



Application of the Maximum Sensitivity of the Photometric Method

Yuan Bingjian

Quality Inspection Department of State Owned 5409 Factory, Yuncheng, China

Email address:

Yuanbingjian55@sina.com

To cite this article:

Yuan Bingjian. (2025). Application of the Maximum Sensitivity of the Photometric Method. *Science Discovery*, 13(2), 33-38.

<https://doi.org/10.11648/j.sd.20251302.13>

Received: 21 March 2025; **Accepted:** 19 April 2025; **Published:** 29 April 2025

Abstract: The method of high content determination of photometry was optimized in the way of maximum sensitivity: 1) Under strictly observing the "condition of repeatable measurement", make the "calibration curve" of the method used. The line joining its upper and lower end points is to be taken as the "calibration line" for the sample, the equation of which is the "two point form" of the geometry, which indicating that "the change ΔA in the absorbance of a substance, is directly proportional to the change ΔC in its substance content, i.e. $\Delta A = k\Delta C$ ", and the sensitivity $Se = \Delta A / \Delta C$; 2) Weigh a standard sample and prepare its "mother liquor"; 3) Drop the "mother liquor" slowly and evenly with a microburette, prepare two samples with absorbance close to the upper and lower limits, and carry out the measurement; 4) On the premise that the content with the highest absorbance can appropriately cover the highest content of the sample, Select the amount of "mother liquor" of the standard sample, and determine the sample content with the lowest and highest absorbance accordingly; 5) The line connecting the two points with the lowest and highest absorbance is used as the "calibration line" for the sample content, and a formula for determination is established; 6) The sample to be measured is prepared according to the standard sample preparation method, and determine its content by the "two-standard method". The method is simple, accurate and environmentally friendly. The same sample was measured 8 times repeatedly, the range was 0.4%, the uncertainty U_{95} was 0.09 % ($k=2$), and the relative standard deviation RSD was 0.08% ($n=8$).

Keywords: Photometry, Sensitivity, Domain, Ferromanganese

光度法最大灵敏度的应用

袁秉鉴

国营5409厂质检处, 运城, 中国

邮箱

Yuanbingjian55@sina.com

摘要: 以最大灵敏度的方式, 优化了高含量的光度法测定: 1) 在严格遵守“重复性测量条件”下, 制作所用方法的“校准曲线”。显示其上、下两端点连线即可作为样品含量“测定线”, 其方程为几何学的“两点式”, 表明“物质吸光度的改变量 ΔA 正比于其物质含量的改变量 ΔC , 即 $\Delta A = k\Delta C$ ”, 灵敏度 $Se = \Delta A / \Delta C$; 2) 称取试样一个标准样品, 制备其“母液”; 3) 用微量滴定管匀速滴取其“母液”, 制备吸光度临近上、下限的两个样品, 实施测定; 4) 以最大吸光度的含量可恰含试样最高含量为前提, 选取标准样品的“母液”量, 并以此为准, 确定吸光度最低和最高的样品含量; 5) 由吸光度最低和最高的两点连线, 作为样品含量的“测定线”, 并组建样品测定的公式; 6) 根据标准样品制备方法, 制备被测样品, 以“两标准测定法”确定其含量。该方法简便、准确、环保。同一样品8次重复测定结果, 极差为0.4%, 不确定度 U_{95} 为0.09% ($k=2$), 相对标准差RSD为0.08% ($n=8$)。

关键词: 光度法, 灵敏度, 值域, 锰铁

1. 引言

测量系统的“灵敏度” Se ，是测量系统的示值变化除以相应的被测量值变化所得的商[1]。每一测定方法的灵敏度，对其应用和推广都是极其重要的，所以在每一光度法的研究中，都要首先绘制方法的吸收光谱，选取其灵敏度最大的峰值波长作为测定波长。根据光度法的原理，光度法的灵敏度，就是其吸光度值域的吸光度最大值减去其最小值之差 ΔA 除以相应物质含量之差 ΔC ，即 $Se=\Delta A/\Delta C$ 。由于长期以来每个光度法，都仅限于低含量测定，都未曾应用其方法测定高含量，所以从来也未曾有人探讨过应用其最大灵敏度的问题。正是由于笔者提出了关于光度法含量测定限的新认识。认为不同含量(涵盖高含量)的试样，只要制成吸光度处于原方法吸光度值域内的样品，即可用原方法实施测定，才提出了光度法可以测定高含量的观点。但笔者在以往的光度法高含量测定中，只注意到必须使其被测样品的吸光度必须处于原方法吸光度值域区间，并未考虑其测定的灵敏度问题。面对高含量测定“校准曲线”过短，难以从“校准曲线”上查得准确结果的实际问题，采用了“两标准测定法”的公式计算处理[2]，所以难以为广大同行推广应用。在提高高含量的光度法测定的适用性的探索中，笔者曾将“含量系列”的最高含量，与方法吸光度最大值匹配，获得了较好的效果，但其“显色系列”制备程序过于繁琐，不利于推广。在关注了灵敏度定义的基础上，对其“高含量系列”的标准样品制备做了改进，提高了测定速度，降低了成本，而且优化了高含量的光度法测定。现以锰铁中锰的测定为例，作详细介绍。

2. 实验部分

2.1. 主要仪器及试剂

分光光度计：721型，中国上海精密仪器仪表有限公司；滴定管和医用针头；硝酸；盐酸；高氯酸；硝酸溶液（体积比）： $HNO_3:H_2O=1:4$ 和 $1:8$ ；硝酸银溶液：1%水溶液；过硫酸铵溶液5%水溶液；实验用水为蒸馏水；试剂均为分析纯。

2.2. 实验条件

严格遵循规范JJF1059.1-2012（以下简称“规范”）中的“重复性测量条件”[3]。

由于光度法实施过程中的“人、机、料、法、环”诸多因素的严重干扰，致使测定结果不能反映其吸光度与含量之间的真实规律。只有在严格遵守“规范”的“重复性测量条件”下，保持各影响因素在同批各个样品中的同一性，各个样品的测定结果，才可只反映其吸光度与其含量之间的唯一关系。所以它是光度法真实规律展现的必要条件。

2.3. 实验原理

根据灵敏度概念，“含量系列”含量之差 ΔC 不变，而增大其吸光度改变量 ΔA ，则其灵敏度 $Se=\Delta A/\Delta C$ 的量值必然会得以提高。

2.4. 实验方法

2.4.1. 高锰酸光度法“校准曲线”的绘制

高锰酸光度法的资料，只介绍了其锰含量的测定限是0.1%~2.0% [4]，并未标明其相应的吸光度值域区间。为了使锰铁测定的“含量系列”，占有吸光度值域更大的区间，但不超出其值域区间，则应首先复现原方法，绘制其“校准曲线”，认知其吸光度的值域限。

由同一人在同一天平的同一量程，称取锰含量0.1%~2.0%的碳钢标准样品0.2000g，置于200mL锥形瓶中，加1:4的硝酸溶液30mL，加热溶解并赶去氮化物。取下，流水冷却至室温，在同一只100mL容量瓶中，加水定容，摇匀，作为各样品的“母液”。由同一人用同一只10mL刻度移液管移取“母液”10mL，置于200mL锥形瓶中。由同一人用同一只5mL刻度移液管，分别加入硝酸银溶液、过硫酸铵溶液各5mL。在80℃~100℃水浴中摇动加热40s。取出，流水冷却至室温。由同一人在30min内，以水作参比，用同一只2cm比色皿，在530nm处测定 MnO_4^- 吸光度。测定结果列于表1。

表1 高锰酸光度法在530nm处的吸光度值域区间。

锰含量(%)	0.19	0.48	0.60	0.96	1.40	1.78	2.02
吸光度	0.230	0.475	0.550	0.870	1.240	1.580	1.750

实验表明高锰酸光度法的吸光度值域区间为0.100~1.750（因为没有0.10%的标准样品，其吸光度只能以“校准曲线”延至含量0.10%确定其量值0.100）。根据表1数据绘制碳钢锰的“校准曲线”（图1）：

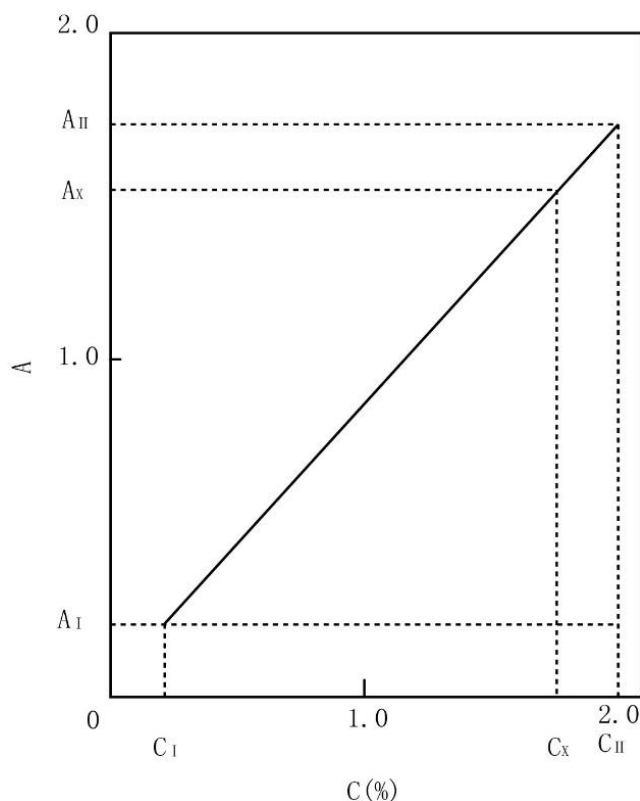


图1 锰的“校准曲线”。

从图1可知,吸光度是个值域函数 ($0 < A < 2$),在其值域区间,所有样品的坐标点 (C, A) 都落在同一条“校准曲线”上,所以其两端的两个坐标点连线,即可替代“校准曲线”,作为样品含量的“测定线”,其方程是几何学的“两点式”:

$$(A_X - A_I) / (A_{II} - A_I) = (C_X - C_I) / (C_{II} - C_I) \quad (1)$$

两边同乘以 $(A_{II} - A_I)$:

$$(A_X - A_I) = (A_{II} - A_I) (C_X - C_I) / (C_{II} - C_I) \quad (2)$$

从图可知, $(A_{II} - A_I) / (C_{II} - C_I)$ 是“校准曲线”的斜率 k , $A_X - A_I$ 是吸光度的改变量 ΔA , $C_X - C_I$ 是吸光物质含量的改变量 ΔC , 所以式 (2) 可简化为:

$$\Delta A = k \Delta C \quad (3)$$

同时,“两点式”还可导出吸光物质含量的数学公式:

$$C_X = [(A_X - A_I) (C_{II} - C_I) / (A_{II} - A_I)] + C_I \quad (4)$$

式 (3) 表明“在吸光度值域内,化学物质的吸光度改变量 ΔA 正比于其含量的改变量 ΔC : $\Delta A = k \Delta C$ ”。我们称其为“化学物质吸光规律”,之所以称其为“规律”,是因为只要在光度法的实施过程中,严格遵守“规范”的“重复性测量条件”,其“标准系列”绝大多数样品的坐标点,都会落在同一条“校准曲线”上,而且不会抵达坐标原点“0” [5-9]。这也正是光度法实际与比尔定律不符的原因:因为 $\Delta A = k \Delta C$ 与 $A = kC$ 不同,前者 $0 < A < 2$, 后者 $0 \leq A \leq 2$, 而且 $\Delta A = A_X - A_I \neq A$, $\Delta C = C_X - C_I \neq C$ 。

实际上,在无法得到一个原子或一个分子信息之前,各种光度法的“校准曲线”,都会具有相同的“两点式”: $\Delta A = k \Delta C$, 而不会是“点斜式”: $A = kC$ 。

“测定线”简化了“校准曲线”的绘制,而公式(4)则使光度法摆脱了对“校准曲线”的依赖,具有了一定的科学性。因为“测定线”和公式(4)都只用两个标准样品,所以统称为“两标准测定法”。

铁锰含量为60%~96%,为了应用该法测定,就必须使其被测样品的吸光度处于0.100~1.750之间锰,所以其试样的吸光度只能选择0.55~0.87的区间。根据灵敏度的定义,锰铁系列的灵敏度 $Se = (0.87 - 0.55) / (96 - 60) = 0.32 / 36 = 0.0089\%$ 。表明与1.0吸光度相应的锰含量为 $1.0 / 0.0089\% = 112.4\%$ 。

由于每个光度计都存在吸光度的示值读数误差,721型光度计的吸光度示值误差约为 ± 0.005 ,它给锰铁中锰测定结果引入的含量误差为 $\pm 0.005(112.4\%) = \pm 0.56\%$,而锰铁锰含量测定的允许误差 $\Delta = \pm 0.45\%$ 。可见,要满足锰铁测定的允许误差要求,就需提高0.55~0.87区间的灵敏度。

2.4.2. 锰铁标准样品“母液”制备

称取锰含量75.48%的锰铁标准样品0.2000g (称量愈小称量误差愈大!),置于200mL锥形瓶中,加硝酸、盐酸各10mL。加热溶解后,再加高氯酸10mL,加热至冒烟,赶去盐酸,取出,流水冷却至室温。在200mL容量瓶中加水定容,摇匀,作为其标准样品“母液”。

2.4.3. 高含量系列两端点样品的制备

为保证锰铁“含量系列”的吸光度,能够占有方法吸光度值域最大的区间,用微量滴定管匀速滴取标准样品“母液”,制备吸光度临近(但不超出)最低和最高吸光度的两个标准样品,具体操作如下。

用2mL滴定管匀速滴加方式向锥形瓶中滴入“母液”0.10mL,再用10mL移液管加入1:4硝酸溶液10mL,用5mL移液管,分别向其中加入硝酸银溶液、过硫酸铵溶液各5mL。在80℃~100℃的水浴中,摇动加热1min,取出,流水冷却至室温。在721型光度计上,选定波长530nm,以水作参比,用同一只1cm比色皿,在30min内,测定 MnO_4^- 吸光度,测定结果为0.310;

根据含量最低样品的含量及吸光度数据,估计临近最大吸光度1.75的样品“母液”量为1.00mL (吸光度临近1.75而不能超过1.75),并依照上述方式,显色并测定其530nm的吸光度,测定结果为1.610。

以吸光度0.310和1.610两个样品,分别作为锰铁中锰含量公式中的两端点样品 C_I 和 C_{II} 。

2.4.4. 两端点样品实际含量的确定

在估计吸光度最大样品含量可恰当涵盖锰铁最高含量的前提下,选取标准样品75.48%的“母液”量为0.75mL,并以此为准,确定“母液”0.10mL和1.00mL两个样品的实际锰含量 $C_I = 10.06\%$ 和 $C_{II} = 100.64\%$ 。其灵敏度 $Se = (1.610 - 0.310) / (100.64 - 10.06) = 1.30 / 90.58 = 0.0144\%$,而表1中的灵敏度只有0.0089%,表明选取标准样品“母液”量,对于提高“含量系列”灵敏度极为重要。

2.4.5. “两标准测定法”的可靠性

以与标准样品“母液”(即含量75.48%)相同的方法制备被测样品“母液”。

以“母液”0.10mL和1.00mL两坐标点(10.06,0.310)和(100.64,1.610)连线,作为被测样品“母液”含量的“测定线”(比原0.60%~0.96%两坐标点连线长了一倍),或以其坐标点数据为准,应用样品含量公式(4),确定吸光度 A_X 相应的样品“母液”含量。

比如, $A_X = 1.250$, 从其“测定线”上查得其相应的 $C_X = 75.30\%$,与标称值75.48%相差0.18%,符合锰铁中锰的测定误差要求。而依照公式(4)计算:

$$C_X = [(1.250 - 0.310) (100.64 - 10.06) / (1.610 - 0.310)] + 10.06 = [(0.94) (90.58) / 1.30] + 10.78 = 85.15 / 1.30 + 10.78 = 65.49 + 10.06 = 75.56(\%), \text{与标称值} 75.48\% \text{相差} 0.08\%, \text{符合锰铁中锰的测定误差要求。}$$

测定结果表明,“两标准光度法”符合光度法实际。

2.4.6. 试样的样品测定

依照2.4.2锰铁标准样品“母液”制备方法,制备锰铁被测试样“母液”200mL,按照2.4.4标准样品的制备方法,滴取其“母液”75滴(与标准样品75.48%“母液”量一致),制备其显色样品,并按照2.4.3方法显色,在530nm处测定其吸光度 A_X 。依照2.4.5“两标准光度法”确定其相应含量 C_X ,测定结果列于表2。

表2 锰铁样品测定结果（%）。

标称值	8次重复测定结果	均值 \bar{X}'	极差R	不确定度 U_{95}	RSD
75.48	75.28 75.35 75.40 75.50 75.58 75.6875.50 75.50	75.47	0.40	0.09	0.08

不确定度 $U_{95}=0.67R/\sqrt{n}$ [2]，表明样品测定结果为 $(75.48\pm0.09)\%$ ($k=2$)。满足其锰铁测定允许误差 $\Delta=\pm0.45\%$ 要求的样本容量 $n_x=n(U_{95}/\Delta)^2=0.4$ ，取整数1 (n 为该样本的容量8) [2]。表明该样品的一次测定结果，即可满足其测定允许误差要求。实际上表2中锰含量75.48%的8次测定结果中的每一个，与其标称值之差都未超出 $\pm0.45\%$ ，显示了遵守“重复性测量条件”的重要性和建立在其基础上的“两标准测定法”的科学性和可靠性。

3. 结果与讨论

3.1. 复现所用方法 “校准曲线”是必须的

当前所有光度法资料，都只给出了方法的含量的测定限，而没有给出其吸光度的值域区间。所以，为了确认所用方法的灵敏度上限，复现其含量范围的“校准曲线”，即可简便地得到其吸光度的最大值，简化了制备“高含量系列”，探寻吸光度最大值的程序。

3.2. 比尔定律不能处理高含量光度法的结果

迄今教科书依然认为比尔定律 $A=kC$ 是光度法的理论基础 [10-14]，但它却不能用于处理本文锰铁标准样品的测定结果。首先，两个标准样品之间没有互换性。以 $C_I=10.06\%$ 、 $A_I=0.310$ 为标准，则 $A_{II}=1.610$ 相应含量 $C_{II}=52.25\%$ ；以 $C_{II}(100.64\%)$ 、 $A_{II}(1.610)$ 为标准， $A_I=0.310$ 相应的 $C_I=19.38\%$ ；其次，不能用 C_I 、 C_{II} 两个标准确定锰含量75.48%的样品，以标准 $C_I=10.06\%$ 、 $A_I=0.310$ 为标准，则吸光度 $A_x=1.250$ 相应的锰含量 C_x 为40.56%；以 $C_{II}(100.64\%)$ 、 $A_{II}(1.610)$ 为标准，则吸光度 $A_x=1.250$ 相应的锰含量 C_x 为78.14%，都与实际含量75.48%相差甚远。但依照“两标准光度法”，无论是从其“测定线”上查找，或是采用其公式计算，都能获得预想的结果。这一事实表明 $\Delta A=k\Delta C$ 要比 $A=kC$ 切合实际。

3.3. 每个“含量系列”都存在最大灵敏度

尽管每个光度法研究，都要绘制“校准曲线”，确定其含量测定范围，但其实际是确定其吸光度的值域区间。任何“含量系列”的试样，只要制成吸光度处于其吸光度的值域区间的样品，都可应用其法实施测定。而且每个“含量系列”，都只是其吸光度值域区间的一部分。所以，实际试样的“含量系列”，都有占居其吸光度值域最大区间、获得最大灵敏度的可能。比如，高锰酸光度法锰测定的含量范围为0.10%~2.0%，吸光度值域为0.10~1.75，锰含量在灵敏度 $Se=0.83\%$ 。在只有一个锰含量0.60%标准样品的条件下，为获得0.4%~1.0%“含量系列”的最大灵敏度，可按照如下方法获得。

按照2.4.1方法，将锰含量0.60%的0.2000g样品制成20mL“母液”，用同一个10mL刻度移液管，移取“母液”1.0mL置于200mL锥形瓶中，再加入1:8硝酸溶液9mL（使体积与2.4.1标准样品“母液”10mL相同）。再用同一只5mL刻度移液管分别加入硝酸银溶液、过硫酸铵溶液各5mL。在80℃~100℃水浴中摇动加热40s。取出，流水冷却至室温。在30min内，以水作参比，用同一只2cm比色皿，在530nm处测定 MnO_4^- 吸光度，结果得 $A_I=0.30$ 。以此估计吸光度逼近最大值1.75的“母液”量约为6mL，所以再用同一个10mL刻度移液管，移取“母液”6mL置于200mL锥形瓶中，加入1:8硝酸溶液4mL。再以上述方式显色、测定530nm吸光度，得 $A_{II}=1.62$ (已逼近最大值1.75)。在估计“母液”6mL的含量可恰当涵盖“含量系列”最高含量1.0%的条件下，选取标准样品0.60%的“母液”量为3mL（被测样品“母液”制备及用量与此相同），再以此为准，确定“母液”1.0mL和6.0mL的锰含量分别是 $C_I=0.20\%$ 、 $C_{II}=1.20\%$ 。得到锰含量最大灵敏度 $Se=(1.62-0.30)/(1.20-0.20)=1.32/1.00=1.32\%$ ，而表1系列的灵敏度仅为0.83%。

3.4. 光度法测定结果的相对误差是样本极差R的函数

教科书根据光吸收定律，断定光度法测定结果的相对误差 $\Delta C/C=0.4343\Delta T/TlgT$ [10-14]。实际上，严格遵守“重复性测量条件”，同一量值 μ “样本”的各个测得值“如出一模”，中心极限定理表明，其“大样本 ($n\rightarrow\infty$)”服从正态分布 [15-17]，即“大样本”均值 \bar{X} 会与 μ 重合于样本极差R的中心，其各个测得值则密度逐渐降低地分布于其两侧0.5R内（图2）。而“小样本”大于 μ 的均值 \bar{X}' 处在 μ 右侧距最小值的eR处（图3）。小于 μ 的均值 \bar{X}' 处在 μ 左侧距最大值的eR处（图省略）。由图3可知，eR就是“小样本”的最大残差，其值在0.5R~R之间，容易求得。笔者根据GB/T4883-2008的正态样本离群值的判断和处理 [18]，采用“折半法”，在大量“小样本”的测得值中，寻找超出 $(\bar{X}'\pm eR)$ 即为统计离群值的量值，最终确定 $eR=0.65R$ 。即“小样本”测定结果（均值 \bar{X}' ）的最大残差为0.65R是样本极差R的函数。样品75.48%的8次重复测定结果（表2）的相对误差 $\Delta C/\bar{X}'=0.65(0.40)/75.47=0.3\%$ ，而与其均值 $\bar{X}'=75.47\%$ 的透光率 $T\approx0.16$ 毫无关系。

极差 $R=0.40\%$ （表2），不仅表明其8个测得值彼此之间的差异不会大于0.40%、样本残差不会大于 $0.65R=0.26\%$ 、不确定度 $U_{95}=0.67R/\sqrt{n}=0.09\%$ 、样品测定结果为 $(75.47\pm0.09)\%$ ($k=2$)，而且满足样品测定允许误差 $\Delta(\pm0.45)$ 的测定样品容量 $n_x=n(U_{95}/\Delta)^2=0.32$ (取整数1)，即只需测定一个样品，其结果即可满足允许误差要求，指导了日常样品检测工作。

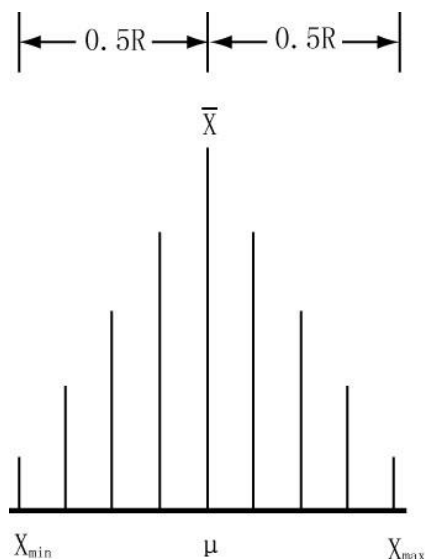


图2 大样本正态分布。

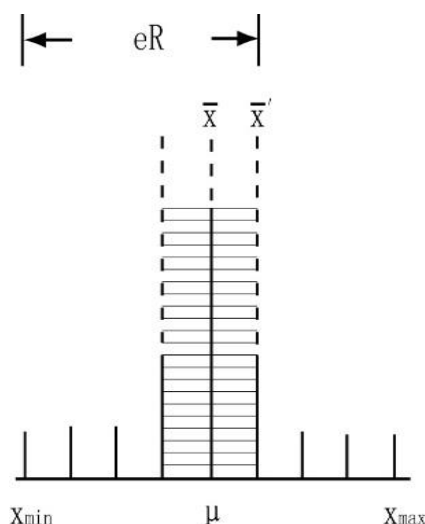


图3 小样本及其均值分布。

3.5. “两标准光度法”两个标准样品的制备

没有标准样品系列,是高含量“两标准光度法”应用的最大难题。实际上,虽然“两标准测定法”的两个标准样品,定为“校准曲线”两端的两个样品。但在实际应用中,只要测定过程遵循“规范”中的“重复性测量条件”,其公式(4)中的 C_I 和 C_{II} 不一定非是“含量系列”两端的两个标准样品,它们可以是包含被测样品含量的任意两个标准样品。所以只要有一个标准样品,都可采用分取同一标准“母液”的方法,简便制备。譬如,只有一个锰含量75.48%的标准样品,而要测定锰含量约50%~65%的试样,可确定标准样品“母液”0.70mL为 $C_{II}=75.48\%$,则其0.46mL即相当于 $C_I=49.60\%$ 。用它们即可对锰含量约50%~65%的试样实施测定;而要对锰含量80%~96%的试样实施测定,可以75.48%“母液”为0.60mL $C_I=75.48\%$,0.80mL即相当于 $C_{II}=100.64\%$,用它们即可对锰含量80%~96%的样品实施测定。

所有被测样品制备,都与标准样品75.48%相同。

3.6. 采用均匀“微滴”方式分取高含量“母液”是必要的

对于高含量($\geq 50\%$)而言,少称量($\leq 0.1g$)是不可取的,因为称量愈小误差愈大。而用常规滴定管又很难保

证分取的“母液”吸光度能够进入吸光度的最大区间。为了使称量误差最小,又能使“含量系列”最高含量吸光度抵达吸光度值域最大区间,最好的方法,就是应用微量滴定管以匀速滴取方式分取“母液”,制备被测样品。匀速滴取还可以避免“母液”在滴管内滞留所产生的误差。

4. 结语

- 1) 严格遵守“规范”的“重复性测量条件”,对于光度法而言,特别重要。因为只有这样才能保持各个因素对各个样品影响的“同一性”,才可使测定结果只呈现物质吸光度与其含量之间的真实关系,所以它是保证光度法测定结果服从其真实规律的基础技术;
- 2) 光度法最大灵敏度的应用,极大地提高了光度法测定结果的准确性和可靠性,拓宽了光度法的适用性和实用性,呈现了它简便、多能、灵敏、环保的特性,是分析化学中一个不可或缺的分支。当前教科书中的光度法原理及误差理论,很值得业内人士重新思考;
- 3) 本文以最高灵敏度的方式,优化了高含量的光度法测定,方便了操作,提高了速度,降低了成本及对环境的污染,为高含量光度法测定提供了一种新思路;
- 4) 标准样品“母液”量的选取极为重要,它直接决定着最大灵敏度量值的大小。选取的原则,是以吸光度最大样品的含量,可恰当地涵盖试样的最高含量。

参考文献

- [1] JJF1001-2011通用计量术语及定义 [S]. 北京: 中国质量监督检验检疫总局, 2011.
- [2] 袁秉鉴, 任屏.“精密度法则”条件下的光度法. [J] Science Discovery, 2020, 8(1): 1-6.
- [3] JJF1059.1-2012测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国国家质量监督检验检疫总局, 2012.
- [4] 吴诚. 机械工程材料测试手册(化学卷) [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996: 1046.
- [5] 高立红, 周凯红, 王燕霞, 等. 硅钼蓝分光光度法测定氟化稀土中二氧化硅 [J]. 冶金分析, 2017, 37(4): 57-61.
- [6] 邓军华, 王一凌, 亢德华, 等. 二安替吡啶甲烷光度法测定含钛物料中二氧化钛 [J]. 冶金分析, 2015, 35(10): 30-35.
- [7] 钟国秀, 黄清华. 光度法快速测定铜合金中微量铝[J]. 化学分析计量, 2011, 20(5): 60-62.
- [8] 王冀艳, 刘勉, 赵晓亮, 等. 酸溶-苯基荧光酮光度法测定矿样中钼 [J]. 冶金分析, 2017, 37(4): 48-51.
- [9] 王璇, 金涛, 王浩伟, 等. 紫外分光光度法测定聚硫密封胶中二氧化钛 [J]. 化学分析计量, 2017, 26(4): 24-27.

- [10] 王玉枝, 张正奇, 宦双燕, 等. 分析化学 [M] 第三版. 北京: 科学出版社, 2016: 187-199.
- [11] 王彤, 段春生. 分析化学 [M] 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 237-244.
- [12] 彭晓文, 程玉红. 分析化学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014: 126-130.
- [13] 尚庆坤, 崔运成, 赫春香, 等. 分析化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 201-208.
- [14] 王文渊, 曲中堂. 分析化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 110-114.
- [15] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 38.
- [16] 杨振明. 概率论 [M] 第二版. 北京: 科学出版社, 2008: 74.
- [17] 余君武, 肖艳清. 概率论与数理统计 [M] 北京: 理工大学出版社, 2009: 95.
- [18] GB/T4883-2008数据的统计处理 and 解释正态样本离群值的判断和处理 [S]. 北京: 中国国家质量监督检验检疫总局, 2008.