

## 基于Python语言的循环伏安法(CV)可视化仿真实验

杨鹰\*, 武泳含, 李紫瑄, 张露, 林荣沁, 张叶梵, 刘季铨, 宁晓辉, 李延, 崔斌  
西北大学化学与材料科学学院, 化学国家级实验教学示范中心, 西安 710127

**摘要:** 循环伏安法(CV)是利用电化学方法研究氧化还原反应的关键表征手段之一。传统的循环伏安法教学实验中往往未能深入探讨CV曲线反映的物理化学过程, 导致学生对CV表征过程中电化学动力学行为的理解停留在表面。为了弥补这一缺陷, 本实验利用Python语言编写了CV数字化仿真程序, 对CV曲线和电极表面的电活性物质浓度变化过程进行了可视化仿真。这一数字化设计不仅减少了实验材料的消耗, 提高了实验效率, 而且通过动态可视化的形式, 使枯燥的电化学数据转化为直观易懂的图像。本数字化仿真实验对传统实验进行了有益的补充和提升, 提高了教学的互动性和学生的参与度, 激发了学生对电化学知识的学习兴趣和探索欲望。

**关键词:** 电化学; 仿真; 循环伏安法; 可视化; Python; 动力学

**中图分类号:** G64; O6; TQ151

## Visualization Simulation Experiment of Cyclic Voltammetry (CV) Based on Python

Ying Yang\*, Yonghan Wu, Zixuan Li, Lu Zhang, Rongqin Lin, Yefan Zhang, Jiquan Liu, Xiaohui Ning, Yan Li, Bin Cui

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education, College of Chemistry & Materials Science, Northwest University, Xi'an 710127, China.

**Abstract:** Cyclic voltammetry (CV) stands as a pivotal electrochemical technique for investigating redox reactions. Traditional CV teaching experiments often lack in-depth exploration of the physicochemical processes underlying CV curves, leading to students' limited comprehension of electrochemical kinetics during CV characterization. To address this pedagogical gap, we developed a digital simulation program using Python to visualize both CV curves and the dynamic concentration changes of electroactive species at the electrode surface. This computational approach not only minimizes material consumption and enhances experimental efficiency but also transforms complex electrochemical data into accessible visual representations through dynamic visualization. The digital simulation experiment serves as a valuable complement to traditional methods, enhancing instructional interactivity and student engagement while fostering greater interest and curiosity in electrochemical studies.

**Key Words:** Electrochemistry; Simulation; Cyclic voltammetry; Visualization; Python; Kinetics

### 1 引言

循环伏安法(cyclic voltammetry, CV)是一种暂态电化学测试方法, 是一种通过测量循环伏安曲线进行定性和定量分析的常用电化学分析实验技术<sup>[1,2]</sup>。循环伏安法能提供发生在电极/电解液界面

收稿: 2024-12-02; 录用: 2025-01-23; 网络发表: 2025-05-19

\*通讯作者, Email: yingyang@nwu.edu.cn

基金资助: 西北大学 2024 年度本科人才培养建设项目(JX2024003, JX2024105); 教育部高等学校化学类专业教学指导委员会教学研究与实践项目(H20210602, H20210603)

处的电荷传递过程动力学和热力学信息，还可为分析电化学反应机理等提供有价值的信息。因此，循环伏安法在电化学合成、化学电源、电催化等研究中被广泛应用，在“仪器分析实验”教学的电分析技术部分也被着重介绍<sup>[3-6]</sup>。在循环伏安法的实验教学中，多采用铁氰化钾或亚铁氰化钾电解液作为研究对象，设置不同的扫描速率和不同的电解液浓度作为研究参数，从CV曲线中读取峰电流值，得到峰电流-扫描速率<sup>1/2</sup>和峰电流-浓度的线性关系，验证Randles-Sevcik方程的正确性<sup>[6]</sup>。传统的循环伏安法实验教学中，对于CV曲线为何呈现“鸭嘴形”没有进行过多介绍，这是由于本部分教学偏向于“分析”应用，对于电极表面的化学反应、电荷转移和物质传递过程并不需要深入探讨，因此学生不能够真正了解形成CV曲线“鸭嘴”形状的动力学原因。导致在后继的学习和研究中应用循环伏安法解决真正的电合成、电源和电催化等问题时，只具有寻找峰电流-扫描速率<sup>1/2</sup>和峰电流-浓度线性关系的狭隘视野。

CV曲线呈现“鸭嘴形”，与被氧化或被还原后的离子扩散远离电极表面或溶液内部的离子向电极表面扩散的动力学行为紧密相关，这些过程在传统的实验教学中很难向学生进行直接展示，只能通过结合多幅图片进行讲解，无法展示一个连贯的动态变化过程。为了解决这一问题，本实验采用Python语言编写了“CV数字化仿真程序”，通过该程序仿真CV曲线的形成过程，并同步展示电极/电解液界面处的氧化态和还原态电活性物质的浓度变化，将循环伏安法测试过程中的电化学动力学行为可视化。通过CV数字化仿真，抽象的电化学理论被转化为直观的图形和动态演示，使学生能够清晰地看到电流与电极电势、电极/电解液界面处的离子浓度、扩散层厚度等相互关联的变化关系，从而深入理解CV曲线的形成机理。

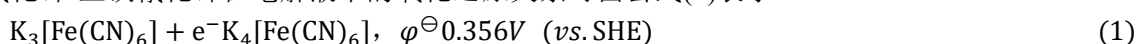
循环伏安法数字化仿真在理论学习的枯燥过程中增加了趣味性，提高了教学的互动性和学生的参与度，使得学生能够结合动手操作和数字化仿真对教学内容进行探索和实践，加深对电化学反应原理和电化学分析原理的理解，激发学生对电化学领域的研究兴趣和探索欲望<sup>[7-10]</sup>。

## 2 实验背景

### 2.1 循环伏安法的测量原理

在循环伏安法测试中，电极电势以线性方式随时间呈锯齿形变化(三角波)。电势从起始电势( $E_i$ )开始逐渐变化至终止电势( $E_f$ )，然后反向回到终止电势，形成一个完整的循环<sup>[1,5]</sup>。

铁氰化钾-亚铁氰化钾在电解液中的氧化还原关系可由公式(1)表示。



式中， $\varphi^\ominus$ 为标准电极电势。

电极电势与电极表面电活性物质活度的关系用能斯特方程表示为公式(2)<sup>[6,11]</sup>：

$$\Delta\varphi = \varphi^\ominus + \frac{RT}{F} \ln \frac{c_{\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]}}{c_{\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]}} \quad (2)$$

式中， $\Delta\varphi$ 为电极电势， $R$ 为气体常数， $T$ 为体系的温度， $F$ 为法拉第常数， $c_{\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]}$ 为铁氰化钾浓度， $c_{\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]}$ 为亚铁氰化钾浓度。

通常用Randles-Sevcik方程描述峰电流与电极表面电活性物质浓度(活度)、转移电子数、扫描速率和物质扩散速率之间的关系<sup>[2,5]</sup>：

$$i_p = 2.69 \times 10^5 \times A \times n^2 \times D^{\frac{1}{2}} \times \nu^{\frac{1}{2}} \times c \quad (3)$$

式中， $i_p$ 为峰电流， $A$ 为电极面积， $n$ 为转移电子数， $D$ 为被测物质扩散系数， $\nu$ 为扫描速率， $c$ 为电活性物质的起始浓度。

在传统教学实验中，电势以一定速率从起始电势 $E_i$  (-0.2 V)正向扫描到终止电势 $E_f$  (+0.6 V)，溶液中 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 被氧化生成 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ ，电化学工作站记录氧化电流的变化；然后从终止电势(+0.6 V)负向扫回起始电势(-0.2 V)，在电极表面生成的 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ 被还原生成 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ ，电化学工作站记录还原电流。

## 2.2 传统循环伏安法实验的步骤

实验仪器：电化学工作站(CS2350Me, 武汉科斯特股份有限公司), 计算机, 玻碳电极, 铂丝电极( $d=3\text{ mm}$ ), 饱和甘汞电极, 电子天平, 电解池, 移液管(2 mL、10 mL), 50 mL烧杯, 100 mL容量瓶。

实验试剂： $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ (分析纯, 天津市大茂化学试剂合伙企业)和 $\text{KCl}$ (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

实验步骤:

① 配制溶液: 配制5.0、10.0、15.0、20.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液(支持电解质为0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{KCl}$ 溶液)。

② 扫描不同扫速下 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液的循环伏安曲线: 分别测量1225、900、625、400、225、100、25、9  $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫速下的循环伏安曲线(浓度均为20.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

③ 扫描不同浓度 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液的循环伏安曲线: 分别测量5.0、10.0、15.0、20.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下的循环伏安曲线(扫速均为100  $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

④ 数据分析: 根据Randles-Sevcik方程进行数据分析。

## 2.3 传统循环伏安法实验的结果

传统循环伏安法中不同扫速的实验结果如图1所示。从图1(a)看到氧化峰电流和还原峰电流随着电极电势扫描速率的增加而变大, 由图1(b)和(c)可看出氧化峰电流和还原峰电流与扫速 $^{1/2}$ 成正比关系。

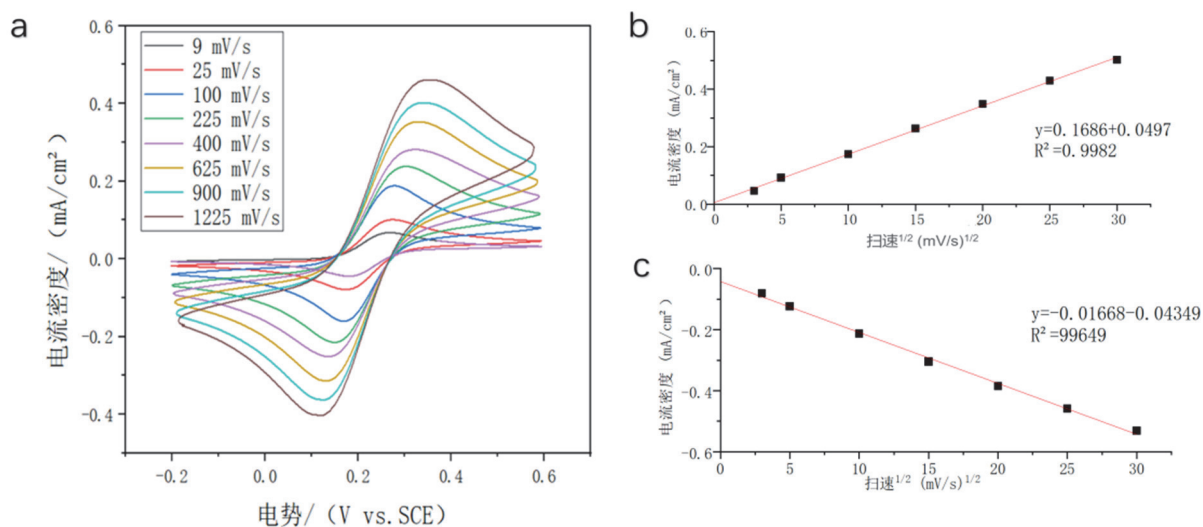


图1 (a) 不同扫速下的循环伏安曲线; (b) 氧化峰电流密度与扫速 $^{1/2}$ 的关系; (c) 还原峰电流密度与扫速 $^{1/2}$ 的关系

传统循环伏安法中不同铁氰化钾浓度条件的实验结果如图2所示。从图2(a)看到氧化峰电流和还原峰电流随着电活性物质的初始浓度增加而变大, 由图2(b)和(c)可看出氧化峰电流和还原峰电流与电活性物质的浓度成正比关系。

## 2.4 传统循环伏安法实验中的问题

① 无法直观获得动力学行为信息, 不便于清晰地理解循环伏安曲线呈现“鸭嘴形”的原因。

② 传统实验中, 扫描速率较低的CV表征需要执行较长的时间, 例如扫速为1  $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的实验需要执行约半个小时。

③ 无法在有限的时间内完成各个影响峰电流因素(如扫描速率、浓度、扩散系数、转移电荷数等)的实验。

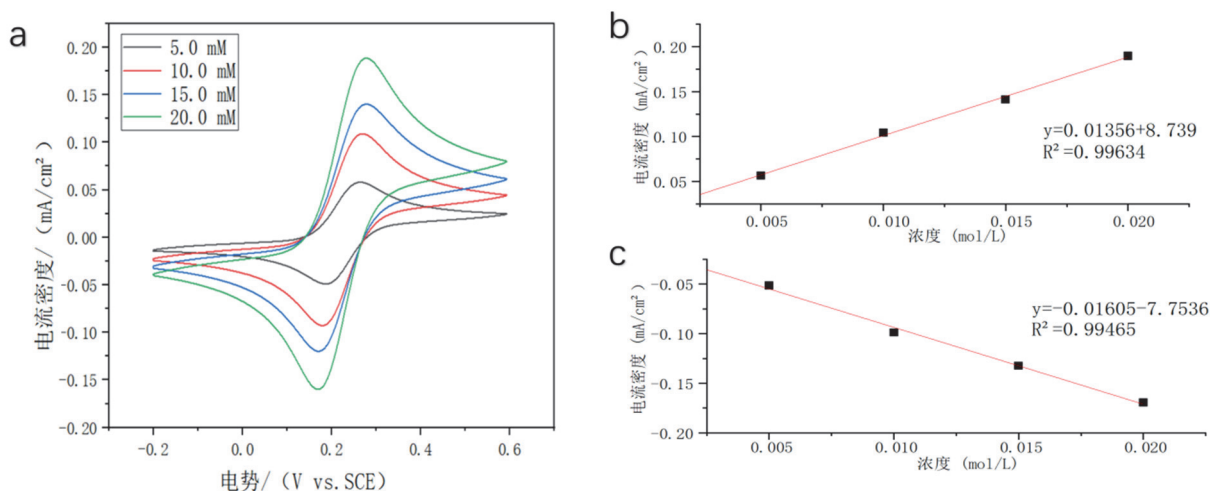


图2 (a) 不同浓度下的循环伏安曲线; (b) 氧化峰电流密度与浓度的关系; (c) 还原峰电流密度与浓度的关系

### 3 数字化实验创新设计

#### 3.1 数字化教学实验目的

- ① 让学生通过本实验理解电化学反应过程中的动力学行为和影响因素;
- ② 让学生理解并比较数字化仿真实验和传统手动操作实验的优点和缺点;
- ③ 让学生了解Python程序语言对于数字化仿真实验设计的积极作用;
- ④ 激发学生学习Python语言的兴趣, 打好利用计算机工具解决化学问题的基础。

#### 3.2 数字化仿真实验的设计思路

传统的CV教学实验只展示电流与电极电势的关系, 没有深入讨论动力学行为的影响。数字化仿真遵循CV过程中需要遵循的电荷守恒原理、能量守恒原理、物质守恒原理、能斯特方程、菲克扩散定律等基本原理解进行了数字化设计, 除了能对真实实验的CV曲线进行仿真, 还能给出电极-电解液界面处反应物和产物浓度变化的图像, 将动力学过程进行可视化, CV数字化仿真程序的设计流程图如图3所示。



图3 CV数字化仿真程序的设计流程图

#### 3.3 CV数字化仿真程序面板介绍

CV数字化仿真程序的操作界面主要包括四个部分: 参数设置区、操作控制区、图形展示区和数据显示区, 如图4所示。

在界面左上角的参数设置区主要输入程序计算参数、CV运行参数和图形显示参数。程序计算参数中,  $\alpha$ 表示电荷传递系数,  $\text{delx}$ 表示空间步长, 用于控制模拟的精度,  $l$ 表示迭代次数<sup>[6,11]</sup>。CV

运行参数分别为 $E_i$  (起始电势)、 $E_f$  (终止电势)、 $D_A$  (氧化态物质的扩散系数,  $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $K_0$  (电化学速率常数,  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $c_A$  (氧化态物质的起始浓度,  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )、 $n$  (转移电子数)、 $A$  (电极的有效面积,  $\text{cm}^2$ )、循环次数和扫速( $\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ )。图形显示参数部分用于调整CV曲线和浓度曲线的显示范围。扫描方向用于设定体系中最初是氧化态物质还是还原态物质。

界面左下角的操作控制区包含“模拟”“停止并清空”和“暂停”3个按钮。“模拟”用于启动程序,“停止并清空”用于停止运行程序并清空图形显示区,为程序下一次运行做准备,“暂停”按钮可以随时暂停仿真过程,便于讲解CV曲线与电极表面电活性物质浓度的变化关系。

界面右上部分为图形展示区,显示CV曲线、氧化态和还原态电活性物质的浓度。

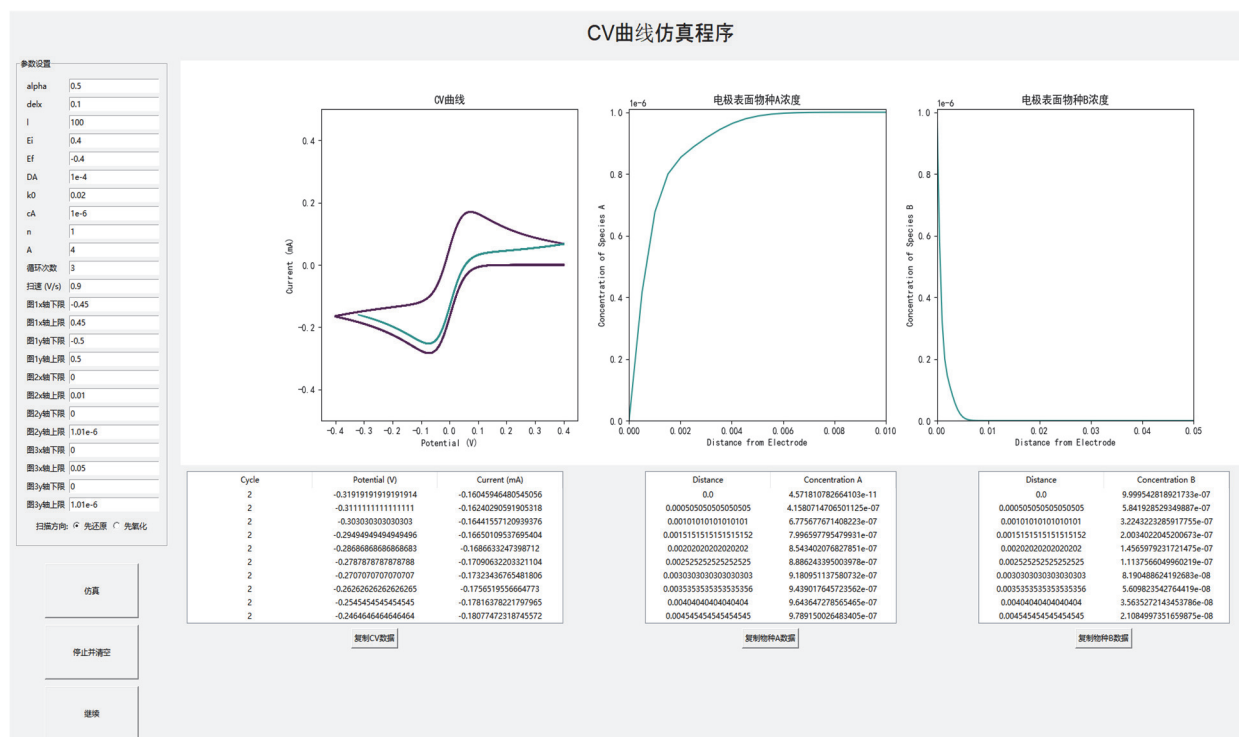


图4 CV数字化仿真程序的操作界面

界面右下方是数据显示区,实时输出仿真过程的电极电势、电流和浓度,并可通过“复制”按钮将数据复制至数据处理软件进行作图。

### 3.4 CV数字化仿真实验步骤

① 打开“CV数字化仿真程序”软件(图5):在参数设置区输入参数。传统实验一般只改变电活性物质浓度和扫速的值,而仿真实验除了浓度和扫速,还可以表征物质的扩散系数、电化学速率常数、电荷传递系数、转移电子数等因素对于CV曲线形状的影响。



图5 CV数字化仿真拟程序软件图标

② 设置模拟参数与扫描方向, 开始仿真: 参考传统实验, 设置扩散系数 $D_A$ 为 $7.6 \times 10^{-6}$ , 浓度为 $20.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 扫速分别为9、25、100、225、400、625、900和1225  $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

③ 观察实验曲线, 导出数据: 完成本次仿真后, 点击“复制CV数据”将数据粘贴至数据处理软件作图。可以提前结束仿真, 点击交互界面上的“停止并清空”, 调整参数并重新运行仿真以观察不同条件下的CV曲线。

④ 改变参数, 继续仿真: 做完不同扫速的仿真之后, 设置扫速为 $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ , 浓度分别为5.0, 10.0, 15.0,  $20.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。设置扩散系数分别为 $1 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , 观察CV曲线的变化。

⑤ 结合传统实验得到的数据与数字化仿真得到的数据进行对比和分析。

⑥ 撰写实验报告。

### 3.5 实验结果与数据分析

#### 3.5.1 数字化仿真结果

传统循环伏安法实验中不同扫速和不同浓度对CV曲线形状的影响如图6(a)和图7(a)所示。CV数字化仿真实验的结果如图6(b)和图7(b)所示, 横坐标与传统实验的不同, 仿真实验中的扫描电势采用了超电势。由图6和图7可看出, 数字化仿真可以取得和传统实验非常相近的实验结果。

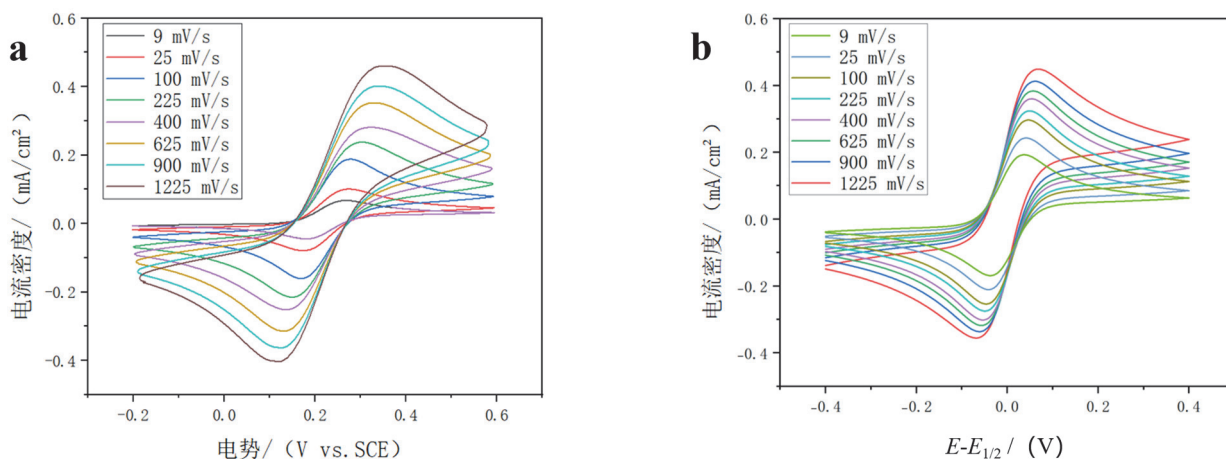


图6 不同扫速的循环伏安曲线的对比

(a) 传统实验结果; (b) 仿真实验结果

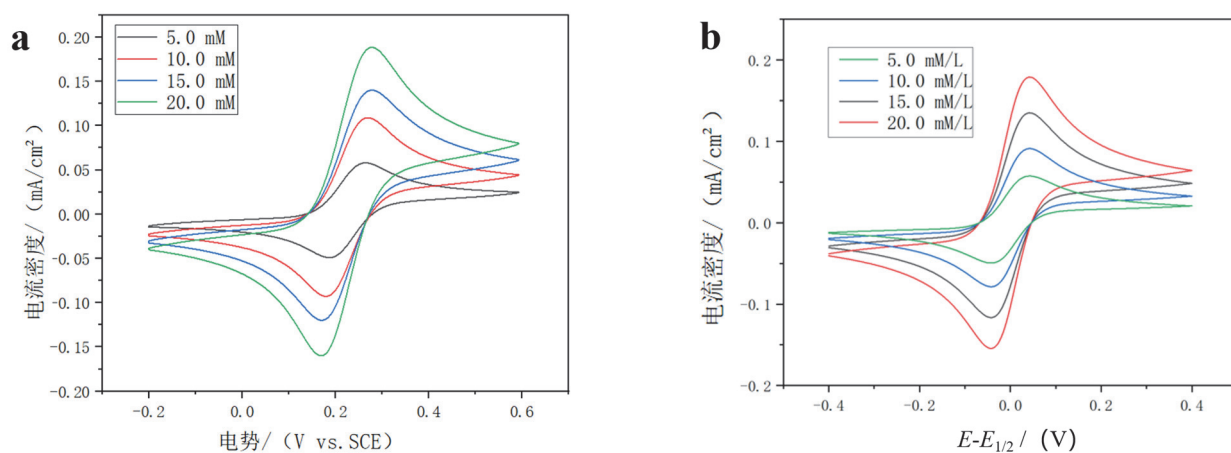


图7 不同电活性物质浓度的循环伏安曲线的对比

(a) 传统实验结果; (b) 仿真实验结果

### 3.5.2 CV仿真的动力学行为可视化

图8(a)展示了一个CV循环过程中电极电势随时间的变化。电极电势从起始电势 $E_i$ 开始线性负向扫描到终止电势 $E_f$ ，再折返回起始电势，完成一个扫描循环。图8(b)展示了整个循环过程中电流随电极电势的变化。扫描刚开始(图8(c), A点)，电极表面浓度和电解液体相浓度一样。但是从拐点处开始，有氧化态物质被还原，将开始产生扩散层，氧化态物质向电极表面扩散，还原态物质向体相扩散，扩散层厚度在扫描期间一直在变大<sup>[11,12]</sup>。当电极表面氧化态物质和还原态的物质浓度相等时(图8(d), B点)，电极电势到达半波电势。随着电势继续变负，当电极表面的氧化态物质浓度到达最低时，还原速率达到最大，还原电流也达到峰值(图8(e), C点)。此时原有电极表面上的氧化态物质基本被还原殆尽，后继的还原电流主要由扩散到电极表面的氧化态物质影响。随着扩散层厚度变大，氧化态物质向电极表面的扩散越来越难，氧化态物质到达电极表面即被还原，还原态物质在电极表面的浓度达到最大(图8(f), D点)。扫描电势从D点开始折返，直至产生明显的氧化电流。当电极表面还原态物质和氧化态物质浓度相等时(图8(g), E点)，电极电势到达氧化峰的半波电势。当电势扫描至F点(图8(h))时，电流出现极大值，此时电极表面处还原态物质的氧化速率达到最大。之后由于氧化电流主要由电解液内部扩散到电极表面的还原态物质被氧化而引起，还原态物质扩散至电极表面的数量越来越少，因此随着电极电势变正氧化电流越来越小，到达起始电势时氧化电流最小(图8(i), G点)。图8中展示了电极电势变正或变负过程中氧化态物质和还原态物质在电极表面的浓度变化，将电流的变化与电活性物质浓度的变化过程直观的动态表示出来，实现了电化学动力学行为的可视化。

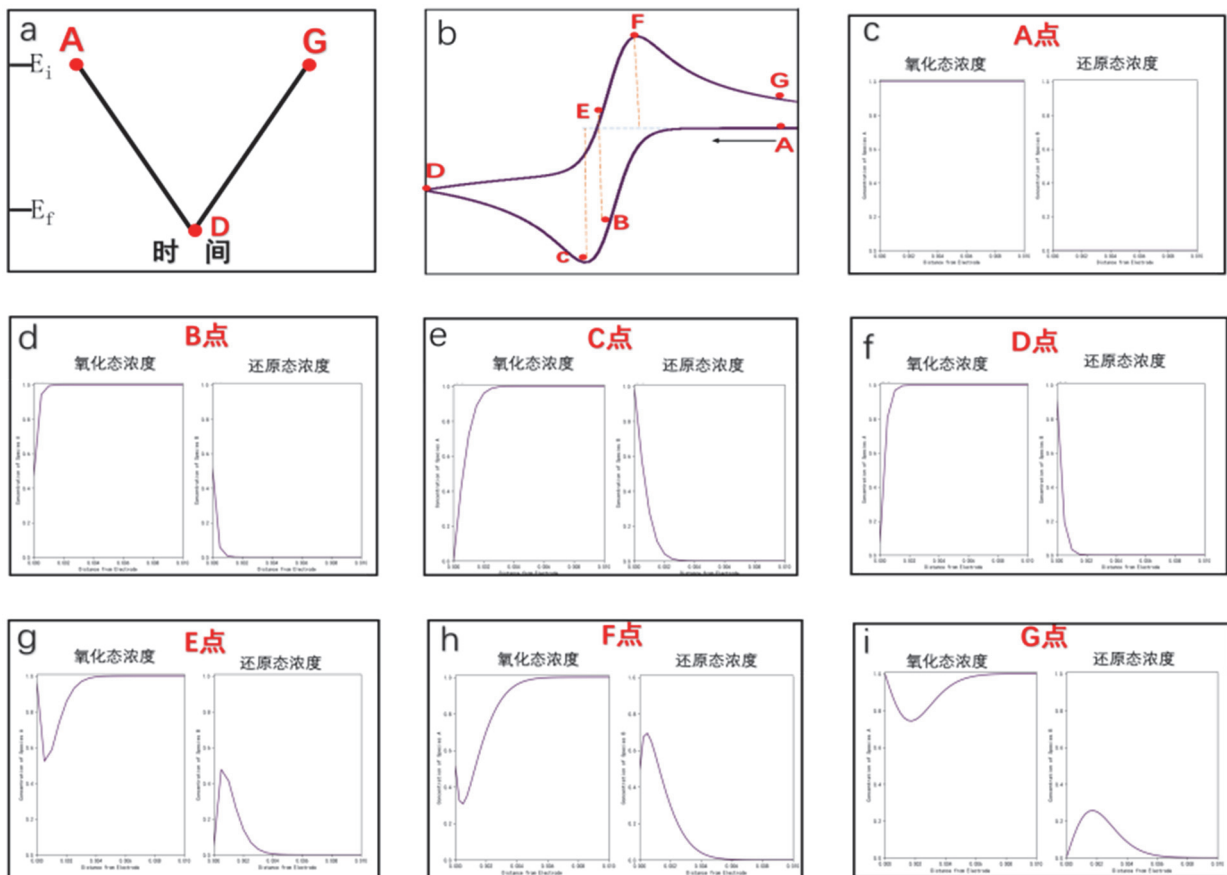


图8 数字化仿真得到的CV曲线与动力学行为可视化

(a) 电极电势随时间的变化关系, (b) CV曲线, (c-i) 氧化态电活性物质和还原态电活性物质在电极/电解液界面处的浓度变化

### 3.5.3 其他参数对CV表征的影响

通过数字化仿真可以清晰地观察扩散系数对于CV曲线形状的影响，CV曲线的峰电流随着扩散系数的增大而增大(图9(a))，扩散层厚度随着扩散系数的增大而减小(图9(b))。

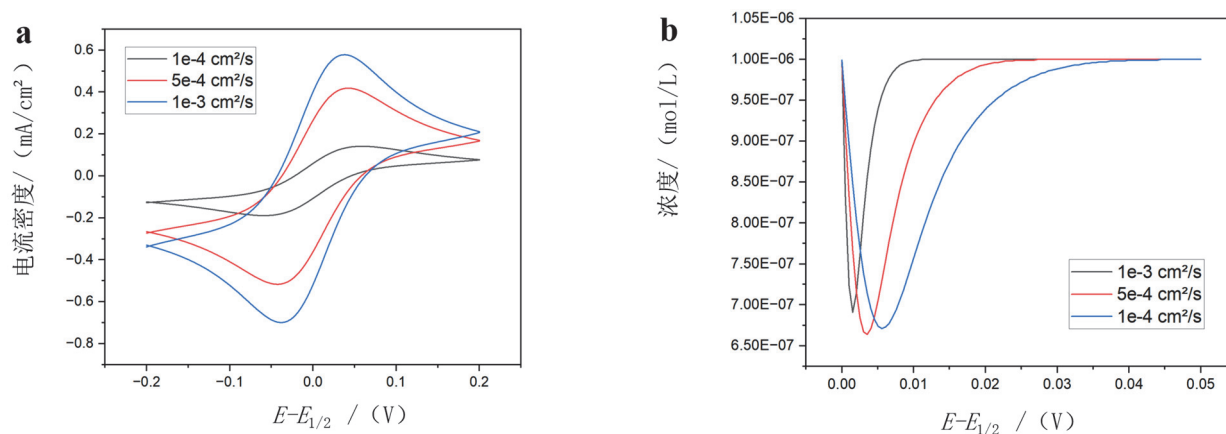


图9 数字化仿真扩散系数对CV曲线的影响

(a) 不同扩散系数的仿真实验结果；(b) 对应的扩散层变化的仿真结果

对于受扩散控制的物质，扩散系数大，说明单位时间内到达电极表面发生氧化还原的物质也越多，导致峰电流增大。一般来说同一种物质在同一电解液中的扩散系数是几乎不变的，传统实验很难进行变化扩散系数的实验，而数字化模拟可以轻松执行这个实验。

在数字化仿真程序中，电势是计算步长的参数，无论实际扫描速率多慢，数字化仿真都可以在较快的时间内给出结果。因此数字化仿真实验可以容易地解决传统实验中扫描速率过慢导致的长时间实验问题，仿真实验模拟一圈的时间仅需几秒钟，效率是传统实验的数百倍。

### 3.5.4 CV数字化仿真实验的特点

① 可以反映电极-电解液界面处反应物和产物浓度变化的图像，传统循环伏安法中无法理解的曲线成因，数字化仿真可以帮助清晰理解CV测试过程中的电化学动力学过程。

② 可以短时间内大量仿真，节省时间、材料成本。

③ 可以仿真传统实验中不易变化的参数值，如扩散系数、电极板面积、转移电子数等，能帮助学生观察出传统实验中不易进行操作的参数对循环伏安曲线的影响。

④ 对于复杂的实际情况未能全部考虑进去，无法完全仿真实验。

## 4 CV仿真实验教学安排

① 理论介绍(1 h)。介绍CV的基本原理、实验目的、应用背景、循环伏安曲线的数据分析、各种参数对反应动力学行为的影响。

② 仿真实验(2 h)。利用CV数字化仿真程序进行实验，研究仿真参数对伏安曲线和氧化态/还原态物质浓度变化的影响。

③ 处理数据，撰写实验报告(1 h)。将传统实验与仿真实验的测试结果进行对比，分析仿真实验和传统实验的一致性和差异性，完成思考题。

## 5 思考题

① CV曲线为什么是鸭嘴型？

② 数字化仿真实验能给传统实验带来什么变化？

③ 数字化仿真实验能否完全取代传统实验? 为什么?

④ 若采用的电极材料(如铁电极)可以发生氧化和还原, 则CV曲线数字化仿真使用的模型与本文是否一样? 试着进行仿真。

## 6 实验效果

数字化仿真实验与传统实验相比, 可以在教学内容上加入更多的参数, 可通过动态过程的直接演示向学生展示机理过程, 在实验场所上也不受专业实验室的限制, 并且可以实现实验过程的本质安全。具体的数字化仿真实验与传统实验效果对比如表1和补充材料中视频所示。

表1 CV数字化仿真实验与传统实验效果对比

项目	传统实验	数字化实验	效果
教学内容	(1) 扫速的影响 (2) 浓度的影响	(1) 扫速的影响 (2) 浓度的影响 (3) 扩散系数的影响 (4) 转移电子数的影响 (5) 动力学行为展示	参与编程, 培养学生创新思维 提高学生主动学习能力 充实教学内容
教学手段	PPT讲解、操作实验、引导想象	PPT讲解、问题导向、动画展示	易于接受学习 提高学生独立思考能力
时间安排	240 min	240 min	同样时间, 学习更多实验内容
实验成本	计算机、电化学工作站、试剂、玻璃仪器	计算机、软件免费	传播绿色化学理念, 易于推广
实验场所	实验室	实验室、教室、图书馆、宿舍	使用范围广
安全性能	存在安全风险	无安全风险	本质安全

## 7 结语

本实验将数字化仿真技术与电化学理论相结合, 开发出一种新的教学工具。与传统的实验教学方法相比, 数字化仿真提供了一种交互性很强的学习方式。学生可以通过调整仿真参数, 实时观察不同条件下的电化学行为, 这种学习体验是传统实验教学难以提供的。此外, 通过与实际实验数据的对比, 本研究还验证了仿真结果的准确性, 确保了教学内容的科学性和实用性。数字化仿真的作用在于它能够将复杂的电化学理论转化为直观的图形和动态过程, 使得学生能够在无需进行实际实验的情况下, 对电化学反应的机理和过程有一个清晰的认识。这种方法的意义在于它不仅提高了教学和学习效率, 还降低了实验成本, 同时减少了实验材料的消耗, 符合绿色化学的理念。通过模拟, 学生可以在虚拟环境中自由探索, 不受实验室条件的限制, 这为实验教学提供了更广阔的空间。

## 8 创新性/特点/特色声明

① 程序自主开发, 免费提供使用, 适于推广。可提供开源程序包供教师和同学二次开发。(源代码见补充材料)

② 充分结合传统实验和数字化仿真实验, 实验过程安全, 为传统教学增加新的授课途径赋能。

③ 学生参与数字化仿真程序的编写, 充分感受数字化技术与化学实验相结合后产生的创新成果。

补充材料: 可通过链接<https://www.dxhx.pku.edu.cn>免费下载。

参 考 文 献

- [1] 郭慧林, 程永亮, 李延, 郭晓辉. 大学化学, **2023**, *38* (9), 293.
- [2] Elgrishi, N.; Rountree, K. J.; McCarthy, B. D.; Rountree, E. S.; Eisenhart, T. T.; Dempsey, J. L. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95* (2), 197.
- [3] 朱卫华, 陈敏, 刘华. 大学化学实验(下册). 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 张华, 刘志广. 仪器分析简明教程. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.
- [5] 刘志广. 仪器分析学习指导与综合练习. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [6] 白泉, 王超展. 基础化学实验IV仪器分析实验. 北京: 科学出版社, 2015.
- [7] 谢乃贤, 高倩蕾. 计算机与应用化学, **1991**, No. 2, 113.
- [8] 袁汝明, 张来英, 徐晓明, 吴平平, 傅钢. 大学化学, **2024**, *39* (1), 1.
- [9] 王川, 陈晓明, 何佩鑫, 金文睿. 高等学校化学学报, **1991**, No. 7, 875.
- [10] 郑子荣, 程津培. 南开大学学报(自然科学版), **1997**, No. 1, 94.
- [11] 巴德, 福克纳. 电化学方法——原理与应用. 第2版. 邵元华, 朱果逸, 董献堆, 张柏林, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [12] 藤岛昭. 电化学测定方法. 陈震, 姚建年, 译. 北京: 北京大学出版社, 1995.