

新工科背景下数值仿真驱动电磁场与微波技术课程教学改革

刘兴鹏, 王丹, 雷婷, 张松*

成都工业学院电气与电子工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

在新工科工程教育改革背景下, 针对电磁场与微波技术课程理论性强、实验难开展的实际问题, 提出将数值仿真引入到教学过程中, 强调通过可视化仿真结果使学生深入学习现象背后的公式与概念。本文以矩形波导和同轴线为例, 通过MATLAB仿真实现微波传输线中电磁场分布的直观化, 以可视化的仿真结果帮助学生学习和理解相关理论知识和教学难点, 激发学生学习兴趣, 提高课程教学质量。

关键词

电磁场, MATLAB, 数值仿真

Reforming the Electromagnetic Field and Microwave Technology Course Driven by Numerical Simulation under the Background of New Engineering

Xingpeng Liu, Dan Wang, Ting Lei, Song Zhang*

School of Electrical and Electronic Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: March 16, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

Under the background of the new engineering education reform, the electromagnetic field and

*通讯作者。

文章引用: 刘兴鹏, 王丹, 雷婷, 张松. 新工科背景下数值仿真驱动电磁场与微波技术课程教学改革[J]. 创新教育研究, 2026, 14(4): 430-438. DOI: 10.12677/ces.2026.144289

microwave technology course is difficult to carry out due to the strong theories and difficult experiments. This paper introduces numerical simulations into the teaching process, emphasizing that students can learn the formulas and concepts behind the phenomenon through visual simulation results. Taking the rectangular waveguide and coaxial line as examples, this paper realizes the visualization of electromagnetic field distribution in microwave transmission line through MATLAB simulation. Visual simulation results are used to help students learn and understand relevant theoretical knowledge and teaching difficulties, stimulate students' interest in learning and improve the quality of teaching.

Keywords

Electromagnetic Field, MATLAB, Numerical Simulation

Copyright © 2026 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

新工科是根据国家战略发展需要提出的工程教育新形态。新工科的本质是深度融合现代科技与现代工业，将工程教育融入到教学全过程，旨在培养实践和创新能力强的高素质复合型人才。在新工科背景下，教学过程不但要培养学生解决复杂工程问题的能力，同时要关注未来技术和产业的发展方向。面向新工科背景下电磁场与微波技术的教学改革具有重要的意义[1]-[3]。

电磁场与微波技术课程是高等学校通信、电子、电气等专业的一门重要的专业基础课，广泛应用在下一代通信、雷达、低空经济等最重要领域，培养电磁场与微波技术相关领域的专业技术人才已成为发展我国电子信息产业的关键环节。课程内容包括宏观电磁现象规律和微波技术理论，具有基础理论和工程实践深度融合的特点[4]。当前教学中普遍存在的问题一方面是由于该课程要求学生具备扎实的数学和物理知识，但大多数学生却没有足够的数学物理基础。传统的理论教学往往是教师局限于理论数学模型的推导，缺乏知识点的生动形象的视觉显示，导致学生难以理解和体会电磁现象规律。另一方面，在传统教学实验中，实验的开展通常需要昂贵的实验设备且实验操作复杂，这种实验方式仅能操作一些验证性实验，实验内容拓展性较低，使得学生自主发挥性差、参与度低，而且学生参与实验的空间和时间受限，导致学生学习效果不佳，在一定程度上影响专业人才培养质量[5] [6]。

针对理论教学缺乏实感、实验教学难以开展的难题，将数值仿真引入到教学过程，将抽象课程内容变得清晰具体，用直观的数据和图像形象地描述电磁场分布和电磁波传播状态，提高学生对电磁场知识的掌握和理解水平，实现教学效率和质量的提升。数值仿真过程是教学改革中的重要一环，在理论教学过程中加入仿真专题，对学生实践考核起到关键作用。在教学过程中，对学生在数值仿真中遇到的理论知识、程序仿真、结果分析等问题进行答疑和辅导，根据情况打分汇总到总成绩中。本文利用 MATLAB 科学计算软件实现矩形波导和同轴线中电磁场分布抽象的理论公式可视化，让学生直观地、多方法地观察电场和磁场分布的特点，实现复杂空间分布具体化，让学生直观地理解和掌握矩形波导和同轴线的理论知识，提高课堂学习效率。

2. 数值仿真在电磁场与微波技术教学中的优势

随着计算机技术的飞速发展，电磁场数值仿真方法得到了飞跃式进步。在电磁场与微波技术课程

中,通过数值仿真实现课程中部分知识点可视化,提升学生学习的参与度,深化学生理解和应用能力,帮助学生在数值仿真中独立分析和解决问题。同时,数值计算过程中不需要真实的微波设备仪器,有效地降低实验成本、控制实验操作过程的风险[7]。将数值仿真工具应用到教学中,通过可视化仿真系统地优化教学过程,有效提升了学生的课堂参与度、知识整合能力与数学直观理解,为电磁场与微波技术课程的教学创新提供了可行路径[8]。根据授课内容,采用物理概念讲解和仿真动画演示相结合的教学方法,将电磁场分布可视化,帮助学生建立起清晰的电磁场时空分布,从而增加学习的乐趣与积极性[9]。

在电磁场数值仿真领域比较常用的仿真软件有 MATLAB、HFSS/CST、Python 等[10]。其中, MATLAB 是由 MathWorks 公司开发的一种用于数据可视化、数据分析及数值计算的科学计算软件。而且与其他仿真软件相比, MATLAB 是大多数学生已经掌握比较熟练的软件,学生可以将数值仿真学习的重点放到物理现象和数学模型的理解中,适用于在基础教学方面的推广使用。MATLAB 具有强大的数值计算能力和图形可视化功能,能够进行数学建模和数据分析,而且包含大量数学函数保证计算的稳定[11]。应用 MATLAB 强大的绘图和图形处理功能,能够给出电磁场二维和三维图形,分析电磁场在各截面的分布情况,直观观察电磁场的空间和时间变化规律。

因此本文重点介绍借助 MATLAB 软件模拟微波传输线中的电磁场分布,把复杂的公式进行计算和画图,直观地描述电磁场分布规律,将抽象的理论概念可视化,帮助学生掌握和理解微波传输线中电磁场分布规律。

3. 仿真案例

微波传输线是基础的微波元器件,用于引导电磁波沿着一定方向传播的装置,其特性直接影响射频电路、微波器件及通信系统的性能。目前广泛应用的微波传输线有波导、同轴线、微带线等,它们在不同的微波系统中发挥着重要作用。其中矩形波导是一种立体的波导类传输线,具有低损耗、抗干扰能力强等优点;同轴线是一种由同轴的内层金属和外层金属圆筒组成的传输线,具有宽的带宽、便于实验应用等优点[12][13]。本文将重点介绍用 MATLAB 数值仿真分析矩形波导和同轴线这两种基础的微波传输线。

3.1. 矩形波导

波导是导引电磁波沿一定方向传输的系统,波导中电磁波的分布和传播规律由麦克斯韦方程和边界条件决定。矩形波导是横界面为矩形的空心金属管,具有结构简单、机械强度大的优点,而且由于矩形波导没有内导体使得导体损耗低、功率容量大,一般用来传播厘米波或毫米波,广泛应用于微波系统中。

如图 1 所示为典型的矩形波导, a 和 b 分别是矩形波导内壁的宽边和窄边尺寸, z 轴为波导的传播方向。

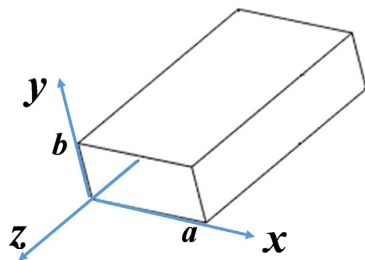


Figure 1. Rectangular waveguide
图 1. 矩形波导

由于矩形波导是单导体结构,不能传输横电磁(TEM)波,只能传输横电(TE)波或横磁(TM)波。根据波动方程和边界条件,通过分离变量法直接求出波导中传播的电场和磁场解,但解的数学形式复杂而抽象,

不易于学生理解和掌握。矩形波导中最简单的波形为 TE_{10} 模，而且实际应用中矩形波导大都工作在 TE_{10} 模。因此本文以 TE_{10} 模为例，其电场分量为公式(1)，磁场分量为公式(2)。

$$\begin{aligned} E_x &= 0 & (a) \\ E_y &= \omega\mu_0 H_0 \frac{a}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - \beta z) & (b) \\ E_z &= 0 & (c) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H_x &= -\beta H_0 \frac{a}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - \beta z) & (a) \\ H_y &= 0 & (b) \\ H_z &= H_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos(\omega t - \beta z) & (c) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， ω 为角频率， μ_0 为真空磁导率， β 为相位常数， H_0 为磁场强度 H_z 的振幅。

对于矩形波导 TE_{10} 模，公式(1)显示出，电场的 x 分量和 z 分量为 0，只有 y 分量，即 E_y 。公式(2)显示出，磁场的 y 分量为 0，而 x 分量和 z 分量不为 0，即 H_x 和 H_z 。在 xz 平面内，从公式(2a)和公式(2c)可以看出，磁场分布受 H_x 和 H_z 两个分量支配、而与 y 无关。在 xy 平面内，从公式(1b)和公式(2a)可以看出，当 $\sin(\omega t - \beta z) = 1$ 时， E_y 和 H_x 沿着 x 方向按照 $\sin(\pi x/a)$ 变化，而与 y 无关。在 yz 平面内，从公式(1b)和公式(2c)可以看出，当 $x = a/2$ 时，则 $\sin(\pi x/a) = 1$ 和 $\cos(\pi x/a) = 0$ ，磁场的 H_z 分量为 0， E_y 和 H_x 沿着 z 方向都按 βz 作正弦变化。

利用 MATLAB 灵活的二维、三维绘图功能，将矩形波导中电磁场理论公式进行数值计算，并画出电磁场的三维、二维分布图，将电磁场的空间分布规律直观地显示出来，能够让学生更深入地理解矩形波导中电磁场的分布。根据公式(1)和公式(2)的电场和磁场各分量的理论公式，分别用三维箭头绘图函数 `quiver3` 和二维箭头绘图函数 `quiver` 绘制出电场和磁场的矢量的分量[14][15]。

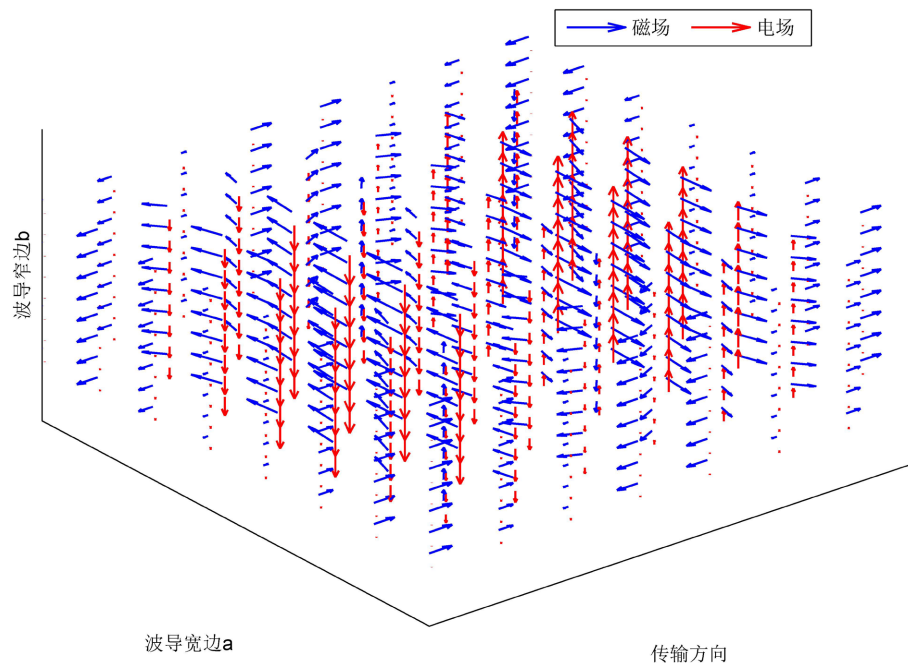


Figure 2. Electromagnetic field distribution of TE_{10} mode
图 2. TE_{10} 模的电磁场分布

图 2 为矩形波导内三维空间的电场和磁场分布图，红色表示电场，蓝色表示磁场。箭头方向为场矢量的方向，线的长短表示场强的大小。可以看出，电场方向与导体上下表面垂直，且电力线不能相互交叉和闭合。磁场方向与导体表面平行，磁力线也不能相互交叉，但磁力线为闭合曲线。电场方向和磁场方向总是相互垂直，且满足波印廷矢量关系，即电磁场的传输方向为能量流动方向。TE₁₀ 模的电场和磁场沿着宽边 a 为半个驻波分布，而沿着窄边 b 为均匀分布。

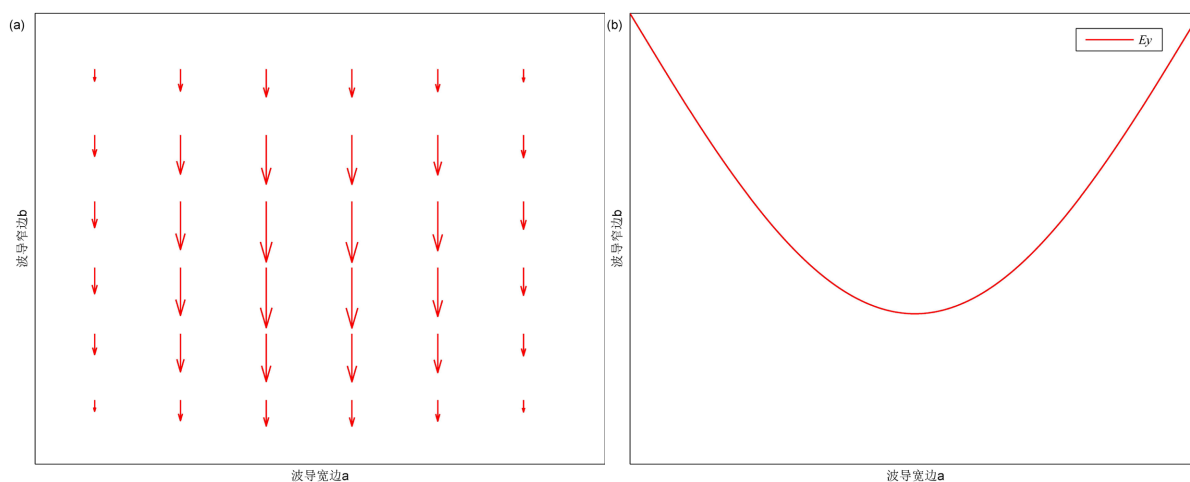


Figure 3. Distribution of TE₁₀ mode electric field in cross section; (a) Electric field vector; (b) Electric field amplitude
图 3. TE₁₀ 模电场在横截面的分布; (a) 电场矢量; (b) 电场幅度

图 3 为某一时刻电场在矩形波导横截面的二维分布图。由于 TE₁₀ 模的电场只有 E_y 分量，从图 3(a) 呈现出电力线方向为平行于矩形波导短边 b ，即电场方向为 y 方向。而且从图 3(a) 可以看出，电力线的长短为沿着矩形波导宽边 a 呈现出中间长、两端短，即电场大小为沿着 x 轴呈现出两端小、中间强的特点。图 3(b) 中显示，电场在波导宽边 a 表现为半个驻波，即在 $x=0$ 和 $x=a$ 处为电场幅度最小、 $x=a/2$ 处电场幅度最大。

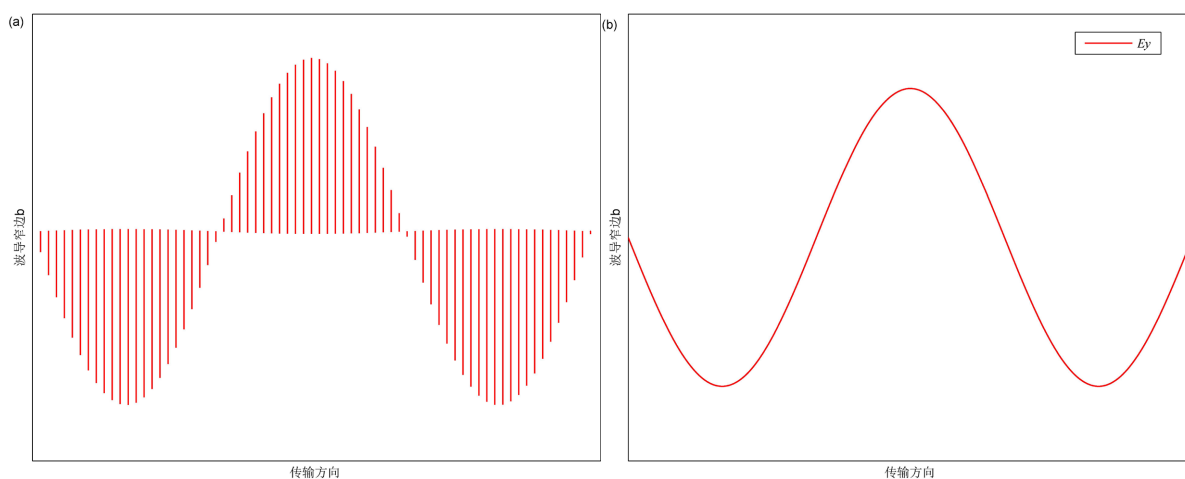


Figure 4. Distribution of TE₁₀ mode electric field in propagation direction; (a) Electric field vector; (b) Electric field amplitude
图 4. TE₁₀ 模电场在传播方向的分布; (a) 电场矢量; (b) 电场幅度

图 4 为某一时刻电场在矩形波导中沿传播方向的二维分布图，可以看出在沿 z 轴的方向电场以正弦规律变化。从图 4(a) 的出电力线方向为平行于矩形波导短边 b ，即电场方向为 y 方向，从图 4(b) 可以看出在电场幅度沿 z 轴正弦规律变化。

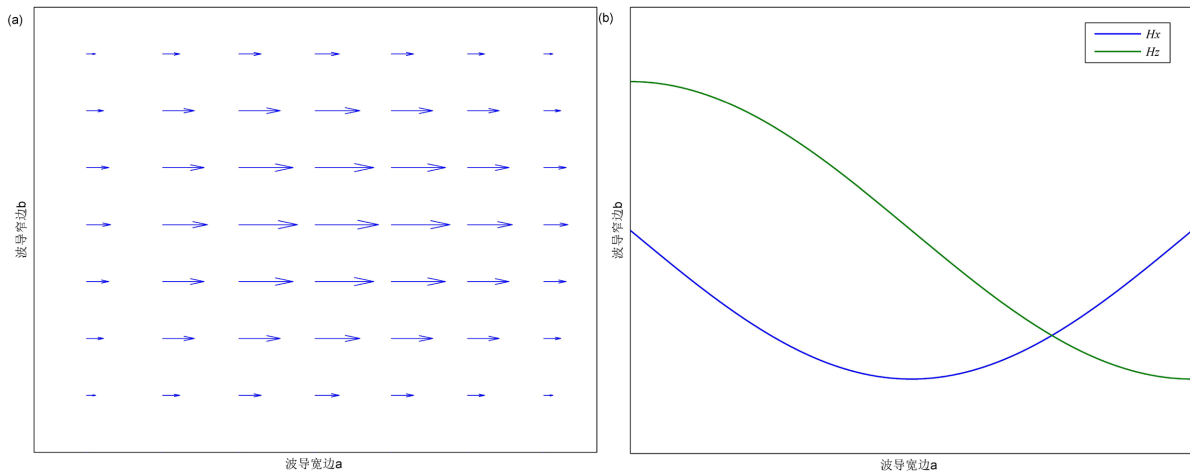


Figure 5. Distribution of TE₁₀ mode magnetic field in cross section; (a) Magnetic field vector; (b) Magnetic field amplitude
图 5. TE₁₀ 模磁场在横截面的分布; (a) 磁场矢量; (b) 磁场幅度

图 5 为某一时刻磁场在横截面的分布图。从图 5(a)可以看出，磁力线方向为平行于矩形波导宽边 a ，即横截面的磁场方向为 x 方向；磁力线的大小为沿着矩形波导宽边 a 呈现出中间大两端小的特点，而沿着矩形波导窄边 b 无变化。图 5(b)显示出 TE₁₀ 模磁场的 H_x 和 H_z 两个分量呈现出驻波状态，即 H_x 沿着 a 边为半周期正弦波，在 $x = 0$ 和 $x = a$ 处磁场幅度最小、在 $x = a/2$ 处磁场幅度最大； H_z 在 a 边为半周期余弦波，在 $x = 0$ 和 $x = a$ 处磁场幅度最大、在 $x = a/2$ 处磁场幅度为 0。

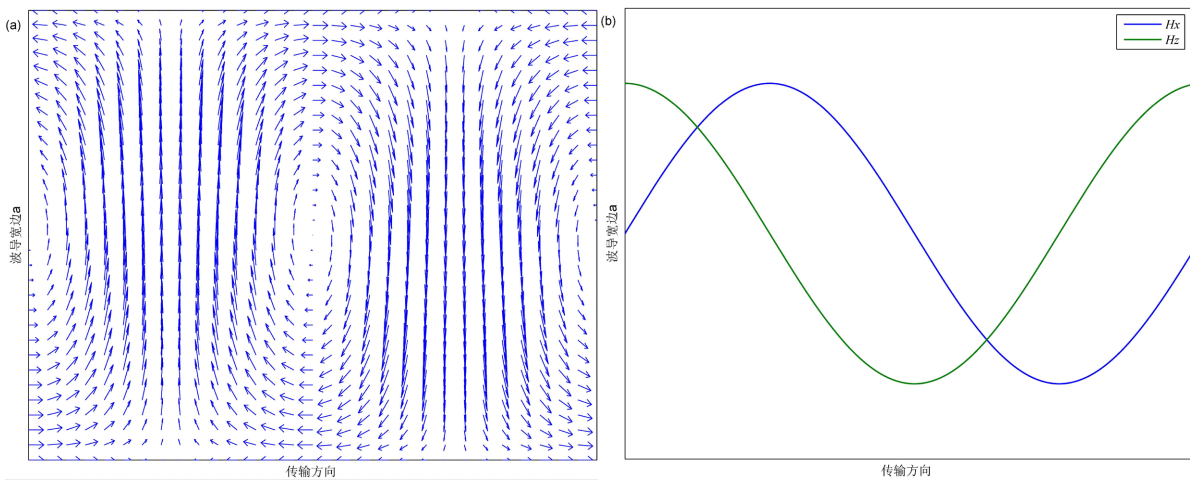


Figure 6. Distribution of TE₁₀ mode magnetic field in propagation direction; (a) Magnetic field vector; (b) Magnetic field amplitude
图 6. TE₁₀ 模磁场在传播方向的分布; (a) 磁场矢量; (b) 磁场幅度

图 6 为某一时刻磁场沿传播方向的分布图，从图 6(a)可以看出磁场呈涡旋状，这是由于矩形波导中 TE₁₀ 模为沿 y 方向变化的电场 E_y 感应出涡旋的磁场，即 H_x 和 H_z 。图 6(b)为在某一时刻 H_x 和 H_z 沿 z 轴的变化，两者具有 90° 的相位差，一个为最大时另一个为 0。

3.2. 同轴线

同轴线也称为同轴波导，由同轴的内层金属和外层金属圆管组成的闭合信号传输系统，内外导体之间可以用空气填充、也可以填充介质，同轴线属于双导体传输线。同轴线中传输的电磁场被限制在内导

体与外导体之间, 根据趋附效应可以忽略同轴线的辐射损耗, 同轴线是一种宽频带传输线。当工作波长大于分米级时, 与矩形波导和圆波导相比, 同轴线的尺寸较小, 因此同轴线经常应用在传输线和制作宽频带元器件。

如图 7 所示为同轴线, 内圆柱体半径为 a , 外圆柱体半径为 b , 内外导体为理想导体, 内外导体之间填充的介质参数为 ε 和 μ 的理想介质。

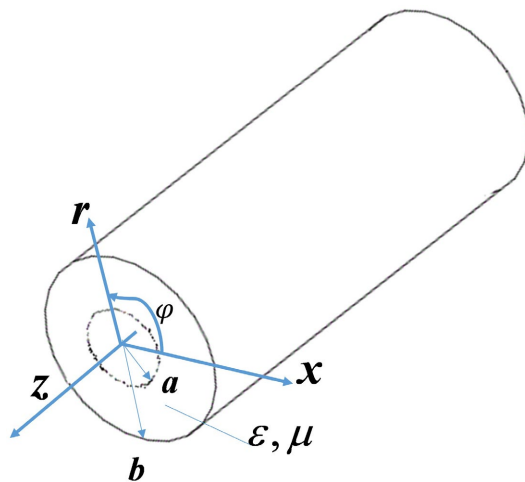


Figure 7. Coaxial line
图 7. 同轴线

同轴线具有轴对称性, 在圆柱坐标系下应用分离变量法求解拉普拉斯方程。由于同轴线工作的主模为 TEM 模, 本文以同轴线中的 TEM 模为例, 其场分量为公式(3)。

$$E_z = H_z = 0 \quad (a)$$

$$E_t = e_r \frac{U}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} e^{-j\beta z} \quad (b)$$

$$H_t = e_\phi \frac{U}{\eta r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} e^{-j\beta z} \quad (c)$$

其中 U 为内外导体间的电压, η 为内外导体间媒质的波阻抗。 η 与填充介质的参数有关, 即 $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 。

从公式(3a)可以看出, TEM 模在传播方向上无电场和磁场分量, 即 $E_z = 0$ 和 $H_z = 0$; 从公式(3b)和(3c)得出, TEM 模的电场和磁场只分布在横截面上, 即 E_t 和 H_t 。而且, 电场沿着 e_r 方向、磁场沿着 e_ϕ ; 电场和磁场的大小都与半径 r 成反比, 都与内外导体间的电压 U 、内导体半径 a 和外导体半径 b 有关; 沿着传播方向 z 轴的正方向, 电场和磁场的传播规律都为 $e^{-j\beta z}$, 也就是电场与磁场均以行波方式在传输线上传输。

借助 MATLAB 软件强大的作图功能, 利用 quiver 函数, 可以轻松将同轴线中 TEM 模的电磁场分布公式(3)用图像表示出来, 如图 8 所示。

图 8 为同轴线横截面内的电场和磁场分布图, 红色表示电场, 蓝色表示磁场。从图 8 可以看出, 对于同轴线的 TEM 模, 电场仅存在内外导体之间并且成辐射状, 电场方向由内导体指向外导体且与两导体表面垂直; 磁场则分布在内外导体之间, 形成以内导体为中心、处处与电场正交的磁力线环。由于磁力线必须是闭合曲线, 磁场只有 e_ϕ 分量。而电场、磁场要相互垂直, 电场只有 e_r 分量。电场方向和磁场

方向总是相互垂直,则波印廷矢量方向为沿着 z 轴方向,即电磁能量的传输方向为沿着同轴线纵向方向传输。图8显示出,越靠近内导体表面电力线和磁力线的长度越长,表明越靠近内导体表面电场和磁场越强。可以推出内导体表面电流密度比外导体内表面的表面电流密度大,因此同轴线的热损耗主要发生在横截面尺寸较小的内导体上。

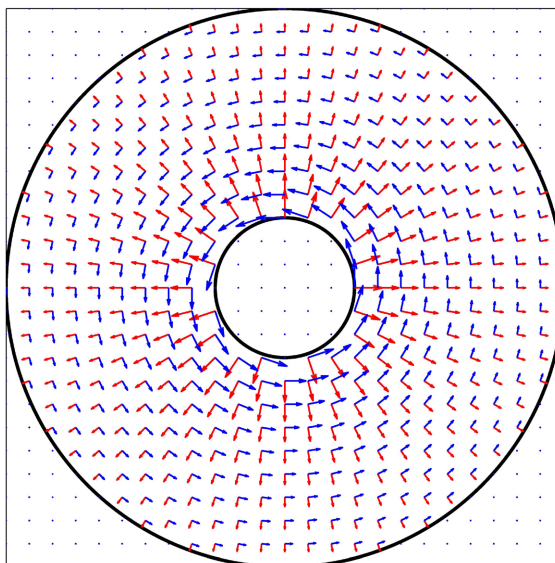


Figure 8. Distribution of electromagnetic field in cross section of coaxial line

图8. 同轴线横截面内电磁场的分布

4. 结论

本文将 MATLAB 应用于矩形波导和同轴线中的电磁场分布仿真中,给出它们的主模的电磁场的分布图。用可视化的结果形象地描述电磁波的传播分布,让学生对电磁波在矩形波导和同轴线中的分布有了更清晰直观的印象,加深了对微波传输线理论的理解。通过数值仿真将抽象理论知识形象化,有利于电磁场类课程知识点的掌握,提高教学水平和教学效果。

基金项目

成都工业学院教学改革与质量提升工程项目(项目编号:2025XQGJ004、2025SJJX018)。

参考文献

- [1] 柴永强,彭媛.新工科背景下电磁场与微波技术课程教学改革探究[J].创新创业理论与实践,2024,7(3):32.
- [2] 万卓,张赛文,宋明霞.“新工科”背景下电磁场与电磁波课程教学改革的探索与研究[J].科技经济市场,2022(10):137-139.
- [3] 花涛,覃翠,包永强,等.新工科背景下应用型本科院校“电磁场与微波技术”课程理论与实验一体化教学设计研究[J].科技风,2023(4):92-94.
- [4] 时翔,王苗苗.电磁场与微波技术课程专创融合教学设计[J].职业教育发展,2025,14(1):459-465.
- [5] 刘北佳,林澍,王楠楠,等.浅谈电磁场与无线技术虚拟仿真创新实验建设[J].教育现代化,2020,7(46):1-3.
- [6] 李怀慎,夏能弘,刘蓉晖,等.虚拟实验助力“电磁场”课程教学[J].中国电力教育,2021(9):54-55.
- [7] 陈召,王艺霖,侯志灵.基于数值仿真的微波技术课程辅助教学改革研究[J].创新教育研究,2024,12(5):257-264.

- [8] 张杰. 基于知识图谱与可视化的复变函数论教学改革与实践研究[J]. 职业教育发展, 2026, 15(3): 8-13.
- [9] 党方超, 孙云飞, 袁成卫. 《微波技术与天线》课程教学策略探讨与研究[J]. 教育进展, 2021, 11(5): 1675-1679.
- [10] 李慧, 李小兵, 马晓瑞, 等. 梯度式虚拟仿真在电磁场教学改革中的应用[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(2): 55-59.
- [11] 谭阳红, 高兵, 帅智康. 电磁场与电磁波的 MATLAB 实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
- [12] 李宗谦. 微波工程基础[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2004.
- [13] 郑钧. 电磁场与电磁波[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [14] 张勇, 朱晨启, 张睿. 基于 FDTD Solutions 的金属矩形波导电磁性质仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(11): 161-165.
- [15] 梅中磊, 李月娥, 马阿宁. MATLAB 电磁场与微波技术仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.