

用微处理器的随线式微波测湿系统*

火真棣 伏寿椿
(华东师大电子科学技术系)

提 要

本文介绍一种随线式微波测湿系统。本系统所用传感器灵敏度较高,线性较好,适合于在传送带上测量碎屑状电介质的含水量。由于采用了可编程计算器采集和处理数据,提高了测量准确度。本系统已在上海焦化厂精煤传送带上做了动态实验,所得结果与实际含水量基本相符。

一、引 言

微波测湿是基于微波与待测电介质和水相互作用将产生衰减这一现象。待测电介质的介电常数一般都不很大,约为2—10,如原油的 $\epsilon = 2.185$,羊毛的 $\epsilon = 3.54$,砂粒的 $\epsilon = 2.53 - j0.091$,精煤的 $\epsilon = 5.14 - j0.19$;而水的介电常数在常温下约为60—80,它要比待测电介质的介电常数高一个数量级左右。待测电介质含了水分以后,它的介电常数便介于原来数值与水的介电常数之间。我们称此介电常数为混合介电常数。待测电介质的含水量愈高,它的混合介电常数就愈大。

微波通过电介质时,其振幅、相位和传播速度会发生变化,变化的大小主要决定于介质的介电常数。倘若在一谐振腔内放入不同介电常数的介质,腔的谐振频率也要发生变化。大家都知道,待测介质的介电常数与其所含水分有关,因此我们可以根据微波与待测介质相互作用后产生的振幅、相位和频率的变化来确定待测介质的湿度。测量湿度的微波衰减法就是根据微波通过待测介质后振幅的变化来确定湿度的;相位法则是根据相位的变化来确定湿度的。利用开放式谐振腔,由于此种腔的 Q 值高,待测介质又可比方便地通过它,再配上锁相信号源就能做成精度高、使用方便的微波测湿仪。

测量过程中并不需要测出具体的介电常数,而只要测得待测介质含水量与微波的振幅、相位和频率中任一量之间的关系即可。在定标过程中待测介质的含水量可用失重法测得。

二、传 感 器

本文采用微波衰减法。系统中采用一种新型传感器,它是一段3cm开槽矩形波导,波

* 1984年12月24日收到,1985年7月30日修改定稿。

导中填充以高频低耗介质。该传感器结构简单,灵敏度较高。

传感器是在矩形波导H面正中央开一长槽,槽宽和槽长可根据需要选择,槽两端有平滑过渡段以改善匹配(图1)。波导外包有厚度适当的高频低耗介质层,以防物料落入波

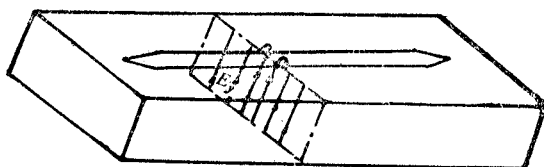


图1 传感器的结构(I)

导内,此层也可增强波导表面的耐磨性。实验表明,微波衰减量与槽宽的关系如图2所示;微波衰减量与槽长的关系如图3所示^[1]。图1所示的传感器,结构简单、线性好,但灵敏度较低。

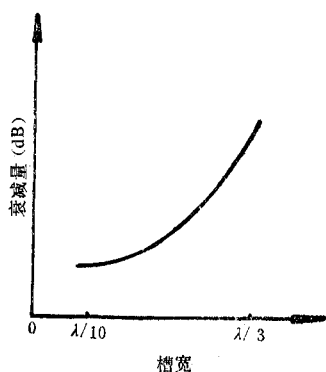


图2 衰减-槽宽特性

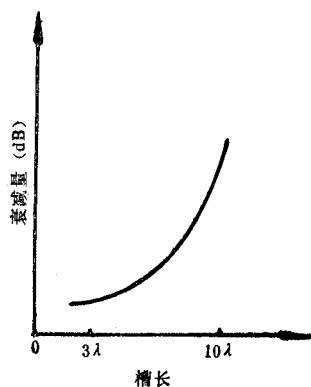


图3 衰减-槽长特性

若在波导内填以高频低耗介质,可明显地提高灵敏度。在 20°C 室温下,用图1所示传感器,按图4所示电路系统测量精煤含水量,测得的含水量与传感器输出功率之间的关系如图5的直线1所示。它的斜率为 -0.60 ,截距为 9.7 ,相关系数为 0.99 。在上述波导内置入长度与槽相同、横截面与波导内尺寸相同,两端带有过渡尖劈的聚乙烯介质后(图6),在 20°C 室温下,做同样的实验,所得的功率-含水量曲线如图5的直线2所示。它的

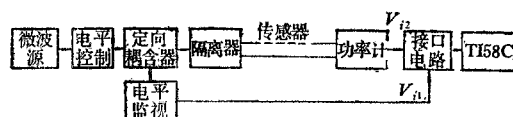


图4 实验电路图

斜率为 -1.06 ,截距为 9.4 ,相关系数为 0.93 。直线2的斜率比前者提高了 76% 。

这是因为矩形波导中的 H_{10} 波的波导波长为

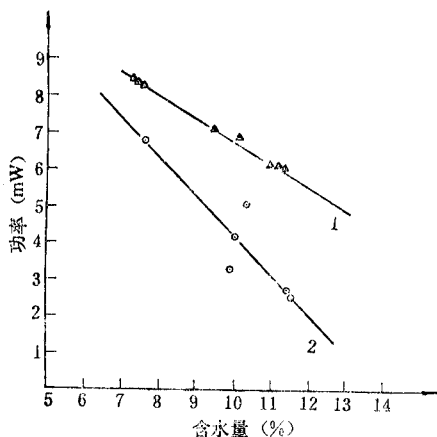


图5 功率-湿度特性曲线(20℃下测量)

1-开槽波导, 2-填聚乙烯开槽波导

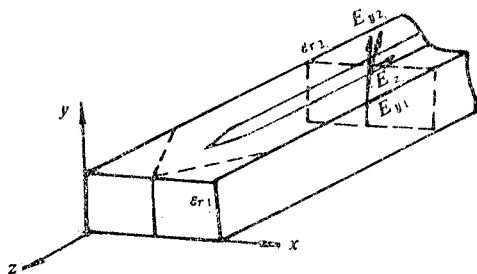


图6 传感器的结构

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (1)$$

这里 λ 为微波信号源的工作波长, a 为矩形波导宽边内尺寸。当波导中充满介电常数为 ϵ_r 的介质后, 波导波长 λ_{gs} 为

$$\lambda_{gs} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (2)$$

聚乙烯的 $\epsilon_r = 2.54$, 这使 $\lambda_g/\lambda_{gs} = 1.76$, 即使机械长度相同的波导的电长度增加到原来的 1.76 倍, 从而使衰减量也相应增加。这说明理论计算与实验结果一致。

测量时试样从波导的有槽面上通过, 试样的含水量愈大, 其混合介电常数也愈大, 因而从波导槽缝中泄漏出的微波功率也愈大, 这是此种传感器测湿的物理基础。^[2]

实验电路如图 4 所示, 微波源用 BS-10 体效应振荡器, 功率计用 GX2B 微波小功率计, 其输出端电压满度为 1 V。

三、误差分析

本系统的误差主要是微波信号源功率不稳定、系统失配和装料密度变化引起的误差。

设信号源幅度为 $u(t)$, 经过干样品后的信号幅度为 $E_1 = T(1) \cdot u(t_1)$, $T(1)$ 是干样品的传输系数。经过湿样品后的信号幅度为 $E_2 = T(2) \cdot u(t_2)$, $T(2)$ 是湿样品的传输系数。信号源幅度稳定时 $u(t_1) = u(t_2)$, 此时对于潮湿样品, 微波的衰减量 A 为

$$A = -10 \lg \frac{T^2 \cdot (2)}{T^2(1)} \text{ (dB)}. \quad (3)$$

若微波信号源幅度不稳, $u(t_1) \neq u(t_2)$, 则

$$A = -10 \lg \frac{u^2(t_2)}{u^2(t_1)} - 10 \lg \frac{T^2(2)}{T^2(1)} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

或

$$A - \Delta A = -10 \lg \frac{T^2(2)}{T^2(1)};$$

$$\Delta A = 10 \lg \frac{u^2(t_2)}{u^2(t_1)} = 10 \lg \frac{P(t_1) + \Delta P}{P(t_1)} = 10 \lg (1 + \delta) \quad (5)$$

式中 $\delta = \frac{\Delta P}{P}$ 为功率稳定度。

当功率稳定度 $\delta = 1\%$ 时,所引起的测量误差由(5)式算得为 0.043dB。所用 BS-10 体效应信号源开机 20min 后,输出功率变化远小于 0.043dB,所以信号源功率稳定度符合要求。

在测量过程中,信号源、传感器和检测系统间的不匹配引起的误差称为失配误差。失配误差可作以下估算。图 7 中 a_1 , a_2 分别为传感器 1 端口和 2 端口的进波, b_1 , b_2 分别为传感器 1 端口和 2 端口的出波。可以导出传感器的总衰减量为^[3]

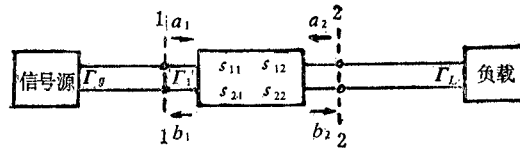


图 7 失配误差分析电路

$$A = -20 \lg \left(\frac{s_{12}''}{s_{12}'} \right) + 20 \lg \frac{(1 - s_{22}'' \Gamma_L)(1 - \Gamma_1' \Gamma_g)}{(1 - s_{22}' \Gamma_L)(1 - \Gamma_1' \Gamma_g)}, \quad (6)$$

上式中 s_{12}'' 为用 s 参数表示的。传感器上通过湿样品时的传输系数, s_{12}' 为与之相应的通过干样品时的传输系数, Γ_g 为信号源的反射系数, Γ_L 为负载的反射系数。

当传感器为对称元件时 $s_{22}'' = \Gamma_1'$ 为放湿样品时传感器的反射系数, $s_{22}' = \Gamma_1'$ 为放干样品时传感器的反射系数。本系统的实测数据为:

$$\Gamma_g = 0.012, \Gamma_L = 0.09, \Gamma_1' = 0.06, \Gamma_2' = 0.04.$$

所以失配误差为 0.017dB。按最坏相位关系计算失配误差约为 0.088dB。当满度功率为 10mW 时,该失配误差引起的功率变化约为 0.2mW。

因此本系统的总误差为 0.13dB,总均方误差为 0.098dB。实际测量中,湿度每变化 1% 相应的功率变化在 0.5—1mW。因此仪器的总系统误差远满足 1% 含水量的误差要求。

测量粉粒体含水量的特点是存在装料密度问题。因为含水量相同的粉料,密度不同时反映出的微波衰减量是不同的。所以为了准确地用微波衰减量表征试样的含水量,就必须消除因装料密度变化而引起的误差,简称装料误差。实际上,由于本传感器泄漏出的微波只被其表面附近的一层试样所吸收。所以只要使传感器上的试样有适当厚度,利用试样的自重来控制其自身密度,就可以解决上述问题。装料密度的影响如表 1 所示。表

表 1 装料密度的影响

试样厚度(cm)	2	3	4	5	6	7	8
输出功率(mW)	6.4	6	5.7	5.2	5.2	5.2	5.2

中第 1 行为传感器上方同一含水量的试样的厚度,第 2 行为传感器输出端的功率电平,由表可见试样厚度较薄时,密度对微波衰减量的影响较大。而当试样达到一定厚度后,试样的自重使下层试样的密度基本相同,输出的功率电平就比较稳定。在静态实验中,采用适当的试样厚度后,此项误差基本可忽略,但在动态条件下,情况就比较复杂,不但要控制试样的厚度、流量还要注意皮带机的车速和振动等情况。

四、微处理器应用

应用微处理器可在生产线上进行湿度测量的实时采样和统计性数据处理,这样可提高测量的准确度。

在碎屑状物质的湿度测量中,表征湿度的微波功率衰减量不仅与试样的含水量有关,还与试样的装料密度以及环境温度等多种因素有关,因而具有一定的随机性。我们需要用统计方法在大量的实验观察中,寻找隐藏在上述随机性后面的统计规律性,这类统计规律称为回归关系,有关回归关系的计算方法和理论通称回归分析。回归分析所利用的数学模型主要是线性回归模型或多项式回归模型。我们采用一元线性回归模型。这是因为试样的含水量(%)与传感器输出端的功率指示间的关系基本上是线性的。(见图 5)。一些点偏离直线是由装料密度,试样温度等其它因素引起的。线性回归运算的目的在于:(1)建立回归方程,(2)判断湿度与测得功率的相关程度。

一元线性回归方程为

$$\hat{y} = b + mx,$$

这里 b, m 称作回归方程的回归系数。对于每一个 x_i 都可由上面方程确定一回归值 $\hat{y}_i = b + mx_i$, 该回归值 $\hat{y}_i$ 与实际观察值 y_i 之差即 $y_i - \hat{y}_i = y_i - b - mx_i$, 表示了 y_i 偏离回归直线 $\hat{y} = b + mx$ 的程度。对于所有的 x_i , 若 y_i 与 $\hat{y}_i$ 的偏离愈小, 则认为直线与所有的试验点拟合得愈好。显然,全部观察值 y_i 与回归值 $\hat{y}_i$ 的偏离的平方和,

$$Q(b, m) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b - mx_i)^2,$$

描述了全部观察值偏离回归直线的程度。所谓最小二乘法就是使 $Q(b, m)$ 为最小的一种确定 b 和 m 的方法。因此,用最小二乘法找出的直线 $\hat{y} = b + mx$ 是这样一条直线,它与点 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 的偏离是一切直线中最小的。在用可编程计算器对湿度数据进行采集和回归运算时,正是从大量的定标数据中求得 b 和 m , 从而建立起能最合理地表示湿度与功率关系的回归方程。这里

$$b = \bar{y} - m\bar{x},$$

式中 $\bar{y}$ 为 $y_1, \dots, y_n$ 的平均值, $\bar{x}$ 为 $x_1, \dots, x_n$ 的平均值,

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

(参见文献[4])。

由正态分布规律可知,要使截距 b 和斜率 m 的计算结果准确些,就应在需要测量的湿度范围内多测几个含水量不同的样品;同时每一含水量相同的样品反映出的含水量 x 值也应适当地取一些。这样建立起 $y = b + mx$ 的线性回归方程后,就可根据采集到的微波功率值 y 来推算相应的含水量 x 。

目前一般使用的测湿方法均为失重法,即在传送带上取一定量的样品,经干燥后,测其失去的重量。所得湿度数据是孤立的,而随线式湿度测量法同时又采用线性回归法处理数据,不但能反映试样湿度的全貌,而且把一些随机因素的影响也考虑进去了,显然是有优点的。

我们用相关系数 $\hat{r}$ 来衡量湿度与微波功率的相关程度。 $\hat{r}$ 由下式计算:

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

怎样根据 $|\hat{r}|$ 接近于 1 的程度来判断二变量是线性相关的呢? 根据对 $\hat{r}$ 的概率性质的研究,已经作出相关系数的临界值表^[4]。具体应用时,对于给定的信度 α (一般为 0.01, 0.05, 0.1 等),可查出相应的 $\hat{r}$ 的临界值 $\hat{r}_\alpha$ 。根据试样数据算出的 $\hat{r}$ 值大于临界值 $\hat{r}_\alpha$ 时,就认为二变量间的线性相关性显著,反之二变量间的线性相关性不显著。查表时,自由度等于试样数据组数 n 减去变量数。例如图 5 中直线 2 的数据共有 6 组,变量是 2 个,所以自由度为 4;若取信度 $\alpha = 0.05$,则由临界值表查得 $\hat{r}_\alpha = 0.811$;而实际测得的 $\hat{r} = 0.93$,因此可以认为在此测量中,湿度与微波功率的相关性是显著的。

我们用 TI-58C 可编程计算器进行含水量与功率的线性回归运算。将电平监视器来的电压 V_{i1} (见图 4) 和由 GX2B 小功率计来的电压 V_{i2} 经 A/D 变换后送入 TI-58C,求出每次采样时与试样所吸收的功率相对应的电平

$$V_i = V_{i1} - V_{i2},$$

然后由 V_i 求相应的含水量。当微波功率有波动时, V_{i1} 和 V_{i2} 同时波动,这样上述减法就代替了差分放大器的共模抑制作用,同样补偿了微波信号源的波动。在进行温度补偿时把回归线方程改写为

$$y = k_1 b + k_2 m x,$$

其中 k_1 和 k_2 分别为截距和斜率的修正系数。实验定标时求得不同温度的 $k_1 b$ 和 $k_2 m$, 并将它们放在存储器里,使用时可从键盘输入的温度查找相应的 $k_1 b$ 和 $k_2 m$ 。

接口电路是个实时控制电路,它能把 A/D 变换器的输出输入到 TI-58C 计算器(见图 9)。当被测量的功率电平需要送入计算器进行处理时,可按动“启动”按钮,“主控触发器”置 1, 打开控制“门”。“时钟发生器”产生的时钟脉冲,经过控制“门”,进入“脉冲分配

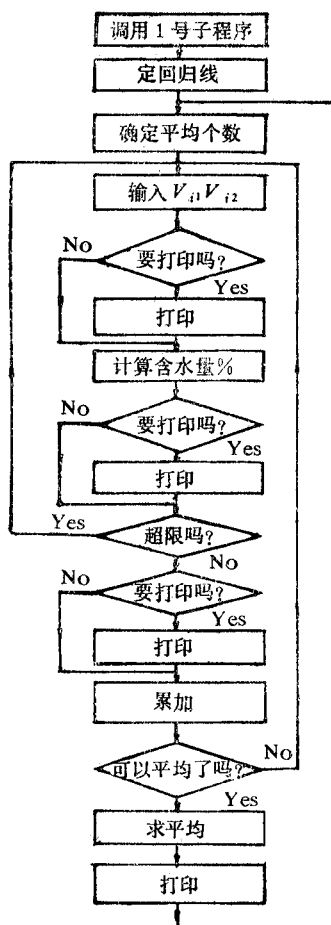


图8 TI-58C 程序框图

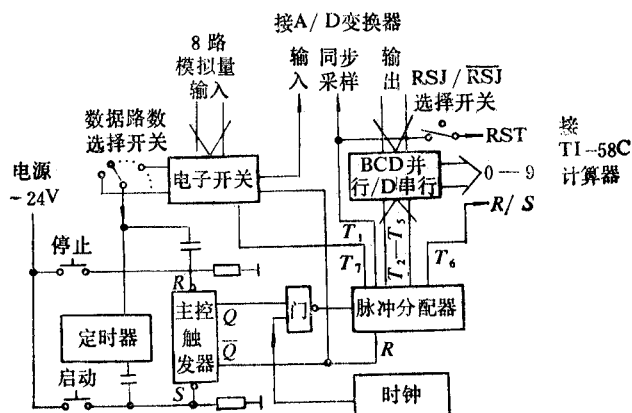


图9 A/D—TI-58C 接口框图

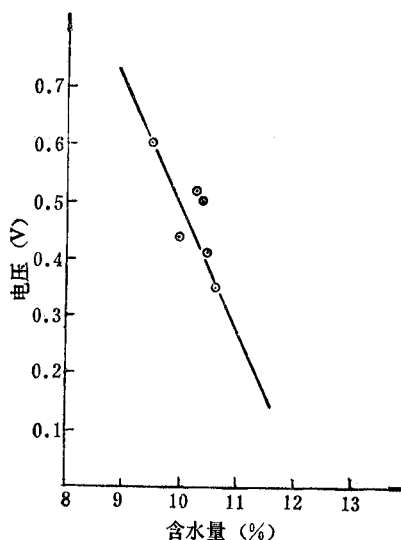


图10 动态实验结果

器”,产生 T_1-T_7 七个节拍。 T_1 由 “RST/ $\overline{\text{RST}}$ 选择开关” 决定是否要向计算器送 RST 指令; T_1 同时向 A/D 变换器送出采样指令。 T_2-T_5 控制数码的传送, 把 A/D 变换器送来的四位十进制 BCD 码译成 0—9 十个相应的十进制信号, 并且把它们串行送入计算器。 T_6 向计算器送 R/S 指令, 表示送完一个数据, 让计算器进入程序操作状态。 T_7 向 “电子开关” 送出切换信号, “电子开关” 切入另一数据, 直到需要送的数据送完。 “数据路数选择开关” 传送出一结束信号, 这一信号使 “主控触发器” 置 0, 关掉控制 “门”; 同时使 “定时器” 开始计时, 到预定的时间一到, 由 “定时器” 再次启动 “主控触发器”, 作又一次数据传送。 如要中途停止送数, 可按 “停止” 按钮, 强迫 “主控触发器” 置 0, Q 使 “脉冲分配器” 和 “电子开关” 都恢复初态, 等待一次新的 “启动”。 最近我们还为此测量系统配上了 PC-1211 可编程计算器及 DBZ-80 单板机, 增加了控制功能。

五、结 束 语

我们用这套测量仪器在上海焦化厂的精煤传送带上做了多次动态实验。动态实验的结果如图 10 所示。横轴表示精煤的含水量,是用失重法测得的;纵轴表示与含水量相对应的电压值。它们的相关系数为 0.8。计算表明此值等于临界值 $\hat{r}_a$ 。可以预计,在正式定标中,样本数 n (现在 $n = 6$) 增大后,二变量的相关关系会得到显著提高。含水量的测量范围为 2—13%。绝对误差不大于 1% 含水量,与目前焦化行业所用大试样法一致。

参 考 文 献

- [1] 木村克弘,遠藤晃,赤羽照信,マイクロ波水分测量器,日本国公开特许公报,昭 57—104844.
- [2] 火真棣,伏寿椿,华东师范大学学报,1985 年,第 3 期,第 54 页.
- [3] 汤世贤编,微波测量,国防工业出版社,1981.
- [4] 萧亮壮,谭锐先编,概率与数理统计,国防工业出版社,1980.

A MICROWAVE SYSTEM FOR MEASURING HUMIDITY OF CLASTIC DIELECTRIC ON CONVEYER WITH PROGRAMMABLE COUNTER

Huo Zhendi, Fu Shouchun

(Department of Electronic Science and Technology, East China Normal University)

A sensitive linear sensor, which is suitable for measuring humidity of clastic dielectric on conveyer, is presented. A programmable counter is used to improve the measuring accuracy. The dynamic test of this system has been completed on the conveyer in Shanghai Coking Factory. The experimental results are in good agreement with the actual humidity of the coking coal.