

微波功率测量

[苏] M. И. 别连柯等著

张 伦 译

人民邮电出版社

微波功率测量

〔苏〕М.И.别连柯等著

张 伦 译

人(民邮电出版社)

Измерение Мощности На СВЧ

М.И. Билько, А.К., Томашевский
П.П. Шаров., Е.А. Баймурамов
М. «Сов. Радио», 1976.

内 容 简 介

本书简要地论述了用于测量微波功率的吸收式功率计和通过式功率计的工作原理、设计方法和误差源以及微波脉冲功率的测量问题。详细说明了各种方法的优缺点和适用范围，并给出了大量实验数据。此外，书中还指出了实际利用微波功率计时应当注意的一些事项。

本书可供从事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

〔苏〕М.И.别连柯等著

张 伦 译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津市第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32 1979年12月第一版

印张：6 24/32 页数：108 1979年12月天津第一次印刷

字数：155 千字 印数：1—21,000册

统一书号：15045·总2318-无678

定价：0.55元

译 者 的 话

在微波功率测量方面，国外曾先后出版过一些书。本书与已出版的一些书相比，叙述的内容较为新颖，基本上反映了这个领域当前发展的概貌，对于一些新型微波功率测量仪器（如热电功率计）也做了分析。

本书的另一特点是对各类功率计的结构、设计要点和使用中应当注意的事项均做了详细说明，通过阅读本书，对于从事实际微波功率计的研制和使用人员有一定参考价值。

在翻译过程中，对于原书中叙述欠明确之处已做了必要的注释和说明。

黄高年同志校对了本书的译文，译者在此表示感谢。

译者水平很低，译文中错误和不当之处在所难免，望读者批评指正。

前 言

现代科学技术的发展，要求不断完善无线电测量设备。在微波频段的各种各样无线电测量项目中，功率测量是主要测量项目之一。

测量微波功率的仪器（称为微波功率计）除了它自己的基本用途以外，还用来测量医学——生物学研究中的辐射强度、确定四端网络的损耗、反射系数以及各种无线电测量装置的频率特性等。微波功率计属于研制、调试和生产微波振荡器及微波放大器的整个阶段所使用的基本仪器之列。近来，微波功率计开始应用在测量和控制信号源输出功率电平的程序控制系统中。

本书叙述了测量频率范围从几兆赫到几十千兆赫、功率范围从1微瓦到几千瓦（平均值）或更大的微波功率的几种主要方法。讨论了功率计的原理电路和各个部件以及整个仪器的设计，分析了测量功率的误差。书中还扼要叙述了一些在科学研究中所使用的新方法，其中包括基于半导体中的新效应且适于测量脉冲功率的方法，讨论了测量光频段功率的若干特点。

本书适于从事设计和使用微波功率计、包含有变换器和微波功率计的系统的工程技术人员阅读，也可供高等院校无线电技术专业的高年级学生和研究生阅读。

书末附有丰富的参考资料索引。在编写本书的材料时，考虑到可以单独阅读各章。

目 录

译者的话

前言

第一章 功率测量仪器的一般知识	1
1.1 基本特性	4
1.2 功率计的基本部件	9
1.3 功率计的分类	11
第二章 测量吸收功率的方法和仪器	13
2.1 热方法、一般知识	13
2.2 量热计法	14
2.3 测辐射热电阻法	35
2.4 热电法	72
2.5 电压表法	86
2.6 利用有频率选择性的铁氧体元件的方法	95
2.7 测量光波段功率的仪器简介	100
2.8 用于自动系统中的功率计的特点	104
第三章 测量通过功率的方法和仪器	107
3.1 吸收壁法	108
3.2 探针法	112
3.3 有质法	121
3.4 基于利用霍耳效应的方法	134

35022

3.5	用定向耦合器测量通过功率的方法	138
第四章	测量脉冲功率的方法和仪器	141
4.1	峰值检波(电压表)法	141
4.2	积分—微分法	146
4.3	测量功率的平均值,再根据已知的占空系数计算脉冲功率	148
4.4	与参考信号进行比较的方法	150
4.5	基于在微波场作用下,半导体元件的电阻发生变化的方法	154
4.6	利用在微波场作用下,半导体元件中形成«热»载流子的热电势效应的方法	156
4.7	使用铁磁薄膜	158
4.8	积分法	159
第五章	使用微波功率计的一些问题	165
5.1	功率计基本参量的控制和测量	165
5.2	测量功率时使用仪器的基本规则	176
5.3	提高测量精确度的方法	177
5.4	利用外部衰减器时功率测量的特点	182
结语		184
附录1	用具有吸收壁的功率计测量通过功率时,失配误差的确定	186
附录2	用探针装置测量通过功率时,失配误差的确定	190
附录3	用电压表法测量微波功率时,失配误差的确定	200
参考文献		203

82038

第一章 功率测量仪器的一般知识

功率是一个物理量，通常定义为单位时间内所完成的功。单位功率（瓦）表示在1秒内完成1焦耳的功所需的功率。

在直流和低频交流上，常常是通过测量负载上的电压有效值 U 、流过负载的电流有效值 I 和电流与电压之间的相位角 φ 来代替直接测量功率。这时，功率由下式确定

$$P = UI \cos \varphi$$

在微波波段，测量电压和电流变得十分困难。测量装置输入回路的尺寸 l 与波长 λ 可以比拟，是使测得的电压和电流呈非单值性的原因之一（图1·1）。这时，测量会伴随有明显的频

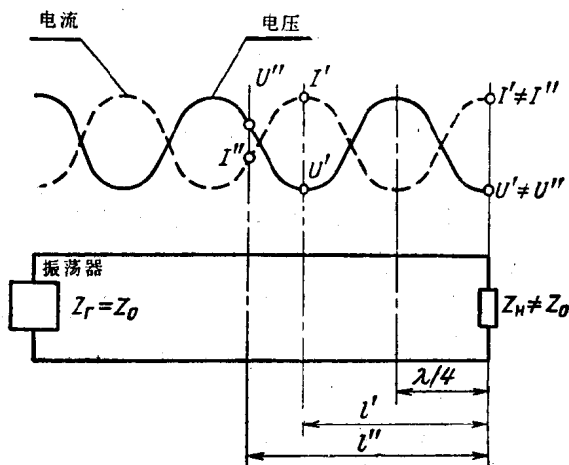


图 1·1 接有失配负载的无耗传输线上的电压和电流驻波

率误差。还应补充说明的是，在传输某种波型的波导系统中（如圆波导中的 H_{01} 波），测量电压和电流并无实际意义。这是因为导体内不存在纵向电场分量，而任何截面直径的波导两端之间的电位差为零。因此，在从几十兆赫开始的频率上，直接测量功率是更好、更精确的方法；而当频率超过1000兆赫时，直接测量功率则是单值表征电磁振荡强度的唯一测量方法。为了直接测量微波功率，采用了一些建立在基本物理定律基础上的方法，其中包括直接测量质量、长度和时间这些基本量的方法。

直接测量功率有以下两种基本形式：

1. 测量从信号源通向给定负载的功率（通过功率），
2. 测量信号源可能馈送给匹配负载的功率（吸收功率）。

在第一种情况下使用通过式功率计，在第二种情况下则使用吸收式功率计。

为了表征微波功率源，在绝大多数情况下，只要知道输出功率的平均值就足够了。通常，输出功率的平均值可以记为

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

式中， T ——取平均的周期， $p(t)$ ——功率的瞬时值。

脉冲调制的信号发生器常常是用峰值功率来表征。峰值功率是指在载频周期内，占有脉冲功率包络线最大值处的微波功率的平均值。峰值功率 P_{nux} 可以直接测量，或根据平均功率 P_{cp} 、占空系数 Q 和脉冲波形系数 $K_{\phi u}$ 用下式计算确定

$$P_{nux} = K_{\phi u} Q P_{cp}$$

式中， $Q = 1/F_u \tau_u$ ——脉冲占空系数； F_u ——脉冲重复频率，（赫）； τ_u ——脉冲宽度，（秒）； $K_{\phi u}$ ——波形系数，数值

上等于实际脉冲功率的最大电平（峰值功率电平）与具有同样宽度和面积的等效矩形脉冲电平之比。

实践中，经常使用术语《脉冲功率》（ P_u ）。这时，所指的是微波脉冲包络为矩形时，在一个脉冲时间内的平均功率值。对于具有矩形包络的微波脉冲而言，因为这时 $K_{\phi u} = 1$ ，故峰值功率和脉冲功率相等。在这种情况下， $P_u = P_{\text{max}} = QP_{cp}$ 。

当微波脉冲的包络不为矩形时，由于缺乏一种确定脉冲宽度的固定方法，故《脉冲功率》的概念便变得不明确了（图1·2）。

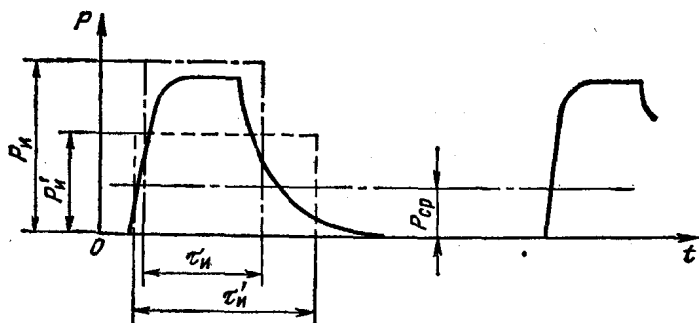


图 1·2 对于具有任意形状的脉冲，脉冲功率 P_u 和约定采用的脉冲宽度的关系

尽管测量微波功率有多种多样的方法，但它们全都归结为将微波电磁振荡能量变换成易于测量的其它能量形式，如热能、机械能等。

在测量微波功率的仪器中，基于热方法的功率计得到了最广泛的应用。除此而外，还采用了其它许多方法，如有质法、探针法等。

下面，我们来研究功率计及其主要部件所固有的一些基本特性以及对它们提出的要求。

1.1 基本特性

输入阻抗和匹配 大家知道, 表征微波振荡源的参量之一,

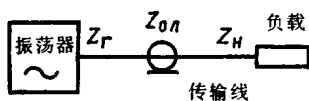


图 1.3 微波功率传送到负载的简化结构图

是它的输出功率。输出功率与负载阻抗有关, 且在复数共轭负载 (即 $Z_s = Z_n^*$) 时达到最大

值 (图1.3)。

通常, 微波振荡源的输出功率是指振荡源可能在匹配负载上给出的功率。因此, 用来测量振荡器输出功率的仪器 (吸收式功率计) 应是等效匹配负载, 它的输入阻抗 Z_s 应等于传输线的特性阻抗 Z_{0n} 。

对于通过式功率计也提出了类似的要求。通过式功率计连接在振荡器和负载之间, 因此不应破坏传输功率的状态。这在通过式功率计的输入阻抗和输出阻抗都等于 Z_{0n} 的情况下便能做到。

在实际仪器中实现的匹配条件都带有一定的近似性。功率计阻抗与传输线波阻抗的匹配程度由下列反射系数表征

$$\Gamma_s = (\dot{Z}_s - Z_{0n}) / (\dot{Z}_s + Z_{0n}) \quad (1.1)$$

反射系数的模等于反射波场强的幅值 E_{orp} 与入射波场强的幅值 E_{nad} 两者之比

$$|\Gamma_s| = E_{orp} / E_{nad} \quad (1.2)$$

实际上, 更经常的是测量驻波系数 (KCB), 驻波系数与反射系数由下式相联系

$$KCB = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|) \quad (1.3)$$

根据功率计的精确度等级, 仪器输入端的驻波系数不应超过下列数值

精确度等级: 1.0 1.5 2.5 4.0 6.0 10.0 15.0 25.0

驻波系数(<): 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.7

工作频段 功率计的工作频段是指这样的频带: 在此频带内, 功率计的特性指标 (尤其是基本误差) 不超过额定的数值。在工作频段内通常不需要对频率进行调谐, 选择性功率计是一个例外情况。这类功率计的工作频段在频率改变时必须重新调谐, 其工作频段取决于调谐元件的调节范围。

对带域式功率计*提出的基本要求如下: 对于同轴功率计而言, 频率覆盖系数 (最高频率与最低频率之比) 应小于 2; 对于波导功率计而言, 频率覆盖系数则不应小于 1.4~1.5。通过使用可更换的变换器**, 可以得到更大的带宽。带宽最大的同轴功率计和波导功率计, 其工作频段受微波系统传输可能性的限制。在频率低于 1000 兆赫时, 工作频段通常用兆赫表示; 在频率更高时, 则用千兆赫表示。

测量范围、动态范围 功率测量范围或用瓦 (瓦的分数和倍数单位) 表示, 或用相对于 1 毫瓦电平的分贝数表示。功率计的动态范围一般不超过 30~40 分贝, 而被测功率的范围则超过 140 分贝。利用可更换的变换器、外接分配器 (衰减器、定向耦合器) 也可以扩展个别功率计的动态范围。但这样又引起一个原则性的困难, 就是即使在窄的频段内也不可能用一台仪器和附加到它上面的分配器来测量整个动态范围的功率***。

* 即在工作频段内无需对每个频率进行调谐的功率计, 亦称非调配式功率计; 而需对每个频率进行调谐的选择性功率计, 则称为调配式功率计。——译注

** 在俄文文献中, 常将功率测量探头 (功率座) 称为变换器或接收变换器。——译注

*** 这是因为参与测量的分功器的工作频段都比较窄, 从而限制了测量的动态范围。——译注

基本误差 测量的基本误差是指仪器在正常工作条件（参阅ГОСТ*9763—67）下的误差（包括系统误差和偶然误差）。基本误差定义为仪器的示值与被测量的真值之差。因为被测量的真值是未知的，故使用所谓被测量的实际值。被测量的实际值是指这样的值：它与真值接近到可以将它看作真值的程度。

通常，被测量的实际值，是用误差小于被校仪器的额定基本误差1/3的标准装置，通过实验方式加以确定。

对某一类功率计规定其基本误差，是为了使任何一台功率计的示值与被测量的实际值之间的差都以一定的置信概率处在所保证的范围内，亦即

$$-A\delta_1 \leq \delta \leq A\delta_2 \quad (1.4)$$

式中， $A\delta_1$ 和 $A\delta_2$ ——基本误差的极限容许值。

对于精确度不高的仪器来说，基本误差容许值规定为

$$-A\delta \leq \delta \leq +A\delta \quad (1.5)$$

对于所规定的测量范围的终值，功率计的基本误差（以百分数表示）不应超过它的精确度等级。

附加误差 附加误差是当影响因素**之一的偏离超出正常数值的极限范围而产生的仪器示值的变化。附加误差由于起因不同可以分为温度附加误差、湿度附加误差、气压附加误差和电源电压附加误差等。温度附加误差通常规定为因温度变化 10° 而产生的误差（以百分数表示）；而其余的附加误差则规定为在影响因素的全部变化范围内（例如对电源电压220伏、50赫所容许的极限偏离）所产生的误差（以百分数表示）。

变换系数、测量（接收）变换器的效率 这两个特性决定

* ГОСТ全文为государственный общесоюзный стандарт是全苏国家标准的缩写。——译注

** 影响因素也称干扰量。——译注

了接收变换器的质量。变换系数和效率用来确定功率计的测量电路在直流和低频交流上校准时的被测功率的大小。

$$P_{свч} = P_s / K_{нрб} \text{ 或 } P_{свч} = P_s / K_s, \quad (1.6)$$

式中, P_s ——测量电路读数装置的示值; $K_{нрб}$, K_s ——接收变换器的变换系数和效率。

在一般情况下, 变换系数是变换器输出端的信号(反映被测量的大小)与引起这个信号的、出现在变换器输入端的信号之比(参阅ГОСТ16263—70)。

对于微波功率计来说, 变换系数是接收变换器输出端的信号(或变换器输出参数的变化)与在输入端引起该信号的功率之比。例如, 对于测辐射热电阻变换器和热敏电阻变换器而言, $K_{нрб} = \Delta R / \Delta P$ (欧/瓦), 这里, ΔR ——变换器输出端电阻值的变化; ΔP ——变换器输入端的功率变化。对于热电变换器而言, $K_{нрб} = U_{тэ.д.с.} / P$ (伏/瓦)。这里, $U_{тэ.д.с.}$ ——变换器输出端的热电势, P ——变换器输入端的功率; 对于二极管变换器而言, $K_{нрб} = U / P$ (伏/瓦), 这里, U ——变换器输出端的电压值等等。在一般情况下, $K_{нрб}$ 与功率电平和信号频率有关。

实践中, 最常使用效率。效率主要与频率有关。与变换系数不同, 效率是一个无量纲的量。它表示当变换器输出端有相同效应时, 在微波频率上测得的变换系数与用直流或低频交流(即校准测量电路的信号)测得的变换系数之比。

对于测辐射热电阻变换器和热敏电阻变换器来说, 效率是替代功率与接收变换器内吸收的微波功率之比, 即

$$K_s = K_{нрбсвч} / K_{нрбклл} = P_{заж} / P_{свч} \quad (1.7)$$

效率表征变换器的传输线损耗、辐射以及用校准电流功率替代微波功率的非等效性。

利用数值 K_0 时, 被测功率由下式确定

$$P_{\text{свч}} = P_{\text{в}} / K, \quad (1.8)$$

式中, $P_{\text{в}}$ ——功率计读数装置的示值(瓦)。

对功率计接收变换器提出的基本要求是, 在工作频段和工作电平范围内, 变换系数*和效率稳定, 并希望 K_0 尽可能接近于1。

在不苛求测量精确度的情况下, 只要效率的实际值和1的差别不大于功率计基本误差额定值的1/2, 则效率便可假定等于1。实际中所使用的接收变换器在0.03~37.5千兆赫的频段内 K_0 的数值为1.0~0.7。应当指出, 以往常用术语《变换系数》来代替《效率》。术语的这种变化是由于全苏国家标准16263—70《为保证测量、计量、术语和定义的统一而制定的国家法则》付诸实施的结果。

示值的稳定时间 当功率计用于自动化系统时, 这个特性显得特别重要。示值的稳定时间是指: 从被测信号加到仪器输入端的一瞬间到读数装置的示值与稳定值之间的差, 小于规定差值**的一瞬间所花费的时间。当示值的稳定过程具有指数特性时, 在过了 $(5 \sim 6)\tau$ 的时间后, 便认为过程是稳定的。这里, τ ——时间常数。

此外, 还有一系列表征功率计质量的参量, 包括抗过载能力、屏蔽程度、连续工作时间、尺寸、重量等。

为了确保功率测量的统一性, 在实际的标准中, 对分类法、功率计和接收变换器的参量表、它们的基本技术特性以及试验方法都做了详细规定。

* 术语《变换系数》常出现在俄文文献中。

——译注

** 根据ГОСТ13605—75的规定, 这个差值应不大于基本误差的1/2。

——原注

1.2 功率计的基本部件

任何一类功率计的基本部件都包括接收（初始）测量变换器（或一组变换器）和包括测量装置及读数装置的测量部分（图1.4, 1.5）。



图 1.4 吸收式功率计的结构图

接收变换器 在接收变换器中，微波电磁振荡能量被转换成热能、机械能或转换成易于进一步变换并用低频装置加以测量的电信号。

在微波功率计中采用的变换器有以下几种形式：

1. 热式变换器：量热变换器（其中包括干式量热计）、测辐射热电阻（热敏电阻）变换器、热电变换器等，

2. 有质变换器，

3. 电子变换器：用真空检波二极管和半导体检波二极管制作的变换器、气体放电变换器、基于《热》载流子效应的变换器、霍耳效应变换器等，

4. 利用铁磁共振效应的铁氧体变换器。

接收变换器完全决定了微波功率计的输入阻抗及其与传输系统波阻抗的匹配程度。这时，接收变换器又分为两大类，即吸收式功率计变换器（图1.4）和通过式功率计变换器（图1.5）。这两类变换器的根本差别在于：前者的接收变换器耗散掉全部馈入的微波功率，而后的接收变换器通常则只消耗掉通向负载的功率的一小部分。

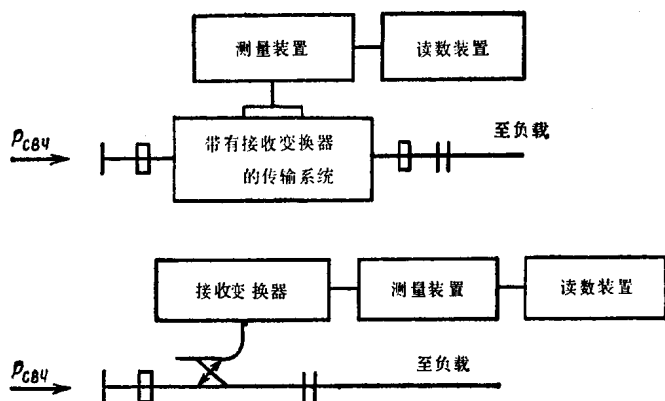


图 1.5 通过式功率计的典型结构图

由信号源馈入匹配负载的功率与吸收式功率计接收变换器耗散的功率之间的关系，可以表示为

$$P_{\text{耗散}} = \frac{P_B}{K_s} \frac{|1 - \Gamma_z \Gamma_B|^2}{1 - |\Gamma_B|^2} \quad (1.9)$$

式中， Γ_z ， Γ_B ——振荡器和接收变换器反射系数的复数值。

由 (1.9) 式可见，为了提高功率测量的精确度，接收变换器的反射系数应最小。在理想情况下， $\Gamma_B = 0$ 。

由通过式功率计接收变换器的灵敏元件和负载所产生的不均匀性对测量精确度的影响，将在第三章作更详细的说明。

除了最重要的计量特性（变换系数或效率、驻波系数）以外，表征接收变换器的参量还有：极限被测功率（对于测辐射热电阻变换器和热敏电阻变换器来说，则由偏置功率的最大值和最小值来表征*）、动态范围、线性度、抗过载能力等。

* 偏置功率是指加到变换器上的直流或低频交流功率。在此功率下，变换器灵敏元件（测辐射热电阻或热敏电阻）的阻值等于工作阻值。——原注