

基于多媒体和全波仿真软件的微波技术矩形波导模式学习方法

王正鹏 谢宇杰

北京航空航天大学, 北京, 100191;

摘要:微波技术课程中矩形波导模式的概念比较抽象。本专业多年教学经验表明, 学生对于电压、电流等传统信号传播方式容易理解, 对于波导模式缺乏直观的认识和理解, 波导模式复杂的数学表达式增加了学生对本部分学习的困难, 笔者结合教研室教师课程教学的经验和实际工程项目经验, 提出基于多媒体和全波仿真软件的辅助教学方案, 从电场、磁场分布变化规律和实际工程应用案例入手, 将波导模式多角度展现给学生, 显著增强学生对本部分的理解。

关键词:电子信息工程; 微波技术; 多媒体教学

微波技术是一本与实际工程和研究紧密结合的课程, 教学内容丰富实用。学生在学习电磁场理论的基础上进行学习, 如果方法得当, 往往产生豁然开朗的感觉, 能够将复杂的电磁场与电磁波理论与实际工作结合起来, 通过掌握的物理规律实际解决工程问题, 将看不见摸不着的电磁场与电磁波应用的得心应手。

1 微波技术教学现状

微波技术课程作为电子信息类专业的基础课程, 承担着为学生提供电子技术、无线通信、雷达系统等领域核心知识的重任。几乎所有与电磁场、微波技术相关的研究和工程实践, 都离不开微波技术的理论支撑^[1]。尤其在现代无线通信、雷达探测、遥感技术、卫星导航等高新技术领域, 微波技术的应用越来越广泛, 成为推动这些技术进步的重要动力。例如, 手机通信技术的普及与发展便离不开微波技术的支撑。微波技术不仅是科学研究的基础工具, 也是各类现代无线系统的核心技术, 已经在产业界和科研领域占据了不可或缺的地位。尽管如此, 当前许多学生在学习微波技术过程中, 往往难以深入理解其中的很多关键知识点。

目前, 在许多高校的微波技术教学中, 实验教学设施的有限性成为了一个显著问题。实验场地通常承担着繁重的科研任务, 难以满足本科生进行频繁实验操作的需求, 导致学生们很难有机会进行充分的动手实践。这种情况不仅限制了学生对微波技术的实践理解, 也影响了学生对微波技术的兴趣和内心认同的建立^[2]。虽然理论基础对于微波技术的学习至关重要, 但理论课程中复杂的公式推导和抽象

的概念往往让学生感到枯燥乏味。由于课堂上教师多采用单向讲授和传统的黑板推导方式, 缺乏互动性和启发性, 学生只能被动地接受知识, 缺少主动思考和探索的空间^[3]。这种教学模式难以激发学生的学习热情, 导致他们在课堂中的参与感较低, 难以深入理解和应用所学内容。

此外, 现代教育技术在微波技术教学中的应用仍然不足。缺乏虚拟仿真、交互式模拟等现代化的教学手段, 使得学生很难在课堂上直观感受到微波技术的实际效果和应用场景, 进一步加剧了课程内容的枯燥性和抽象性。在这种情况下, 学生对微波技术的兴趣不断降低, 学习动力逐渐减弱, 最终影响了教学效果和学生的学业成绩。

2 微波技术的发展趋势

传统的理论教学仍然是微波技术课程的基础, 但实践导向和应用性教学日益受到重视。现代微波技术教学已经不再局限于简单的理论知识传授, 而是强调理论与实践的深度融合。许多高校开始引入先进的实验室设备, 如矢量网络分析仪、频谱分析仪等高精度仪器, 让学生能够直接接触和操作最新的微波测试设备。这种实践性教学模式有助于培养学生的动手能力和工程实践技能。

现有的微波技术课程存在一定的教学困境, 主要表现为实验条件受限、教学方法单一以及课程内容难度较大等问题。这些因素使得学生在学习过程中很难建立对微波技术的深刻理解和兴趣。为了解决这些问题, 亟需采取新的教学策略, 如引入基于多媒体和全波仿真软件的微波技术学习方法。这些现代化的教学工具能够帮助学生更直观地理解微

波技术的原理与应用,提升课堂的互动性与趣味性,从而有效地增强学生的学习兴趣 and 实践能力^[4]。通过改进教学方法和手段,结合当前教学现状,必将有助于提升微波技术课程的授课质量,进而推动学生对微波技术的全面掌握和深入理解。

3 微波技术多媒体仿真教学案例——以矩形波导为例

3.1 矩形波导的模式

通常默认矩形波导宽边长度为 a , 窄边长度为 b , 如图 1 所示。

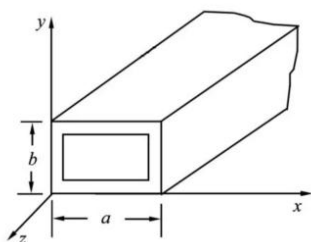


图 1 矩形波导示意图

当矩形波导中 $E_z \neq 0$, $H_z = 0$ 时, 其场分布称为 TM 波; $E_z = 0$, $H_z \neq 0$ 时, 其场分布称为 TE 波^[5]。TM 波的通解可表示为:

$$\begin{cases} E_x = -\frac{jk_z}{k_c^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) E_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-jk_z z} \\ E_y = -\frac{jk_z}{k_c^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) E_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-jk_z z} \\ E_z = E_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-jk_z z} \\ H_x = -\frac{1}{\eta_{TM}} E_y \\ H_y = \frac{1}{\eta_{TM}} E_x \\ H_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

TE 波的通解可以表示为:

$$\begin{cases} H_x = \frac{jk_z}{k_c^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) H_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-jk_z z} \\ H_y = \frac{jk_z}{k_c^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) H_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-jk_z z} \\ H_z = H_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-jk_z z} \\ E_x = \eta_{TE} H_y \\ E_y = -\eta_{TE} H_x \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对应于每一组 m, n 的取值, 都可求得波导场的一个特解, 称为波导场的一个模式, 记为 TM_{mn} 模式和 TE_{mn} 模式。注意到为了保持其物理意义, 对于 TM 波要求 m, n 都不为零, 对于 TE 波要求 m, n 不全为零。其中 $k_c^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$, 称为截止波数, $\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c}$ 称为截止波长。矩形波导具有“高通低不通”的传播特性, $\lambda < \lambda_c$ 的 TE 模式和 TM 模式可以在波导中导通, 而 $\lambda > \lambda_c$ 的 TE 模式和 TM 模式在波导中被截止。TE₁₀ 模式有最大的截止波长, 故被称为主模。

注意到 λ_c 完全由矩形波导的物理尺寸和传播模式所决定。

在本教学案例中波导尺寸 $a=22.86\text{mm}$, $b=10.16\text{mm}$, 不同模式的截止波长和截止频率见表 1。在本教学案例中共考虑 TE₁₀, TE₂₀, TE₀₁ 和 TM₁₁ 等 11 种模式。

表 1 不同模式的截止波长和截止频率

模式	λ_c/mm	f_c/GHz
TE ₁₀	45.72	6.56
TE ₂₀	22.86	13.11
TE ₀₁	20.32	14.75
TM ₁₁ , TE ₁₁	18.57	16.15
TE ₃₀	15.24	19.68
TE ₂₁ , TM ₂₁	15.19	19.75
TE ₃₁ , TM ₃₁	12.19	24.61
TE ₀₂	10.16	29.53

3.2 CST 中的场分布

CST (Computer Simulation Technology) 是一款全波电磁仿真软件, 广泛应用于微波领域。通过多种仿真方法 (如时域有限积分法、积分方程法等), CST 可以高效地分析微波组件、天线、滤波器、传输线等设计。其强大的三维建模和高精度计算能力, 使得复杂的微波结构能够被精确模拟, 从而优化设计性能、提高效率并减少试验成本。此外, CST 提供了丰富的后处理工具, 帮助用户分析和可视化仿真结果, 为微波设备的开发和优化提供了强大的技术支持。在仿真软件中可以静态或动态的展示电场、磁场、电流分布等, 为初学者理解电磁波传播、反射等物理规律提供了极大便利。

在 CST 中设置对应尺寸的矩形波导模型, 设置边界条件 (Normal) 与频率范围 (10GHz-15GHz), 设置激励 (Waveguide port 包含模式 1-5) 和电场磁场监视器, 最后使用时域求解器求解, 即可观察不同频率下的电场分布、磁场分布、表面电流和导通状态。在本教学案例中设置工作频率为 10GHz、15GHz 和 20GHz。通过在全波仿真软件中以多媒体形式展现波导中电磁场的传播状态与分布情况, 可以有效提升本科同学的学习兴趣, 使教学更具互动性与直观性。

在 10GHz 下仅有 TE₁₀ 模式导通, 四种模式的电场分布如图 2 所示。可以看到除 TE₁₀ 模式外, 其他模式在端口激励后电场很快衰减。各个模式从场形分布上可以看出与公式 (2) 的描述是完全吻合的。TE₁₀ 模式作为主模在这种情况下是导通的, 电场方向是垂直于宽边的。TE₂₀ 模式在 x 轴方向反向复制了 TE₁₀ 模式。

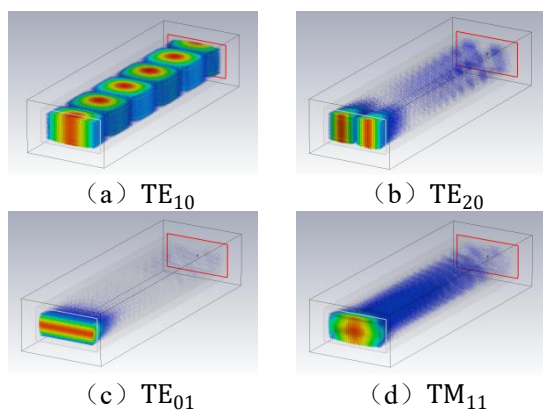


图 2 10GHz 下不同模式的导通状态

对于导通的 TE_{10} 模式进一步对电场和磁场分布进行观察如图 3 所示。TE 波不存在 z 方向的电场分量，而存在 z 方向的磁场分量，同时电场和磁场相互正交。

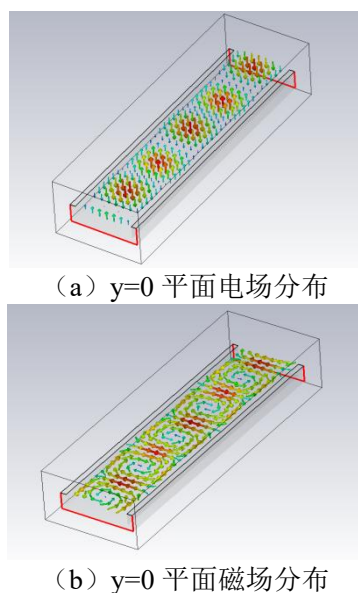


图 3 TE_{10} 模式 $y=0$ 平面电场和磁场分布

在 10GHz 下四种模式的表面电流分布如图 4 所示，同样除 TE_{10} 模式外，其他模式在端口激励后表面电流很快衰减。

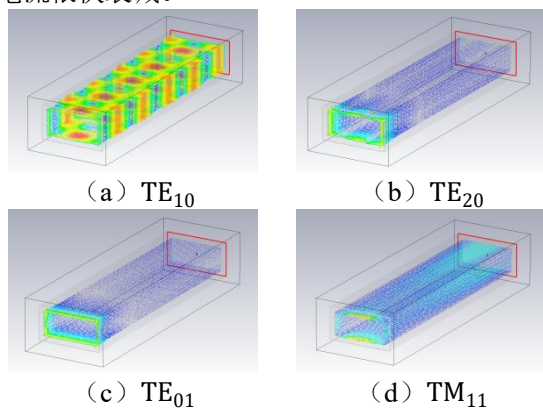


图 4 10GHz 下不同模式的表面电流

在 15GHz 下导通的模式有 TE_{10} 、 TE_{20} 和 TE_{01} ，四种模式的电场分布如图 5 所示。仅有 TM_{11} 模式表现出截止状态。

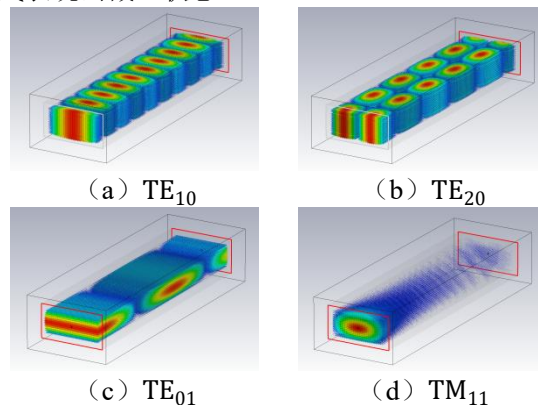


图 5 15GHz 下不同模式的导通状态

在 15GHz 下四种模式的表面电流分布如图 6 所示， TM_{11} 模式在端口激励后表面电流很快衰减。

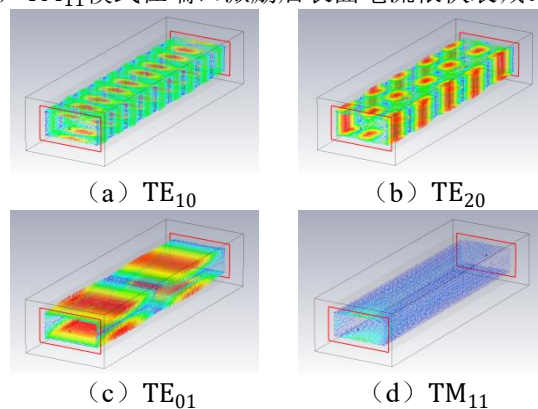


图 6 15GHz 下不同模式的表面电流

在 20GHz 下四种模式全部导通，其电场分布如图 7 所示。

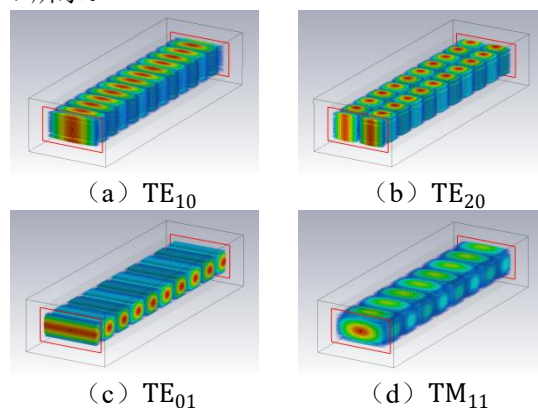
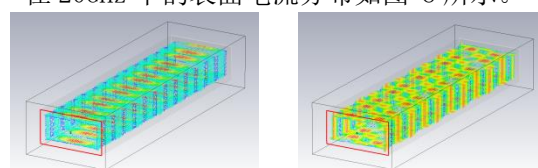


图 7 20GHz 下不同模式的导通状态

在 20GHz 下的表面电流分布如图 8 所示。



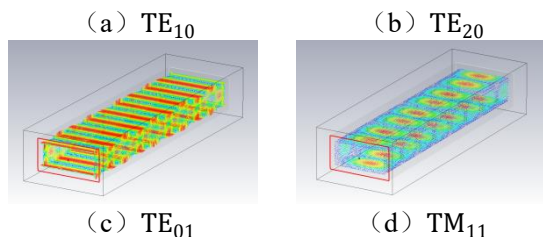


图 8 20GHz 下不同模式的表面电流

通过以上直观的观察很容易理解“高通低不通”的矩形波导特点，当频率升高，波长变短，高次的模式更容易“挤”过固定的单导通金属壁。

3.3 矩形波导的应用

在向学生在 CST 中展示矩形波导内不同频率下的场分布、表面电流和导通状态后，可进一步介绍矩形波导的应用，起到延伸与拓展作用。例如矩形波导喇叭主要用于将波导中的电磁波有效地辐射到自由空间，或者将自由空间中的信号引入波导，如图 9 所示。它的设计形状通常是渐开式或锥形，通过调整尺寸可以控制波束的宽度和增益，广泛应用于雷达系统、卫星通信和射频实验室。从图 9 可以明显的看到电磁波由导行波逐步转换为自由空间波的过程，这个展示的过程可以让学生对波动的概念有更为深刻的理解。

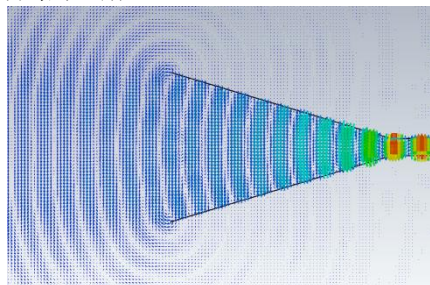


图 9 矩形波导喇叭电场分布

4 结语

通过结合多媒体和全波仿真软件（CST），提出

了一种创新的微波技术教学方法，以矩形波导模式学习为例，展示了如何通过现代化的教学手段提升学生对微波技术的理解和学习兴趣。传统的微波技术教学往往面临理论抽象、实践机会有限等挑战，而多媒体和仿真技术的引入为解决这一问题提供了新思路。通过课程大作业学生的选题比例和实际完成情况表明，通过多媒体和全波仿真软件相结合的方式，学生都能够理解和运用波导模式开展初步的仿真和实践工作。

未来，微波技术教学应继续追求理论与实践的深度融合，不断创新教学方法，引入更先进的仿真技术和多媒体手段。通过这种方式，我们可以培养出更加具有工程创新能力和实践技能的电子信息工程人才，为推动微波技术的发展和贡献力量。

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(03): 32-34+38.
- [2] 范美端, 张建秀, 于晶, 等. 电磁场微波技术与天线课程的教学实践[J]. 电子技术, 2024, 53(09): 72-74.
- [3] 陈麟, 黄俐皓, 庄松林. 电磁场与微波课程“TAKES”教学方法的研究[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(07): 169-175.
- [4] 傅世强, 付嘉琪, 李婵娟, 等. 微波传输线虚拟仿真教学辅助工具设计与实践[J]. 工业和信息化教育, 2024, (08): 65-69+90.
- [5] 全绍辉. 微波技术基础[M]. 高等教育出版社, 2011.

作者简介：王正鹏，1981 年 10 月生，男，汉族，山东青岛人，博士，副教授。研究方向为天线设计，现工作于北京航空航天大学微波工程实验室。