

Matlab在“电磁场与电磁波”课程可视化教学中的探索

——以平面电磁波在介质交界面处的反射与透射分析为例

张慧博, 张轶博

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年4月5日; 录用日期: 2022年6月3日; 发布日期: 2022年6月10日

摘要

电磁场理论有着丰富的科学内涵和应用领域, 广泛应用于包括广播、电视、雷达、卫星通信导航定位等, 催生了信息时代的到来。电磁场相关知识学习过程中涉及的理论推导多、概念多且抽象。利用Matlab程序对平面电磁波在介质界面的反射与透射进行可视化, 有助于学生理解和掌握该物理过程, 也为《电磁场与电磁波》课程中其他知识点的教学提供有益借鉴。

关键词

Matlab, 平面电磁波, 反射与透射

The Application of Matlab in the Visual Teaching of the Course of “Electromagnetic Field and Electromagnetic Wave”

—Taking the Reflection and Transmission Analysis of Plane Electromagnetic Waves at the Interface of the Medium as an Example

Huibo Zhang, Yibo Zhang

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Received: Apr. 5th, 2022; accepted: Jun. 3rd, 2022; published: Jun. 10th, 2022

Abstract

Electromagnetic field theory is widely applied in scientific contexts and industrial fields such as

radio, television, radar, satellite communications, navigation and positioning, etc., which ushered in the information age. During the learning of electromagnetic fields, there are many abstruse derivations and concepts as obstacles for students. Using the Matlab program to visualize the reflection and transmission of plane electromagnetic waves at the interface of the medium will help to improve students' understanding and mastery of the physical process, and also provide a useful reference for the teaching of other knowledge points in the Electromagnetic Field and Electromagnetic Waves course.

Keywords

Matlab, Plane Electromagnetic Waves, Reflection and Transmission

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

可视化教学是指利用视频、动画、图片等多种可视化媒介,将抽象的事物或过程以直观清晰的方式呈现出来[1]。在理论性偏重的课程中使用可视化教学,能够将枯燥的理论概念以视觉形式表达,有助于激发学生学习兴趣,增强学生学习主动性,提高学生学习效率。《电磁场与电磁波》是一门研究宏观电磁场与电磁波的基本概念、规律和基本应用的课程,是电子信息类专业本科生必修的专业核心课[2]。课程主要讲述麦克斯韦方程组的物理意义及其应用、媒质的电磁特性及电磁场边界条件、静态场特性与分析、平面电磁波特性及传播规律和电磁波辐射原理等方面的内容。该课程涉及的理论推导多、概念多且抽象,学习难度较大。运用电磁仿真软件和计算机程序实现“场”、“波传输”、“波反射和透射”等物理概念的可视化,可以加深学生对抽象概念的认知与理解[3][4]。本文以平面电磁波在介质界面的反射与透射物理过程分析为切入点,编写了 Matlab 程序来对该过程进行可视化,化抽象为具体,探索 Matlab 在该课程教学中的应用。

2. 介质交界面反射与透射理论模型构建

入射电磁波在交界面上感应出电荷或电流,这些电荷、电流向交界面两边辐射电磁波,称为二次辐射。辐射到原媒质中的是反射波(reflected wave),辐射到另一种媒质中的是透射波(transmitted wave)。反射和透射的物理实质是界面感应电荷、电流的二次辐射[5][6]。

给定初始条件:入射电磁波为均匀平面波,介质交界面为平面且无限大;介质为理想媒质,均匀、线性、各向同性、不导电(相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 均为实常数, $\sigma = 0$)。等相面上任意取向电场强度分解为两个线极化波分量的叠加。垂直极化波为电场方向与入射面垂直的波,平行极化波为电场方向与入射面平行的波。

假设入射波是垂直极化波入射的情况(如图 1 所示), \vec{E}_i 和 \vec{E}_r 分别为入射波和反射波, \vec{E}_t 为透射波。入射电场幅值为 E_{i0} , 反射波电场幅值为 $r_{\perp} E_{i0}$, 透射波为 $t_{\perp} E_{i0}$ 。此时电场的表示式为:

$$\begin{aligned}\vec{E}_i(\vec{r}) &= (E_{i0} \hat{y}) e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \\ \vec{E}_r(\vec{r}) &= (r_{\perp} E_{i0} \hat{y}) e^{-j\vec{k}_r \cdot \vec{r}} \\ \vec{E}_t(\vec{r}) &= (t_{\perp} E_{i0} \hat{y}) e^{-j\vec{k}_t \cdot \vec{r}}\end{aligned}\quad (1)$$

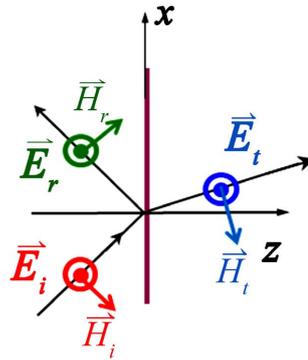


Figure 1. Diagram of the reflection and transmission of electric fields with vertical polarization
图 1. 入射波为垂直极化下的反射与透射示意

由电场表达式可以推导出对应的磁场分量表达式:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{\omega\mu} \vec{k} \times \vec{E}(\vec{r}) \quad (2)$$

根据电磁场边界条件可以得到反射系数 r_{\perp} 和透射系数 t_{\perp} 。对于垂直极化, 电场平行于界面(x - y 平面), 故两侧电场相等; 而磁场位于 x - z 平面, 介质为理想介质(无自由电流), 故此两侧磁场的平行分量也相等。由此列出方程:

$$\begin{aligned} E_{i0} + r_{\perp} E_{i0} &= t_{\perp} E_{i0} \\ -H_{i0} \cos \theta_i + H_{r0} \cos \theta_r &= -H_{t0} \cos \theta_t \end{aligned} \quad (3)$$

$$H_{i0} = \frac{E_{i0}}{\eta_1}, H_{r0} = \frac{r_{\perp} E_{i0}}{\eta_1}, H_{t0} = \frac{t_{\perp} E_{i0}}{\eta_2}$$

联立方程解得电场反射系数和透射系数:

$$\begin{aligned} r_{\perp} &= \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \\ t_{\perp} &= \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \end{aligned} \quad (4)$$

由于三个波的传播方向不同, 其定义只有在是沿 z 方向能量流动是有意义的, 可得:

$$\begin{aligned} R_{\perp} &= |r_{\perp}|^2 \\ T_{\perp} &= |t_{\perp}|^2 \frac{\eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i} \end{aligned} \quad (5)$$

可以验证 $R_{\perp} + T_{\perp} = 1$ 。

同理可以得到入射波为水平极化下的电场反射系数和透射系数为:

$$\begin{aligned} r_{\parallel} &= \frac{\eta_1 \cos \theta_i - \eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \\ t_{\parallel} &= \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \end{aligned} \quad (6)$$

通过对上述公式进行分析, 可以得出以下结论:

1) 介质参数差异越大, 反射系数越大; 入射角度越大, 反射系数越大; 从光密到光疏, 有全反射现

象(对应的入射角为 $\arcsin(\varepsilon_{r2}/\varepsilon_{r1})^{0.5}$, ε_{r1} 和 ε_{r2} 分别为光密和光疏介质相对介电常数, 即 $\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$);

2) 对于入射波为平行极化波时, 入射波的入射角存在布儒斯特角(对应的入射角为 $\arctan(\varepsilon_{r2}/\varepsilon_{r1})^{0.5}$, ε_{r1} 和 ε_{r2} 分别为入射和透射介质相对介电常数), 即此时的反射波振幅为 0。

3. Matlab 计算结果与分析

利用 Matlab 对电磁波的反射和透射进行可视化。利用 Matlab 设计好的 GUI 展示界面, 将影响电磁波反射与透射的参数输入界面中, 可以直观的对比不同参数对反射系数等参数的影响。该 GUI 界面如图 2 所示, 可以用来设置电磁波频率、介质相对介电常数、介质电导率、介质相对磁导率、入射场幅值、入射角度、电磁波模式(TE 波或者 TM 波)等。

Frequency[Hz]	Electric permittivity	Incident field[V/m]	TE wave Real values
2e9	[2 1]	1	
Conductivity[S/m]	Magnetic permeability	Angle of incidence	
[0 0]	[1 1]	15	

Figure 2. The GUI input interface

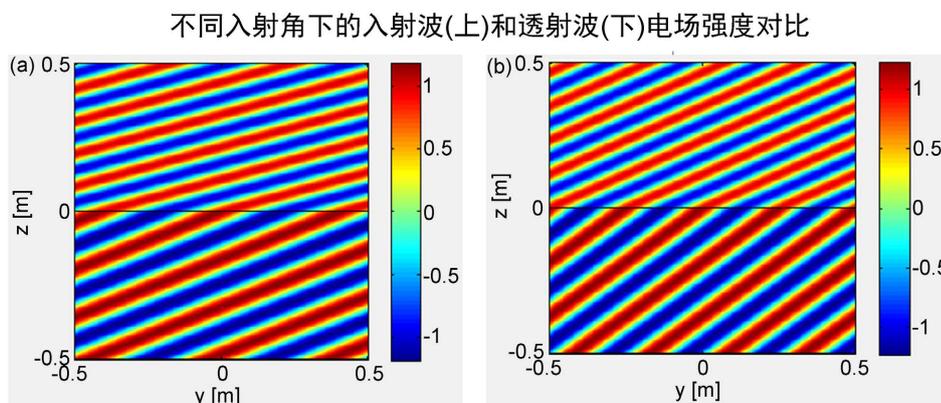
图 2. GUI 输入界面

为了方便起见, 以入射波电场垂直于 xoz 平面为例进行分析, 入射电磁波的频率设置为 2 GHz (对应的波长为 0.15 m), 入射电场的峰值场强为 1 V/m。入射介质的相对介电常数为 $\varepsilon_{r1} = 2$, 透射介质的相对介电常数为 $\varepsilon_{r2} = 1$ 。对应的入射交界平面为 $z = 0$, y 轴计算范围为 $[-0.5, 0.5]$, z 轴的计算范围为 $[-0.5, 0.5]$, 在此范围之外的区域设为完美吸收边界。下面对不同条件下的入射和透射进行分析。

3.1. 不同入射角对比

图 3 给出了电场入射角分别为 15° 、 25° 、 30° 和 45° 情况下, 入射波和透射波的电场强度分布对比。可以看出在其他条件一致的情况下, 随着入射角度的增大, 反射系数增大, 透射系数降低, 这与理论计算相一致。

特别的, 在入射角度为 45° 时, 透射角变为 90° , 此时发生全反射。理论计算全反射角为 $\arcsin(\varepsilon_{r2}/\varepsilon_{r1})^{0.5} = 45^\circ$, 与图 2(d) 所示相一致。如图 4 所示, 发生全反射时, 入射平面内的入射电场和反射电场叠加, 表现出驻波的特性, 周期为 0.15 m, 与预期相一致。全反射现象在光纤通信中应用广泛。



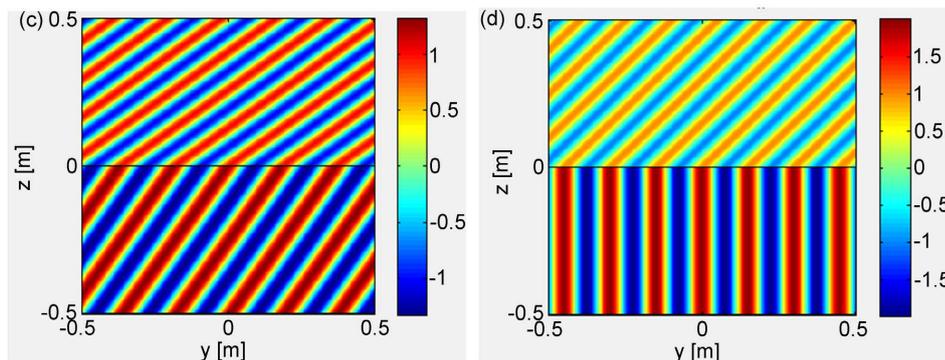


Figure 3. Comparison of the reflection and transmission of at different incident angles: (a) Incident angle = 15°; (b) Incident angle = 25°; (c) Incident angle = 35°; (d) Incident angle = 45°

图 3. 不同入射角下的反射与透射对比: (a) 入射角为 15°; (b) 入射角为 25°; (c) 入射角为 35°; (d) 入射角为 45°

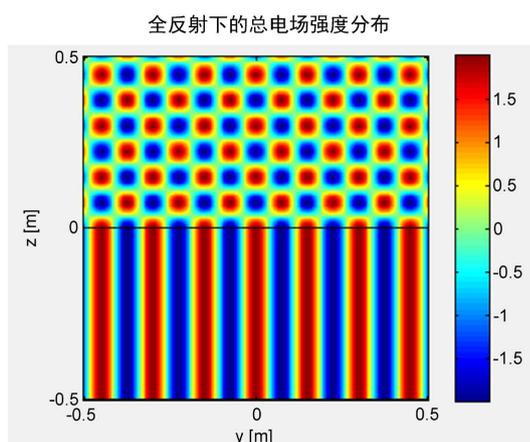
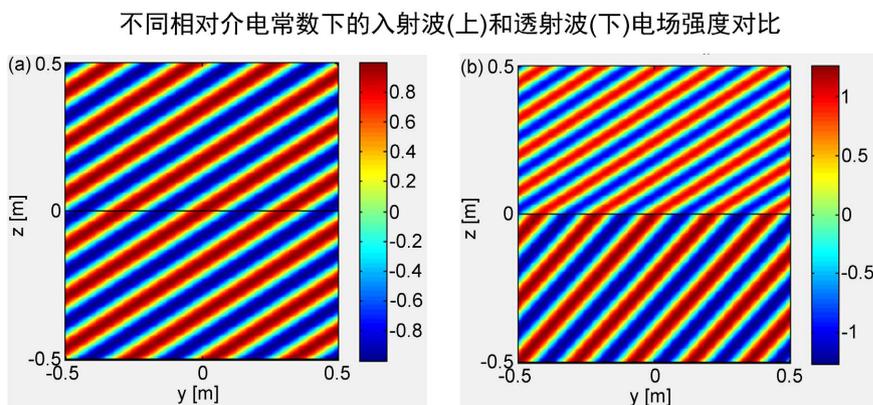


Figure 4. The distribution of electric field intensity under total reflection

图 4. 全反射下的电场强度分布

3.2. 不同介电常数对比

接下来开展了介质 1 在不同相对介电常数情况下的反射与透射对比分析, 如图 5 所示。固定入射角度在 30°, 选取的介质 1 相对介电常数 ϵ_{r1} 分别为 1、2、3 和 4。当 ϵ_{r1} 为 1 时, 由于其与介质 2 相对介电常数相同, 在交界面处没有反射现象发生, 如图 5(a)所示。随着介质 1 相对介电常数增大, 反射现象逐渐明显。当 ϵ_{r1} 达到 4 时, 此时入射角度恰好满足全反射边界条件, 透射角度为 90°, 入射波在交界面处发生全反射。



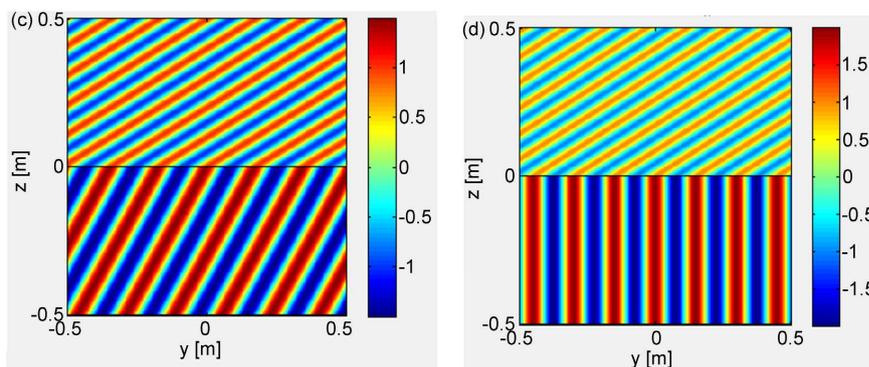


Figure 5. Comparison of the reflection and transmission of at different relative permittivity: (a) $\epsilon_{r1} = 1$; (b) $\epsilon_{r1} = 2$; (c) $\epsilon_{r1} = 3$; (d) $\epsilon_{r1} = 4$

图 5. 不同相对介电常数下的反射与透射对比: (a) $\epsilon_{r1} = 1$; (b) $\epsilon_{r1} = 2$; (c) $\epsilon_{r1} = 3$; (d) $\epsilon_{r1} = 4$

3.3. 多层介质反射与透射对比

Matlab 程序还可以拓展对多层介质界面的反射和透射分析对比, 如图 6 所示。此时的界面分别为 $z = -0.5$ 和 $z = 0$, 需要将上述单层的反射在第二层界面($z = -0.5$)定义一遍, 同时需要考虑由第二层界面反射回第一层界面($z = 0$)的电磁波, 原理类似但过程较为繁琐, 就不展开论述。

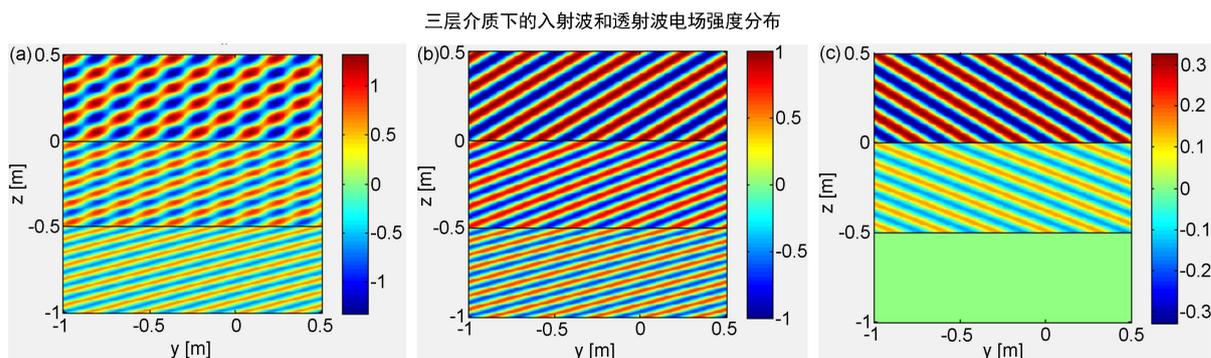


Figure 6. Electric field intensity distribution in three-layer dielectric: (a) Total electric field; (b) Incident and transmitted electric field; (c) Reflected electric field

图 6. 三层介质下的电场强度分布: (a) 总电场; (b) 入射和透射电场; (c) 反射电场

4. 课堂实施与效果评估

在教学实施方面, 原则是以教师为主导, 以学生主体, 具体实施方案如下: 首先开展理论教学, 引导学生给出不同电磁波极化方式下(水平极化和垂直极化)的电磁场边界条件, 分别对应于电磁波的电场分量和磁场分量; 其次结合麦克斯韦方程组和边界条件, 构建两不同介质界面反射与透射理论模型, 推导出相应的反射与透射系数表达式; 在此基础上, 选取特定电磁波参数和介质特性参数, 得到不同入射角和不同介电常数下的反射系数和透射系数, 同时得出在全反射条件下的入射角与相对介电常数的对应关系。

在可视化教学实施方面, 首先将编写好的 Matlab 程序分发给学生, 在如图 2 所示的 GUI 展示界面中, 引导学生自己设置与上述理论计算一致的电磁场参数以及介质参数, 运行程序后就可以得到上一节中所示的电场强度分布。后续分别选取不同的介质参数和电磁场入射角度, 进行可视化演示和深入的对比分析。至此, 完成了两层介质条件下的电磁波反射与透射理论教学和可视化演示。编写的 Matlab 程序支持

对三层介质中的反射与透射进行可视化。鼓励学生推导摸索三层乃至多层介质表面下的反射与透射规律, 与 Matlab 可视化结果相对比印证, 进一步深化学生对知识点的理解和掌握。

通过 Matlab 程序可视化演示, 学生对平面电磁波在介质界面的反射与透射有了更清晰和更直观的认知, 对介质中电磁波的特性也有了更深刻的理解。具体表现为: 在引入 Matlab 程序可视化教学演示后, 学生在完成与该知识点相关的课后作业和考试内容时的得分率提升了约 15% (相较于未引入 Matlab 时), 课堂教学效果提升明显。可以得出结论, 利用 Matlab 程序进行可视化演示, 在“电磁场与电磁波”课程教学中发挥了积极的应用, 可进一步推广到该课程其他部分。

5. 总结

通过使用 Matlab 程序对平面电磁波在介质界面的反射与透射进行可视化演示, 极大丰富了教学内容设计, 提高学生对于此过程的认识和理解。学生处于开放式的学习环境, 有助于充分发挥学生主体性作用, 让学生在学习过程中有较大的自主权。同时将课堂内容做了进一步延伸和拓展, 让学生探索多层介质的反射与透射, 激发了学生主动学习的热情, 这种更深层次的认知体验让学生收获更大的成就感。该举措也为《电磁场与电磁波》课程中其他知识点的教学提供有益的参考, 将有助于提升学生对宏观电磁场与电磁波基本规律的掌握, 使学生能够较为容易理解抽象的知识, 促进知识点有机融合联系, 同样对于培养学生的知识综合应用能力和创新能力具有重要意义。

参考文献

- [1] 阳晓艳. 视频教学资源在大学生心理健康教育课程中的应用[J]. 创新教育研究, 2020, 8(6): 1109-1112. <https://doi.org/10.12677/ces.2020.86181>
- [2] 朱建清, 刘荧, 柴舜连, 杨虎. 电磁波原理与微波工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [3] 张辉, 占建伟, 曹菲, 李艳玲. “电磁场与微波技术”军队网络课程的设计与实现[J]. 创新教育研究, 2018, 6(4): 245-250. <https://doi.org/10.12677/ces.2018.64039>
- [4] 张辉, 占建伟, 苗倩, 李艳玲, 曹菲. “电磁场与微波技术”课堂伴随仿真实验教学研究[J]. 创新教育研究, 2018, 6(4): 321-325. <https://doi.org/10.12677/ces.2018.64051>
- [5] Cheng, D.K. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [6] 谢处方, 饶克谨, 杨显清, 赵家升. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.