# 材料微波介电常数和磁导率测量

**摘要：**材料的微波介电常数和磁导率决定了材料对于微波波段电磁波的吸波能力，是材料重要的物理性质。本文使用微波开短路方法测量了材料的微波介电常数和磁导率。

**关键词：**微波介电常数；磁导率；同轴系统

## 引言

隐身技术是通过控制、降低目标的可探测信号特征，使其不易被微波、红外、可见光、声波等各种探测设备发现、跟踪、定位的综合技术。其中，微波隐身（或称雷达波隐身）的研究早在20世纪30年代就开始了。现在已经发展成集形状隐身、材料隐身等一体的高度复杂的技术，并已应用到导弹、飞机、舰船、装甲车辆、重要军事设施等许多武器装备上。

雷达隐身技术中，最简单的一种是涂覆型隐身技术。它是将吸收材料直接以一定的厚度涂覆在外壳以降低对微波的反射，减小雷达探测截面，提高隐身能力。

## 实验目的

1. 了解和掌握微波开路和短路的含意和实现方法。

2. 掌握测量材料微波介电常数和磁导率的原理和方法 。

3. 了解微波测试系统元部件的作用。

## 3.实验原理

对于涂覆在金属平板（假定其为理想导体，下同）表面的单层吸波材料，空气浴涂层界面出的输入阻抗为：

（1）

其中是自由空间波粗口，是电磁波在涂层中的传播常数，d是吸波涂层厚度，，分别为涂层的相对磁导率和相对介电常数。

当电磁波有空气向涂层垂直入射式，在界面上的反射系数为：

（2）

以分贝（dB）表示的功率反射率为：

（3）

对于多层涂覆，电磁波垂直入射到第n层是，其输入阻抗为：

（4）

其中，是第n层的特性阻抗，是第n层的传播常数，为第n层的厚度，为第n-1层入射面的输入阻抗。

理想导体平板的输入阻抗为0，最外层的输入阻抗可以通过迭代法得出，从而由公式（2）和公式（3）得到反射率。

由此可见，无论是单层涂覆还是多层涂覆，测出各层材料的复介电常数和复磁导率及其与频率的关系是设计隐身涂层的关键。

网络分析仪今年已较多地用于测量材料微波波段的，，但其价格较高。我们在此介绍一种基于测量线的波导测量装置，用其测出开路，短路二点阻抗，推算出和。图1是该装置的示意图。

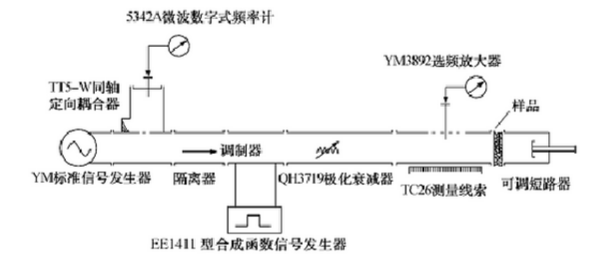


图1 一种基于测量线的波导测量装置

在微波测量中，是通过驻波的测量来得到阻抗。对图1所示的测量装置，可以用如图2所示的传输线模型进行分析。

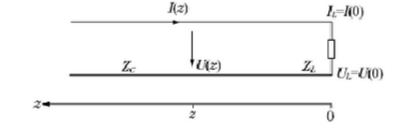


图2 传输线模型

以表示入射波，表示反射波，为传播常数，入射波电压振幅与电流振幅之比为，反射波此比值为，坐标为z点的电压复振幅与电流复振幅之比称为该店输入阻抗，简称该点阻抗Z(z)，即：

（5）

其中，是负载上的电压反射系数，可以推得：

（6）

坐标为z点的电压反射系数:

（7）

其中，，于是从（5）式又推得：

（8）

当线上有两点和，，两点阻抗分别为，，则：

（9）

定义驻波最大点与最小点电压之比为电压驻波比：

（10）

在图1所示测量装置上，当终端短路时，即，由（5）式知，样品输入端面向终端的等效阻抗为：

（11）也是空气波导的负载阻抗，其中是介质波导的特性阻抗，是测量样品的厚度。

当终端接上四分之一波导波长长度的短路线时，根据（5）式，从B端向右看B处的阻抗为：

此时，，因此，B端等效开路。于是，由（5）式知，样品输入端面向终端的等效阻抗为：

（12）

同时，由（5）式知，在距离样品输入端面D的驻波最小点处阻抗是：

由此得：

由（8）式得：

在驻波最小点，所以

由此得：

（13）

可见测出驻波比即可得。

对于柱状波导中的TE波，，因此介质波导的，空气波导的，因此，

（14）

由（11）式和（12）式得：

（15）

（16）

分别测出终端短路和等效开路两种状态的驻波比，综合（13）（14）（15）（16）式即可得到值。

在介质波导中，

因此，

（17）

其中为自由空间波长，为波导截止波长。

从以上分析显而易见这种开路、短路两点法测量比较简便，可以同时的到和，且不需解超越方程。

## 4.实验仪器

测试系统如图3所示，用微波源的等幅波，外调制用1KHz的方波，以提高稳定度和测量精度。

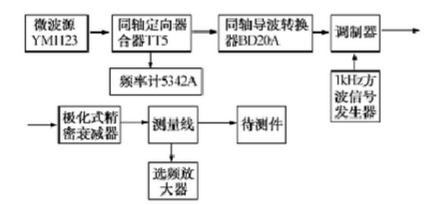


图3 实验系统示意框图

## 5.实验内容

1. 调节微波测试系统，选择好工作频率，测试系统处于稳定可靠的工作状态（极化衰减器置于0.5dB）。

2. 测量待测材料厚度和波导板厚度。

3. 参考点位置的测量，测量线终端短路，用等指示法测得终端短路时最小点的位置作为参考点d。测量波导波长，与频率计划的频率计算出的波导波长比较误差。

4. 短路测量材料参数。将材料片和短路板接入测量线的输出端，用等指示法测得最小点的位置和最小点的藕合电压放大值，用精密衰减器，用替代法测得电压最大值和最小值之间的替代分贝数。

5. 开路测量材料参数。将可调短路活塞置于𝜆𝑔/4的位置使活塞波导口呈开路状态，与材料一片并接入测量线的输出端，与上相同测量开路状态下驻波最小点的位置，最小点位置上耦合电压的放大值与最大值的替代量。

6. 用测得的数据输入程序计算出和 。

7. 改变微波频率f，测量和与频率f的关系。

## 6.实验数据及处理

1.基本参量

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 参量 | 材料厚度/mm | 波导管长度/mm | 微波频率/GHz |
| 测量值 | 1.90 | 22.60 | 9.00 |

2.对于波导波长的测量

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 驻波节点数 | 1 | 2 |
| 距离/mm | 125.90 | 150.80 |

从而可以求的波导波长。

3.开短路测量参数

短路状态：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 最大值 | 最小值 | D/mm |
| 电压读数 | 548 | 144 | 126.36 |
| 分贝数 | 40 | 50 |

开路状态：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 最大值 | 最小值 | D/mm |
| 电压读数 | 362 | 450 | 126.94 |
| 分贝数 | 40 | 60 |

从而可分别求得其驻波比为38.06及80.44。

综上，利用（13）~（17）式，即可求得材料的微波介电常数和磁导率分别为：

## 7.思考题

**1. 本实验测得材料的和其主要误差来源是什么？**

答：1.微波信号源输出的信号不完全稳定。

2.由于实验中的驻波并不完美，在最值读取时有一段变化极为缓慢的过程，这对最值及距离的测量都会造成误差。

**2. 微波吸收材料要提高吸波性能，对和有何要求？**

答：由（1）~（3）式可推得功率反射率R与和的关系，从中可以看出两者的比值要与相应电磁波的频率匹配，才能最大程度提高吸波性能。

## 8.参考文献

【1】黄润生，近代物理实验（第二版），南京大学出版社