

# 利用微波谐振技术检测物体密度的软件设计

徐达旺<sup>1,2</sup> 张济民<sup>1</sup> 王永军<sup>1</sup> 方鹏<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第四十一所 青岛 266555; 2. 电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

**摘要:** 论述了一种物体密度的微波检测技术,即利用微波谐振技术,通过检测谐振腔的频率变化和微波信号的幅度衰减,来测定微波谐振腔体内的介质的密度。主要阐述了测量原理、校准技术和测量过程。重点对校准过程进行说明,利用频率扫描的方法,逼近谐振腔的谐振频率,对主要的公式进行了理论推导。通过对实验数据的分析与整理,结合工程实践,推导了谐振腔中的介质密度的计算公式。利用这种技术测量得到的物体密度误差满足预期设计要求。

**关键词:** 谐振腔;谐振频率;幅度;带宽;校准

**中图分类号:** TM930.12; TM931 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

## Software design of material density detecting by using microwave resonant technology

Xu Dawang<sup>1,2</sup> Zhang Jimin<sup>1</sup> Wang Yongjun<sup>1</sup> Fang Peng<sup>1</sup>

(1. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China; 2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A technique for material density microwave detecting is introduced in this paper. Using a microwave resonant technique, by detecting the change of resonant frequency and the attenuation of microwave magnitude, the density of the material in the microwave cavity resonator can be measured. Measurement principle, calibration technique and measurement process are mainly discussed. The calibration process is emphatically illustrated, that is, the resonant frequency of the cavity resonator is approached by using frequency sweep method, and some formulae are deduced. After data analysis and process of the experiment, the formula for the density of the material in the microwave cavity resonator is given. The error of this technique for microwave density detecting can satisfy the design requirement.

**Keywords:** cavity resonator; resonant frequency; magnitude; bandwidth; calibration

## 1 引言

近年来,微波测量技术已经渗透到国民经济的许多领域,特别是在民用领域得到了广泛的应用,如测量物体的水分或湿度等<sup>[1-5]</sup>。本文介绍一种利用微波技术来测量物体密度的方法。

微波通常是波长介于红外线与无线电波之间的电磁波,其特性是遇到金属材料发生反射,它很难被金属吸收,不易穿透金属;对于非金属材料,微波可以穿过,但在微波穿过的同时,其能量会被吸收一部分<sup>[6]</sup>。微波谐振法就是基于微波的这种特性,来实现对物料密度的测量。

## 2 测量原理

微波密度检测技术的原理框图如图1所示。

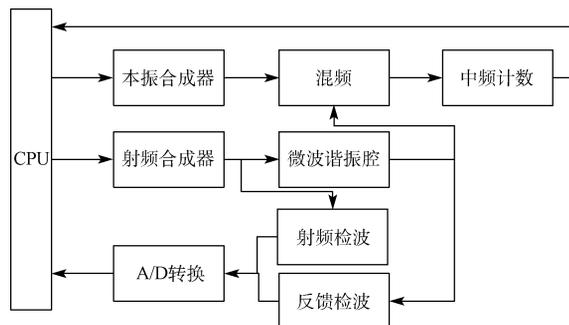


图1 原理框图

CPU 设置射频合成器的频率,用于产生射频激励;通过双通道的 A/D 转换芯片对两路信号进行模数转换。由于对高频的计数比较困难,故采用本振合成器与射频混频

产生中频,并对中频进行计数,推算出射频的频率。

微波密度检测的原理是建立在微波谐振的理论基础之上的,当非金属物料通过微波谐振腔时,物料便成了谐振腔介质的一部分,使原谐振腔的频率、幅度等参数发生变化(或称为“微扰”)。通过检测器来检测该场的变化,例如谐振频率的变化和微波信号幅度的衰减等,根据特定的方法来计算微波介质的密度<sup>[7-9]</sup>。

### 3 校准技术

#### 3.1 概述

本方案用到的谐振腔的谐振频率大约为 2.5 GHz<sup>[1]</sup>,带宽大约为 6 MHz,下面就该微波谐振腔的校准过程加以说明。

微波谐振腔校准过程,实际上是测量谐振腔的谐振点的过程。主要参数有:谐振频率(记为  $F$ )、3 dB 带宽(或半功率带宽,记为  $W$ )、校准系数(记为  $C$ )等。下面分别给出定义。

1) 3 dB 带宽是指谐振腔中的射频信号的幅度衰减到峰值幅度的一半时频带宽度。

2) 射频检波 ADC(记为  $ADC_1$ )是指射频信号不通过微波腔体后进行检波和 ADC 变换的结果。

3) 谐振腔反馈通路检波 ADC(记为  $ADC_2$ )是指射频信号通过微波腔体后进行检波和 ADC 变换的结果。 $ADC_1 > ADC_2$ 。

#### 3.2 校准过程

谐振腔的校准的关键是计算谐振频率。

文献[10-11]分别给出了方形介质谐振腔和圆柱介质谐振器的谐振频率的理论推导与计算。

本方案采用横磁模(transverse magnetic mode,  $TM_{010}$ )圆柱谐振腔<sup>[12]</sup>,其特点是只存在轴向方向的电磁场,且电磁场强度只与径向半径有关,有较高的品质因数等。运用扫频的方法计算谐振腔谐振频率。

校准过程分为粗调过程、精调过程、计算谐振频率。

##### 1) 粗调过程

以较大的步进(记为  $Step_1$ )设置射频信号的频率,检测  $ADC_1$ ,如果  $ADC_1 < 给定值 ADC_{min}$ ,则继续该过程,否则退出粗调过程,进行后续的精调过程。一般, $ADC_{min}$ 略高于通路噪声,该值的选取与电路设计密切相关。实验结果表明, $ADC_{min}$ 取满量程 ADC 的 6%~10% 比较合适。例如采用 14 位 ADC,则  $ADC_{min}$ 可取 250。 $Step_1$ 的设置与该腔体的 3 dB 带宽(记为  $W$ )有关,一般  $Step_1$ 可设置为  $W$  的 1/4,扫宽设置为  $W$  的 8~10 倍。

##### 2) 精调过程

精调过程如图 2 所示。

用较小的步进(记为  $Step_2$ )设置射频信号的频率,检测  $ADC_1$ 。为了精确测量谐振频率, $Step_2$ 不能太大,当然也不能小于系统的频率最小分辨率,当然,如果  $Step_2$ 太小,必

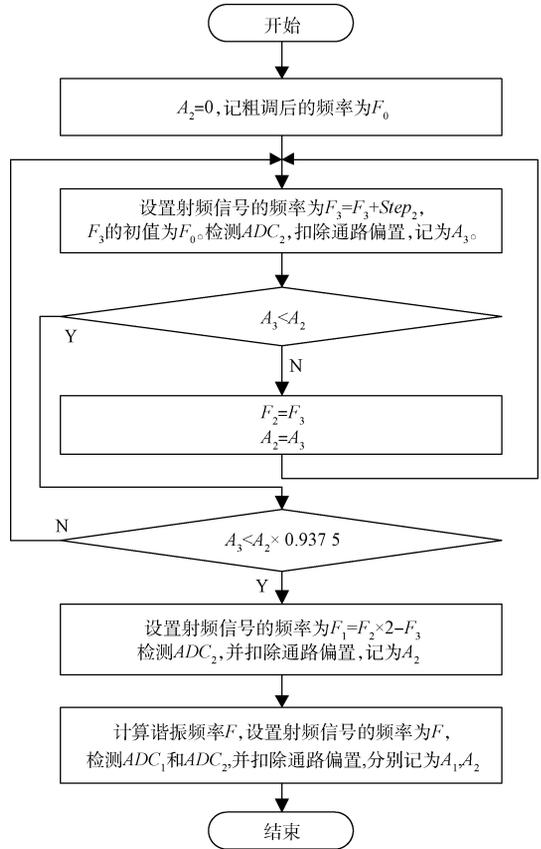


图 2 校准精调过程

然增加校准的时间。综合考虑,并根据实验,可以将  $Step_2$  设置为  $Step_1$  的 1/32~1/16 之间比较合适。

##### 3) 谐振频率的计算

可以用精调过程中测得的 3 个点,记为  $Z_1, Z_2, Z_3$ ,如图 2 所示,其坐标分别为,  $\{A_1, F_1\}, \{A_2, F_2\}, \{A_3, F_3\}$ , 计算谐振频率,如式(1)所示:

$$\begin{aligned}
 a &= A_1 \times A_2 \times (F_1^2 - F_2^2) \\
 b &= A_2 \times A_3 \times (F_2^2 - F_3^2) \\
 c &= A_3 \times A_1 \times (F_3^2 - F_1^2) \\
 d &= A_1 \times A_2 \times (F_1 - F_2) + \\
 &A_2 \times A_3 \times (F_2 - F_3) + \\
 &A_3 \times A_1 \times (F_3 - F_1) \\
 F &= \frac{a + b + c}{2d} \tag{1}
 \end{aligned}$$

其中, $Z_2$ 的幅度值  $A_2$  在此 3 点中最大, $F_2$  是以  $Step_2$  为步进下测量的  $F$  最接近的频率值。

推测:利用式(1)计算的频率值  $F$  即为满足精度的所需的谐振频率,即  $F$  不小于,且趋向于  $F_2$  的值。证明如下。

令:

$$A_1 = A_2 \times a, 0 < a < 1 \tag{2}$$

$$A_3 = A_2 \times b \tag{3}$$

$$F_1 = \lambda \times F_2, 1 - \frac{Step_2}{F_2} \leq \lambda < 1 \quad (4)$$

由校准过程可以看出:

$$a < b \leq 0.9375 \quad (5)$$

并且

$$F_1 = 2 \times F_2 - F_3 \quad (6)$$

将式(2)~(5)代入式(1)得:

$$F = \frac{a(\lambda^2 - 1) - b(\lambda - 1)(\lambda - 3) - 4ab(\lambda - 1)}{2[a(\lambda - 1) + b(\lambda - 1) - 2ab(\lambda - 1)]} \times F_2 \quad (7)$$

很显然,  $\lambda$  不能为 1。

$$F = \frac{(a - b) \times \lambda + a + 3b - 4ab}{2(a + b - 2ab)} \times F_2 \quad (8)$$

又根据式(5), 可以得出  $F$  为  $\lambda$  的减函数。

当  $\lambda = 1$  时, 式(8)中的  $F$  取得极小值, 故:

$$F \geq \frac{2a + 2b - 4ab}{2 \times (a + b - 2ab)} \times F_2 = F_2 \quad (9)$$

当  $\lambda \rightarrow 1$  时, 式(8)中,  $F \rightarrow F_2$ 。

实际校准过程中,  $Step_2$  取带宽( $6 \times 10^6$ )的  $1/128$ , 则:

$$\lambda \geq 1 - \frac{Step_2}{F_2} > 1 - \frac{6 \times 10^6}{128 \times 2.5 \times 10^6} \approx 0.99998 \quad (10)$$

因而, 前面的推测成立。证明完毕。

另外, 谐振幅度(记为  $A$ , 在查找 3 dB 带宽时用到)由式(11)给出, 证明过程从略。

$$A = A_2 \times [1 + (F_2 - F)^2 \times \frac{A_3 - A_1}{A_1 \times (F_1 - F)^2 - A_3 \times (F_3 - F)^2}] \quad (11)$$

### 1) 3 dB 带宽的计算

该过程比较复杂, 下面只给出简要说明。

先查找上限频率  $F_h$  (大于谐振频率), 后查找下限频率  $F_l$  (小于谐振频率), 使用式(12)计算 3 dB 带宽。

$$W = F_h - F_l \quad (12)$$

查找上限频率的过程可以简要描述为: 以  $F_2$  为开始频率, 以  $Step_2$  为步进设置谐振腔的频率, 直到谐振腔检波 ADC 扣除通路偏置后的值小于谐振幅度的一半。其计算公式比较复杂, 此处不再给出。同理, 可以查找下限频率。

### 2) 校准系数的计算

谐振频率计算好后, 存储谐振点处的 ADC, 分别用  $ADC_{10}$ ,  $ADC_{20}$  ( $ADC_{10}$  为不经过谐振腔的检波 ADC,  $ADC_{20}$  经过谐振腔的反馈检波 ADC) 表示, 校准系数的计算如式(13)所示。

$$C = \sqrt{\frac{ADC_{20}}{ADC_{10}}} \quad (13)$$

## 4 密度测量方法

实时跟踪谐振腔谐振点<sup>[6]</sup>, 与校准时的相应参数进行运算, 计算出腔体内微波介质的密度。如图 2 所示。

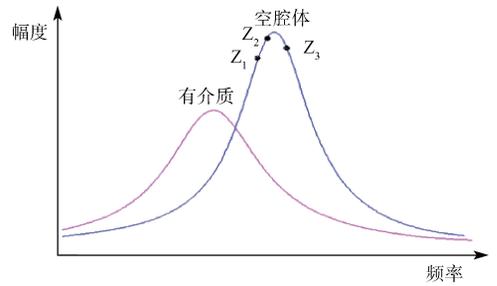


图 2 谐振腔幅频特性

计算与频率有关的变化如下, 记为  $x$  (单位为 Hz)。  $F_1$  是指测量过程的谐振频率, 小于  $F$ , 通过中频计数得到。  $R_1$  是适合介质的修正因子, 在给定温度下为常数, 在 23 °C 时,  $R_1$  为 0。

$$x = \Delta F = F - F_1 + R_1 \quad (14)$$

计算与幅度有关的变化如下, 记为  $y$  (单位为 Hz), 其中,  $ADC_1$  和  $ADC_2$  是测量过程的射频检波 ADC 和谐振腔反馈检波 ADC,  $R_2$  是适合实际电路的幅度修正因子, 在给定温度下为常数, 在 23 °C 时,  $R_2$  为 0。

$$y = (C \times \sqrt{\frac{ADC_1}{ADC_2}}) \times W \times 100 + R_2 \quad (15)$$

下面结合几组在常温下的实验数据(见表 1 和 2), 推导一下密度的计算公式。

表 1  $y/x$  相对固定,  $x$  与密度统计数据表

$y/x$	$x/\text{Hz}$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0.290 1	$5.312 \times 10^6$	229.00
0.289 5	$5.432 \times 10^6$	234.35
0.290 4	$5.550 \times 10^6$	239.14
0.289 6	$5.729 \times 10^6$	244.67
0.290 5	$5.831 \times 10^6$	249.65

表 2  $x$  相对固定,  $\arctan(y/x)$  与密度统计数据表

$x/\text{Hz}$	$\arctan(y/x)$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
$5.612 \times 10^6$	0.281 9	242.04
$5.610 \times 10^6$	0.270 1	245.89
$5.613 \times 10^6$	0.263 2	248.32
$5.611 \times 10^6$	0.270 1	252.53
$5.614 \times 10^6$	0.281 9	256.57

表 1 中, 在  $y/x$  相对固定(变化小于 0.5%) 时, 密度的变化与  $x$  的变化率在  $4.2 \times 10^{-5}$  附近微小变化, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3/\text{Hz}$ , 因此, 在工程计算上, 变化量可近似为正比关系。

表 2 中, 同样可近似的认为密度的变化与  $\arctan(y/x)$  的变化接近于正比关系, 变化率在一 335 附近微小变化, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3/\text{rad}$ 。

通过以上实验数据的分析,可以得出, $y/x$ 为确定值时,密度是频率变化的线性函数,而频率变化固定时,密度与 $y/x$ 的反正切成线性关系。计算介质密度的计算如式(16)所示,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$D = a + b \times x + c \times \delta + d \times \delta \times x \quad (16)$$

其中, $\delta = \arctan(y/x)$ ,无量纲,本方案,介于 $0.1 \sim 0.3$ 。 $a, b, c, d$ 是适合介质的密度修正因子,在给定温度下是常数。其中 $a \in [-0.1, -0.001]$ ,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $b \in [4 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-5}]$ ,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3/\text{Hz}$ ;  $c \in [-0.9, 1.7]$ ,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $d \in [-6 \times 10^{-5}, -4 \times 10^{-5}]$ ,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3/\text{Hz}$ 。

通过实验,只需测量并存储一些典型温度下的相应修正因子,然后采用一些插值和曲线拟合算法<sup>[13]</sup>,如牛顿插值<sup>[14]</sup>、切比雪夫曲线拟合<sup>[15]</sup>等技术,便可得出不同温度下的修正因子。

下面给出 $23^\circ\text{C}$ 某介质密度的计算结果(误差小于2%):

$$\begin{aligned} a &= -2.029 \times 10^{-2}, b = 5.988 \times 10^{-5}, c = 1.189, d = \\ &= -5.962 \times 10^{-5}, \\ y &= 1.577 \times 10^{-5}, x = 5.454 \times 10^6, \delta = 2.815 \times 10^{-1} \\ D &= 2.354 \times 10^2 (\text{kg}/\text{m}^3). \end{aligned}$$

## 5 结 论

本文介绍了微波谐振技术测量物体密度的基本原理、校准技术和测量方法,基本思想是动态跟踪谐振腔的谐振点,根据谐振点的变化来计算谐振腔体介质的密度。测量得到的物体的密度值满足预期的设计效果,这种测量谐振腔内介质密度的方法虽然不是直接的,但仍然是可行的。

## 参考文献

- [1] 张济民, 钦华. 烟支水分与密度分布测量技术[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014(4): 90-95.
- [2] 伍玉涛, 陈志平, 贺存君, 等. 微波技术在矿石水分检测方面的应用[J]. 2011年机械电子学学术会议论文集, 2011: 532-537.
- [3] 李光煜. 物料含水量微波检测系统关键技术研

究[J]. 北京: 北京理工大学, 2014.

- [4] 景军锋, 王波, 李鹏飞. 基于微波透射法测量织物含水率[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(11): 2491-2493.
- [5] 彭响. 颗粒、粉末及片状材料的微波湿度检测方法[J]. 2013(1): 44-45.
- [6] 张济民, 孙宏杰. 微波谐振腔参数动态跟踪技术[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(6): 153-156.
- [7] 左季. 烟条重量采集与控制系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [8] 周永军, 牛中奇, 卢智远, 等. 微波谐振腔微扰测量法在线监测烟支湿度及密度[J]. 仪表技术与传感器, 2009(1): 102-104.
- [9] 刘兴鹏. 基于微波同轴谐振腔物料密度测量技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [10] 章三妹, 雷建平, 唐正明. 微波谐振腔模式数的程序求解法[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(6): 64-65.
- [11] 童川. 谐振腔法测量材料介电常数的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [12] 刘永喜, 张贵新, 侯凌云. 基于圆柱形谐振腔的高气压微波等离子体发生装置的电磁特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1757-1762.
- [13] 曾金芳, 滕召胜. 信息熵在曲线拟合辨识中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2): 171-176.
- [14] 陈良柱, 滕召胜, 杨敏, 等. 电子分析天平的非线性影响与补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 581-587.
- [15] 尤文坚. 现代传感器输出特性拟合技术研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(3): 25-27.

## 作者简介

徐达旺, 1972年出生, 毕业于山东大学, 高级工程师, 主要从事微波测量仪器的研发工作。

E-mail: Xudawang2008@163.com