

微波测湿实用技术

● 罗秉铎 刘重光 编著

● 徐得铭 审译



● 电子工业出版社

微波测湿实用技术

罗秉铎 刘重光 编著

徐得名 审校

電子工業出版社

内 容 提 要

本书着重介绍微波测湿所涉及的微波基本理论, 微波测湿原理, 以及常用微波组件知识, 介绍了微波测湿方法及系统的组成部份, 列举了一些有代表性的微波测湿应用实例。本书还搜集整理了196篇国外的有关文献目录, 以及相当详细的介电系数表作为附录, 这些资料是很有参考价值的。

本书的主要读者对象为高中以上文化程度的从事微波应用的工程技术人员, 也可供大专院校有关专业的师生参考以及作为需要了解新技术应用的管理干部自学用的教材。

微波测湿实用技术

罗秉铎 刘重光 编著

责任编辑 魏永昌

电子工业出版社 (北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

北京燕山印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 5.625 字数: 135千字

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数: 1-3000 册 定价: 2.95元

ISBN 7-5053-0697-9/TN·254

序 言

自然界中极大多数的物质都含（或吸附）有水，人们的衣食住行离不开水，工、交、农、林、文教、卫生、科研、国防等部门的生产实践活动中也都需要测量和控制水份，水对于人类社会的生存和发展的关系如此密切，因而水份检测（Aquametry）就成为人们关注的重要学问。随着社会生产力的发展和科学技术的进步，也要求不断改进测湿方法，从古老的失重法、蒸馏法、电阻法、电容法发展到近代的波谱法、中子法、微波法、红外法等等，其中以微波法的适应面较广、优点较多，是一种年轻而有生命力的方法。

人们应用微波技术测量物料的水份，开始于50年代初期，其最大优点是快速、连续和无需接触，因此特别适用于工业生产自动控制系统，此外，微波测湿对物料无破坏、无污染、操作安全，量程也宽（含水量可以是0~100%）。由于此技术有以上种种优点，因此被广泛采用于粮食、造纸、土壤、石油、轻纺、化工、建材等生产领域。我国对微波测湿的探索可追溯至60年代中期，当时从国外引进了微波粮食测湿设备，但是主要的研制工作则是始于70年代中期，涉及的领域有石油、煤炭、交通运输、轻工纺织、造纸、制糖、原盐、土壤、建材及热带作物等，其中为石油、土壤、化肥、原盐、胶乳、纸张等行业中服务的微波测湿仪已有商品问世，并达到一定的水平。中国电子学会电子测量与仪器学会

在1981年至1987年里召开了四次非电量检测学术年会，其中有关微波测湿的论文占有很大的比重。一支具有相当规模和一定水平的技术队伍已经形成。

纵观三十余年微波测湿的发展历史，并非一帆风顺，而是经历了一段曲折的过程，究其原因，主要有以下几方面：第一，有关测湿的基础理论例如复合材料的介电系数理论，束缚水的微波特性，颗粒状固体材料的密度影响问题等等均需要深入研究，第二、由于一些经典的微波元器件如速调管、锗二极管检波器、喇叭天线等不适应某些工业环境，因而影响使用效果（此一状况在70年代后期随着固态器件、集成电路和微机应用的普及，已经有所改善），第三是微波测湿知识不够普及，由于使用微波设备的人员来自各行各业，对微波基础知识缺乏了解，也会直接影响到测试效果和推广应用，第四、微波测湿是一门综合技术，需要有组织地联合开发，需要向社会宣传，以引起有关部门的重视。

罗秉铎和刘重光高级工程师编写的“微波测湿”实用技术一书介绍了微波测湿原理、方法、具体测试系统和大量应用实例，内容丰富，文字精练，书中第二章介绍了常用的微波元件及有关电子仪器知识，并在附录中列举了有关微波测湿的大量文献和电介质材料的介电特性，实用性强，全书深入浅出，通俗易懂，这对从事微波测湿的科技人员无疑是一本很好的读物，此书的出版对发展我国微波测湿技术将是有力的促进与推动，衷心祝贺此书与读者见面。

徐得名于上海科技大学

绪 言

许多物品在生产、使用、运输与储存过程中，都需要保持一定的湿度，以保证该物品具有良好的性能和质量。例如：纸张、印刷品、纺织品等在染色过程中，对颜料的吸收能力与材料本身含水量的多寡有关；粮食的含水量过高将霉、烂变质，含水量过低又会使味道变坏，且颗粒易粉碎；建筑物墙体含水量的高低直接影响房屋的保温性能；型砂或陶瓷的原材料的含水量影响其成型的粘结性与收缩性；压榨甘蔗时，蔗渣的含水量与出糖率、能源利用等关系密切；橡胶乳液的含水量与橡胶树的品种、土质、灌溉、施肥等有关；水源不足的地区，需要快速测定大面积土壤的含水量，以便确定灌溉的轻重缓急；胶片生产的各个环节都需严格控制含水量，否则将产生粘连或龟裂。总之，各行各业都存在快速、准确测量物质干湿程度的问题。

测量含水量的经典方法是失重法，又称烘干法，它的操作过程是。分别测量被测物在烘干前、后的重量，含水量表示公式为：

$$\alpha = \frac{W_1 - W_0}{W_1} \times 100\%$$

式中， W_0 为干重， W_1 为湿重， α 为被测物中所含水份的重量与该物质总重量的比值。这种方法只有操作工艺要求，误差很难估计。其主要误差来源如下：1) 取样误差，烘干法无法进行在线的连续测量，不同的取样时间、范围、位置

等，均将给测量带来误差。2) 操作误差，为了使取得的样品中的含水量均匀，对所取样品要进行充分搅拌，然后再从搅拌均匀的样品中取一小部分进行烘烤。实验证明，搅拌过程中可能丧失0.2%的水份；此外，天平称量不准确；其它化学成分随水份一起被蒸发散尽等均将给测量带来误差。烘干法的另一缺点是烘烤时间长，测试结果往往在生产完了才能得出，起不到控制、指导生产的作用，因此，也不能用于在线测试。

由于烘干法存在上述缺点，在实践中，人们根据介质在电场作用下，其介电系数与导电率随含水量不同而不同的特点，研制出了电容式与电阻式水份测量仪。这种仪器的优点是：测量速度快，价廉，体积小，耗电省。其缺点是：测量范围小，一般只能测8%~22%之间的含水量。由于水中的杂质将引起离子导电，致使这两种测量方法的误差很大。

近年来出现了中子水份测试仪，它是利用中子射线在穿透被测物时，由于被测物中含水量不同产生的衰减也不同，从而可用衰减的大小来确定物质中含水量的多寡。这种方法的优点是快速，误差小。缺点是价格昂贵，测量范围小。这种方法如果屏蔽不好，易造成射线泄漏，以致污染环境，故很多操作人员存在恐惧心理，使其较难推广应用。

此外，还可用光照透射法、比重法等测量液体材料中的含水量，这些方法一般都具有价格低廉，操作方便等优点，但测量误差很大。

50年代初，英国人Waston发现，微波透过墙体所产生的衰减量的大小与墙体内含水量的多少呈线性关系，他首先提出可用微波方法检测介质材料中的含水量。这一发现引起了人们的注意，三十多年来，据不完全统计，从事微波测温

的国家有美、英、苏、法、加拿大、西德、日本、波兰、瑞典、匈牙利、荷兰等。涉及的领域很广泛，以农产品、建筑材料、土壤砂石、造纸、食品、燃料、木材、纺织、化工等领域的研究比较活跃。日本的微波粮食水份仪，瑞典和加拿大的纸张水份测试仪，波兰的原煤水分测试仪等均已成为商品。国内起步于60年代中期，到80年代初已初步形成了一支研制队伍，包括轻工、纺织、石油、化工、农林、气象等部门，这些部门都有人在用微波方法去解决本行业生产中存在的水份测量问题，在烟丝、原油、胶乳、土壤、墙体、棉糖等方面均已通过技术鉴定，并正在推广应用中。

为了使微波测湿技术能更好地推广，本书就从事微波测湿工作中可能遇到的一些带有普遍性的技术问题作了扼要的说明，以期这项新技术能被更多的人掌握，能有更多的行业采用，从而提高产品的质量与产量。

目 录

绪 言

第一章 微波测湿原理 (1)

第一节 微波的概念 (1)

第二节 电介质的概念 (4)

第三节 水的微波特性 (14)

第二章 常用的微波元件及电子仪器 (21)

第一节 微波简介 (21)

第二节 信号源 (37)

第三节 波导元件 (49)

第四节 指示电路 (63)

第三章 常用的微波测湿方法 (69)

第一节 空间波法 (69)

第二节 传输线法 (72)

第三节 衰减法 (76)

第四节 相位法 (78)

第五节 频率法 (80)

第六节 与密度无关的测湿方法 (81)

第七节 有源系统测湿方法 (89)

第四章 微波测湿应用举例 (99)

第一节 型砂水份测量 (99)

第二节 测量建筑物或建材水份的一种微波探头 (105)

第三节 片状材料的水份测量 (107)

第四节	颗粒状材料的水份测量	(114)
第五节	煤的含水量快速测量	(119)
第六节	纸张水份测量	(129)
第七节	石油水份测量	(135)
附录一	有关微波测湿的国外文献	(141)
附录二	电介质的介电系数表	(154)
附录三	我国微波测湿仪器一览表	(168)
附录四	微波测湿中常用微波元器件一览表	(169)

第一章 微波测湿原理

第一节 微波的概念

一、什么是微波

微波是一种波长很短的电磁波，一般是指波长从1米到1毫米（相当频率从300到300000兆赫）范围内的电磁波。微波的频率和波长，与比较熟悉的工业用电和无线电广播的频率及波长比较，参见表1-1。

表 1-1

名 称	频 率	波 长
工业用电	50赫	6×10^8 米(6千公里)
中央台第一套节目	640千赫	468米(中波)
北京电视台	58~64兆赫	5.2~4.68米(超短波)
微波	300~300000兆赫	1米~1毫米

二、微波的特点

微波在自由空间中的传输与水波相似。平静的水面如扔进一块小石头，水面将围绕落石点泛起一圈一圈的水波。如果离落石点不远的地方有一块浮起的纸片，我们会看到纸片将周期性地上下运动；如果用一根木棍在落石点处不断上下拨动，则水波将长时间存在下去；如果停止拨动，我们可以

看到纸片的起伏幅度越来越小，直到最后完全停止不动，水面重新恢复平静。微波信号从微波信号源发射到空间，以与水波相似的波动方式向外传播，它与水波的不同之处在于，它是以交变电场产生交变磁场，由交变磁场再产生交变电场（如图1-1所示），如此交替转换，愈传愈远，将电磁波的能量传向远方。

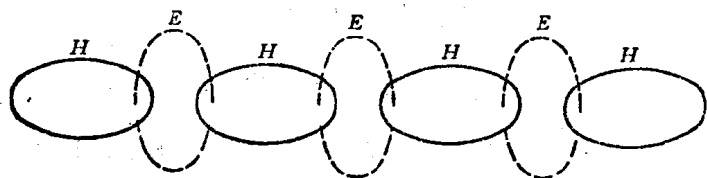


图 1-1 交变电磁场在空间的传播

微波由于其频率很高，波长很短，因此，具有很多与低频电路不同的特性。下面介绍一些与微波测温有关的微波特性：

1. 定向传播

微波由于其波长短得可以与周围物体的几何长度相比拟，因此，具有直线传播的性质。利用这一特点，通过方向性较高的天线，可将电磁波定向传送到空间。

2. 准光学特性

微波具有与光波近似的特性。它由一种媒质进入另外一种媒质时，将产生折射与反射；遇到吸收性能较好的材料时，其大部分能量将被吸收并转换成其它形式的能量，只有少部分能量可以穿透过去；遇到金属平面时，将产生全反射；遇到大小与波长相当的障碍物时，将产生绕射。

3. 分布参数元件

在低频电路中，组成回路的元件是晶体管、电容器、电

感线圈、电阻等,在微波电路中,低频电路中的元件都不能再使用,而代之以分布参数的微波元件。例如晶体管的截止频率应比工作频率高3倍以上才能正常工作,一般晶体管的截止频率为几百兆赫,在微波频段,这种晶体管根本不能使用,用于微波频段的晶体管须经特殊加工,使其管壳电容、引线电感都非常小,才能使用。又如低频电路中用电容器、电感线圈组成振荡回路,微波电路中的振荡回路是一段谐振腔。

4. 性能指标

低频电路中的主要技术参量为电压、电流、电阻等,在微波频段,这些概念已失去了确切的涵义。微波技术中的主要性能指标是频率、波长、功率、驻波比、反射系数等。由于性能指标的变化,低频电路中最常用的仪表(如万用表、电流表、电压表等)已不能使用,微波频段常用的仪器是功率计、频率计、波长表、测量线等。

三、微波技术的发展

微波技术是在第二次世界大战中发展起来的。由于战争的需要,利用微波方向性强的特点测量飞机、战舰的方位,这就是雷达定位技术。到五十年代,微波技术被广泛用于通信、导航、遥控遥测等领域,同时不断涌现出新的微波元器件。到六十年代,微波技术一方面向小型化、微波集成电路及毫米波段发展,另一方面,向微波应用方面发展。微波应用又可分为两大分支,一支是微波能应用技术,主要是大功率的微波源应用于烘干、治癌、灭菌等方面,另一支是微波非电量测量,主要是将小功率的微波源应用于测湿、测厚、测速、测距及测量密度等方面。

第二节 电介质的概念

一、材料的分类

材料的分类是一个比较复杂的问题，多数学科习惯于按材料的用途分类，分为金属、无机非金属、高分子、半导体、电解质、无线电材料等。也有按材料的形态分为气态、液态、固态材料的。微波测温研究的对象种类繁多、形态各异，但其实质是研究电介质材料与微波场的相互关系，而电介质材料从广义上来说，它不仅包括绝缘材料，还包括各种所谓功能材料，甚至包括电解液和金属材料，因此本节将围绕电介质材料的特点来讨论材料的分类。

1. 按键分类

原子相互结合组成分子时，原子之间存在着极强的相互作用力。分子内部两个或多个原子之间的相互作用力称为键。键可分为离子键、共价键、金属键与原子轨道的杂化。物质由于键的形式不同，具有不同的特性，各种键的特性可简述如下：

(1) 离子键 原子化合成分子时，一种原子上的电子转移到另外一种原子上所形成的键叫离子键，如 NaCl （食盐）由一个钠原子与一个氯原子组成， Na 原子的外层只有一个电子，当 Na 原子上的这个电子转移到 Cl 原子上去以后， Na 原子因失去一个电子而成为带正电的正离子， Cl 原子则因获得一个电子而成为带负电的负离子，正负离子间由于库仑力的作用而形成离子键。这类化合物中，原子失去或获得电子的数目即为该元素的化合价。要使离子化合物熔化或气化，必须用很大的能量来破坏它们之间强烈的吸引力，所以，离子

型化合物具有高的熔点和沸点。此外，离子型化合物易溶于介电系数较大的极性溶剂中（如 H_2O ），并产生正负离子，所以它们的溶液是导电的。

(2) 共价键 指相同或不同的原子组成分子时，共用的电子对所形成的化学键。如图1-2所示， HCl 分子是由一个氢原子和一个氯原子构成的， H 原子的外层只有一个电子， Cl 的外层有七个电子，当这两种原子化合组成 HCl 分子时， H 的一个电子与 Cl 的某一个电子配成一对共用电子，共用电子使 H 的外层为两个电子， Cl 的外层为八个电子，成为稳定状态。共价键构成的物质种类很多，可分为分子型与原子型两种，分子型物质（如 CO_2 、 CH_4 等）是以共价分子为基本结构的质点，通过分子间的相互作用力联结起来，这类物质在熔化或气化时，不破坏分子内的化学键，只需克服分子之间微弱的作用力，所以这类物质的熔点和沸点都较低。原子型共价键物质是以共价键原子为基本结构的质点，例如金刚石，原子间的共价键非常牢固，要拆散这种共价键需要大量的能量，所以这一类物质具有极高的熔点和沸点。

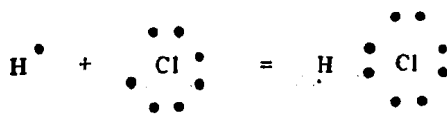


图 1-2 HCl 形成示意图

(3) 金属键 自由电子在金属原子及离子所组成的晶格之间不停地运动，金属原子和离子之间的相互作用力称作金属键。金属原子的外层轨道上的价电子与原子核之间的相互作用比较松弛，容易失去这些价电子而形成阳离子，这些失去的电子则在晶体中自由运动，称作自由电子。当有外电场作用时，自由电子将定向流动而形成电流，所以金属都是

导体。

(4) 原子轨道的杂化 不同元素的原子在相互作用时，由于原子间相互作用的结果，使同一原子的能量相近的轨道产生变化，形成新的原子轨道，这种现象称为原子轨道的杂化，本书讨论的主要对象 H_2O 水分子，便具有杂化特性（将在水的微波特性一节内叙述原子轨道杂化的形成）。

2. 按导电性能分类 从宏观上看，在电场作用下，物质内部将有一定的电流通过。电流大的材料，导电性能好，电流小的材料，绝缘性能好。导电性能的好坏可用电阻率或电导率来描述。一般规定，单位截面积，单位长度上材料所具有的电阻或电导，称为该材料的电阻率（ ρ ）或电导率（ σ ），电阻率的单位为欧姆·米，电导率的单位为西门子/米。在常温、常压下，可根据材料的电阻率或电导率的大小对材料进行分类，分为导体、半导体、绝缘体，一般将 $\rho \leq 10^{-9}$ ，即 $\sigma \geq 10^9$ 称为导体，如金、银、铜等； $\rho = 10^{-9} \sim 10^0$ ，即 $\sigma = 10^0 \sim 10^9$ 称为半导体，如锗、硅、一氧化铜等； $\rho = 10^0 \sim 10^{18}$ ，即 $\sigma = 10^{-9} \sim 10^{-18}$ 称为绝缘体，如碱玻璃、云母、各种高分子聚合物等。应该注意的是，一种物质到底是属于导体、半导体，还是绝缘体，并不是绝对的。例如：金属在液态和固态下是典型的导体，但在气态下却可能是绝缘体。常温下，固体锗是半导体，高温下，气态锗是绝缘体。炭的非晶态结构石墨是导体，它的同素异构体金刚石却是绝缘体。当外电场频率不同时，材料的导电性能也是变化的，例如土壤在1000赫时是导体，10兆赫时为半导体，10吉赫以上为绝缘体。从狭义上讲，绝缘材料都是电介质，微波测湿的对象就是电介质，下面介绍电介质的特性。

二、电介质与介电系数

1. 电介质的极化

任何电介质都由分子组成，分子由原子组成，原子由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成。分子中的正负电荷并不是集中在一点的，假定用一个集中的带负电的点电荷来等效所有负电荷群对周围的作用，则这个等效负电荷所在的位置称为这个分子的负电荷“重心”。同理，正电荷群也有一个重心。

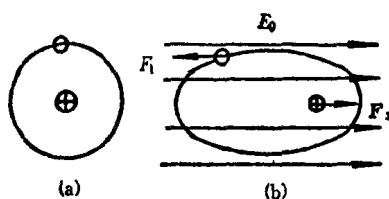


图 1-3 无极分子的位移极化

电介质可以分为两大类，一类是正负电荷作用重心重合在一起的物质，称为无极分子，如图 1-3

(a) 所示。当外加电场作用在无极分子上时，正负电荷重心将产生相对位移，如图 1-3 (b) 所示；当外加电场消失后，正负电荷重心又重新重合在一起，这种位移好像具有弹性一样，故称弹性位移，这种极化形式称为位移极化。另一类电介质，即使没有外加电场，其原子或分子的正负电荷重心也不重合，形成电偶极子。由于分子的热运动，这些偶极子的排列是杂乱无章的，如图 1-4 (a)，因此对外不显电性，当外电场作用在这些有极性的分子上时，它们将沿着外电场的方向排列，外电场越强，它们的取向排列就越整齐，如图 1-4 (b) 所示。偶极子的这种随外电场取向的过程，称为有极分子的取向极化。

有极分子的取向极化与无极分子的位移极化，都使介质上出现极化电荷，这种电荷的活动范围局限在分子内部，不