

# 电动力学课程的 MATLAB 辅助教学探索与实践\*

贺梦冬 陈葛锐 刘凌虹 李建波 李泽军 彭小芳 张宁

(中南林业科技大学理学院 湖南长沙 410004)

(收稿日期:2020-06-16)

**摘要:**为解决电动力学课程由于概念深奥抽象、公式推导繁杂和电磁相互作用复杂等原因而普遍存在教学效率低下的问题,我们围绕 Matlab 辅助教学与传统课堂教学有机结合进行了探索与实践.借助 Matlab 数值计算能力,检验和验证公式;发挥 Matlab 绘图和动画功能,可视化与模拟仿真电磁场;依托 Matlab 编程计算优势,引入学科前沿知识,引导学生探究性学习.实践结果表明,Matlab 辅助教学能有效激发学生学习兴趣,培养其自主学习与创新能力,提高课堂教学效果.

**关键词:**电动力学 Matlab 辅助教学 可视化 模拟仿真

## 1 引言

电动力学既是物理类专业必修的一门支柱性课程,也是电子类、电气类专业的一门重要学科基础课.该课程运用的分析与综合、归纳与演绎、比较与类比等思维方法,对学生学科知识体系的建立、思维能力的提升以及探索精神与创新能力的培养发挥着极其重要的作用.然而,电动力学涉及高等数学、数学物理方法、电磁学等课程知识,具有概念深奥抽象、理论性强、公式推演繁多等特征,是一门典型的难教、难学的理论性课程.“课堂上似懂非懂,课后做题无从下手”是电动力学教学过程中一种比较普遍的现象<sup>[1]</sup>.近年来,人们在教学内容、方法、手段以及课程考核方式等方面进行了一些改革与探索.通过运用信息技术手段、开展多元化的教学模式、重构知识体系、分层教学等多种举措,提高学生的学习兴趣,进而达到改善课堂教学效果的目的<sup>[2~5]</sup>.但从目前课堂教学的实际情况来看,依然存在着教学效率低下的问题.

Matlab 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件.作为一款集科学计算、控制设计、信号处理

与通讯、图像处理、动态仿真等功能于一体的交互式程序仿真开发工具,Matlab 具有计算能力强、绘图功能强、模块工具丰富等优点<sup>[6]</sup>,为电动力学教学改革提供了新的平台与契机.通过 Matlab 软件编程计算,可以在实现复杂微积分高效率、高精度数值计算的同时,能以可视化手段逻辑地将物理概念、公式及规律展现在我们面前,有助于学生获得感性认识,发展其观察力和形象思维,并为形成正确而深刻的理性认识奠定基础.近年,我们把 Matlab 软件工具引进课堂教学,并围绕 Matlab 辅助教学与课堂教学有机结合进行了一系列的探索和实践.

## 2 借助 Matlab 数值计算能力 检验和验证公式

面对电动力学中繁杂冗长的公式,学生难以理解与接受的同时,甚至还心存质疑.此时,不妨为学生创造主体参与的教学环境,使学生通过动手、动脑的活动,学习知识,发展能力以及体验成功.例如,与学生一道检测电偶极子与电四极子远处激发势的近似表达式.仅从表达式,我们是无法估计其可靠性与精确度的.借助 Matlab 软件,可解决该问题.首先,建立坐标系,电偶极子与电四极子系统沿直角坐标

\* 湖南省教育厅教改项目,项目编号:2019-291-354

作者简介:贺梦冬(1972-),男,博士,教授,研究方向为大学物理课程与教学研究以及表面等离激元光学.

系  $z$  轴放置(系统中心为坐标原点, 偶极子系统正、负电荷之间的距离设置为 3 个单位长度, 电四极子系统负、正电荷距坐标原点的距离分别设置为 1 个和 2 个单位长度). 然后, 根据激发势的解析式, 利用 Matlab 编写 M 文件, 数值求解电偶极子与电四极子产生的势(近似值). 与此同时, 采用点电荷系的电势公式计算空间场点位置的电势(实际值). 最后, 运行 M 文件, 对比近似值与实际值. 结果显示, 利用上述近似公式计算  $z$  轴上距离偶极子(电四极子) 中心 6.30 与 90 个单位长度处的电势所产生的相对误差分别为 2.78%(13.6%)、0.11%(0.56%) 以及 0.012%(0.062%), 电四极子与电偶极子在上述 3 个场点处的电势比值分别为 56.3%, 10.0% 和 3.3%. 若场点不在  $z$  轴上, 同样可求得两系统激发势及其误差. 上述数据表明, 电偶极子与电四极子系统在远处的激发势近似公式是有效的. 学生经历建模、编程、程序运行、检验与验证等过程, 在加深对近似公式理解的同时, 还会对电荷体系多极展开式产生兴趣. 由此, 鼓励学生去实践验证教材中其他重要的解析式, 如通电直导线周围的磁感应强度公式、电偶极辐射场公式等.

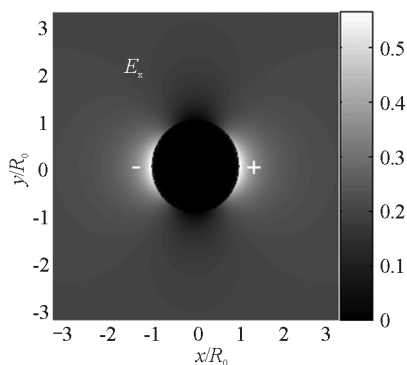
上述途径可以帮助学生从烦琐的演算中解放出来, 把注意力放在物理概念与规律的理解上. 学生在操作中体验成功的喜悦, 增强了学习自信心, 破除了上课单调、枯燥乏味、公式深奥难懂等消极畏难情绪. 有了学生的参与, 课堂不再沉闷, 学生学习的热情得以激发, 师生、生生之间的互动频次大幅提高, 学生推导公式、建模与编程能力得到提升. 近 3 年, 每位学生都参与了公式推导、方程求解、建模及编程的过程, 整合学生自编 Matlab 程序达到 60 余个. 有 3 位学生选择教材公式与方程的数值求解作为毕业论文的主要内容, 其中获校优秀毕业论文 1 篇. 3 位学生在物理与数学建模竞赛中获省级以上奖励.

### 3 基于 Matlab 绘图与动画功能 实现电磁场的可视化与仿真模拟

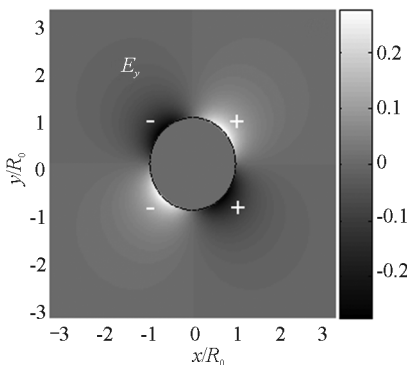
基于 Matlab 的电磁场可视化与仿真模拟能够

直观、形象地为学生提供感性材料, 丰富学生的直接经验, 从而缩小理论与实际的差距. 电磁场的可视化使学生不会觉得概念、公式与规律枯燥无味、无用, 往往会驱动他们去追根溯源. 下面以导体球置于均匀外电场中为例予以说明.

基于导体球泊松方程的电势解以及表面自由电荷面密度解析式, 我们采用 Matlab 软件绘制了导体球附近的电场图(图 1, 外电场沿  $x$  轴的正方向). 图 1(a) 为电场分量  $E_x$  的分布图, 其电场分布具有左右对称性, 导体球左右两端处的场强最大. 根据电磁场边值关系式  $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma$ , 可推断导体球左、右表面分别分布有负感应电荷和正感应电荷, 而且左右端电荷面密度最大. 可用同样的方法分析电场分量  $E_y$  分布图[图 1(b)]. 综合图 1(a) 与图 1(b), 可得出结论: 球左右两端处的电荷密度最大, 偏离两端越远的球面处的电荷密度越小, 球上下两端处无电荷分布. 导体球附近总电场  $E$  的分布如图 1(c) 所示, 球内部场强处处为零, 球表面左右两端电场分布最强.



(a) 电场分量  $E_x$  分布图



(b) 电场分量  $E_y$  分布图

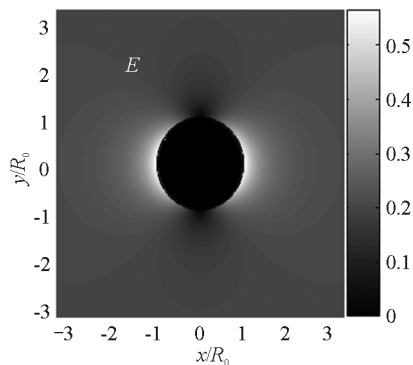
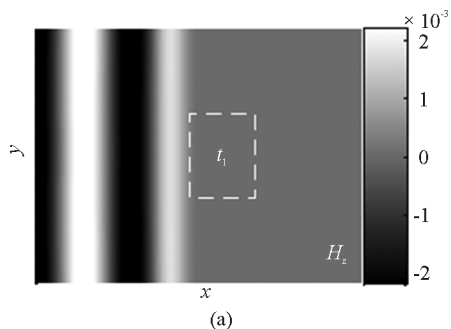
(c) 导体球附近总电场 $E$ 分布图

图1 置于均匀外电场中的导体球附近的电场分布图

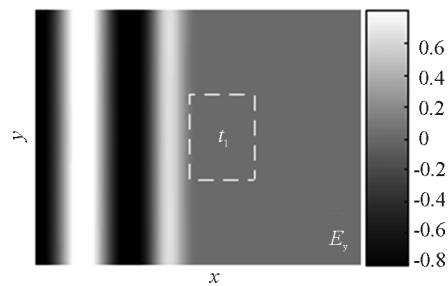
麦克斯韦方程组是电动力学的核心内容之一. 学生学习时既要弄清楚矢量与微积分运算的数学意义, 更要弄清楚电磁运动规律. 基于时域有限差分法的基本思想, 将麦克斯韦方程组转换成离散的差分形式, 然后利用 Matlab 软件平台编译成相应程序, 可以实时观测电磁场的变化过程. 图 2 描绘了不同时刻金属颗粒与平面电磁波相互作用的情况(电磁波沿  $x$  轴正方向传播).

图 2(a) 与图 2(b) 分别为平面波接触颗粒前磁场  $H_z$  与电场  $E_y$  分量的瞬时分布图. 通过图像可引导学生观察如下特征: 磁场  $H_z$  与电场  $E_y$  同相位、相互垂直, 且都与传输方向垂直; 磁场  $H_z$  与电场  $E_y$  相差两个数量级. 随着时间的后推, 如图 2(c) 所示, 电磁波被金属颗粒散射, 由于电磁波与金属颗粒复杂作用, 颗粒附近电场  $E_y$  的分布不再具有平面波特征了. 再经过一段时间, 如图 2(d) 所示, 电磁波绕过金属颗粒继续传播, 这就是我们常说的光的衍射现象.

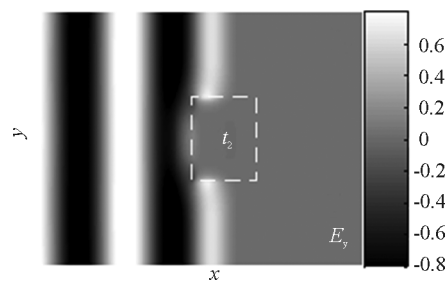
就物理本身而言, 图像与动画不仅是一种重要的物理语言, 还是一种重要的物理方法<sup>[7]</sup>, 它们与文字、公式等相互转化、相互支撑、相互补充. 图像与动画能有逻辑地把物理概念、规律全面、生动地展现在学生面前. 它们较文字、公式更直观、形象. 富有真实感、启发性的图片和动画能吸引学生的注意力, 这种直观的知识呈现方式将在一定程度上帮助学生在对物理知识有清晰认识的情况下, 较为轻松地掌握相关概念及规律<sup>[8]</sup>, 有助于培养学生的观察能力、调动学生积极思维与激发学生的学习兴趣.



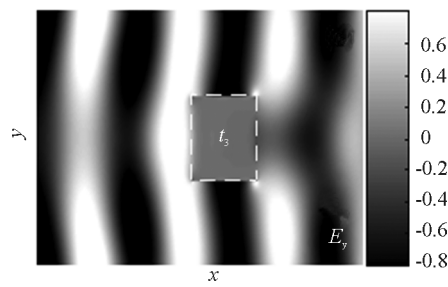
(a)



(b)



(c)



(d)

图2 金属颗粒与平面电磁波相互作用下的电磁场瞬时分布图

#### 4 依托 Matlab 编程计算优势 引入学科前沿知识 组织学生探究性学习

电动力学是一门应用非常广泛并且与学科前沿研究密切联系的课程. 而现有教材内容与前沿热点课题存在一定的距离, 若一味地给学生强调书本知识, 势必影响学生学习兴趣与动力. 因此, 经常给学生介绍学科前沿与发展动态(如光学异常透射现象、

电磁超材料、光子晶体、超导磁悬浮、巨磁电阻效应等),将最新科学发现和研究成果引入课堂,可以使 学生明晰电动力学中的电磁场理论是相关前沿研究领域所必备的基础知识,由此调动学生学习的积极性和热情.图 3(a) 是光学异常透射现象的 Matlab 仿真图.研究人员发现对于某些特定入射波长,亚波长金属孔(尺寸小于入射波长)的光透过率远高于传统孔径理论给出的数值.主要参数如下:入射波长为 870 nm,矩形金属孔(材质为金)的尺寸为  $300 \times 240 \text{ nm}^2$ ,孔的深度为 120 nm.这种光学异常透射现象在纳米光源、成像、光刻等方面有着潜在的应用价值.第二个案例为超表面实现聚焦的二维 Matlab 电磁仿真,如图 3(b) 所示.在金属表面构建阵列微纳结构(即超表面),通过单元结构的渐变或指向角空间变化可在超表面上形成相位梯度,原有的斯涅耳定律(即折射定律)需要修订,从而可实现对光传输方向的任意操控.纳米聚焦成像只是超表面主要应用领域之一.

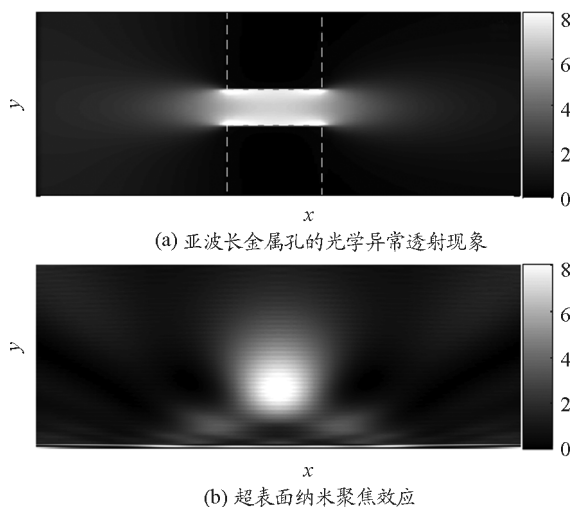


图 3 Matlab 在学科前沿中的应用

学科前沿动态与最新研究成果在开阔学生视野的同时,必将激发学生的好奇心.结合实际,我们可以借机提供多个研究性课题或课程论文题目,供学生自主选择,然后,组织、引导学生开展探究性学习,培养其探索精神与创新能力.基于探究性学习,我们进一步引导学生开展科研创新活动.近 3 年,学生发表科研论文 2 篇,申请发明专利 4 项,获批国家级与省级大学生创新创业项目各 1 项.

## 5 结束语

针对电动力学具有的概念抽象、理论性强、公式冗长、计算繁琐等课程特点,本文提出利用 Matlab 软件进行辅助教学的教改思路.充分发挥 Matlab 数值计算能力,检验和验证公式;基于 Matlab 绘图与功能,可视化和仿真模拟电磁场;借助 Matlab 编程计算优势,引导学生探究性学习. Matlab 能化抽象为具体,为学生提供直观形象的教学素材,有益于加深对理论知识的认知,帮助学生跨越理解和想象的障碍.多年教学实践表明, Matlab 辅助教学与传统理论教学的有机融合,使学生能够深入理解电磁场的基本属性、电磁场的运动规律及其与物体相互作用的物理过程,可激发学生对课程的学习兴趣,能有效增强学生自主学习的能力,提高课堂教学效果.在教学探索与实践过程中,学生取得了不菲的成绩,课堂同行评价与学生评价的得分逐年上升.当然,我们的工作仍有许多地方需要改进,还有许多工作需要进一步提高和完善.例如,利用 Matlab 的 GUI 功能建设一套内容丰富、交互性强的辅助教学系统, Matlab 辅助教学手段与分层教学、线上教学模式的有机融合.

## 参考文献

- 1 刘发民,陈强,林敬与.电动力学教学改革与实践[J].物理,2004(10):771~774
- 2 赵晓云.电动力学课程教学方式设置的探讨[J].洛阳师范学院学报,2014,33(05):56~58
- 3 胡要花,韩运侠,姚丽萍.电动力学教学中调动学生积极性的对策研究[J].教育教学论坛,2018(51):189~191
- 4 刘倩,李彩霞,郑国旭,等.基于主动学习法的《电磁学与电动力学》教学方法改革研究[J].物理通报,2018(09):11~13
- 5 郭芳侠,刘琦,李贵安,等.基于核心素养的“电动力学”翻转课堂教学效果的实证研究[J].物理与工程,2019,29(03):105~112
- 6 王晓华,羊帆,陈湘芸. Matlab 在《电磁场与电磁波》教学中的应用研究[J].教育现代化,2019,6(87):215~216
- 7 袁丽.中学物理课程中数学知识的支持性研究[D].重庆:西南大学,2009
- 8 李佳伟,王婕,张中月,等. MATLAB 在电动力学教学中的应用研究[J].物理通报,2017(06):15~19