

COMSOL Multiphysics 仿真软件在 PT 教学中的应用

宋清卿¹ 王晓杰^{1,2}

(南开大学¹物理科学学院; ²基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071)

摘要 PT(Physicists' Tournament)作为一种启发学生物理思维、锻炼学生动手能力、培养专业素养的创新型赛事类物理科研活动,越来越多的学生在参与过程中选择使用仿真软件作为辅助工具进行模拟计算,以完成较为复杂的开放性研究问题。由于 PT 实验探究具有局限性,利用软件仿真能够突破苛刻的实验条件和复杂的操作过程等限制,将实验现象转变为可视的数据结果,既是对传统实验的拓展,又能继续指导实验的开展。相比于其他软件,COMSOL Multiphysics 具有易于上手、可视性强、计算功能强大等特点,对于本科学生而言具有独特的使用优势。本文从三道具有代表性的不同类型 PT 赛题入手,利用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真模拟,发现其具有将抽象结果可视化、弥补实际实验不足、增强探究性等应用价值。本文的研究结果为基于 COMSOL Multiphysics 软件开展 PT 问题分析与探究和培养学生创新能力提供了有益的借鉴。

关键词 PT; 实验探究; COMSOL Multiphysics; 模拟仿真; 能力培养

APPLICATION OF COMSOL MULTIPHYSICS SIMULATION SOFTWARE IN PHYSICISTS' TOURNAMENT TEACHING

SONG Qingqing¹ WANG Xiaojie^{1,2}

(¹ School of Physics; ² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract PT (Physicists' Tournament) is an innovative physical research activity that inspires students' physical thinking, exercises their practical ability and cultivates their professional quality. More and more students choose to use simulation software as an auxiliary tool for simulation calculation in the process of participation to complete relatively complex open research problems. Although PT experiment exploration has limitations, software simulation can break through the limitations of harsh experimental conditions and complex operation processes, and transform experimental phenomena into visual data results. It is not only an expansion of traditional experiments, but also continues to guide the development of experiments. Compared with other software, COMSOL Multiphysics has the characteristics of easy to use, strong visibility and powerful computing function, which has unique advantages for

收稿日期: 2023-07-13

基金项目: 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会课题(DJZW202310hb, WX202206); 教育部产学合作协同育人项目(220905259141912), 南开大学本科教改项目(NKJG2023048, 22NKSYPK05)。

通讯作者: 王晓杰, 男, 助理研究员, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为非线性光学, wxj@nankai.edu.cn。

引文格式: 宋清卿, 王晓杰. COMSOL Multiphysics 仿真软件在 PT 教学中的应用[J]. 物理与工程, 2023, 33(6): 38-47.

Cite this article: SONG Q Q, WANG X J. Application of COMSOL Multiphysics simulation software in Physicists' Tournament teaching [J]. Physics and Engineering, 2023, 33(6): 38-47. (in Chinese)

undergraduate students. Therefore, this paper uses COMSOL Multiphysics software to simulate three representative different types of PT competition problems. It is found that it has the application value of visualization of abstract results, making up for the lack of actual experiments, and enhancing inquiry. The research results of this thesis provide a useful reference for analyzing and exploring PT problems based on COMSOL Multiphysics software and cultivating students' innovative ability.

Key words PT; experimental exploration; COMSOL Multiphysics; simulation; ability training

信息技术的进步和计算机模拟仿真技术的飞速发展,使得仿真软件在教学中的应用逐渐凸显^[1-4]。常用的仿真软件有 Matlab、Mathematica、COMSOL Multiphysics、ANSYS 等通用数值软件和专用仿真软件。这些软件一般是以物理理论为基础,数值化后在计算机系统中经过建模和运算后得到结果,能够直观地展现出具体的物理图像。其教学使用目的也不尽相同,可以作为求解工具解析复杂的数学方程并绘制曲线,帮助学生攻克课程难点;也可以对抽象的物理现象或不易开展的物理实验进行直观演示,通过将文字内容转变为图像的可视化过程使学生更容易理解教学内容,课堂效率更高。

以电磁学课程为例,电磁学的内容以基本概念和公式为主,由于内容抽象,讲授时通常需要画出各物理量在场中的分布图来辅助理解;此外,电磁波部分的物理推导大多基于麦克斯韦方程组展开,且部分数学计算较为复杂,学习难度大。利用 Matlab、COMSOL Multiphysics 等软件进行仿真,能够实现对带电粒子在电磁场中的运动和电磁波在介质中传播现象的模拟^[1-2],给出介质波导内电磁波的模式^[3],绘制自由电荷、带电导体在静电场中的电场和电势分布图^[4],从而将抽象的概念形象化,帮助学生掌握电磁场分布与电磁波传播的规律。总体而言,将仿真软件逐步引入物理教学,在实践中已经取得了不错的教学效果。其应用意义主要有物理现象可视化、提高实验探究性和弥补实验条件不足等优势。

自 2010 年第一届中国大学生物理学术竞赛 (China Undergraduate Physics Tournament, 简称 CUPT) 在南开大学举办以来,PT 系列竞赛在中国已有十多年的历史,并且覆盖范围广、形式多样^[5]。由于其具有区别于传统竞赛的新颖模式和有利于培养学生创新思维和科研兴趣的优势,目

前已受到广泛关注,被各高校引入物理实验教学中。PT 的题目一般由赛事组委会严格筛选,取材简单,确保学生都能够使用身边的器材设计和开展实验;难度适宜,即使是中学生也可以结合所学知识对其中的物理原理进行探究^[6]。PT 每道题目都具有极大的开放性和丰富的内容,基本涵盖了力、热、声、光、电等物理学各个领域,学生们在解题过程中不仅需要整合以往学到的知识进行运算,还需要花费一些时间和精力学习新的知识点、分析影响因素和设计实验方案,完成自主研究探索^[7]。PT 赛题的开放性促使学生在研究过程中主动学习并使用各种仿真模拟软件建立模型,通过分析近几年 PT 比赛的相关资料和论文,可以看到不同赛题中均有运用各种仿真模拟软件的实例^[8-9]。

COMSOL Multiphysics 作为一款基于有限元法开发的多物理场仿真软件,可以从描述不同物理场初始条件和边界条件的偏微分方程(组)出发,利用有限元分析进行数值模拟,通过高精度的计算实现对物理现象的仿真。它能够在同一个界面下、使用同一套操作逻辑解决不同物理场的仿真问题,非常适合初学者以此为辅助工具求解 PT 题目这种涉及多物理场的问题。COMSOL Multiphysics 计算精度高,可以自行划分网格大小和选择求解器,给予使用者很高的操作自由度;功能强大,可以通过后处理功能实现物理问题的可视化,以动态与静态相结合的方式,将不同维度的物理图像清晰地展示在使用者眼前^[4]。以此为工具辅助解题,其结果可以指导实际实验的开展,有助于学生理解其中的物理规律,提高教学效果。

为了进一步梳理 COMSOL Multiphysics 仿真软件在 PT 教学中的应用价值,本文结合三道典型的 PT 题目,研究 COMSOL Multiphysics 仿真软件对实验教学的促进作用和对能力的培养

养,为基于仿真软件探究 PT 问题提供教学指导。

1 案例 1 不起眼的瓶子

2020 年 IYPT 第二题“不起眼的瓶子”^[10]: Put a lit candle behind a bottle. If you blow on the bottle from the opposite side, the candle may go out, as if the bottle was not there at all. Explain the phenomenon. 翻译为:把一根点燃的蜡烛放在瓶子后面,如果你从另一面向瓶子吹气,蜡烛可能会熄灭,就好像瓶子根本不存在那里一样,解释这种现象。本实验需要探究的关键因素是瓶子后方流场的速度分布,但在实际中我们无法观察到气流的状态。由于蜡烛熄灭较快,各位置的速度大小也难以在瞬间进行测量。因此,本文利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行圆柱绕流模型建模仿真并分析蜡烛熄灭的影响因素。

1.1 理论模型

当忽略蜡烛和火焰对流体产生的影响的时候,题目所描述的物理现象可以被抽象成“圆柱绕流”模型;理想流体以均匀来流的方式绕圆柱体流动。对此模型的一种定性解释是康达效应:当流体流经凸出物体时,它倾向于偏离原来的流动方向而沿着物体表面流动。只要流体在流动时与物体表面存在表面摩擦(或者称之为流体粘性),且物体的曲率不大,流体就会由于流速减缓而被吸附在物体的表面上流动。

在二维圆柱绕流现象中,对圆柱后尾流形态起决定性作用的影响因素是雷诺数 Re 。这是流体力学中的一个无量纲数,用来表征流体的流动情况,其计算公式为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

其中, ρ 是流体的密度, v 是流体的速度, μ 是流体的粘度, d 是物体的特征长度。

根据雷诺数的定义式,猜想影响圆柱后尾流形态的因素分别有气流速度、瓶子直径、障碍物形状、蜡烛与瓶子的距离等。在仿真中发现,基于实际情况改变温度,从而使得空气密度和动力粘度不同的一组模拟结果差别极小,故这两个因素不作考虑。

1.2 COMSOL Multiphysics 仿真结果

为了简化计算,将空气域设置为长 15cm、宽

5cm 的长方形。不同来流速度和圆柱直径下气流速度场分布如图 1 和图 2 所示。可以看到,当来流速度增加或是圆柱直径减小时,从圆柱两侧分离的气流由在后方汇合的稳定形态,逐渐过渡到形成旋涡并交替脱落的剧烈变化的形态,形成卡门涡街现象。气流的速度场变化更加剧烈,速度较小的气流区域面积随之减小,因此当蜡烛被摆放在圆柱后固定位置时更容易熄灭。

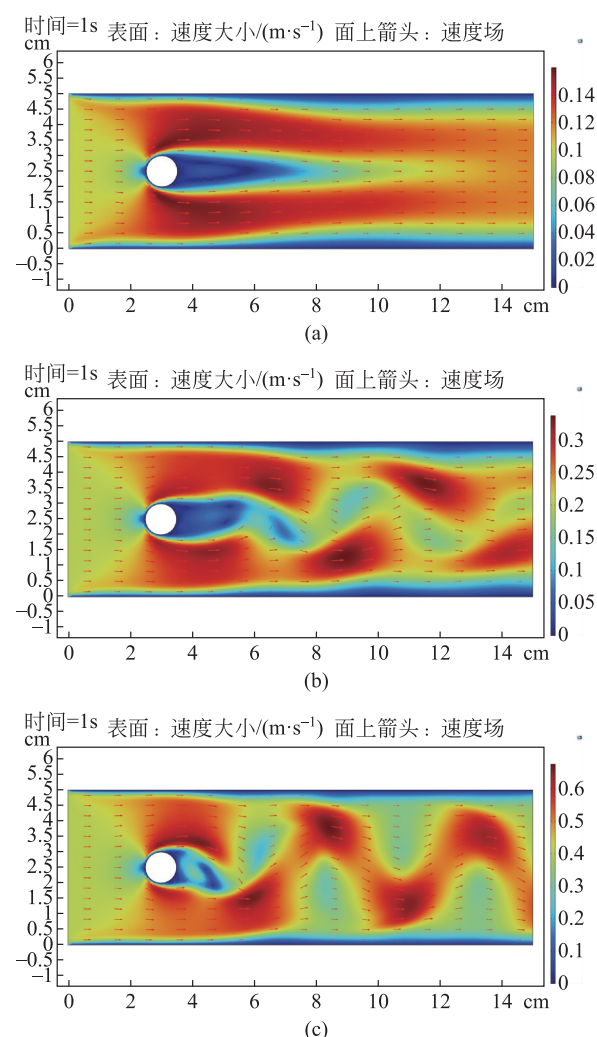


图 1 来流速度 v 不同时气流速度场分布
(a)~(c) 来流速度 v 分别为 0.1m/s、0.2m/s、0.4m/s, 圆柱直径 $d=1\text{cm}$

由图 1(b)可以看出,圆柱后方形成一个旋涡,气流方向朝向圆柱,与来流速度方向相反,据此推测在实际实验中蜡烛熄灭之前其火焰可能会偏向瓶子这边。

若障碍物的形状为平板,气流速度场分布如图 3 所示。此时仍有一定的康达效应存在,同样

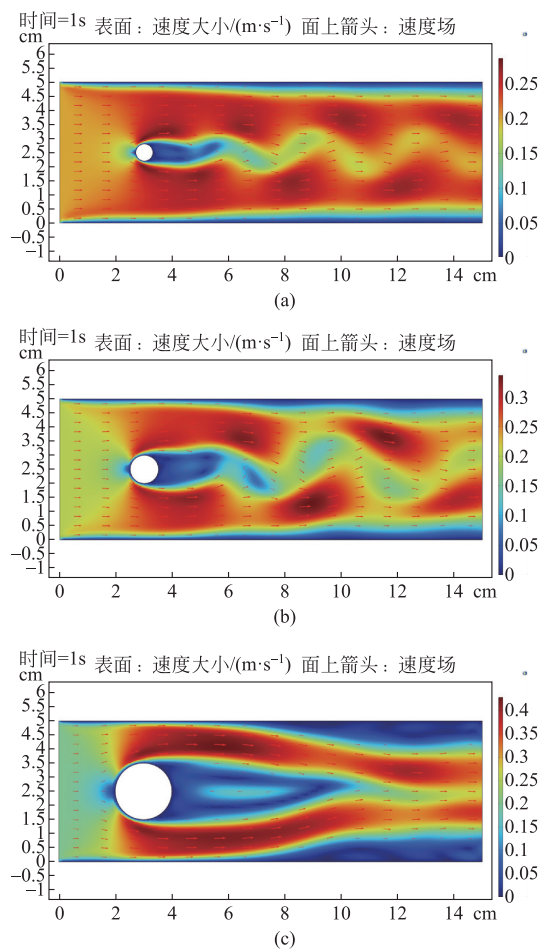


图2 圆柱直径 d 不同时气流速度场分布

(a)~(c) 圆柱直径 d 分别为 0.6cm、1cm、2cm, 来流速度 $v=0.2\text{m/s}$

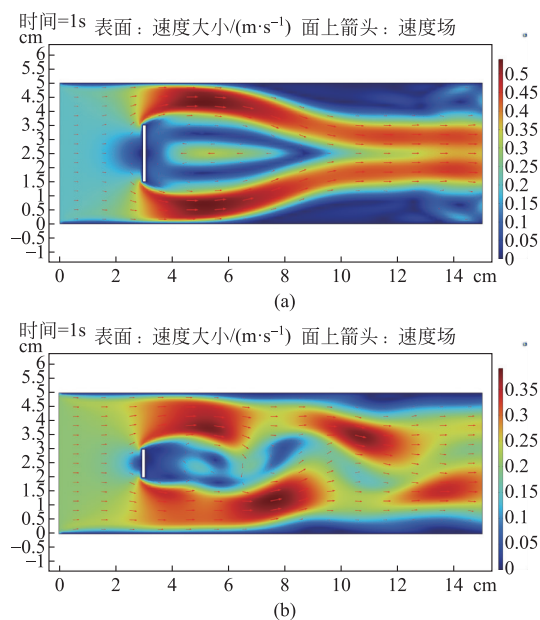


图3 平板宽度 L 不同时气流速度场分布

(a)和(b)平板宽度 L 分别为 2cm 和 1cm, 来流速度 $v=0.2\text{m/s}$

满足平板尺寸越小尾流现象越明显的特性;与圆柱相比,在平板后一定距离内气流受阻碍较大,若蜡烛放在平板后将更难熄灭。

从上面的研究中可以看出,相比于实际实验中只能靠相机记录下蜡烛火焰熄灭的过程,仿真结果能够化抽象为具体,将流体的速度和方向等数据信息可视化,将结果更加直观、形象地展现在学生眼前。此外,流场一般难以观察,使用仿真模拟可以使肉眼不可见的气流传播过程变得更加生动形象。将仿真结果和具体实验相结合,能够帮助学生更好地理解物理现象及其成因,如蜡烛在熄灭之前火焰为何偏向瓶子这边。此外,软件强大的计算功能可以对复杂方程进行精确的数值求解,简化了数学运算过程,方便学生开展研究。

2 案例2 光须

2021年IYPT第九题“光须”(Light Whiskers)^[11]:When a laser beam enters a soap film at a small angle, a rapidly changing pattern of thin, branching light tracks may appear inside the film. Explain and investigate this phenomenon. 翻译为:当一束激光以小角度照射肥皂膜时,薄膜内部可能出现由细的、分叉的光轨迹构成的快速变化的图案。解释并探究此现象。本实验在实际开展中存在许多问题,如:肥皂膜容易破碎,无法长时间保持完整,不利于实验观察,且破裂后需重新调整光路,加大了工作量;实验中的某些微小变量难以控制,等等。因此,可以采用COMSOL Multiphysics仿真软件对该现象进行仿真模拟,探讨激光在肥皂膜中产生分支现象的影响因素,用于指导后续实验展开。

2.1 理论模型

光分支流的形成,是由于传播介质的折射率分布无序且随机。对于肥皂膜而言,其厚度一般在5nm至几个微米之间随机变化^[12],与激光的波长处于同一个数量级,而膜上各点折射率也随之变化,使得光在传播过程中发生偏折并产生分支;同时由于肥皂膜内水分子的流动,各处的厚度也在随时间不停变化,导致光分支随机快速变化。此外,当膜厚大约等于光波长的一到两倍时,折射率变化较大,实验现象更明显。

肥皂膜可以被抽象成一个如图4所示的三维

模型,其内部和外部的折射率分别等于肥皂液和空气的折射率,即

$$n(y) = \begin{cases} n_0, & y > d \\ n, & 0 \leq y \leq d \\ n_0, & y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

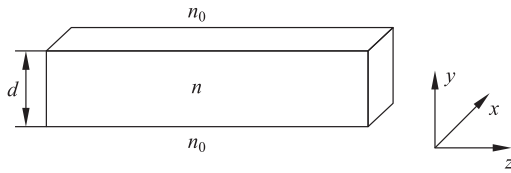


图4 肥皂膜模型^[12]

光作为一种电磁波,在肥皂膜中传播时满足 Helmholtz 方程^[12]

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2(y) E = 0 \quad (3)$$

对方程的解进行分离变量: $E = \varphi(x, z)G(y)$, 代入式(3)后得到

$$\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + k_0^2 n^2(y) G = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 G \quad (4)$$

$$\nabla^2 \varphi + k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \varphi = 0 \quad (5)$$

其中, $n_{\text{eff}}(x, z)$ 是膜的等效折射率,与 x 和 z 坐标有关。

解式(4)得到

$$G(y) = E_0 \cos(ky + \varphi) \quad (6)$$

其中, $k^2 = k_0^2 (n^2 - n_{\text{eff}}^2)$ 。

引入平均折射率,使得式(5)变为如下形式

$$-\nabla_{\perp}^2 \varphi + k_0^2 (\overline{n^2} - n_{\text{eff}}^2) \varphi = k_0^2 \overline{n^2} \varphi \quad (7)$$

当考虑光沿 z 方向入射薄膜时,可以认为式(7)有行波解

$$\varphi(x, z) = \bar{\varphi}(x, z) \exp(-ik_0 \bar{n} z) \quad (8)$$

将式(8)代入方程,忽略高阶小量 $\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2}$,可以得到

$$i \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} = \frac{1}{2k_0 \bar{n}} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial x^2} + \frac{k_0}{2\bar{n}} (\overline{n_{\text{eff}}^2} - \bar{n}^2) \bar{\varphi} \quad (9)$$

因此,给出光入射处的电场分布 $\varphi(x, z=0)$ 和等效折射率的分布 $n_{\text{eff}}(x, z)$ 后,可以通过式(9)求出空间各处电场分布 $|\bar{\varphi}(x, z)|^2$ 。

在式(9)中令 $\bar{\varphi}$ 所在项的系数 $\frac{k_0}{2\bar{n}} (\overline{n_{\text{eff}}^2} - \bar{n}^2) = k$,可以初步推断有效折射率与平均折射率的相对大小和入射光的波长均会对电场分布产生影响,从而影响光分支现象。折射率的变化幅度越大、

变化越密集,入射光的波长越小,都会使式(9)中系数 k 的变化幅度更大,对电场分布解的影响就越大,光分支现象越明显^[13]。

2.2 COMSOL Multiphysics 仿真结果

不同波长下空间电场分布如图5所示。从图中可以看出入射光的波长越短,越容易观察到光分

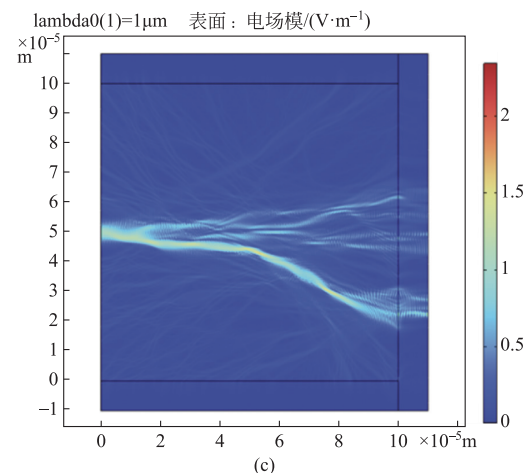
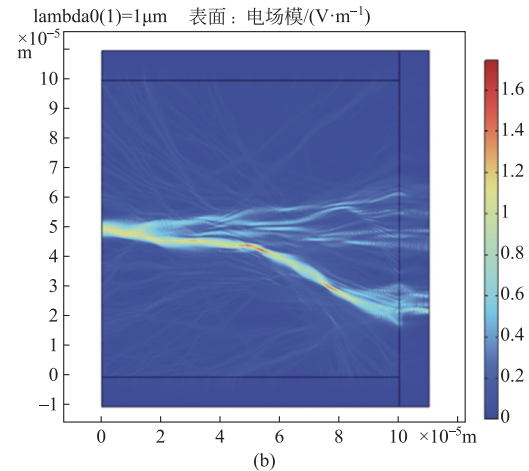
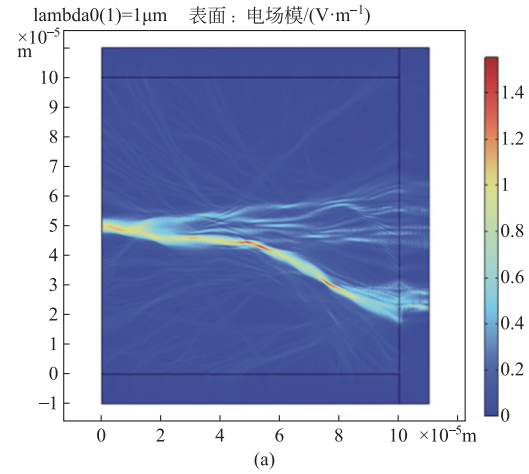


图5 不同入射光波长下空间电场分布
(a)~(c) 光波长 λ 分别为450nm、532nm、650nm,光源电场 $U=1\text{V}$

支流现象,模拟结果同理论分析结果一致。从光的波粒二象性角度来看,波长越短,则光的粒子性效应越显著,也就越容易观察到分支流现象^[13]。

不同有效折射率变化幅度和变化密集程度对光分支流现象的影响如图6和图7所示。从图中可以看出有效折射率变化幅度越大、变化越密集,入射激光的分支数越多,分支越细。且各分支角度增加,光分支流现象更加明显。在实际实验中可以通过改变肥皂水溶液浓度来改变这两个变量。即肥皂液浓度越高,其折射率越大,有效折射率的变化范围和密集程度也就越大。

光分支流的实验在实际开展中具有诸多不便。首先,在光源的选取上,低功率的激光笔目前市面上常见的只有红色和绿色两种,不利于学生改变波长条件进行多次实验。其次,肥皂膜容易碎裂,不利于实验现象的长时间观察。此外,拍摄到的照片可能无法清晰记录实验现象,影响后续分析。使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进

行仿真模拟,光源的波长和电场大小可以被设定为任意值进行反复实验,传播域由计算机模拟得到,实验环境更加稳定,弥补了实际操作之不足。此时能够观察到排除环境干扰和其他人为因素后较为理想的结果,有助于学生结合理论进行分析和探究,以及将其与实际结果对比,进行深入探究。

3 案例3 等势线

2022年 IYPT 第八题“等势线”(Equipotential Lines)^[14]: Place two electrodes into water, supply a safe voltage and use a voltmeter to determine electric potential at various locations. Investigate how the measured equipotential lines deviate from your expectations for different conditions and liquids. 翻译为:将两个电极放入水中,加一个安全的电压,然后使用电压表测定不同

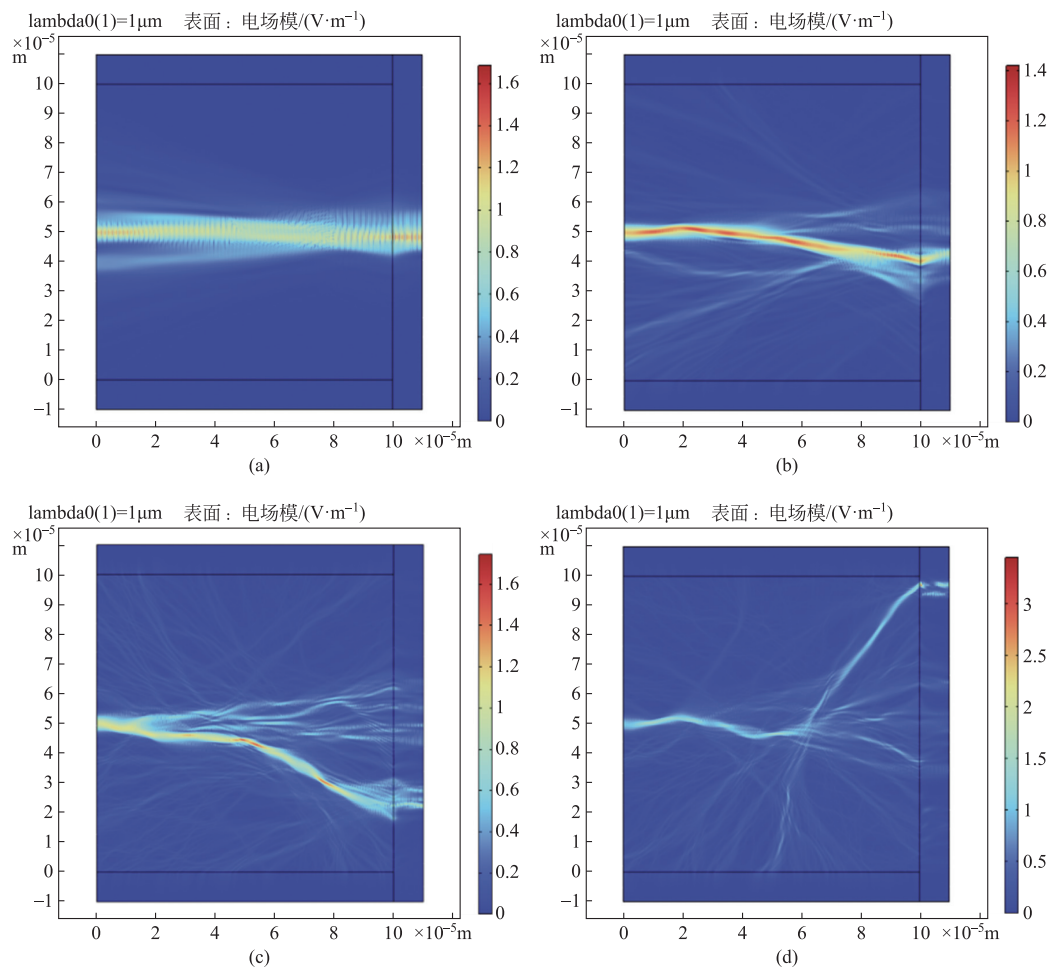


图6 折射率变化幅度对光分支流现象的影响

(a)至(d)折射率变化幅度分别为 1.28~1.32, 1.2~1.4, 1.1~1.5, 1.0~1.6, 肥皂膜的平均折射率为 1.3, 光源电场 $U=1\text{V}$, 波长 $\lambda=532\text{nm}$

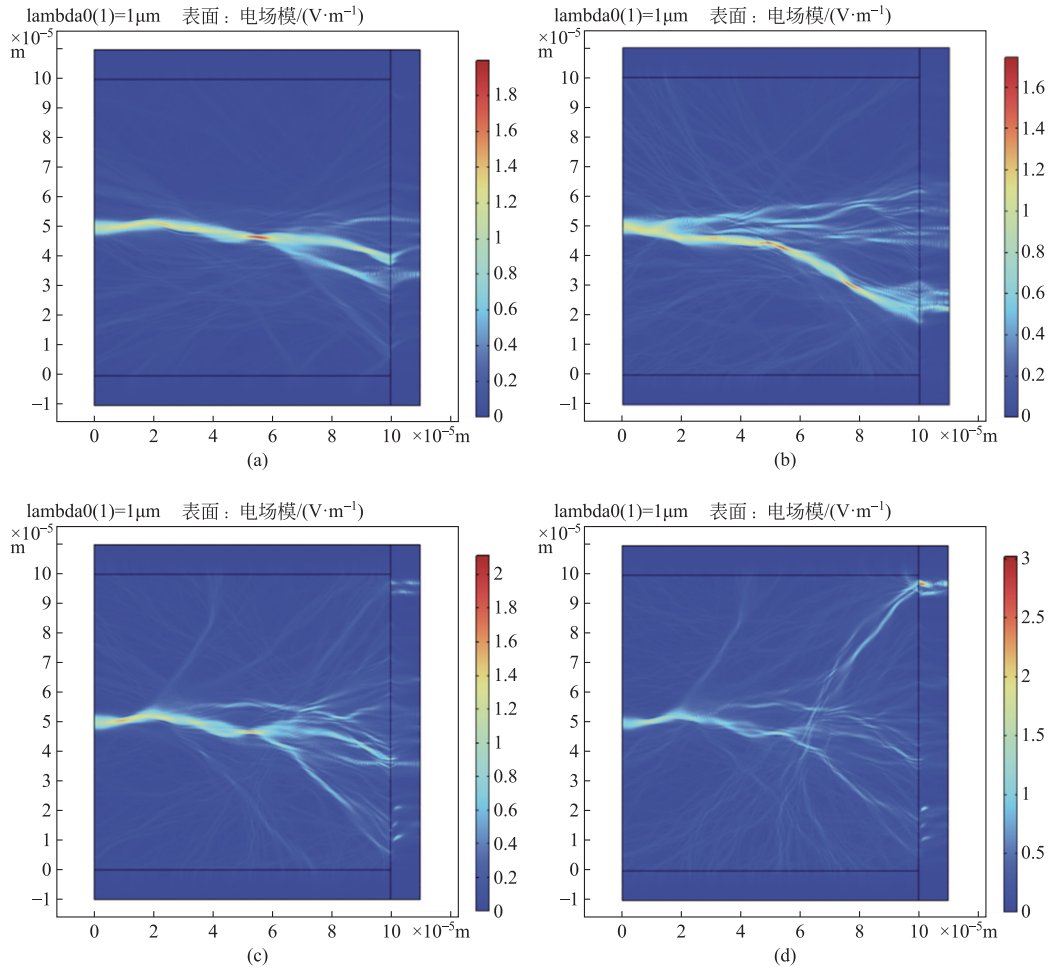


图7 折射率变化密集程度对光分支现象的影响

(a)至(d)变化密集程度依次增加,肥皂膜的平均折射率为1.3,光源电场 $U=1\text{V}$,波长 $\lambda=532\text{nm}$

位置的电势。研究测出的等势线与你在不同条件和液体情况下的期望值是如何产生偏离的。受实验器材的限制,我们无法针对所有能够考虑的因素开展控制变量实验。所以可以利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行仿真建模,通过对比改变不同条件后的模拟结果,为实际现象提供参考,并指导实验过程。

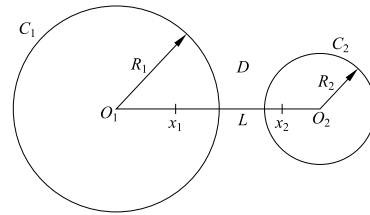
3.1 理论模型

将两个电极视为圆柱体,在水层较浅的情况下,这个模型可以简化成如图8所示的平面场问题^[15]。

电场分布满足下面的拉普拉斯方程

$$\begin{aligned} \nabla^2 V &= 0 \\ V|_{\text{边界}C_1\text{上}} &= V_1 \\ V|_{\text{边界}C_2\text{上}} &= V_2 \end{aligned} \quad (10)$$

解方程得到电势的表达式为

图8 简化电极模型^[15]

$$V(x, y) = C_0 + \frac{A_0}{2} \ln \frac{(x - x_1)^2 + y^2}{(x - x_2)^2 + y^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } C_0 &= \frac{2V_1 \operatorname{arcth} \left[\frac{(L+R_1-R_2)(L-R_1-R_2)}{(L+R_1+R_2)(L-R_1+R_2)} \right]^{1/2}}{\operatorname{arch} \left(\frac{L^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2} \right)} + \\ &\frac{2V_2 \operatorname{arcth} \left[\frac{(L+R_2-R_1)(L-R_1-R_2)}{(L+R_1+R_2)(L-R_2+R_1)} \right]^{1/2}}{\operatorname{arch} \left(\frac{L^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2} \right)}, A_0 = \end{aligned}$$

$$\frac{V_2 - V_1}{\operatorname{arch}\left(\frac{L^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2}\right)}.$$

由此可见,影响等势线分布的主要因素有电极之间的距离、电极的半径和两个电极间的电势差。在实际实验中,还需要考虑到液体的极化对等势线产生的影响。由于水分子是极性分子,存在外电场时其电偶极矩将在电场力的作用下向外电场的方向偏转,最终产生极化电场,导致等势线向靠近电极方向偏移。

3.2 COMSOL Multiphysics 仿真结果

不同电极间距和电极半径下的等势线分布结果如图 9 和图 10 所示。可以看出,随着电极间距离的增大、电极半径的增大,等势线整体向远离电极的方向偏移。这主要是由于电极距离增大,导致电场梯度减小,使得等势线更加稀疏。

不同电压下的等势线分布结果如图 11 所示。从图中可以看出,随着电极间电压的增大,等势线形状不变,但同一位置电势增加。这主要是由于,电压增大并不会引起电势梯度的变化,从而使等势线的分布保持不变。

对于等势线这种学生自主思考空间较大的问题,实际操作中若直接针对所有考虑到的影响因素进行实验,不仅费时费力,而且需要消耗大量的实验材料。而利用 COMSOL Multiphysics 进行仿真,仅需调整设置界面中相关参数即可实现对某一组具体变量的反复多次模拟探究,引导学生对物理现象进行全方位的深入思考,增强了学生自主探究性,更好地发挥了题目的开放性作用;同时学生可以基于得到的模拟结果开展进一步分析,并以此为依据进行相应的准备。

4 讨论

本文从近几年 PT 赛题中选取了三个代表性案例,并使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行建模仿真,得到了生动、直观的结果,并与理论分析进行比较。通过这三个具体案例的分析,可以看出 COMSOL Multiphysics 仿真软件在 PT 中具有很强的现实应用意义。首先,COMSOL Multiphysics 仿真软件能够将抽象结果可视化,使学生将物理图像与数学结果直接联系在一起,加深对物理模型的理解。其次,COMSOL Multiphysics 仿真实验不需要复杂的操作过程和严苛

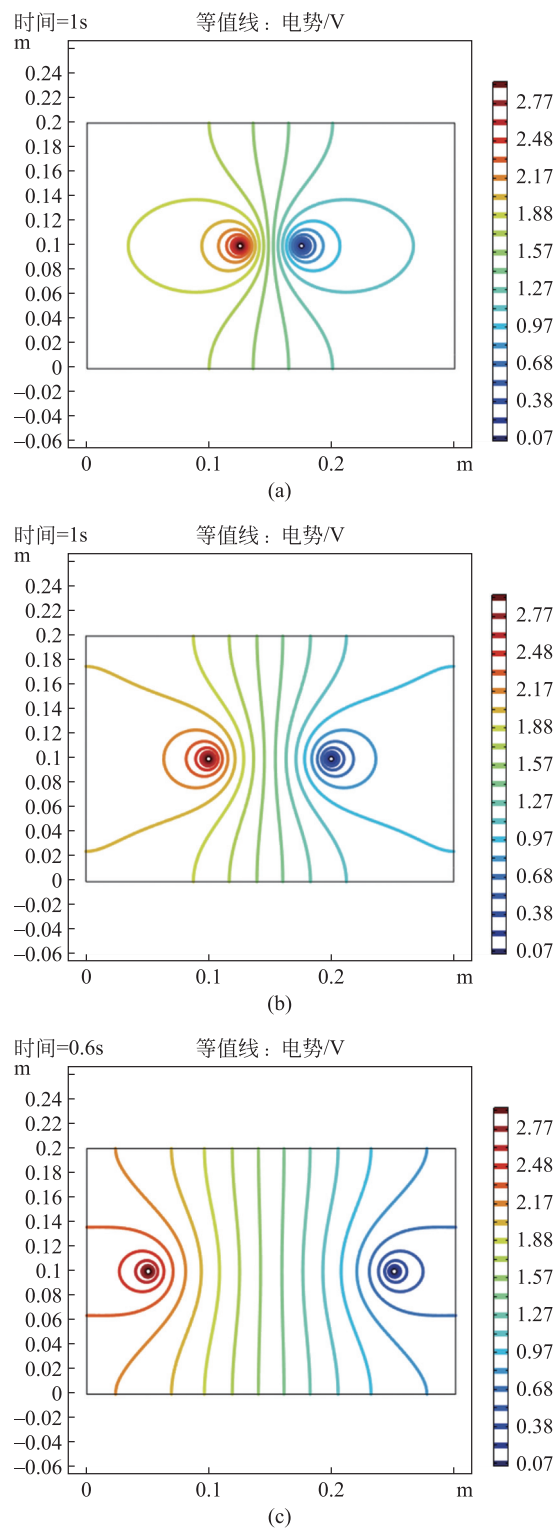


图 9 不同电极间距下的等势线

(a)~(c) 电极间距分别为 5cm、10cm、20cm,电极半径 $r=2\text{mm}$,电极间电压 $U=3\text{V}$

的环境条件,可以弥补实际实验的不足,减小实验结果中环境因素和人为因素造成的误差,方便学

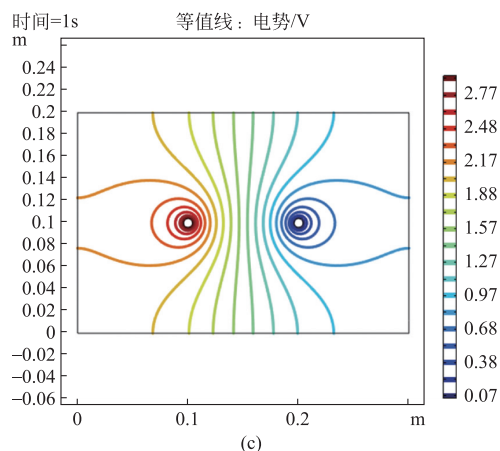
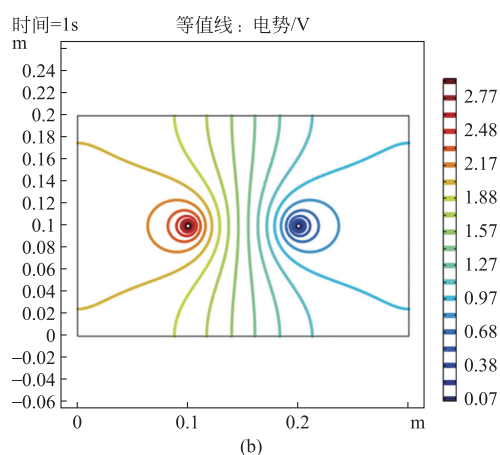
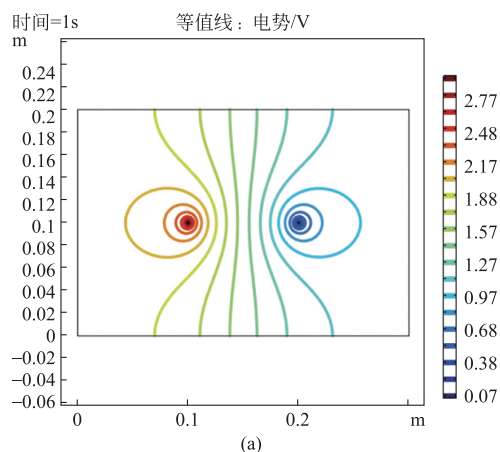


图 10 不同电极半径下的等势线

(a)~(c) 电极半径分别为 1mm、2mm、4mm, 电极间距 $L=10\text{cm}$, 电极间电压 $U=3\text{V}$

生在比对模拟与实际结果后进行误差分析。最后, COMSOL Multiphysics 仿真软件能够增强探究性。软件强大的计算功能和简洁的界面使得学生可以在实际操作前短时间内完成对不同影响因素的探索, 有助于后续实验的设计, 增强了学生的探究性、主观能动性, 教学效果得到提高。由此可

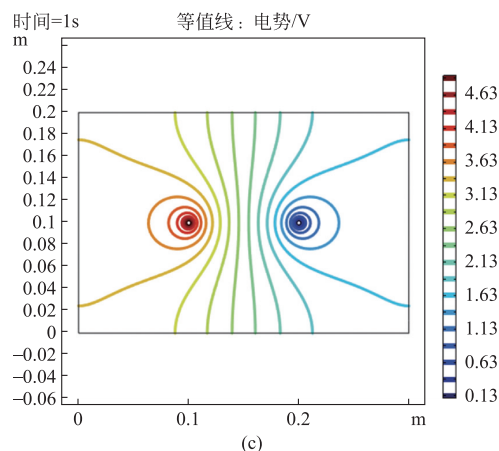
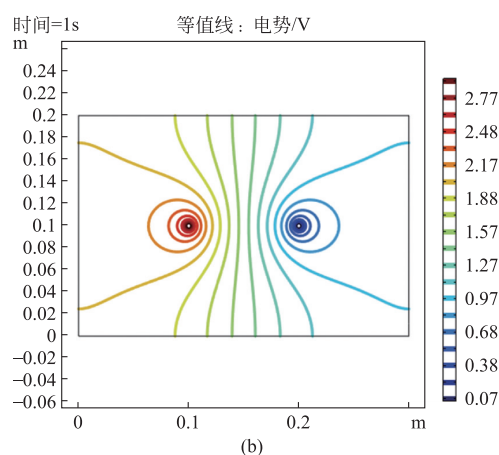
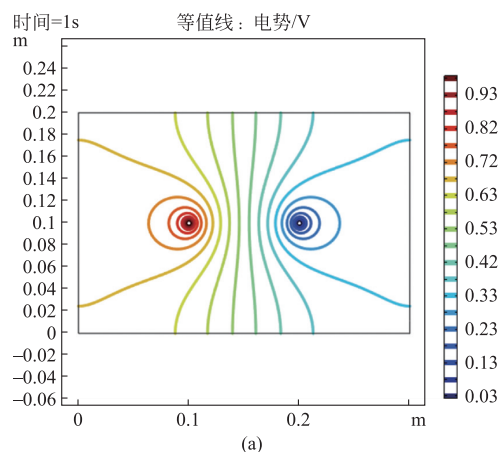


图 11 不同电压下的等势线

(a)~(c) 电压分别为 1V、3V、5V, 电极半径 $r=2\text{mm}$, 电极间距 $L=10\text{cm}$

见, COMSOL Multiphysics 仿真软件既能够辅助学生进行实验的探究, 同时又充分发挥了题目本身的教学作用, 在 PT 中具有较高的应用价值。

当然, 数值仿真是对所建立的模型进行数学计算和模拟的过程, 并不能完全代替实验。PT 作为一项注重创新能力和动手能力的科研活动, 理应注

重理论探究和实验探究的相互配合。在 PT 过程中使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行建模仿真,其目的是使抽象的物理模型更加具体,加深学生对理论的理解,并利用其结果指导实验的开展,对实际操作起到辅助的作用。此外,对于初次接触 PT 的低年级本科生而言,使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行建模仿真辅助解题,能够帮助他们更好地完成题目,使 PT 题目本身增强学生探究性、主观能动性的价值得到体现。但对于从事科研工作的物理学专业学生而言,编程可以说是一项必备技能。从长远来看,学生不能单纯地依赖这种仅需输入参数和条件即可获得结果的工程类计算软件,而需要掌握更为通用的编程语言。

5 结语

将 COMSOL Multiphysics 仿真软件应用于 PT 这种开放性实验教学中,通过引导学生在特定的物理模型中进行相关课题研究,让学生从初步的软件操作学习,到真正体会到科研仿真软件的使用方法和相关知识,能够十分有效地激发学生对物理现象探究的学习兴趣,提升其逻辑思考能力和自主探究的能力。

参 考 文 献

- [1] 董少光,谭鹏,朱传云. 基于 MATLAB 的可视化处理复杂电磁学问题的应用研究[J]. 物理通报, 2020(S2): 99-104.
DONG S G, TAN P, ZHU C Y. Research on the application of visual processing of complex electromagnetic problems based on MATLAB[J]. Physics Bulletin, 2020(S2): 99-104. (in Chinese)
- [2] 张祥军. 电磁仿真软件在“电磁场与电磁波”课程教学中的应用[J]. 中国电力教育, 2010(S1): 150-152.
ZHANG X J. The application of electromagnetic simulation software in the teaching of Electromagnetic Field and Electromagnetic Wave course[J]. China Electric Power Education, 2010(S1): 150-152. (in Chinese)
- [3] 崔小斌,季文杰. COMSOL Multiphysics 软件在矩形波导课堂教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(11): 130-135.
CUI X B, JI W J. Application of COMSOL Multiphysics software in rectangle waveguide teaching[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(11): 130-135. (in Chinese)
- [4] 徐亚东,周航,高雷. 信息技术优化教学方案 提升教学效果——以 COMSOL 在电磁学中的应用为例[J]. 物理通报, 2019(12): 22-24.
XU Y D, ZHOU H, GAO L. Information technology optimizing teaching scheme and improving teaching effect[J]. Physics Bulletin, 2019(12): 22-24. (in Chinese)
- [5] 李川勇,宋峰,王慧田,等. 贯通大中学物理综合能力培养的物理学竞赛教学模式[J]. 大学物理, 2018, 37(6): 45-49.
LI C Y, SONG F, WANG H T, et al. Teaching mode of physics tournament linking middle-school and college of comprehensive ability training in physics[J]. College Physics, 2018, 37(6): 45-49. (in Chinese)
- [6] 潘崇佩,李川勇,陈靖,等. 物理学竞赛牵引下的大-中学生实验能力协同培养探索[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(1): 172-175.
PAN C P, LI C Y, CHEN J, et al. Co-development of experimental ability between university and high school students based on physicists' tournament[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(1): 172-175. (in Chinese)
- [7] 余华,李川勇,吴强,等. 物理学竞赛对学生从中学到大学过渡的桥梁作用[J]. 物理与工程, 2017, 27(6): 104-107.
YU H, LI C Y, WU Q, et al. The bridging role of physics tournament in the transition from high school to college[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(6): 104-107. (in Chinese)
- [8] 曾溢嘉,王晓杰,李文华,等. 轻重物体系统绕杆运动的循环摆现象研究[J]. 物理实验, 2020, 40(6): 34-40.
ZENG Y J, WANG X J, LI W H, et al. Looping pendulum of light and heavy objects moving around a rod[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(6): 34-40. (in Chinese)
- [9] 闫宝罗,张颖,魏云,等. 快链条现象的研究[J]. 物理实验, 2017, 37(6): 43-47.
YAN B L, ZHANG Y, WEI Y, et al. Related research on fast chain[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(6): 43-47. (in Chinese)
- [10] Problems for the 33rd IYPT 2020. [EB/OL]. (2019-7-14) [2023-4-20]. <https://www.iypt.org/problems/iypt-2020-problems/>.
- [11] Problems for the 34th IYPT 2021. [EB/OL]. (2020-7-16) [2023-4-20]. <https://www.iypt.org/problems/problems-for-the-34th-iypt-2021/>.
- [12] 曾建华,胡舒琦,曾文强,等. 光分支流现象影响因素的实验初探[J]. 上饶师范学院学报, 2021, 41(3): 19-24.
ZENG J H, HU S Q, ZENG W Q, et al. An experimental study on the influence factors of branch flow of light[J]. Journal of Shangrao Normal University, 2021, 41(3): 19-24. (in Chinese)
- [13] 邹梓晴,徐奕扬,马光远,等. 肥皂膜中光分支流现象的探究. 物理与工程, 2022, 32(5): 157-163.
ZOU Z Q, XU Y Y, MA G Y, et al. Branched flow of light in thin soap membranes[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 157-163. (in Chinese)
- [14] Problems for the 35th IYPT 2022. [EB/OL]. (2021-7-14) [2023-4-20]. <https://www.iypt.org/problems/problems-for-the-35th-iypt-2022/>
- [15] 胡先权,胡文江,马勇. 偏心圆柱面与分离圆柱面带电导体等势面的统一描述[J]. 大学物理, 2004(8): 20-23.
HU X Q, HU W J, MA Y. The uniform representation for equipotential surfaces of two parallel charged cylinder conductors with eccentric and separated axes[J]. College Physics, 2004(8): 20-23. (in Chinese)