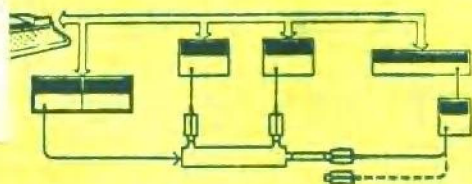


无线电计量测试丛书

5

高频、微波功率 的计量测试

冯新善 吴幼璋 赵基 陈成仁 编著



中国计量出版社

内 容 提 要

本书是《无线电计量测试丛书》的第五分册,着重阐述高频、微波功率测试中的基础理论、基本知识和实用问题。作者博采了高频、微波功率计量测试领域中的大部分重要文献和实际成果,从微波功率测量的基本概念出发,定义了关于微波功率测量中的各种常用名词术语,导出了它们的表达式。全书对微波功率的测量方法、各类功率计的原理、微波功率标准以及微波功率计的校准问题作了详尽的阐述和分析。此外,本书对微波功率的自动测量问题也作了较为详细的介绍。

本书可供具有中等以上文化程度从事无线电计量测试的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生阅读参考。

无线电计量测试丛书 5 高频、微波功率的计量测试

冯新善 吳幼璋 編著
赵 基 陈成仁

责任编辑 刘宝兰

—*

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

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 印张 9.75

字数 218 千字 印数 1—7 000

1987 年 3 月第一版 1987 年 3 月第一次印刷

统一书号 15210·671

定价 2.30 元

无线电计量测试丛书编委会

主 编： 汤世贤

副主编： 周清一 吴鸿适 张世箕 席德熊

编 委： (以姓氏笔划为序)

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿适

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 夏虎林 倪伟清 诸维明

席德熊 黄志洵

本分册责任编辑： 陈成仁 戈锦初

前 言

《无线电计量测试丛书》是根据中国计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想和统一安排，在中国计量测试学会的高度重视和实际支持下，由本编委会邀请作者、组织编写和审订的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各分册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书的先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员、大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

序

本书是无线电计量测试丛书第五分册，专题论述高频和微波功率的计量测试问题。书中所述的高频和微波的频域，包括了 $0.01\sim 110\text{GHz}$ 的宽广频率范围。为了行文方便，本书中均简称为“微波”。

在较低频率上，电压是描述信号强度的一个重要基本参量。但是，在射频以上的频段，无线电测量系统大多采用分布参数电路，特别是采用非 TEM 波型的单导体传输线和元器件时，电压失去唯一性定义，致使功率参量取代了电压参量的地位。正如本丛书第一分册《无线电计量测试概论》所论述的，在经典的分布参数系统的计量测试中，基本标准分为功率、阻抗（驻波和反射）和衰减三大类。

从下述实际例子中可知，功率测量在微波领域内的重要性。例如，对于一个雷达站，必须测量雷达发射机的输出功率和天线的辐射功率，才能确定雷达站的作用距离；在卫星地面站，发射机输出的高电平功率，是经放大器放大获得的，放大器的激励功率则是低电平功率信号。而天线接收到的信号，其功率电平是十分微弱的。因此，必须对各种不同大小的功率电平进行准确测量。

第一章首先阐述了微波功率测量的一般性知识和基本定义，旨在使读者对微波功率参量及其测量建立起正确的概念。

第二章到第五章详细介绍了几种常用的微波功率计。第六章详尽讨论了量热计和微量热计两种微波小功率标准。

希望通过这几章能使读者深入了解常用功率计的工作原理和测量方法，并全面了解各种功率计的误差来源及误差分析方法。

第七、八两章讨论了微波小功率计的计量检定问题。介绍了几种常用的微波功率座校准方法，并对其误差分析进行了详尽讨论。

第九章到第十一章介绍了微波大、中功率计和脉冲功率计的工作原理及其校准方法。

最后三章叙述了微波功率计量测试的新技术，着重讨论微波功率的自动测量和计算机技术的应用。

本分册力求符合本丛书的总体设计思想，名词术语、符号规范力求遵循丛书大纲的要求。本书的成书过程和审稿修定，是在编委会的具体指导下完成的。编委会副主编周清一（研究员）、责任编辑陈成仁和戈锦初同志多次详细审读，颇多教正，谨此一并致谢。

参加本书编写的有冯新善（第一、二、四～八章）、赵基（第九～十一章）、吴幼璋（第十二～十四章）、陈成仁（第三章）。全书由冯新善统稿。限于作者的学识水平，疏漏和错误在所难免，尚祈读者不吝赐教。

1985年6月

作者识于北京

目 录

序

第一章 高频和微波功率测量的一般知识	(1)
第一节 高频和微波功率测量技术	(1)
第二节 功率的几个不同定义和表达式	(2)
第三节 二端口网络对信号源反射系数的影响	(3)
第四节 低反射系数等效信号源	(5)
参考文献	(8)
第二章 测辐射热器法功率测量	(9)
第一节 基本原理	(9)
第二节 薄膜测热电阻座	(10)
第三节 热敏电阻座	(17)
第四节 铂丝镇流电阻座	(23)
第五节 测辐射热器法功率测量的误差分析	(26)
参考文献	(33)
第三章 测辐射热器电桥	(35)
第一节 概述	(35)
第二节 精密手动测辐射热器电桥	(40)
第三节 电流测量型自平衡电桥	(43)
第四节 电压测量型自平衡电桥	(49)
第五节 温度补偿型双热敏电阻自平衡电桥	(52)
第六节 四端引线热敏电阻电桥	(62)
参考文献	(69)
第四章 热电偶和晶体二极管式功率计	(72)
第一节 热电偶式功率计	(72)
第二节 薄膜-半导体热偶式功率计	(75)

第三节	晶体二极管式功率计	(77)
第四节	误差分析	(81)
	参考文献	(84)
第五章	量热式功率计	(85)
第一节	量热式功率计的原理	(85)
第二节	量热计的结构	(86)
第三节	测量方法和误差分析	(88)
	参考文献	(93)
第六章	高频和微波小功率标准	(94)
第一节	量热式小功率标准	(94)
第二节	微量热式小功率标准	(110)
第三节	高频电压标准用于功率测量	(117)
	参考文献	(121)
第七章	功率座的常用校准方法	(123)
第一节	交替比较法	(123)
第二节	单定向耦合器比较法	(128)
	参考文献	(136)
第八章	反射计技术用于校准功率座	(137)
第一节	反射计技术	(137)
第二节	调配反射计用作功率传递标准	(146)
第三节	功率方程法用作功率座的校准	(156)
第四节	不同接头型式的功率座的校准	(166)
	参考文献	(176)
第九章	微波中、大功率计量	(178)
第一节	概述	(178)
第二节	定向耦合器法	(178)
第三节	衰减器法	(182)
第四节	级联耦合器法	(192)
	参考文献	(201)
第十章	脉冲功率测量	(203)

第一节	概述	(203)
第二节	平均功率法	(204)
第三节	镇流电阻积分-微分法	(208)
第四节	晶体检波-视频斩波法(峰值检波法)	(210)
第五节	取样比较法	(212)
第六节	陷波技术法	(215)
	参考文献	(226)
第十一章	微波中、大功率计	(228)
第一节	微波中、大功率计	(228)
第二节	脉冲功率计	(235)
	参考文献	(241)
第十二章	程控功率计	(242)
第一节	第一类程控功率计	(244)
第二节	第二类程控功率计	(256)
	参考文献	(262)
第十三章	量热式功率标准自动化	(263)
第一节	理论基础	(263)
第二节	控制参考功率的自调节系统	(266)
第三节	控制辅助加热器的自调节系统	(268)
第四节	线性反馈的自调节系统	(272)
	参考文献	(275)
第十四章	微波功率校准系统自动化	(276)
第一节	自动修正失配因子的微波功率校准系统	(277)
第二节	宽带自动校准有效效率的微量热计	(281)
第三节	测量校准系数的自动校准装置	(284)
第四节	带网络分析仪的微波功率自动校准系统	(287)
第五节	用六端口反射计作微波功率校准系统	(293)
	参考文献	(299)

第一章 高频和微波功率

测量的一般知识

第一节 高频和微波功率测量技术

在直流和低频时，功率测量可以通过电流和电压的测量来完成。但是当信号的频率高于几十 MHz 乃至上百 GHz 时，工作波长已经与测量装置的尺寸相近，电流和电压缺乏唯一性定义，因此也便失去了其实际意义。此时，功率量值却可以直接地加以测量。

测量微波功率的最常用方法是“热”的方法。即把微波能量转换成热能，然后用测热的方法进行测量。常用的测热式功率测量仪器有量热式功率计，热电偶式功率计和测辐射热器式功率计等等。此外，还有用其它物理效应制成的功率计。如晶体二极管检波式功率计，有质功率计，霍尔效应式功率计和电子注功率计等。

功率的单位是瓦特，用符号 W 表示，它是由国际单位制 SI 基本单位导出的，由它还可以派生出千瓦、兆瓦以及毫瓦、微瓦等单位。常用的单位还有分贝毫瓦 (dBm)，可按下式计算：

$$A = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

式中， P 为以毫瓦为单位的功率值； P_0 为 1mW 的参考功率。

例如，电平为 10mW 的功率，其相对功率为 10dBm，1mW 为 0dBm，0.1mW 为 -10 dBm 等等。

第二节 功率的几个不同定义和表达式

在高频和微波功率的测量中，对于不同的场合，功率的概念有各种不同的定义。例如：信号源的资用功率、信号源传输到无反射负载上的功率（也称发生器功率）、信号源入射到任意负载上的功率以及信号源传输到任意负载上的净功率等等。

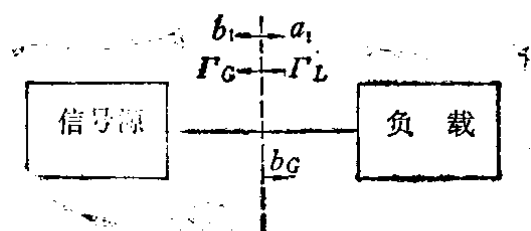


图 1-1 信号源和负载之间的功率传输

图 1-1 表示了信号源和负载之间的功率传输关系。图中： a_1 为信号源入射到负载的入射电压波波幅； b_1 为负载反射的反射电压波波幅； b_G 为信号源传输到无反射负载的电压波波幅； Γ_G 为信号源的反射系数； Γ_L 为负载的反射系数。

在图 1-1 的功率传输系统中，由于信号源和负载的反射系数都不为零。因此，入射到负载的入射电压波波幅 a_1 应为电压波波幅 b_G 在信号源和负载之间多次反射的总和：

$$a_1 = b_G + b_G \Gamma_G \Gamma_L + b_G \Gamma_G^2 \Gamma_L^2 + b_G \Gamma_G^3 \Gamma_L^3 + \dots + b_G \Gamma_G^n \Gamma_L^n \quad (n \rightarrow \infty)$$

由等比级数之和，可求出：

$$a_1 = b_G \left(\frac{1 - \Gamma_G^n \Gamma_L^n}{1 - \Gamma_G \Gamma_L} \right) = \frac{b_G}{1 - \Gamma_G \Gamma_L} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-1)$$

由式 (1-1)，求得信号源入射到负载上的功率 P_i 的表达式：

$$P_i = |a_i|^2 = \frac{|b_G|^2}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} = \frac{P_0}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \quad (1-2)$$

式中, P_0 为信号源传输到无反射负载上的功率。

$$\text{即} \quad P_0 = |b_G|^2 \quad (1-3)$$

同理, 负载反射的功率 P_r 应为:

$$P_r = |a_i|^2 |\Gamma_L|^2 \quad (1-4)$$

因此, 信号源传输到任意负载上的净功率为:

$$P_L = P_i - P_r = P_0 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \quad (1-5)$$

在特定条件下, 当负载的反射系数与信号源的反射系数成复数共轭时, 其反射系数满足 $\Gamma_L = \Gamma_G^*$ 的条件。此时信号源传输到负载上的功率最大。将条件 $\Gamma_L = \Gamma_G^*$ 和 $|\Gamma_L| = |\Gamma_G|$ 代入式 (1-5), 可求得信号源传输到负载的最大功率为:

$$\begin{aligned} P_A &= P_0 \frac{1 - |\Gamma_G|^2}{|1 - \Gamma_G \Gamma_G^*|^2} \\ &= P_0 \left(\frac{1}{1 - |\Gamma_G|^2} \right) \end{aligned} \quad (1-6)$$

P_A 是一个表征信号源特性的物理量, 它表明信号源可能输出的最大功率, 也称为资用功率或可利用功率。由式 (1-5) 和 (1-6) 进而得到传输到任意负载上的净功率 P_L 与信号源资用功率之间的关系:

$$P_L = P_A \frac{(1 - |\Gamma_G|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \quad (1-7)$$

第三节 二端口网络对信号源

反射系数的影响

从上一节分析可知, 信号源传输到任意负载上的净功率

P_L 与信号源的反射系数 Γ_G 和负载的反射系数 Γ_L 有关。在通常的条件下，两者都是复数量，因此它们的测量是比较困难的。于是在测量中将引入较大的误差。减小信号源的反射系数是提高测量准确度的有效方法。

当信号源与负载相连时，由于负载的反射系数的变化，将导致信号源振荡频率的变化和输出阻抗的变化。为了防止这种现象的产生，需在信号源和负载之间接入一个隔离元件。常用的隔离元件有衰减器、隔离器和环流器等。由于隔离元件的接入，信号源和负载之间的功率传输关系将产生变化。

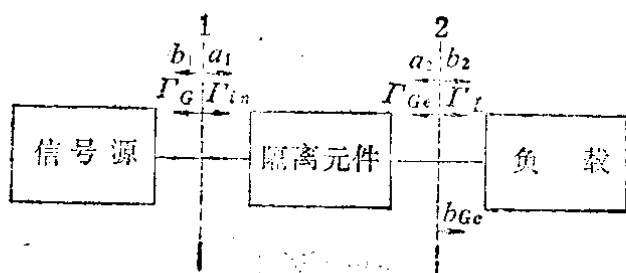


图 1-2 二端口网络插入信号源和负载之间的功率传输

在图 1-2 中， a_1 和 a_2 分别为二端口网络在端口 1 和 2 上的入射电压波波幅； b_1 和 b_2 分别为端口 1 和 2 上的出射电压波波幅； Γ_{in} 是二端口网络的输入反射系数， Γ_{out} 是其输出反射系数； Γ_G 和 Γ_L 分别是信号源和负载的反射系数。

对于图 1-2 的二端口网络，其散射方程为：

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1-8)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (1-9)$$

式中， S_{11} ， S_{12} ， S_{21} ， S_{22} 是二端口网络的散射参量。

在端面 2, 满足条件:

$$a_2 = b_2 \Gamma_L \quad (1-10)$$

由式 (1-9) 和 (1-10) 得到:

$$a_2 = \frac{S_{21} a_1 \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L}$$

于是, 式 (1-8) 可写成如下形式:

$$b_1 = S_{11} a_1 + \frac{S_{12} S_{21} a_1 \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L} \quad (1-11)$$

因此, 二端口网络的输入反射系数为:

$$\Gamma_{in} = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L} \quad (1-12)$$

同理, 当二端口网络在端面 2 激励时, 端面 1 满足条件:

$$a_1 = b_1 \Gamma_G \quad (1-13)$$

由式 (1-8)、(1-9) 和 (1-13), 可求得二端口网络的输出反射系数:

$$\Gamma_{G0} = \frac{b_2}{a_2} = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_G}{1 - S_{11} \Gamma_G} \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可见, 当二端口网络的传输系数 S_{12} 和 S_{21} 足够小时 (如小于 0.01), Γ_{G0} 主要取决于 S_{22} , 而与信号源的反射系数 Γ_G 关系不大。在实际应用中, 可选用低反射系数去耦衰减器、隔离器或环流器与信号源连接, 以获得低的信号源输出反射系数。

第四节 低反射系数等效信号源

一个由高方向性定向耦合器和功率检波器组成的稳幅信号源可以提供一个低反射系数等效信号源^[1]。等效信号源的输出反射系数仅仅取决于定向耦合器的特性, 而与实际信号

源的反射系数无关。图 1-3 为其方框图。

图 1-3 中的定向耦合器是一个三端口网络，其散射方程为：

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 \tag{1-15}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 \tag{1-16}$$

$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 \tag{1-17}$$

在端面 1、2 和 3 上分别有：

$$a_1 = b_G + b_1\Gamma_G \tag{1-18}$$

$$a_2 = b_2\Gamma_L \tag{1-19}$$

$$a_3 = b_3\Gamma_3 \tag{1-20}$$

式中， Γ_3 为功率检波器的反射系数。

由式 (1-15) 到 (1-20)，得出定向耦合器在端面 2 上的出射电压波波幅：

$$b_2 = b_3 \left[\frac{S_{21}}{S_{31}} + \left(S_{23} - \frac{S_{21}S_{33}}{S_{31}} \right) \Gamma_3 \right] + a_2 \left(S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \right) \tag{1-21}$$

如果端面 3 上的出射电压波波幅 b_3 由稳幅环 保持 不变，则 b_2 是由一个恒定不变的项和一个正比于反射波的项合成。比较式 (1-18) 和 (1-21)，可见两式具有相同的形式。于

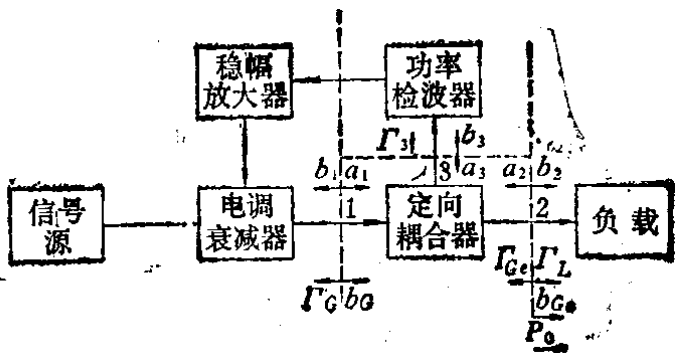


图 1-3 稳幅信号源的方框图

是，可以将式 (1—21) 写成如下形式：

$$b_2 = b_{G_0} + a_2 \Gamma_{G_0} \quad (1-22)$$

$$\Gamma_{G_0} = S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \quad (1-23)$$

式中， Γ_{G_0} 为等效信号源的反射系数。由式 (1—23) 可见， Γ_{G_0} 仅与定向耦合器的参数有关，而与实际信号源的反射系数无关。

当定向耦合器的方向性为 40 dB 时， $S_{32}/S_{31} = 0.01$ ，而定向耦合器的传输系数 S_{21} 是小于 1 的数。因此，当定向耦合器臂 1, 3 接匹配负载时，等效信号源的反射系数 Γ_{G_0} 近似等于臂 2 的反射系数 S_{22} 。

如果在定向耦合器的端面 2 上接入一个调配器，通过调节，可以使 Γ_{G_0} 趋于零。

Γ_{G_0} 的测量可用图 1-4 所示的系统。改变可调负载的相位和幅度，使 $b_3 = 0$ 。由式 (1—21)，等效信号源的反射系数为：

$$\Gamma_{G_0} = S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} = \frac{b_2}{a_2}$$

用测量线便可测出 $|\Gamma_{G_0}|$ 的值。

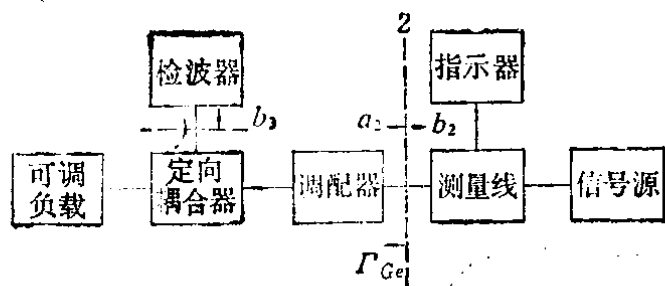


图 1-4 测量 $|\Gamma_{G_0}|$ 的系统

参 考 文 献

- [1] G.F.Engen, Amplitude Stabilization of a microwave Signal Source, IRE, Vol. MTT-6, No 2, 1958.
- [2] D.M.Kerns and R.W.Beatty 著,
陈成仁译, 波导接头理论和微波网络分析, 人民邮电出版社, 1982.