

微波功率测量方法 译文集

上 集

国防工业出版社

73.457

427

微波功率测量方法

(译文集)

上 集

纪 亮 编 译

国防工业出版社

73.457

427

微波功率测量方法

(译文集)

上 集

纪 亮 编 译



240163
内 容 简 介

本书以译文集的形式，试图能比较全面地介绍微波功率测量的理论和技术问题。全书共分上、下两集：《上集》由苏联作者波克利斯卡娅等所著《微波功率测量方法》一书翻译而成；《下集》选译了十三篇英、俄两种文种的期刊文献。《上集》主要介绍了测量微波功率的测热电阻法、有质作用法、霍耳效应法，并对测量微波功率时的失配误差作了分析。《下集》对微波脉冲功率的测量方法、标准功率计的设计制作、功率计的校准技术以及测热电阻座效率的测量等若干问题的新近成果作了介绍，并给出了大量实验数据。

本书可供从事于无线电测量技术工作的广大工人、科技人员及大专院校师生参考。

微波功率测量方法

(译 文 集)

上 集

纪 亮 编 译

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 5³/₁₆ 107千字

1973年8月第一版 1973年8月第一次印刷 印数：00,001—11,500册

统一书号：15034·1302 定价：0.46元

译者序

微波功率测量是无线电技术领域很重要的一环。通过对微波功率的测量，可以很方便地确定诸如发射装置的输出功率、接收机的灵敏度以及放大器的增益等一系列重要参量。

为了帮助广大工人、科技人员和大专院校师生了解有关方面的情况，遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们编译了《微波功率测量方法》一书。本书以译文集的形式，试图能比较全面地介绍有关微波功率测量的各种基本方法和近十年来所发表的部分研究成果。

本书共分上、下两集：上集由苏联的波克利斯卡娅等所著《微波功率测量方法》一书翻译而成；下集选译了十三篇期刊文献。上集所译之原书，以专著形式较系统地阐述了几种常用的微波功率测量方法的原理，着重分析了测热电阻法、有质作用法和霍耳效应法，并对测量微波功率时的失配误差作了估计。但是，应当指出，该书对另一类十分重要的方法，即量热计法却未能涉及。还有一些较重要的内容（如脉冲功率的测量、功率计的校准技术等）也未予论述。这就使原书在结构内容方面不够完整。

近十年来，微波测量技术取得显著的进展，一些新的测量方法相继出现，而功率计的校准技术的发展则更为迅速。

现代微波功率测量技术的发展主要集中在以下几个方面：
(1) 研制和建立功率标准；(2) 拟制精确测定测热电阻座效率的方法；(3) 探讨校准功率计的新方法；(4) 探讨精确测量微波功率的新方法；(5) 探讨精确测量极小功率与极大功率的方法；(6) 探讨提高测量精确度的各种可能途径。据此，我们围绕着这些论题，选译了十三篇英、俄两种文种的期刊文献，作为《微波功率测量方法》一书的下集。

为了切合实际需要，在编译过程中，我们对原文作了某些必要的删节。但是，由于我们水平有限，无论在选题或译文质量上均难令人满意，诚恳希望读者批评指正。

目 录

原序	7
第一章 测量功率的测热电阻法	9
1-1. 各类现代测热电阻的特性	12
1-1-1. 金属测热电阻	16
1-1-2. 半导体测热电阻	20
1-1-3. 铁氧体测热电阻	24
1-2. 用测热电阻法测量功率时替代法适用性的估计	27
1-3. 利用各类测热电阻制造功率计的原理	35
1-3-1. 利用热敏电阻的功率计	36
1-3-2. 关于利用铁氧体测热电阻制造功率计的可能性	41
1-3-3. 利用钽流电阻的功率计	43
1-3-4. 利用金属薄膜测热电阻的功率计	48
1-3-5. 测热电阻的电桥线路	58
第二章 测热电阻的动态工作分析	63
2-1. 作电路元件用的测热电阻	63
2-1-1. 测热电阻的基本方程	63
2-1-2. 使用测热电阻的直流电路中的过渡状态	68
2-1-3. 测热电阻的动态特性	70
2-1-4. 线性惯性测热电阻的等效电路	79
2-1-5. 脉冲作用状态下的测热电阻	86
2-2. 电热作用状态下的测热电阻	92
2-2-1. 测热电阻的动态灵敏度	94
第三章 测量功率的有质法	98
3-1. 电磁波有质作用的一般概念	99
3-1-1. 自由空间的辐射	99
3-1-2. 定向波辐射	101
3-1-3. 场强对波导侧壁的作用	105

3-2. 绝对有质功率计的一般理论	109
3-2-1. 封闭系统的能量不变性定理	110
3-2-2. 有质功率计的绝对校准方法	112
3-2-3. 一般理论的应用	115
3-2-4. 有质功率计的结构	119
第四章 利用半导体霍耳效应的功率计	123
4-1. 测量方法的一般概念	123
4-1-1. 霍耳效应及其在测量功率方面的应用	123
4-1-2. 霍耳电动势和功率流之间的关系	124
4-2. 利用霍耳效应测量微波功率的一般理论	126
4-2-1. 交流霍耳效应	126
4-2-2. 谐和场中载流子运动方程的解	127
4-2-3. 位移电流和霍耳传感器的趋肤效应	131
4-2-4. 电磁场中的霍耳传感器	132
4-3. 利用霍耳效应的微波功率计的结构	136
4-3-1. 双线传输线功率计和同轴线功率计的结构	136
4-3-2. 波导结构及其分析	139
4-3-3. 具有空腔谐振器的功率计	141
4-4. 测量功率时辐射压力和霍耳效应之间的关系	144
第五章 测量微波功率时的失配误差	147
5-1. 失配时波导内的功率流	147
5-2. 几种功率测量方法的失配误差	149
5-2-1. 单个平方律检波器	149
5-2-2. 两个平方律检波器	151
5-2-3. 定向耦合器	152
5-2-4. 有质功率计	153
5-2-5. 利用霍耳效应的功率计	155
5-3. 吸收型功率计的失配误差	156
5-4. 通过型功率计的失配误差	160
参考文献	163

原 序

功率测量是微波测量的主要内容之一。大家知道，当工作波长可以与装置的尺寸相比拟时，电压和电流的概念便失去其一般意义。因此，在微波频段，功率测量不仅是一种重要的、独立的测量形式，而且在许多情况下也代替了电压和电流的测量。

测量电磁振荡功率的方法是多种多样的。但是，几乎所有测量方法的实质都在于首先将信号功率转变成某种易于测量的其它能量形式（如热能、机械能等）。因此，研究那些对整个电磁波频谱有共通性，而又属于绝对测量的方法，无疑是很重要的。

现代微波功率测量技术的发展趋势，是探讨一些崭新的测量方法。这些方法是以电磁能流对物质中的过程以及对粒子运动的直接作用作为基础的。基于电磁场分量与半导体中自由运动的载流子相互作用（霍耳效应）的功率测量方法，以及借助于利用了场和电子自旋相互作用的铁氧体测热电阻来测量功率的方法，都属于新测量方法之列。这些方法有着严格的理论根据，或者是以物质的物理常数为基础。因此，可以作为绝对测量方法。

作者的任务并不是阐明现有的一切微波功率测量方法。书中详细叙述了由于简便而在技术中获得广泛应用的测热电阻法。也介绍了利用电磁波的有质作用及半导体中霍耳效应

的两种比较新的中功率和大功率测量方法。对大家都知道的且已被详细论述过的量热测量法^(11,12,15)则未予研究。实际计量问题也未涉及,因为这些问题主要取决于功率计的实际结构。书中对于测量方法本身的误差作了部分说明。此外,还单独讨论了失配误差。在论述测量功率的测热电阻法时,还顺便研究了测热电阻的动态工作特性。鉴于脉冲设备和快速作用装置的广泛发展,作这样的补充说明也是十分重要的。

关于微波功率测量问题,在期刊上已发表过大量文章。这些文章所论述的主要结果,本书在讨论相应的测量方法时都作了扼要介绍。

根据不同的能量变换形式而要求不同的分析途径的各种测量方法的不一致性,致使在同一本书内论述这些方法时定会有一些不完整之处。

第一章 测量功率的测热电阻法

测量微波功率的测热电阻法是基于：利用某些元件在由它们吸收的电磁振荡功率的作用下将改变其导电率这一特性。这些属各类热变电阻的专门制作的元件，用一个共同的名称——测热电阻（来源于希腊文 $\beta\omicron\lambda\eta$ ——射线和 $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ ——量度）来统一是合理的。测热电阻吸收的电磁振荡能量转变为热使其温度升高。这时，测热电阻所发生的电阻变化，可以作为被吸收功率的量度。

各种电阻温度系数很大的材料可作为测热电阻的灵敏元件。

测热电阻在整个微波频段可用作电磁振荡的检测器。此外，在红外线测量技术中，测热电阻还广泛地用来研究辐射频谱的能量。

不久以前，人们还认为，测量微波功率的测热电阻法，只能成功地用来测量小功率（10 微瓦 $\sim$ 0.1 瓦）和中功率（0.1 $\sim$ 10瓦）。但是，目前就不能认为这样的界限是合理的了。例如，在红外线分光计中，就利用了门限灵敏度为 $10^{-9}\sim 10^{-11}$ 瓦的薄膜测热电阻。在测量微波功率的装置中利用这类测热电阻时，便能将测量范围向极小功率方向大大扩展。文献〔4〕中证明了，在利用磁化铁氧体热变电阻作为测热电阻时，用测热电阻法测量大功率（大于10瓦）的可能性。微波频段内各种分支装置技术（定向耦合器、隙缝电桥等）的发展，

也促进了测量范围向大功率方向扩展。

期刊和专业文献对测热电阻采用了极为繁多的术语^①。因此，在图1所列举的测热电阻中，只指出了暂定的分类^②。测热电阻的材料是分类的基础，这是因为测热电阻的基本性质都由它的材料决定。而测热电阻的形状和尺寸，只表征各参量的不同数值及决定装置高频部分的结构。

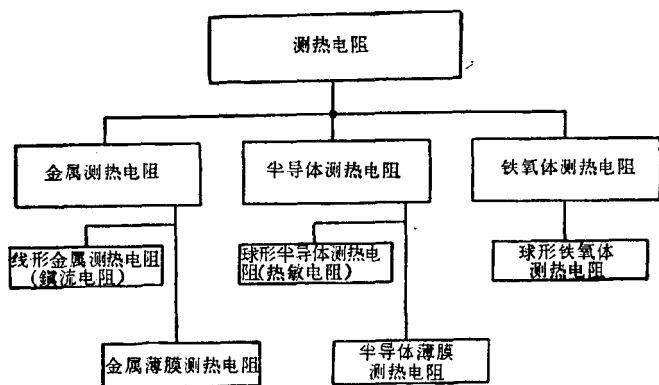


图1 测热电阻的分类

到目前为止，各类测热电阻也还未采用统一规定的表示方法。本书所用测热电阻的表示方法示于图2。表示方法的区别，是由测热电阻的结构决定的。

目前，测量微波功率主要有两种基本方法：测量从发生器馈至工作负载的功率，测量耗散在等效负载电阻上的功

-
- ① 线形金属测热电阻称为铂流电阻；半导体球形测热电阻称为热敏电阻；薄膜测热电阻称为测热电阻。
 - ② 为了便于后面的叙述，在图1中的括弧内也写出了在期刊文献中广泛采用的测热电阻的习惯名称。

率。前者用来测量通过的功率，后者用来测量被吸收的功率。测量通过功率的装置，只耗散一小部分（已知）用专门的装置从传输线上分出来的功率。吸收型装置是测量与发生器传输线匹配的负载电阻上耗散的功率。这样的测量方法，可以单值地对各种发生器的功率进行比较，因而，应用极为广泛。

吸收型功率计的组成中，除了有将微波能量转变成另一种易于测量的能量形式的元件以外，还应有一个等效负载电阻。在测热电阻功率计中，其测热电阻既是等效负载电阻，同时又是能量变换器。

众所周知，耗散在电阻上的直流功率，可能以很高的精确度进行测量。因此，用与微波功率等效的直流功率来确定

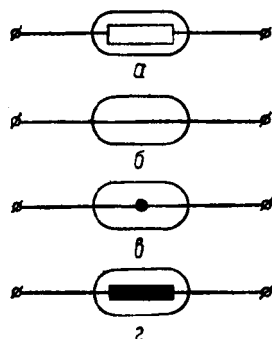


图 2 测热电阻的表示方法

a ——一般表示； b ——镇流电阻；
 b ——热敏电阻； z ——薄膜测热电阻。

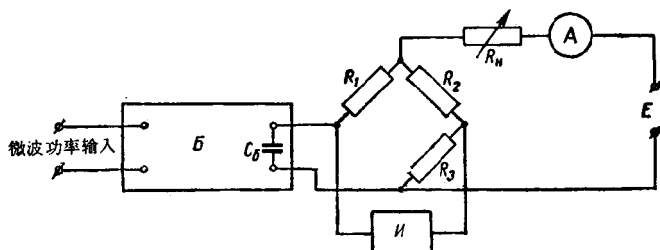


图 3 测热电阻功率计的方块线路

B —测热电阻座； H —指示器； E —偏置电源； C_δ —测热电阻座的电容。

1104056

微波功率的测量方法，获得了广泛应用。这种测量方法之一，通常称为替代法。此法的实质由图 3 所示线路说明。

在用以将测热电阻连接到微波功率源及连接匹配元件的测热电阻座的结构中，装有测热电阻的直流引出线（未显著增加微波功率损耗）。直流引出线连接到电桥上，后者由电池 E 经负载电阻 R_H 供电。电桥的一个臂为测热电阻，其余三个臂由电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 组成。当没有微波功率时，由电池 E 馈送的能量应这样调节，使得测热电阻的电阻值与电桥其余各臂的电阻值相等。当测热电阻吸收微波功率时，测热电阻受额外加热，致使电桥失衡。通过减少由电池 E 馈送的一定数值的直流功率，便可使电桥恢复平衡。此减少的功率便确定了被测微波功率，并由测量装置 H 记录。替代法只有在测热电阻由直流功率和微波功率加热时其温度有相同变化的情况下，才可能保证有高的测量精确度。这个问题将在后面更详细地讨论。

1-1. 各类现代测热电阻的特性

红外线测量技术的特点是，在研制灵敏度高和惯性小的测热电阻方面比超高频技术取得了更为显著的成就。这不仅是由于测热电阻很早就开始用作红外线接收机，而且也由于在微波频段的装置中必须使测热电阻和微波能量传输线呈阻抗匹配。这一要求既决定了测热电阻的结构，又决定了整个测热电阻座的结构。

在吸收型功率计中，测热电阻的阻值应接近于传输线的波阻抗。对于厘米波段而言，传输线的波阻约为几百欧姆。因此，大多为高阻值的高灵敏度半导体薄膜测热电阻，以及

广泛应用于红外线测量技术中的通常为低阻值的金属薄膜测热电阻，便不适用于吸收型微波功率计。然而，这两类测热电阻却成功地应用于通过型功率计中。通过型功率计不要求有那样良好的匹配，而具有高灵敏度，却是对测热电阻提出的基本要求。

下述的有关测热电阻的资料，不仅限于已经运用在微波功率测量装置的样品的特性和参量；同时还引述了特殊测热电阻的某些数据和技术特性。这种特殊的测热电阻被用于红外线技术中，它们或者在高灵敏度或者在小惯性方面是领先的。

在以后的叙述中，我们将利用下列测热电阻的主要参量和技术特性，这些特性决定了它们在微波功率计中的应用可能性：

1. 在某一规定的温度 ($T_0^{\circ}\text{K}$ 或 $\Theta_0^{\circ}\text{C}$) 下，测热电阻的额定电阻

$$R_0(\text{欧})$$

2. 电阻温度系数——温度改变 1 度时，电阻的相对变化（以百分数表示）

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\Theta} 100 (\text{百分数/度})$$

3. 耗散常数——耗散在测热电阻上的外加功率 P 与由于 P 使测热电阻温度 Θ_6 超过环境温度 Θ_0 的差值之比

$$H = \frac{P}{\Theta_6 - \Theta_0} = \frac{P}{\Theta} (\text{瓦/度})$$

4. 测热电阻的热容量——使测热电阻温度升高 1 度所需的热量。热容量的数值由比热和质量的乘积确定

$$C = mc(\text{焦耳/度})$$

5. 测热电阻的灵敏度——测热电阻的阻值改变与电磁振荡功率的改变（增量）之比，或是连接到电压源的测热电阻端电压的改变与电磁振荡功率改变之比

$$\Sigma = \frac{dR}{dP} (\text{欧/瓦}) \quad S = \frac{dU}{dP} (\text{伏/瓦})$$

6. 门限灵敏度或测热电阻可检测的最小功率

$$P_{\min} (\text{瓦})$$

7. 测热电阻的热时间常数——测热电阻温度相对于初始测量瞬时的温差 $\Theta_s - \Theta_0$ 改变 63% 所需的时间

$$\tau (\text{秒})$$

8. 假定测热电阻的特性维持不变而寿命足够长，这时，在连续工作和非稳态过程中可能耗散的最大容许功率

$$P_{\max} (\text{瓦})$$

测热电阻的主要特性是，它的电阻和温度之间的依赖关系为 $R = \psi(\Theta)$ 。

根据电阻和温度的依赖关系的特点，可以将现有的测热电阻分为两类：电阻值随温度的升高而增大（电阻温度系数为正）的金属测热电阻；电阻值随温度的升高而减小（电阻温度系数为负）的半导体测热电阻。由具有不大的负电阻温度系数的铋、锑、碲等中间元素的薄层制成的测热电阻属于后一类。

表 1 列出了几种制造测热电阻的材料特性，而各种不同材料的电阻和温度的关系曲线示于图 4。

作用原理是基于超导现象的测热电阻，可以列为特殊的一类。

表 1 几种用来制作测热电阻的材料特性

材 料	在18°C时的电阻率 ρ (欧姆·厘米)	在18°C时薄层的电阻温度 系数 α (百分数/度)
铂	10.5×10^6	+0.39
金	2.21×10^6	+0.4
镍	7.35×10^6	+0.63, +0.67
铁	9.9×10^6	+0.65
钨	5.32×10^6	+0.46
铋	118×10^6	-0.45
铟	39.8×10^6	-0.47
碲	17.7×10^6	-0.5
氧化铜	3.3×10^{10}	-3.3
锰、镍和钴 的氧化物	3×10^9	-5.0, -6.0

许多金属在很低的温度下变成超导金属。如果对于纯金属来说这种转变由于非常急剧而难以利用的话，那末，对于合金来说这种转变则比较平缓，且在很小但有限的温度范围内对应着大的正值 α 。这一属性决定了获得高灵敏度测热电阻的可能性。

例如，由铌的氮化物制作的、应用于红外线测量技术中的超导测热电阻，其门限灵敏度为 2.1×10^{-11} 瓦。测热电阻的时间常数 $\tau = 0.5$ 秒。图 5 示出了由面积为 1 毫米² 的铌的氮化物制成的窄条的电阻和温度的关系曲线⁽⁸⁸⁾。从图中可以看出，这类测热电阻的温度系数为 50%。

尽管现代超导测热电阻有以上显著优点，但由于对它需要建立专门的冷却室（恒温槽），因此，只能将它视作测量极小功率的特殊装置，而不能作为普通的实验仪器。