

传感技术赋能有机化学实验数字化转型 ——以常压蒸馏、减压蒸馏和分馏为例

吴云英¹, 莫志兰¹, 周雪¹, 袁羽¹, 马云飞¹, 陈婧¹, 唐刚^{2,*}

¹ 玉溪师范学院化学生物与环境学院, 云南 玉溪 653100

² 西南林业大学材料与化学工程学院, 昆明 650224

摘要: 数字化实验相较于现有教材实验, 具有较强的综合性、创新性和直观性。本文将数字化传感技术引入有机化学实验基本操作中, 借助温度传感器和压强传感器对常压蒸馏、减压蒸馏和分馏实验开展改进与创新探索。研究结果表明, 通过运用温度传感器、压强传感器对实验装置进行优化, 能够实时监测常压蒸馏、减压蒸馏与分馏等基本操作过程中的温度和压强变化情况, 并自动采集、记录时间-温度曲线及时间-压强曲线。这一融合举措实现了有机化学实验的数字化转变, 提高了学生学习的深度与广度, 可在本科有机化学实验教学中推广实施。

关键词: 温度传感器; 压强传感器; 基本操作; 实验改进; 曲线

中图分类号: G64; O6; O6-3

Empowering the Digital Transformation of Organic Chemistry Experiments with Sensing Technology: A Case of Atmospheric Distillation, Vacuum Distillation and Fractionation

Yunying Wu¹, Zhilan Mo¹, Xue Zhou¹, Yu Yuan¹, Yunfei Ma¹, Jing Chen¹, Gang Tang^{2,*}

¹ College of Chemistry Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, Yunnan Province, China.

² College of Materials and Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China.

Abstract: Compared with the experiments in existing textbooks, digital experiments are characterized by a high degree of comprehensiveness, innovativeness, and intuitiveness. This paper incorporates digital sensing technology into the basic operations of organic chemistry experiments. By means of temperature sensors and pressure sensors, explorations on the improvement and innovation of atmospheric distillation, vacuum distillation, and fractional distillation experiments are carried out. The research findings indicate that by optimizing the experimental setup with temperature sensors and pressure sensors, it is feasible to monitor in real - time the variations in temperature and pressure during fundamental operation processes such as atmospheric distillation, vacuum distillation, and fractional distillation. Moreover, the time – temperature curves and time – pressure curves can be automatically collected and recorded. This integration initiative has realized the digital transformation of organic chemistry experiments, enhanced the depth and breadth of students' learning, and is worthy of being promoted and implemented in undergraduate organic chemistry experimental teaching.

Key Words: Temperature sensor; Pressure sensor; Basic operation; Experimental improvement; Curve

收稿: 2025-03-20; 录用: 2025-06-26; 网络发表: 2025-07-29

*通讯作者, Email: tangganghappy@163.com

基金资助: 云南省一流本科课程《有机化学实验》; 云南省本科教育教学改革研究项目(JG2023092); 云南省一流建设学科-“新学科培育计划”高原农业生态保护修复; 云南省高等教育 121 工程项目-应用生物科学; 大学生创新创业训练计划项目(S202411390012, 2023A020)

教育数字化是适应数字时代发展的时代应答,也是实现教育现代化的必然选择,随着信息技术在教育领域的深入推广和应用,技术创新对于推动教育形态和学习模式等方面的革新作用愈加凸显^[1]。然而,目前对高等教育数字化转型实践路径的研究还处于起步阶段,如何推进其转型还有待进一步创新探索。当信息技术与有机化学实验相融合时,传统的有机化学实验发生了新的变革,数字化实验引入教学有利于体现教师主导的地位和发挥学生的主体地位,进而培养学生的创新精神和实践能力^[2-4]。

数字化实验,也称传感器实验、DIS (Digital Information System)实验、手持技术等,其主要构成为传感器、数据采集器、计算机及处理软件等^[5]。实验数据可通过传感器转换为电信号,电信号被采集器处理后传输至计算机,计算机及软件对数据信息进行分析、记录和图像的呈现。传感器能实时动态地监测反应体系的压强、温度等物理量,且同一个实验中可多个传感器联用,同一个传感器也可在多个实验使用,能有效提高实验效率和教学效果。因此,基于传感器的数字化实验操作简单,可实时监测实验过程并采集实验数据,进一步对数据和图表进行更深层次分析,有助于深入探索和挖掘实验现象背后的本质。

高校有机化学实验教学及教材通常包括有机化学实验的一般知识、基本实验操作、有机化合物的制备和性质、天然有机化合物的提取和分离等内容^[6-13]。虽有新反应、新方法、新仪器和新技术等引入到有机化学实验,但基于数字化的传感技术在有机化学实验中创新与应用相对较少。因此,本文以常压蒸馏、减压蒸馏和分馏为例将数字化传感技术融入有机化学实验的基本操作训练,利用传感器实时监测反应的变化过程,实现有机化学实验基本操作的数字化。

1 实验部分

1.1 实验目的

- (1) 理解常压蒸馏、减压蒸馏、分馏等基本实验操作的原理和方法。
- (2) 熟练掌握常压蒸馏、减压蒸馏、分馏等基本操作。
- (3) 学会数字化传感器在有机化学实验中的设计、应用及数据分析。

1.2 实验原理

蒸馏是将液体加热到沸腾状态,使液体变成蒸汽,又将蒸汽冷凝为液体的过程,如图1所示:



图1 蒸馏过程图

常压蒸馏是一种在常压下,利用液体混合物中各组分沸点差异(沸点差 > 30 °C)进行分离的蒸馏方法。减压蒸馏则通过降低系统压力来降低液体沸点,从而实现分离或纯化热敏性物质的蒸馏技术。分馏是一种利用混合物中各组分的沸点差异(沸点差 < 30 °C),通过分馏柱实现多次汽化和冷凝循环,从而高效分离沸点相近组分的蒸馏技术。常压蒸馏、减压蒸馏与分馏是有机化学实验中最常用的实验操作技术,可用于液体混合物的分离,测定化合物的沸点,提纯液体及低熔点固体,以除去不挥发的杂质,浓缩溶液或回收溶剂等^[14]。

1.3 实验仪器与试剂

1.3.1 实验仪器

温度传感器(LW-T803, 山东远大朗威教育科技有限公司)、压强传感器(LW-T822, 山东远大朗威教育科技有限公司)、微型有机实验装置(微型套装, 重庆市高教玻璃仪器厂)、电热套(DZTW, 邦西仪器科技上海有限公司)、循环水式真空泵(SHZ-D (III), 邦西仪器科技上海有限公司)等。

1.3.2 实验试剂

甲醇(西陇化工股份有限公司)、丙酮(天津市风船化学试剂科技有限公司)、无水乙醇(天津市风船化学试剂科技有限公司)、乙酸(天津市风船化学试剂科技有限公司), 均为分析纯, 蒸馏水(实验室自制)。

1.4 实验装置改进

为了能够实时监测和记录常压蒸馏、减压蒸馏与分馏过程中的温度及压强变化, 将温度传感器和压强传感器引入到实验装置中, 可实现蒸馏和分馏操作过程中时间-温度曲线、时间-压强曲线的记录。三套改进的实验装置示意图如图2所示, 均将原有的温度计替换为温度传感器, 实现实验过程中温度的实时监测和记录。同时, 将压强传感器引入到减压装置的测压部分, 在安全瓶上加入了压强传感器和控制气压开关(二通旋塞), 控制二通旋塞可以调节真空度, 实现减压体系压强变化的直观显示和准确测量。

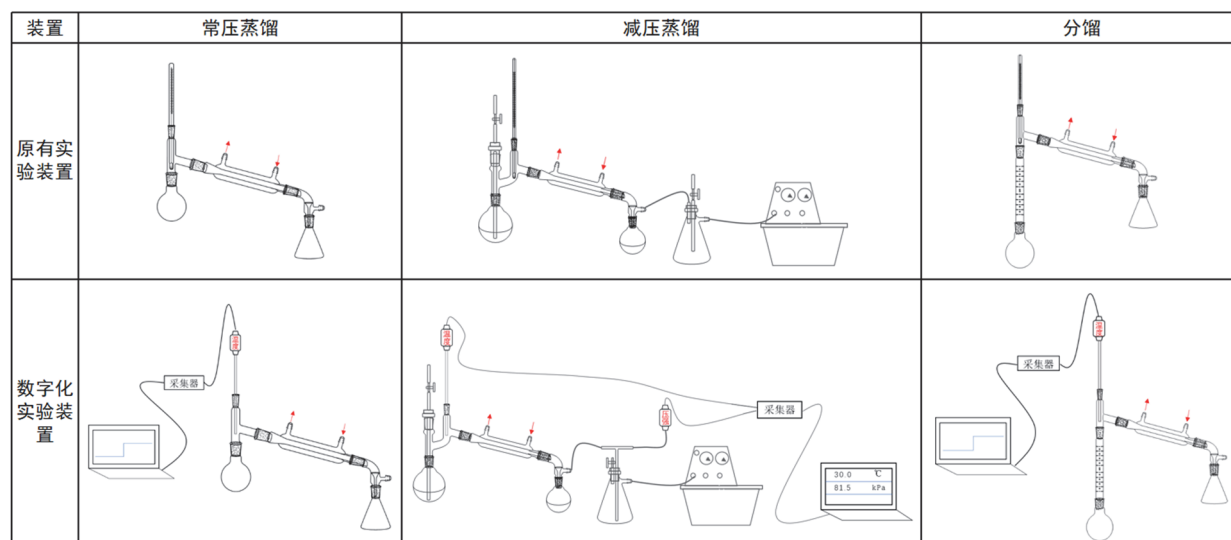


图2 改进前后实验装置示意图

1.5 实验步骤

1.5.1 常压蒸馏的数字化实验——以常压下丙酮沸点的测定为例

(1) 组装装置。

向25 mL圆底烧瓶中加入15 mL丙酮和两粒沸石。组装常压数字化蒸馏装置, 并将温度传感器与采集器、计算机连接, 打开传感器操作界面, 调试备用。

(2) 数据采集。

完成数字化蒸馏装置组装, 检查无误后, 开始实验。先通冷凝水再加热, 点击传感器操作界面的“开始”按钮, 采集蒸馏过程中的实验数据, 即自动记录得时间-温度曲线。

(3) 馏分收集。

调节热源控制馏出液速度为每秒1-2滴。A瓶收集前馏分, 待温度稳定后, 换B瓶收集所需馏分, 记录该馏分第一滴和最后一滴的时间。待所需馏分蒸出后, 停止加热。点击传感器操作界面的“停止”按钮, 保存数据。停止蒸馏, 回收试剂, 结束实验。

1.5.2 减压蒸馏的数字化实验——以不同压强下乙酸沸点的测定为例

(1) 组装装置。

组装数字化减压蒸馏装置, 检查装置气密性^[6]。将温度传感器、压强传感器与采集器、计算机连接, 打开传感器操作界面, 调试备用。通过长颈漏斗向100 mL圆底烧瓶中加入50 mL乙酸, 塞好套

管。完成数字化减压蒸馏装置组装，检查无误后，开始实验。打开水泵，逐渐关闭安全瓶上的二通旋塞，调节毛细管导入空气量，以能冒出一连串小气泡为宜。待压强稳定后，通水，加热。

(2) 数据采集。

调节热源控制馏出液速度为每秒1–2滴，待温度传感器、压强传感器示数稳定时，点击“开始”采集数据，30 s后停止采集，测得最小压强时乙酸的沸点。依次调节二通旋塞控制体系压强，测定不同压强下乙酸的沸点。待数据采集完成，停止蒸馏，回收试剂，结束实验。

1.5.3 分馏的数字化实验——以丙酮与水的分馏例

(1) 组装装置。

向25 mL圆底烧瓶中加入丙酮-水体积比1:1混合液和两粒沸石。组装分馏装置，并将温度传感器与采集器、计算机连接，打开传感器操作界面，调试备用。

(2) 数据采集。

完成数字化分馏装置组装，检查无误后，开始实验。先通冷凝水再加热，点击传感器操作界面的“开始”按钮，采集蒸馏过程中的实验数据，即自动记录得时间-温度曲线。

(3) 馏分收集。

调节热源控制馏出液速度为每2–3秒1滴。准备三个接收瓶，分别编号A、B、C，收集各馏分，A瓶收集温度传感器示数稳定范围内的馏分，待温度示数开始迅速上升，更换B瓶收集，当示数再次平稳，更换C瓶收集。残液约0.5 mL时停止加热，测量馏分的体积。点击传感器操作界面的“停止”按钮，保存数据。

(4) 精制。

分馏完毕，冷却后将分馏装置改为蒸馏装置，将A瓶、C瓶中的粗馏分别进行精馏得纯品，称量后回收，结束实验。

2 结果与讨论

2.1 常压下纯液体物质沸点的测定

分别选取丙酮(a)、甲醇(b)、乙醇(c)三种有机溶剂进行常压蒸馏。常压下(82.8 kPa)，借助温度传感器测定三种有机溶剂蒸馏过程中的的时间-温度曲线，实验结果如图3所示。

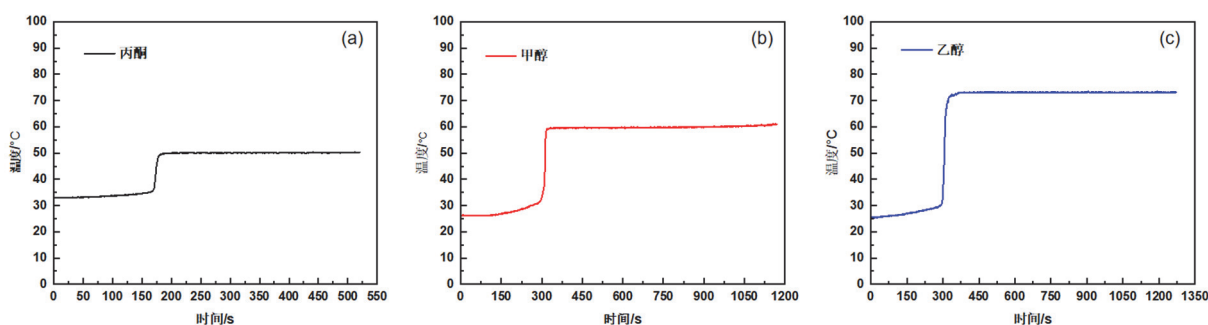


图3 常压下蒸馏纯液体物质的时间-温度曲线

随着温度传感器的引入，可将蒸馏过程中体系的温度变化曲线进行采集、记录。实验过程中可根据时间-温度曲线的转折点，准确判断前馏分 and 主馏分的分离点，即可通过采集曲线的转折点及时更换A、B瓶，实现前馏分与主馏分准确收集及沸点的测定。

根据实验现象及采集所得时间-温度曲线，记录前馏分A、主馏分B的收集温度及体积，实验数据如表1所示。

由表1可知，在常压下(82.8 kPa)，丙酮的沸程为50.0–50.5 °C，甲醇的沸程为59.0–59.5 °C，乙醇

的沸程为72.3–72.9 °C，其沸程符合纯液体物质的理论沸程，均在0.5–1.0 °C [15]。可见常压蒸馏的数字化实验获取时间–温度曲线，准确测量纯液体物质的沸点。

表1 常压蒸馏的实验数据记录表

实验编号	瓶号	丙酮		甲醇		乙醇	
		温度/°C	体积/mL	温度/°C	体积/mL	温度/°C	体积/mL
1	A	49.9–50.0	0.5	59.1–59.1	0.5	72.5–72.6	0.4
	B	50.0–50.5	12.5	59.1–59.4	11.5	72.6–72.9	12.5
2	A	49.9–50.0	0.5	59.1–59.1	0.6	72.3–72.3	0.5
	B	50.0–50.5	13.0	59.1–59.3	12.0	72.3–72.8	11.8
3	A	50.0–50.1	0.5	59.0–59.1	0.5	72.3–72.3	0.6
	B	50.1–50.4	12.5	59.1–59.5	11.5	72.3–72.8	12.0

2.2 不同压强下纯液体物质沸点的测定

分别选取乙醇(a)、乙酸(b)、水(c)三种溶剂进行减压蒸馏，通过调节二通旋塞控制体系内的压强，利用温度传感器和压强传感器采集乙醇、乙酸、水在不同压强时的沸点，实验结果如图4所示。

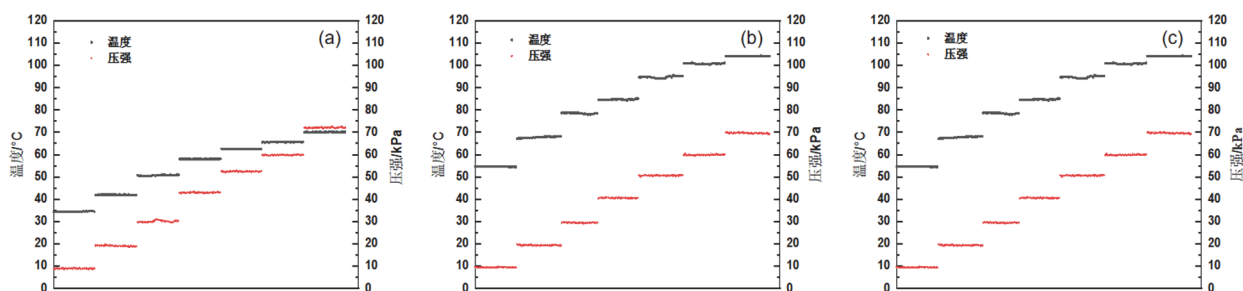


图4 不同压强下纯液体物质的沸点

利用温度传感器、压强传感器对减压蒸馏操作进行实时监测，记录不同压强下的沸点数据。根据所得数据通过作图可绘制得乙醇、乙酸、水在不同压强时的沸点，如图4所示。实验数据如表2所示，实验测得不同压强时的沸点与教材液体在常压、减压下的沸点近似关系图中所获取值基本一致 [6]。通过数字化减压蒸馏实验可知，当体系压强不断增大，测得纯液体物质的沸点不断升高，并且可以准确获取每个压强下的沸点。

表2 减压蒸馏的实验数据记录表

实验编号	乙醇		乙酸		水	
	压强/kPa	温度/°C	压强/kPa	温度/°C	压强/kPa	温度/°C
1	8.8–9.2	34.3–34.6	9.4–9.6	54.5–54.8	7.8–8.2	42.0–42.2
2	18.7–19.7	41.7–42.0	19.1–19.7	67.2–68.1	18.1–18.5	57.9–59.2
3	29.7–30.3	50.5–50.9	29.3–29.7	78.0–78.6	29.9–30.1	69.2–69.4
4	42.7–43.3	57.9–58.1	40.4–40.8	84.4–85.1	40.6–41.0	76.4–76.6
5	52.2–52.8	62.4–62.6	50.2–50.8	94.6–95.3	49.0–49.4	80.9–81.3
6	59.7–60.1	65.4–65.8	59.7–60.1	100.3–101.1	59.1–59.7	85.7–86.1
7	71.7–72.5	69.9–70.2	69.2–70.0	104.0–104.3	70.0–70.5	90.1–90.4

2.3 沸点相近的两种液体物质的分馏

分别选取体积比为1:1的丙酮与水(a)、甲醇与水(b)、乙醇与水(c)混合物进行分馏,常压下(82.8 kPa),借助温度传感器记录分馏过程中的时间-温度曲线,实验结果如图5所示。

随着温度传感器的引入,可实现分馏过程中反应体系内温度变化曲线的采集与记录。实验过程中可根据时间-温度曲线的转折点,及时更换A、B、C瓶,实现三个馏分准确收集。

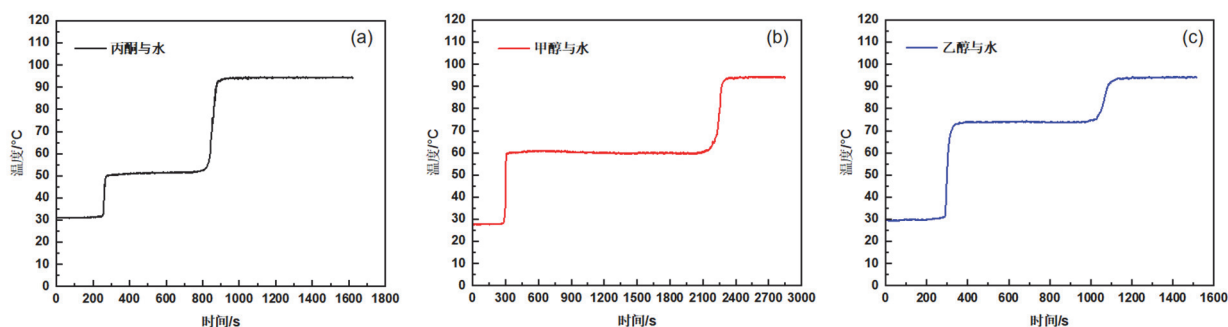


图5 常压下分馏沸点相近的两种液体物质的时间-温度曲线

根据实验现象及时间-温度曲线,记录三个馏分A、B、C瓶的收集温度及体积,实验数据如表3所示。粗馏分再精馏后,体积有所减少,但产品纯度更高。

表3 分馏的实验数据记录表

实验 编号	瓶号	丙酮与水			甲醇与水			乙醇与水		
		温度/°C	体积1/ mL	体积2/ mL	温度/°C	体积1/ mL	体积2/ mL	温度/°C	体积1/ mL	体积2/ mL
1	A	51.9-52.0	7.2	6.5	60.1-62.0	5.7	4.8	73.0-74.1	8.2	7.1
	B	52.0-93.6	0.2	-	62.0-94.0	0.5	-	74.1-94.0	0.4	-
	C	93.6-94.3	5.8	4.6	94.0-94.2	5.0	4	94.0-94.2	5.3	4.2
2	A	51.9-52.5	7.4	6.8	60.2-61.2	6.0	5.0	73.1-74.1	8	6.9
	B	52.5-93.0	0.1	-	61.2-93.0	1.0	-	74.1-92.2	0.8	-
	C	93.0-94.6	5.7	4.8	93.0-94.0	4.0	3.2	92.2-94.3	5.7	4.6
3	A	50.1-51.7	7.5	6.5	58.8-60.2	5.6	4.7	73.4-73.8	8	6.9
	B	51.7-93.3	0.1	-	60.2-92.4	0.7	-	73.8-94.0	0.6	-
	C	93.3-94.0	6.0	4.6	92.4-94.4	4.5	3.6	94.0-94.5	4.8	3.8

体积1为分馏所得粗馏分体积,体积2为精馏所得馏分体积,-表示无数据

2.4 蒸馏与分馏分离效果的比较

为了比较蒸馏和分馏的分离效果,在体积比为1:1的丙酮与水(a)、甲醇与水(b)、乙醇与水(c)三种体系分别进行蒸馏,同样收集A、B、C三个不同的馏分。对蒸馏、分馏所得数据进行对比分析,实验数据如表4所示。

为便于对所得结果进行比较,将蒸馏曲线与分馏曲线在同一坐标系内作时间-温度曲线,如图6所示,从左到右分别为丙酮与水、甲醇与水、乙醇与水的蒸馏和分馏所得到的曲线。图6(a)为丙酮-水混合物的普通蒸馏曲线,可看出无论是丙酮还是水,都不能以纯净状态分离,从丙酮-水混合物的分馏曲线可以看出分馏柱的作用,曲线转折点即为丙酮和水的分离点,基本可将丙酮分离出。同样,

甲醇-水(b)、乙醇-水(c)混合物的蒸馏和分馏曲线也可以看出,分馏能实现甲醇与水、乙醇与水的分离,而蒸馏不能实现分离。综上,实验结果表明分馏的分离效果优于蒸馏的分离效果。

表4 蒸馏与分馏比较的实验数据记录表

实验方法	瓶号	丙酮与水		甲醇与水		乙醇与水	
		温度/°C	体积1/mL	温度/°C	体积1/mL	温度/°C	体积1/mL
分馏	A	51.9–52.0	7.2	60.1–62.0	5.7	73.0–74.1	8.2
	B	52.0–93.6	0.2	62.0–94.0	0.5	74.1–94.0	0.4
	C	93.6–94.3	5.8	94.0–94.2	5.0	94.0–94.2	5.3
蒸馏	A	54.3–62.0	6.0	70.3–81.0	8.0	76.1–84.1	4.0
	B	62.0–94.0	1.0	81.0–94.1	1.0	84.1–94.1	6.0
	C	94.0–95.1	5.0	94.1–94.6	4.0	94.1–94.7	2.0

体积1为分馏所得粗馏分体积

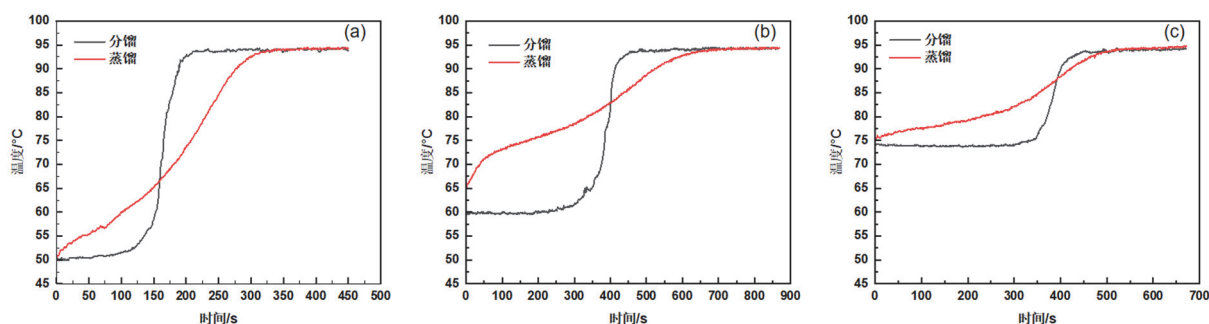


图6 蒸馏和分馏时间-温度曲线

3 结语

为探究数字化传感技术与有机化学实验的创新融合路径,本文将数字化传感技术引入有机化学实验的基本操作,涵盖常压蒸馏、减压蒸馏和分馏等重要实验。融合举措已在实际教学中稳步开展,旨在深化学生对于数字化实验操作的训练,以提升有机化学实验的教学质量,全方位培育学生的专业综合素养。通过构建实时监测系统,实现了实验过程中时间-温度、时间-压强曲线的自动化采集与分析,显著提升了实验数据的精确性与可靠性。教学实践表明,该技术不仅能够直观呈现实验过程的动态变化,更有助于引导学生从观察现象向理解本质的深度学习转变,有效促进了学生对实验的深入掌握。本研究不仅适用于常见的有机化学实验基本操作,且能进一步推广至有机物的合成、纯化及检验等实验环节中,进而实现有机化学实验教学的数字化全覆盖,推动形成“数字化实验”新教学形态。该融合模式不仅提升了学生的专业素养和数字化实验能力,更推动了化学实验教学向数字化方向转型,有较强的综合性和前沿性,具有一定的教学示范价值和广阔的推广应用前景。

参 考 文 献

- [1] 杨宗凯. 中国高教研究, **2023**, No. 3, 4.
- [2] 周旋, 刘丽敏, 马祥梅. 实验科学与技术, **2021**, *19* (6), 123.
- [3] 张婷, 马宏佳. 化学教育, **2017**, *38* (9), 5.
- [4] 王晓江. 中国教育技术装备, **2014**, No. 11, 2.

- [5] 刘怡, 刘翀. 湖北教育(新班主任), **2017**, No. 6, 42.
- [6] 肖玉梅, 袁德凯. 有机化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2018: 44–54.
- [7] 侯士聪. 基础有机化学实验. 北京: 中国农业大学出版社, 2015: 37–48.
- [8] 曾和平. 有机化学实验. 第5版. 北京: 高等教育出版社出版社, 2020: 33–48.
- [9] 赵剑英, 胡艳芳, 孙桂滨. 有机化学实验. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2017: 40–61.
- [10] 谢小敏, 曾焯, 郑少瑜. 有机化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2022: 28–29.
- [11] 刘路, 张俊良. 现代有机化学实验. 上海: 华东师范大学出版社, 2019: 44–61.
- [12] 腾巧巧, 姜艳. 有机化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2020: 17–21.
- [13] 胡昱, 吕小兰, 郭瑛. 有机化学实验. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2020: 46–54.
- [14] 王玉良, 陈静蓉. 有机化学实验. 第3版. 北京: 科学出版社, 2021: 29–40.
- [15] 袁金伟, 肖咏梅. 有机化学实验. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2022: 52–60.