



二、质子转移反应类型的滴定

1. 强酸（碱）的滴定

例 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L NaOH}$ 滴定 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L HCl}$ ，是否可行，求突跃大小。若 $\text{pH}_{\text{ep}} = 6$ ，求 TE。

解：强碱滴定强酸生成水是生成反应型（与沉淀生成同），滴

定可行性判据为 $\frac{c_{\text{D,eq}}^2}{[\text{D}]_{\text{eq}}^2} \times 10^6$ 。

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = [\text{OH}^-]_{\text{eq}} = (K_{\text{w}})^{1/2} = 1.0 \times 10^{-7}$$

$$\frac{c_{\text{D,eq}}^2}{[\text{D}]_{\text{eq}}^2} = \frac{(1 \times 10^{-4})^2}{(10^{-7})^2} = 10^6$$

恰好满足精密滴定

$$\text{突跃大小} : y = \frac{0.001 \times c_{D,eq}}{2[D]_{eq}} = \frac{0.001 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-7}} = 0.5$$

$$\Delta\text{pH} = \frac{\sinh^{-1}(y)}{2.303} = \frac{\sinh^{-1}(0.5)}{2.303} = 0.21$$

突跃 0.42 个 pH 单位 : 6.79-7.21

$$\Delta\text{pH} = 6 - 7 = -1$$

$$\text{TE} = \frac{[D]_{eq} (10^{\Delta\text{pH}} - 10^{-\Delta\text{pH}})}{c_{D,eq}} = \frac{10^{-7} \times (10^{-1} - 10^1)}{10^{-4}} = -1\%$$

或
$$\text{TE} = \frac{2[D]_{eq}}{c_{D,eq}} \sinh(2.303\Delta\text{pH})$$
$$= \frac{2 \times 10^{-7}}{10^{-4}} \sinh[2.303 \times (-1)] = -9.9 \times 10^{-3}$$

2. 强酸与弱酸混合酸的滴定

例 0.02 mol/L HCl 与 0.02 mol/L HAc 混合液用 0.02 mol/L NaOH 滴定，能否滴定 HCl 和连续滴定 HAc？

解：滴定 HCl，化学计量点为 HAc 和 H₂O

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{Ac}^-]$$

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = [\text{Ac}^-]_{\text{eq}}$$

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = (K_{\text{a}_{\text{HAc}}} c_{\text{HAc,eq}})^{1/2}$$

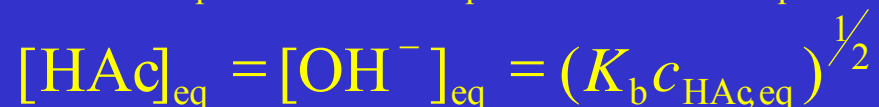
$$= (1.8 \times 10^{-5} \times 0.01)^{1/2} = 4.2 \times 10^{-4}$$

判别式

$$\frac{c_{\text{HCl,eq}}^2}{[\text{D}]_{\text{eq}}^2} = \frac{c_{\text{HCl,eq}}^2}{[\text{H}^+]_{\text{eq}}^2} = \frac{0.01^2}{(4.2 \times 10^{-4})^2} = 5.67 \times 10^2 < 10^4$$

不能选择性滴定 HCl，故谈不上连续滴定 HAc。

那么能否滴定总量？



可行性：

$$\frac{c_{\text{D,eq}}^2}{[\text{D}]_{\text{eq}}^2} = \frac{[(0.02 + 0.02) / 3]^2}{(K_b c_{\text{HAc,eq}})} = \frac{0.013^2}{\frac{10^{-14}}{1.8 \times 10^{-5}} \times \frac{0.02}{3}}$$

可滴合量

$$= 4.6 \times 10^7 > 10^6$$

计量点 $[\text{OH}^-]_{\text{eq}} = (K_b c_{\text{HAc,eq}})^{1/2}$

$$= \left(\frac{10^{-14}}{1.8 \times 10^{-5}} \times 6.7 \times 10^{-3} \right)^{1/2} = 10^{-5.72}$$

$$\text{pH} = 8.28$$

由此：滴定一元弱酸

$$\frac{c_{\text{HA}}^2}{c_{\text{HA}} K_{\text{b}}} = \frac{c_{\text{HA}}}{K_{\text{b}}} \geq 10^6 \quad \text{或} \quad cK_{\text{a}} \geq 10^{-8}$$

滴定一元弱碱

$$\frac{c_{\text{B}}^2}{c_{\text{B}} K_{\text{a}}} = \frac{c_{\text{B}}}{K_{\text{a}}} \geq 10^6 \quad \text{或} \quad cK_{\text{b}} \geq 10^{-8}$$

强酸+弱酸选择滴定

$$\frac{c_{\text{H}^+}^2}{c_{\text{HA}} K_{\text{a}_{\text{HA}}}} \geq 10^6$$

强碱+弱碱选择滴定

$$\frac{c_{\text{OH}^-}^2}{c_{\text{B}} K_{\text{b}_{\text{B}}}} \geq 10^6$$

注：c均为化学计量点时的分析浓度。

3. 两种一元弱酸混合酸的滴定

例 0.02 mol/L NaOH 滴定含 0.02 mol/L HAc 和 0.02 mol/L NH₄Cl 的混合液，可否选择滴定，连续滴定？如能滴，随机误差多大？

解： $K_{a_{\text{HAc}}} > K_{a_{\text{NH}_4^+}}$ ，先滴HAc，化学计量点为Ac⁻和NH₄⁺



近似 $[\text{HAc}]_{\text{eq}} = [\text{NH}_3]_{\text{eq}}$

相当于 $\text{NH}_3 + \text{HAc} = \text{NH}_4^+ + \text{Ac}^-$ 滴定反应

$$K_t = \frac{[\text{NH}_4^+][\text{Ac}^-]}{[\text{NH}_3][\text{HAc}]} \frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}^+]} = \frac{K_{a_{\text{HAc}}}}{K_{a_{\text{NH}_4^+}}}$$

$$[\text{HAc}]_{\text{eq}} = [\text{NH}_3]_{\text{eq}} = \left(\frac{[\text{NH}_4^+][\text{Ac}^-]}{K_t} \right)^{1/2} = \left(\frac{[\text{NH}_4^+][\text{Ac}^-]}{K_{a_{\text{HAc}}} / K_{a_{\text{NH}_4^+}}} \right)^{1/2}$$

判别式

$$\begin{aligned} \frac{c_{\text{HAc,eq}}^2}{[\text{HAc}]_{\text{eq}}^2} &= \frac{c_{\text{HAc,eq}}^2}{\frac{K_{a_{\text{NH}_4^+}} [\text{NH}_4^+]_{\text{eq}} [\text{Ac}^-]_{\text{eq}}}{K_{a_{\text{HAc}}}}} = \frac{K_{a_{\text{HAc}}} c_{\text{HAc,eq}}}{K_{a_{\text{NH}_4^+}} [\text{NH}_4^+]_{\text{eq}}} \\ &= \frac{1.8 \times 10^{-5} \times 0.01}{5.6 \times 10^{-10} \times 0.01} = 3.2 \times 10^4 \sim 10^4 \end{aligned}$$

可满足工业分析要求

求 $[\text{H}^+]_{\text{eq}}$:

$$[\text{HAc}]_{\text{eq}} = \left(\frac{5.6 \times 10^{-10}}{1.8 \times 10^{-5}} \times 0.01 \times 0.01 \right)^{1/2} = 5.6 \times 10^{-5}$$

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = \frac{K_a [\text{HAc}]_{\text{eq}}}{[\text{Ac}^-]_{\text{eq}}} = \frac{1.8 \times 10^{-5} \times 5.6 \times 10^{-5}}{0.01} = 1.0 \times 10^{-7}$$

$$\text{pH} = 7.00$$

$$\text{TE} = \frac{[\text{D}]_{\text{eq}} (10^{\Delta\text{pH}} - 10^{-\Delta\text{pH}})}{c_{\text{HAc,eq}}} \quad \Delta\text{pH} = \pm 0.2$$

$$\text{TE} = \pm \frac{5.6 \times 10^{-5} \times (10^{0.2} - 10^{-0.2})}{0.01} = \pm 0.005 = \pm 0.5\%$$

$$\text{或 } \text{TE} = \frac{2[\text{D}]_{\text{eq}}}{c_{\text{HAc,eq}}} \sinh(2.303\Delta\text{pH})$$

$$= \pm \frac{2 \times 5.6 \times 10^{-5}}{0.01} \sinh(2.303 \times 0.2) = \pm 5 \times 10^{-3}$$

第二 eq : NH_3 , Ac^- 和 H_2O

$$[\text{H}^+] + [\text{HAc}] + [\text{NH}_4^+] = [\text{OH}^-]$$

简化 $[\text{NH}_4^+]_{\text{eq}} = [\text{OH}^-]_{\text{eq}} = (K_{\text{bNH}_3} c_{\text{NH}_4^+, \text{eq}})^{1/2}$

$$= (1.8 \times 10^{-5} \times \frac{0.02}{3})^{1/2} = 3.5 \times 10^{-4}$$

判别式 $\frac{c_{\text{NH}_4^+, \text{eq}}^2}{[\text{NH}_4^+]_{\text{eq}}^2} = \frac{0.0067^2}{(3.5 \times 10^{-4})^2} = 3.7 \times 10^2 < 10^4$ 不能滴

结论 : (1) 弱碱滴定弱酸 , 及强碱滴定混合一元弱酸第一步

$$\frac{K_{\text{aHA}} \cdot c_{\text{HA}, \text{eq}}}{K_{\text{aHB}^+} \cdot c_{\text{B}, \text{eq}}} \geq 10^6 (10^4)$$

(2) 弱酸滴定弱碱 , 及强酸滴定混合一元弱碱第一步

$$\frac{K_{\text{bB}} \cdot c_{\text{B}, \text{eq}}}{K_{\text{bA}^-} \cdot c_{\text{A}^-, \text{eq}}} \geq 10^6 (10^4)$$

4. 多元酸碱的滴定

(1) 强碱滴定多元弱酸

$$\frac{K_{a1}}{K_{a2}} \geq 10^6 (10^4) \quad \frac{K_{a2}}{K_{a3}} \geq 10^6 (10^4) \quad K_{a3}c \geq 10^{-8} (10^{-10})$$

(2) 强酸滴定多元弱碱

$$\frac{K_{b1}}{K_{b2}} \geq 10^6 (10^4) \quad \frac{K_{b2}}{K_{b3}} \geq 10^6 (10^4) \quad K_{b3}c \geq 10^{-8} (10^{-10})$$

例 0.2 mol/L NaOH 滴定 0.2 mol/L H₃PO₄ ,可否分步滴定?

计算各步随机误差及 pH_{eqo}

解：第一 eq NaH₂PO₄ , H₂O



$$20K_{a_1} = 20 \times 10^{-2} = 0.2 > c \quad [\text{H}^+] \text{不能忽略}$$



相当于弱碱 HPO₄²⁻ 滴定 H₃PO₄ 至 H₂PO₄⁻



$$K'_t = \frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]^2}{[\text{HPO}_4^{2-}][\text{H}_3\text{PO}_4]} = \frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_3\text{PO}_4]} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]}{[\text{H}^+][\text{HPO}_4^{2-}]} = \frac{K'_{a_1}}{K_{a_2}}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{H}_3\text{PO}_4} &= \frac{[\text{H}^+] + [\text{H}_3\text{PO}_4]}{[\text{H}_3\text{PO}_4]} = 1 + \frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}_3\text{PO}_4]} \\ &= 1 + \frac{K_{a_1}}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]} = 1 + \frac{1 \times 10^{-2}}{0.1} = 1.1 \end{aligned}$$

判别式

$$[D']_{\text{eq}} = [\text{H}_3\text{PO}'_4]_{\text{eq}} = [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{eq}}$$

$$= \left(\frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]^2}{K'_t} \right)^{1/2} = \left(\frac{c_{\text{H}_3\text{PO}_4, \text{eq}}^2}{K'_t} \right)^{1/2}$$

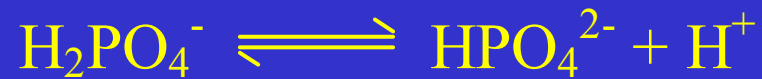
$$\frac{c_{\text{H}_3\text{PO}_4, \text{eq}}^2}{[D']_{\text{eq}}^2} = \frac{c_{\text{H}_3\text{PO}_4, \text{eq}}^2}{\frac{c_{\text{H}_3\text{PO}_4, \text{eq}}^2}{K'_t}} = K'_t = \frac{K'_{a_1}}{K_{a_2}} = \frac{K_{a_1} / \alpha_{\text{H}_3\text{PO}_4}}{K_{a_2}}$$

$$= \frac{1 \times 10^{-2}}{1.3 \times 10^{-7} \times 1.1} = 7.0 \times 10^4 > 10^4$$

工业分析

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = \left(\frac{K_{a_1} K_{a_2} [\text{H}_2\text{PO}_4^-]}{K_{a_1} + [\text{H}_2\text{PO}_4^-]} \right)^{1/2} = \left(\frac{1 \times 10^{-2} \times 1.3 \times 10^{-7} \times 0.1}{1 \times 10^{-2} + 0.1} \right)^{1/2}$$

$$= 3.4 \times 10^{-5}$$



$$[\text{H}^+] = K_{a_2} \frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]}{[\text{HPO}_4^{2-}]} = 1.3 \times 10^{-7} \times \frac{0.1}{\left(\frac{0.1^2}{7.0 \times 10^4} \right)^{1/2}} = 3.4 \times 10^{-5}$$

$$\text{pH} = 4.47$$

$$\text{TE} = \frac{[\text{D}]_{\text{eq}} (10^{\pm \Delta \text{pH}} - 10^{\mp \Delta \text{pH}})}{C_{\text{H}_3\text{PO}_4, \text{eq}}} = \pm \frac{10^{0.2} - 10^{-0.2}}{(K'_t)^{1/2}}$$

$$= \pm \frac{0.95}{(7.0 \times 10^4)^{1/2}} = \pm 3.6 \times 10^{-3} = \pm 0.36\%$$

第二 eq : $[H^+] + [H_2PO_4^-] + 2[H_3PO_4] = [PO_4^{3-}] + [OH^-]$

简化 $[H_2PO_4^-] = [PO_4^{3-}] + [OH^-]$

看成 $PO_4^{3-} + H_2PO_4^- \rightleftharpoons 2HPO_4^{2-}$

$$K'_t = \frac{K_{a_2}}{K'_{a_3}}$$

$$\begin{aligned}\alpha_{PO_4^{3-}} &= \frac{[PO_4^{3-}] + [OH^-]}{[PO_4^{3-}]} = 1 + \frac{[OH^-]}{[PO_4^{3-}]} = 1 + \frac{K_{b_1}}{[HPO_4^{2-}]} \\ &= 1 + \frac{5 \times 10^{-3}}{0.2/3} = 1.08\end{aligned}$$

$$[D']_{eq} = [H_2PO_4^-]_{eq} = [PO_4^{3-}]'_{eq} = \left(\frac{C_{H_2PO_4^-}^2}{K'_t} \right)^{1/2}$$

判别式

$$\frac{c_{\text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{eq}}^2}{[\text{D}']_{\text{eq}}^2} = K'_t = \frac{K_{a_2}}{K'_{a_3}} = \frac{K_{a_2}}{K_{a_3} \alpha} = \frac{1.3 \times 10^{-7}}{2 \times 10^{-12} \times 1.08} = 6.0 \times 10^4$$

工业分析

$$[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_{\text{eq}} = \left(\frac{c_{\text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{eq}}^2}{K'_t} \right)^{1/2} = \left[\frac{(0.2/3)^2}{6.0 \times 10^4} \right]^{1/2} = 2.7 \times 10^{-4}$$

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = K_{a_2} \frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_{\text{eq}}}{[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{eq}}} = \frac{1.3 \times 10^{-7} \times 2.7 \times 10^{-4}}{0.2/3} = 5.3 \times 10^{-10}$$

$$\text{pH} = 9.28$$

$$\text{TE} = \pm \frac{10^{0.2} - 10^{-0.2}}{(K'_t)^{1/2}} = \pm \frac{0.95}{(6.0 \times 10^4)^{1/2}} = \pm 3.9 \times 10^{-3}$$

若计算两步合并滴定的误差则减半，即 $\pm 2 \times 10^{-3}$

$$\text{第三 eq : } [\text{H}^+] + [\text{HPO}_4^{2-}] + 2[\text{H}_2\text{PO}_4^-] + 3[\text{H}_3\text{PO}_4] = [\text{OH}^-]$$

$$\text{简化 } [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{eq}} = [\text{OH}^-]_{\text{eq}}$$

强碱滴定一元弱酸

$$c_{\text{HPO}_4^{2-}, \text{eq}} \cdot K_{a_3} = \frac{0.2}{4} \times 2 \times 10^{-12} = 10^{-13} < 10^{-10} \quad \text{不能滴}$$

$$[\text{OH}^-] = \frac{cK_{b_1}}{[\text{OH}^-] + K_{b_1}}$$

$$[\text{OH}^-]^2 + K_{b_1}[\text{OH}^-] - cK_{b_1} = 0$$

$$[\text{OH}^-]^2 + 5 \times 10^{-3}[\text{OH}^-] - \frac{0.2}{4} \times 5 \times 10^{-3} = 0$$

$$[\text{OH}^-]_{\text{eq}} = 0.0135 \quad \text{pOH} = 1.87 \quad \text{pH} = 12.13$$

$$[\text{D}]_{\text{eq}} = [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{eq}} = [\text{OH}^-]_{\text{eq}}$$

$$\text{TE} = \pm \frac{[\text{D}]_{\text{eq}} \times (10^{0.2} - 10^{-0.2})}{c_{\text{HPO}_4^{2-}, \text{eq}}} = \pm \frac{1.35 \times 10^{-2} \times 0.95}{0.2/4} = \pm 0.26$$

例 0.1 mol/L HCl 滴定 0.1 mol/L Na₂CO₃ , 能否分步滴定 ,
pH = 9 , pH = 3.6 的滴定误差多大? H₂CO₃ :

$$K_{a_1} = 5 \times 10^{-7}, \quad K_{a_2} = 8 \times 10^{-11}$$

解：第一 eq : Na₂HCO₃ : [H⁺] + [H₂CO₃] = [CO₃²⁻] + [OH⁻]

$$\text{简化} : [\text{H}_2\text{CO}_3] = [\text{CO}_3^{2-}]$$

判别式

$$\frac{c_{\text{eq}}^2}{[\text{D}]_{\text{eq}}^2} = K_t = \frac{K_{b_1}}{K_{b_2}} = \frac{K_W / K_{a_2}}{K_W / K_{a_1}} = \frac{K_{a_1}}{K_{a_2}}$$

$$= \frac{5 \times 10^{-7}}{8 \times 10^{-11}} = 6.2 \times 10^3$$

勉强工业分析

$$[D]_{\text{eq}} = [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{eq}} = [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{eq}} = \left(\frac{C_{\text{eq}}^2}{K_t} \right)^{1/2}$$

$$= \frac{0.05}{(6.2 \times 10^3)^{1/2}} = 6.3 \times 10^{-4}$$

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = \sqrt{K_{a_1} K_{a_2}} = (5 \times 10^{-7} \times 8 \times 10^{-11})^{1/2} = 6.3 \times 10^{-9}$$

$$\text{pH}_{\text{eq}} = 8.20$$

$$\text{pH}_{\text{ep}} = 9 \quad \Delta\text{pH} = 9 - 8.2 = 0.8$$

$$\text{TE} = \frac{10^{-\Delta\text{pH}} - 10^{\Delta\text{pH}}}{(K_{a_1} / K_{a_2})^{1/2}} = \frac{10^{-0.8} - 10^{0.8}}{(6.2 \times 10^3)^{1/2}} = \frac{-6.15}{78.7} = -0.078$$

第二步滴定相当于强酸滴定一元弱碱 (HCO_3^-)

第二 eq : H_2CO_3

$$[\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$$

简化 : $[\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-]$

判别式

$$c_B K_b = c_{\text{NaHCO}_3, \text{eq}} \cdot K_{b_2} = \frac{0.1}{3} \times \frac{10^{-14}}{5 \times 10^{-7}} = 6.7 \times 10^{-10} > 10^{-10}$$

工业分析

$$[\text{D}]_{\text{eq}} = [\text{H}^+]_{\text{eq}} = [\text{HCO}_3^-]_{\text{eq}}$$

$$[\text{H}^+]_{\text{eq}} = \left(K_{a_1} c_{\text{HCO}_3^-, \text{eq}} \right)^{1/2} = \left(5 \times 10^{-7} \times \frac{0.1}{3} \right)^{1/2} = 1.29 \times 10^{-4}$$

$$\text{pH}_{\text{eq}} = 3.89$$

$$\Delta\text{pH} = 3.6 - 3.89 = -0.29$$

$$\begin{aligned} \text{TE} &= \frac{\left(10^{-\Delta\text{pH}} - 10^{\Delta\text{pH}}\right) [\text{HCO}_3^-]_{\text{eq}}}{c_{\text{HCO}_3^-, \text{eq}}} \\ &= \frac{\left(10^{0.29} - 10^{-0.29}\right) \times 1.29 \times 10^{-4}}{0.1/3} = 5.6 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

当由 Na_2CO_3 直接滴至 H_2CO_3 时，其滴定误差减半，为 0.3%。
用 Na_2CO_3 标定 HCl 时，通常在终点前加热除去 CO_2 。

若剩余 1%，即 $3.3 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ，则

$$[\text{H}^+] = \sqrt{10^{-6.3} \times 3.3 \times 10^{-4}} = 10^{-4.9}$$

$$\text{随机误差 TE} = \frac{10^{-4.9}}{2 \times 0.033} \times \left(10^{0.2} - 10^{-0.2}\right) = 2 \times 10^{-4}$$

滴定时以甲基红、溴甲酚绿作指示剂为宜。

5. 强碱与弱碱混合碱的滴定

$$\frac{c^2_{\text{OH}^-}}{K_{\text{b1}}c_{\text{B}}} \geq 10^6 (10^4) \quad \frac{K_{\text{b1}}}{K_{\text{b2}}} \geq 10^6 (10^4) \quad K_{\text{b2}}c \geq 10^{-8} (10^{-10})$$

例 0.1 mol/L HCl 滴定 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L Na_2CO_3 混合物，能滴哪步，随机终点误差多大？

解：滴定 NaOH

判据

$$\frac{c^2_{\text{NaOH,eq}}}{c_{\text{Na}_2\text{CO}_3,\text{eq}} \cdot K_{\text{b1}}} = \frac{0.05^2}{0.05 \times \frac{10^{-14}}{8 \times 10^{-11}}} = 4 \times 10^2 < 10^4$$

不能选择滴定 NaOH，可合并滴定 NaOH 和 Na_2CO_3 的第一步

第一 eq : $[H^+]_{eq} = 8.2$

$$[D]_{eq} = \frac{c_{Na_2CO_3,eq}}{(K_{a_1} / K_{a_2})^{1/2}} = \frac{0.1/3}{(6.2 \times 10^3)^{1/2}} = 4.2 \times 10^{-4}$$

$$TE = \frac{[D]_{eq} (10^{\pm 0.2} - 10^{\mp 0.2})}{c_{NaOH,eq} + c_{Na_2CO_3,eq}} = \pm \frac{4.2 \times 10^{-4} \times 0.95}{0.033 + 0.033} = \pm 6.0 \times 10^{-3}$$

或 $TE = \frac{10^{0.2} - 10^{-0.2}}{2 \times (K_{a_1} / K_{a_2})^{1/2}} = \frac{0.95}{2 \times (6.2 \times 10^3)^{1/2}} = 6.0 \times 10^{-3}$

第二 eq : 与上例相同

$$TE = \frac{(10^{\pm 0.2} - 10^{\mp 0.2}) (cK_{a_1})^{1/2}}{c_{HCO_3^-,eq}} = \frac{0.95}{\left(\frac{0.1/4}{5 \times 10^{-7}} \right)^{1/2}} = 4.2 \times 10^{-3}$$

