

高濁度水處理之探討 (II) — 混凝加藥控制

江清蓮¹ 羅吉雄¹ 史午康²

摘要

本處藉水質電腦自動監測系統功能及應用層次之提昇，得以逐步落實淨水流程管理。為突破傳統人工加藥作業之瓶頸，進而提昇出水品質並降低操作成本，本處除精簡加藥點並改善加藥設備外，近三年來自行研發混凝加藥自動控制系統，除結合傳統操作經驗及包括流導電流(SC)、濁度、pH等控制參數，可適用於高、低濁度及鹼度變化之淨水處理。

國內自來水大都以地面水為水源，每逢暴雨不僅原水水質驟然變化，水質監控系統容易故障，且經常面臨取水口堵塞致水量變化的窘境；為因應原水高濁度及水量驟變期間之混凝操作，本文乃進一步探討高濁度期間於取水口加注陽離子高分子凝聚劑之可行性。本研究主要內容及重要發現包括：

1. 彙整歷年傳統杯瓶試驗及實場成功之水處理案例建立加藥經驗式，依原水濁度及pH自動設定加藥上下限(前饋控制)及混凝pH及SC之目標值(回饋控制)。
2. 建立防故障之混凝加藥自動控制邏輯，包括自動加藥監控參數中斷及加藥設備故障時之因應，以提昇高濁度水處理自動化之安全性。
3. 高濁度期間於取水口加注陽離子高分子凝聚劑，可大幅提昇水處理之穩定性及淨水效果。

1 臺北自來水事業處生產科副工程司

2 臺北自來水事業處生產科科长

一、前言

混凝機制之回顧

原水中的膠體微粒通常帶負電荷，乃互相排斥而形成懸浮濁度。以硫酸鋁為混凝劑之反應機制為例，水溶液為酸性時形成較大比例帶正電荷之游離性鋁離子(Al^{+3})及複合鋁離子($Al_2(OH)_2^{4+}$ ， $Al_3(OH)_5^{4+}$ ，

$Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$), 其中游離性鋁離子如同 Ca^{2+} 、 Na^+ 僅於微粒表面週圍扮演電性中和角色, 無法使微粒表面發生電性逆轉, 複合鋁離子則可大量附著於微粒表面, 而使微粒表面發生電性逆轉; 若溶液為鹼性時, 鋁離子係以 $Al(OH)_4^-$ 為主, 不利於帶負電性膠體粒子之凝集。前述離子及粒子達到飽和後, 過飽和鋁鹽則生成膠羽態氫氧化鋁 ($Al(OH)_3^0$), 可對微粒進行膠凝。

另一種常用無機高分子聚合物多元氯化鋁 $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$, 受溶液 pH 值影響較小, 由於聚合離子粒徑比硫酸鋁之複合鋁離子粒徑大, 膠凝後生成較大粒徑且較強之膠羽, 因此在沉降過程可承受較大之水平流速。

1966 年 Gerdes 推出流導電流偵測儀 (Streaming Current Detector) 係藉由外力使液體與固體界面間產生相對運動, 以量測微粒表面之電位。Dentel 自 1991 年以來亦陸續提出溶液之 pH 及鋁鹽濃度對 SC 值之影響, 對混凝自動監控技術影響深遠。在低濁度而原水鹼度有變化或以高分子為混凝劑時, 尤能顯現以 SC 為加藥控制指標之優點⁽¹⁾。

混凝操作對原水水質變化之因應

國內地面水源除北部地區之新店溪及翡翠水庫等水源其鹼度較低外 (15~35ppm as $CaCO_3$), 其他水源之鹼度大都較高 (35~150ppm as $CaCO_3$), 對於鋁鹽 (Alum 或 PACl) 之混凝效果有很大的影響。高鹼度原水在低濁度時雖不利於鋁鹽之膠凝, 而在暴雨初期之高濁度期間通常不需加鹼性調理劑⁽²⁾, 使加藥控制之困難度大為降低。低鹼度原水在低濁度時雖有利於鋁鹽之膠凝, 而濁度大於 50 NTU 時, 則通常須添加鹼性調理劑 ($NaOH$ 或 $Ca(OH)_2$)。因此, 高濁度時之混凝加藥, pH 或鹼度之控制乃攸關成敗。鑑於原水水質急驟變化時以杯瓶試驗決定加藥量往往緩不濟急, 本處乃於 1995 年自行研發以原水濁度、pH 及混凝 pH、SC 為控制參數自動控制 Alum(or PACl) 及 $NaOH$ 之加藥系統, 並成功的應用於高濁度之淨水處理⁽³⁾。唯在遭遇數千 NTU 之高濁度時, 含大量懸浮膠羽之混凝水在沉澱池中形成密度流⁽⁴⁾, 尤其當大量沉積之沉澱污泥導致貼近底層之水平流速增加, 使膠羽自下層揚起而帶出, 造成沉澱水濁度上升而影響淨水效果。因此, 在原水濁度過高時勢必得藉由高分子助凝劑以提昇淨水處理效果⁽³⁾⁽⁵⁾。

二、研究方法與設備

本處自 1983 年設置水質電腦監測系統以來, 對原水、淨水處理流程、及供水區水質均能掌握其變化趨勢。對傳統淨水廠而言, 攸關出水水質之淨水處理作業乃加藥混凝及加氯消毒。有鑑於此, 繼水質監測系統的穩定性提升達相當水準後, 乃進一步研發本土化的加藥自動

監控技術⁽⁶⁾。

1996年4月起於長興淨水場進行實場自動加藥控制，設備如圖1，其中連續式杯瓶試驗機之特點包括：

1. 平行之處理單元為四組，包括：(1)模擬實場加藥，(2)實場快混水樣，(3)實場快混水樣再加礬，(4)實場快混水樣再加鹼，以作為修正實場加藥之依據。
2. 共用同一個模擬過濾器，以避免因濾池不同而影響淨水效果之比較。
3. 每組處理容量為1.5公升/分鐘，完整流程及水樣輪測週期皆約30分鐘，可自動完成不同加藥量單元間之淨水效果評估。

除作平行四組處理單元之淨水績效評比外，該自動加藥系統之軟體功能包括⁽¹⁾：

1. 讀取16個A/D偵測訊號(4~20ma)，包括：原水濁度、原水pH、快混池(pH、S.C.)、過濾水(濁度、pH、導電度或粒子數、UV254)及加藥流量計等之4~20 ma訊號，可分別設定偵測範圍，並於螢幕顯示瞬間值，連續偵測訊號可於螢幕連續移動顯示。
2. 以原水濁度及快混pH之每分鐘平均值為前向控制參數，依自動計算之加礬量上下限，每隔一分鐘調整模廠及實場加藥量。
3. 以原水濁度及原水pH之每分鐘平均值，自動計算理想混凝pH及SC，依實際值與設定值之偏差量，每五至七分鐘修正模廠及實場加藥量。
4. 可依設定輪測週期及水樣間緩衝時間，輪測#1~#4之過濾水濁度、pH、導電度或粒子數，於螢幕顯示瞬間值，並依濁度比較結果每五至七分鐘自動修正加藥量。
5. 水質及操作參數分別以1分鐘、1小時及日平均值建檔；可設定掃描圖座標及時間，並可顯示六種資料；掃描圖之組合至少儲存六組以上，並可選擇28種資料傳送至淨水場資料工作站。

該連續式杯瓶試驗機之監控功能應用於高級處理模廠後，原設備乃移至雙溪淨水場；1997年另於直潭淨水場設置同型之連續式杯瓶試驗機及實場混凝自動加藥設備如圖2。因此，目前本處各淨水場中除陽明場外，皆係以該混凝自動加藥設備作水質監測及加藥控制。

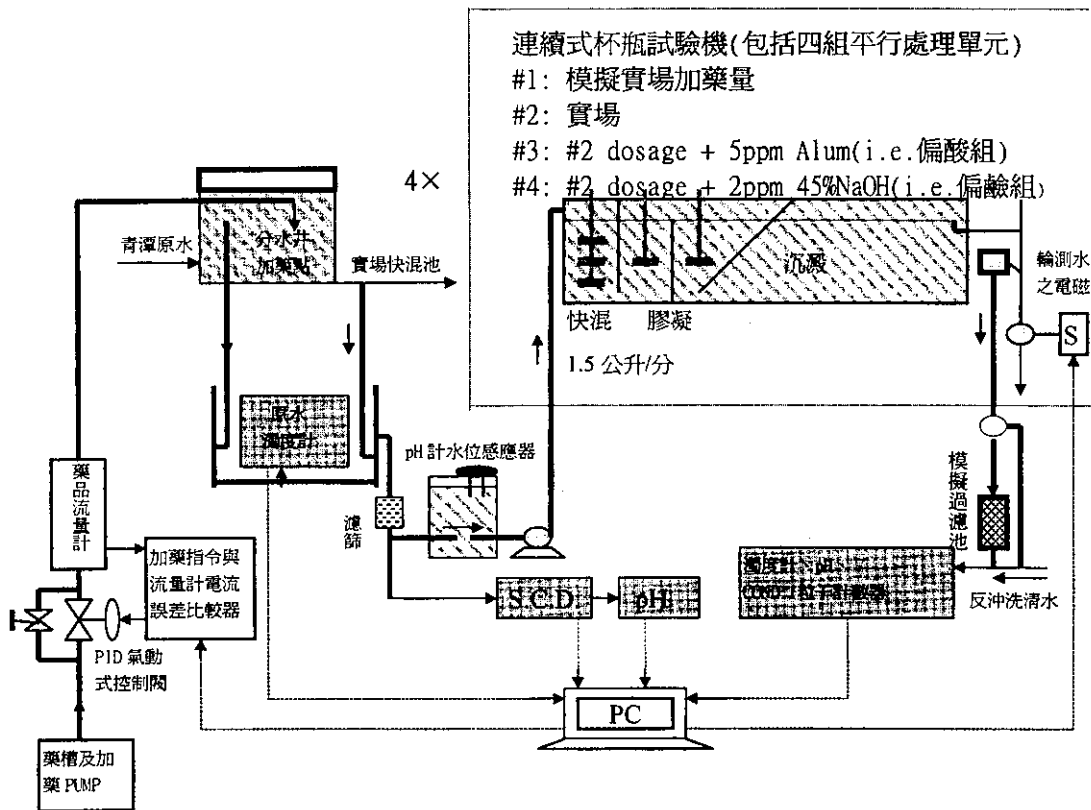


圖 1 長興淨水場實場自動加藥控制及連續杯瓶試驗流程示意圖

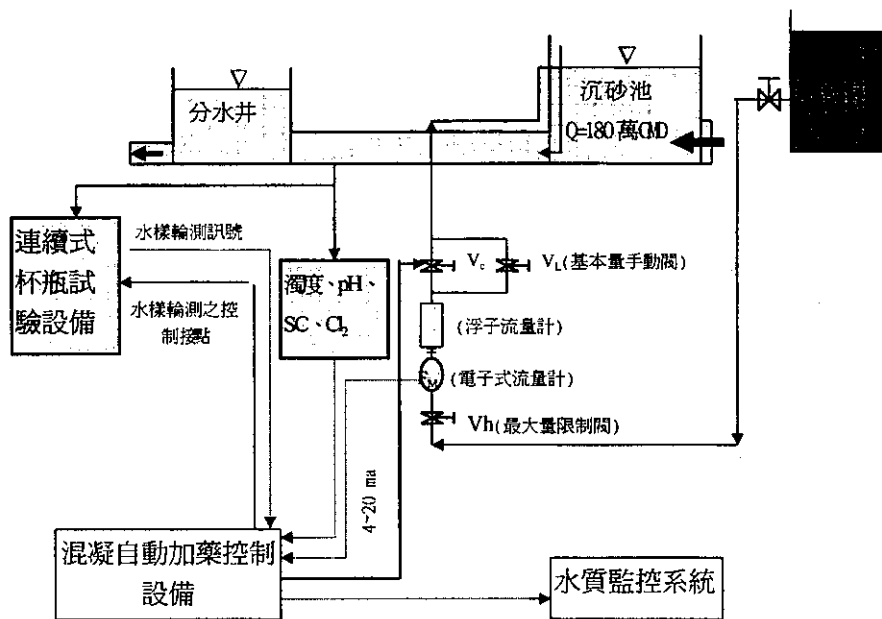


圖 2 直潭淨水場混凝自動加藥系統示意圖

三、結果與討論

3.1 新店溪原水水質特性分析

占本處供水量 97%以上之新店溪水源，其水源集水區業經劃定為「台北水源特定區」，並由「台北水源特定區管理委員會」專責管理，水源水質尚屬良好。新店溪原水之濁度、鹼度及 pH 變化歷程如圖 3，一般而言，平時原水濁度皆相當低，但每遇颱風豪雨則會出現顯著之濁度波峰，在到達濁度波峰後，原水濁度及鹼度則逐漸下降⁽³⁾。

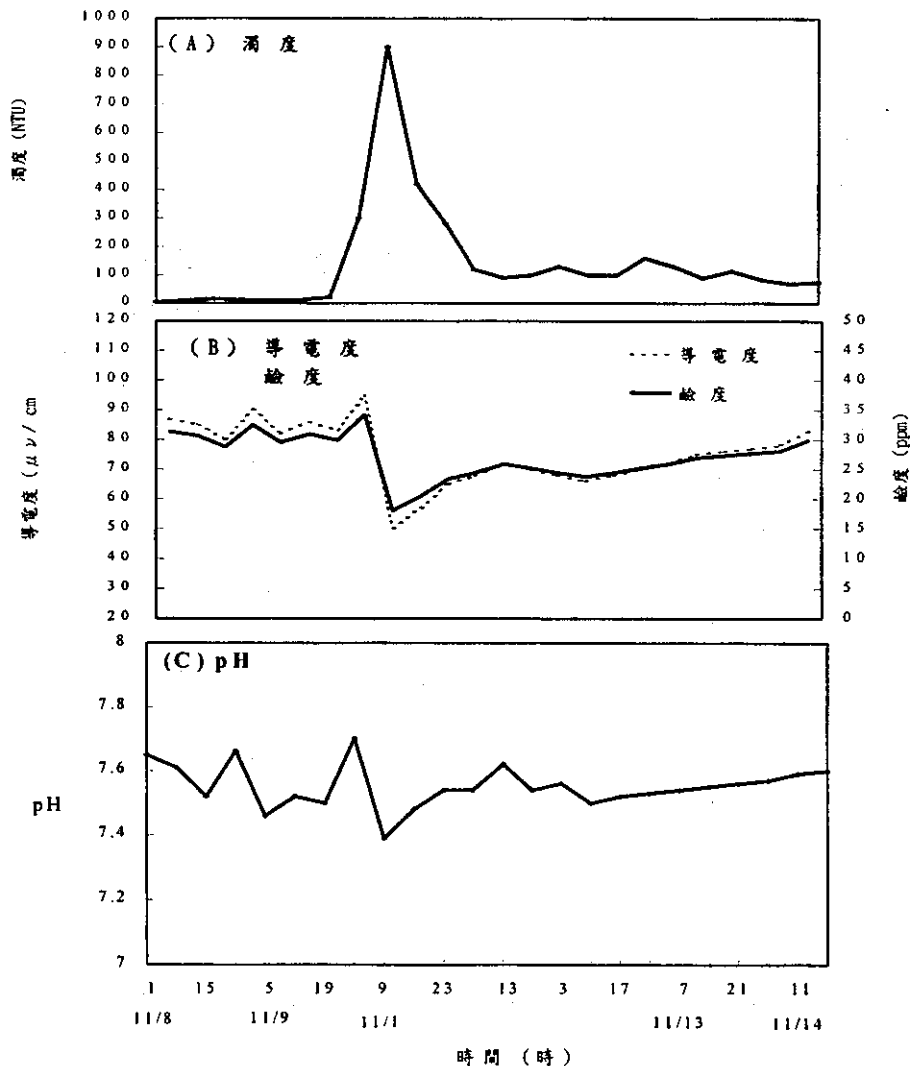


圖 3 高濁度期間新店溪原水水質變化趨勢(A)濁度，(B)導電度、鹼度，(C)pH (資料期間：1996年11月11-14日)

3.2 混凝加藥操作之預警指標

高濁度期間，影響淨水場出水濁度之主要因素為加藥控制。本處加藥操作控制共有六種指標可供參考，其流程及時效如圖 4 所示：

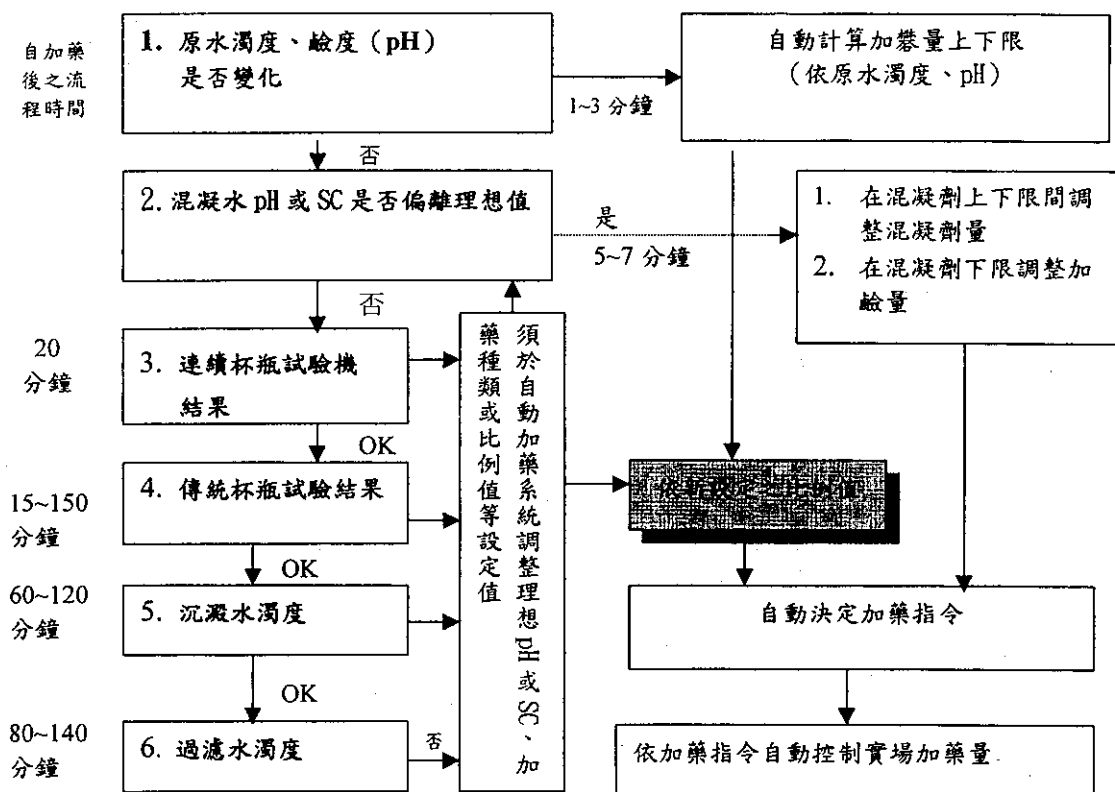


圖 4 淨水操作之預警指標及加藥控制流程

- (1). 依原水濁度、pH 及混凝 pH 在 1 分鐘內自動調整混凝劑加藥指令。
- (2). 混凝水 pH 及 SC 在 5-7 分鐘內自動調至理想預測值。
- (3). 依連續式杯瓶試驗結果自動調整第(1)項之加藥量，本項加藥調整時效約延遲 20 分鐘。
- (4). 依傳統杯瓶試驗結果調整第(1)項加藥量，本項加藥調整時效視杯瓶試驗觀察膠羽外觀，或量測不同沉降速率之殘留濁度，對加藥調整時效約延遲 15-150 分鐘。
- (5). 參考沉澱水濁度自動監測值，重新設定混凝劑之比例值(在±10 內微調)，本項加藥調整時效視實場之流程及取樣輪測週期而定，對加藥調整時效約延遲 60-120 分鐘。
- (6). 參考各濾池之過濾水濁度自動監測值，同第 (5) 項調整比例值，本項加藥

調整時效視實場之流程及取樣輪測週期而定，約延遲 80~140 分鐘。

3.3 混凝自動加藥控制

3.3.1 建立混凝加藥經驗式

加藥經驗式有助於現場在暴雨高濁度時配合原水水質變化，快速決定加藥量，且為自動加藥系統控制邏輯之基本依據⁽⁶⁾。

篩選出本處長興淨水場 1994 年 3 月~1997 年 12 月三年間共 380 筆合格之傳統杯瓶試驗數據，原水水質大部份屬低濁度(<200NTU)，鹼度介於 15~40ppm。其中以硫酸鋁為混凝劑者共 310 筆，以多元氯化鋁(PACl)為混凝劑者共 70 筆，經迴歸分析如圖 5 得到 Alum 及 PACl 加藥經驗式如下：

$$\text{Alum upper limit} = 6.8 + 2.8 (\text{Turb}_{\text{RW}})^{0.5}$$

$$\text{PACl upper limit} = 5.7 + 1.8 (\text{Turb}_{\text{RW}})^{0.5}$$

Alum 及 PACl 之加藥量對(原水濁度)^{0.5}之相關性佳($R^2=0.75\sim0.85$)，其中 PACl(10% Al_2O_3)/Alum(8% Al_2O_3)之加藥量比值約為 0.6。

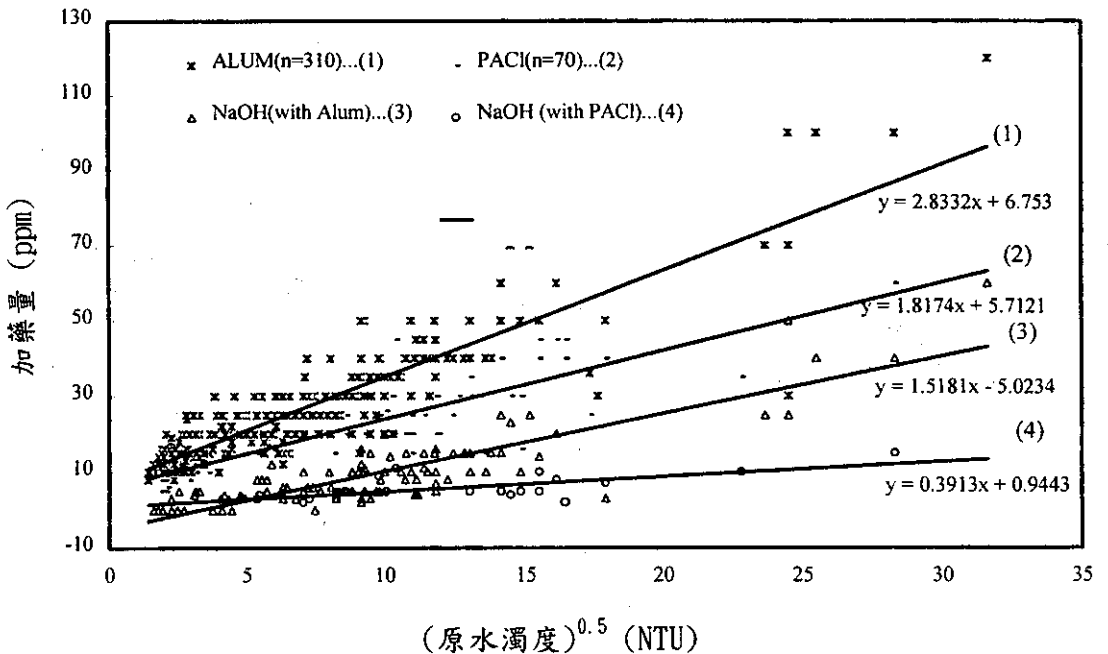


圖 5 杯瓶試驗混凝劑加藥量與原水濁度之相關性

上述加藥經驗式經本處依混凝自動加藥系統三年來之操作經驗，再逐步納入原水 pH、混凝水 pH，及由連續式杯瓶試驗機產生之自動修正值等參數修正如式(1)。該式除供自動加藥系統自動運算加藥量安全上下限如圖 6 外，亦可供暴雨高濁度時手動加藥參考；另考量取樣系統、偵測器或加藥控制設備均可能發生故障，乃增設加藥指令之安全設限及極端情況下之最大及最小加藥量。

$$\text{加藥量(ppm)} = \{ (\text{原水濁度})^{0.5} * [a + b (\text{混凝水 pH} - c) + f * (\text{原水 pH} - g)] + d + \text{Table} + \text{自動修正值} \} * \text{比例值} \dots \dots \dots (1)$$

其中 Table 係不同原水濁度範圍之混凝劑添加量，可彌補計算式亦可使用非線性情況。

以長興場為例，以 Alum(8% Al₂O₃) 為混凝劑時

上限：a=3 b=3 c=6.4 d=3 f=4 g=7.0，

自動修正值=0~4 比例值=0.9~1.1

下限：a=2.5 d=0 f=2，餘皆不變。

以 PACl(10% Al₂O₃) 為混凝劑時，僅比例值修正為 0.5~0.6，餘皆與 Alum 同。

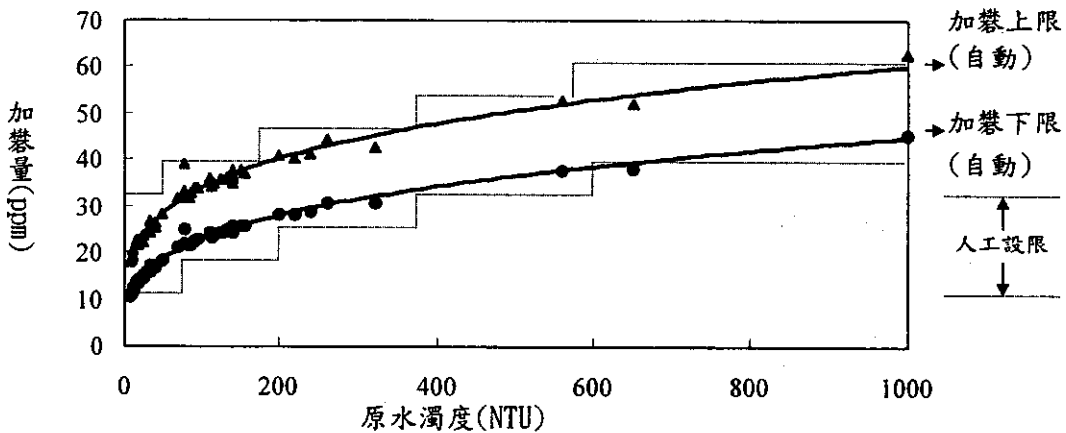


圖 6 自動及手動硫酸鋁加藥上下限之設定

3.4 以理想混凝 pH 或 SC 對加藥量進行微調

理論上高 pH 原水其濁度顆粒表面電位較具負電性，此外由本處淨水場實際操作經驗得知：高鹼度原水隨濁度上升，其理想之快混 pH 由平時 7.0 降為 6.4；反之，低鹼度原水無論原水濁度高低，其理想之快混 pH 則介於 6.8~7.0。乃更進一步以原水 pH、原水濁度及連續杯瓶試驗機修正值預估理想的混凝 pH 如式(2)，並參考長興淨水場使用 Model-3000 XR 流導電流儀[偵測範圍(-10~+10)，電流訊號未放大]之實場數據彙整成經驗式(3)⁽⁶⁾。

$$\text{混凝 pH}_{\text{ideal}} = \text{原水 pH} - (0.2 + a) - (2-3) \times [\text{原水 pH} - (7.1 \pm 0.1)] \times (\text{原水濁度} / (100-300))^{0.5} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{凝混 SC}_{\text{ideal}} = (-0.26 + a) - 0.000002 \times (\text{原水濁度})^2 + 0.001 \times (\text{原水濁度}) - 0.2 (\text{凝混 pH}_{\text{ideal}} - \text{凝混 pH}) \dots \dots \dots (3)$$

其中 a：連續杯瓶試驗機修正值

自動加藥系統每隔所設定之實場反應加藥量變化所需時間，依原水濁度及原水 pH 之最近一分鐘移動平均值自動計算凝混 pH_{ideal} 及凝混 SC_{ideal}；前述計算值可再經連續式杯瓶試驗機自動進行微調修正。

當原水水量或原水鹼度變化，導致凝混 pH 與凝混 pH_{ideal} 出現偏差時，pH 調整頻率須配合實場反應加藥量變化所需時間，每次調整量則視最近一分鐘凝混 pH 之移動平均偏差量而定。

當實際凝混 pH > 凝混 pH_{ideal}，先調降加鹼量；若加鹼量已為零，則調增凝混劑，但凝混劑加注量不得大於凝混劑之上限值。反之，當實際凝混 pH < 凝混 pH_{ideal}，先調降凝混劑量；若凝混劑加注量已降至凝混劑之下限值，則調增加鹼量。

當凝混 pH 或凝混 SC 之偵測功能故障時，兩者可互補自動切換控制路徑，其中以 SC 偏差量調整凝混劑及加鹼量之方向，恰與 pH 偏差量之控制方向相反。

3.5 原水濁度上升之加藥操作

由前述凝混 pH_{ideal} 之自動計算公式(2)所得之凝混 pH_{ideal} 包含以下考量：(1) 平時之高鹼度低濁度原水，通常其(凝混劑量/原水濁度)為高比值，其凝混 pH 值可略為提高(使用 alum 時凝混 pH_{ideal} 可高達 7.2，使用 PACl 時凝混 pH_{ideal} 更高達 7.4)；(2) 高濁度初期，當原水鹼度 > 30 ppm 且原水濁度 > 20 NTU，實場操作及杯瓶實驗結果顯示降低凝混 pH 有助於凝混(使用 alum 時 pH < 6.6，使用 PACl 時 pH <

6.8)。

加鹼操作原則

當 pH 高於理想混凝 pH 須作調整時，若混凝劑加注量未超過經驗值，則強制停止加鹼操作；若屬暴雨原水濁度上升，當之前混凝劑加注量小於原水濁度上升後之混凝劑加注量下限值，在一分鐘內以不影響混凝 pH 為原則，依一定比例（混凝劑/加鹼量），同時提高混凝劑及加鹼量。

3.6 原水濁度及水量驟變之傳統加藥操作

取水口堵塞導致原水水量驟變，在原水水量恢復初期歷時約半小時，因原水管內積泥受水流沖刷而致濁度驟增，此時應將原水濁度視為取水口堵塞前之三倍作加藥考量，若未加注高分子助凝劑，可採取下述因應措施：

暴雨致取水口堵塞期間，原水鹼度通常在 10~20ppm 間，理想混凝 pH 約為 6.7~7.0 與原水 pH 接近，可採取同時增減混凝劑及加鹼量（混凝劑與加鹼量之比例恰好酸鹼中和）之方式因應，即使原水水量高估，除加藥成本偏高外仍屬成功之混凝。

3.7 使用高分子凝聚劑

本處最初使用高分子凝聚劑係 1992 年暴雨導致高濁度持續二個月，不巧 PACl 因故供應中斷，使淨水處理陷於困境。經以杯瓶試驗緊急測試多種高分子凝聚劑，發現其中 Cat-floc-T（一種 poly diallyl dimethyl ammonium chloride，即 poly (DADMAC)）效果甚佳，乃辦理緊急採購並進行實場加注，當時僅以 0.3 ppm Cat-floc-T 即可將清水濁度適時降低至 2 NTU。

傳統混凝劑與高分子凝聚劑混合使用之杯瓶試驗

篩選濁度波峰及暴雨高濁度後期原水含細小懸浮顆粒（即白濁水）期間之杯瓶試驗數據，將高分子凝聚劑對照 alum 之杯瓶試驗結果迴歸分析如圖 7。使用 Cat-floc-T 高分子凝聚劑，在沉降速率 $(Q/A)=1\sim 2$ cm/min.，即使原水濁度高達 1200 NTU，其沉澱後殘留濁度皆小於 10NTU，顯示 Cat-floc T 能緩和原水濁度驟增之衝擊；此外，無論以 Alum 或 PACl 為混凝劑若添加少量 Cat-floc-T 皆能有效降低殘留濁度；在表面負荷較高 $(Q/A=2$ cm/min.) 情況下，效果更顯著；對硫酸鋁而言，高分子凝聚劑之增進效果更明顯。

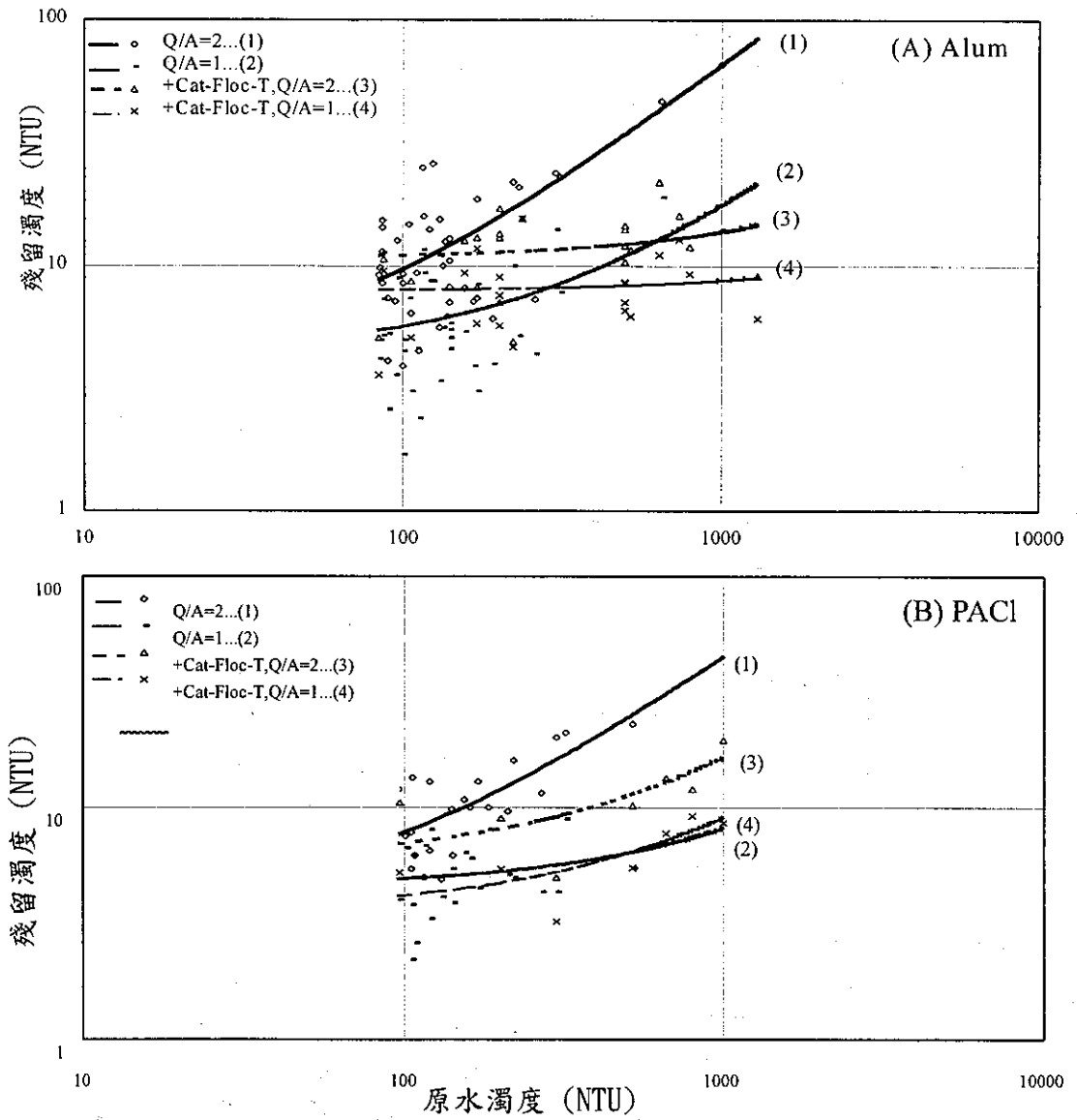


圖 7 添加高分子凝聚劑對 (A) 硫酸鋁及 (B) 多元氯化鋁在不同表面負荷下混沉效果之影響

模擬高分子凝聚劑添加於不同加注點之杯瓶試驗

由杯瓶試驗結果發現若將高分子提前於取水口加注(混凝劑仍於淨水場加注)，對濁度之去除效果更顯著(如表1)。

表1 模擬高分子凝聚劑於青潭取水口加注之設計實驗

— Alum 與高分子凝聚劑 (Cat-floc-T) 加藥順序對混凝效果之影響

批號	ALUM (ppm)	高分子 (ppm)	加藥順序	5分鐘取樣濁度 (沉降速率=2)	10分鐘取樣濁度 (沉降速率=1)
1	20	0.8	同時加注	33	25
	20	0.8	先加高分子慢混3分鐘	13	7
2	20	0.6	同時加注	37	19
	20	0.6	先加ALUM慢混1.5分鐘	23	16
	20	0.6	先加高分子慢混15分鐘	18	9
3	20	0.6	先加ALUM慢混10分鐘	20	8
	20	0.6	先加高分子慢混10分鐘	10	5
4	20	0.4	同時加注	30	19
	20	0.4	先加ALUM慢混10分鐘	17	12
	20	0.4	先加高分子慢混10分鐘	11	5

(日期：1996.08.04，原水濁度264 NTU，鹼度25ppm，水溫27°C，pH 7.3)

加注高分子凝聚劑之混凝自動加藥操作

高分子凝聚劑之混凝機制可以離子之解離會受錯合劑濃度影響之觀念來說明。由於淨水場所加注混凝劑之複合離子係兩性化合物，將視高分子錯合劑濃度多寡而略自修正解離常數，即當陽離子高分子加注過量時，會使流導電流值偏高，此時鋁鹽之負電性複合離子量需增加，若提高混凝之pH則有助混凝效果⁽³⁾。另為確保下游(淨水場)加注點能配合取水口之高分子加注，適時調整加藥，乃訂定高分子凝聚劑加注標準作業流程如圖8。

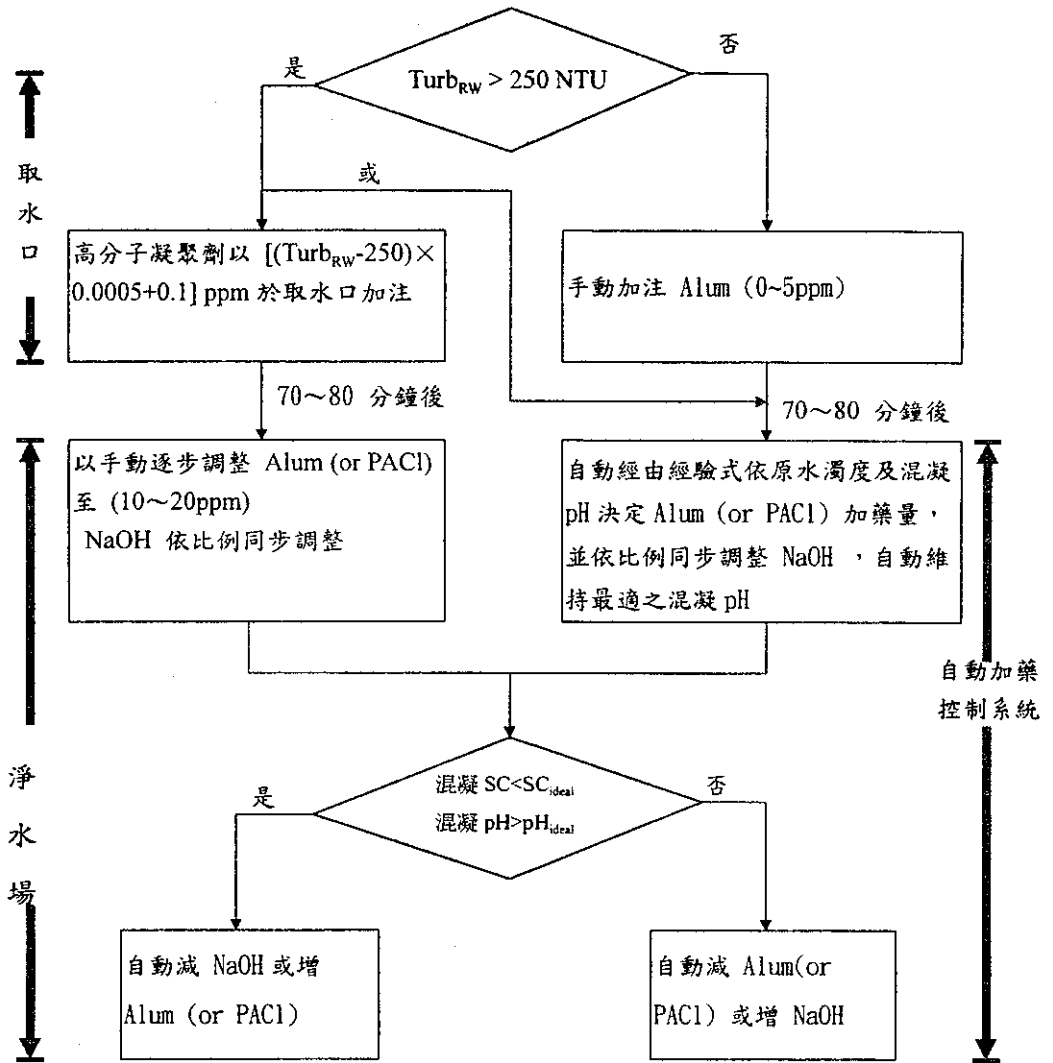


圖 8 長興場高濁度時期之混凝加藥對策

四、結論與建議

1. 本處自行研發之混凝自動加藥系統針對「高濁度原水期間監測功能易受影響」及「使用不同混凝劑」等問題，持續不斷改進軟體及監控設備，皆有因應之道，已為未來持續提昇出水水質建立基礎。
2. 暴雨高濁度期間，於取水口加注陽離子高分子凝聚劑【Poly (DADMAC)】，不僅可提升混沉、過濾效果及降低加藥、污泥處理成本；當高分子凝聚劑受原水濁度、水量驟變發生電性中和不足或電性逆轉時，仍可藉由淨水場追加少量硫酸鋁、多元氯化鋁或氫氧化鈉以改善混凝效果，大幅提昇暴雨高濁度水處理之穩定性。
3. 淨水場應瞭解原設計功能並釐清實際處理能力，掌握原水水質特性及變化，以訂定各項標準作業流程，包括：加藥量調整、混凝劑選用、使用高分子凝聚劑或水量調配等，俾及時對高濁度水處理採取適當應變措施。
4. 淨水加藥自動化為更進一步提昇暴雨高濁度水處理效果之利器，而本土化之自動加藥技術可貴在可不斷自我成長，惟相關監控設備之維護及人員訓練應予落實。

參考文獻

1. 江清蓮、蔣本基，「淨水處理混凝加藥自動監控系統之探討」台大環境工程研究所碩士論文，1997。
2. Kawamura S., Optimisation of basic water-treatment processes-design and operation: coagulation and flocculation, *J Water SRT-Aqua*, 45(1): 5~47, 1996
3. Shih W. K. and Chiang C. L., Treatment of High Turbidity Water , 4th *International Workshop on Drinking Water Quality Management and Treatment Technology*, pp. 197~209 TAIPEI, 1998.
4. Kawamura S., Optimization of basic water-treatment process-design and operation: sedimentation and filtration, *J Water SRT- Aqua*, 45(3): 130~142, 1996.
5. Tambo N. and Wang X. C., Control of coagulation condition for treatment of high-turbidity water by fluidized pellet bed separation *J Water SRT-Aqua* ,42(4): 212~222, 1993.
6. 江清蓮等，「淨水處理加藥自動化之可行性探討」，台北市政府員工平時自行研究報告，86年。