

智能手机在化学实验中的应用

董志强, 刘丰俊[†], 翁玉华, 潘蕊, 颜长明, 许振玲, 张春艳, 吕银云, 欧阳小清, 阮婵姿, 任艳平*

厦门大学化学化工学院, 化学国家级实验教学示范中心(厦门大学), 福建 厦门 361000

摘要: 分类介绍了智能手机在化学实验中的应用, 总结了基于智能手机应用的化学实验方法的特点以及智能手机应用于化学实验教学的优点, 并对其在化学实验中的应用前景进行了思考和展望。

关键词: 智能手机; 应用; 化学实验

中图分类号: G64; O6

Application of Smartphones in Chemistry Laboratory

Zhiqiang Dong, Fengjun Liu [†], Yuhua Weng, Rui Pan, Changming Yan, Zhenling Xu, Chunyan Zhang, Yinyun Lü, Xiaoqing Ouyang, Chanzi Ruan, Yanping Ren *

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (Xiamen University), College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, Fujian Province, China.

Abstract: This article introduces the application of smartphones in chemistry laboratory teaching in a comprehensive way. We summarize the characteristics of chemical experiment methods based on smartphones and the advantage of smartphones in chemistry laboratory teaching, and make an outlook of the application of smartphones in chemistry laboratories.

Key Words: Smartphone; Application; Chemistry laboratory

随着科技的发展, 手机也在不断更新换代, 现代的智能机集成了高清摄像头、各种传感器元件、强大的处理器和高清显示屏等, 通过各种 App (Application) 软件, 可以实现数码成像、图像处理、数据传输等功能, 并且智能手机具有方向、陀螺仪、光线感应、重力、旋转矢量等多种传感器^[1], 通过这些传感器, 利用不同 App, 可以实现对长度、位置、方向、光强、重力等测量, 这为智能手机应用于化学实验提供了可能。

智能手机应用于化学实验主要是基于其如下特点:

- 1) 智能手机的集成度高, 集成了高清摄像头、强大的处理器、高清显示屏及各种传感器等, 不同的功能可以适用于不同的实验设计中。
- 2) 智能手机具有开放式的外接端口, 结合相关配件可搭建能使用光度法、荧光法等方法的分析仪器装置, 并且可以进行多种信号的处理, 应用范围广。

收稿: 2020-05-13; 录用: 2020-06-08; 网络发表: 2020-06-18

[†] 2016 级本科生

*通讯作者, Email: ypren@xmu.edu.cn

基金资助: 2018 年度厦门大学教学改革研究项目(JG20180132); 2018 年福建省本科高校教育教学改革项目(FBJG20180097); 2018 年厦门大学教学改革研究项目(JG20180105); 国家基础科学人才培养基金项目(J1310024)

3) 智能手机本身可连接网络, 可以实现实时跟踪测定、即时信号分析以及实验数据的云处理。

4) 智能手机的便携性强, 配合一些外部集成的模块, 可以实现现场定性、定量分析测定等。

基于上述特点, 人们已经利用智能手机中的硬件和软件进行了化学实验方法的建立、改进等。智能手机在物理学、生物识别等领域也有着广泛的用途。如利用智能手机的各种传感器设计实验, 实现了对加速度、角速度、磁感应强度、声音频率等物理量的测量^[2]。在生物识别领域, 利用智能手机也已经实现了人脸、指纹、语音等生物信息的识别^[3]。此外, 在地震预警^[4]、大气探测^[5]等领域, 智能手机也有着广泛的应用。

本文主要根据文献报道的基于智能手机不同功能的应用所设计的实验, 对智能手机在化学实验中的应用进行了分类总结。

1 基于智能手机数码成像的实验方法

基于智能手机数码成像的实验方法主要是利用了智能手机的数码成像功能, 通过智能手机的摄像头将处理后的实验待测样品进行数码成像, 然后对成像图像进行定性或定量分析。按照不同的应用, 将基于智能手机数码成像的分析方法进行如下分类介绍。

1.1 数码比色分析法

数码比色分析法是通过对数码成像的有色物质溶液颜色的深浅来确定待测组分含量的分析方法^[6-12], 即对一系列标准溶液和待测溶液进行数码成像, 利用软件提取出不同浓度溶液所对应的颜色数据, 通过建立浓度与提取的颜色数据的标准曲线来对待测样品进行分析。数码比色分析法简单、便捷, 只需要一台数码相机就可以实现。而目前智能手机数码成像功能强大, 还可通过 App 对成像的颜色数据进行提取。因此相对于数码相机, 基于智能手机的数码比色分析法用起来更加简单、方便。

目前, 数码比色分析法颜色数据可以采用智能手机 App 或者电脑软件进行提取。常用的颜色数据提取的 App 软件有 Color Grab、Colormeter 等; 而电脑提取颜色数据主要是通过 Photoshop 来进行。

2007 年杨传孝等^[6]首先采用数码比色法对水样中总磷的含量进行了测定, 即利用数码相机对 KH_2PO_4 标准溶液与 $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ 、酒石酸锑钾及抗坏血酸生成的蓝色配合物和待测样品进行数码成像, 利用软件提取不同颜色梯度的灰度值与 KH_2PO_4 浓度建立线性关系, 对水样中总磷含量进行测定。随着智能手机硬件的发展, 智能手机数码成像能力大幅提高, 2014 年申贵隼等^[7]利用智能手机数码比色法测定了土壤中总磷的含量。

基于智能手机的数码成像比色法操作简单、方便, 并且不需要专业设备, 近几年来, 有关智能手机应用于化学实验教学的相关报道很多。孙丹等^[8]利用智能手机数码比色法, 通过 Fe(III) 与 KSCN 显色后, 其数码成像的灰度值与 Fe(III) 的浓度呈线性关系, 测定了补铁剂中铁的含量。丁宗庆等^[9]采用了智能手机数码比色法, 将水样中 Cr(VI) 经二苯碳酰二肼显色后, 其数码成像的亮度值与溶液中 Cr(VI) 的质量浓度呈线性关系, 测定了水样中 Cr(VI) 的含量。此方法简单、便捷, 引导学生可使用智能手机自行设计检测, 可极大地激发学生的实验兴趣和创新、探索精神。

在国外基于智能手机数码成像的比色法测定物质含量的报道也很多。Gee 等^[10]将数码比色法应用于蛋白质测定的两种常用方法, 即考马斯亮蓝法和双缩脲法。通过两种方法中蛋白质浓度与数码成像颜色数据之间的线性关系, 来测定蛋白质浓度, 并将测定结果与分光光度法进行了比较, 结果表明基于智能手机的数码成像比色法是可行的。

Dangkulwanich 等^[11]利用了智能手机数码比色法研究了淀粉酶随温度的变化对淀粉水解作用的影响。由于溶液中淀粉颗粒对光的反射和散射, 使得分光光度法的使用受到限制, Dangkulwanich 等通过搭建特殊的成像平台, 建立了基于智能手机数码成像的比色法, 即使溶液中存在淀粉颗粒的情况下, 也可以进行定量比色分析。该方法可以有效地量化含有样品的不透明有色溶液中化合物的浓

度, 这有效弥补了分光光度法的不足。

Montangero 等^[12]在中学实验教学中基于 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液中 Cu^{2+} 浓度与溶液颜色近似线性关系, 利用智能手机数码成像对未知溶液中 Cu^{2+} 浓度进行测定。该实验可用于课堂演示, 启发学生可利用自己的智能手机来完成相应实验, 这种新颖的教学方式可以让学生对化学有更多感性的认识, 引起学生对学习化学的兴趣。

此外, 还可利用数码比色法来对化学反应动力学进行研究。如 Knutson 等^[13]利用了智能手机数码摄像的方法对结晶紫与 NaOH 反应动力学进行了研究。将配制好的系列标准溶液和待测溶液放置在计时器旁, 用智能手机拍摄整个反应过程, 采集不同时间点的图像, 通过谷歌浏览器插件 ColorPick Eyedropper 来读取不同时间点样品的 RGB (Red、Green、Blue) 值, 然后利用标准曲线法来计算反应级数。由此可以看出, 数码比色法可用于涉及颜色变化反应的反应动力学参数的测定; 这种方法简单、便捷、不再需要其他昂贵的仪器, 适合高中生或大学生用于探索化学动力学方面的实验。

目前, 智能手机的数码成像功能非常强大, 已经可以媲美专业的数码相机, 配合手机颜色数据提取 App 软件可以实现颜色数据的实时提取及分析。基于智能手机的数码成像比色法具有一般比色法所具有的简单、方便的特点, 同时测量准确, 可应用于样品的现场测定、课堂演示及学生的研究性实验中。

1.2 光谱分析法

智能手机光谱分析法主要是基于智能手机的数码成像功能, 通过利用智能手机及其他相关配件搭建的光谱仪得到的光谱图来对样品进行定性和定量分析的一种方法。

秦永乐等^[14]设计了基于智能手机的光谱仪(如图 1 所示), 该装置以手机内置闪光灯为光源, 以 DVD 光盘作为衍射光栅, 利用智能手机的数码成像功能进行光谱分析。在使用前, 利用窄带滤光片对波长进行校准, 利用 Image J 软件将智能手机捕获的光谱图像转化为灰度值, 通过扣除溶剂背景, 得到对应样品的吸收光谱强度曲线。最后, 基于朗伯-比尔定律, 在浓度与吸光度之间建立定量检测的标准曲线来对待测样品进行测量。采用此套装置实现了水中 Cr(VI) 的快速定量检测, 检测结果与常用的分光光度法结果一致。

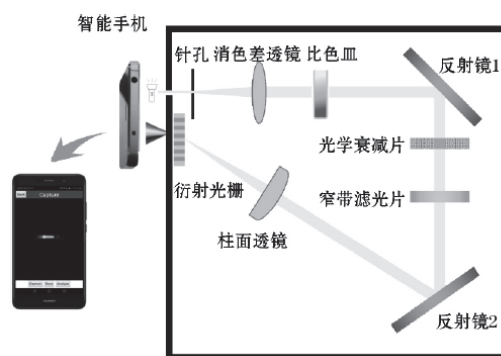


图 1 秦永乐等^[14]设计的实验装置概念图

史建政^[15]设计了一款便携式手机光谱仪并研发了相应的 App, 该光谱仪由刻划型光栅、准直镜、成像镜和智能手机组成。实验装置的分辨率为 4 nm, 分别以 LED 灯、Na 灯为光源, 分别用照度计和所研制的便携式手机光谱仪系统来检测其光学参数, 并将所测数据进行对比以确认所组装的便携式手机光谱仪及其图像处理软件的可靠性。丁兆强^[16]设计了一种基于智能手机的便携式生化光谱分析装置, 该装置由激发光的驱动电路和集成化的系统检测装置构成。整个硬件电路的电源都由手机提供, 非常方便。遮光盒巧妙地使用光纤传导激发光, 可以灵活改变光的照射方向。通过实验表明, 该套装置和 App 程序稳定、可靠。

王军等^[17]设计了一款简易的手机光谱仪(如图 2 所示)。该光谱仪由智能手机和一个暗盒组成,

暗盒两端分别为透射光栅和狭缝,手机摄像头用于采集衍射光谱图像,通过手机 App 显示光谱和吸光度曲线。利用该实验装置实现了对橄榄油真伪的鉴别,这种简易手机光谱仪可视化效果好、成本低。

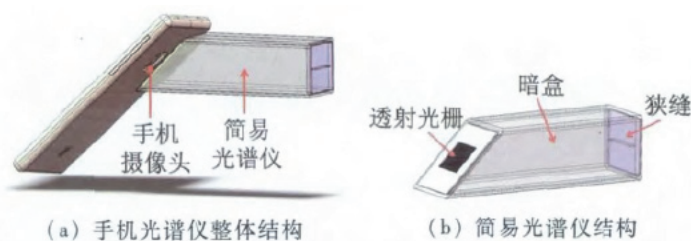
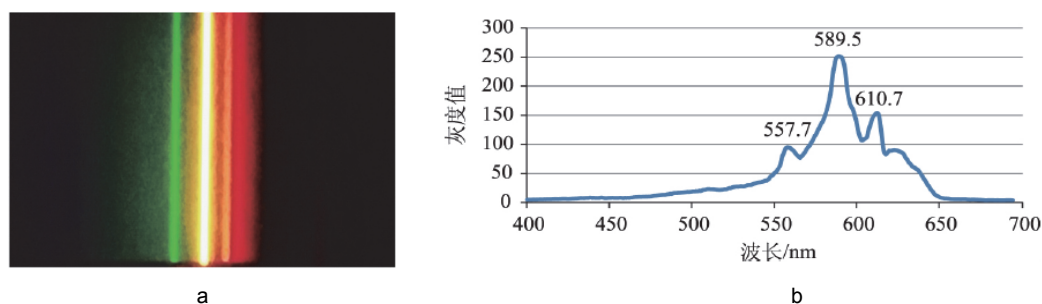


图2 王军等^[17]的实验装置图

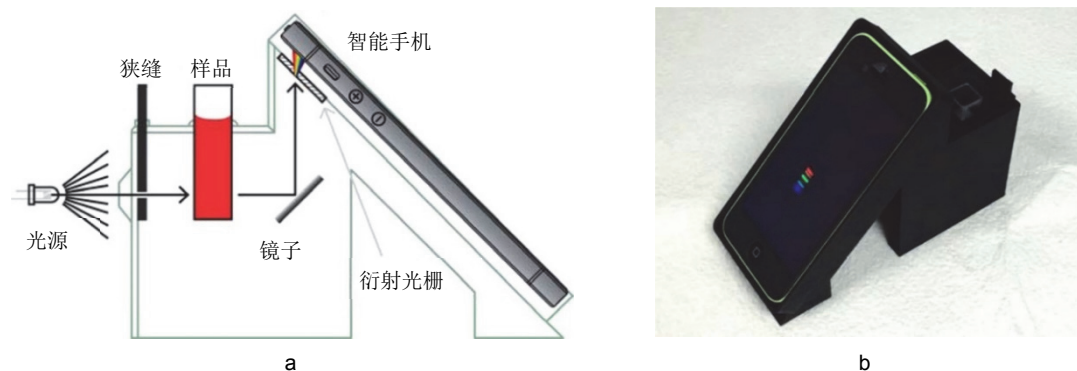
李嘉^[18]使用智能手机和手持式分光镜设计出可以快速准确记录混合或单一金属离子光谱图的简易实验装置。该装置利用手持式分光镜对入射光进行分光,通过智能手机的数码成像功能来记录光谱,然后将得到的光谱图结合 image J 软件绘得波长-灰度值图(如图 3 所示),进而确定金属离子的种类。此装置简单、便捷,不需要其他昂贵的仪器,可用于实验教学,通过此实验可以让学生初步了解光谱分析技术的基本原理。



a: 实验中混合物的光谱图 b: 混合物的波长-灰度图

图3 实验中混合物的光谱图及混合物的波长-灰度图

Grasse 等^[19]利用 3D 打印技术制造出了模块化程度高,且小巧便携的分光光度计(如图 4 所示)。该装置由光源、狭缝、比色皿架、反光镜、衍射光栅、智能手机和其他支持部件构成,其中外壳、狭缝等都是通过 3D 打印技术制造。该分光光度计具有开放式特点,可以使学生有效地观察到分光光度计的各个组件,了解各个组件的作用,这样有利于学生更好理解仪器构造和测量原理。



a: 智能手机分光光度计的设计图 b: 智能手机分光光度计的实物图

图4 Grasse 等^[19]设计的智能手机分光光度计

Jian 等^[20]设计了一种基于 3D 打印技术制造的小型手持式智能手机光谱仪, 该装置以太阳光为光源, 太阳光穿过样品后经过光栅, 再利用智能手机单色相机记录光谱。以太阳光为光源则不需要其他光源设备, 并且在整个可见光谱范围内分布更均匀。单色相机代替彩色相机用于光谱图像记录, 不仅增加了光谱分辨率和光收集效率, 而且避免了色彩重叠。通过开发配套的 App, 可快速、自动地进行光谱校准和分析。该实验装置具有接近商用酶标仪的高灵敏度和准确性, 已成功用于 AIV H7N9 抗体和 PCV2 抗体的检测。

综上所述, 基于智能手机的光谱分析法利用了智能手机的高清摄像头, 对得到的光谱图进行高清的数码成像, 利用光谱成像来对样品进行定性和定量分析。基于智能手机搭建的光谱仪不具备成品商用仪器的高精度、高稳定性等特点, 因此在对精度要求较高的科研实验中应用较少, 但是自组装置具有的可拆卸、构件可视化、便携、成本低等特点, 适合应用于实验教学中。如在实验教学中缺乏专业仪器时, 可以启发学生利用智能手机搭建相应装置解决实验中遇到的困难, 通过启发学生思考—动手搭建装置—完成实验的过程, 培养学生的动手能力和创新意识; 同时通过仪器的搭建, 也有利于学生对仪器结构和原理有更深刻的认识和理解。

1.3 显微观察法

显微观察法主要通过使用智能手机搭建的显微镜对实验过程、现象和物质的结构等进行显微观察。手机显微镜的结构与普通的光学显微镜基本相同, 通过搭建可与手机摄像头配合的显微镜头, 利用智能手机的数码成像功能来记录观察的图像。

在这方面国外起步较早, 如 Skandarajah 等^[21]及 Meng 等^[22]由智能手机、LED 光源、目镜、物镜及其他支持部件都搭建了手机显微镜, 其分辨率可以达到微米级, 可用于红细胞涂片、蚕豆表皮切片等的观察。

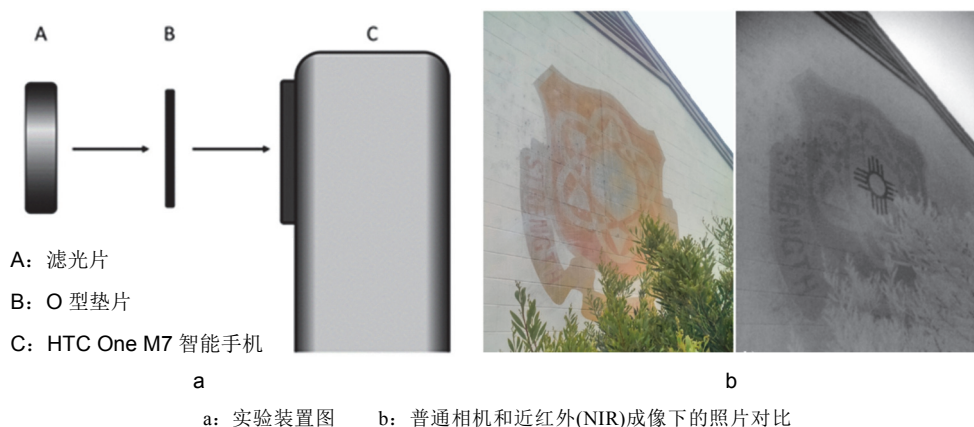
美国西北太平洋国家实验室设计了一种新的显微镜头^[23]。该镜头由玻璃珠和相应的支持组件构成, 不同玻璃珠可以实现不同的放大倍率, 最大可以达到 350 倍的放大效果。Lumetta 等^[24]利用这种镜头和智能手机搭建的手机显微镜实现了对氯化钠晶体的溶解和结晶过程的显微观察, 取得了不错的实验效果。

1.4 热成像分析法

智能手机搭配显微镜头配件可以成为手机显微镜, 而搭配其他相应配件可以变成另一种具有不同功能的装置。Xu 等^[25]使用智能手机及热成像配件 FLIR One Pro 组装了一台智能手机热成像仪, 其测温范围为 $-20-400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可满足一般的化学实验要求。他们利用智能手机热成像仪观察了 CH_3COONa 过饱和溶液的结晶、不同溶液的混合、浓 H_2SO_4 稀释、高分散金属粉末自燃等过程的热量吸收、释放、传递等。通过搭建的智能手机热成像仪, 学生可以在自己的智能手机上看到肉眼看不见的热传递现象, 并且可以拍摄热成像图片并随时记录实验过程。智能手机热成像仪也可用来研究系统中温度的空间分布。通过实验加深学生对所学知识的理解, 促使理论与实验的相互融合。

1.5 近红外检测法

有关利用智能手机的近红外检测法的文献报道还较少。Torres 等^[26]通过利用智能手机及波长为 750 nm 的滤光片设计了一种可用于文物检测的近红外(NIR, Near Infrared)成像装置(如图 5a 所示)。该装置可以有效地改善被其他颜色掩盖的底纹的可见性, 检测艺术家的构图变化, 以及因损坏或老化而掩盖的原始构图元素(如图 5b 所示)。近红外检测法的实现和应用表明智能手机可以应用于文物鉴定、痕迹鉴定等领域中, 这类基于智能手机的检测装置具有很好的便携性, 且成本低, 适用于多人同时现场勘查。也可以将此装置用于教学演示。通过现场演示来向学生介绍红外反射成像等概念, 或让学生通过自己搭建的装置进行现场鉴定等。

图5 Torres 等^[26]设计的实验装置及实验效果图

1.6 荧光检测法

基于智能手机的荧光检测法同样利用的是智能手机的数码成像功能捕捉荧光图像，然后通过对荧光强度的分析，运用标准曲线法等方法实现对未知样品含量的测定。

Yu 等^[27]利用智能手机、衍射光栅、柱面透镜、激光光源等搭建了一台荧光光谱仪，将搭建的光谱仪用于 RNA 突变碱基的检测，获得了满意的效果。Lian 等^[28]合成了一种功能化材料，这种材料可以和苯基乙醛酸进行反应而产生具有荧光性质的物质，他们基于此原理设计了一种测试试纸，通过智能手机采集测试试纸的荧光图像，实现了对苯基乙醛酸浓度的检测。Zeinhom 等^[29]利用智能手机的数码成像功能设计制造了一台基于智能手机的便携式荧光成像仪，并用于酸奶和鸡蛋中的大肠杆菌 O157: H7 病原体的检测，其检出限分别为 1 和 10 CFU·mL⁻¹。

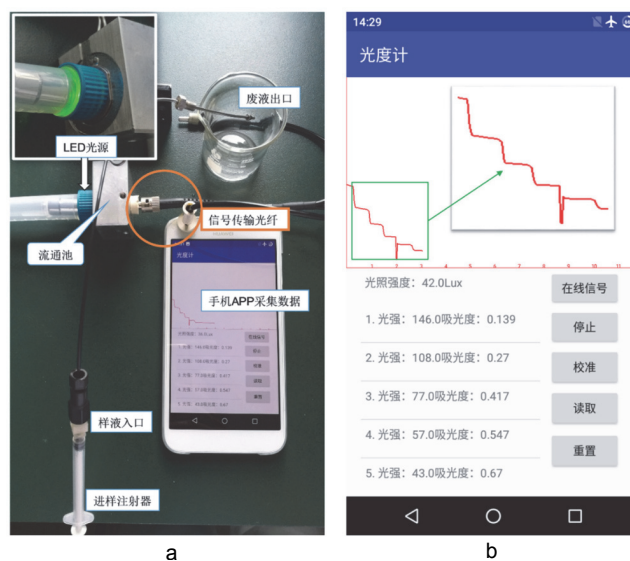
从上述介绍可看出，基于智能手机数码成像的实验方法或是直接利用智能手机数码成像，然后对数码成像图像的颜色、强度等进行分析，或是通过在手机摄像头前加装不同装置，实现不同功能的应用。这两种基于智能手机数码成像的实验方法都具有简单、便捷等优点。随着智能手机的发展，基于智能手机数码成像的实验方法在图像的分辨率、图像数据的处理等方面都会进一步增强，其应用也会越来越广泛。

2 基于智能手机光线传感器的分析方法

基于智能手机光线传感器的分析方法主要是将智能手机的光线传感器作为检测器，通过样品对单色光的定量吸收，利用朗伯-比尔定律来进行定量测定的分析方法。其测定思路 and 分光光度法类似。

张宇哲等^[30]利用紫外手电筒、比色皿和智能手机搭建的实验装置对维生素 B₁₂ 的含量进行了检测，通过 phyphox 软件采集数据，其实验加标回收率在 89.3%–105.4% 之间，检出限为 0.2638 μg·mL⁻¹，实验表明其测定结果与分光光度法测定结果基本一致。温宁红等^[31]提出了一种利用智能手机基于考马斯亮蓝法对牛奶中蛋白质的含量进行定量探究的实验方法。该实验装置由硬纸盒、智能手机和比色皿组成。实验中使用两部手机，一部通过 RGB 调色板应用程序提供黄色光源，另一部通过光线传感器使用 phyphox 软件采集透过样品的光强来计算吸光度，其线性拟合方程的 R 值达到了 0.997。刘琳琳等^[32]利用紫外手电筒、比色皿暗盒以及智能手机搭建了一种简易的光度计，通过使用 Luxmeter with graph 软件实现了对牛血清白蛋白(BSA)标准溶液及待测卵白蛋白溶液透过光强度的测定，并计算得到了蛋清盐析法制取卵白蛋白的产率。

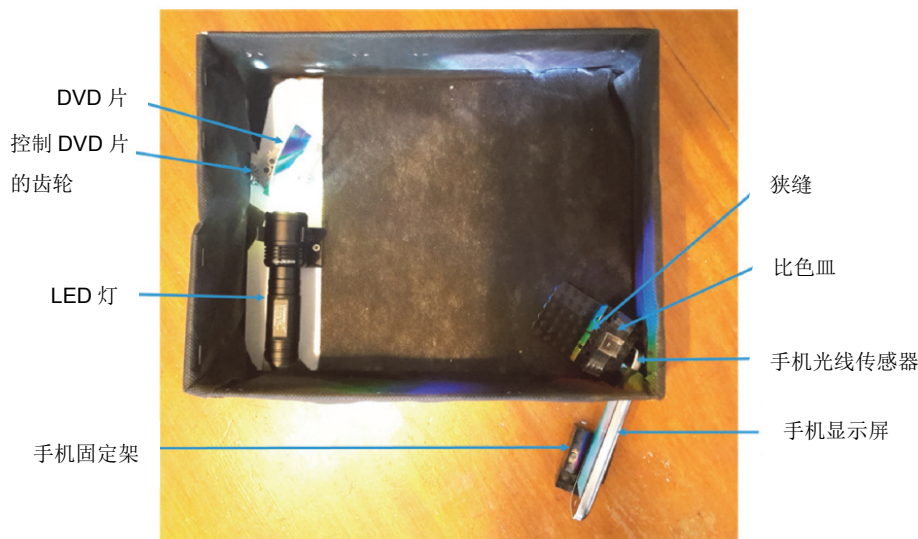
奚忠华等^[33]利用智能手机光线传感器作为检测器、液相色谱紫外检测器的流通池作为样品吸收池以及光纤传导信号设计了一款手机光度计(如图 6 所示)。利用该手机光度计对 Fe(II)标准溶液进行了测定，在测定范围内，样品浓度与吸光度有着良好的线性关系，利用此装置进行一次测试只需要约 200 μL 样品溶液，可有效降低实验室废液的回收量。



a: 手机光度计结构图 b: 光度计 App 运行界面

图 6 奚忠华等^[33]设计的手机光度计结构图和光度计 App 运行界面

上述报道所搭建的装置均是简单的光度计，不具备分光功能，Hosker^[34]利用纸盒、LED 手电筒、DVD 光盘和智能手机组装了具备分光功能的光度计(如图 7 所示)。该装置通过 LED 手电筒提供光源，利用部分 DVD 光盘进行分光，纸盒内部衬有黑色材料，以最大程度地减少光的反射。通过调节 DVD 光盘的齿轮将实验所需波长的光投射到狭缝。智能手机的光线传感器置于比色皿架后方，与通过狭缝的光线对齐，而手机显示屏部分则位于盒子外部，方便读取数据。用搭建好的装置，在不同波长下对不同物质进行了测试，均获得了满意的结果。

图 7 Hosker^[34]搭建的实验装置

除此之外，还可利用智能手机光线传感器研究化学反应速率。柴红梅等^[35]利用智能手机光线传感器研究了 KMnO_4 和 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 反应中反应物浓度及酸化时间对化学反应速率的影响。实验中利用 LED 灯作为光源，智能手机光线传感器作为检测器，通过测量实验反应体系透射光的强度随时间变化的关系来对体系进行研究。该实验装置简单、便携，可用于实验教学以增加实验教学的趣味性。

智能手机的光线传感器可以感知光线的强弱,通过 App 可以对光线强弱进行量化。因此化学实验中利用光线强度变化来进行分析的实验均可利用智能手机的这一功能来实现,如基础化学实验中的 $\text{Cu}(\text{IO}_3)_2$ 溶度积的测定、水中 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的测定、邻二氮菲吸光度法测定 Fe 等实验。由于光学实验对环境要求较高,因此在设计这一类实验时需要尽量保证一个密闭不透光的实验环境;其次在实验设计时,要对各部件进行固定,以避免微小的移动对实验产生影响。总的来说,这种利用智能手机光线传感器的实验装置及搭建过程简单、易于实现,可以在实验教学中启发学生通过搭建基于智能手机光线传感器的实验装置进行实验,这既可丰富实验教学的内容和形式,也有利于培养学生的动手能力和创新能力。

3 智能手机在其他化学实验中的应用

3.1 智能手机辅助滴定终点的判断

智能手机辅助判断滴定终点主要是利用滴定终点颜色的变化,根据智能手机的图像采集能力设计相应 App 来实现对滴定终点的判断。

Bandyopadhyay 等^[36]开发出一种基于 Android 的应用程序以帮助视力弱或色盲而无法准确感知颜色变化的学生顺利完成滴定实验。此应用程序通过摄像头记录颜色信息,使用 HSV (Hue, Saturation, Value)坐标的范围阈值来检测特定指示剂的颜色变化,当到达滴定终点时,智能手机会发出蜂鸣声和振动来提醒学生。Soong 等^[37]设计出一套自动滴定仪(如图 8 所示),用于帮助手臂有残疾的学生完成实验。该装置可以通过蓝牙功能连接到智能手机或平板电脑以辅助完成滴定。除此以外,智能手机还可以用于滴定终点的评价,Rathod 等^[38]设计了一款 App,利用智能手机的摄像功能,将捕获颜色的 RGB (Red, Green, Blue)数据转换为 HSV 值。根据 HSV 值,确定滴定终点的最佳颜色,并对滴定终点的判断做出评分。

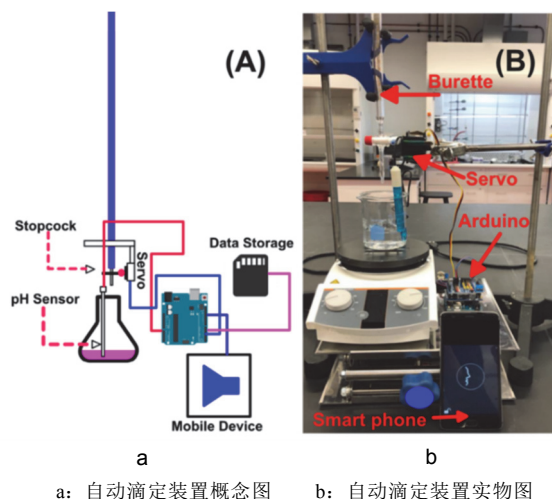


图 8 自动滴定装置的概念图及实物图

3.2 智能手机模拟实验

模拟实验是利用智能手机中具有模拟实验功能的 App 来实现,这种实验方法不受时间和地域的限制,可以随时随地多次重复进行,不仅节约了实验成本,也减少了对环境的负面影响。

Plunkett^[39]设计了一款虚拟软件,利用智能手机对仅写有反应试剂和底物的记录卡进行交互后,在手机显示屏上将显示出产物以及形成产物的机理(如图 9 所示)。Plunkett 共设计了三十个常见的有机化学反应机理,以此帮助学生学习。Tee 等^[40]提出通过编程来模拟滴定过程,并在手机端运行程序模拟实验,可以在不使用任何化学药品的情况下获得实验的体验。

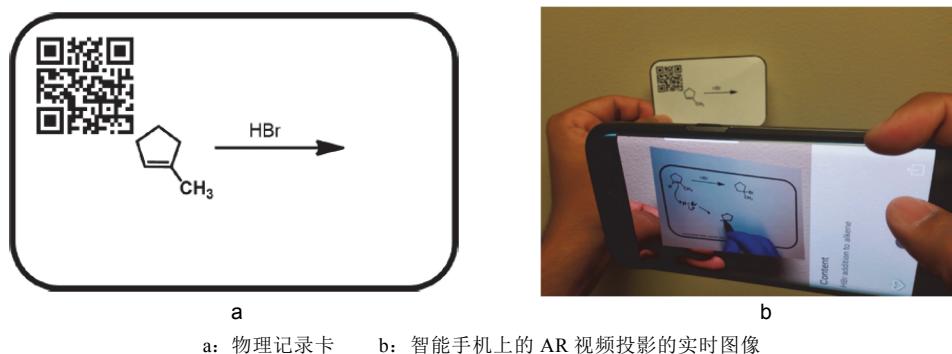


图9 物理记录卡和智能手机上的 AR 视频投影的实时图像

除此以外，目前大力推行的虚拟仿真实验项目也是通过程序对实验过程的模拟，让学生在虚拟的实验环境下完成实验。与上文所述模式不同的是，虚拟仿真实验项目是在线项目，只需通过电脑端、移动端等终端对在线项目服务器进行访问加载就可进行实验，在形式上更方便。

3.3 智能手机应用于其他实验装置的搭建

Thomson 等^[41]利用智能手机设计了一台旋光仪。该旋光仪由文档相机、3D 眼镜和智能手机构成，3D 眼镜作为偏振滤镜，智能手机用于提供光源和测量旋转角度。实验过程中先用无旋光性的物质校准，使文档相机里的图像清晰。再加入有旋光性的物质，此时文档相机中的图像会变模糊，水平旋转手机，使图像再次清晰，并使手机旋转角度最小，通过智能手机上的指南针可以测量旋转的角度。Thomson 设计的这种旋光仪已用于有机化学教学课堂演示中，并且收到了良好的效果。

Almendro Vedia 等^[42]提出利用智能手机的音频输出所提供的交流电信号制备悬浮于盐溶液中的囊泡，然后利用显微镜对其进行可视化观察。智能手机等可以通过音频输出插孔以可变的电压和频率输出电信号，再利用 App 软件产生所需频率的信号，并通过音量键调节所输出电信号的强度，最后利用自制的音频插孔连接器将电信号导出，通过智能手机提供的 10 Hz、1 V 的交流电信号制备了悬浮于溶液中的囊泡。

智能手机也可应用到检测系统的构建中。如刘翠玲等^[43]利用光谱检测技术提出了基于移动网络的便携式近红外光谱快速检测系统。这种系统利用探头获取现场样本的近红外光谱数据，通过智能手机端将获得样本的光谱数据上传至云平台的服务器进行建模、预测，云平台将得到的结果下发至智能手机端并显示，整个过程耗时很短，可以实现样品的现场快速检测筛查。

4 结语

本文详细总结了基于智能手机数码成像及光线传感器的实验方法，以及智能手机在虚拟实验、辅助滴定等方面的应用。这些基于智能手机的应用大多具有简单、便捷等特点，可以实现现场测定、课堂演示等功能。这些基于智能手机的应用主要用到了智能手机的高清摄像头、光线传感器、磁传感器、蓝牙设备等，而目前的智能手机基本上都集成了这些装置，一般 1000 元左右的智能手机就能很好地满足实验的需求。从整体看，目前智能手机在化学实验中的应用主要还是集中在化学教学实验中，这主要可能是化学科研实验对仪器精度等要求高，基于智能手机搭建的仪器还达不到大多数科研实验所需的精度；另一方面，智能手机具有的高集成、高智能、多传感器的特点使得其更适合应用于化学实验教学中。在实验教学中，通过启发学生利用智能手机解决实验中遇到的相应问题，这有利于丰富实验教学的内容和形式，增加学习的趣味性，同时也可更好地培养学生的动手能力和创新意识。此外，智能手机功能强大，可以开发一些基于智能手机的科普实验，将抽象的理论知识通过实验直观、具体地呈现给大众。同时基于智能手机搭建的实验装置的便携性也能为现场科普实验的进行提供方便。

目前, 智能手机的发展越来越迅速, 每年都会推出新的产品。新产品除了在硬件配置上会大幅提升外, 可能还会加入一些新的功能, 这使得智能手机的功能越来越强大, 应用越来越广泛; 同时 5G 时代的到来, 智能手机作为最重要的终端, 其在 5G 时代的功能还会被进一步拓展, 例如基于智能手机的远程操控及人工智能实现等。因此, 可以预计在将来会出现更多、更新颖的基于智能手机的化学实验设计, 智能手机在化学实验领域中的应用将会有更进一步的发展。

参 考 文 献

- [1] 智能手机. [2020-03-28]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%99%BA%E8%83%BD%E6%89%8B%E6%9C%BA/94396?fr=aladdin>
- [2] 李锡均, 程敏熙, 江敏丽. 大学物理. **2018**, 37 (2), 53.
- [3] 李四维. 广东通信技术. **2018**, 38 (6), 30.
- [4] F. Finazzi, 王林. 世界地震译丛. **2017**, 48 (6), 479.
- [5] 刘西川, 高太长, 贺彬晟, 刘磊, 印敏, 宋堃. 地球科学进展, **2018**, 33 (12), 1223.
- [6] 杨传孝, 孙向英, 刘斌, 连惠婷. 分析化学, **2007**, No. 6, 850.
- [7] 申贵隼, 魏婷, 赵婷. 中国无机分析化学, **2014**, 4 (3), 26.
- [8] 孙丹, 熊晓丹, 吴雪亭, 伍晓春. 化学教育, **2017**, 38 (5), 76.
- [9] 丁宗庆, 朱圣平, 周向宇. 化学教育, **2017**, 38 (4), 68.
- [10] Gee, C. T.; Kehoe, E.; Pomerantz, W. C. K.; Penn, R. L. *J. Chem. Edu.* **2017**, 94 (7), 941.
- [11] Dangkulwanich, M.; Kongnithigarn, K.; Aurnoppakhun, N. *J. Chem. Edu.* **2018**, 95 (1), 141.
- [12] Montanero, M. *J. Chem. Edu.* **2015**, 92 (10), 1759.
- [13] Knutson, T. R.; Knutson, C. M.; Mozzetti, A. R.; Campos, A. R.; Haynes, C. L.; Penn, R. L. *J. Chem. Edu.* **2015**, 92 (10), 1692.
- [14] 秦永乐, 张校亮, 谭慷, 李晓春. 仪表技术与传感器, **2019**, No. 7, 22.
- [15] 史建政. 便携式手机光谱仪的研制及其软件开发(硕士学位论文). 广东工业大学, 2015.
- [16] 丁兆强. 基于智能手机的便携式生化光谱分析装置研制(硕士学位论文). 山东师范大学, 2019.
- [17] 王军, 王振亚, 陈宝华, 吴泉英, 朱爱敏. 实验室研究与探索, **2018**, 37 (2), 87.
- [18] 李嘉. 化学教育(中英文), **2019**, 40 (5), 77.
- [19] Grasse, E. K.; Torcasio, M. H.; Smith, A. W. *J. Chem. Edu.* **2015**, 93 (1), 146.
- [20] Jian, D.; Wang, B.; Huang, H.; Meng, X.; Liu, C.; Xue, L.; Liu, F.; Wang, S. *Biosensors and Bioelectronics* **2019**, 143, 111632.
- [21] Skandarajah, A.; Reber, C. D.; Switz, N. A.; Fletcher, D. A. *PLoS One* **2014**, 9 (5), e96906.
- [22] Meng, X.; Huang, H.; Yan, K.; Tian, X.; Yu, W.; Cui, H.; Kong, Y.; Xue, L.; Liu, C.; Wang, S. *Lab Chip* **2016**, 17 (1), 104.
- [23] PNNL Smartphone Microscope. [2020-03-28]. <https://availabletechnologies.pnnl.gov/technology.asp?id=393>
- [24] Lumetta, G. J.; Arcia, E. *J. Chem. Edu.* **2016**, 93 (10), 1754.
- [25] Xu, X.; Wu, M.; Wang, X. *J. Chem. Edu.* **2019**, 96 (11), 2545.
- [26] Torres, A.; Floyd, M. A. *J. Chem. Edu.* **2019**, 96 (6), 1129.
- [27] Yu, H.; Tan, Y.; Cunningham, B. T. *Anal. Chem.* **2014**, 86 (17), 8805.
- [28] Lian, X.; Miao, T.; Xu, X.; Zhang, C.; Yan, B. *Biosens. Bioelectron.* **2017**, 97, 299.
- [29] Zeinhom, M. M. A.; Wang, Y.; Song, Y.; Zhu, M.; Lin, Y.; Du, D. *Biosens. Bioelectron.* **2018**, 99, 479.
- [30] 张宇哲, 孙雪花, 任宜霞, 熊巍. 系统医学, **2018**, 3 (22), 1.
- [31] 温宁红, 倪刚, 赵瑞雪, 何洋, 吴晓红. 化学教与学, **2019**, No. 1, 81.
- [32] 刘琳琳, 马青, 杨天林. 实验技术与管理, **2016**, 33 (12), 60.
- [33] 奚忠华, 孔璇凤, 余晓冬, 章文伟. 大学化学, **2019**, 34 (1), 54.
- [34] Hosker, B. S. *J. Chem. Edu.* **2018**, 95 (1), 178.
- [35] 柴红梅, 闫婷婷, 任宜霞, 杨子涵, 张妍妍. 延安大学学报(自然科学版), **2019**, 38 (2), 48.

- [36] Bandyopadhyay, S.; Rathod, B. B. *J. Chem. Edu.* **2017**, 94 (7), 946.
- [37] Soong, R.; Agmata, K.; Doyle, T.; Jenne, A.; Adamo, A.; Simpson, A. J. *J. Chem. Edu.* **2019**, 96 (7), 1497.
- [38] Rathod, B. B.; Murthy, S.; Bandyopadhyay, S. *J. Chem. Edu.* **2019**, 96 (3), 486.
- [39] Plunkett, K. N. *J. Chem. Edu.* **2019**, 96 (11), 2628.
- [40] Tee, N. Y. K.; Gan, H. S.; Li, J.; Cheong, B. H.; Tan, H. Y.; Liew, O. W.; Ng, T. W. *J. Chem. Edu.* **2018**, 95 (3), 393.
- [41] Thomson, P. I. T. *J. Chem. Edu.* **2018**, 95 (5), 837.
- [42] Almendro Vedia, V. G.; Natale, P.; Chen, S.; Monroy, F.; Rosilio, V.; López-Montero, I. *J. Chem. Edu.* **2017**, 94 (5), 644.
- [43] 刘翠玲, 周子彦, 孙晓荣, 李天瑞. 计算机仿真, **2019**, 36 (5), 461.