

《电子管技术》丛书之四

# 微波功率测量

13.4.598/537

73.4598  
537

《电子管技术》丛书之四

# 微波功率测量

(英) J·A·莱恩著

张 伦 邓流勃译  
潘 承 志 校

3/K500/09

(内部读物)

《电子管技术》编辑部

1976

微波功率测量

(内部读物)

---

出版： 电子管技术编辑组  
印刷： 同济大学印刷厂  
代销： 北京市中国书店  
机电产品样本代销处  
(琉璃厂西街 18 号)

---

工本费 0.36 元

## 毛主席语录

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

## 内 容 简 介

本书是英国出版的 *IEE* 丛书之一。书中以简明扼要的方式，全面论述了微波功率测量技术的许多重要方面，包括几种最常用的微波功率计的设计原理、结构，功率测量技术、校准技术等。原书着重于阐明测量的物理过程，回避了繁琐的公式推导。书末列出了较广泛的文献目录，对于深入了解某些技术细节的同志很有帮助。

本书可供从事微波测量技术的广大工人、科技人员及高等院校师生参考。

**33699**

## 译 者 序

翻译本书的目的主要是供那些只需对微波功率测量技术作一般性的了解，而不去进行专门研究的同志参考阅读。原书以专著形式，通俗论述了现代微波功率测量技术的许多方面。叙述着重于工作的物理过程及其应用潜力。读者通过阅读本书可以对整个微波功率测量领域有较全面的认识。

译者水平很低，译文中错误在所难免，切望读者批评指正。

# 原 序

(摘 译)

与电子工程学会的其它丛书一样，本专著的目的是在学术期刊上报导的新知识与其在工程实践中的应用之间起桥梁作用。

本专著适于具有大学毕业水平的读者阅读。叙述方法着重于实践，只包括了理论工作的要点。为了在一本专著中保持一定的格式，必须作重要选择，故特别注意精密测量中有着实际应用的方法和仪器。对于在日常测量或相对测量中所用的许多其它装置，在参考文献中给出了详细的细节。

J · A · 莱 恩

# 目 录

译者序	3
原序	4
<b>第一章 前言</b>	<b>1</b>
1.1 微波功率测量的意义	1
<b>第二章 基本定义 问题和方法</b>	<b>3</b>
2.1 定义	3
2.2 阻抗失配的影响	4
2.3 测量方法概述	5
2.4 功率计的普通型式	7
2.4.1 量热式功率计	7
2.4.2 电阻式毫瓦计	9
2.4.3 电阻式毫瓦计的电桥电路	10
2.4.4 座效率	13
2.4.5 薄膜测热电阻	14
2.4.6 机械力作用法	15
2.4.7 其它方法	15
<b>第三章 同轴线法</b>	<b>18</b>
3.1 量热法	18
3.2 测量大于 10 毫瓦功率的同轴测热电阻	21
3.3 同轴热敏电阻座和镇流电阻座	22
3.4 巴罗瓦克座	23
<b>第四章 波导法</b>	<b>25</b>



4.1 流动式量热计.....	25
4.2 静止式量热计.....	29
4.3 测量大功率的机械力作用仪器.....	30
4.4 测量小功率的机械力作用法.....	34
4.5 测量小功率的量热法.....	35
4.5.1 微量热计的设计与工作.....	35
4.5.2 干负载微量热计的设计.....	38
4.5.3 其它的干负载量热计.....	40
4.5.4 等温量热计.....	43
4.6 波导薄膜测热电阻(通过式).....	43
4.7 横向薄膜测热电阻.....	45
4.7.1 方法和原理.....	45
4.7.2 设计细节.....	47
4.7.3 横向薄膜的性能.....	50
4.8 电阻式波导毫瓦计.....	52
4.8.1 功率测量电桥的温度补偿.....	53
4.8.2 直流校准的精确度.....	55
4.8.3 测量座效率的阻抗法.....	58
4.8.4 替代误差.....	62
4.9 毫米波技术.....	63
<b>第五章 其它问题.....</b>	<b>65</b>
5.1 脉冲功率测量.....	65
5.2 其它装置的研制.....	66
5.3 微波标准的国际比对.....	68
<b>参考文献.....</b>	<b>68</b>
译后记.....	74

# 第一章 前 言

## 1.1 微波功率测量的意义

在整个射频范围都属重要的功率测量，在微波频段更具特殊意义。在频率约为 1000 兆赫或更高时(波长约 30 厘米或更短)，所用仪器和元件的尺寸可以与波长相比拟，一些基本量(电流和电压)已很难定义和测量了，特别是在波导中更是如此。

虽然“微波”这个术语通常是与波导而不是与同轴线相联系的，但是，近年来，在高达 10 千兆赫的频率上，同轴线的使用已日益增多。由此，本书将讨论一些同轴线技术，这些技术适用于 1 千兆赫或更高的频率。而这正是本书主要涉及的频率范围。

二次大战期间，曾拟制了好几种测量同轴线和波导中传输的功率的方法。不过，这些方法中，有许多已不适于现代应用了。由于复杂雷达和通信系统的发展，问题就变得十分严重。为了保证整个装置能有效工作，许多另部件中每一个的性能都必须以很高的精确度确定。对于大多数场合，现在对直流或低频测量所取得的精确度是令人满意的。但是，用于微波频率上的功率测量设备则往往不具实际应用所要求的性能。

这个特点清楚地反映在近十年来所发表的若干会议录和评述文章中。其中，*Rumfelt* 和 *Elwell* (1967) 所作的评述特别有价值。另一些综述文章收集在电子工程学会(*IEE*)所举办的微波测量技术会议的会议录中和精密电磁测量会议的会议录中(美国科罗拉多州, *Boulder*)，后者自 1958 年以来在(*IEE*)学报的仪器 and 测量汇刊上，每两年公布一次。*Carlin* 也曾作过全面的评述

(1963)。

功率测量占重要地位的应用场合是很多的，它们要求在很宽的功率电平上进行测量。表 1.1 总结了一些最重要的应用。

**表 1.1 功率测量的实际应用**

测 量 类 型	功 率 电 平
发射机输出，包括天线系统辐射的功率	平均值 $> 1$ 瓦，直到 100 千瓦，峰值高达 $10^7$ 瓦。
振 荡 器 输 出	平均值 $10^{-3} \sim 1$ 瓦
毫 [瓦] 计 的 校 准	平均值 $\approx 10^{-3}$ 瓦
标准信号发生器的校准	在校准电平上，平均值为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 瓦； 在衰减器的输出端下降到 $10^{-14}$ 瓦。

在所希望的电平上直接测量功率并不总是可能。为了能在很宽的功率范围内进行测量，常常在功率测量装置中加入已校衰减器或已校定向耦合器。因此，在这类应用中，衰减器和定向耦合器的性能很重要。本书中也包括对使用衰减器和定向耦合器的一些说明。

## 第二章 基本定义 问题和方法

在详细讨论各种方法之前，概述一下微波功率测量的一些基本特点是重要的。首先，必须弄清楚与波形以及信号源、负载和连接传输线的阻抗相联系的“功率”的含义。其次，必须强调的是，微波测量常常具有比低频测量大得多的系统误差。接头和其它一些元件的杂散损耗就是一例。为此，研制用来校准微波功率的“参考标准”是极为重要的。本书最后列出了有关这类标准的专门文献。基本工作原理不同的各种方法的相互比较是评定系统误差大小的一种最有价值的方法。

### 2.1 定 义

因为微波信号源有时是经脉冲调制的，所以，必须对平均功率、脉冲功率和峰值功率三者加以区分。前两者都是对时间的平均值，但取平均时所包含的时间间隔不同。如果取平均的周期与单一脉冲的持续时间以及与相继脉冲之间的时间间隔相比很大，则功率为平均功率。如果是对单一脉冲的持续时间取平均，则功率为脉冲功率。脉冲调制峰值处的射频功率称为峰值功率，且可定义为：

$$P(\text{峰值}) = \frac{V_p^2}{R} \quad (2.1)$$

式中， $V_p$  是吸收功率的恒定电阻  $R$  两端的峰值电压。如果脉冲是矩形脉冲，则峰值功率或脉冲功率的定义便完全一致。

然而，测量峰值功率是困难的。少数方法允许直接确定。但

是，较常用的方法是根据平均功率  $P_m$  来算出峰值功率  $P_p$ ：

$$P = \frac{KP_m}{Tf} \quad (2.2)$$

式中， $T$  = 在最大功率一半处的脉冲持续时间，秒；

$f$  = 重复频率，脉冲/秒；

$K$  是一个接近于 1 的系数，它与脉冲波形有关。对于具有平顶的梯形脉冲、余弦平方脉冲、以相同时间常数呈指数上升和下降的脉冲以及具有某种对称性的其它形式的脉冲来说， $K$  等于 1。对高斯脉冲来说， $K = 0.93$ 。

在说明“功率”与信号源、负载和连接传输线的阻抗关系时，必须谨慎。例如在测量打算采用匹配（无反射）负载的信号发生器的输出功率时，唯一满意的定义是等效资用功率（Woods, 1961）。等效资用功率就是“当在输出端的一个特定平面上测量时，在等于基频下标称信号源阻抗的无电抗负载上所耗散的功率”。这个量必须与最大资用功率（或简称“资用功率”）相区别。只有在负载和连同传输线在一起的发生器之间呈共轭阻抗匹配时，负载才能获得最大资用功率。这种测量方法必须采用匹配可调的装置，除方法不便之外，还常常引入明显的功率损耗。

等效资用功率的定义要求用来测量这个量的瓦特计相对于标称阻抗具有接近 1 的电压驻波系数（V.S.W.R）。定义不要求被测设备（信号源）有良好匹配，而是对测量仪器（负载）提出要求。在测量功率时，瓦特计的阻抗与标称阻抗有任何偏离都将引起偶然误差。这种偶然误差的大小将在 2.2 节中讨论。更详细的细节已由 Harris 给出（1962）。

## 2.2 阻抗失配的影响

在传输线上，电压反射系数的模  $|\rho|$  和电压驻波系数

$\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} = S\right)$ 的关系如下:

$$|\rho| = \frac{(S-1)}{(S+1)} \quad (2.3)$$

当信号源的复反射系数为  $\rho_s$  时, 复反射系数为  $\rho_L$  的负载实际吸收的功率  $P_1$  与等效资用功率  $P_0$  (即  $\rho_L=0$  时的功率) 之比为

$$\frac{P}{P_0} = \frac{(1 - |\rho_L|^2)}{|1 - \rho_s \rho_L|^2} \quad (2.4)$$

$\frac{P}{P_0}$  的上、下限可以用  $S_s$  和  $S_L$  来表示 ( $S_s$  和  $S_L$  分别是信号源和负载的电压驻波系数)。它们是,

$$\frac{S_L(1+S_s)^2}{(S_s+S_L)^2} \text{ 和 } \frac{S_L(1+S_s)^2}{(1+S_s S_L)^2} \quad (2.5)$$

当  $S_s=1$  时, 信号源与传输线匹配, 上、下限便重合一致, 即

$$\frac{P}{P_0} = \frac{4S_L}{(1+S_L)^2} \quad (2.6)$$

例如, 若负载电压驻波系数为 1.3, 则由电压驻波系数为 2 的信号源失配所引起的偶然误差大约为  $\pm 10\%$ 。

## 2.3 测量方法概述

微波功率测量的一个共同要求就是将两台功率计进行比对, 或将其中之一相对于参考标准进行校准。如两台仪器能耗散近似相等的功率, 则利用一台  $S_s$  接近于 1 的信号源通过将待测仪器直接代替标准, 便能完成校准。常常采用衰减量为 10 分贝的匹配衰减器, 尽管在波导测量中有时优先选用正向衰减很小 ( $< 1$  分贝) 的非互易铁氧体衰减器 (即铁氧体隔离器——译注)。如果

需要，就必须运用由方程 2.6 给出的修正系数。图 2.1 示出了这种实验装置。

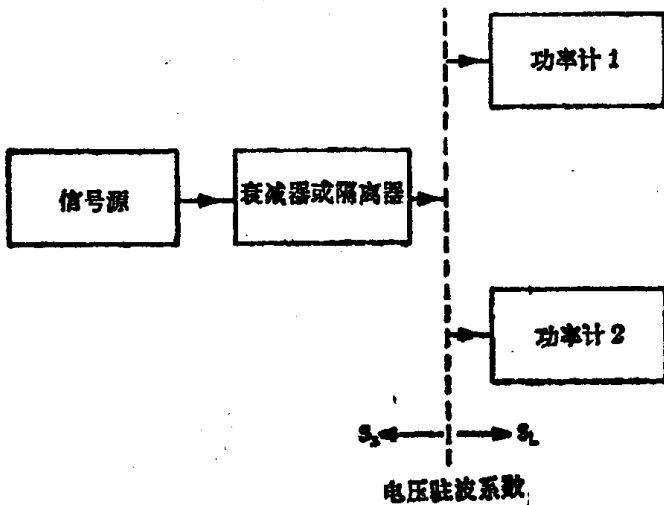


图 2.1 用替代法比对功率计

当两台仪器的功率电平不同时，可采用一个已校定向耦合器。图 2.2 示出将待校功率计  $P_1$  接至耦合器的正向辅助或“低电平”臂（臂 3）的装置。入射到此功率计上的功率等于进入主管（臂 1）的功率除以定向耦合器的耦合系数。这种被广泛采用的方法的优点是能同时比对两台仪器。而且，当所用耦合系数大于

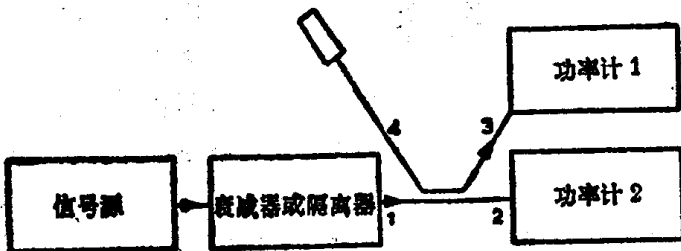


图 2.2 利用已校定向耦合器比对功率计

20 分贝时,从输出臂 3 看去的信号源匹配情况主要取决于臂 4 负载的电压驻波系数。因此,采用良好匹配的负载时,等效信号源反射系数将很小。

也可采用倒置装置,即将一低电平标准仪器接至臂 3。这种方案便构成所谓“通过式”功率计,它能使工作在 10 瓦电平上的瓦特计用标准毫瓦计来校准。只要定向耦合器的方向性很高(比方说为 40 分贝或更高),则瓦特计的校准就与信号源的失配大小无关。

## 2.4 功率计的普通型式

在功率测量中应用了好几种物理效应。但是,通常所使用的绝大多数仪器为热式功率计,即功率计利用耗散负载中产生的热量来测量输入功率。因此,这类功率计为终端式装置。与通过式仪器相反,在理想情况下,终端式装置将吸收全部入射功率,而通过式仪器则只吸收输入功率的一小部分。

### 2.4.1 量热式功率计

在第 3~5 章中叙述了同轴线和波导技术的细节。但是,所有各类功率计共同的基本原理是将输入功率变换成热。业已拟定了静止式和连续流动式两类量热计设计。在静止式量热计中,量热计是由绝热负载和某种测量温升的装置组成。实际上,常常利用替代技术来校准温度测量装置(例如热电偶),这种方法无需知道负载的热容量。因此,替代静止式量热计是用直流或低频功率来测量射频功率的一个转换装置实例。进一步的改进是采用由两个相同负载组成的对偶负载装置(图 2.3),负载与其周围环境呈局部隔离。一个负载吸收射频功率,另一个作为参考负载。负载之间的稳态温差就是射频功率的量度。这种对称系统减小了环



境温度变化的影响，而且能测量很小的功率。

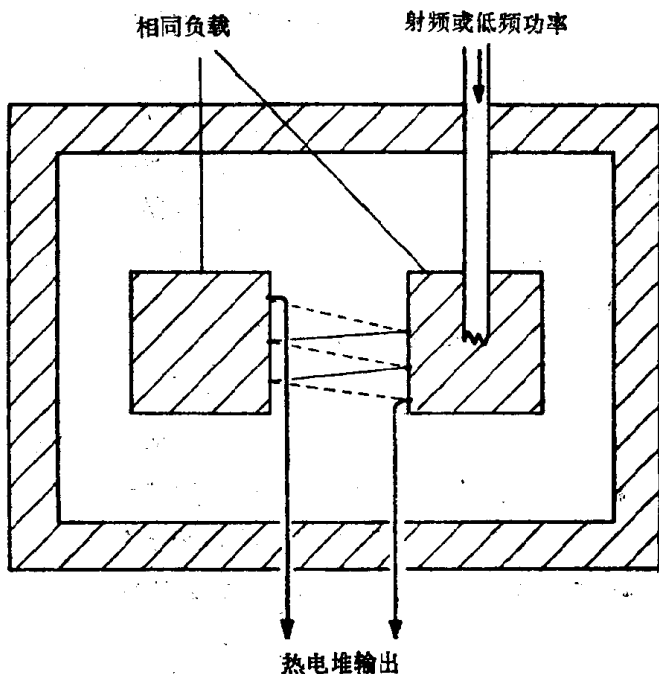


图 2.3 对偶负载量热计的原理

流动式量热计是由负载、循环系统和测量循环液体中产生的温升的装置组成。在负载中，吸收液体（例如水）将射频功率转变成热。负载吸收的功率  $P$  为

$$P = 4.187 m C_p (\Delta T) \quad (2.7)$$

式中， $m$  = 液流的质量，克/秒；

$C_p$  = 液体的比热，卡/克·°C

$\Delta T$  = 温升。

和静止式量热计一样，实际中，用等效直流功率或低频功率产生与待测射频功率相同的温升来校准量热计是方便的。这种方法无需知道流速、比热和温升。图 2.4 示出了基本电路。