

虚拟实验在大学基础化学实验教学中的探索与应用

马荔*, 张卫, 韩莉, 陈虹锦

上海交通大学化学化工学院, 上海 200240

摘要: 针对复杂酸碱体系的滴定问题和氯化铅溶度积常数测定两个典型基础化学实验进行了虚拟实验设计与建设。借助于软件平台创建的虚拟实验交互系统涵盖了大量的基本理论、实验仪器与设备等信息, 提供了各种反应条件下的组合实验、实验数据的计算结果与检验等, 满足了学生不同层次的学习要求。

关键词: 虚拟实验; 酸碱滴定; 氯化铅; 溶度积常数

中图分类号: G64; O6

Exploration and Application of Virtual Experiment in Teaching of College Basic Chemistry Laboratory

MA Li*, ZHANG Wei, HAN Li, CHEN Hongjin

School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China.

Abstract: Design and construction of virtual experiments were carried out based on two typical basic chemical experiments, complicated acid-base titration and solubility constant measuring of PbCl_2 . A large amount of information about basic theories, experimental instruments and equipment were encompassed by the virtual experiment system which was created by means of a software platform. In addition, series of experiments under different conditions, calculation and inspection of experimental data were provided to meet different learning demands from students.

Key Words: Virtual experiment; Acid-base titration; Lead chloride; Solubility product

化学实验是化学的重要研究方式,但由于化学实验的复杂性和某些特殊性,不能随时随地完成,借助计算机软件营造一个虚拟的实验环境,使演示实验能够接近或优于真实的实验环境,实验者可通过操作虚拟实验系统完成各种预设的、延伸组合的实验项目^[1-3],作为虚拟现实的一个应用领域,虚拟实验已经对中学及各类高等院校的实验教学、远程教学等产生了较为重要的影响^[4-6],建立了新的教学模式,虚拟实验具有如下几个显著的特点^[7]:

- (1) 个性化的虚拟实验能激发学生的学习动力,提高学生自主学习的能力和兴趣;
- (2) 可降低实验成本,节省实验时间,避免实验室常见的人为误操作而造成人员损伤或仪器设备故障;
- (3) 可彻底打破时间与空间的限制,使学生能够观察到宏观与微观的以及需要长时间才能完成的反应变化过程;

收稿: 2017-10-26; 录用: 2017-10-27; 网络发表: 2017-12-25

*通讯作者, Email: mali@sjtu.edu.cn

基金资助: 国家级支撑计划“虚拟实验教学资源构件的多领域建模与装配平台研究”中的“中学教学虚拟实验(化学)的建设”项目(2008BAH29B03, 2008–2010); “上海交通大学虚拟实验建设”项目(2010–2011)

(4) 能将理论课的基本原理与实验过程紧密联系,通过选择不同体系、不同反应条件下的实验,进一步验证并加深理解和掌握相关理论知识,提高应用基础理论解决问题的能力。

我校针对大学基础化学实验教学中的几个典型实验,建设了两维或三维空间的虚拟实验,如酸碱滴定分析实验。酸碱滴定是分析化学的定量滴定分析教学模块中的重要环节,也是其他滴定分析体系的基础,而目前各类高校理论课教材限于篇幅,对滴定过程中的滴定突跃范围随被滴定物的浓度、弱酸(或弱碱)的离解常数、滴定误差要求的不同而改变等问题未做详细的讨论^[8-10],同时配套的实验操作课程限于学时及仪器、试剂的消耗,不可能涵盖各种常见的酸碱滴定体系,而该虚拟实验能提供一个直观的、针对各种常见的酸碱滴定体系进行学习的平台,具有一定的实际应用意义。

再如离子交换-酸碱滴定组合法测定氯化铅溶度积常数实验,该实验涉及了大学化学的溶液平衡体系中的沉淀溶解平衡、溶度积计算、离子交换等基本原理,但由于铅离子剧毒,对实验者和实验室技术人员都具有潜在的危害,且废液处理也有特殊要求,目前大多数高校已不再开设该实验。但该实验对于学生理解溶度积规则及其应用非常重要,其涉及的理论知识是大学化学教学体系中非常重要的内容,因此,目前也有部分高校提出将这一类实验改为微型实验以节省实验试剂的用量、降低成本及减少对实验操作者和环境生态的危害^[11]。尽管微型实验在一定程度上解决了常规氯化铅溶度积常数测定实验的现实性问题,但如果选修学生人数众多,基于污染物排放总量控制的要求,亦无法从根本上解决铅离子排放的危害问题,而测定氯化铅溶度积常数虚拟实验的建设可以有效地解决上述矛盾。

1 虚拟实验平台建设

现以上述两个虚拟实验平台为例,详细说明虚拟实验教学模式在大学基础化学实验教学中的建设与应用。

1.1 酸碱滴定分析虚拟实验的建设

酸碱滴定分析虚拟实验的设计旨在模拟各种常见酸碱体系滴定过程的同时,梳理各酸碱滴定体系的滴定突跃范围的影响因素,尤其是因滴定误差要求不同而产生的影响,另外辅以理论知识练习题讨论,加强和巩固学生对相关理论知识的掌握。

该虚拟实验包括“实验目的”“实验原理”“实验仪器及试剂”“预备知识”“实验内容”“理论知识练习题”六个模块,界面如图1所示。



图1 酸碱滴定分析虚拟实验界面

“实验目的”“实验原理”“实验仪器及试剂”三个模块与传统的实验教材涵盖的内容相同,“预备知识”模块主要包括常用酸碱指示剂的变色范围、酸碱滴定曲线的计算与绘制、各种酸碱滴定体系的终点误差计算公式三部分内容,让学生能更深入、详细地了解各种酸碱滴定体系的滴定过

程。

“实验内容”模块是该虚拟实验的主体部分，同时提供了强碱滴定不同酸、强酸滴定不同碱，以及未知浓度酸(或碱)溶液样品测定三个部分模拟滴定操作练习，如强碱滴定酸体系，滴定剂 NaOH 可选择 0.1000 、 $0.0100 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 两种浓度，被滴定酸可选 HCl、HAc 或六次甲基四胺，选择后在窗口中可查看滴定曲线，并可用鼠标拖动滴定曲线上的“”圆圈图标，可显示滴定过程中体系 pH 随滴定体积的变化。另外，选择“显示滴定突跃范围”选项则可以查看计量点 pH、不同终点误差要求条件下的酸碱滴定突跃的 pH 范围，为选择合适的酸碱指示剂提供理论依据，操作界面如图 2 所示。

此外，“显示综合图”选项，可显示不同浓度的各滴定体系的滴定曲线，能比较出滴定突跃范围随被滴定酸的浓度、弱酸离解常数的变化如图 3 所示。

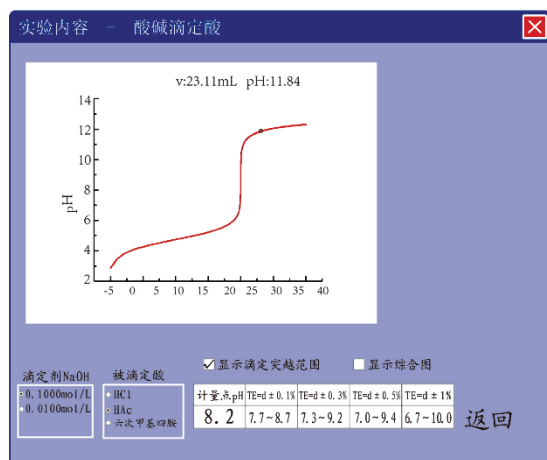


图 2 酸碱滴定突跃范围示意图

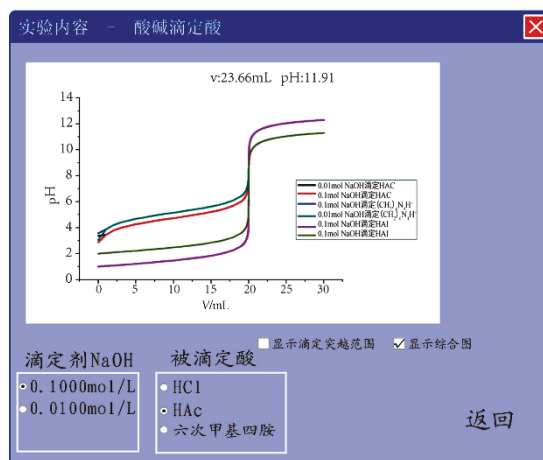


图 3 不同浓度强碱滴定酸体系的滴定曲线

选择“返回”按钮可退至“实验内容”模块界面窗口，可再选择其他滴定操作实验练习。

类似地，强酸滴定碱体系中滴定剂 HCl 也提供 0.1000 、 $0.0100 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 两种浓度，被滴定碱可选 NaOH 或氨水进行滴定练习。

未知浓度的酸碱滴定体系中滴定剂设置为 $0.1000 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 和 NaOH 两种选项，被滴定物(体积设定为 25.00 mL)的选项随所选滴定剂的不同而变化，如选择 HCl 作为滴定剂，被滴定物可选择的物质为 NaOH 和氨水，若选择 NaOH 作为滴定剂，被滴定物选项变为 HCl、HAc、六次甲基四胺三种酸，选择合适的酸碱指示剂后，即可开始模拟实验，可查看滴定过程中 pH 随着滴定剂体积增大的变化规律以及锥形瓶中模拟的酸碱指示剂颜色变化，若选择“显示终点误差”选项，则可显示整个滴定过程的终点误差变化，如图 4 所示。

在整个模拟滴定过程中，可随时按“暂停”按钮暂停实验，当指示剂颜色在计量点附近有突变时，按照消耗的滴定剂体积，可模拟计算出未知酸或碱的浓度。

此外，“理论知识练习题”模块中包括与酸碱滴定理论和实验相关的 10 道选择题，在模拟虚拟实验前进行练习或完成虚拟实验后对理论知识进行总结，选择“提交”后，虚拟实验系统还会给出正确率，如图 5 所示。同时，还设“是否显示正确答案”选择命令，用红色显示错误题目代码，供学生进一步检查或思考错误的题目，提高学习效果。

1.2 氯化铅溶度积常数测定虚拟实验的建设

综合考虑离子交换-酸碱滴定组合法测定氯化铅溶度积常数的实验原理及主要操作步骤，虚拟实验将整个测定过程分为阳离子交换柱的装柱与活化、氯化铅饱和溶液的交换与洗涤，以及酸碱滴定

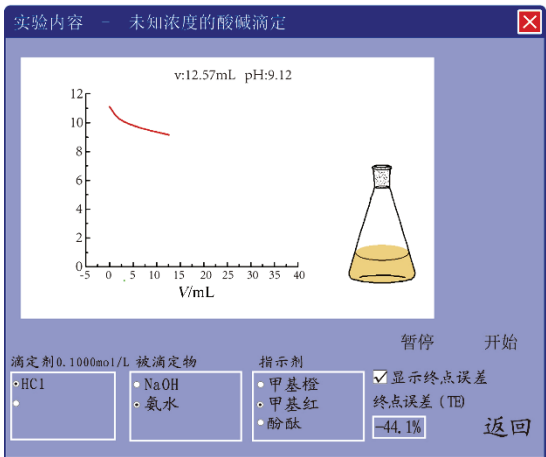


图 4 未知浓度酸碱滴定体系示意图

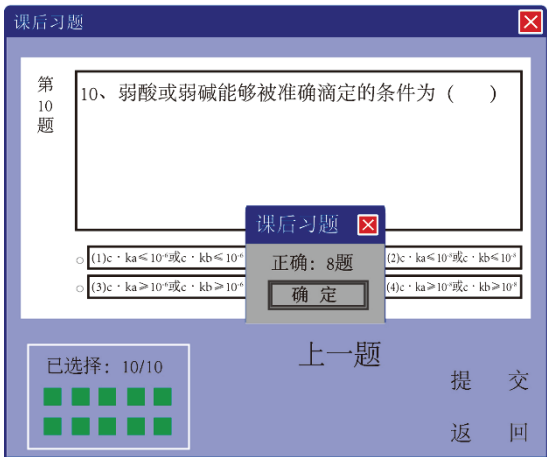


图 5 “理论知识练习题”模块示意图

法测定铅离子交换出的氢离子浓度及计算氯化铅溶度积常数三个主要场景进行设计，基于更形象化考量，设计为三维虚拟实验。

虚拟实验采用菜单命令的形式进行控制，可通过点击鼠标查看相关内容、学习基本理论和进行虚拟实验操作，主界面如图 6 所示，各菜单命令及其实现的功能如表 1 所示。

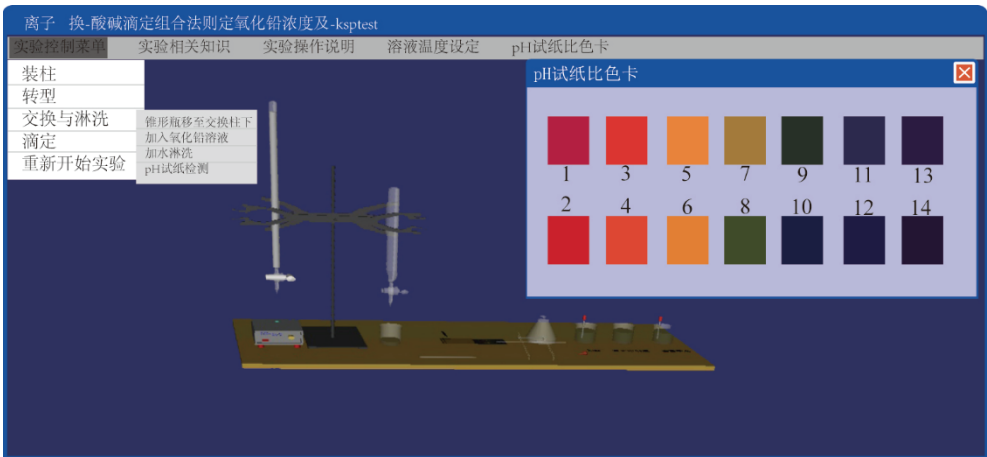


图 6 离子交换-酸碱滴定组合法测定氯化铅溶度积常数虚拟实验界面

表 1 测定氯化铅溶度积常数虚拟实验的菜单命令及其功能

菜单	功能
实验相关知识	查看并学习包括实验目的、原理、仪器与设备、预备知识和实验步骤五个模块的内容，其中预备知识部分涵盖了本实验的相关理论知识，学生可利用该模块进行自主学习，掌握本实验的基本原理及计算公式
实验操作说明	查看本虚拟实验的基本操作方法
实验控制菜单	包括装柱、转型、pH 试纸检测、去离子水淋洗、锥形瓶移至交换柱下、加入氯化铅溶液滴定、锥形瓶移至滴定管下、添加溴百里酚蓝指示剂、快速滴定(或慢速滴定)、停止滴定等命令，完成各实验操作环节
溶液温度设定	设定反应温度值
pH 试纸比色卡	打开“pH 试纸比色卡”，进行颜色对比，确定 pH

整个虚拟实验过程采用序贯式的流程设计, 针对每一个关键步骤, 如反应温度的设定、离子交换柱的活化、离子交换等操作是否完成都设有特定的提醒标签, 使学生能够逐步完成预设的所有实验环节, 交互信息简单明了, 方便操作。

为更准确、全面地模拟现实, 在虚拟实验的设计过程中, 添加了反应温度的设定选项, 这是由于氯化铅溶解过程是一个吸热过程, 饱和溶液的浓度随温度升高而增大, 氯化铅的溶度积常数也显著不同^[12], 利用文献数据, 采用数值分析方法中的拉格朗日线性插值函数构造了 273–308 K 温度范围内氯化铅溶度积常数 K_{sp} 与温度 T 之间的插值函数:

$$K_{sp}(T) = 0.0046T - 1.6 \times 10^{-5}T^2 + 1.9 \times 10^{-8}T^3 - 0.44$$

利用该插值函数, 虚拟实验系统给出可供选择的反应温度范围内的溶度积常数 K_{sp} , 与学生的实验计算结果相比较, 给出虚拟实验结果准确度的评价。学生可以选择不同的反应温度进行模拟测定与计算, 更深刻地理解反应温度对实验结果的影响, 进一步掌握氯化铅溶度积常数随温度的变化规律。

虚拟实验系统将 NaOH 标准溶液的浓度设计为 0.0490–0.0510 mol·L⁻¹ 范围内的随机数据, 这样一方面强调 NaOH 并非基准物, 所配制的标准溶液需要标定, 故其数值并不恒定; 另一方面也增加了虚拟实验的趣味性, 每一次的实验操作都有不同的虚拟现实的感受, 且在滴定过程中设置了“快速滴定”和“慢速滴定”两种方式可供选择, 方便学生观察实验过程及判断滴定终点。

滴定结束后, 系统弹出“实验数据记录与计算”对话框, 显示出本次虚拟实验的反应温度、NaOH 标准溶液的浓度以及滴定终点消耗的滴定剂体积。根据实验数据, 利用公式, 学生需要自行计算, 并将计算结果填入 K_{sp} 文本框中, 点击“检验结果”, 可给出本次实验的实验结果误差, 实验数据记录与计算对话框及检验结果如图 7 所示。

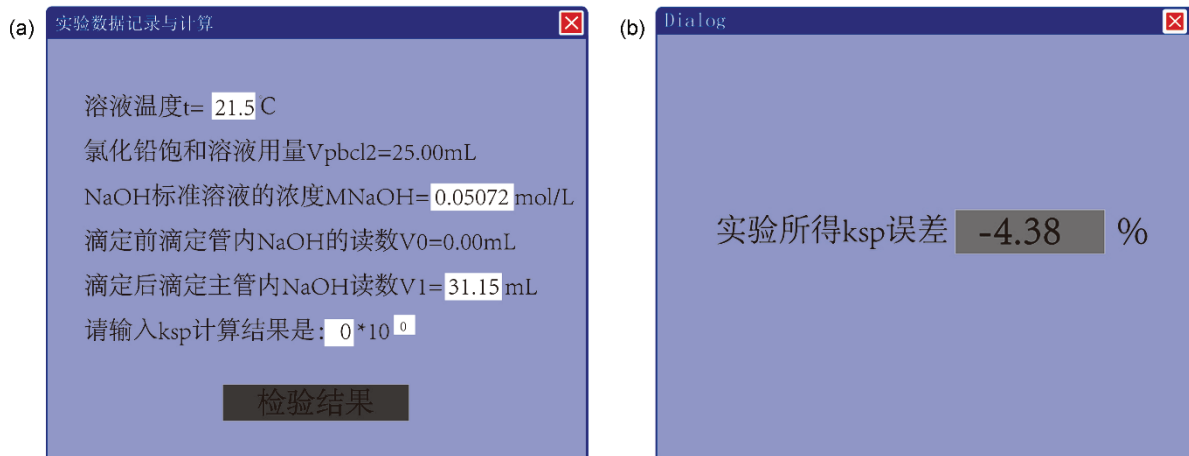


图 7 实验数据记录与计算对话框及误差检验结果示意图

(a) 实验数据记录与计算对话框; (b) 误差检验结果

在“实验控制菜单中”选择“重新开始实验”命令, 准备开始新一轮的实验。

2 结论

借助于软件平台创建的虚拟实验交互系统可涵盖化学实验的多种基本信息, 能提供各种条件下的实验过程、实验结果与检验等, 可以满足学生不同层次的学习需求。

(1) 酸碱滴定分析虚拟实验中各模块内容以单独的新窗口形式展开, 从理论知识的介绍、模拟各种酸碱体系的滴定过程到理论知识练习题的巩固, 构成一个较为完整的虚拟实验平台, 进一步拓

展理论课与实验课教材的内容,比如增加讨论酸碱滴定突跃范围与终点误差要求之间的对应关系等。通过本虚拟实验的学习可以让学生对酸碱滴定过程有更深刻和直观的理解,对掌握相关酸碱理论知识以及具体实验操作具有良好的指导作用,也为其他溶液平衡体系的定量滴定分析的学习打下良好的基础。我们将这一系统应用在酸碱滴定分析的滴定误差部分理论课教学中,学生通过模拟各种复杂酸碱体系的滴定,对酸碱滴定误差的理解更加直观透彻。

(2) 氯化铅溶度积测定虚拟实验的建设,一方面通过实验数据的验证,能使学生对沉淀溶解平衡、溶度积计算、离子交换原理、酸碱中和反应以及指示剂的选择等基本原理解理解和掌握;另一方面能在线模拟实验数据的处理、评价实验结果,进一步提升了教学效果,填补了我校溶度积常数定量分析实验的空白。同时,虚拟实验中构造了氯化铅溶度积常数与温度 T 之间的插值函数,可模拟不同温度条件下的实验过程,对实验内容进行拓展和补充,拓宽学生获取知识的途径,提高学习兴趣。

虚拟实验不仅可以节约实验成本,使学生在虚拟实验平台完成实验内容,节省实验时间,同时避免了部分实验造成的有毒有害废弃物排放。因此,可以相信,虚拟实验的建设作为大学基础化学实验教学的一种新模式、新探索,必将成为学生理想的自主学习、深入理解和掌握化学实验的相关理论知识和基本实验操作技能等的新平台。

参 考 文 献

- [1] 李婉,黄微,刘济红,高明丽,朱平平. 大学化学, **2017**, 32 (7), 18.
- [2] 肖玲,李红霞. 新课程, **2013**, No. 1, 109.
- [3] 陈雅. 广东技术师范学院学报, **2003**, No. 6, 102.
- [4] 廖仕东,徐显秋. 重庆科技学院学报(社会科学版), **2005**, No. 3, 115.
- [5] 杜俊敏,李建中. 交通高教研究, **2003**, No. 3, 63.
- [6] 周建国,王小兰. 实验室研究与探索, **2011**, 30 (10), 78.
- [7] 于洪涛,施德路,刘国海. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), **2008**, 23 (4), 386.
- [8] 史启祯. 无机化学与化学分析. 北京:高等教育出版社, 2001: 212-220.
- [9] 李运涛,杨秀芳,黄良仙. 无机及分析化学. 北京:化学工业出版社, 2010: 71-78.
- [10] 陈虹锦,谢少艾,张卫. 无机及分析化学. 第2版. 北京:化学工业出版社, 2008: 271-282.
- [11] 宋龄琰,梁淑芬,蒋笃孝,吴柳英,王倩. 广东化工, **2006**, 33 (11), 22.
- [12] 杨立新. 大学化学, **1996**, 11 (5), 34.