

# 利用物质的介质损耗系数进行微波检测

李伟光, 彭 昭

(四川理工学院自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000)

**摘 要:**当微波照射在物质上, 会呈现出穿透、反射和吸收三个特性。物质对微波的吸收程度主要由物质的介质损耗系数决定, 物质吸收电磁波后会产生诸如发热等物理特性的变化, 相应的电磁波能量就会衰减。通过检测这些物理变化, 可以检测物质的存在以及含量, 利用电磁波具有穿透特性可以实现无损检测。

**关键词:**微波检测; 趋肤效应; 无损检测

**中图分类号:** TN98

**文献标识码:** A

微波是能量的一种表现形式, 具有波长短(1 m - 1 mm)、频率高(300 MHz - 300 GHz)和量子特性明显等特征<sup>[1]</sup>。当电磁波照射在物体上, 物质的介质损耗会吸收电磁波能量, 由于不同物质的介质损耗系数是不同的, 对电磁波的吸收程度也是不同的, 因此利用物质对微波能量吸收程度的差异特性, 可以检测到物质是否存在以及含量多少<sup>[2]</sup>。相对于传统的物质检测技术, 微波的穿透特性优点可以在不损伤被检测物的条件下, 深入物体内部进行检测, 实现无损检测<sup>[3]</sup>。

## 1 基本原理

电磁波是一种能量形式, 当电磁波照射在物质上, 介质材料与微波电磁场相互耦合, 会形成各种功率耗散。能量转化的方式有许多种, 如离子传导、偶极子转动、界面极化、磁滞、压电现象、电致伸缩、核磁共振和铁磁共振等<sup>[4]</sup>。例如微波炉主要就是通过物质内部偶极分子高频往复运动产生“内摩擦热”使物质内外同时加热升温。物质吸收的电磁波能量越多, 相应电磁波的损耗就会越大。不同的物质以及物质不同形态对电磁波的吸收效果不一样, 反映该特性的参数被称为介质损耗系数。

高介质物理理论指出: 有耗介质的介质损耗系数  $\varepsilon_r$  是频率的复函数<sup>[5]</sup>:

$$\varepsilon_r(w) = \varepsilon'(w) - j\varepsilon''(w) \quad (1)$$

在单位时间、单位体积的电介质在微波中所产生的热功率( $p$ )与电场强度( $E$ )、频率( $f$ )及电介质的介质损耗系数( $\operatorname{tg}\varepsilon_r$ )之间的关系式为<sup>[5]</sup>:

$$p = \operatorname{Re}\left(-\frac{1}{2}jw(\varepsilon' + j\varepsilon'')E^2\right) = f^* E^2 * \varepsilon_r * \operatorname{tg}\varepsilon_r \quad (2)$$

式中  $\operatorname{tg}\varepsilon_r = \varepsilon''/\varepsilon'$  代表物质的介质损耗系数。

可以看出, 物质在微波中所吸收能量的大小与物质种类及其介电特性和频率有很大关系, 即不同物质由于其介电常数  $\varepsilon_r$  不同, 受到照射的微波频率不同, 吸收的电磁波能量也将不同, 利用此原理, 测量接收天线收到的电磁波能量, 就可以检测物质的存在以及含量。

另外需要注意的是当微波的频率与介质的固有振动频率一致时, 将产生共振现象, 此时介质分子或原子从微波中吸收的能量最大, 测量效果最为明显。

## 2 微波检测中介质的选择

当使用微波进行物质检测时, 总是存在一定的中介介质, 比如检测水中某种物质的含量、空气中某种物质的含量, 其中水和空气就是其中的中介物, 中介物的选择对微波检测有重要的影响。电磁波传播过程中满足亥姆霍兹方程<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x = 0 \quad (3)$$

若取  $z$  方向的传播解, 得:

$$E_x = E_m e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,电磁波沿传播方向的振幅按照  $e^{-\alpha z}$  的指数规律衰减,  $\alpha$  称之为衰减系数,  $\alpha$  表达式<sup>[5]</sup>:

$$\alpha = w \sqrt{\frac{u\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{w\varepsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (5)$$

可以看出,  $\alpha$  主要取决于  $w$  和  $\sigma$ 。

从以上分析可以看出,如果频率选择在中间介质衰减系数较大的频点,检测的电磁波很快就会在中间介质中衰减,电磁波能量的很大一部分会被传递电磁波的中间介质所吸收,相应的电磁波接收装置收到的电磁波能量就会减少,这对于检测来说是应该避免的<sup>[6-7]</sup>。当电磁波的中间介质所吸收的能量远大于被检测物质吸收的能量时,无论检测的效果和精度都很差。所以要避免选择衰减系数大的中介物质<sup>[6-9]</sup>。

为了书写方便将有耗介质的介质损耗系数  $\varepsilon_r$  式(1)改写为:

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_1(f) - j\varepsilon_2(f) \quad (6)$$

由式(2),  $p = f^* E^2 * \varepsilon_r(f) * \text{tg}\varepsilon_r(f)$  若求物质吸收的能量最大,则对式(6)求导并取零点得

$$p' = E^2 * (\varepsilon_1(f) - j\varepsilon_2(f)) * \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)' + fE^2 * \left[ \varepsilon_2(f) - j \frac{\varepsilon_2(f)}{\varepsilon_1(f)} \right]' = 0 \quad (7)$$

通过式(7)求导取零,分别对待检测物质和中间介质求衰减最大的频点,如果二者频率过于接近,则检测效果不好,需要重新选择检测频点。

### 3 检测波长的选择

由式(2)可以看出,物质吸收电磁波后转化为热量的  $p$  与电磁波频率成正比,即频率越高,物质吸收的电磁波能量越多,相应电磁波接收装置接收到的电磁波能量越少。但在实际中并非如此,这是由于电磁波“趋肤”效应的存在,导致并非频率越高越好<sup>[1-2,5]</sup>。

电磁波穿透能力是指电磁波穿透到介质内部的本领,电磁波在介质中传播时,它所携带的能量就随着穿透的距离以指数形式衰减<sup>[1-2,5]</sup>。

穿透深度定义为,电磁波场强的振幅衰减到表面值的  $1/e$  (约为 36.8%) 所经过的距离,其计算公式为:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,穿透深度和波长频率成反比。即电磁波的频率越高,能量就主要被物质表面吸收,当物质颗粒大小远远大于电磁波波长时,这时候主要是物质表面吸收电磁波能量,而内部由于电磁波不能穿透进

去,并没有吸收电磁波能量,能量主要是以热传递的方式从物体的表面传递到内部<sup>[7-8]</sup>,这样由于物质吸收的能量并没有随着频率的提高而增加,接收天线测量到的衰减值并不随着频率的提高而一直增加。我们知道,电磁波的频率越高,相应的设备价格越昂贵,电子线路也越复杂,实际测量当中,单纯的提高频率并不能改进检测效果。

### 4 微波测量的方法和步骤

从上面分析可以看出,在微波测量当中,频率越高,物质吸收的电磁波能量越多。但是由于中间媒介物和趋肤效应的存在,电磁波的频率又不能选择过高,需要在实际系统中根据实际条件灵活选择<sup>[9]</sup>。

(1) 根据被测量物质颗粒大小,根据趋肤效应的原理,选择适合的波长范围。如果必要,可以限制被测物质加工颗粒的大小。原则上波长范围应当小于被检测物质颗粒的直径。

(2) 根据有耗介质的介电常数  $\varepsilon_r$  是电磁波频率的复函数的原理,首先测量检测物质在不同频率电磁波下的介电常数,按照公式  $\text{tg}\varepsilon_r = \varepsilon''/\varepsilon'$  计算物质的介电常数,选择使式(2)取得最大值的频率点作为对该物质的测量频点。由于电磁波的范围很宽,可以通过对式(2)求导,即  $p' = 0$  估算测量频点。有耗介质的介电常数  $\varepsilon_r$  的测量可以参考相关文献,一般来说,可以采用微波介质谐振器来测量。

(3) 选择合适的测量介质,尽量选择对测量频点衰减小、吸收功率少的物质。计算该介质对测量频点的损耗和衰减系数,并求出衰减距离,要求测量装置沿电磁波传播方向距离应当小于衰减距离。否则接收天线接收到的信号会很弱<sup>[1]</sup>。

(4) 在选定频点和传输介质的情况下,使用计算机技术,批量测量物质的浓度和电磁波衰减的关系,得到的数据可以使用查表法或者曲线拟和法,供以后实际测量。

### 5 结束语

(1) 物质的介电损耗系数是频率的复函数,选择合适的频点使介电损耗系数达到最大值,从而物质吸收的电磁波能量最大,而接收天线测量到的电磁波强度最低。利用这个特性可以用来检测物质的存在以及物质的含量。

(2) 从式(2)看出,电磁波频率越高,物质吸收电磁波能量越多,但是由于电磁波的趋肤效应以及受到电磁波设备造价的约束,不适宜在检测中一味的提高电磁波频率。

(3) 当微波的频率与介质的固有振动频率一致时, 将产生共振现象, 此时介质分子或原子从微波中吸收的能量最大, 测量效果最为明显。

#### 参考文献:

- [1] 姚毅. 微波技术与天线 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [2] 戴晴, 黄纪军, 莫锦军. 现代微波技术与天线测量技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [3] 李俊林, 张元, 廉飞宇. 微波检测储粮水分技术的研究 [J]. 粮油加工, 2007(9): 98-99.
- [4] 甘灰炉, 尚海萍, 邓宇等. 微波加热用于检测稻草纤维素含量 [D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
- [5] 姚毅. 电磁场与电磁波 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [6] 朱小会, 陈艳, 姚毅. 微波检测在烟草水分检测中的应用 [J]. 中国西部科技, 2008(5): 39-41.
- [7] 罗玉雄, 陈斌, 刘林辉等. 原煤含水量微波加热在线检测方法研究 [J]. 微计算机信息, 2009(5): 309-310.
- [8] 倪丽琴, 张建伟. 微波法检测造纸原料热水抽提物 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2009(5): 37-39.
- [9] 龙海, 王娇娜, 吕长富等. 采用微波辅助提取技术快速检测过磷酸钙中有效磷 [J]. 磷肥与复肥, 2008(5): 68-69.

## Detect Material by Microwave Dielectric Loss Coefficient

LI Wei-guang, PENG Zhao

(School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** Material will present characteristics of penetration, reflection and absorption when microwave is shining on it. The microwave absorption is depended on dielectric loss coefficient and material will show some physical properties such as heating. Correspondingly, energy of electromagnetic will be weaken. We can detect the material and content by detect those physical changes and achieve non-destructive testing using electromagnetic's feature of penetration.

**Key words:** microwave-detection; skin effect; non-destructive testing