

高等学校教学用书



超高频电真空器件的测试

CHAOGAOPIN DIANZHENKONG QIJIAN
DE CESHI

依·弗·列别捷夫讲
成都电讯工程学院译

人民教育出版社

超高频电真空器件的测试

依·弗·列别捷夫讲

成都电讯工程学院译

北京市书刊出版业营业许可證出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 15010·1085 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 4 插页 5

字数 97,000,印数 4,001—8,000,定价(7) ¥0.55

1961年2月第1版 1961年11月北京第2次印刷

目 录

序	iv
第一章 緒論	1
第二章 超高频测量的某些問題	3
§ 2.1. 超高频测量的特点	3
§ 2.2. 超高频波段中振荡的指示	5
§ 2.3. 功率的测量	10
§ 2.4. 波长的测量	26
§ 2.5. 阻抗及导納的测量	37
§ 2.6. 品质因数(Q 值测量)测量的某些問題	59
§ 2.7. 超高频波段的各種測試設備	71
第三章 超高频电真空器件測試的特点	79
§ 3.1. “冷”測和“热”測的方法	79
§ 3.2. 反射調速管測量的特征	85
§ 3.3. 多腔磁控管測量的特征	94
§ 3.4. 諧振放电器測量的特点	103
§ 3.5. 有关超高频电真空器件工厂測試程序的某些說明	119
参考书目	123

第一章 緒論

超高频电真空器件的发展是与测量及测试问题紧密联系的。超高频器件参量的复杂性和多样性达到这样的程度：如果不仔细的考虑技术完善的测量问题，那么现在这些器件的研究、设计和生产皆是不可思议的。

超高频器件经常运用在工作于困难的电的、热的和机械的状态的重要而复杂的装置中，这一情况起着重要的作用。提出以下情况就足够了：超高频器件广泛的运用在海、陆、空无线电仪器中以及一系列的新技术中；在使用时电真空器件受到机械的振动、冲击和加速；周围介质的温度及湿度能在很大的范围内变化；器件往往需工作在低于大气压力的高空中等等。

目前已制定并应用着整套的测试体系以测试包括超高频器件在内的各种各样的电真空器件。在苏联，对于每一种类型的电真空器件通用的称“总技术条件”（简称为 OTY）；同样的，对于个别类型的器件适用的称为“分技术条件”（简称为 YTY）。总技术条件及分技术条件是在电真空器件使用人的要求的基础上制定，但同样也应全面地考虑到电真空工业工艺上的可能性及近代测试技术的可能性。

象对其它电真空器件一样，总技术条件及分技术条件所规定的超高频器件的测试可以人为的分为四类：

1. 器件的电气参量及其特性的测量；
2. 气候要求试验；
3. 机械要求试验；
4. 寿命试验。

机械和气候試驗的方法和装置对所有类型的电真空器件在很大程度上是一样的。这样的方法甚至运用在不属于电真空器件的很多类型的产品中。虽然气候、机械試驗具有很大的重要性,但对超高频波段來說这种測試类型并不是典型的。在今后的叙述中机械和气候試驗的方法将不予考虑。

器件的寿命試驗本质上归結于經過一定時間間隔的电气参量測量,在該時間間隔內器件在一定的状态下工作。

这样,在今后的叙述中最有兴趣的是超高频器件的主要电气参量的測量,但是这些測量的作用远远地超出了总技术条件及分技术条件所指出的測試范围。在設計及生产超高频器件的下述三个阶段上測量均起着重要的作用:

1. 实验室的測量:它与科学研究及試制工作有关。

2. 生产測試:作为中間檢驗及生产器件的零件的預先測試或在出厂之前整个器件的調整。

3. 生产的驗收試驗:即試驗已制成的电真空器件。

实验室測量是最复杂的和最多种多样的,它要求具有較高技术水平的工作人員利用精确的仪器来进行。与此相反,一般較低技术水平人員應該就可以进行生产測量。对生产測量的其它重要的要求是生产率要高。

虽然有上述一些区别,但实验室測試及生产測量具有互相联系的一些共同的主要特征。下面我們將給出在超高频波段中主要測量的綜述,并指出苏联工业部門出产的某些典型的測試器件。然后研究三种最广泛类型的超高频器件——反射調速管,諧振腔脉冲磁控管和諧振放电器件——的測試特点。主要用作測試无綫技术装置(例如雷达站)的超高频測量装置以及用于与电真空器件无关的其它目的装置今后将不再涉及。

第二章 超高频测量的某些问题

§ 2.1. 超高频测量的特点

超高频波段的特性在测量技术上以及在各种电气量值的测量方法上都表现得十分明显。

超高频波段的两端均同以完全不同的测量方法及测量技术所表征的电磁频谱段相连接。运用在比较低的频率范围中的“一般”无线电技术测量完全不同于运用在红外线及可见光波段中的辐射能的测量。

实质上，在比较低的频率范围中所有无线电技术的测量均建筑在三个主要参量的基础上：即电压、电流和频率。这三个量值可以看作原始参量，无线电技术中运用的所有其它量值和参量均通过原始参量表示出。这些“二次”或“导出”的参量有波长、振荡功率、阻抗、导纳、振荡系统的品质因数、放大系数、衰减系数等等。

选择电流、电压和频率作为原始参量首先与在低频电工学中实际测量这些参量的方便性有关。众所周知，甚至在数十和数百兆赫频率下这些参量的测量是完全可能的。

在和超高频波段邻近的长红外线波的区域中可以发现完全另外一种情况。这里根本没有电流和电压的概念。主要利用由相干测量所确定的波长代替振荡频率。除了波长外主要被测的量值是辐射能量（辐射功率）。

以上所指出的区别并不是仅仅由于传统上或历史上所形成的，在其基础上有着深奥的物理特性，这些特性在厘米波段已经开始表现出。

这样在超高频波段中与波长缩短有关的逐步的量的变化转向

于明显的质的变化,这种变化不能不影响测量技术的情况。

从1—2千兆赫的频率开始(波长15—30厘米)直接测量电流和电压碰到严重的困难,在利用波导传输线及空腔谐振系统时这些困难看得特别明显。在一系列的情况下不仅测量而且甚至单值的理论确定“电流”和“电压”也失去其本身的一般意义。直接确定振荡频率也有些困难。

在测量技术的基础中应该有实际的被测量值,在超高频波段中这些量值是:

1. 波长:例如很容易由在驻波状态下长线段段的几何长度来确定;
2. 振荡功率:例如由吸收高频能量的热效应来确定;
3. 阻抗(或导纳),按波的反射情况来确定。

不难相信,通过上述三个量值能够表示出对实际目的有兴趣的所有其它的参量。知道了电磁波的相速,按测量出的波长很易确定振荡频率。电场和磁场的强度在已知频率和已知传输线或谐振腔的几何尺寸的情况下按传输功率的量值来计算(至少,在原理上可能)。确定振荡系统的品质因数可以归结于例如有功电阻、无功电抗及波长的测量。放大系数和衰减系数仅需借助于一个参量——输入和输出功率就可确定等等。

超高频电真空器件测量的特点之一为被测参量的范围非常宽广,例如在测试超高频器件时须要测量的功率可以由一毫瓦到几万瓦,在一系列情况下最小被测功率为 10^{-14} — 10^{-15} 瓦。对驻波的测量提出了更高的要求,因为阻抗和品质因数的测量(所谓 Q 测量)主要基于驻波的测量,可以指出,有载品质因数的测量范围大致由一到几万。

在近代超高频测量中,脉冲状态下的测量起着极大的作用,虽然和连续状态下的测量有着原则上的相似之点,但脉冲测量在一

系列的情况下要求有特种的测量装置。

对超高频测量装置所提出的重要要求是它的宽频带性，众所周知，在设计超高频电真空器件时宽频带性的问题占有显著的地位。目前，器件的工作频带为中心频率的 $\pm 10\%$ 到 $\pm 40\%$ — $\pm 50\%$ 已不是少量的了。愈来愈广泛的应用宽频带电子调谐迫使重新研究对超高频装置所提出的很多要求。

在测试超高频电真空器件时除了典型的测量功率、波长和阻抗外，也采用比较复杂的特殊的测量，其中包括在电子和气体放电器件中被称为过渡历程的测量，噪音的测量等等。可以毫不夸大的讲，这些测量在精确度和灵敏度方面大大地超过了“一般”无线电技术及电工测量。

§ 2.2. 超高频波段中振荡的指示

在电磁频谱的整个范围内振荡的指示是最简单的和较常遇到的测量。

在超高频波段范围外的更短波方面指示的主要形式有：

- a. 视觉指示(仅对可见光波段)；
- б. 光化学指示：在最简单情况下借助于照片和照相胶卷；
- в. 光电子指示；
- г. 电离指示；
- д. 热指示：其中包括测量阻抗的指示和温差电动势的指示。

更长波方面指示的主要形式有：

- a. 电机的(电动力学的)指示：该指示基于电流和磁场的相互作用或两个电流的相互作用；
- б. 热指示，其中包括基于温差电动势，基于热膨胀和基于测量阻抗的指示；
- в. 借助于非线性阻抗变交流电为直流电的途径来指示。

超高频波段的物理特征不允许利用直接的视觉指示，光化学和光电子指示。在超高频波段中最广泛应用的振荡指示有四种形式：

1. 借助于非线性阻抗——晶体检波器或较少情况用电子管——来将超高频电流变换为恒定电流；
2. 根据由于高频电流加热的结果而发生的阻抗的变化来指示(利用测辐射热计及热敏电阻)；
3. 借助于温差电偶的直接热的指示，也可基于在高频电流加热时光辐射的指示；
4. 利用稀薄气体中超高频放电的气体放电指示。

在最简单的情况下并不要求指示装置指示出高频功率的数值。这种装置的典型例子是简单的气体放电管，在功率足够大的情况下(约高于1瓦)管中即发生无电极高频放电。

但是，常常向指示装置提出高频功率读数的要求或以相对单位表示的场强读数的要求，为此指示器应以高频功率的单位来刻度。

但是在某些条件下指示器的读数与高频功率可能是线性相关，在这种情况下，指示器件的刻度就不需要。

在超高频波段中经常运用晶体检波器作为指示器。双根线中晶体检波器指示器的最简单线路图示于图1中。在连续状态下用指针的磁电式仪表(微安表)来测量整流电流。假如进入检波器瞬时功率大约不高于10—20微瓦，则在很大的精确度上可以认为微

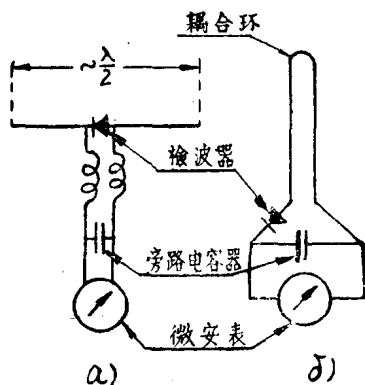


图1. 双根线晶体检波器指示器的线路图。

a) 半波偶极子指示器；

b) 耦合环指示器。

安表读数正比于高频功率。对于近代检波器来说不要求刻度的最大整流电流在连续状态下约为 10 微安。

在振荡源脉冲状态情况下建议用对整流电流瞬时值灵敏的无惯性的指示装置来代替微安表，在这种情况下一般利用放大器及电子束管或普通的示波器。假如在指示时不要求观察高频脉冲的包线，射线的扫描不是必要的。

在同轴和波导系统中晶体检波器放入专门的装置——检波器接头由调谐机构，旁路抗流器及旁路电容器组成，这样的检波器接

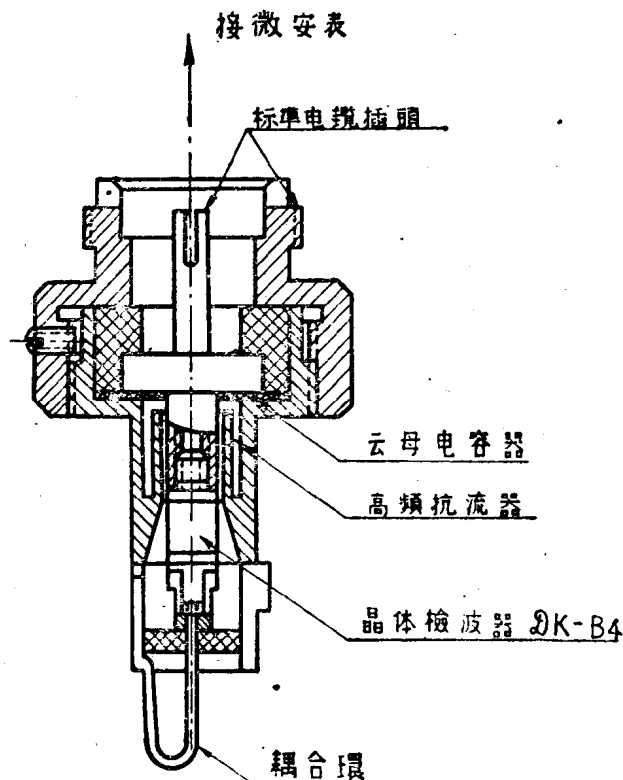


图 2. 在晶体检波器上同轴指示装置的例子。应该注意高频抗流器和防止高频能量涌入直流电路的平板云母电容器。

头或作为高频系统的个别元件或作为其它测量器件(测量线, 波长计等)的组件。

在图 2 中示出了接入厘米波段的波导及谐振系统的带有耦合环指示器的同轴线装置, 检波器接头的其它结构例子可以在文献中, 其中包括作者的第一本书“超高频技术”中可以找到。

在表 I 中列出了适合于测量目的的二个硅测量二极管和二一个硅视频检波器(接收二极管)的某些参量。晶体检波器的缺点是: 对过载灵敏及其特性随着时间的某些变化。

表 1 苏联的硅检波器的某些参量

检波器的类型	主要用途	额定的工作波长 (厘米)	当功率为 20 微瓦时 电流的灵敏度 (安/瓦)	在使用情况 下最大允许的 整流电流 (毫安)	在短时间过 载情况下最大 允许的脉冲 功率 (毫瓦)
ДК-И1	{ 在测量仪器中作高频的 指示	9.8	不小于 0.5	1	—
ДК-И2		3.2	不小于 0.2	1	—
ДК-В4	{ 在直接放大的接收机的 输入装置中作检波	3.2	不小于 0.8	—	50
ДК-В7		3.2	不小于 0.4	—	50

在分米波及米波波段中常常利用电子管——特殊结构的测量二极管来代替晶体检波器。在表 II 中列出了苏联出产的 2Д1С 型的测量二极管的参量。

表 2 2Д1С 型测量二极管的某些参量

阴极.....	旁热式氧化物阴极
灯丝电压.....	2.3 伏 $\pm$ 0.1 伏
灯丝电流.....	0.4 安
反向电压最大振幅值.....	100 伏
平均整流电流的最大值.....	0.1 毫安
最大阳极耗散功率.....	0.01 瓦
阴极——阳极电容.....	0.25 $\pm$ 0.15 微微法
最短波长.....	10 厘米

在分米波和米波波带中在小功率的情况下得到某些运用的指示器件的其它类型是真空热电偶。利用不同金属的细导线作为制造热电偶的材料,成对的镍铬合金——康铜,铜——康铜等等能保证最大的灵敏度(最大的温差电势)。高频热偶的电极放在众所周知的“橡皮管”型的接收放大管中是适宜的(见图 3)。

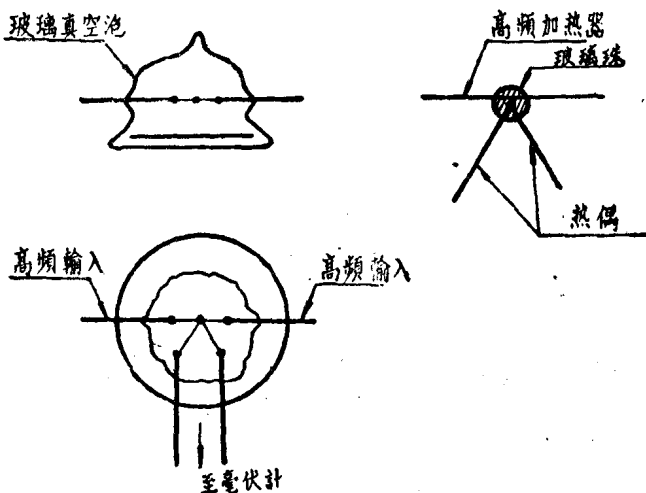


图 3. 适合对超高频波段长波部分的指示的真空的结构例子。

右边以较大尺寸示出热偶的内部装置。

通常真空热偶在直流方面的内阻不超过 10—20 欧姆,用来作为和热偶一起的直流仪表(毫伏计)应具有与此大致相同的内阻。

目前真空工业出产的频率到 200 兆赫的仅数个类型的真空热偶(热变换器),这些变换器的装置与图 3 中示出的结构相似。最灵敏的 TBB-1 型热变换器中加热器的额定电流值等于 1 毫安;相应的温差电势为 2.5 毫伏。比较强的热变换器的温差电势值可以达到 12 毫伏。

热电偶的缺点是对过载的持久性不大。由于厘米波段的指示热偶制造的复杂性故现在指示热偶没有得到广泛的应用。

超高频气体放电指示器在某些情况下不仅可以用来作定性的而且也可以用作定量的指示。可以利用管子的发光部分的几何尺寸或超高频放电等离子区的直流电导率来作为功率量值的准绳。在后一种情况下放电管中有两个电极，该两电极上由外电源加上不大的直流电压。功率愈高，高频放电就愈强，指示放电器的外电路中直流电流就愈大。有兴趣的指出，在沒有直流电压时在外电路中同样可以有直流电流（由于电极在放电方面的不对称性）。

为了提高气体放电指示器的灵敏度可以利用高频电路的谐振元件，但是借助于这些器件指示小功率（小于 0.1—0.5 瓦）一般是不可能的。

除了晶体检波器及热电偶外还可以利用热敏电阻及测热电阻作为小功率的指示，但是它们用作测量高频功率的绝对值是比較典型的（見后）。

在分米波及米波波带中有时运用不大的白炽灯来指示中等功率，一般带有直綫灯絲的这些管子直接接入双根綫或同軸系統，灯絲的发光亮度或用視覚或用简单的光电管来估計，这种方法亦可以用来测量功率的绝对值（見后）。

在所有列举出的指示器的类型中晶体检波器具有极大的普遍性及最高的灵敏度。

§ 2.3. 功率的測量

a. 功率測量方法的簡短綜述

測量超高频波带中的功率可以利用基于不同物理現象的几种方法：

1. 热量計法，利用在高频能量完全被吸收的情况下提高液体或固体（較少）吸收器的温度；
2. 热敏电阻（测热电阻）法，利用高频能量被完全吸收加热的

結果使金属或半导体的电阻改变;

3. 光度测定法, 基于对高频电流加热时金属中放射出的光的测量。

4. 有质动力法, 基于电磁波的压力。

按其本身特性来说所有四种测量方法都是绝对测量, 即不求其他高频测量器作为标准来进行功率测量的刻度。

在热量计测量情况下一般用通过波导或同轴系统的流水来吸收高频能量。测量器的输入端和输出端的温度 t_1 和 t_2 及水的流速 v 为主要被测数值。考虑到热功当量等于 4.1833 焦耳/卡 (或 0.24 卡/焦耳) 并忽略热损耗, 可以得到高频功率的表示式:

$$P = 4.183 \cdot v \cdot c (t_2 - t_1), \quad (1)$$

此处 c 为水的比热, 一般认为等于 1° 。假如速度 v 以米/秒来表示则由方程式 (1) 确定的功率 P 以瓦来表示。

这样, 热量计功率测量法完全基于简单的非电参量的测量, 但是也可以利用基于比较由直流或低频电流的等效作用的热量计测量的另一方案。

不借助于低频电流刻度装置的热量计测量器的简化方块图示于图 4。

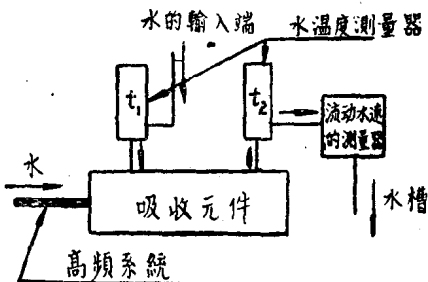


图 4. 超高频波段的热量计功率测量的方块图。

吸收元件尺寸按水吸收器所能得到的衰减的大小来选择。例如: 由经验方法得

到, 在波长为 9 厘米时完全以水填充的同轴线情况下在室温下每

① 严格地讲水的比热仅在温度为 $19.5^\circ \sim 20.5^\circ \text{C}$ 及 60°C 附近时才等于 1, 但是由于同温度影响到数值 c 相联系的误差小得可以忽略, 甚至在沸点温度时水的比热在 1.009 左右, 即与 1 的差别小于 1%。

厘米綫长的衰减为 1.5 分貝左右，同时也确定了衰减大致正比于振荡频率而变化。

对吸收元件的重要要求是和輸入高频系統匹配，希望进入热量計輸入端水的温度和器件外壳的温度沒有区别，水的流速要合理的选择使温度 t_2 及 t_1 的差約不超过 30°C ，但亦不能小于 $2^{\circ}-5^{\circ}\text{C}$ 。

借助于热量計测量器能足够精确测量的最小平均功率一般为数瓦，被测量功率的上限实际上并不存在，在脉冲状态下主要为吸收元件中高频击穿所限制。

在准确选择的情况下热量計功率测量器的誤差可以不大于 5—10%（一般在减小功率方面）。

有时在测试具有水冷却的超高频器件时可以运用热量計功率测量法，它在某种程度上与以上叙述的相反。按照这种方法，代替直接测量被吸收的高频功率，而测量管子阳极上的耗散功率，象通常一样，按水流温度差来测量。知道直流輸入功率后，由能量守恒定律不难求出振荡功率，但是这种方法不是很精确的，因而仅获得非常有限的运用，主要是当由于某些原因直接测量高频功率有困难或不可能的情况下利用这方法才是方便的。

在热敏电阻(热幅射器)测量中吸收元件是由金属或半导体組成的小物体，所謂珠形热敏电阻得到广泛的运用，典型的 3 厘米波段珠形热敏电阻的裝置示于图 5 中，作为吸收体(小珠)的材料例如为具有半导体特性的氧化鋁，二氧化鈮酸鉍的混合物，热敏电阻的静态伏安特性曲綫的典型形状示于图 6 中。

借助热敏电阻测量功率基于由直流(或由低频电流)产生的热效应与高频引起热效应的比較。热敏电阻接入示于图 7 的桥接电路中。功率的讀数或按照接入电桥对角綫中的微安表讀出(不平衡电桥法)，或按与电桥的供給电源串联的毫安表来进行(平衡

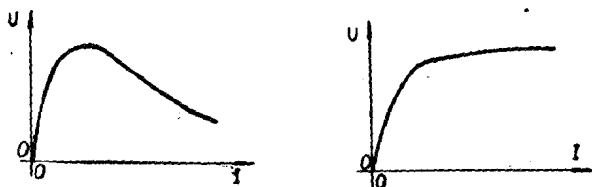


图 6. 用在测量超高频波段功率的, 不同型号珠形热敏电阻的, 静态伏安特性曲线的典型形状。

法)。

在后一种情况下高频功率由基本的导出方程来确定

$$P = \frac{R}{4}(I_0^2 - I_1^2), \quad (2)$$

此处 R 为桥臂的电阻。 I_0 表示在无高频功率时电桥平衡情况下毫安表所测量的直流电流。相应的 I_1 为在热敏电阻上加有高频功率后电桥重新平衡的情况下所测量的直流电流。

阻抗 R 的值与热敏电阻的型号和高频系统的波阻抗有关, 一般选择在由 100 到 500 欧姆的范围。

为了提高灵敏度可以利用示于图 8 的桥接电路。功率的读数

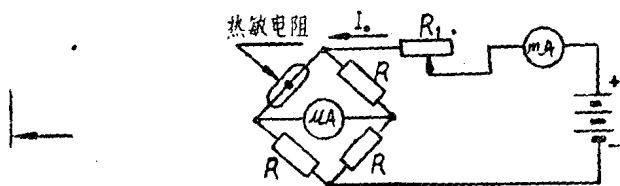


图 7. 测量超高频功率的最简单的热敏电阻桥式电路

按分流电路中微安表的指示; 在加上高频功率后桥的平衡借助于接入该分流支路中的阻抗 R_2 得到。不难指出欲求的高频功率在 $I_1 \ll I_0$ 时可由以下简单表示式确定

$$P = \frac{I_0 I_1 R}{2}. \quad (3)$$

在实际工作时更方便的是按接入桥路对角线的微安表直接指

示出功率读数。在这种情况下示于图 8 的分流电路仅用作桥的刻度。

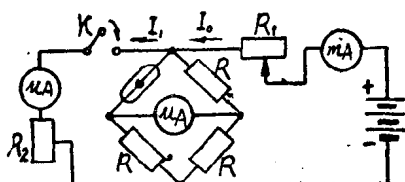


图 8. 有分流电路的热敏电阻桥式电路。

可以指出在测量小功率情况下电桥对角线中的电流与高频功率有线性关系，因此当在桥对角线中仪器偏差满刻度时桥的刻度仅按一点进行即可。在桥对角线中的微安表以功率的单位刻度之后为了完成测量在加上高频功率前需使电桥具有起始平衡。

为了保证在直流及超高频波段中阻抗改变的等效性必须减小热敏电阻工作体的尺寸，因此热敏电阻的测量原则上仅对小功率范围适合，一般加至热敏电阻的最大功率不超过 5—10 毫瓦。

另一方面，热敏电阻电桥所测量的最小功率被电桥对角线中指示仪表的灵敏度所限制。在一系列的情况下为了测量非常小的功率（几十和几个微瓦）利用由音频振荡器供给的电源，在这情况下由电桥对角线取下的失去平衡的信号可以由谐振放大器放大，但是在这种线路情况下对小于 1 微瓦的功率不能进行可靠的测量。

在热敏电阻测量器工作中起最大作用的是高频系统——热敏电阻接头，它可用作匹配装置，隔直流电容器等等。有固定调谐的良好热敏电阻接头的驻波系数在尽可能比较宽的频段中应不高于 1.2—1.5^①。

① 在可调接头工作时应该记住在一般情况下进入热敏电阻的功率最大值与热敏电阻接头匹配的情况有关，因此或者可以讲进入匹配功率测量器的功率，或者讲在振荡源和测量器共振匹配情况下给出的最大功率。仅当振荡器和长线理想匹配的情况下二种测量才得出同样的结果。