样, 真有效效率和效率的关系为

$$\eta_{eff} = \eta_{sub} \eta_s \quad (5)$$

由于目前使用在热敏电阻座中的热敏电阻均是珠状结构, 直径约为 0.05 毫米, 且表面并没有封装材料, 微波和直流信号在热敏电阻中电流分布不同导致的误差很小, 研究表明这项误差小于 0.01%^[3], 所以可以认为在热敏电阻上直流功率和微波功率是热等效的, 即 $\eta_{sub} = 1$, 所以 $\eta_{eff} = \eta_s$. 为避免混淆, 在后面的分析中, 将用效率代替真有效效率作为评价有效效率的参考.

从热敏电阻座的直流替代原理来看, 由直流平衡电桥偏置着的热敏电阻在微波功率入射后经历了两个过程, 真有效效率和有效效率分别描述了热敏电阻座

在两个过程内的特性:

过程 1: 高频和微波功率进入功率座, 由于热敏电阻的热容极小, 直流平衡电桥的时间常数很小, 象用于美国 NIST 的 N 型同轴热敏电阻功率座对高频和微波功率输入的平衡时间小于 6ms^[3]. 在如此短的时间内其他因素的影响可以忽略不计, 平衡电桥迅速达到重新平衡后, $P_{RFsub} = P_{sub}$, $\eta_{eff} = \eta_{eff} = \eta_s$.

过程 2: 在过程 1 完成后, 功率座壁等热敏电阻的周围环境与热敏电阻的热交换等因素的影响开始显现, $P_{RFsub} \neq P_{sub}$, 有效效率开始偏离真有效效率, $\eta_{eff} \neq \eta_{eff}$, 图 1 显示的就是这一过程的情况.

为此, 需要分析热敏电阻座的传热特性, 研究有效效率和传热特性的关系, 解决在过程 2 中有效效率与真有效效率的偏差问题.

3 热敏电阻功率座的传热结构

图 2 是热敏电阻功率座传热结构示意图, 其中: C_2 、 T_2 分别是热敏电阻的热容和温度, C_1 、 T_1 分别是功率座壁的热容和温度, G_{21} 和 G_{10} 分别是热敏电阻与功率座壁之间、功率座壁与所连接传输线之间的热导.

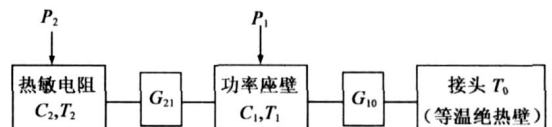


图 2 热敏电阻功率座传热结构示意图

T_0 是功率座所接传输线的温度, 由于总是连接在等温绝热壁上(等温绝热壁采用绝热的大热容设计或恒温设计)或有大热容和大热导的传输线上, 可以认为 T_0 始终不变. P_2 和 P_1 分别是作用在热敏电阻和功率座壁上的总功率, 包括了直流功率 P_{2DC} 、 P_{1DC} 和微波功率 P_{2RF} 、 P_{1RF} .

根据传热学原理^[7], 描述热敏电阻功率座的方程式为:

$$\begin{aligned} P_2(t) &= G_{21} \times (T_2(t) - T_1(t)) + C_2 \times \frac{dT_2(t)}{dt} \\ P_1(t) &= G_{10} \times (T_1(t) - T_0(t)) + G_{21} \times (T_1(t) - T_2(t)) \\ &\quad + C_1 \times \frac{dT_1(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

根据热敏电阻功率座的工作原理, 可以将其功率测量过程分成两个阶段, 第一阶段是直流偏置阶段, 第二阶段是微波替代阶段. 第一阶段由平衡电桥提供直流功率, 达到平衡状态后, 热敏电阻被偏置在一个固定的直流电阻下, 其温度也保持不变; 第二阶段在第一阶段平衡状态的基础上, 加入微波功率, 在平衡电桥的作用下, 直流偏置功率减小, 达到平衡后, 完成了微波功率对直流功率的替代过程.

令第一阶段电桥平衡后的直流偏置功率与第二阶

段的直流偏置功率之差为 ΔP_{2DC} , ΔP_{2DC} 即直流替代功率 P_{sub} . 在第二阶段, 由于直流偏置功率受热敏电阻与功率座壁热交换影响而随时间变化, 所以 P_{sub} 也是第二阶段时间的函数. 在下面的推导中, 将用 T_{ij} 表示第 i 个位置第 j 个阶段达到稳态时的温度, 用 P_{iDC} 表示第 i 个位置第 j 个阶段达到稳态时的直流功率, 位置 0、1、2 分别指所接传输线、功率座壁和热敏电阻.

4 微量热计中的有效效率

根据 T_1 的不同, 微量热计设计可分成两类:

(1) 等温测量, 结构如图 3 所示:

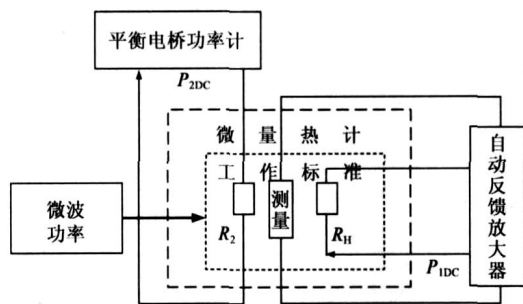


图 3 等温测量方式的微量热计结构示意图

等温是指由测温元件、直流辅助加热器和反馈控制组成反馈控温环路, 在加退微波功率过程中始终保持 T_1 不变.

在直流偏置阶段, 未加入微波功率, 只有直流功率, $P_2 = P_{2DC}(t)$, $P_1 = P_{1DC}(t)$. 达到初始平衡后, $P_2 = P_{2DC1}$, $P_1 = P_{1DC1}$, 下式成立:

$$\begin{aligned} P_{2DC1} &= G_{21} \times (T_{21} - T_{11}) \\ P_{1DC1} &= G_{10} \times (T_{11} - T_0) - G_{21} \times (T_{21} - T_{11}) \end{aligned} \quad (7)$$

在微波替代阶段, 加入微波功率后, $P_2 = P_{2RF} +$

$P_{2DC}(t)$, $P_1 = P_{1RF} + P_{1DC}(t)$, 则有

$$P_{2RF} + P_{2DC}(t) = G_{21} \times [T_2(t) - T_1(t)]$$

$$P_{1RF} + P_{1DC}(t) = G_{10} \times [T_1(t) - T_0] - G_{21} \times [T_2(t) - T_1(t)] \quad (8)$$

其中 P_{2RF} 和 P_{1RF} 分别是热敏电阻和功率座壁上吸收的微波功率, 即 P_{TRF} 和 P_{loss} .

由于热敏电阻平衡电桥和反馈控温环路的作用, T_2 始终不变, T_1 始终不变, 令第一阶段电桥平衡后的辅助加热功率与第二阶段的辅助功率之差为 ΔP_{1DC} , 将式(8)与式(7)相减有:

$$\begin{aligned} P_{2RF} &= \Delta P_{2DC}(t) \\ P_{1RF} &= \Delta P_{1DC}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

有效效率为:

$$\eta_{eff} = \frac{P_{sub}}{P_{net}} = \frac{\Delta P_{2DC}(t)}{\Delta P_{2DC}(t) + \Delta P_{1DC}(t)} = \frac{P_{2RF}}{P_{1RF} + P_{2RF}} = \eta \quad (10)$$

即有效效率始终与效率相等.

(2) 升温测量, 结构如图 4 所示:

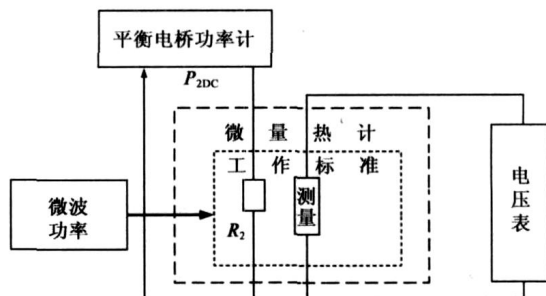


图 4 工作标准结构示意图

升温是指在这种设计中, 没有反馈控温环路, 加入微波功率会导致 T_1 的变化.

在直流偏置阶段, 没有输入任何功率时, 热敏电阻、功率座壁和等温绝热壁的初始温度相等, 为 T_0 . 当加入功率时, 只由热敏电阻平衡电桥提供直流功率, $P_1 = 0$; 达到初始平衡后, $P_2 = P_{2DC1}$, 则下式成立:

$$\begin{aligned} P_{2DC1} &= G_{21} \times (T_{21} - T_{11}) \\ 0 &= G_{10} \times (T_{11} - T_0) - G_{21} \times (T_{21} - T_{11}) \end{aligned} \quad (11)$$

由此得到功率座壁在本阶段的稳态温升为:

$$\Delta T_{11} = \frac{P_{2DC1}}{G_{10}} \quad (12)$$

在微波替代阶段, 加入微波功率后, $P_2 = P_{2RF} + P_{2DC}(t)$, $P_1 = P_{1RF}$, 则

$$\begin{aligned} P_{2RF} + P_{2DC}(t) &= G_{21} \times [T_2(t) - T_1(t)] \\ P_{1RF} &= G_{10} \times [T_1(t) - T_0] + G_{21} \times [T_1(t) - T_2(t)] \\ &+ C_1 \times \frac{dT_1(t)}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

上式减去式(12), 可解得在本阶段功率座壁温升的表达式:

$$\Delta T_1(t) = T_1(t) - T_{11} = \frac{P_{1RF}}{G_{10} + G_{21}} \left(1 - e^{-\frac{(G_{10} + G_{21})}{C_1} t} \right) \quad (14)$$

及

$$P_{2RF} = P_{2DC1} - P_{2DC}(t) - G_{21} \times \Delta T_1(t) = P_{sub} - G_{21} \times \Delta T_1(t) \quad (15)$$

则有效效率为

$$\begin{aligned} \eta_{eff}(t) &= \frac{P_{sub}}{P_{net}} = \frac{\Delta P_{2DC}(t)}{P_{1RF} + P_{2RF}} \\ &= \eta + \frac{G_{21}}{G_{10} + G_{21}} \left(1 - e^{-\frac{(G_{10} + G_{21})}{C_1} t} \right) (1 - \eta) \end{aligned} \quad (16)$$

有效效率与效率之差为:

$$\eta_{eff}(t) - \eta = \frac{G_{21}}{G_{10} + G_{21}} \left(1 - e^{-\frac{(G_{10} + G_{21})}{C_1} t} \right) (1 - \eta) \quad (17)$$

微量热计始终采用热敏电阻功率座有效效率的稳态值作为功率座的定标值, 达到稳态后, 有效效率为:

$$\eta_{eff} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{G_{21}}{G_{10}}} (1 - \eta) \quad (18)$$

有效效率与效率之差变为:

$$\eta_{\text{eff}} - \eta_s = \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{G_{21}}{G_{10}}} \right] (1 - \eta_s) \quad (19)$$

根据式(19)计算得到的有效效率与效率偏差曲线如图5所示.

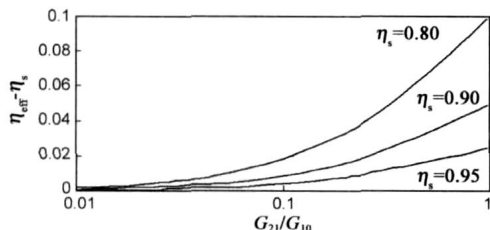


图5 升温测量方式有效效率与效率偏差曲线图

三条曲线从低到高依次是, 效率 η_s 为 0.95、0.9、0.8 时, 有效效率与效率的偏差随 G_{21}/G_{10} 变化的曲线. 由图5可见, 采用升温方法测量得到的有效效率总是大于效率, 对 η_s 较小的功率座, 两者差异较大; 对同一个功率座, η_s 和 G_{21} 固定, G_{10} 的变化影响二者差异的变化.

5 功率测量时的有效效率和热等效误差

在微量热计中定标过的热敏电阻功率座可用来进行功率测量, 其热平衡过程与升温测量方式的微量热计相似, 有效效率表达式也相同. 但由于功率座直接连接到功率分配器等没有隔热结构的器件, 功率座壁与它们间的热导 G_{100} 要远大于到微量热计中的热导 G_{10} , 即

$$\eta_{\text{eff}}(t) = \eta_s + \frac{1}{\frac{G_{100}}{G_{21}} + 1} \left(1 - e^{-\frac{(G_{100} + G_{21})}{C_1} t} \right) (1 - \eta_s) \quad (20)$$

稳态表达式为

$$\eta_{\text{eff}} = 1 - \frac{1}{1 + G_{21}/G_{100}} (1 - \eta_s) \quad (21)$$

从式(20)可知, 在高频和微波功率刚输入到功率座时, 其有效效率等于效率, 随着时间的增加, 有效效率逐渐增大, 最终达到的稳态值是式(21).

根据功率测量公式^[6], 热敏电阻功率座入射功率 P_{IN} 计算式为:

$$P_{IN} = \frac{P_{\text{sub}}}{\eta_y \times (1 - |\Gamma_L|^2)} \quad (22)$$

其中: η_y 为微量热计定标的有效效率, Γ_L 是功率座的反射系数, P_{sub} 是 P_{IN} 在热敏电阻上的直流替代功率. 而实际上 P_{IN} 应为

$$P_{IN} = \frac{P_{\text{sub}}}{\eta_o \times (1 - |\Gamma_L|^2)} \quad (23)$$

其中 η_o 为实际测量时的有效效率.

由于测量功率时功率座的有效效率相对于在微量

热计中定标得到的有效效率有变化, 式(22)的计算结果必然带来误差, 本文将这种有效效率变化带来的功率测量误差称为功率测量的热等效误差.

根据以上分析, 功率测量的热等效误差表达式为:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{sub}}}{1 - |\Gamma_L|^2} \left(\frac{1}{\eta_y} - \frac{1}{\eta_o} \right) \quad (24)$$

相对热等效误差表达式为:

$$\frac{\Delta P}{P_{IN}} = \eta_o \left(\frac{1}{\eta_y} - \frac{1}{\eta_o} \right) = \frac{\eta_o - \eta_y}{\eta_y} \quad (25)$$

对采用等温方式定标的功率座, 其 η_y 为 η_s , 则上式可表示为:

$$\frac{\Delta P(t)}{P_{IN}} = \frac{1}{1 + \frac{G_{100}}{G_{21}}} \left(1 - e^{-\frac{(G_{100} + G_{21})}{C_1} t} \right) \frac{(1 - \eta_s)}{\eta_s} \quad (26)$$

稳态表达式为:

$$\frac{\Delta P(t)}{P_{IN}} = \frac{1}{1 + \frac{G_{100}}{G_{21}}} \frac{(1 - \eta_s)}{\eta_s} \quad (27)$$

对采用升温方式定标的功率座, 其 η_y 表示式为式(18), 则式(25)可表示为

$$\frac{\Delta P(t)}{P_{IN}} = \frac{\eta_s + \frac{1}{\frac{G_{100}}{G_{21}} + 1} \left(1 - e^{-\frac{(G_{100} + G_{21})}{C_1} t} \right) (1 - \eta_s)}{1 - \frac{1}{1 + \frac{G_{21}}{G_{10}}} (1 - \eta_s)} - 1 \quad (28)$$

稳态表达式为:

$$\frac{\Delta P}{P_{IN}} = - \frac{(1 - \eta_s)}{1 + \frac{G_{10}}{G_{21}} \eta_s} \frac{\frac{G_{100}}{G_{21}} - \frac{G_{10}}{G_{21}}}{1 + \frac{G_{100}}{G_{21}}} \quad (29)$$

6 热等效误差的消除

根据以上的分析, 热等效误差的大小除了与热敏电阻功率座的换热特性有关, 与其效率有关外, 还与测量时间有关, 所以无法对这项误差进行补偿, 只能在微量热计定标和功率测量两个环节采取措施, 使在微量热计中的有效效率定标值和功率测量中的有效效率尽可能接近效率, 以消除热等效误差对功率测量的影响.

(1) 微量热计的改进

对升温测量方式的微量热计来说, 为了减小有效效率和效率的偏差, 应对有效效率的测量结果进行修正^[8]. 修正后的有效效率 η_{effC} 与效率的差为

$$\eta_{\text{effC}} - \eta_s = \frac{(1 - \eta_s)^2 G_{21}/G_{10}}{1 + (2 - \eta_s) G_{21}/G_{10}} \quad (30)$$

尽管对有效效率的修正能有效的减小其与效率的偏差, 但当 G_{21}/G_{10} 较大时, 修正的作用有限. 下图给出

了不同条件下, 修正后的有效效率与效率的偏差曲线。

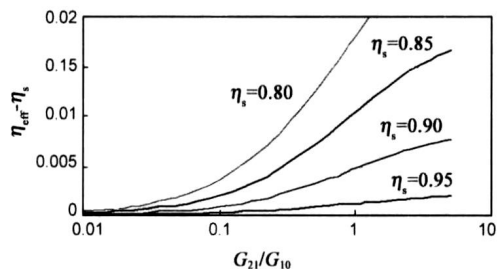


图 6 升温测量方式修正后的有效效率与效率偏差曲线图

从图6可以看出, 为保证修正后的有效效率与效率的偏差在 0.2% 以内, 应对用于升温测量方式微量热计的热敏电阻功率座特性有严格的要求, 效率不应低于 85%, G_{21}/G_{10} 不应大于 0.1。如果无法满足要求的话, 应改用等温测量方式和量热计方式建立功率基准, 这样才有利于世界功率量值的统一。

对于采用等温测量方式的微量热计来说, 定标得到的有效效率值等于效率, 无须修正。加拿大的波导功率基准和我国的宽带同轴功率基准均采用等温测量方式, 国际比对结果证明了等温测量方式得到的有效效率和修正后的升温测量方式得到的有效效率的一致性^[9]。

(2) 功率测量的改进

由式(20)可知, 在功率测量时, 随着时间的推移, 有效效率逐渐偏离效率, 所以应该把测量时间尽可能的缩短。研究表明^[6], 功率测量时热敏电阻功率座的时间常数一般大于 5 分钟, 根据式(20), 如果功率测量是在 2 秒内完成的, 即使效率 = 0.85, G_{100}/G_{21} 仅为 1 时, 有效效率与效率的差值也将小于 0.05%, 这对测量误差普遍在 1% 以上的功率测量来说已经可以忽略。而且根据上文对热敏电阻功率座特性的要求, G_{100}/G_{21} 至少为 10, 即使 10 秒内完成测量也能保证有效效率与效率的差值小于 0.05%。

7 结论

有效效率是微波功率测量的重要参量, 本文通过对热敏电阻功率座详细的热传递分析和理论推导, 发现了有效效率定义的局限, 本文表明有效效率不仅与功率传感器的换热特性有关, 还会随功率测量时间变化。有效效率的不唯一性给功率测量带来了误差, 为描述这种误差本文定义了热等效误差, 并提出了消除热等效误差的方法, 通过改进微量热计和缩短功率测量时间, 可以将热等效误差控制在 0.2% 以内。

参考文献:

- [1] U Stumper. New developments of RF and microwave power standards[A]. 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements[C]. Washington, D C, USA, 1998. 296– 297.
- [2] J Wayne Allen. NIST Microwave Power Standards in Waveguide[R]. Boulder: NIST Technical Note 1511, 1999.
- [3] Fred R Clague. A Calibration Service for Coaxial Reference Standards for Microwave Power[R]. Boulder: NIST Technical Note 1374, 1995.
- [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] 冯新善, 等. 高频、微波功率的计量测试[M]. 北京: 中国计量出版社, 1990. 26– 28.
- [6] A Fantom. Radio Frequency and Microwave Power Measurement[M]. London, U K: Peregrinus, IEE press, 1990.
- [7] 杨世铭等. 传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 66– 80.
- [8] 刘欣萌, 彭喜元. 微量热计的一项被忽略的系统误差. 北京: 计量学报[J]. 2008, 29(1): 49– 53.
- [9] Jan P M de Vreede. Final Report of the comparison CCEM. RF K8. CL: Calibration factor of thermistor mounts [J]. Metrologia, 2005, 42(10): 1088– 1172.

作者简介:



刘欣萌 男, 1974 年生于辽宁省鞍山市, 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