

确定乙酸乙酯和氢氧化钠等浓度下的皂化反应速率常数的多种方法

林洁丽, 霍敏贤, 潘坤贵

佛山科学技术学院环境与化学工程学院, 广东 佛山

收稿日期: 2022年8月3日; 录用日期: 2022年9月8日; 发布日期: 2022年9月16日

摘要

在物理化学实验的课程中常用电导法测定乙酸乙酯和氢氧化钠等浓度下的皂化反应速率常数, 通过测量不同反应时间下的电导率, 再根据二级反应特点, 找出反应物浓度与时间的关系, 然后处理数据给出反应速率常数, 发现误差与处理数据的模型有关。本文为了说明不同误差的原因, 能够更清晰比较各种处理模型的特点, 详细推导了五种处理模型的拟合公式, 并用其分别处理5组平行实验数据。其中四种模型是建立在电导率与浓度是线性关系的基础上, 包括非线性拟合和线性拟合, 其处理数据的反应速率常数相对误差都较大, 在65.16%到138.11%之间, 而建立在电导率与浓度是非线性关系基础上的第五种模型, 用数值法处理数据, 发现其误差最低, 平均值为23.95%。本文通过比较不同模型处理的结果, 指出学生处理实验数据时需要根据实验情况而选择合适的拟合模型的必要性。只有选择合适的拟合模型才能得到较准确的反应速率常数。

关键词

电导率, 反应速率常数, 乙酸乙酯, 皂化反应

Various Methods for Determining the Saponification Reaction Rate Constant at the Same Concentration of Ethyl Acetate and Sodium Hydroxide

Jieli Lin, Minxian Huo, Kungui Pan

School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan Guangdong

Received: Aug. 3rd, 2022; accepted: Sep. 8th, 2022; published: Sep. 16th, 2022

文章引用: 林洁丽, 霍敏贤, 潘坤贵. 确定乙酸乙酯和氢氧化钠等浓度下的皂化反应速率常数的多种方法[J]. 创新教育研究, 2022, 10(9): 2166-2172. DOI: 10.12677/ces.2022.109341

Abstract

In the course of physical chemistry experiment, the conductance method was commonly used in the saponification reaction of the same concentration of ethyl acetate and sodium hydroxide to measure the reaction rate constant. By measuring the conductivity under different reaction times, the relationship between the concentration of reactants and time was found according to the characteristics of the second-order reaction, and then the reaction rate constant was given by processing the data. The errors were found to be related to the model of processing the data. In order to explain the causes of different errors and compare the characteristics of various processing models more clearly, this paper derived the five fitting formulas of processing models in detail and used them to process five groups of parallel experimental data respectively. Among the five models, there were four ones that were based on the linear relationship between conductivity and concentration, including nonlinear fitting and linear fitting, and the relative errors of the reaction rate constants of the processed data were large, ranging from 65.16% to 138.11%. The fifth model which was based on the nonlinear relationship between conductivity and concentration had the lowest error, with an average of 23.95%. By comparing the results of different models, this paper pointed out that it was necessary for students to choose an appropriate fitting model according to the experimental situation when processing experimental data. Only by choosing a suitable fitting model could we get a more accurate reaction rate constant.

Keywords

Conductivity, Reaction Rate Constant, Ethyl Acetate, Saponification Reaction

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

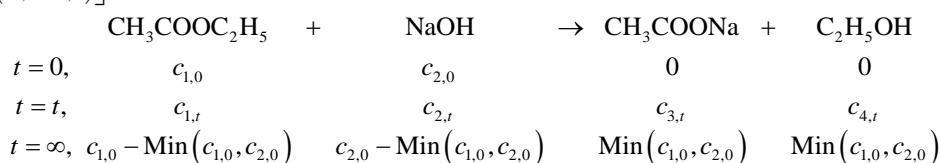
1. 引言

通过设计合理的实验方法来测量化学反应速率常数,是物理化学实验课程中非常重要的实验。利用电导法测乙酸乙酯皂化反应速率常数是一个较经典的二级反应动力学实验,实验中通过电导率仪测量皂化反应进程中反应体系的电导率值以跟踪反应物浓度随时间的变化。常规处理法是使氢氧化钠和乙酸乙酯的初始浓度相等来简化处理公式,再根据公式对数据进行处理,借助直线斜率求出反应的速率常数。常见的数据处理方法有线性拟合和非线性拟合,对于线性拟合法[1],通过对电导率与时间关系式进行不同的数学转换处理,不同作者采取不同的数学模型处理数据,其结果误差也有差别,说明线性拟合法有一定的局限性和弊端,而赵亚萍等人[2]借助计算机软件用非线性方法拟合数据的处理结果误差较小,这是因为保持了原来各变量之间的非线性关系,减少它们之间的关系失真[3]。但无论采取哪一种方法处理实验数据,都是建立在电导率与浓度关系是近似线性的前提基础上。这种近似处理引起的偏离原有理论模型的误差不是通过探讨实验数据的不同处理方法就能解决的,因为哪怕在强电解质的稀溶液中,电导率与浓度关系都不符合严格意义上的线性关系,早期我们对此做过研究,发现建立在非线性关系基础上的数据处理模型带来的实验误差比建立在线性关系的误差小一半[4]。但是文献[4]没有研究最能反映自变量和因变量关系的非线性拟合模型的处理结果,本文为了进一步确定电导率与浓度的非线性关系对确定反应速率常数的较大影响,探讨了乙酸乙酯和氢氧化钠初始浓度相等下的皂化反应速率常数的多种方

法,除了增加基于电导率与浓度的线性关系的非线性拟合法外,还一并推导出多种线性拟合法的处理模型公式,将处理数据的多种方法的结果进行较全面比较,目的在于确定更能接近实验的实际情况的数据处理模型,为实验教学提供简便且有价值的参考,为学生指明较为明确的处理数据方法。

2. 实验原理

乙酸乙酯($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$)和氢氧化钠(NaOH)发生皂化反应生成乙酸钠(CH_3COONa)和乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$),这四种物质分别用 1、2、3、4 表示,因此后续的所有物理量,下标“1”、“2”、“3”、“4”分别对应 $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ 、 NaOH 、 CH_3COONa 和 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 。假设反应物的原始浓度分别为 $c_{1,0}$ 和 $c_{2,0} \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$,反应时间为 t 时,反应物的浓度分别变为 c_1 和 $c_2 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$,反应掉的物质浓度分别为 $(c_{1,0} - c_{1,t})$ 和 $(c_{2,0} - c_{2,t}) \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$,反应完全时,初始浓度较小的反应物浓度为 0,而初始浓度较大的反应物浓度为 $[c_{i,0} - \text{Min}(c_{1,0}, c_{2,0})] \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$,函数 Min 表示取选项中的最小值。皂化反应如下:



其中 $c_{t,3} = c_{t,4} = c_{1,0} - c_{1,t} = c_{2,0} - c_{2,t}$,根据二级反应特点,有微分式:

$$-\frac{dc_{1,t}}{dt} = kc_{1,t}c_{2,t} \quad (1)$$

其中 k 为反应速率常数,考虑到:

$$c_{1,0} - c_{1,t} = c_{2,0} - c_{2,t} \quad (2)$$

把式(2)代入式(1)得到:

$$-\frac{dc_{1,t}}{dt} = kc_{1,t}(c_{2,0} - c_{1,0} + c_{1,t}) \quad (3)$$

当 $c_{2,0} = c_{1,0} = c_0$ 时,则 $c_{1,t} = c_{2,t}$,且设 $c_{1,t} = c$,对式(3)进行积分得到:

$$\frac{c_0 - c}{c} = c_0 kt \quad (4)$$

当 $c_{2,0} \neq c_{1,0}$ 时,设 $\Delta c_0 = c_{2,0} - c_{1,0}$,对式(3)进行积分得到:

$$\ln\left(\frac{c_{1,0}(c_{1,t} + \Delta c_0)}{c_{2,0}c_{1,t}}\right) = \Delta c_0 kt \quad (5)$$

下面讨论已知 $c_{2,0} = c_{1,0} = c_0$ 情形下,当考虑物质 2、3 的浓度与电导率的不同关系时,用不同的数据处理方法处理实验数据以比较效果。

2.1. 常规使用的关系

实验中通过直接测量反应体系的电导率变化来反映物质浓度的变化,在大多数物理化学实验教材[5]中,常把强电解质在稀溶液中的电导率与浓度关系近似看成成正比[1],比例系数设为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 ,由于影响电导率的是离子,因此对于本体系有 $B_1 = B_4 = 0$,只有 NaOH 和 CH_3COONa 这两个物质的浓度变化才会影响电导率的变化。设 κ_0 、 κ_t 、 κ_∞ 分别为反应初始时刻、反应某时刻、反应完全时刻体系的电导率数值,则各电导率与浓度关系为:

$$\kappa_0 = B_2 c_0, \quad \kappa_\infty = B_3 c_0, \quad \kappa_t = B_2 c_{2,t} + B_3 c_{3,t} \quad (6)$$

将 $c_{2,t} = c$, $c_{3,t} = c - c_0$, 代入式(6), 约去比例系数 B_2 和 B_3 , 得到用电导率表示的 t 时刻浓度 c 与初始浓度 c_0 的关系式:

$$c = \frac{\kappa_t - \kappa_\infty}{\kappa_0 - \kappa_\infty} c_0 \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)得到电导率与时间的关系:

$$\kappa_t = \frac{\kappa_0 + \kappa_\infty c_0 k t}{1 + c_0 k t} = \frac{a + b t}{1 + d t} \quad (8)$$

式(8)即是基于电导率与浓度的线性关系而推导得到的电导率与时间的数学关系式, 其中系数 a 、 b 、 d 分别表示 κ_0 、 $\kappa_\infty c_0 k$ 、 $c_0 k$, 显然电导率与时间不成正比, 对式(8)进行转换得到如下关系:

$$\frac{\kappa_0 - \kappa_t}{\kappa_t - \kappa_\infty} = c_0 k t \quad (9)$$

$$\text{或 } \kappa_t = \frac{1}{c_0 k} \frac{\kappa_0 - \kappa_t}{t} + \kappa_\infty \quad (10)$$

因此处理数据时可以选择线性关系拟合, 对式(9)以物理量 $(\kappa_0 - \kappa_t)/(\kappa_t - \kappa_\infty)$ 对时间 t 作图, 对式(10)以 κ_t 对 $(\kappa_0 - \kappa_t)/t$ 作图, 都将得到一条直线及其斜率和截距, 再通过关系得到反应速率常数 k 。在拟合数据时仔细比较式(9)和(10), 发现按照式(9)拟合时需要测量 κ_0 和 κ_∞ , 而按照式(10)拟合时不需要测量 κ_∞ 。对式(10)两边乘以 $c_0 k t$, 得到:

$$\kappa_t \cdot c_0 k t = \kappa_0 - \kappa_t + \kappa_\infty \cdot c_0 k t \quad (11)$$

设 $t' = t + \Delta t$ 时溶液的电导率为 κ'_t , 代入式(11)有:

$$\kappa'_t \cdot c_0 k t' = \kappa_0 - \kappa'_t + \kappa_\infty \cdot c_0 k t' \quad (12)$$

将式(12)减去式(11), 两边除以 $c_0 k \Delta t$ 后可得:

$$\frac{\kappa'_t t' - \kappa_t t}{\Delta t} = \frac{1}{k c_0} \frac{\kappa_t - \kappa'_t}{\Delta t} + \kappa_\infty \quad (13)$$

由式(13)可以看出新变量 $(\kappa'_t t' - \kappa_t t)/\Delta t$ 与 $(\kappa_t - \kappa'_t)/\Delta t$ 成一线性关系, 不需要知道 κ_0 和 κ_∞ , 该式能够避免测量 κ_0 和 κ_∞ 引起的误差, 特别是能避免使用对某些实验点高度敏感的 κ_0 值, 数据处理的精度完全取决于 t 时刻测定的溶液电导率 κ_t , 通过线性拟合可以获得 k 和 κ_∞ , 处理的结果就能完全由实验数据整体质量决定, 而不会过分依赖于某几个实验点。采用这含有 Δt 变量的模型拟合, 测定的时间间隔可以相等也可以不相等, 如果相等, 则它可以合并到截距项, 处理更简单, 这正是凌锦龙[6]提出的方法。另外, 数据处理时除了因测量 κ_0 和 κ_∞ 给带来的误差外, 许丽梅[7]认为因物质纯度的限制及配制溶液时的误差造成反应物浓度很难达到真正意义上的相等, 在 $c_{2,0}$ 略大于 $c_{1,0}$ 情况下, 改进了实验数据处理方程, 提出方程拟合时与乙酸乙酯初始浓度 $c_{1,0}$ 无关, 能够避开初始浓度的不准确性带来的影响, 但得到的公式与本文的式(5)一致, 属于浓度不等情况下, 本文不做数据处理比较。

根据电导率与浓度的线性关系公式(6)推导得到三种处理数据的模型(9)、(10)和(13), 区别在于自变量和因变量的不同, 但它们均为线性关系, 属于线性拟合处理数据法。如果不进行数学转换, 直接根据式(8)也可以借助计算机软件通过非线性拟合方法对数据进行处理[2], 这种方法属于非线性拟合法, 从严格的数学关系角度看时, 没有改变因变量和自变量, 也保留它们的原来关系, 拟合结果从理论上应该

更接近实际测量值给到的结果，只是从后面处理结果看，相对误差较大。

2.2. 新的处理方法

以上是大多数教材基于电导率与浓度成线性关系的处理实验数据的常规做法，这等于假设摩尔电导率 Λ_m 不随浓度变化，较早期时陈联群[8]认为该反应体系的物质 2、3 的摩尔电导率几乎不变，近似等于其无限稀释时的摩尔电导率，并说明了该近似产生的误差低于实验误差。而柯尔劳施根据大量实验发现在很稀的强电解质溶液中，其摩尔电导率与浓度的平方根呈线性关系[9]：

$$\Lambda_m = \Lambda_m^\infty - A\sqrt{c} \quad (14)$$

式中， Λ_m^∞ 为无限稀释摩尔电导率，和 A 都是常数。而摩尔电导率与电导率关系为如下：

$$\kappa_t = c\Lambda_m \quad (15)$$

把式(14)代入式(15)，显然说明电导率与浓度关系不呈现线性。用 $\Lambda_{m,2}^\infty$ 、 $\Lambda_{m,3}^\infty$ 、 A_2 、 A_3 分别对应 NaOH 和 CH_3COONa 的各自常数，得到电导率与浓度的精确关系式：

$$\begin{aligned} \kappa_0 &= c_0(\Lambda_{m,2}^\infty - A_2\sqrt{c_0}), \quad \kappa_\infty = c_0(\Lambda_{m,3}^\infty - A_3\sqrt{c_0}), \\ \kappa_t &= c(\Lambda_{m,2}^\infty - A_2\sqrt{c}) + (c_0 - c)(\Lambda_{m,3}^\infty - A_3\sqrt{c_0 - c}) \end{aligned} \quad (16)$$

方程组(16)无法给出浓度与电导率关系的解析解，我们借助 Matlab 软件利用数值法求出每个电导率 κ_t 值对应的浓度值 c ，再根据式(4)，以 $(c_0 - c)/c$ 对 t 作图，得到的直线斜率除以初始浓度即可得反应速率常数 k 。

3. 数据处理结果

反应体系选择的溶液浓度是稀溶液，浓度都在 $10 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右，因 NaOH 溶液浓度经由酚酞滴定而定，所以确定了它的浓度后，设为 $2c_0$ ，分为两份，一份为待稀释一倍用来测量电导率，即 κ_0 ；一份作为备用的反应物。为了测量 κ_∞ ，还需配制浓度为 c_0 的 CH_3COONa 溶液，然后测其电导率。再配制浓度为 $2c_0$ 的 $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ 溶液，体积与备用的 NaOH 溶液体积相同。将浓度均为 $2c_0$ 的反应物 NaOH 溶液和 $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ 溶液，分别加入两支电导池且以橡胶塞塞住管口，置于选定温度为 35°C 的恒温槽中。将电导率仪探头提前固定于反应混合管中，将恒温 10 分钟后的反应物倒进混合管的两端，借助吹球将它们进行混合，溶液混合到一半时开始计算反应时间，然后塞住管口，保留在恒温槽中，以秒表记录反应时间，分别测得不同时间下反应体系的电导率数值 κ_t 。共进行 5 组平行实验，对每组实验数据点 (t, κ_t) ，分别用公式(8) (即非线性拟合)、(9)、(10)、(13)和(16)进行数据处理，分别记为线性关系非线性拟合模型①、线性关系线性拟合模型②、③、④和非线性关系数值拟合模型⑤。模型⑤的 $\Lambda_{m,2}^\infty$ 和 $\Lambda_{m,3}^\infty$ 的数值由文献[9]提供， A_2 和 A_3 分别由 κ_0 和 κ_∞ 以及公式(14)给出。

不同模型处理数据后的反应速率常数 k 及其相对误差如表 1 所示，拟合相似度如表 2 所示。

35°C 下 k 的理论值[10]为 $1.9902 \times 10^{-4} \text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。模型①属于非线性拟合方法，保持了因变量 κ_t 和自变量 t 的原有关系，模型②、③、④都是线性拟合。基于电导率与浓度是线性关系的这四种拟合模型区别在于数学关系式的不同转换，只有模型①保持原自变量 t 和原因变量 κ_t ，其它三种模型的自变量和因变量都有相应变化，而模型③得到的反应速率常数非常不正常，出现了负值，因此用式(10)拟合数据是不被推荐的，虽然它能够避免初始电导率的测量误差，保持原来的因变量 κ_t ，但因新的自变量 $(\kappa_0 - \kappa_t)/t$ 的表达式含有因变量 κ_t ，自变量和因变量存在嵌套关系，导致因变量随自变量的变化趋势不是单调的，直接引起变量之间的关系失真，在线性拟合时导致数据的拟合相似度非常低，这从列举不同

模型的拟合相似度的表 2 的结果得到验证。这结论与王蕴华[11]和曹文辉[12]所提出的式(10)不如式(9)严谨和准确的结论一致。排除模型③, 比较模型①、②、④的相对误差结果, 发现保持原有关系的模型①虽然不会产生因数学关系引起的失真现象, 但是相对误差最大, 平均值为 76.3%; 教材最常用的模型②的误差较大, 平均值为 70.19%; 模型④的误差最小, 平均值为 65.16%; 这说明改变原有拟合公式(从式(8)变到式(9)、(13))出现误差下降现象, 似乎能够提高处理数据精度, 但模型①误差最大的结论说明处理本文实验数据时把电导率看成与浓度呈线性关系会存在处理数据的误差较大。而模型⑤能够解决这个问题, 不把电导率与浓度看成线性关系, 其处理得到的反应速率常数的相对误差最小, 平均值为 23.95%。在学生完成的实验报告中, 发现使用模型②处理数据时经常遇到误差超 100%的情况, 如果改为用模型⑤处理数据时误差则最少会降低一半[4]。另外, 从表 2 看出, 最高的拟合相似度是模型②, 平均值为 0.99994, 这也是实验教材最常用式(9)作为拟合公式的原因。模型④的拟合相似度比模型⑤的稍微高一些, 平均值分别为 0.99818、0.99806, 而模型①和③的拟合相似度都比较差。

Table 1. Reaction rate constants and their relative errors after data processing by different models

表 1. 不同模型处理数据后的反应速率常数及其相对误差

实验组别		1	2	3	4	5	平均值
反应速率常数 ($\times 10^{-4}$ $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	模型①	0.5260	0.4962	0.4657	0.5000	0.3977	0.4771
	模型②	0.6188	0.5923	0.5730	0.6118	0.5703	0.5933
	模型③	0.9961	-1.3511	-0.9811	-1.4790	-0.9774	-0.7585
	模型④	0.6725	0.6932	0.7057	0.6885	0.7074	0.6935
	模型⑤	1.5265	1.5498	1.3602	1.5908	1.5405	1.5136
相对误差/%	模型①	73.57	75.07	76.60	74.88	80.02	76.03
	模型②	68.91	70.24	71.21	69.26	71.34	70.19
	模型③	49.95	167.89	149.30	174.31	149.11	138.11
	模型④	66.21	65.17	64.55	65.41	64.46	65.16
	模型⑤	23.30	22.13	31.65	20.07	22.60	23.95

Table 2. Fitting similarity corresponding to different data processed by different models

表 2. 不同模型处理不同数据对应的拟合相似度

实验组别		1	2	3	4	5	平均值
拟合相似度	模型①	0.98494	0.96175	0.94735	0.96307	0.93124	0.95767
	模型②	0.99999	0.99998	0.99990	0.99997	0.99987	0.99994
	模型③	-0.03657	-0.03962	0.14063	-0.05853	0.14755	0.03069
	模型④	0.99906	0.99781	0.99726	0.99802	0.99876	0.99818
	模型⑤	0.99949	0.99855	0.99669	0.99889	0.99668	0.99806

4. 结论

在实际的实验操作中, κ_0 和 κ_∞ 是由单独配制溶液测定, 与测量 κ_t 的反应体系不是同属一个体系, 因此所测得的 κ_0 和 κ_∞ 对于反应体系而言有着不可避免的系统误差, 该误差必会影响数据处理的精度。因此当用模型①和②处理数据时, 误差比不考虑这两物理量的模型④的误差大。值得注意的是模型①在

①、②、④中误差最大的结论跟文献[2]的结论有一定的差异, 后续需要进一步分析原因。如果实验中无法准确测量 κ_{∞} , 建议用模型③, 不过要小心, 因为它理论上应该预见误差变小, 即可以预测按式(10)拟合的结果比按式(9)的结果误差小些。但本文处理数据结果说明, 按式(10)拟合的结果非常糟糕, 甚至有的实验数据出现异常的负数反应速率常数和负数拟合相似度, 因此本文不建议使用模型③处理实验数据。如果实验中无法准确测量 κ_0 和 κ_{∞} , 建议用模型④, 能够降低误差。如果希望更准确反映实际化学反应过程的反应物浓度与时间关系, 建议用模型⑤。本文针对 5 组平行实验数据, 比较了五种不同处理模型的结果, 证明了把电导率与浓度看成线性正比关系的结果会加大实验数据的处理误差, 而采用模型⑤处理数据时虽过程复杂些但是更接近理论值。总之, 本文极力推荐不用模型③处理数据, 如果希望保持实验数据之间的实际关系时建议使用模型①非线性拟合处理数据, 如果要按教材介绍的模型②线性拟合处理数据时, 当发现误差超过 50% 时, 建议改用不需考虑 κ_0 和 κ_{∞} 的模型④处理数据, 发现误差超过 100% 时, 建议改用模型⑤处理数据。

参考文献

- [1] 成昭, 范涛, 杨莉宁, 等. 电导法测定乙酸乙酯皂化反应速率常数的数据分析方法[J]. 化工时刊, 2019, 33(11): 10-12.
- [2] 赵亚萍, 咸春颖, 余逸男. 酯皂化反应动力学实验数据的非线性拟合处理[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(3): 26-30.
- [3] 余逸男. 乙酯皂化反应实验数据的非线性拟合[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2002, 28(3): 93-95.
- [4] 林洁丽, 陈浒, 林洁玲. 电导率与浓度关系在处理乙酸乙酯皂化反应的实验数据中的应用[J]. 化工管理, 2021(27): 15-16.
- [5] 宋淑娥. 基础化学实验(III) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 162-164.
- [6] 凌锦龙. 乙酸乙酯皂化反应实验数据处理方法的改进[J]. 通化师范学院学报, 2005, 26(2): 49-51.
- [7] 许丽梅, 马琳, 徐旭耀, 等. 电导法测定乙酸乙酯皂化反应速率常数实验的思考与改进[J]. 广东化工, 2018, 45(3): 213+194.
- [8] 陈联群. 电导法测量初浓度不等时乙酸乙酯皂化反应速率常数[J]. 内江师专学报(自然科学版), 1988, 4(2): 51-54.
- [9] 天津大学物理化学教研室. 物理化学(下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 321-323.
- [10] 马志广, 庞秀言. 物性参数与测定[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 29-33.
- [11] 王蕴华. 对“测量乙酸乙酯皂化反应速度常数”实验数据处理方法的探讨[J]. 北京师范学院学报(自然科学版), 1988, 9(4): 87-91.
- [12] 曹文辉. 对“乙酸乙酯”皂化实验数据处理的讨论[J]. 盐城工学院学报, 1999, 12(4): 55-56.