

DOI 10.3969/j.issn.1003-0972.2010.04.013

不同媒质界面平面电磁波的反射与透射

雷前召*

(渭南师范学院 物理与电子工程系, 陕西 渭南 714000)

摘要: 利用相应的媒质界面反射、透射场方程, 对平面电磁波在两种典型媒质—理想介质和理想导体表面的入射波、反射波以及透射波进行了模拟, 利用模拟结果得出理想介质和理想导体的反射、透射特性. 一般导电介质具有和典型介质本质不同的特征, 但可以根据介质参数和电磁波频率的不同把介质近似为理想介质或理想导体.

关键词: 理想介质; 理想导体; 反射波; 导电介质

中图分类号: TN011 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0972(2010)04-0524-03

Reflection and Transmission of a Plane Wave at Different Media Interface

LEI Qian-zhao*

(Department of Physics and Electronic Engineering, Weinan Teachers University, Weinan 714000, China)

Abstract The incident wave, reflected wave and transmission wave are simulated at two typical media surfaces by using their field equations. The two media are ideal dielectric and perfect conductors. Simulation results clearly show that the reflection/transmission characteristics of an ideal dielectric or a perfect conductor. General conductive medium has typical different characteristics with the two essential media, but can be approximately ideal dielectric or perfect conductor according to the medium parameters and the electromagnetic wave frequency.

Key words ideal dielectric; perfect conductor; reflected wave; conductive medium

0 引言

电磁波在分界面的反射和透射与电磁波入射角度、电磁波极化性以及电磁波频率之间的关系研究得比较早. 而对反射、透射特性和媒质之间关系^[1]的研究却是方兴未艾, 因为媒质参数能影响电磁波反射、透射系数, 可以给介质表面涂层, 得到所需反射透射参数^[2]. 还有“频率选择表面”^[3-4]本质上也是媒质参数对反射透射的影响. 本文探讨了不同媒质界面对电磁波传播的本质差别.

1 理想介质表面平面电磁波的传播

1.1 理想介质表面的反射波、透射波模拟

平面电磁波在传播途中遇到边界会发生反射与透射, 对于理想介质, 其电导率为 0. 设媒质 1 为理想介质真空, 媒质 2 为另一种理想介质, 反射波与入射波均在媒质 1 中. 以垂直入射为例, 在真空

介质 1 中, 入射波的电场表示为^[5]:

$$\vec{E}_k(z, t) = \vec{e}_x E_{in} e^{-\beta_1 z} e^{j\omega t}, \quad (1)$$

反射波电场可表示为:

$$\vec{E}_r(z, t) = \vec{e}_x \Gamma E_{in} e^{\beta_1 z} e^{j\omega t}, \quad (2)$$

在真空介质 1 中, 合成波的电场为:

$$\vec{E}_{1x}(z, t) = \vec{e}_x E_{in} (e^{-\beta_1 z} + \Gamma e^{\beta_1 z}) e^{j\omega t}, \quad (3)$$

而透射波的电场为

$$\vec{E}_{2x}(z, t) = \vec{E}_t(z, t) = \vec{e}_x \tau E_{in} e^{-\beta_2 z} e^{j\omega t}, \quad (4)$$

式(2)(3)(4)中, $\Gamma = (\eta_2 - \eta_1) / (\eta_2 + \eta_1)$, $\tau = 2\eta_2 / (\eta_2 + \eta_1)$ 均为实数.

利用上述入射波、反射波及其合成波以及透射波公式, 模拟出各自行波, 其截图如图 1 所示. 其中横轴 z 在 0 处为分界面, 在图 1 截图中, 媒质 1 ($z < 0$) 中的带“*”号标识的曲线为正向入射波, 细线为负向反射波, 带“+”号标识的粗线代表入射反射波的合成波, 媒质 2 ($z > 0$) 中的曲线代表透射波.

收稿日期: 2010-06-26 修订日期: 2010-07-30 * . 通讯联系人, E-mail: leiqtz@126.com

基金项目: 陕西省教育厅专项科研基金资助项目 (08JK286).

作者简介: 雷前召 (1967-), 男, 河南商城人, 讲师, 硕士, 主要从事复杂介质中的波传播研究.

具体的参数设置: 为了能在人的视觉范围内观察电磁波的波动, 这里对时间轴进行了放大, 把 10 MHz 平面波频率缩小为 0.1 Hz, 时间步长取 10^{-3} s, 相移常数 β_1 和 β_2 分别取 $(1/4)\pi$ 和 $(1/2)\pi$, 反射系数取 -0.6 . 纵轴 x 轴单位为 10^{-4} V/m, 横轴 z 轴的具体数值可以根据时间轴放大倍数由波长计算.

1.2 模拟结果分析

(1) 平面波经理想介质反射、透射后, 平面波的极化特性不变. (2) 理想介质是无耗介质, 能量无损耗, 是等幅波. (3) 对理想介质而言, 媒质 1 区的合成波兼具行波和驻波的特性, 哪个方面占优要看反射系数——反射系数的绝对值越小, 行波的特

性越大, 驻波的特性越小, 此时合成波紧随入射波步调; 反之驻波特性较大. (4) 反射系数大于 0 则反射波入射波同相位, 小于 0 则反相. (5) 媒质 1 区的合成波绝对值总不为 0, 必有一个最小值, 如图 1 中第 6 小图为其绝对值最小值处. (6) 媒质中相速度和相移常数分别为 $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$, $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$, 这些都为定值. 另外理想介质内部的电场、磁场具有相同相位, 电场方向和磁场方向相互垂直, 且和传播方向三者构成右手螺旋法则, 磁场 $H_i(z, t) = e_x H_{im} e^{-j\beta_1 z} e^{j\omega t}$, 其中 $H_{im} = E_{im} / \eta_1$, 所以由电场很容易求得相应的磁场.

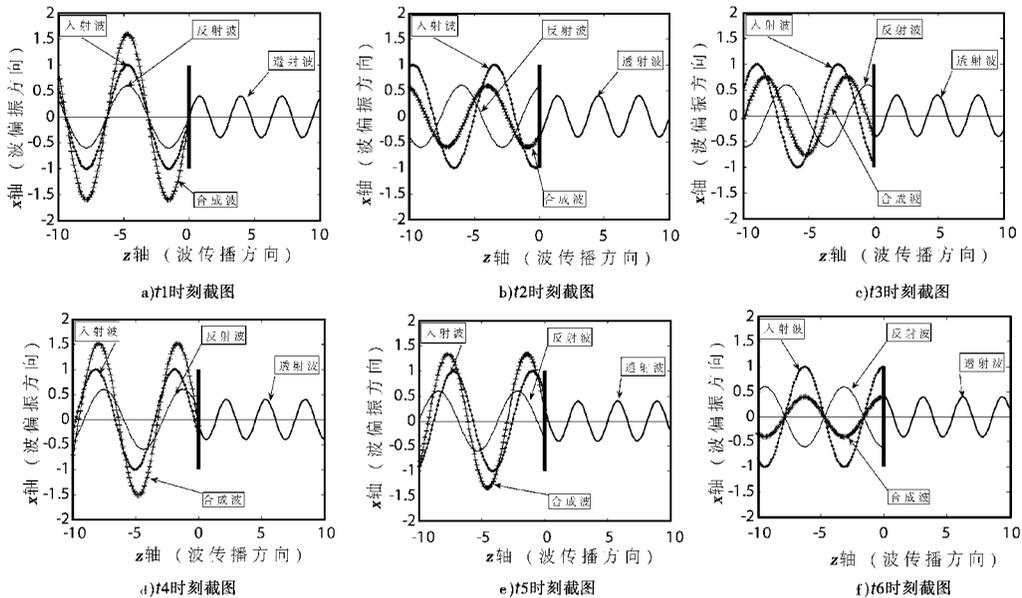


图 1 理想介质的入射波、反射波、合成波和透射波的行波截图 (各图依时间先后顺序排列)

Fig 1 The traveling wave screenshots of incident wave, reflected wave, synthesis wave and transmission wave at ideal dielectric interface (Graphs arranged in time sequence)

2 理想导体表面平面电磁波的传播

设媒质 1 为理想介质, 其电导率 $\sigma_1 = 0$, 媒质 2 为理想导体, 其电导率为 $\sigma_2 = \infty$, 从而媒质 2 的本征阻抗为 $\eta_{2c} = \mu_2 / \epsilon_{2c} = \mu_2 / (\epsilon_2 - j\sigma_2 / \omega) \rightarrow 0$, 反射系数 $\Gamma = -1$, 而透射系数 $\tau = 0$. 根据边界条件, 在理想导体表面上 $E_{tm} = -E_{im}$, 即反射波电场与入射波电场相位差为 π .

由于媒质 1 是理想介质, $\gamma_1 = j\omega \sqrt{\mu_1 \epsilon_1} = j\beta_1$. 同样以垂直入射为例, 入射波电场同式 (1), 而反射波的电场则为^[5]:

$$E_x(z, t) = -e_x E_{im} e^{\beta_1 z} e^{j\omega t} \quad (5)$$

媒质 1 中合成电场为:

$$E_{1x}(z, t) = e_x E_{im} (e^{-j\beta_1 z} - e^{\beta_1 z}) e^{j\omega t} = -e_x j \cdot 2E_{im} \sin\beta_1 z e^{j\omega t} \quad (6)$$

合成波在空间没有移动, 只在原来的位置振动, 故称这种波为驻波, 用公式表示驻波为:

$$|E_1(z)| = 2E_{im} |\sin\beta_1 z| \quad (7)$$

利用上述入射波、反射波和两者的合成波以及透射波公式模拟出各自行波, 图 2 为其行波的截图, 分界面在横轴 z 为 0 处, 其中带“*”号标识的曲线为正向行波的入射波, 细线则为负向行波的反射波, 带“+”号标识的粗线为两者的合成波. 参数设置同样对时间轴进行了放大, 把平面波频率缩小为 0.1 Hz, 时间步长 10^{-3} s, 相移常数 β_1 取 $(1/4)\pi$, 各坐标轴单位同上例.

图 2 中的 3 幅图表示了各行波在不同时刻截图, 由图 2 可知: 只有理想介质 1 ($z < 0$) 中的入射波和反射波及其合成波, $z > 0$ 理想导体区域内没有透射波; 反射波和入射波有固定位相差 π , 在给定

的 t 时刻, 入射波、反射波、驻波随距离而作正弦变化; 合成波是由正向入射波与负向反射波叠加而成的驻波, 虽然它的波形遵循正弦规律而变化, 但场

强零点位置始终没有变, 说明波形并没有移动; 入射波和反射波振幅相等且都为等幅波.

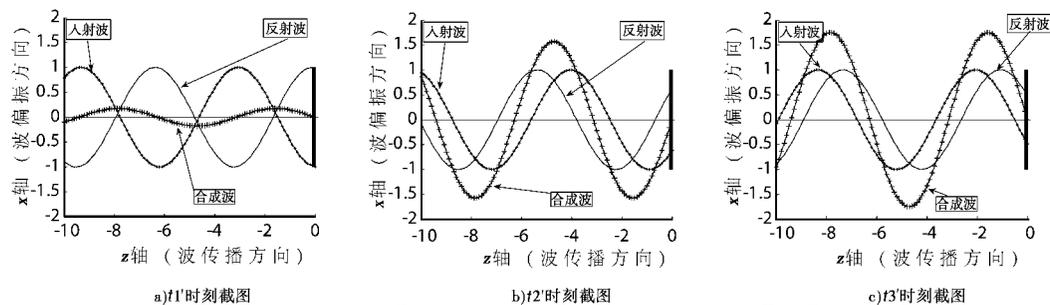


图 2 理想导体的入射波、反射波、驻波的行波截图 (各图依时间先后顺序排列)

Fig 2 The traveling wave screenshots of incident wave reflected wave and standing wave at perfect conductor interface (Graphs arranged in time sequence)

3 导电介质表面平面电磁波的传播

电介质相关参数分别可以近似为^[6]:

一般导电媒质, 其电场的反射系数和透射系数分别为^[6]:

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad \beta \approx \sqrt{\mu\epsilon}, \quad \eta \approx \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (10)$$

$$\Gamma = \frac{\eta_{2c} - \eta_{1c}}{\eta_{2c} + \eta_{1c}}, \quad \tau = \frac{2\eta_{2c}}{\eta_{1c} + \eta_{2c}} \quad (8)$$

此时, 平面波在电介质中的相移常数 β 和波阻抗 η 近似和理想介质中相同, 衰减常数 α 与频率无关, 和电导率 σ 成正比. 除了其振幅有微弱衰减之外, 其他传播特性和理想介质几乎相同.

3.1 一般导电介质的主要特征

当频率满足 $\sigma/\epsilon\omega \gg 1$ 时, 导电介质为良导体. 对微波及更低频率的电磁波, 常见的导体可以视为良导体. 良导体中衰减常数为 α 相移常数为 β , 且 $\alpha \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma}$, $\beta \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma}$, 电场和磁场位相差 $\pi/4$ 而波数 $k = \beta - j\alpha$ 趋肤深度 $\delta = 1/\alpha$ 其反射系数接近于 1 此时良导体可以近似看作理想导体. 此时导体表面反射系数近似为 1 但反射波和入射波不像理想导体处处反相, 而是增加一个由介质参数和电磁波频率决定的相差.

因为导电介质的波阻抗是复数, 故 Γ 和 τ 为复数, 且不管是平行极化波还是垂直极化波均有 $\Gamma + 1 = \tau$ 在分界面, 反射波、透射波和入射波存在相位差^[7], 只有在理想导体或者理想电介质时, Γ 和 τ 均为实数, 反射、透射和入射的波如前所述没有相位差; 如果不是理想介质或理想导体, 平面波经过边界后极化方向会发射改变^[7]; 导电介质中磁场和电场之间的相位不同, 其相位差由导电媒质的电导率、电容率和电磁波的频率决定.

以上为一般导电介质不同于两种典型介质之处, 相同之处是磁场方向同样和电场方向垂直, 两者和传播方向一起构成右手螺旋法则.

4 结束语

3.2 一般导电介质的近似处理

通过对平面电磁波在界面反射波和透射波的模拟, 得到电磁波在两种典型介质分界面处传播的特征. 模拟结果能够帮助更深刻理解典型介质反射、透射特征. 一般导电介质借助于近似处理, 能够得到其反射和透射的概貌.

导电媒质中平面波的电场 (即透射波) 为:

$$\vec{E}_x = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (9)$$

通常由比值 $\sigma/(\epsilon\omega)$ 把介质区分为两大类, 即电介质和良导体. 当电磁波频率满足 $\sigma/(\epsilon\omega) \ll 1$

参考文献:

[1] 杨娟, 梁昌洪. 平面波在双负和双正参数媒质界面的反射与折射 [J]. 电波科学学报, 2005, 20(3): 321-324.
 [2] 官正涛, 杨儒贵. 单层磁性平板传输特性分析 [J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 691-695
 [3] 孟凡计, 杨儒贵, 张双文. 频率选择表面的反射和传输系数的修正 [J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(5): 611-614
 [4] 樊振宏, 陈民, 旺书娜, 等. 有限周期频率选择面的电磁特性分析 [J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 724-728.
 [5] 谢处方. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
 [6] 姜宇. 工程电磁场与电磁波 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009
 [7] 官正涛, 张双文, 刘运林, 等. 磁性边界反射特性的研究 [J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(5): 699-702

责任编辑: 任长江