

手提反射式微波测湿仪

钟茂声

(厦门大学)

摘要: 本文主要介绍手提反射式微波测湿仪的工作原理,并阐述它对小麦、黄豆和玉米等粉末状物质测量结果进行分析,说明微波测湿具有很大的优越性。

关键词: 微波测湿、介电常数、反射系数。

1. 前言

在工农业生产过程中对各种成品或半成品非金属材料含水量的检测是非常重要的。所检测的材料有板状、粉末、颗粒、块状;有固体或液体;有取样或在场动态中的测量方式。对物质含水量的测量,在本世纪初期是采用电导式的 D、C 湿度计,后来应用测量物质介电常数的 R、F 方法湿度计,到了本世纪五十年代初期已发展应用微波技术测量物质的含水量,检测时材料只与微波传感器单边接触,具有快速、安全、可靠等优点。当前国内外在工农业生产和食品加工方面的大量采用微波测湿法,并结合微型计算机应用原理,在生产过程中形成闭环自动控制水份含量,以提高产品质量。

2. 微波测湿原理

$$\text{或 } \gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon' - P - j\epsilon'')^{1/2} \quad (4)$$

这里的 $P = (\lambda/\lambda_c)^2$, 值得注意的是 λ 和 λ_c 分别为自由空间波长和截止波长。由此可见,式(4)一般可由传播常数组份给予描述,即由衰减系数和相位常数表示:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' - P}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon' - P} \right)^2} - 1 \right]} \quad (5)$$

测量非金属材料含水量有湿基法和干基法两种方式,即:

$$m_w = \frac{W_1 - W_n}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$m_d = \frac{W_1 - W_n}{W_n} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_1 为材料的湿重(烘干前材料的重量), W_n 为材料的干重(烘干后材料的重量)。在工农业生产过程中,比较常用的是湿基法,我们研制微波测量材料湿度也是采用这种基准。同时,微波测量湿度的方法,它是建立在对于干湿材料有很小含水量变化都会影响该材料介电常数的不同为理论依据。我们知道,电磁波在介质材料中传播常数可由介电常数 $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ 的特性表示,因此可由下面关系式进行推导[1]

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' - P}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon' - P} \right)^2} + 1 \right] \quad (6)$$

当电磁波在自由空间传播时, $P=0$, 其两参量可用如下近似公式来表示电磁波传播到湿材料中的状况, 当 $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$, 且 $\text{tg}\delta \ll 1$ 时, 即:

$$\alpha \cong \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2\epsilon'} \text{tg}\delta \quad (7)$$

$$\beta \cong \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 从材料中的电介质特性关系是能够确定材料本身的湿度的大小 [2], 所以

①材料介电常数和它湿度之间的函数关系为 $\epsilon = f_1(W_w, W_0)$ 必须确定;

②电磁波特性和湿材料介电常数之间的函数关系 $E = f_2(\epsilon)$ 应当确定;

③测量设备的显示输出和电磁波特性之间的函数关系 $\gamma = f_3(E)$ 也必须确定。

实践证明, 这三种函数是从线性方面推导出, 可是它们之间是被不想要的效应互

$$A = f(\omega) = \int_0^L \alpha(L) dt = \alpha L \quad (9)$$

式中 α 是衰减常数, 与样品湿度有关, 当样品厚度为恒定值时, A 幅度是随 α 值而变化。当电磁波通过材料厚度为 L 恒定值时而引起相位移动的测量方法 [5], 可给出方程如下:

$$\varphi = \int_0^L \left[\beta(L) - \frac{2\pi}{\lambda} \right] dL = (\beta - \beta_0)L \quad (10)$$

式中 β 为电磁波通过被测材料时的相位常数, β_0 是在空气中的相位常数, 这时相位 φ 就随着相位常数 β 而变化。当电磁波通过湿材料表面时测量其反射系数 Γ , 可从如下方程获得:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{(\beta - \beta_0)^2 + d^2}{(\beta + \beta_0)^2 + d^2}} \quad (11)$$

相干扰和互相掩盖着。例如函数 f_1 受材料的形状、结构、温度、化学成份、颗粒的组份和分布等变化的影响; 函数 f_2 受测量条件 (如传感器尺寸, 微波系统的阻抗匹配, 材料样品的放置等) 不稳定的影响; 最后函数 f_3 受所有电器元件的噪声和不稳定性的影响。因此, 我们在测量材料湿度与电参量之间的关系时, 有几种参数的测量应尽可能根据实际情况分别交替地进行: ①复传播常数 $\hat{\lambda}$ 的确定; ②复反射系数 $\hat{\lambda}$ 的确定; ③复传输系数 $\hat{\lambda}$ 的确定; ④复输出阻抗 $\hat{\lambda}$ 的确定; ⑤复共振角频率 $\hat{\lambda}$ 的确定。对于这些参数在自由空间或在波导管内, 或在谐振腔中都能够进行测量。以下是我们应当尽量考虑微波测湿法的几种方式: 有吸收微波能量的衰减法, 相位移测湿法, 反射系数测湿法以及截止式谐振腔测湿法。当电磁波穿透被测材料随着湿度而衰减幅度 A 时, 可把测量方程式写成如下关系 [3]

式中 d 为非正入射的相位因子, 如果被测样品材料足够厚, 从样品反向表面反射回来的电磁波能量可以忽略时, 那么 Γ 反射系数就与材料样品所呈现的厚度和表面状况是无关的。当某种样品插入谐振腔后, 如果被测样品体积厚度 L 比谐振腔的体积小很多时, 其谐振腔频率变化可用如下形式表达:

$$\Delta\omega = \theta(W) \cong \omega_0 L \frac{\epsilon' - 1}{K} \quad (12)$$

$$\text{或 } \Delta Q = Y(W) \cong 2\epsilon'' L/K \quad (13)$$

式中的 K 是腔体的形状因子, 而 $\Delta Q = \frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0}$ 是由于样品插入腔中引起 Q 值的变化。综上所述, 至于采用哪种方式测量物质湿度, 就必须根据样品的特性和状态来选择。我们以反射式微波测湿法为例, 说明微波测量物质的含湿度具有先进性和优越性。

3. 测试电路

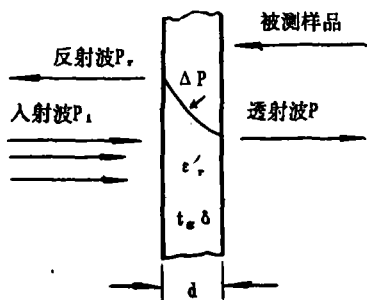


图1 被测样品电磁波分布规律

从图1中被测样品通过电磁波后, 由电场的分布情况可知, 当微波源的功率为 P_i 入射被测样品后, 有一部分微波能量被材料所反射, 反射波功率用 P_r 表示, 还有一部分微波能量能够透过被测样品再继续传输, 即由透射波 P_t 来表示[4], 这时被测材料所吸收的微波能量(即被衰减的微波功率)就是:

$$\Delta P = P_i - (P_r + P_t) \quad (14)$$

由式(14)可知, 在一定入射波功率之下, 就有反射波 P_r 和透射波 P_t 的相应值。因此, 我们就利用测量 P_r 、 P_t 或 ΔP 这三种量值中任意的一项, 就可以测出某种材料样品的含水量。我们所研制的微波测湿法是测量反射波能量

的方法, 用反射系数表示:

$$\Gamma = 10 \log Pr/pi \quad (15)$$

$$\text{或 } \Gamma = 20 \log \left[\frac{\sqrt{\epsilon'} - 1}{\sqrt{\epsilon'} + 1} \right] \quad (16)$$

由式(16)可知, 因为含水材料的 ϵ' 主要是由材料的湿度 m_w 决定, 当 m_w 增大时, ϵ' 也随之增大。由此可见, 当样品材料基重保持一定的情况下, 测定 Γ 物理量之后, 就可以确定该材料的湿度 m_w [6]。

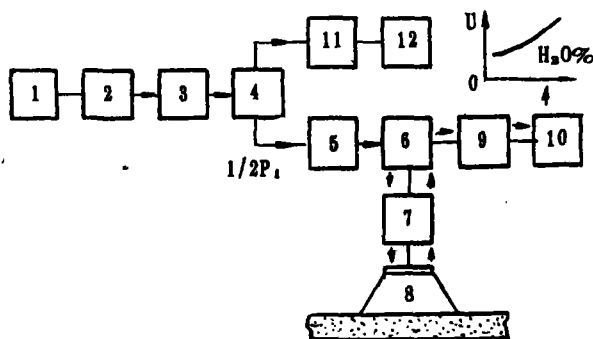


图2 反射式测湿仪电路结构图

图2所示就是我们所采用的反射式微波测湿仪的电路结构框图, 各元件名称标注如下: ①12V 电池; ②介质腔微波振荡器; ③隔离器(单向器); ④ $\frac{1}{2}$ 功率分配器; ⑤同轴波导转换器; ⑥T型环流器; ⑦双螺钉调配器; ⑧微波传感器; ⑨波导检波器; ⑩ H_2O 百分比显示器; ⑪同轴检波器; ⑫微波功率监视器。该电路的工作流程为: ①由介质腔微波振荡器②产生的微波能量 P_i (约 50mW 左右), 频率调至 9370MHz 附近, 通过隔离器③经由二分之一功率分配器④和同轴波导转换器⑤及 T型环流器⑥传输至双螺钉调配器⑦最后将 $1/2 P_i$ 功率传至微波传感器(喇叭)⑧直达被测样品材料。然而由图1可知, 当电磁波到达被测样品材料后, 将有一部分微波能

量被反射,这时反射波 P_r 经由传感器⑧和双螺钉调配器⑦顺其 T 型环流器⑥传输至波导检波器⑤,最后把检测的反射信号电压关入 H_2O 百分比显示器⑩指明被测材料含水量的大小。这时候,反射波 P_r 的大小值是与被测样品所含水份 m_w 有关,水份多 ϵ' 大, P_r 也大;水份少 ϵ' 小, P_r 也小。所以这种微波电路的基本结构原理就是在这种基础上组成的。

4. 测量结果

我们研制这种微波电路结构,主要是测量小麦,黄豆和玉米等粉末状材料所含的水份。按部颁标准,这三种材料所含水份分别为:小麦 $13\% \pm 0.5\%$,黄豆 $14\% \pm 1\%$,玉米 $14\% \pm 1\%$ 。测量这些样品时是把这三种被测材料各取样三份 5 克重放在温度 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的电热干燥箱连续烘 4 小时,由恒重法测量它们的含水量。测量结果如图 3 的 $V_o \sim H_2O\%$ 曲线所示,所测水份范围从 5% 至 20% ,电路的输出电压指示值为 10mV 至 40mV 之间。这三种样品含水量的测量误差值是限定在 $\pm 0.5\%$ 和 $\pm 1\%$ 之内(部颁标准),而用反射式微波测湿仪测量时其误差值是在 $\pm 0.5\%$ 之内,比一般恒重法测量要准确。由图 3 的曲线可知,这三种样品所含水份为 $13\% \sim 14\%$ 符合部颁标准值时,它们所对应的输出电压是 $35\text{mV} \sim 40\text{mV}$ 之间,这完全满足高灵敏度的显示器或微型计算机的输入要求。因为我们所研制的是手提反射式微波测湿仪,即采用

8098 型单片机作为智能化仪器,这将另文阐述。

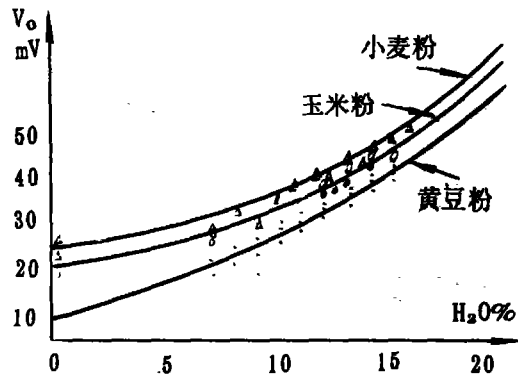


图 3 反射信号与样品水份的关系曲线

5. 结束语

由实验结果表明,手提反射式微波测湿仪的传感器测量样品是单边接触,测量快速方便,它可以交直流两用供电,在无市电情况下仍然可用干电池供电测量,是比较简便的测湿仪。该测湿仪虽然会受材料各向异性和松紧度(填充系数)的影响,但对于测量粉末状饲料物质或肥皂粉等物质的含水量,其误差小,测量精度高。

我们在研制这种湿仪的过程中,发现被测材料的传感器采用圆筒式容器比方形容器要优越得多,测量误差要小得多。这是因为物料在圆形容器的松紧度和排列要比方形容器分布均匀,这样就可以减少被测材料各向异性和填充系数对电磁场分布的影响,从而提高了测量的准确度。

参考文献

(1) Kraszewki. Microwave Instrumentation for Moisture Measurement. Journal of Microwave Power, 8(3/4), 1973.
 (2) M. A. K. Hamid. Survey of Radio Frequency Techniques For Teledetection of Soil Moisture. Journal of Microwave Power, 8(3), 1973.

(下转第 31 页)

该程序中,190至198通道为信号存储区,分别存储五次采样值和总和;180至185通道为用于中间计算的缓存区;190通道是程序运行的出错标志,用于检测滤波过程的正确性;数据区D045和D047中所存储的数值为0005和0004。之所以设置缓存区,是为了在多信号输入是实现计算过程的通用性。该程序运行后,对存储于D120中的数字量信号(BCD码)进行滤波,滤波结果仍以BCD码方式存储于D120中。

5. 结论

周期扫描机制是可编程控制器的一个很

重要的特征,深刻理解这一机制并在编程中灵活运用,是可编程序控制器应用程序开发的一个很重要的方面。对可编程控制器输入信号的快速软件滤波,即是巧妙地利用了可编程序控制器的这一机制。因此,无论是对开关量输入信号的滤波还是对模拟量输入信号的滤波,其方法易于用梯形图来实现,而且与传统的滤波方法相比,能够以少的程序量和短的扫描时间完成对信号的良好滤波效果。本文所介绍的方法在某大型装备控制系统软件设计中得到应用,从软件的调试和实际运行的结果来看,此方法十分有效。

.....

(上接第 12 页)

密程度和积分器运放的长时间稳定性和温度稳定性对整机的准确度和稳定度的影响。

c. 精密整流电路的带 * 电阻精密程度和运放转换速率对波形的对称性及过零时波形畸变的影响。

d. A/D 转换时所出现的量化误差、零位偏置误差、增益误差及非线性误差等转换误差的影响。

减弱或消除这些系统误差的影响,可进一步提高整机的准确度和辨别能力。

参考文献

1. J·J·Power. "A digital offset fluxgate magnetometer for use in remote geomagnetic observatories" AFCRL TR 73 0603.1973 年
 2. B·R·Morton and K·P·Suckan. "A micropower fluxgate magnetometer for remote operations" Momitor 9272~277
 3. D·I·Gordon and R·E·Brown. "Recent advances in fluxgate magnetometer". IEE Trans in mag Vol MAX-8 No 1 march 1972 年。
 4. 王德芳、叶妙元。“磁测量”。北京,机械工业出版社,1990,10。
 5. 李白男。“伪随机信号及相关解识”。北京,科学出版社,1987。
-

(上接第 26 页)

(3) James R. Wsng and Thomas J. Schmutge. An Empirical Model for the Complex as a Function of Water Content.

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. Ge. 18. No. 4. October 1980.

(4) 吕文选,余扬政。“微波测量湿度原理及其在造纸方面的应用”。厦门大学学报(自然科学版),1979,2:86-95。

(5) 周清一。“微波测量技术”。国防工业出版社,1964,220-225。

(6) M. Bramanti and E. Salerno. Electromagnetic Techniques for Nondestructive Testing of Dielectric materials: Diffraction and Electromagnetic Energy.

Vol. 27 No. 4. 1992. 233-240.