

无綫电測量

下 册

(超 高 頻 部 份)

梁 冊 編

內 部 教 材

北 京 科 学 教 育 編 輯 室

1961年12月

15.101013
11.5

无线电测量 下册（超高频部份）

*

出版者：北京科学教育编辑室

印刷者：中国人民解放军 535 工厂

787×1092 毫米 $\frac{1}{16}$ 印张 9 $\frac{5}{8}$

1961 年 7 月第一版

1961 年 12 月第二次印刷

定 价：1.59 元

內 容、簡 介

本书是作为无线电系各专业无线电測量課程教材的一部分而編写的,內容共分四章,前三章分別讲述超高频功率的測量与檢察、駐波及阻抗的測量、波长与頻率的測量等超高频測量的基本問題,最后一章概略叙述了超高频測量用信号源、輔助測量元件、成套測試設備和綜合測試儀器的情况。除作为教材外,本书也可供从事无线电工作的技术人員作为参考。

目 录

前 言	4
第一章 功率的测量与檢察	
§ 1—1 概述	7
§ 1—2 借测量电流或电压的方法测功率	9
§ 1—3 用测热电阻法测功率	10
1—3—1 测热电阻元件的种类和特性	10
1—3—2 测热电阻元件的选择	14
1—3—3 测热电阻支架的要求和指标	14
1—3—4 测热电阻支架的某些典型构造	16
1—3—5 测热电阻电桥綫路	23
1) 不平衡式电桥	23
2) 平衡式电桥	27
3) 自动平衡式电桥	29
1—3—6 测热电阻式功率計的誤差	32
§ 1—4 光度計法测功率	33
§ 1—5 量热計法测功率	34
1—5—1 測量功率的量热計的不同类型	34
1) 靜止式眞量热計	34
2) 循环式眞量热計	35
3) 循环式替代量热計	36
4) 循环式平衡量热計	37
1—5—2 循环式量热計的水負載	37
1—5—3 測量毫瓦功率的靜止量热計	40
§ 1—6 机械力效应式瓦特計	43
§ 1—7 霍尔效应式瓦特計	45
§ 1—8 超高频功率的檢察	47
1—8—1 常用檢波元件的类型和特性	47
1—8—2 晶体檢波器支架	49
1—8—3 檢波器的指示装置	51
§ 1—9 其他功率指示器	52
第二章 駐波及阻抗的測量	
§ 2—1 超高频阻抗測量的意义和重要性	54
§ 2—2 反射系数、駐波系数和負載阻抗的关系	55

§ 2—3 常用測量方法概述	57
§ 2—4 駐波測量綫的構造要点	60
2—4—1 帶槽傳輸綫的特性	61
2—4—2 探針在傳輸綫內的影响	62
2—4—3 探針固定架与探針的滑行裝置	64
§ 2—5 典型駐波測量綫的結構	66
2—5—1 同軸測量綫	67
2—5—2 平板同軸測量綫	68
2—5—3 波導測量綫	69
§ 2—6 用測量綫測試駐波系数	71
§ 2—7 用測量綫法測定阻抗	75
§ 2—8 用定向耦合器測量反射系数及阻抗	79
§ 2—9 用电桥測量阻抗和反射系数	82
1) 双 T 形波導电桥	82
2) 同軸綫式導納电桥	83
§ 2—10 阻抗測量数据的自动显示	84
2—10—1 自动駐波測量綫	84
2—10—2 反射系数动态显示仪	84
2—10—3 自动阻抗示迹仪	85

第三章 波长与频率的測量

§ 3—1 概述	90
§ 3—2 超高频波长計按所用諧振器的类型和按諧振指示方法的分类	90
§ 3—3 在双綫式傳輸綫上測量波长	93
§ 3—4 同軸綫波长計	95
3—4—1 半波长式同軸綫波长計	95
3—4—2 四分之一波长式同軸綫波长計	97
3—4—3 电容負載式同軸綫波长計	99
§ 3—5 空腔波长計	100
3—5—1 空腔波长計的主要問題概述	100
3—5—2 空腔波长計的波型图	102
3—5—3 空腔波长計的常用类型及其結構原理和举例	104
1) H_{011} 式波长計	104
2) H_{111} 式波长計	108
3) E_{010} 式波长計	111
3—5—4 空腔波长計的定度	113
3—5—5 空腔波长計的測量准确度及与同軸綫波长計的关系	115
§ 3—6 諧振波长計的接入方式	117
§ 3—7 用光学方法測量波长	119
§ 3—8 超高频频率的測量	121

3—8—1 超高频频率标准	121
1) 原始频率标准	121
2) 二次频率标准	121
3) 分子和原子频率标准	123
4) 标准谐振腔	124
3—8—2 与频率标准进行比较的方法概述	124
3—8—3 超高频外差式频率计	125
第四章 超高频测量用信号源及辅助元件	
§ 4—1 概述	127
§ 4—2 超高频测量用信号源	127
4—2—1 超高频振荡器的不同类型	128
4—2—2 速调管振荡器及其频率稳定	130
1) 速调管振荡器的高频结构	130
2) 速调管电源及其稳定度的要求	131
3) 速调管振荡器的频率稳定装置	131
4—2—3 超高频振荡器的调制	132
§ 4—3 超高频测量用辅助元件	134
4—3—1 衰减器和隔离器	134
1) 截止式衰减器	135
2) 吸收式衰减器	136
3) 极化吸收式衰减器	138
4) 谐振吸收式和场移式衰减器	140
4—3—2 终端器	140
4—3—3 阻抗变换器	141
4—3—4 可调短路器	142
4—3—5 移相器	143
4—3—6 定向耦合器	144
§ 4—4 实验室用成套的超高频测量设备及其组合举例	147
§ 4—5 便携式超高频综合测量仪的构成及其举例	149
参考书	154

前 言

本书是作为无线电系各专业“无线电测量”课程教材的一部分而编写的。它的任务，是讲述超高频范围内基本电参量的测量问题。这里所说的超高频范围，是指从 50 或 100 兆赫左右开始，到目前所能掌握的最高频率为止的一个极其宽广的频段。这个频段的主要特点，是从集中参数电路过渡到分布参数电路。此项过渡实际上可以为两个阶段，即由集中参数电路过渡到传输线，再由传输线过渡到波导。第一个过渡从 50 或 100 兆赫左右开始，此时，由于集中参数电路及其元件的尺寸愈益接近波长，电路中的辐射损耗大量增加；同时，由于频率增高，传导损耗和介质损耗也均愈益增大，结果使集中参数电路的效率显著降低，电路间的杂散耦合愈趋严重。在另一方面，由于工作波长变短，以传输线段构成电路元件其尺寸并不显得十分庞大。因此，在这种频率下，便开始放弃集中参数电路而改用传输线段构成的高频电路。这种工作于 TEM 型波的传输线元件的适用频率范围，大约可以达到 3000 兆赫（即波长 10 厘米）。随着波长的愈益变短，双绞式传输线亦同样由于辐射的发生而效率降低；同轴传输线也由于尺寸过小而难于加工，或因高次型波的出现而致难于应用。与此同时，空心波导管和由它构成的空腔谐振器的尺寸则已经合乎实用，于是便开始了上述第二阶段的过渡。（当然，上述两个过渡的界线并不是按所说的频率截然划分的，而是在相当宽的毗邻频带内，带有逐渐过渡和参差采用的性质）。工作于最低次型波的波导元件，目前可以一直应用到毫米波范围。虽然波导尺寸随频段愈高而愈小，但目前在掌握最短波长方面所受到的限制（约在 3 毫米左右）主要尚不是由于所用的小尺寸波导元件的难于制造，而更主要的还是由于在这样短的波长下缺少有效的振荡源。当今后所掌握的波段减短到必须在波导元件中采用高次型波以避免过小的尺寸时，问题的性质便接近于光学技术，那时又可能要出现另一次新的过渡了。

在超高频范围内，用以产生振荡的电子管类型的一再更迭也是这个频段的另一重要特征。从数十兆赫开始，由于电子渡越时间效应开始显著，产生振荡便必须采用各种小渡越角的特殊三极管（如橡实式、门钮式等）。这类管子配上集中参数式 LC 回路最高只能用到 300 兆赫左右，配以混合式 LC 回路最高也不能超过 1000 兆赫。大约从几百兆赫起，便开始采用一些便于与同轴式振荡回路直接结合的盘封式三极管（如灯塔管、铅笔管、金属瓷管等）。由于这类管子毕竟还要受到渡越时间的限制，目前这种振荡器最高只能达到 3000—4000 兆赫。超高频范围的更高频段的开拓是当制成了一些不受渡越时间限制，反而利用了渡越时间的速度调制型振荡管（如速调管、空腔磁控管、行波管等）才大为发展。在测量工作中大约从 1000 多兆赫开始便依靠反射式速调管作为产生小功率连续振荡的主要来源。目前这种管子的最高频率限度已能达到 70—75 千兆赫（即波长 4—4.5 毫米左右）。虽然有个别实验性的磁控管的振荡波长已能短到 2.6 毫米，返波管振荡器可以达到 1.5 毫米，但比 2—3 毫米更高的频率，目前主要还是依靠用晶体倍频器或铁氧体倍频器等来获得；而且根据研究已可断定在这样高的频率电真空器件已无多大发展前途，因此目前正在寻求一些新的产生振荡的方法。

关于超高频范围内频段的划分及名称目前尚未完全统一。现举比较通用的一种分法如下

表:

频段名称 (外文缩写)	频率范围	波长范围	波段名称
甚高频 (BBV, VHF)	30—300 兆赫	10—1 米	米波
超高频 (VBV, UHF)	300—3000 兆赫	10—1 分米	分米波
特高频 (CBV, SHF)	3—30 千兆赫	10—1 厘米	厘米波
极高频 (GBV, EHF)	30—300 千兆赫	10—1 毫米	毫米波

除按上表划分外,有时还把大约 1000 兆赫以上的整个超高频带的波长范围统称为微波。在超高频技术中,有时还愿意把某些最常用型号的波导管或振荡管所适用的波长范围,用该波段的中心波长称之,或用某个字母代称之。例如通常把 10 厘米左右的常用波段总称为 10 厘米波段或 S 波段; 3.2 厘米左右的波段称为 3 厘米波段或 X 波段; 1.25 厘米左右的波段称为 1 厘米波段或 K 波段等等。

根据上述超高频技术的特点,可以想像到超高频无线电测量不论在测量任务,测量方法及所用仪器方面都有一些不同于低频和高频测量的特点。首先,集中参数电路的放弃和分布参数电路的采用就给无线电测量带来了一个根本问题,就是在分布参数电路中一般不再有可供测量电流和电压的确定的端点。在传输线式电路中电压和电流是分布的,因而在某一点上测出它们的单一数值并无多大意义,除非测量出这些参量沿整个线路的分布情况;而在波导系统中甚至电压和电流的概念也失去了实际意义;同时在较高的超高频段内,一般也难于获得真正能测量电压和电流绝对值的仪表。由于这些原因,在超高频范围内电压和电流绝对值的测量已基本失去了重要性,在微波范围内则根本不予测量。但在另一方面,不管在何种分布参数系统中,某一元件所发出或所吸收的功率以及沿传输线通过的功率的绝对数值都永远有其实际意义,加以测量技术上的某些便利,因而在超高频范围内,功率的测量就占据了与较低频率下的电压、电流测量同等重要的地位。

在超高频范围内,另一经常测量其绝对值的参量是振荡的频率或波长。虽然在超高频范围内频率与波长的测量方法与普通高频时没有原则区别,但由于波长的缩短,在传输线路上直接测量波的长度已成为可能,因而波长的测量比在普通高频时具有更为现实的意义,而且与频率的测量有了更加明显的区别。日常用得最多的谐振波长计在超高频范围内的确具有了长度测量的意味,并且成为日常测量波长和从而确定振荡频率的主要方法。在毫米波范围内,除仍沿用谐振波长计方法外,还开始采用光学的方法测量波长。直接测量频率在超高频范围内反不如波长的测量那样经常进行,它的测量方法仍是和普通高频时一样,即主要采用比较法,不同之点是需要超高频的频率标准。

在超高频传输系统中阻抗匹配问题具有非常重要的意义,因而阻抗的测量也有很大的重要性。在分布参数系统中,阻抗的概念与普通电路不尽相同,这里阻抗的测量大都只要求测出被测阻抗对于传输线特性阻抗的比值,即所谓一般化阻抗值。因此凭借测量传输线上的驻波图形或反射系数,从而测定阻抗,就成为超高频范围内测量阻抗的主要方法。另外在普通频率下普遍采用的电桥法和谐振法,在超高频时虽仍有采用,但已远不如在普通频率下那样重要和普遍。

功率、阻抗和频率（或波长）是超高频中最常测量的三个基本参量。对于一些其他二次参量（如衰减、 Q 值、介质常数等等）的测量一般都可归结到这三种基本参量的测量而加以解决。按照本书的编写目的，在本书中主要将只讲述上述三项基本参量的测量方法、及有关的测量仪器和测量技术等問題，分別在前三章中加以討論，对于其他参量的测量不予論述。此外，由于超高频振荡产生方法上的特点，反映到超高频测量用信号源上也有一些特殊問題需加論述；另外进行一項超高频测量，除需要前三章所述的测量功率、阻抗和频率的主要仪器和信号源外，一般还需要一些輔助测量元件（如衰减器、調配器、定向耦合器等）配合使用才能完成；故本书最后特另辟一章，专门概述各种超高频测量用信号源及輔助元件的結構类型和簡單工作原理，并举例說明利用这些設備組成實驗室成套测量装置及便携式綜合測試仪器的方法，以增加讀者对超高频测量設備的全面知識。

鉴于目前已經出版的超高频测量方面的中文书籍不多，本书內容除适应課堂教学的需要外，对于所讲問題还力求比較詳細，并吸收了若干实际資料，以便不仅对于学生而且对于有关超高频的工作人员有一定的参考价值。然而由于本书目的究非作为一本超高频测量的专门参考书而编写，所以不論在內容的广度和深度上均受到一定限制。为适应学生进一步钻研本課程的需要，在书末列出了超高频测量方面的几本主要参考书的名称和代号，并且对本书中未加詳細討論的某些問題則于正文中用括弧注明了有关参考书的代号和頁数，以便学生查閱。至于期刊文献則未列出。

由于编写時間仓促；以及編者水平的限制，本书在內容和文字上不免有欠妥和錯誤之处，希望讀者提出批評和指正。

編 者

第一章 功率的測量与檢察

§ 1—1 概 述

如同前言中所述，功率的測量在超高频範圍內占有特別重要的地位。功率的測量通常是指确定功率的絕對数值。这种任务在測定发射机的輸出功率、測定接收机的灵敏度、或測量傳輸綫中所通过功率的大小等情形下均屬必要。測量功率絕對数值的仪器通常称为功率計或瓦特計（包括毫瓦計、微瓦計）。另外，在有些情形下我們只須要檢察測量裝置的某部分有无超高频功率存在，或进而需要指示或确定其相对大小，这种任务称为功率的檢察，而所用仪器通常称为功率指示器或檢波器。本章將討論这两方面的問題。

由于功率的測量与信号的发送和接收都有关系，所以超高频功率測量的数值范围会从若干千瓦向下延伸到微瓦甚至热騷扰的电平；而且被测功率有时是連續的，有时是脉冲的或其他調制的。由于这些不同情况，加以超高频頻率范围的寬广，所以在超高频功率測量方面曾經設計出很多种彼此不同的方法，它們各有其特点和适用范围。下面首先略述本章所將讲述的几种主要方法的基本概念及其在本章中所占的地位。

像普通高频范围一样，測量超高频功率的最簡單方法是凭借測量已知电阻上的电压或电流以測定功率。但是这种方法只可能在数百或至多 1000 兆赫以下的頻率范围內采用。工业产品中有按此原理制成的直讀式瓦特計，由于其作用原理比較簡單，在本章內將只作概略叙述。

在微波范围內測量功率主要是依靠把它轉变为热來測量。測热的方法又有多多种，其中之一是借測量吸收高频功率而发热的电阻的阻值变化作为功率的量度。由于这种方法曾在測量輻射热能时应用，故在文献中习称为电阻輻射热能測量計法，而这里所用的对温度敏感的电阻元件便称为电阻輻射热能測量計；为了方便起见，以下把它簡称为測热电阻。常用測热电阻的类型有电阻温度系数为正的金属細絲或薄膜，和温度系数为負的半导体（称为热敏电阻）等多种。在此附带指出，电阻輻射热能測量計一詞也曾被用来专指正温度系数的測热电阻；为避免混淆，有时便将正温度系数測热电阻中一种主要类型（即用极細的鎢絲制成者）借名称之为鎢流电阻。由于測热电阻本身之敏感，加以应用电桥方法可以測定很小的电阻变化，所以測热电阻法是測量微波功率最灵敏的方法。其最低測量限度可以达到微瓦范围，其最大測量限度因限于測热电阻的功率容量，一般不超过 10 毫瓦，特殊者亦不超过一瓦。在頻率限度方面，若适当选择測热电阻及其高频支架的构造，此种方法能够一直应用到厘米波甚至毫米波范围。因此，測热电阻式瓦特計是在整个超高频范围內測量小功率的最主要工具（有时特称之为微瓦計）；而且，把它配以适当的附件还有可能扩展到測量中等功率或大功率（注：在微波范围內通常把 10 毫瓦以下称为小功率，1 瓦或 10 瓦以上称为大功率，其間称为中等功率）。所以，測热电阻法是本章所將討論的第一个重点。

另一种利用超高频功率热效应的測量方法，是根据吸收了被测功率的特殊鎢絲灯泡的发光强度来判定該功率的大小，这种方法称为光度計法。光度計法通常只能在波长不短于 10 厘

米左右的範圍內測量中等或稍大的功率，加以具有一些其他缺點，因而應用得不甚普遍，故在本章中只擬略加論述。

對於若干瓦以上的較大微波功率，可以直接測量該功率所轉化成的熱量的多少，以求得功率的大小，這種方法稱為量熱計法或熱量計法。為了較快的達到穩定狀態，通常採用流動的水或其他流体作為量熱的媒質。當水流經適當設計的“水負載”時，被測微波功率便直接被水吸收而使水變熱，功率的大小便可根據水的流速及進出口水的溫度差計算之，或與已知的直流或低頻功率相比較以測定之。由於此種測量方法的絕對性（即測量結果可以根據質量、長度、時間等基本物理量計算）和一般能夠獲得較高的準確度，量熱計式瓦特計不僅作為整個超高频範圍內測量大功率的主要工具，而且通常作為校驗其他瓦特計的依據。然而量熱計法過去由於其所需設備比較龐大和作用比較遲緩，特別是不能用以測量小功率，因而一直感到它有一定的缺點和限制。但在近幾年中，已經設計出若干種採用較簡便的干式負載，并可測功率低至1毫瓦以下的小功率量熱式瓦特計，而且這類瓦特計特別適宜於較短的厘米波及毫米波範圍，從而便彌補了量熱計法的歷來缺陷。由此可知，量熱計法應該作為本章研究的第二重點。

除利用電磁波的熱效應之外，利用電磁波的機械力效應也可測量微波功率。由於波導內的電磁波有一定的機械力作用於波導壁，若將一部分波導壁做成薄膜狀，便可根據其位移來確定波導中所通過的微波功率的大小。根據類似原理，也可設法使電磁波的機械力作用於懸在波導中的金屬片，使之發生偏轉以測量功率。這類方法目前雖可用來準確測量中等以上的微波功率，但由於這種測量設備的構造頗為纖弱，尚不適宜於日常工作中採用，只是在功率的絕對測量方面頗有發展前途。此外，利用置於波導中的半波導體片的霍爾效應所產生的電動勢，也可以測量傳輸綫中的通過功率。用這種方法測量傳輸綫中的通過功率有很大優點，但目前還處在繼續改進和發展階段。對於上述兩種較新的方法本章將予概略介紹。（參閱書3，第162—167頁；書4，第62—77頁）。

微波功率的檢察主要採用晶體檢波器。然而，在需要增加檢波元件的結實和穩定性時也採用特制的真空二極管檢波器；在需要嚴格的平方律響應時也採用前述的鎮流電阻作為檢波器。將檢波器的輸出直接用直流微安表指示，或者將其放大後再用电表指示，便可表明微波功率的存在並顯示其相對大小。在較大功率電平下，有時也採用小氬管和熱電偶等作為功率指示器。功率檢察裝置，特別是晶體檢波器，通常是微波測量設備中必不可少的部件，故本章中亦將予以適當的重視。

在實際工作中，關於測量和檢察功率的任務一般有下列兩種不同情形。一種是欲測試某一發生器或傳輸綫路，在其終端可資輸出的功率，亦即在於與其匹配的負載中所能給出的功率數值。此時所用的瓦特計本身應該兼作與其傳輸綫匹配的假負載，以便全部吸收所測的可資功率，屬於這種用途的瓦特計通常稱為吸收式瓦特計。另一種情況是欲測量某一傳輸系統在其實際工作中，通過傳輸綫路輸送到真實負載（不一定是匹配的）中的功率數值。此時所用瓦特計應該跨接在傳輸綫路上，只吸收通過功率的很小一部分，作為欲測功率的量度。這種瓦特計稱為通過式瓦特計。雖然每一瓦特計按其工作原理和方式，一般可以區分它系屬於吸收式瓦特計，或系屬於通過式瓦特計（像上面所述的測熱電阻式、量熱式等都是吸收式瓦特計，機械力作用式和霍爾效應式是通過式瓦特計）。但此兩種瓦特計在應用中也能夠互相變通使用，例如把吸收式瓦特計用定向耦合器或其它類似配件耦合到傳輸綫路上，分取傳輸綫

路中通过功率的很小已知部分测量之，也可达到测量通过功率的目的；反之，把通过式瓦特计与一只匹配负载联合使用也可起到吸收式瓦特计的作用。由于大多数瓦特计属于吸收式瓦特计，以及吸收式瓦特计通常系作为测量的目的而使用；而通过式瓦特计则多系为监视的目的而使用，故前者应该占有比较重要的地位。至于检测功率用的检波器和功率指示器按其工作性质一般均类似于通过式瓦特计，很少把它接到主传输线路的终端吸收全部功率。虽然有些晶体检波器也作成终端负载的形式，但在使用中大都是接于分支线路的终端或某些仪器的输出端作为指示之用。

超高频功率计，如同普通交流瓦特计一样，所测出者是为交流周期中的平均功率。在测量等幅高频振荡时平均功率的定义已无疑义，但在测量脉冲调幅的高频振荡（例如脉冲雷达信号）时，便应对下列两种平均功率的定义加以区别：其一是在脉冲出现的时间内的平均功率；另一是在脉冲重复周期内的平均功率。为避免混淆，通常将前者称为脉冲的巅峰功率或简称脉冲功率，后者称为脉冲的平均功率。一般超高频功率计，由于其响应的时间常数通常均大于脉冲的重复周期，故其测出结果均是脉冲的平均功率。测出平均功率之后欲求巅峰功率，一般就可按照下列简单关系计算（假设为理想的方形脉冲），即

$$P_{\text{脉冲}} = \frac{1}{F\tau} P_{\text{平均}} \quad (1-1)$$

式中 τ 是脉冲的宽度， F 是脉冲的重复频率。

§ 1-2 借测量电流或电压的方法测功率

如上述介绍，借测量电流或电压的方法测量功率主要只适用于微波以下的超高频范围；通常按此原理做成直读的吸收式瓦特计。此种瓦特计中包含一个与传输线阻抗相匹配的负载电阻和一个直接按负载功率刻度的伏特计或安培计。图 1-1 即例示出这种瓦特计的一种构成方法，作为同轴传输线的负载采用棒形碳质电阻 1，因该电阻的形体长度，在超高频范围内较之波长不可以忽略，为了保证与传输线阻抗达到良好匹配，必须将其作为同轴线中心导体的

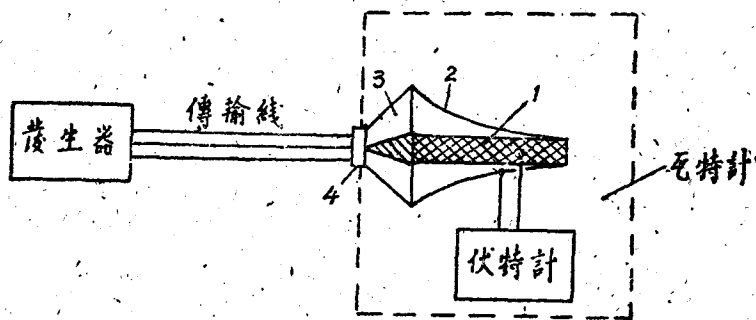


图 1-1 用测量负载电压的方法构成的吸收式瓦特计

延长部分来看待，因此，在该电阻外面加了一个作为同轴线外导体的屏蔽罩 2'。该屏蔽罩之所以做成截面按指数律变化的圆锥形，是为了使在它的任何截面上向远端看去的负载电阻数值均等于该截面处的同轴线特性阻抗。在这种锥形负载电阻的近端与同轴线插口 4 之间，再加入一个过渡线段 3，便可保持与外接同轴传输线达到良好匹配，成为近乎无反射的终端

負載。為了測量此負載中所吸收的功率，圖中系在負載電阻的一部分上跨接了一個伏特計（只跨接一部分是為了減低伏特計的輸入阻抗對傳輸綫阻抗匹配的影響，同時也可以擴大量程）。這種伏特計通常採用晶體二極管或特制的真空二極管檢波，將檢波後的電流通入直流毫安計便可指示負載中的平均功率。當輸入高頻功率為脈沖調制時，在檢波器的負載電阻上跨接一個電子示波器或與檢波管串聯一只靜電式伏特計也可以直接測量脈沖功率。

作為上述伏特計有時也以熱偶式毫安計串聯適當的電阻充任。將熱偶式安培計串聯到同軸綫中心導體內以測量負載電流的方法實際上較少採用，即使採用不接觸式的热電偶也不易保證其熱絲的接入不影響阻抗匹配。

在超高頻傳輸綫上跨接一個簡單的伏特計作為通過式瓦特計在原理上也是可能的，不過在實際上不甚易於實現。這是因為，在一般情況下，傳輸綫的真實負載不見得與其特性阻抗相匹配，於是因有駐波存在，沿綫各點的電壓數值便不相等，這時若欲測出負載所吸收的通過功率，必須測出傳輸綫上一個最大點和一個最小點的電壓數值才可根據下式算出：

$$P_{\text{通过}} = P_{\text{入射}} - P_{\text{反射}} = \frac{U_{\text{入}}^2}{R_0} - \frac{U_{\text{反}}^2}{R_0} = \frac{1}{R_0} (U_{\text{入}} + U_{\text{反}})(U_{\text{入}} - U_{\text{反}}) =$$

$$= \frac{U_{\text{最大}} U_{\text{最小}}}{R_0} \quad (1-2)$$

式中 R_0 是傳輸綫的特性阻抗。為此，必須要求伏特計能夠沿綫移動，這在同軸傳輸綫上便不易辦到，除非在同軸綫外導體上開槽，將伏特計通過可以沿槽移動的探針耦合到綫路上（如同以後將要講述的測量駐波比的開槽式測量綫一樣）始可，但是用這樣的裝置來測量電壓的絕對數值是有困難的。

大致說來，用上述測量電壓的方法做成的吸收式瓦特計，可以在 50 到 1000 兆赫的頻率範圍內，測量 60 毫瓦到 150 瓦的功率準確到 7—10%；用測量電流的方法，一般只能在頻率不超過 300 至 500 兆赫的範圍內，測量中等功率準確到 $\pm 10\%$ 上下。

§ 1—3 用測熱電阻法測功率

如同 §1—1 所概述，測熱電阻法是測量微波功率的最重要方法。有關這種方法的主要問題為：（1）測熱電阻元件的選擇；（2）支持測熱電阻元件以與傳輸綫相匹配的測熱電阻支架（或稱測熱電阻接頭或高頻頭）的設計；（3）輔助綫路（在此通常是指用以測量電阻變化從而顯示功率數值的電橋綫路）的設計。下面擬對這幾方面問題作比較詳細的研究。

1—3—1 測熱電阻元件的種類和特性

如前所述，測熱電阻的兩種主要類型為正溫度系數的鎢流電阻和負溫度系數的熱敏電阻，此外還有一些其他形式的正溫度系數的測熱電阻。

所謂鎢流電阻，其典型構造是把很短一段極細的鎢絲（直徑 1—2 微米），支持於黃銅端子之間，置於絕緣管套之內（如圖 1—2）。這樣細的鎢絲是將拉成適當粗細的鍍銀鎢絲，裝上兩端引綫之後，再用硝酸溶液蝕去銀皮，露出鎢心而成。鎢流電阻的尺寸通常使之比工作波長盡量的短，同時還要使其電阻數值不太低，以便易於與波導傳輸綫相匹配（例如 200 歐上下）。因此採用這種結構的鎢流電阻，一般最高只能用到 3 厘米波段。若欲用於 1 厘米波段，則不採用管套而將鎢絲直接裝於波導內部的支持點上。這種以極細鎢絲構成的鎢流電阻具有顯著的正溫度系數，其電阻變化近乎與其中所消耗功率的變化成正比，這也意味著鎢流

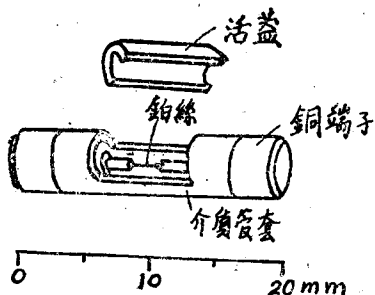


图 1—2 铂丝钎流电阻的外形

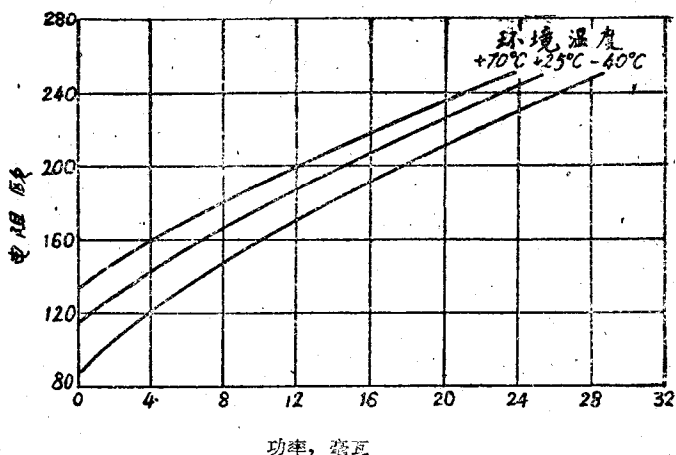


图 1—3 一种典型钎流电阻的特性曲线

电阻对于电流或电压具有近乎平方律的响应，如图 1—3 所示的一种典型钎流电阻的电阻-功率特性曲线 $R=f(P)$ 相当接近于直线，可以作为这种响应的例证。这种钎流电阻工作在 200 欧的工作点，所需的起始加热功率（或称偏功率）约 15 毫瓦（即在其中需通以直流或低频的偏电流约 9 毫安），其所能经受的最大功率约 30 毫瓦。这种钎流电阻的灵敏度，即 $\beta = \frac{dR}{dP}$ 近乎不随工作点改变，其值大约在 5 欧/毫瓦之谱。由图 1—3 还可看出，这种钎流电阻的特性受环境温度的影响不算非常显著。

另一种便于安装在同轴线终端的钎流电阻的构造如图 1—4 所示，它是把两根细铂丝跨接在一个圆形云母片上三个渗银的接点之间。当将这样的钎流电阻元件安装到同轴线支架中时，位于中间的那个接点便与同轴线的中心导体相接触，而其余两个接点则都与同轴线的外导体接触，于是，同轴线的终端电流便按相反方向流过这两段铂丝，这个情况使得负载电阻的残余电感减至最小，因而便于在宽频带内实现匹配。

在没有特制的钎流电阻的情况下，亦可把通常用来保护电表用的 5 毫安或 10 毫安的小保险丝充当正温度系数的测热电阻，但它们的高频性能要差得多。

当欲增大钎流电阻的功率容量时，也可用特制的钨丝灯泡作为测热电阻。例如以直径约 0.001 厘米、长度不超过 1 厘米的单根钨丝作成的灯泡，可以用于 10 厘米的波长而消耗功率可达 1 瓦，将灯泡中充以氢气，其功率限度可增至 20 瓦。

另一类正温度系数测热电阻是金属薄膜式电阻。此种测热电阻的好处是易于得到接近传输线特性阻抗的电阻值，同时还可做成适当的形状以便直接与传输线终端相匹配。加以这种只有分子厚度的薄膜能在很高频率下具有与直流相等的电阻值，所以薄膜式测热电阻可以获得非常良好的宽频带特性。薄膜式测热电阻有各种不同的构造，例如有一种采用与图 1—4 类形状，只是在云母片的金属接点之间不是接上细的铂丝，而是蒸发上铂的薄膜；另一种构造是粗 0.04 厘米、长 0.7 厘米的玻璃管上被以铂膜而成。这两种测热电阻均可消耗 100 毫瓦的功率。还有某几种薄膜电阻可以安于波导或同轴线的内壁，以吸收传输功率的一小部分，

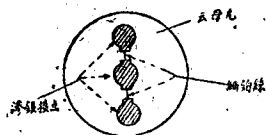


图 1—4 一种专用于同轴线式支架中的钎流电阻元件

因而可作通过式瓦特计使用。薄膜式测热电阻的构造和应用近来还在不断发展之中。最近有人设计出一种准备安装于3厘米波导的横向平面中的薄膜式测热电阻，其外形和尺寸示于图1—5，它是在厚约 10^{-2} 厘米的云母条上，真空蒸发上厚约 10^{-6} 厘米的铂膜而成，在其两端镀以金质接点以便与波导壁及直流引线相接触。其最佳工作阻值约480—500欧，最大工作电平为100毫瓦，短时间能经受200—300毫瓦。据报导采用这种测热电阻的功率测量装置，可以在3厘米波段测量1—100毫瓦的功率，具有很高的准确度（误差不大于 $\pm 3\%$ ）。

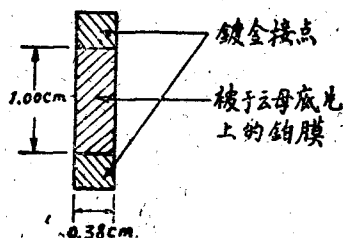


图 1—5 一种设计用于 3 厘米波导的薄膜式测热电阻

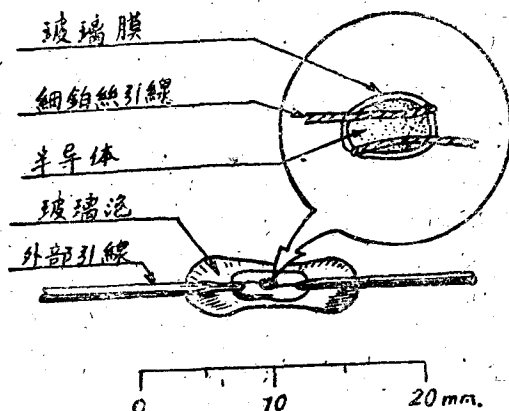


图 1—6 珠形热敏电阻的构造

作为测热电阻的另一种重要类型的热敏电阻，其构造如图 1—6 所示，是一个直径大约 0.04 厘米的半导体小珠（材料是锰、钴、镍和铜等金属氧化物的混合物），其中嵌有两根很细的铂丝作为引线，珠的外面通常被以一层玻璃薄膜以防止氧化。为安装便利起见，通常还将这种小珠的引线焊于两根较粗铜线之间，封于长约 1 厘米、不抽空的小玻璃泡之内；但是适当用于 3 厘米以下的波长时，一般则以采用不带玻璃泡的热敏电阻珠为合适。这种珠形热敏电阻的电阻值几乎完全集中在半导体小珠上（铂丝引线的电阻相对可以忽略），因而表现为一个具有很大的负温度系数的电阻。它的电阻数值能凭借改变通入其中的直流偏流的大小而使之在很宽的限度内改变。图 1—7 例示一种典型热敏电阻在不同环境温度下的电阻-功率特性曲线。把它和图 1—3 的钨流电阻特性曲线相比较，可以看出热

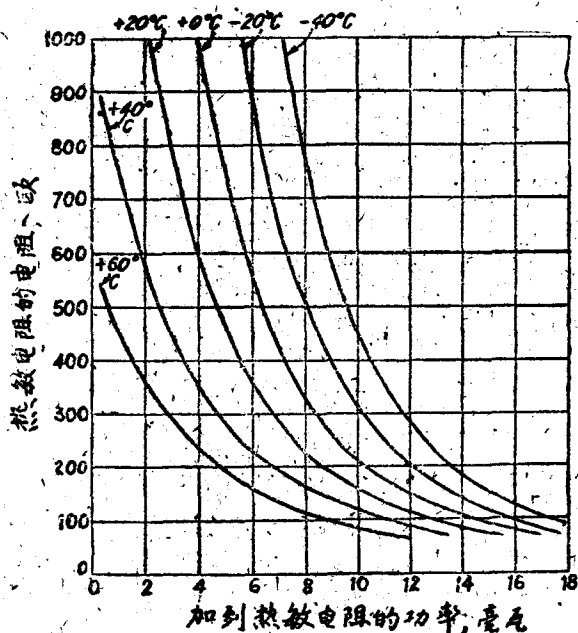


图 1—7 一种典型的热敏电阻的特性曲线

敏电阻的电阻值几乎完全集中在半导体小珠上（铂丝引线的电阻相对可以忽略），因而表现为一个具有很大的负温度系数的电阻。它的电阻数值能凭借改变通入其中的直流偏流的大小而使之在很宽的限度内改变。图 1—7 例示一种典型热敏电阻在不同环境温度下的电阻-功率特性曲线。把它和图 1—3 的钨流电阻特性曲线相比较，可以看出热

敏电阻的灵敏度 $\beta = \frac{dR}{dT}$ 随工作点的改变颇大，但在整个范围内其灵敏度至少要比铂流电阻高几倍。可是与此同时也可看出，热敏电阻的电阻值随环境温度的变化也比铂流电阻显著得多。

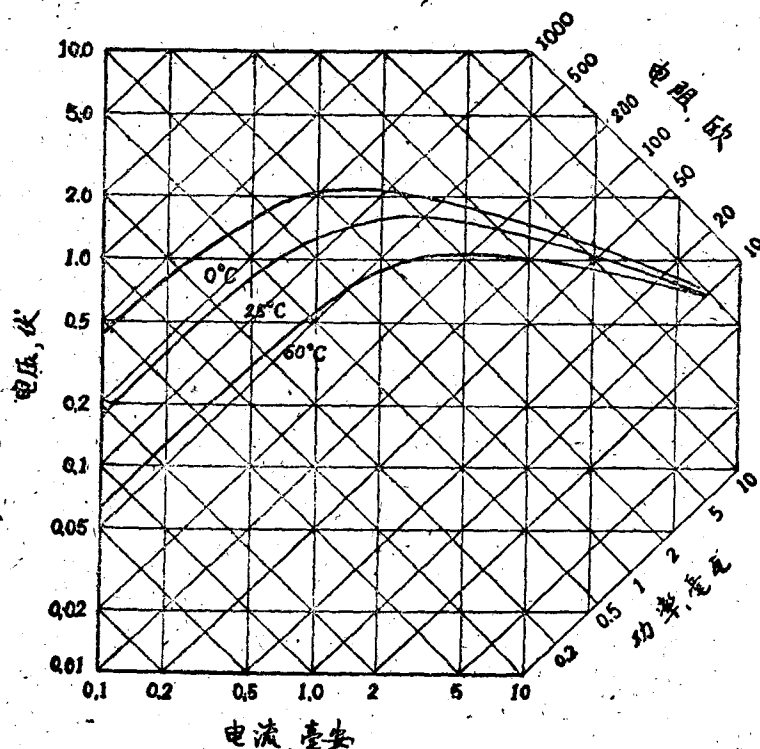


图 1—8 繪于特制座标紙上的热敏电阻特性曲线

像这样的热敏电阻静态特性曲线，有时愿意把它画到一种特制的对数——对数座标纸上（如图 1—8 所示），以便可以把四个重要参量，即电阻、电压、电流和功率之间的关系同时显示出来。由于这种静态曲线通常是用直流测繪出的，故又称直流特性曲线。从图 1—8 的曲线上可以看到一些有趣的事实，即当通入热敏电阻的电流由小增大时，其电阻起先几乎保持不变，以致其上的电压降系随电流而增加；直至电流超过 1 毫安左右时，电阻才开始显著下降；此后随着电流的增大，电压降反而降低，其间要通过一个最大值。因此，对于某一电压数值便可能有两种电流、电阻和功率的数值与之相对应。这在测繪曲线时须注意及之。

由上列曲线可以看到，上述热敏电阻在正常室温下的“冷”电阻值（即当其中消耗功率为零或很小时的电阻）大约为 1000 欧姆左右；当功率增加到可能使其烧坏时的最低电阻值约为 10 欧。实际上，可以运用的工作阻值范围则不能够这样大。因为假如让热敏电阻工作在太高的电阻值（例如 700 欧），则当室温增高到一定程度后（例如 50°C），即使把加入其中的功率减小为零值，它的电阻也不可能等于这样高的阻值；假如让它工作在 500 欧，虽然一般温度下都可达到，但因所需由电桥供给它的电流甚小，以致电桥灵敏度很低。另一方面假若让热敏电阻工作在太低的电阻值（例如 50 欧），则又太接近于烧坏的危险。为了使它

的工作电阻值既易于与高频传输线相匹配，同时又能保证最佳的电桥灵敏度和较大的过荷安全性，通常把它的工作阻值范围选择在 100—300 欧之间。

1—3—2 测热电阻元件的选择

选择测热电阻元件通常要考虑下述几方面的问题，即（1）灵敏度（用“欧/毫瓦”表示）的高低；（2）是否适用于功率绝对数值的测量，还是只能测相对数值；（3）抵抗过荷烧毁的特性如何；（4）是否容易在宽频带内实现阻抗匹配；（5）在同一类型的多数元件之中灵敏度和阻抗等特性的变化大不大；（6）时间常数的大小；（7）所要求辅助线路的复杂性如何；（8）是否能够易于得到，等等。当然在考虑上述这些问题时一定要采取一些折衷考虑，因为没有那一种测热电阻在所有这些方面都很好。现在就以一般最常用的两种测热电阻，即钨钨电阻和热敏电阻为对象，从上述这些方面加以考察和比较。

珠形热敏电阻和钨钨电阻一般都是设计来测量同等数量级的功率的，但是它们在特性和适宜用途上则是各有千秋，很难绝对评定其优劣。例如，热敏电阻的响应比较迟缓，因而在某些需要快速响应的用途中不如钨钨电阻合适；然而，由于同一特点却使热敏电阻非常适宜于测量脉冲调制的功率，因为它的较大时间常数使得能够自动采取功率的平均值，而不致发生由于其电阻随脉冲的来去而波动所引起的某些误差。热敏电阻比钨钨电阻较为灵敏，因而使得它有可能测量较小的功率；但同时这也使得热敏电阻对环境温度的变化较为敏感，从而产生了必须在辅助线路中采用温度补偿的麻烦。热敏电阻的小珠的尺寸能够做得非常之小，因而使得用直流功率代替微波功率不会有多大误差；而钨钨电阻由于丝的尺寸较长及不能无限的细，以致会由于丝中高频电流的驻波分布及集肤效应等原因，使得用直流功率代替微波功率的正确性问题变得颇为复杂。此外，热敏电阻在构造上比较不甚脆弱，同时也不像钨钨电阻那样易于因过荷而烧毁，（因为热敏电阻的烧毁电阻值比其工作电阻值小得很多，以致在它真正过荷到烧毁之前，便会由于它的电阻值与传输线的阻抗非常失配，而使它所吸收的功率大为减少，从而得以自保）但在另一方面，钨钨电阻的特性比较一致，一个烧坏了能够更换一个新的，无须重调高频电路的匹配；热敏电阻则因同一类型的特性很不一致，一旦损坏更换之后，必须重调高频电路的匹配才可。

根据上述可见，热敏电阻具有较多的优点，因而目前在一般用途中较钨钨电阻为常用。就频率限度而言，虽然它们最满意的工作范围一般都不宜高过 3 厘米的波段，但是热敏电阻（特别是不用玻璃泡者）尚有可能用到较高的频率；而钨钨电阻用于更高的频率则有较多的困难。然而由于钨钨电阻具有特性稳定、响应快速、 $R-P$ 特性曲线近乎为直线，以及可以不需要温度补偿等特点，因而在功率测量方面不可能完全被代替。此外，钨钨电阻还是作为功率检波器的重要元件之一（其用法见后）。

上节所述其它类型的测热电阻也可按照上述那几方面研究其特点而在适宜情况下选用之。

1—3—3 测热电阻支架的要求和指标

测热电阻支架是一段传输线构成的容器，它一方面要将测热电阻元件支持于其中作为传输线的终端负载而吸收全部所测功率，同时还要供给一个直流或低频通路，以便能将测热电阻接出，作为电桥的一臂而测量其电阻变化。测热电阻支架是测热电阻式功率计的唯一高频部件（因而习称为功率计的高频头），它所面临的主要要求为：（1）作为吸收式瓦特计的高频头必须能够充当传输线的无反射终端负载，才能吸收全部可资功率；而且为使用方便计