

LTspice 软件仿真在电路教学中的应用

王玉莹 贺西平 李清晏 刘玉娟 申文洁 买子桐 陈恬雅

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119)

摘要 高中电路教学中, 电源输出功率最大值、动态电路的分析及暂态电路分析等问题是教学难点问题。传统教学方式因未能展示物理量变化导致电路参数发生变化的具体过程, 较为抽象, 使得学生在理解和掌握上存在较大困难。本文利用 LTspice 软件对这几种电路变化进行仿真计算, 可视化地呈现了电路变化过程。直观地提升了学生的理解力, 提高了教学效果。仿真软件的应用也有利于拔尖创新性人才的培养。

关键词 动态电路; 暂态电路; LTspice; 仿真计算

APPLICATION OF LTSPICE SOFTWARE SIMULATION EXPERIMENT IN CIRCUIT TEACHING

WANG Yuying HE Xiping LI Qingyan LIU Yujuan SHEN Wenjie MAI Zitong CHEN Tianya

(College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119)

Abstract In high school circuit teaching, issues such as the maximum power output of a power source, the analysis of dynamic circuits, and the analysis of transient circuits are difficult to teach. Traditional teaching methods are relatively abstract due to the lack of specific demonstration of the process where physical quantity changes lead to changes in circuit parameters, making it difficult for students to understand and grasp. This paper utilizes LTspice simulation software to construct circuit models with adjustable parameters, achieving dynamic simulation of these circuits from steady state to transient state, visually presenting the circuit change process. This intuitively enhances students' comprehension and improves teaching effectiveness. The application of simulation software is also conducive to the cultivation of top-notch innovative talents.

Key words dynamic circuit; transient circuit; LTspice; simulation calculation

高中物理电路分析的电源输出功率最大值^[1-3]、动态电路分析^[4-6]等问题, 是教学重点与难点, 暂态电路分析问题也是学生难以理解的内容之一。传统教学模式下, 尽管公式推导能从数学层面揭示电路规律, 但抽象的电路变化致使学生难以直观认知, 深度理解。而仿真实验参数调整灵活全面, 能够将电路的响应可视化, 通过直观的

图形界面和动态演示, 突破传统教学的局限^[7-9], 揭示更多的不易发现的和极端条件下的规律。新工科背景下, 将仿真技术引入高中教学可以培养学生高效解决问题和创新思维能力, 为国家培养拔尖创新性人才^[10,11]。

LTspice 作为一款图形化电路仿真计算软件, 因其图形化编程、可视化界面、计算速度快等特

收稿日期: 2025-03-08

通信作者: 贺西平, hexiping@snnu.edu.cn。

引文格式: 王玉莹, 贺西平, 李清晏, 等. LTspice 软件仿真在电路教学中的应用[J]. 物理与工程, 2025, 35(5): 303-308.

Cite this article: WANG Y Y, HE X P, LI Q Y, et al. Application of LTspice software simulation experiment in circuit teaching[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(5): 303-308. (in Chinese)

点,应用在电路教学中将优势明显。学生仅需轻松选择与连接元件,即可自主搭建电路并灵活调节参数,软件可自动计算电路,避免了烦琐公式推导。软件内置示波器功能,能够实时、直观地呈现各物理量间的动态关联,无须数据导出操作,极大地降低了学习难度与操作门槛。本文以电源输出功率最大值、动态电路的分析及暂态电路分析等问题为例,利用 LTspice 软件进行电路仿真教学研究,取得了良好的教学效果。

1 电源输出功率最大值

在如图 1 所示的电路中,电源内阻 r 为 6Ω ,变阻器 R 阻值从 0 开始不断增大过程中,分别设置 R_0 为不同值的情况下,探究电源输出功率随变阻器阻值增大的变化趋势。

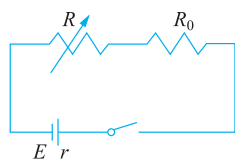


图 1 电路图

电路的总电阻 $R_{\text{总}} = R + R_0 + r$,由欧姆定律电路总电流 $I = \frac{E}{R + R_0 + r}$,输出功率 $P = \left(\frac{E}{R + R_0 + r}\right)^2 (R + R_0)$,令 $R_x = R + R_0$ 则 $P = \frac{E^2}{R_x + \frac{r^2}{R_x} + 2r}$,若 $R_{x,\min} \leq r$,当且仅当 $R_x = r$ 时,

输出功率取最大值。当 $R_{x,\min} > r$ 时, $R = R_{x,\min}$ 处功率取得最大值。对于学生来说,以上仅仅停留在数学层面的计算,没有物理量的变化过程,不利于学生的理解。

现利用 LTspice 构建电路、仿真可视化计算。在软件库中选择电阻元件、电压源元件,并构建电路如图 2 所示。

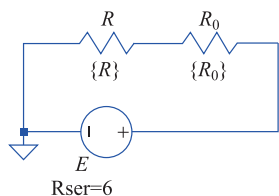


图 2 LTspice 电路

然后按如下步骤操作:

(1) 利用命令 . param 将 R_0 值分别设置为 2Ω 和 8Ω ;

(2) 利用命令 . step 设置电阻 R 的值从 0 到 20Ω 变化;

(3) 设置 . op 模式,运行 LTspice,开始计算;

(4) 将探针放在电源正极测量电源输出电压 $V(n002)$,放在 R_1 处测量电流 $I(R1)$;

(5) 在示波器中添加因变量 $V(n002) \times I(R1)$ 即输出功率,将横坐标变量设置为电阻值。

得到电源输出电压、电流、输出功率随电阻 R 的变化关系如图 3 所示。由图可知, R 增大过程

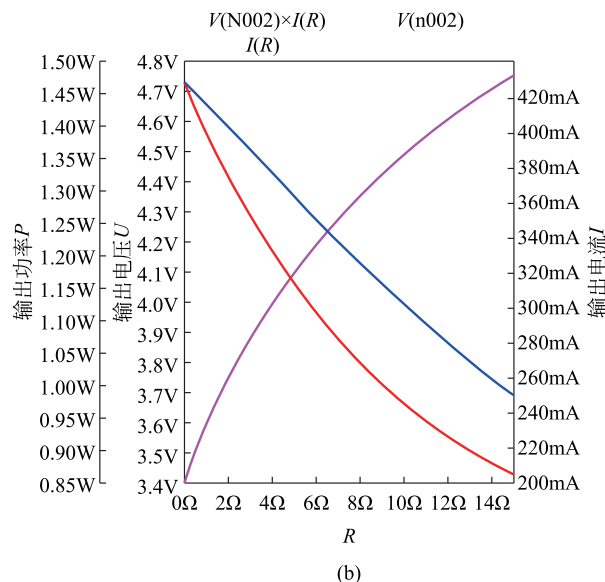
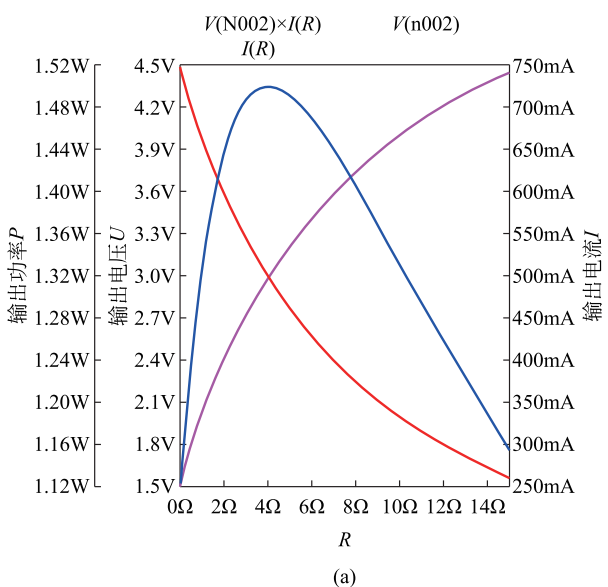


图 3 LTspice 中示波器显示结果

(a) $R_0 = 2\Omega$; (b) $R_0 = 8\Omega$

中,输出电压不断增大,输出电流 I 则不断减小。 R_0 为 2Ω 时输出功率随电阻 R 先增大后减小, $R+R_0=r$, 即 $R=4\Omega$ 时取最大值。 R_0 为 8Ω 时输出功率随电阻 R 增大而减小,与上解析计算结果相符。

再利用命令 step 进行 R_0 和电阻 R 的双参数扫描,得到不同 R_0 下的电源输出功率随电阻 R 变化的图像如图 4 所示。电源输出功率 $P = \frac{E^2}{R_x + \frac{r^2}{R_x} + 2r}$, R_0 的变化实质上是造成了函数的偏移。教师可以引导学生从图像寻找 R_0 的临界值,学生通过观察可以直观地发现 R_0 的临界值为 6Ω ,这与理论计算的 r 为临界值是对应的。

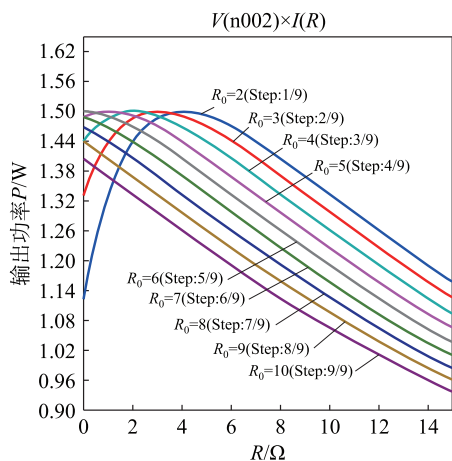


图 4 不同 R_0 下功率随 R 变化曲线

2 动态电路中 I 和 U 的变化

如图 5 所示的电路中,电源 E 的内阻不计, $R_1=R_2=R_3=1\Omega$,变阻器 R 的阻值从零开始增大,电压表 V_x 示数为 U_x ($x=1,2,3$),干路电流表示数为 I , R 的电流为 I_R ,分析该电路。

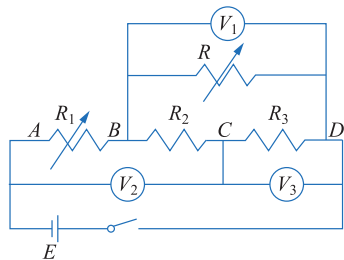


图 5 电路图

令 R_2 与 R_3 串联与变阻器并联后的等效电阻为 $R_{并}$, 则 $R_{并} = \frac{R(R_2+R_3)}{R+R_2+R_3}$ 。随着 R 增大, $R_{并}$ 增大, 电路总电流 I 减小, 电压表 V_1 示数 $U_1 = E - IR_1$ 增大, 则电压表 V_3 示数 $U_3 = \frac{U_1}{R_2+R_3} R_3$ 增大, 电压表 V_2 示数 $U_2 = E - U_{R_3}$ 减小。由于 $R_{并} = \frac{R(R_2+R_3)}{R+R_2+R_3}$ 随着 R 增大是一个非线性的变化, 相应的电压和电流随着 R 增大也是非线性的变化, 传统教学通常只停留在定性描述, 学生难以理解其中的关系。

利用 LTspice 进行电路仿真可视化计算, 同上节过程, 构建电路如图 6 所示。使用自带示波器可以绘制 $R_{并}$ 的变化规律, 并使用 Mark Reference 参考节点功能, 得到各电压表示数随阻值和电流的变化。

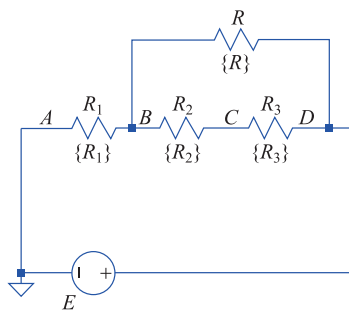


图 6 LTspice 电路

由图 7(a)可知, U_x 和 $R_{并}$ 随 R 增大呈非线性变化, $R_{并}$ 增大速度逐渐减慢, 电路总电流 I 减小, U_1 和 U_3 增大, U_2 减小, 电压电流的变化率也不断减小。电路中也存在一些线性关系, 根据 $U_1 = E - IR_1$, U_1 与 I 呈线性关系, 代入 U_2 和 U_3 的表达式中, 得到 U_x 与 I 均呈线性关系, 该关系在高中教学中较为常见。

同时, 电路存在一些学生难以自主发现的规律, 教师可以引导学生利用 LTspice 探索其他电压与电流的关系, 如 U_x 与 I_R 也呈线性关系。教师可以让学生猜测其中的物理原理, 然后讲解等效电源法, 将 R 视为外电路, 其余部分视为等效电源, $r_{等效} = \frac{R_1(R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3} = \frac{2}{3}\Omega$, 得到 $U_1 = E - I_R r_{等效}$, 则 U_x 与 I_R 也呈线性关系。学生可以利用 LTspice 自带的斜率计算功能, 得到 U_1-I_R 图

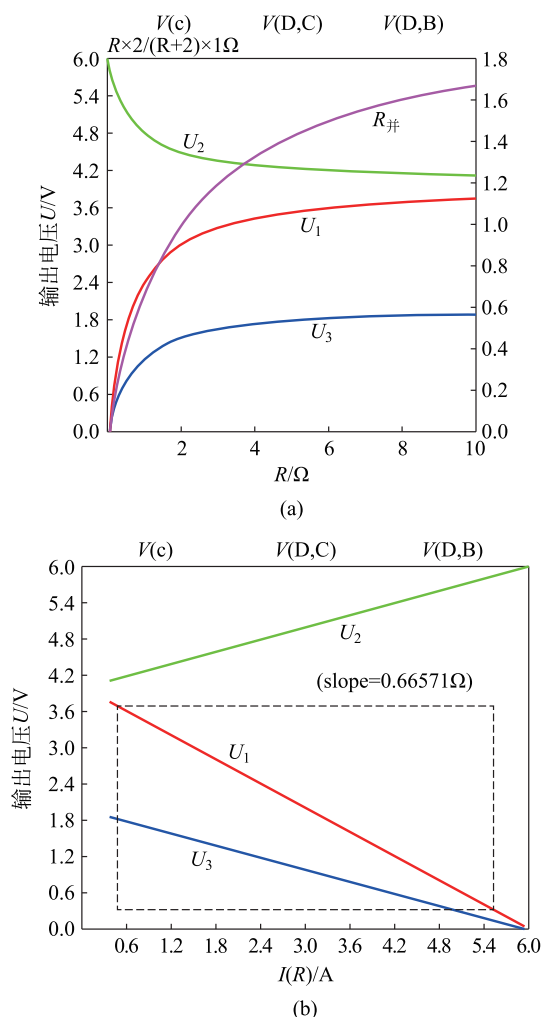


图7 Ltspice 中的示波器显示结果

(a) U_x 和 $R_{并}$ 随 R 非线性变化; (b) U_x 与 I_R 呈线性关系

像斜率绝对值 $\text{slope} = 0.66571\Omega \approx \frac{2}{3}\Omega$, 如图 7(b) 所示, 与 $U_1 = E - I_R r_{\text{等效}}$ 中的斜率相对应。

根据 $R_{并} = \frac{R(R_2 + R_3)}{R + R_2 + R_3}$ 随着 R 增大, $R_{并}$ 趋近于 $R_2 + R_3$, 即 R 视为断路。LTspice 仿真实验突破了传统实验的器材限制, 可以灵活的调节参数, 直观地呈现出极端条件下系统的状态。学生可以将 R 扫描范围增大如图 8 所示, 观察到 U_1 和 U_2 趋向于 $4V$, U_3 趋向于 $2V$, 与理论对照一致。

3 暂态电路分析

如图 9 所示的电路, P 、 Q 为两个相同的灯泡。分析闭合开关瞬间, 两个灯泡的亮灭情况; 电路稳定后, 再判断两个灯泡的亮灭状态。

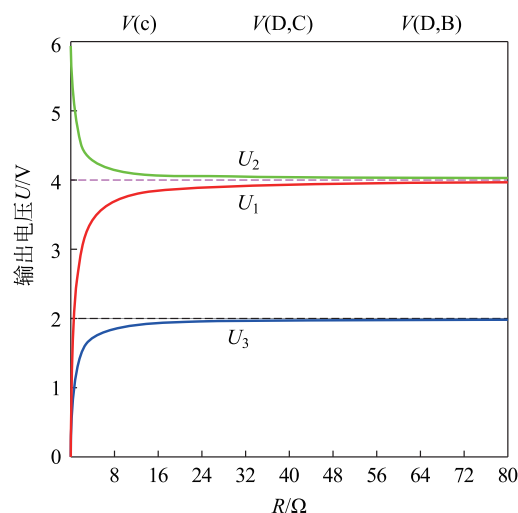
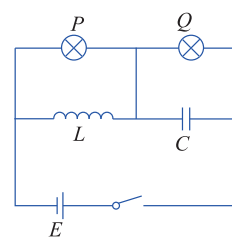
图8 U_x 随 R 变化

图9 暂态电路图

闭合开关瞬间, 电感近似视为断路, 电容近似视为短路, 则电路变化过程可由图 10 来解释, 即闭合瞬间小灯泡 Q 被短路, 灯泡 P 瞬间亮起, 灯泡 Q 不亮; 稳态时, 电感由于近似视为短路, 电容近似视为断路, 由图可知, 灯泡 P 被短路, 灯泡 Q 瞬间亮起, 而灯泡 P 不亮。

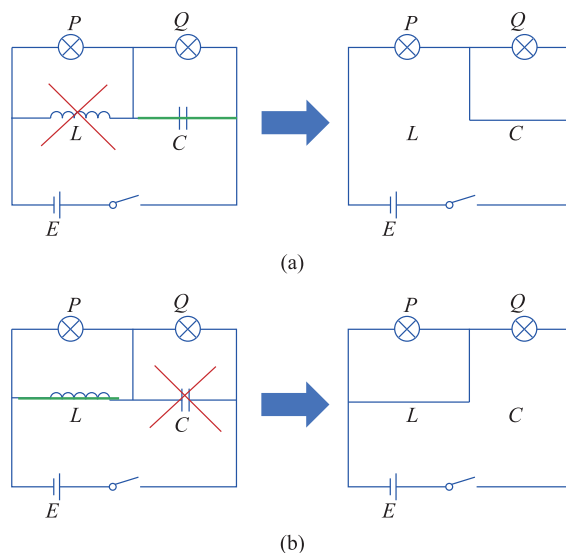


图10 等效电路图

(a) 开关闭合瞬间等效电路图; (b) 电路稳态等效电路图

传统教学中仅仅定性解释了闭合瞬间和稳态两个特殊状态,之中的物理变化过程未能清晰展现,学生难以理解。教师可以利用 LTspice 对过程进行可视化,演示不同参数下电路的响应。与上同理,构建电路如图 11 所示,并设置电源选择 PULSE 脉冲模式(模拟该时刻开关突然闭合),设置 .tran 瞬态分析模式,得到不同参数下通过电阻 R_1 、 R_2 的电流的变化如图 12 所示。

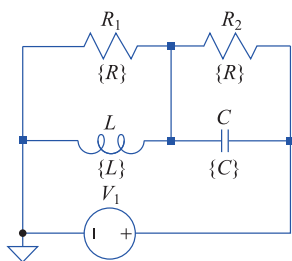


图 11 LTspice 电路

改变电路参数,可以得到两类结果如图 12 所示(其中右图为左图框内波形放大图),一类发生振荡,另一类不发生振荡。分析图像可知,无论哪类结果均为闭合瞬间小灯泡 P 瞬间亮起,小灯泡 Q 不亮;稳态时,小灯泡 Q 瞬间亮起,小灯泡 P 不亮。在未达到稳态过程中,第一种情况小灯泡会发生多次闪烁,而第二种情况则仅瞬间亮起然后熄灭。

同时发现, R 阻值越大,越容易产生振荡现象。设置一种极端情况, R 阻值非常大(如 1000000Ω),则两个电阻近似断路,同时电阻电流反映电容电感电压。电路构成一个经典的零状态响应系统,发生 LC 振荡,如图 13 所示。

教师可以引导学生猜测曲线的函数形式,并帮助他们在陌生的电路中发现熟悉的规律。例如发生振荡后两个电路电压之和是定值,当电容电

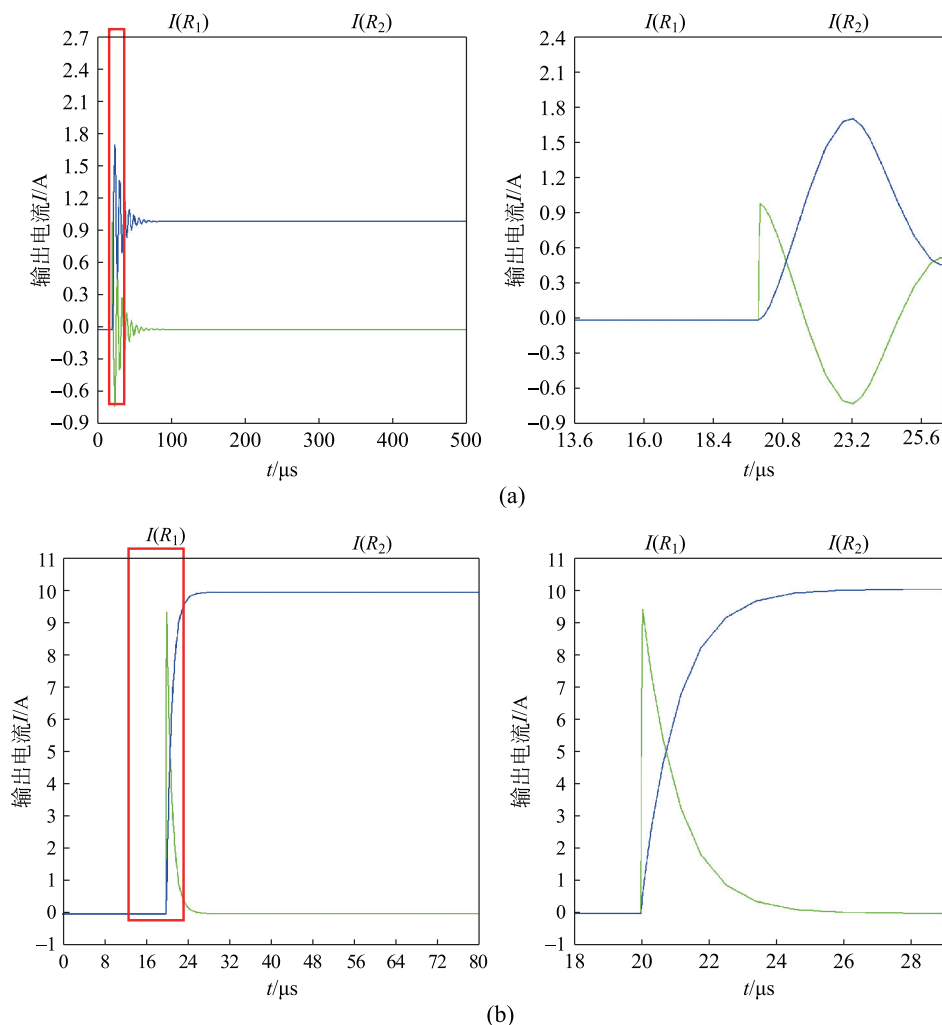


图 12 Ltspice 中的示波器显示结果

(a) 振荡图像; (b) 非振荡图像

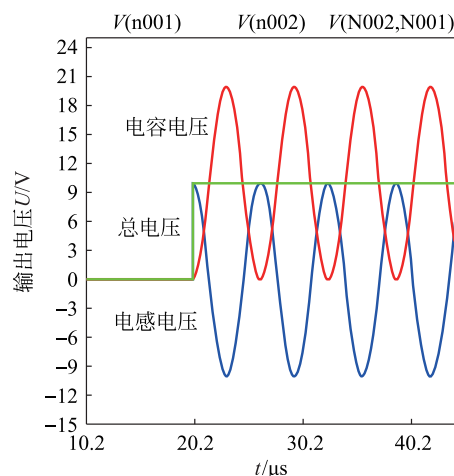


图 13 振荡图像

压增加时,电感电压必然减小,两电压变化趋势相反。观察发现电压最大振幅不减小,即能量没有耗散,由此学生可以更深刻地理解电容电感作为储能元件的作用。

4 结语

本文以电源输出功率最大值、动态电路、暂态电路分析为中心探讨了 LTspice 软件在高中物理电路分析问题教学中的应用。通过详细的案例,展示了 LTspice 如何助力学生突破传统教学的局限,直观地理解电路动态变化的复杂过程。这种结合信息化技术的教学方案,不仅可以有效提升学生对电路知识的掌握程度,还可以激发学生的学习兴趣,培养实践能力和创新思维。

参 考 文 献

- [1] 贺艳伟. 去情境化阶段的物理概念教学——对电源输出功率概念教学的反思[J]. 物理教师, 2020, 41(10): 28-30.
- [2] 王琦. 电源输出功率随变阻器阻值变化规律分析[J]. 物理教师, 2017, 38(4): 85-87.
- [3] 王伟民, 毕亮. 电源输出功率最值问题的应用[J]. 物理教师, 2015, 36(10): 86-87.
- [4] 杨天才, 李红梅. 追寻动态电路中的“不变量”[J]. 物理教师, 2024, 45(2): 61-62, 82.
- [5] 任永祥. GeoGebra 软件在高中物理教学中的应用——以电路动态分析问题为例[J]. 中国现代教育装备, 2023, (14): 20-23.
- [6] 张亮. “动态电路”中考试题的分类与解析——以 2020 年中考物理真题为例[J]. 物理教学, 2021, 43(1): 51-54, 50.
- [7] 张宇彪, 陈浪, 吕梦雪, 等. 基于 LabVIEW 的虚拟仿真实验——双臂电桥测量低电阻[J/OL]. 物理与工程, 1-7[2025-03-06].
- [8] 卢艳, 李劲松, 程家齐. 线圈自感、互感问题的数值仿真教学案例研究[J]. 物理与工程, 2021, 31(S1): 49-53.
- [9] 房位阳, 王业伍, 陈水桥, 等. 虚实结合的基础物理实验教学设计与实践研究[J]. 物理与工程, 2018, 28(S1): 151-156, 161.
- [10] 王辉, 覃垠, 谢东, 等. 新工科背景下基于大学物理数值仿真的创新型人才培养[J]. 物理与工程, 2024, 34(4): 76-81.
- [11] 张亮. 工程仿真软件在大学物理课堂教学中的运用[J]. 物理与工程, 2021, 31(3): 85-91.