

## 微波在水分快速分析测量技术中的应用\*

徐 会 予      陆 永 香  
(贵州省兴仁县科技局)      (贵州省兴仁县粮食局)

快速水分分析技术与粮食、造纸、木材、纺织、制药、化工等国民经济一些重要部门的发展都有十分密切的关系。微波测水法由于精度高、适用范围广、探头不需接触样品便于在生产流水线上对原料水分进行连续测定、监控，因而为快速水分分析提供了一种强有力的新工具。下面我们结合研制微波粮食水分仪的实践，谈谈微波在水分快速分析测量技术中的应用。

### 一、测量原理

微波是一种超高频的电磁场，当它在谷物、木材等物料中传播时，如果物料中含有水分，那么水分子这种电偶极子会在电磁场作用下产生振动而消耗电磁场的能量，能量消耗的大小与水分子的多少即水分含量有一定的关系，所以可把微波通过物料时能量的衰减值作为物料含水值的一种度量。见图 1。

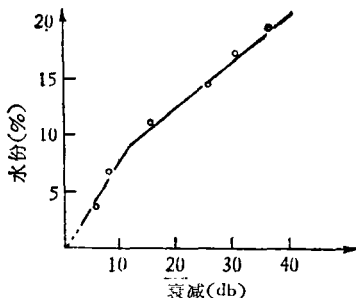


图1 小麦含水量与衰减关系曲线

电磁场在均匀介质中以平面波在  $x$  方向上传播时电场强度的衰减关系式为：

$$E = E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}$$

其中  $\alpha$  称为衰减常数，它决定了电磁场能量衰减的大小。在一般情况下，

$$\alpha = \frac{\pi \lambda_g}{\lambda_0^2} K_r \cdot \operatorname{tg} \delta$$

式中  $K_r$  为相对介电常数， $\operatorname{tg} \delta$  为介质损耗角。在  $x$  波

段中纯水的  $K_r$  约在 40—60 之间， $\operatorname{tg} \delta$  约在 0.5—1.2 之间；而绝对干的谷物  $K_r$  在 1—5 之间， $\operatorname{tg} \delta$  在 0.001—0.05 之间。由此可知，即使对含水量为 1% 的低水分谷物，水分对微波能量的衰减值依旧比物料本身所引起的衰减值大一个数量级以上。这样由于物料本身的组成、状态等不同，对被测参数产生的干涉就很小，这就是微波测水法比其它几种快速测水法具有较高精度的一个重要原因。

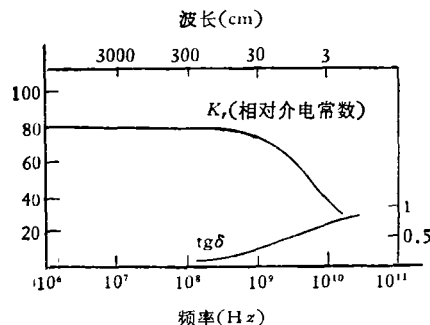


图2 水的介电特性与频率的关系曲线

图 2 为水的相对介电常数和损耗角与频率的关系。采用  $x$  波段的微波 ( $\lambda = 3\text{cm}$ ) 是比较合适的，这种超高频电磁波已具有光波的传输特性，因而可以成束状直线发射传送，便于对样品进行无接触探测。图 3 是我们试制的微波粮食水分仪整机方框图。

由微波源 (1) 产生的波长  $\lambda = 3\text{cm}$  的微波，经隔离器 (2) 从发射喇叭 (3) 辐射出去，穿透样品后的微波由接收喇叭 (4) 接收，然后送至检波二极管 (5)，检波后的直流电通过电阻衰减器 (6) 和放大器 (7)，送到指示电表上。样品中水分决定了微波衰减的大小，因而指示电表的电流读数可以反映样品中的水分含量。它们之间严格的关系曲线可由实验决定。

\* 1974 年 7 月 20 日收到。

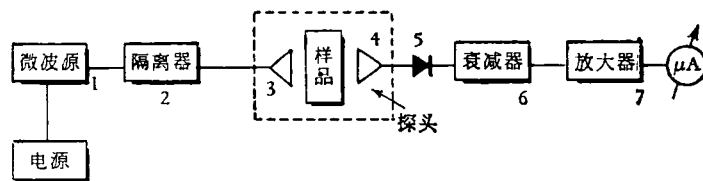


图3 整机方框图

## 二、设备介绍

探测头和微波源的精心设计是提高整机各项指标的关键,现对其大致结构介绍如下:

### 1. 探测头

一般都选取料盒大一点,使测量结果有较好的代表性。当样品中各颗粒水分含量不均匀时,为希望测量值能正确反映它们的平均值,应使  $l > h$ 。我们可应用郎伯吸收定律,对场通过二理想不均匀介质的衰减情况进行计算。从图5可以看出,在纵向不均匀性情况下,损耗正比于二样品的平均衰减常数。而微波通过横向不均匀介质时的衰减情况比较复杂。因而增加样品厚度  $l$  对于减小由于物料不均匀而引起的测量误差以及提高测量灵敏度均有很大好处。按表1选取厚度  $l$  是可行的。

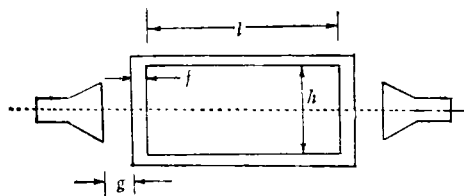


图4 探头的设计

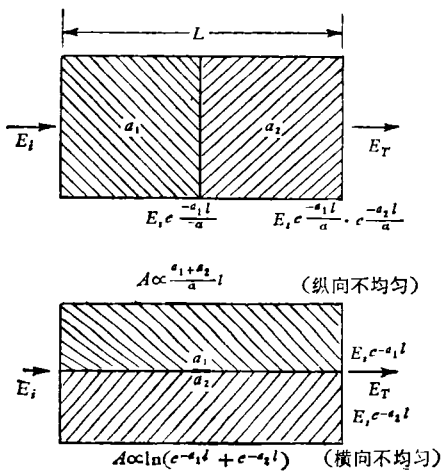


图5

表1 料盒厚度的选择

含水量范围 (%)	料盒厚度 $l$ (cm)
1—4	15
4—20	5
20—100	0.5

料盒横截面应略大于喇叭口,这可减少能量的漏失,实际上当样品衰减量在30—40 db时,漏失的影响是可以忽略的。

图6表示了喇叭口与料盒间距离和相对衰减之间的关系,很明显的取  $g = 3\text{mm}$  时,料盒微小位移所引起的测量误差最小,料盒应尽可能固定在二喇叭中间。

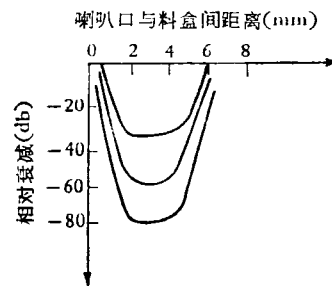


图6 喇叭与料盒之距离和相对衰减的关系

料盒本身由电介常数稳定、损耗角小的材料(例如有机玻璃或聚苯乙烯)构成。

料盒二侧壁厚度取半波长整数倍时可减少微波在界面上的反射,降低由于盒子壁厚和介电常数微小变化所引起的测量误差。

### 2. 微波源

我们利用近年来迅速发展起来的体效应振荡器作为仪器的微波源,图7是体效应振荡器的结构图。其中的体效应管是由砷化镓化合物半导体制成的一种固体微波源,它在加上直流工作电压后在谐振腔内激发出微波振荡。微波能量可以用同轴线馈送出去,也可把谐振腔与波导管组成一体,产生的微波沿波导管经分离器由喇叭发送出去,这样,仪器的结构就更为简便。

利用体效应管代替速调管作为微波源可带来很多好处。体效应振荡器的工作电源简单 ( $V = 10$  伏  $I = 400\text{mA}$ ),因而仪器结构可以做得小巧,也便于在

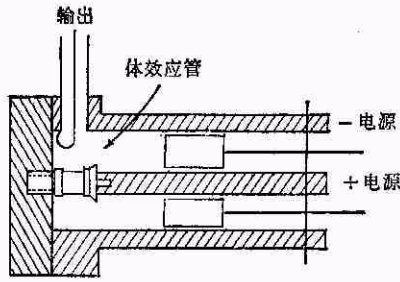


图7 体效应振荡器示意图

无电源地区使用。测水仪不象雷达，通讯等方面对微波源有很高的要求，它只需在点频上有一较为稳定的等幅功率输出，对波形的纯度要求也不高。这就为谐振腔的设计加工带来很大的方便。

### 三、使用情况

我们试制的微波水分仪见图8。在1973年曾到粮食收购现场进行实地测试，它的基本性能指标可归纳如下：

1. 测量精度： $\leq 0.3\%$ （如对每种谷物使用校正的刻度表，可把精度提高到 $\leq 0.1\%$ ）；
2. 测量范围：8—20%（根据需要可扩展至100%）；
3. 适用品种：稻谷、玉米、麦、大米、高粱、菜籽等；
4. 仪器总重：5公斤；
5. 仪器尺寸：30×40×25厘米<sup>3</sup>；
6. 电源：交、直流两用，功耗小于5瓦。

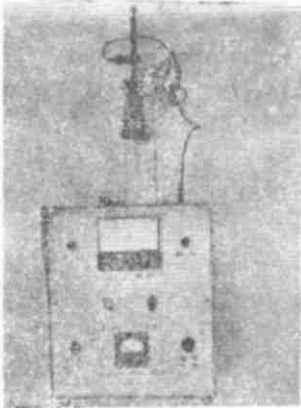


图8 微波粮食水份仪外形

通过使用，可以看出微波式比电阻式、电容式确有很多优点，为比较这三者的测量误差，我们可把这几种种测量方法用同一数学形式归纳为图8。Z、U、V是分别对(1)、(2)、(3)过程的干涉，其中Z是材料状态和特性的变化（包括化学成分、与水分子结合状态、温度、水分分布等因素）；U是测量条件的变化（探头与样品之间的作用力、接触面积、装料形式等因素）；V是测量

线路所受干扰。很明显，为使测量精度提高，应使测量系统设计得

$$\frac{\partial I}{\partial Z} \text{ 和 } \frac{\partial x}{\partial U} \text{ 为极小,}$$

$$\frac{\partial I}{\partial W} \text{ 和 } \frac{\partial x}{\partial l} \text{ 为极大.}$$

并尽可能稳定因子Z和U。在微波式中，Z因子是较为稳定的，而且x实际上是按波的路径对材料性质作积分值，这就减少了Z因子的影响。由于探头与样品无接触，U因子的影响也小。如装料时经过整流罩，使物料均匀并以自由落体进入料盒，则效果更好。同时还可把相移 $\Delta\varphi$ 作为一个讯号输出值，利用双参数可得全部讯息，可精密补偿干扰影响。

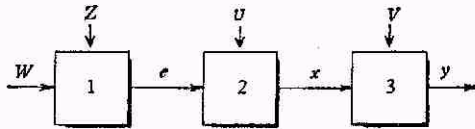


图9

- (1) 将温度W转变为介质参数 $\epsilon$  ( $\epsilon, \text{tg}\delta, \sigma$ )
- (2) 将 $\epsilon$ 转变为电气参数x (衰减A, 相移 $\Delta\varphi$ , 电流电压)
- (3) 将x转变为讯号y。

电容法受U因子的影响大，电阻法受Z和U的干涉都严重。要减小这二因子是极困难的。所以这二种方法虽问世几十年，结构类型不下上百种，但都没有解决这个关键问题，其应用范围一直受到很大限制。

### 四、应用展望

1. 微波水分测试仪的检测灵敏度还可大大提高，很有可能在一些应用部门把它发展成为一种标准的水分检验仪器。同时高灵敏的微波测水仪可在制药、炼油、生物化学试验部门找到广泛的用途。图9表示了一种连续测试煤油或其它石油制品的探头结构。探头的金属管做得与波导的标准尺寸一样，可与波导系统直接连接，管子可延伸至几公尺，检测0.001%以下的水分含量。

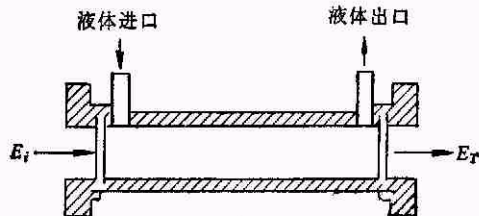


图10 测量石油制品中含水量的探头示意图

2. 由于微波测水仪的探头无需与样品接触，所以

物料可在输送带上连续通过微波束，其水分含量被立即测量出来。所以在卷烟、纸张、茶叶等生产加工流水线上将成为唯一可行的检测、监示手段。表 2 列出了

表 2 几种物料的介电特性

	水	典型木料	纸	干土壤	烟 叶
$K_r$	64	1.6	2.7	2.4	1.8
$\text{tg}\delta$	0.45	0.019	0.019	0.00042	0.018

一些物料的电介质特性，可看出微波测水法的应用范围是很广的。

3. 在仓库贮存技术中，迫切需要能快速精确检测大宗物料内部的水分。图 10 是一种表面波体系，微波可沿金属杆表面传播，受到包围在四周的物料的影响而衰减后的微波，到达位于杆前的检波头，最后转换成电讯号送至放大、显示设备。可以说，微波测水仪向插入式、埋入式发展也是很有前途的。表面波插入式探头如图 11 所示。

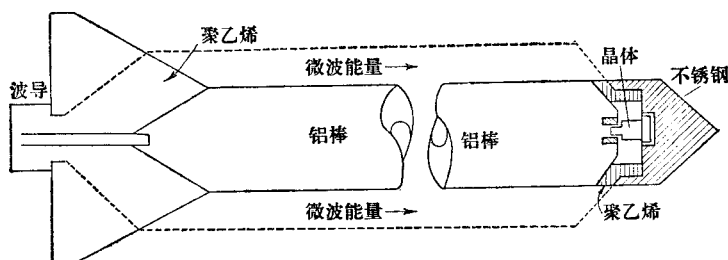


图 11 表面波插入式探头

## 后 记

从近来大量实验数据分析来看，温度对测量值的影响是比较复杂的。在比较宽的水分范围内(5—25%)，温度系数不能简单看成一个常数，不同谷物的温度系数也有差别。为了减少温度变化对测量的影响，最好是把不同品种的谷物在各种温度下的实测值用曲线或表格形式记录下来，在使用时核对校正。用热敏电阻补偿法或使用高频加热法把样品控制在一个固定温度上都是可行的方法，但会使仪器的结构变得很复杂。

仪器的喇叭安装可采用横向或竖向二种结构，采用横式结构时，微波穿过物料的二个界面是为容壁所固定的，装料误差可控制得较小，设备也便于安排，利于缩小仪器体积，测样取料也可少一点，这样微波衰减较小，检测后不加放大器，缺点是读数显示比较麻烦。因为当微波横向穿过样品时，衰减决定于被穿越样品中水的绝对重量，而我们要测量的是水在样品中的重量百分比，这样要求样品重量不能变化，因而当样品的容重比不同时就要另加校正。自动化流水线上测量时都只能采用横向结构，测量时物料的流量和容重一定要加以控制。采用竖式结构，可以不管样品的容重变化，有利于被测值的直接显示，但装料方法上要多加考虑，要减少样品厚度发生变化时波通道中的驻波、散射等因素发生的变化。

微波的发射、接收喇叭应设计得具有良好的辐射方向图特性(即减少旁瓣的幅值，消除反向辐射)，并根据

据料盒和仪器体积确定喇叭的具体尺寸，使得测量时微波的漏失和边缘影响减至最小。采用带有波纹壁的镀铜的泡沫介质喇叭和镀铜塑料波导管，是提高仪器性能降低成本的一条重要途径。

固态微波源最近又有飞速进展，雪崩渡越时间二极管和 IMPATT 管(碰撞雪崩渡越时间二极管)具有更大的微波功率输出，幅度和频率稳定度也有提高。高频晶体三极管已在 S 波段得到有用的功率输出，并还在向更高的工作频率、更大的功率输出、更低的噪声系数、更佳的能量转换效率等几方面发展。经过一段时间的实践和摸索已经把谐振腔的结构改变得更为简单、轻便，甚至可以把检波架稍加改装代替谐振腔。在微波测水仪中采用固态源比用电真空器件——速调管是利多弊少。所有这些都使微波测水仪的生产成本逐渐变得可以与电阻式、电容式相较。

但是我们也应看到，电阻式、电容式也有他们的一些优点，经过精心设计制作的一些电阻式测水仪在一些特定的使用场合中也能获得满意的效果。可以预料，在今后一个相当长的时期中，这几种方法相互并存、相互补充，将共同为各个部门的测水需要而作出贡献。

本文所讨论的都是有关物料中水分含量的检测方法，习惯上称为湿度测量法，按严格定义，湿度是指空气中的水分含量，这又属于另一个专门的技术问题。就我们所知，利用微波谐振腔法测定空气湿度也是一种有价值的方法。