

一种分析非均匀填充矩形波导的简单方法

张厚, 黎可, 高峰

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 提出了一种用均匀填充来等效非均匀填充矩形波导的简单方法, 引入等效的介电常数, 可以简化对其传输特性的分析与计算。

关键词: 非均匀介质填充; 等效介电常数; 波导

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)02-0072-03

非均匀填充介质片的波导常用作若干种波导元件应用, 如移相器, 衰减器, 阻抗匹配器等。典型的非均匀填充矩形波导的截面如图 1 所示。

以往的分析都是利用横向谐振法求出传播常数的超越方程[1~2], 传播常数只能在某一点频上求解。要分析波导的传播特性就显得尤为复杂。文献

[3]对图 1(a)所示的情况提出用均匀填充介质来等效并给出了等效介电常数的实用计算公式。但在实际中, 图 1(b)所示的情况更具有普遍意义。本文对图 1(b)的非均匀填充引入等效介电常数, 将其等效为均匀填充介质的矩形波导, 并对其传输特性进行了分析, 大大简化了计算。

1 非均匀介质的等效

为了分析方便, 将图 1(b)置于直角坐标系下, 如图 2 所示。其中介质的相对介电常数为 ϵ_r 。

用横向谐振法可求得本征方程为^[1]

$$b_1^2 \operatorname{tg}(b_2 t) + b_1 b_2 \operatorname{tg}(b_1 d) + b_1 b_2 \operatorname{tg}(b_1 d_1) - b_2^2 \operatorname{tg}(b_1 d_1) \operatorname{tg}(b_1 d) \operatorname{tg}(b_2 t) = 0 \quad (1)$$

其中 b_1 和 b_2 分别为空气和介质中的波数, 且是传播常数 γ 的函数。 γ 满足

$$\gamma^2 = b_1^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k_0^2 = b_2^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k^2 \quad (2)$$

其中 $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$, $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$, n 为任意整数。

这时, 矩形波导的波型 LSE 和 LSM 是均匀填充矩形波导中的 TE_x 和 TM_x 的变型。在无耗情况下, 各种波型的截止频率(对应于 $\gamma=0$)总是在全部填充空气和全部填充介质的相应波型的截止频率之间。图 3(c)是实际非均匀填充的波导, 如将介质去掉就是图 3(a)所示的全部填充空气的波导, 如将介质全部填充就成了图 3(b)所示的介质全部填充的波导。无耗时, 图 3(b)

所示主波型的截止波长 λ_{c0} 一定满足 $\lambda_c < \lambda_{c0} < \lambda'_c$ 。其中 λ_c 为全部填充空气矩形波导的截止波长, λ'_c 为全部填充介质矩形波导的截止波长, 且 $\lambda'_c = \lambda_c \sqrt{\epsilon_r}$ 。

我们引入一种等效介电常数 ϵ_{re} , 将图 3(c)的非

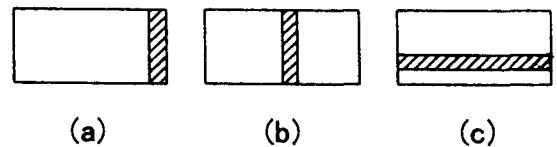


图 1 非均匀填充介质的矩形波导

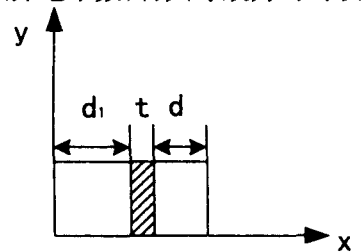


图 2 非均匀填充坐标系

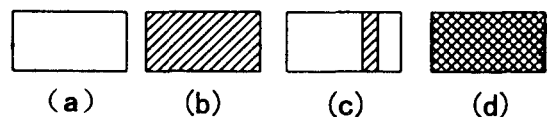


图 3 等效原理图

均匀填充等效为全部填充介质的矩形波导。等效的前提是截止波长不变。可见 ϵ_{re} 必定满足 $1 < \epsilon_{re} < \epsilon_r$, 且有

$$\lambda_{c0} = 2a \sqrt{\epsilon_{re}} = \frac{2\pi}{k_{c0}} \tag{3}$$

实际上非均匀填充波导的主要波型是主波型, 因为 $a \approx 2b$, 主波型就相当于均匀填充矩形波导的 TE_{x10} 波型, 也就是均匀填充矩形波导的 TE_{10} 波型。

在(2)式中, 令 $n=0, \gamma=0$, 得

$$b_1 = \omega_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = k_{c0} \tag{4}$$

$$b_2 = \omega_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \sqrt{\epsilon_r} k_{c0} \tag{5}$$

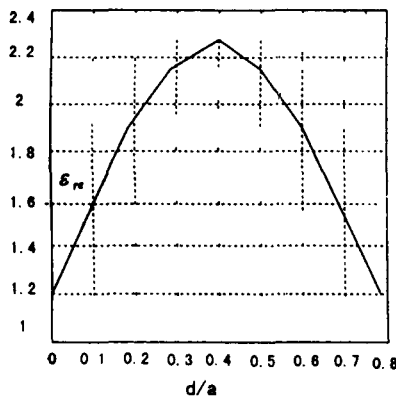
将上式代入(1)式得

$$\text{tg}(\sqrt{\epsilon_r} k_{c0} t) + \sqrt{\epsilon_r} \text{tg}(k_{c0} d) + \sqrt{\epsilon_r} \text{tg}(k_{c0} d_1) - \epsilon_r \text{tg}(k_{c0} d_1) \text{tg}(k_{c0} d) \text{tg}(\sqrt{\epsilon_r} k_{c0} t) = 0 \tag{6}$$

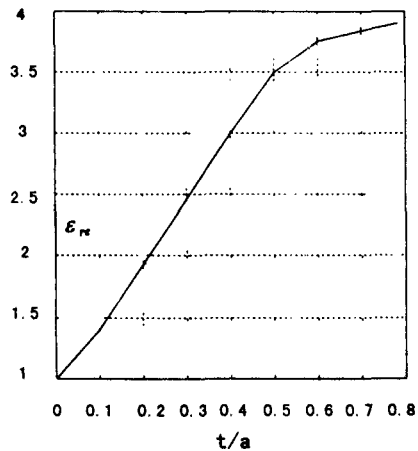
联立(6)式和(3)式便可求得等效的介电常数 ϵ_{re} 。

$$\epsilon_{re} = \left(\frac{\pi}{k_{c0} a} \right)^2 \tag{7}$$

可见, ϵ_{re} 随 d 和 t 的改变发生变化。图 4 为给定 ϵ_r 和 t 时, ϵ_{re} 随 d 变化的情况, 当 $d=0$ 时便是图 1(a) 的情况。图 5 为给定 ϵ_r 和 d 时, ϵ_{re} 随 t 变化的情况。



$\epsilon_r = 4, t = 0.2a$
图 4 ϵ_{re} 与 t 的关系曲线



$\epsilon_r = 4, d = 0.2a$
图 5 ϵ_{re} 与 t 的关系曲线

可见 ϵ_{re} 只与 $t/a, d/a$ 有关, 通过对计算数据的分析可知 ϵ_{re} 与 ϵ_r 有如下关系:

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \tag{8}$$

式中 q 为有效填充因子, q 是 $t/a, d/a$ 的函数, 其函数关系如图 6 所示。当给定 ϵ_r, a, t, d 时, 由图 6 可先查出 q 值, 从而根据(8)式很方便地计算出 ϵ_{re} 的值。

利用等效的 ϵ_{re} 就不难分析非均匀填充波导的传播特性:

$$\text{波导波长 } \lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re} - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \tag{9}$$

$$\text{相移常数 } \beta_{10} = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \beta \sqrt{\epsilon_{re} - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} \tag{10}$$

图 7 是相移常数随 d 变化的情况

可见 $d=0$ 时相移最小。介质位于波导宽边中央时, 相移常数最大, 这正是移相器的基本特性。

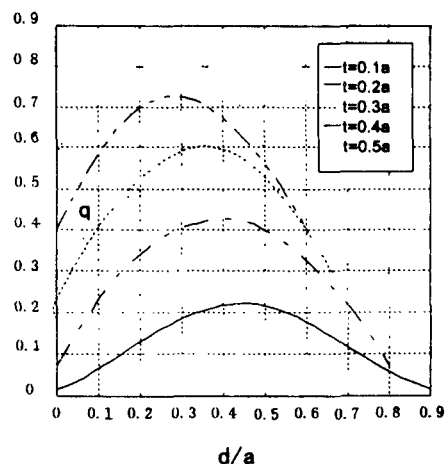


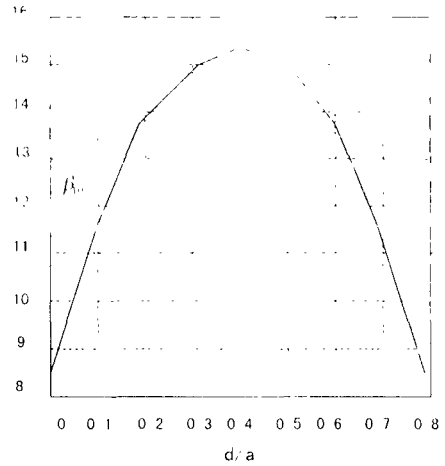
图 6 有效填充因子的变化

2 误差分析

下面来分析用等效公式(10)计算得出的 ϵ_{rel} 与解方程(6)、(7)得出的 ϵ_{re0} 之间的误差。

取 BJ-48 波导, 介质分别取聚乙烯、石英、氧化铝, 得到它们的关系曲线, 如图 8 所示。

实线为 ϵ_{rel} , 虚线为 ϵ_{re0} , 可以看出在常用的 ϵ_r 范围内其误差不超过 1%。所以这种方法是适用的。



$\lambda_0=500\text{mm}, a=292\text{mm}, \epsilon_r=4, t=0.2a$

图 7 相移常数变化情况

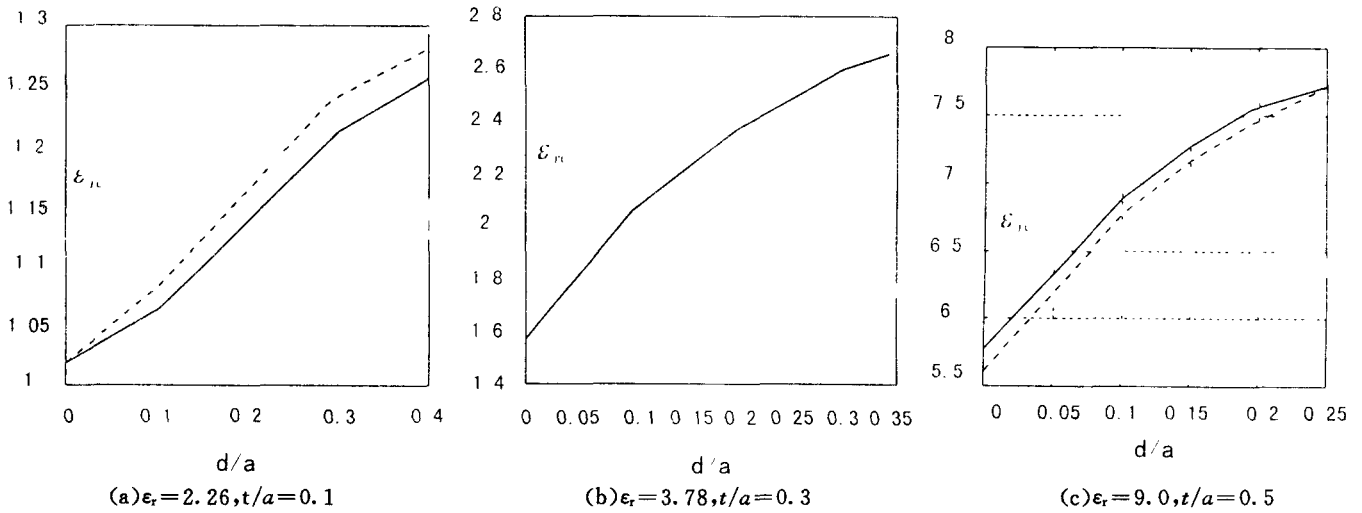


图 8 误差曲线

3 结束语

利用本文引入的等效介电常数可以简化非均匀填充矩形波导的分析计算, 文中仅对图 1(b) 的情况进行了分析。对于图 1(c) 所示的平行波导宽边的加载介质板的情况可以用同样的方法予以分析。

参 考 文 献

- [1] 王一增, 陈达章, 刘鹏程. 工程电动力学[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [2] R. E. 柯林. 导波场论[M]. 侯元庆译. 上海: 上海科技出版社, 1966.
- [3] 黎 可, 张 厚, 甄蜀春. 平行窄边加载介制裁片矩形波导的等效介电常数[A]. 军事微波技术第一届全国学术会议论文集[C]. 北京: 1996, 185~189

A Simple Method to Analyze Wave Propagation in an Inhomogeneously Filled Waveguide

ZHANG Hou, LI Ke, GAO Feng
(The Missile Institute, AFEU., Sanyuan 713800, China)

Abstract. In this paper a method to analyze and calculate the wave propagation in an inhomogeneously filled waveguide is proposed, the inhomogeneously filled waveguide is equivalent to a homogeneously filled waveguide by using an equivalent dielectric constant, which can simplify analysis and calculation of wave propagation in the waveguide.

Key words: inhomogeneously filled with dielectrics; equivalent dielectric constant; waveguides