

以光纖監測系統自動控制混凝加藥之研究  
Automatic Control for Chemical Dosing in Laboratory  
Simulation of Full-scale Coagulation Process  
by Using an Optical Monitor

劉棋彬\* 黃志彬\*\*

**摘要** 本研究的目的，是為了評估光學偵測器應用於混凝加藥自動控制的可行性。首先利用一連串的批次試驗，模擬淨水處理之程序，以確定此光學偵測器輸出值與最佳加藥量之關係；由此試驗結果顯示，在相同的加藥量下，膠羽的密度隨膠羽粒徑之增加而減小，且膠羽的粒徑與有效膠羽密度成一對數線性關係；此結果亦同時顯示，此光學偵測器之Ratio輸出值，可以正確地指示出在膠凝過程中，膠羽粒徑的變化趨勢與沈降速度。因此，利用此監測器來決定硫酸鋁與多元氯化鋁，在不同情況下的最佳加藥量是很可行的技術。

本研究中設計一套控制系統，並連接實驗室規模的水處理程序，用以評估混凝加藥處理之效果；而由控制系統中的電腦記錄所有階梯式加藥（progressive dosing）所產生的Ratio value。當前後兩次的Ratio值差，達到預先設定值時，此控制系統便可藉此決定一最佳加藥量，並改變水處理模擬程序的加藥量，然後停止加藥模擬操作。當進流水的濁度變化量高於設定值時，則重新啓動加藥控制系統，模擬混凝操作並決定新的最佳加藥量。由實驗室的模擬結果顯示，此光學監控系統成功地應用在實驗室規模的即時混凝加藥控制。

### 一、前言

隨著經濟文明的發展與生活品質的提高，居民對飲用水的質與量之需求也日益提高；而另一方面伴隨著工業與經濟的發展，所造成河川污染量的增加，以及過度的開發也使得水源區的水質愈趨惡化。基於以上兩大因素，淨水廠為滿足居民的生活品質要求，確保飲用水的安全與衛生，不能不投注大筆經費於淨水設備的改善與更新。而長久以來，混凝/膠凝程序(Coagulation/Flocculation)一直是淨水處理的傳統單元，其操作的正常與否關係到處理水質的好壞與後續處理設備的操作負荷；然而，大多數水廠操作員往往只根據經驗之判斷（如原水濁度），或不定期的瓶杯試驗（Jar test）來決定混凝的加藥劑量，如此的方法不僅耗費人力也不符合科學的要求，一旦面臨水量水質頻繁的變動，或是暴雨後突增的高濁度變化，處理上的延遲，往往造成膠凝效果不佳，增加處理設備的負荷而淨水效果也因此變差。

目前淨水場所使用的混凝劑，大多以硫酸鋁（Alum）和多元氯化鋁（PACl）為主，通常為了維持混凝的效果，都實施超量加藥以達到沈澱拌除的混凝去除效果，因此容易造成混凝劑的殘餘及成本之浪費。1988年Letterman<sup>(1)</sup>等人對殘餘鋁鹽的研究指出：淨水廠的出水中所殘留的鋁鹽來自混凝劑的過度增加，而攝取過量鋁鹽可能導致神經系統的疾病（如老年癡呆症）。除此之外，若使用聚合物形態的混凝劑，如殘餘量過高也將對人體產生神經毒性<sup>(2)</sup>。因此不能忽略混凝劑的超量殘餘對人類及水體生態所造成的影響。

\*交通大學環境工程所碩士

\*\*交通大學環境工程所副教授

基於健康的考量、經濟的效益以及操作的便利，如何改善目前混凝加藥模式實為當務之急；而本研究所採用新的即時監測膠凝技術，即是基於上述考量為出發點，探討其應用於監測膠凝行為的可行性，藉此決定一個兼具經濟效益與處理效果的最適加藥量；以及探討其應用於連續自動監控的應變能力與穩定性，期望能有效地解決混凝加藥處理所面臨的問題。

## 二、光纖監測系統(PDA)之原理

PDA是一種光學偵測儀器，其偵測原理乃利用光束通過懸浮液時的光強度衰減程度，來定義懸浮液中的顆粒濃度變化。而造成光強衰減的因素不外乎兩種：(1) 懸浮顆粒造成光束的反射或散射，(2) 溶解性物質或色度物質吸收光強度。就PDA的偵測理論而言，Gregory解釋說：穿透流動性懸浮固體溶液的光強度變動平均值大小，是由於樣本體積中顆粒總數的隨機變化所造成；假設懸浮液中顆粒數目的變化成卜瓦松分佈 (Poisson distributed)，則可說明光強度變化的均方根植，與顆粒的散射係數和顆粒濃度的根號值有關。對於單一分散相的懸浮溶液，結合rms值和測量濁度值，可以簡單地推導出顆粒數目和大小；這個過程並不需要事先知道顆粒的光學性質，而且適用於寬廣的濃度範圍。

若將穿透流動性懸浮液的光強度變化，應用Lambert-Beer Law<sup>(4)</sup>以電壓的形式表示如下式。

$$\frac{\bar{V}}{V_0} = \exp(-\tau) \quad (4)$$

$$\text{由上式可得：} \ln\left(\frac{\bar{V}}{V_0}\right) = -\tau = -NC\ell \quad (5)$$

其中  $V_0$ ：入射光相對之電壓輸出

$\bar{V}$ ：入射光穿透過懸浮液之相對平均電壓輸出

$\tau$ ：濁度

$N$ ：單位體積之顆粒數目

$C$ ：顆粒之散射截面積

$\ell$ ：通過懸浮液之光徑長

在高顆粒濃度的條件下， $\ln(V_0/V)$ 和顆粒濃度的關係，不再如5式所預期成線性相關。造成這種變化的因素，是由於顆粒的多方向散射效應 (multiple scattering effects)，使較多的光穿透過懸浮液時未被偵測到而低估濁度。而對於稀釋的懸浮液而言，應用Lambert-Beer law也不容易預測顆粒凝集對濁度的影響，因為就算忽略入射光被顆粒吸收、以及向前散射的效應之外，顆粒的散射截面積，將會隨著凝集時顆粒的大小的改變而變化<sup>(4,6)</sup>。

假設特定體積的懸浮溶液，其內顆粒數目因布朗運動 (Brownian motion) 的擴散作用而呈隨機的分布。假設這隨機改變的機率亦符合卜瓦松分布 (Poisson distributed)，其在統計上一個有用的特性就是：顆粒數的平均值和變異數等於  $\nu$ ，而其相對於平均值之標準偏差等於  $\nu^{1/2}$ 。舉例而言：如果顆粒的平均數目為 1000，則實際數目將在  $1000 \pm 63$  (95% 的可信賴區間內，2個標準偏差) 的範圍之內。

考慮懸浮液流經光纖照射器時，若光徑長為 $l$ ，有效光徑截面積為 $A$ ，則樣本體積為 $Al$ ，而光徑中的顆粒平均數目為：

$$v = NA\ell \quad (6)$$

由4及6式，針對單一懸浮液可導出下式：

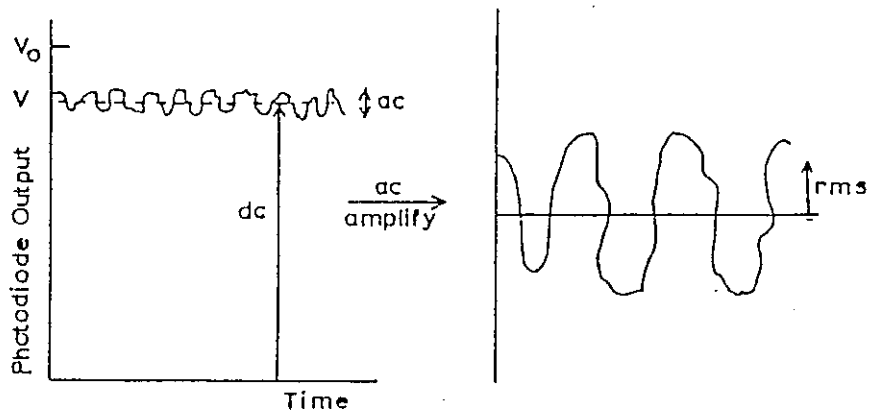
$$\frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{\bar{V}}{V_0} = \exp\left(\frac{-vC}{A\ell}\right) \quad (7)$$

其中  $I_0$ ：入射光相對應之電流

$\bar{I}$ ：入射光穿透過懸浮液後相對應之平均電流

$A\ell$ ：光徑之截面積。

上式表示當懸浮液通過光徑照射時，在光徑中的顆粒數目將會相對於平均數目成一隨機變動，並非為固定值；舉例而言，假設懸浮溶液中單位體積的平均顆粒數目為1000，則在光徑中實際觀察到的顆粒平均數目可能是1015、971、993、1025等值，這些數值相對於平均值有一隨機的變動存在。而量測訊號變動的最簡單方法就是：計算其均方根值（root mean square；rms），即考慮當穿透過懸浮液的光強度（dc component）在扣除平均值部分之後，相對於平均值之變動值（ac component）的rms值，如圖一所示。結果顯示，如果顆粒數的變化符合卜瓦松分布，則 $V_{rms}$ 值相當於對平均電壓值的標準偏差。



圖一 PDA感應器光二極體的輸出訊號

Gregory<sup>(4)</sup>利用7式及假設光徑中的顆粒數目變化，將會高於或低於平均值一個標準偏差，其間之差異為兩個標準偏差，因而導出下列二式：

$$V_{rms} = V_0 \left[ \exp(-NC\ell) \right] \left( \frac{NC\ell}{A} \right)^{1/2} C \quad (8)$$

$$V_{rms} = \bar{V} \left( \frac{N\ell}{A} \right)^{1/2} C \quad (9)$$

由以上推論可知： $V_{rms}$ 的變化決定於顆粒濃度與顆粒的散射面積，而 $\frac{1}{A}$ 為常數值（因為使用同一條層流管，光徑的長度和截面積為固定值）。Gregory將 $\frac{V_{rms}}{V}$ 的比值定義為Ratio值，用來表示顆粒凝集時之變化，當作PDA的一個輸出訊號並作為監測膠凝程度的指標。如下式：

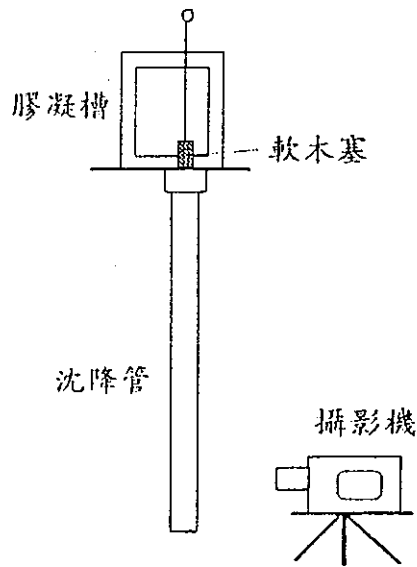
$$\text{Ratio} = \frac{V_{rms}}{V} = \left( \frac{Nc}{A} \right)^{1/2} C \quad (10)$$

當顆粒凝集時，顆粒數目濃度會減少，而凝集後之散射截面積通常大於未凝集前；而凝集後懸浮液的濁度增大或減小，則決定於起始顆粒的大小，但對於顆粒大小為 $1\mu m$ 或更大者，其凝集後所產生的濁度減小並不顯著。上述結果中可以看出：隨著膠凝作用之進行，愈多的顆粒凝集成單一聚集體時，表示膠凝作用愈佳，其Ratio亦愈大，因此可以有效地當作膠羽大小的指標；即此值愈大，相對地表示生成的膠羽也愈大。經由上述一連串的數學式推導及說明，可知利用PDA來監測膠凝作用是一方便且可行的工具。

### 三、實驗方法

#### 3.1 膠羽的粒徑與密度分析

1978年Tambo和Watanabe<sup>(10)</sup>則利用簡單的攝影技術拍攝高領土膠羽的沉降過程，直接從螢幕上計算膠羽的粒徑和沉降速度，再代入史脫克公式（Stoke's eq.）中計算出膠羽密度，之後更有多位學者<sup>(11,12,13,14)</sup>延續上述方法，繼續探討活性污泥膠羽的粒徑大小、密度、孔隙率及碎形維度（Fractal dimension）。因此本實驗採用自由沉降的方法，將利用瓶杯試驗方法產生的膠羽置入自製的沉降設備中，如圖二。將沉降管頂端的軟木塞打開，讓膠羽自由沉降，並在充滿水的沉降管的底端，利用攝影機拍攝膠羽達終端速度的沉降過程；將拍攝的影帶在電視中播放，可於電視螢幕上量測膠羽之直徑與沉降速度，再代入Stoke的修正公式<sup>(10)</sup>如下（當 $\psi = 0.8$ 時，如11式），可計算出膠羽之密度。



圖二 膠羽沉降試驗設備

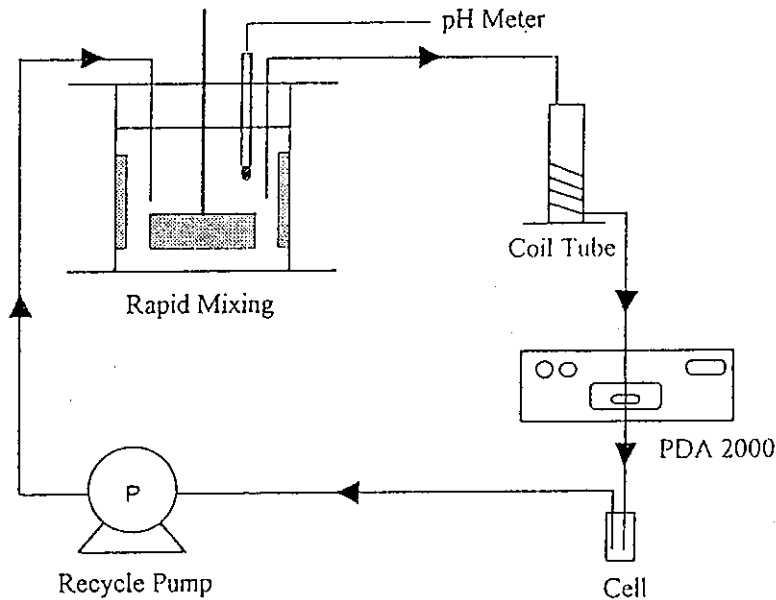
$$w = \frac{g(\rho_f - \rho_w)d_f^2}{34\mu} \quad (11)$$

其中 $\rho_f$ 為膠羽密度； $\rho_w$ 為水的密度； $\mu$ 為水的黏滯係數。

### 3.2 實驗流程

#### 3.2.1 批次試驗

實驗裝置如圖三所示：利用包土混合自來水配製人工原水，至少須攪拌混合一小時以上使其能混合均勻，其濁度分別調為20、80、200NTU模擬低、中、高不同濁度變化(15)。取1升的人工原水置於反應槽中，以每分鐘200轉的速度( $G=468s^{-1}$ )攪拌之，將層流管置入，並以原水調PDA之RMS輸出值為0.5(16)，採用階梯式加藥法(programmed dosing)加入定量混凝劑(分別以Alum和PACl兩種混凝劑做試驗)，並控制pH值在 $7.00\pm 0.05$ 左右，因此水樣經過快混後，再流經2m長的層流管(部分為彎管狀態)產生膠凝作用( $Gt=10667$ )，再通過PDA之光纖偵測器；之後水樣再以蠕動幫浦抽回反應槽中，為使水不在cell中累積，蠕動幫浦的流量須大於管流量，以維持反應槽中水位高低固定。記錄此加藥量下PDA的Ratio及D.C.輸出值，依此法依序增加混凝劑量，重複試驗並記錄Ratio及D.C.值。將所有膠凝後之水樣利用瓶杯試驗法(慢混25rpm、20mins，靜置20mins)，測其殘餘濁度；再將沈澱後的膠羽移作沈降性試驗(10)，分析不同加藥量下，膠羽的粒徑、密度以及沈降速度。

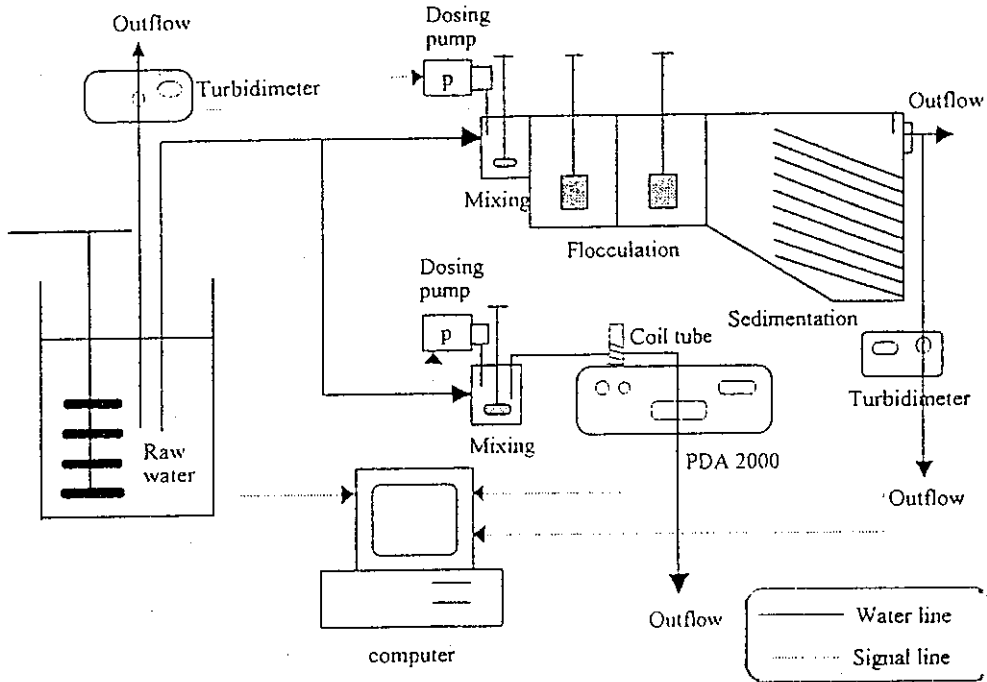


圖三 批次實驗設備裝置圖

#### 3.2.2 連續流式試驗

實驗裝置如圖四所示，設定模型槽的快混速度為200rpm( $G=468s^{-1}$ )，慢混速度為60rpm( $Gt=24854$ )。將配製好的人工原水以幫浦( $Q=0.5L/min$ )抽至模型槽與PDA系統之快混槽中，此時電腦自動控制程式偵測到濁度的改變，會啟動加藥機加入混凝劑。PDA則由PDA系統之快混槽水樣讀取Ratio值，經由介面卡輸入電腦中，每次增加混凝劑量後60秒(水樣在層流管中之流動時間)讀Ratio值，而電腦根據Ratio值的變化增加測試槽的混凝劑量；當前後兩種加藥量的Ratio值差值小於0時，則停止加藥量測試。電腦則以前一次加藥量為最適加藥量，啟動模型槽的加藥機定量加藥，此時繼續監測模型槽進流水及出流水之濁度與pH值變化，評定處理效果，如此步驟為一種濁度的最適加藥量判定過

程。當進流水之濁度變化相差10NTU以上時，則控制系統會自動重新進行加藥量測試，再一次決定新的最適加藥量；如此以不同的濁度連續變化，測試整個控制系統的穩定性與應變力。本實驗中以六種不同的濁度變化（20、80、200、500、1000、2000NTU）做測試，並以不同的加藥間隔(每次增加1%、2%、5%)累積增加加藥量做測試，希望找出最適合的增加量，可以節省劑量、減短延遲判斷時間，並可以達到很好的沈澱去除效率。



圖四 連續流式混凝加藥監控試驗設備裝置圖

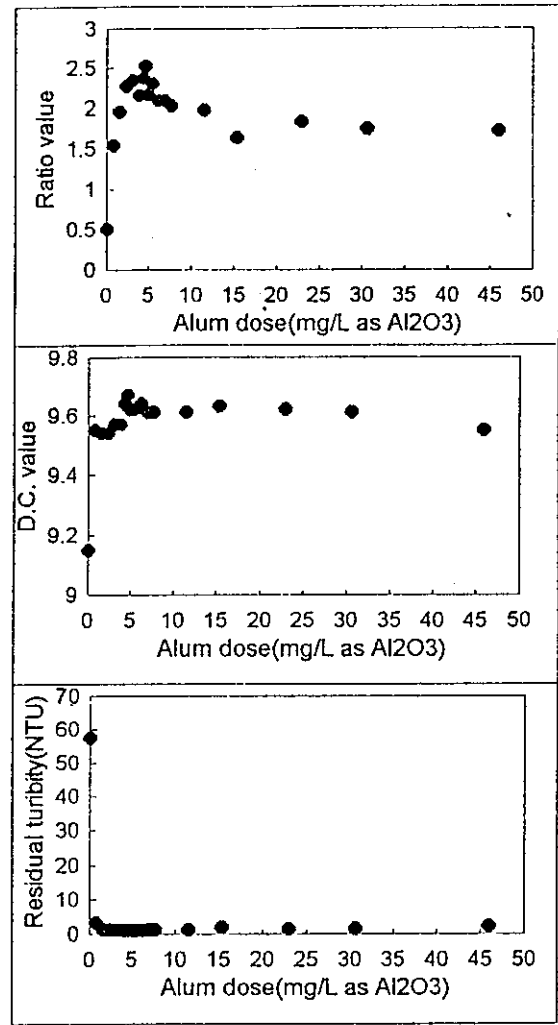
#### 四、結果與討論

不同的混凝劑，由於本身的特性不同以及混凝膠凝機制的不同，將導致膠凝的過程與結果有所差異。因此本研究針對硫酸鋁及多元氯化鋁兩種不同混凝劑，進行試驗並探討PDA儀器操作時之特性及其膠凝作用時膠羽粒徑與密度之變化，並嘗試以Ratio index膠凝曲線來決定混凝程序之最適加藥量，並以此方法作為連續式自動監控的操作依據，應用於實場之操作。

##### 4.1 Ratio value與濁度隨加藥量之變化

(a) 硫酸鋁之混凝效應（如圖五所示）：經由批次的混凝試驗結果發現：隨著鋁鹽加藥量的依序增加，Ratio value亦隨之增大，而代表水樣濁度的DC值亦增大<sup>(5)</sup>，此結果顯示懸浮液中的顆粒因膠凝作用而凝聚，顆粒因此變大，但因光散射面積總和減少，使得濁度變低，而DC值增大；水樣經由Jar test方法測得之殘餘濁度亦降低至1 NTU以下。而當所加入的鋁鹽超過一定量時，因為顆粒的表面電性逆轉，使得顆粒聚集程度降低，所以Ratio value也慢慢降低，DC值也減小，殘餘濁度稍稍增大但仍維持在1.5 NTU以下的程度，也就是說膠凝效果稍微變差。當Ratio value最大時，DC值亦最大，而此加藥劑量下的水樣，經Jar test後其上澄液之殘餘濁度降至最低約0.8 NTU；由2.4節的原理所述，此時顆粒的膠凝效果最佳，所生成的膠羽也最大，沈降效果最佳，此加藥量稱為最

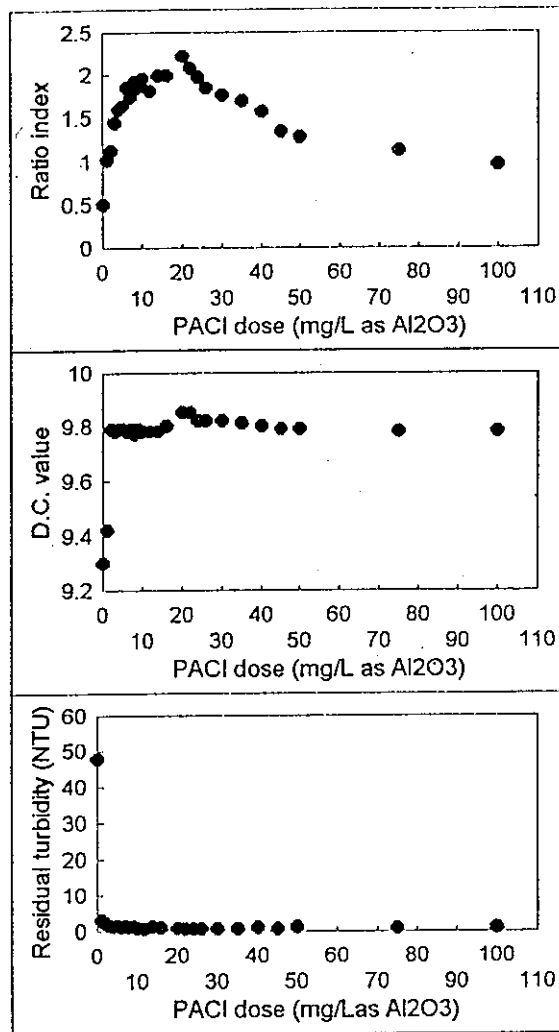
佳加藥量；即使在不同濁度的變化下，利用PDA監測膠凝過程都可得到相同的趨勢變化與結果，也都能找到一最佳加藥量，因此PDA適用於各種濁度變化之監測，隨著濁度的增加，最佳加藥量也隨之增加。由Dentel的研究(17)中知道，當pH值維持在7附近時，鋁鹽的混凝機制主要為電性中和及沈澱排除作用，或是以沈澱排除作用為主，因此超量加藥比較不會產生再穩定的狀況，殘餘濁度也不致增加，可與本實驗結果相驗證。在一般的鋁鹽混凝加藥操作中，都以超量加藥來維持高沈澱去除效率，雖然此法可維持高濁度去除效率，卻會造成鋁鹽的浪費，以及增加鋁鹽殘留量可能造成對健康的影響；若改以PDA所決定的最佳加藥量當作淨水處理之用，不但有很高的濁度去除效率又可節省劑量。所以Ratio value膠凝曲線的變化趨勢，可當作膠凝效果好壞的指標，也可當作決定最佳加藥量的指標。



圖五 80NTU下 Alum加藥量與(a)Ratio值 (b)DC值 (c)Jar test 法殘餘濁度之關係

(b) 多元氯化鋁的混凝效應 (如圖六所示)：使用PACl為混凝劑時，所測得的膠凝曲線亦與Alum有相同的膠凝趨勢，即隨著PACl加藥量的依序增加，Ratio value亦隨之增大，而代表水樣濁度的DC值亦增大(5)，此結果顯示懸浮液中的顆粒因膠凝作用而凝聚，顆粒因此變大，但因光散射面積總合減少，使得濁度變低，而DC值增大；水樣經由Jar test方法測得之殘餘濁度亦降低至1 NTU以下，當Ratio value最大時，DC值亦最大，而此劑量的殘餘濁度降至最低。在不同濁度的變化下，利用PDA監測膠凝過程都可得到相同的趨勢變化與結果，也都能找到一最佳加藥量。但是因PACl具有很大的表面積體積比 (area-to-volume ratio) (17)，所以更能有效地以電性中和的方式，吸附於帶負電性的顆粒表面，因此少量的PACl即可造成很好的濁度去除效果。但此時生成之膠羽並非最大，因為PACl吸附於顆粒上時，表面的電性雖然由負變為正，但顆粒表面仍有供多核鋁鹽錯合物吸附的位置，PACl繼續加入可使膠羽繼續增大，因此生成最大膠羽之加藥量往往會高於Alum加藥量，如表一所列，當濁度變化分別為

20NTU、80NTU、200NTU時，Alum的最佳加藥量依次為2.7mg/l as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、4.6mg/l as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、6.9mg/l as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>；而PACl的最佳加藥量依次為5mg/l as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、20mg/l as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、24mg/l as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，這是因為PACl具有架橋作用的性質，可吸附較多顆粒而凝聚成更大之顆粒，PACl加入越多，生成的膠羽也越大，因此在相同濁度下，PACl的最佳加藥量比Alum的高。若以此點當作PACl之最佳加藥量，與一般水場操作(18)或研究(19)的加藥量比較時，PACl的用量約為Alum用量的一半有所差異，但Ratio value膠凝曲線的變化趨勢，仍很清楚的指示出膠羽大小的變化情形。為了避免PACl用量的浪費，可以更改控制參數，使得最佳加藥量在達Ratio value最大時即已決定，如此可以節省加藥量，也可達到高濁度去除效率。而觀察不同濁度下的膠凝效果發現：隨著濁度的增加，最佳加藥量也增加，但膠凝曲線在最大值附近的變化也比較平緩，可知PACl對高濁度的最佳加藥量範圍較廣，因此較適用於高濁度的混凝。



圖六 80NTU下PACl加藥量與(a)Ratio值 (b)DC值 (c)Jar test 法殘餘濁度之關係

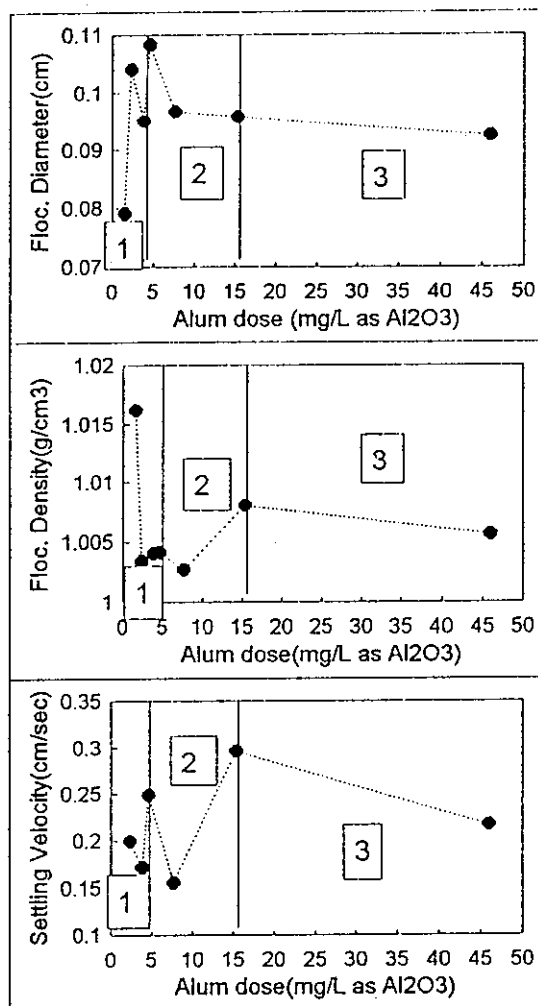
濁度	Alum		PACl	
	Ratio value	最適加藥量	Ratio value	最適加藥量
20NTU	3.45	2.7	4.93	5
80NTU	2.52	4.6	2.21	20
200NTU	1.14	6.9	3.11	24

(加藥量單位：as mg/l Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

表一 各種濁度之最適加藥量與Ratio值

#### 4.2 Ratio value與膠羽的粒徑、密度、沈降速度之關係

(a) 硫酸鋁：溶液中的懸浮顆粒，因為添加混凝劑所造成的去穩定效應，而使顆粒產生凝集的作用；隨著混凝劑量的增加，凝集的顆粒越來越大，若超過最佳劑量時，膠羽粒徑則開始減小。由自由沈降法分析膠凝過程中膠羽的粒徑結果（如圖七所示）發現：即使在不同的濁度（20NTU、80NTU、200NTU）之下，Ratio value最大之點的鋁鹽添加量，所生成之膠羽其平均粒徑最大；其平均粒徑大小之變化由小變大，至最佳加藥量之後再變小，與PDA的Ratio value之變化具有相同的趨勢，由此可說明，利用PDA監測膠凝行為是非常可行的技術，因為PDA可以清楚地指示出，在膠凝的過程中膠羽粒徑的相對大小變化。以水樣濁度為80NTU的膠凝過程為例，當加藥量較少時（如圖七(1)），雖然生成的膠羽粒徑較小，但是因為膠羽的結構較緊密具有較大的密度，所以沈降速度也較大，因此在相同的沈降時間內，顆粒可以很快的沈降，才能維持很低的殘餘濁度；而在最佳加藥量下（如圖七(2)）所生成的膠羽，其粒徑最大，雖然膠羽密度是相對的最低值，使得沈降速度也相對地變小，但並非最低，所以在相同的沈降時間內，顆粒沈降去除效果仍是最好的；而過多的加藥量（如圖七(3)），造成顆粒表面電性逆轉，懸浮液形成再穩定作用，使得膠凝效果變差，膠羽粒徑也因此變小，但因為顆粒吸附的鋁鹽夠多，結構緊密使密度變大，沈降速度又變大，再加上沈澱拌除之作用，使殘餘濁度亦降低。



圖七 80NTU下 Alum加藥量與(a)膠羽粒徑 (b)膠羽密度(c)膠羽沈降速度之關係

(b) 多元氯化鋁：由自由沈降法分析膠凝過程中膠羽的粒徑結果，當使用PACl為混凝劑時所得的Ratio value與膠羽粒徑、密度之變化與使用Alum具有相同的趨勢（如圖八所示）；在不同的濁度（20NTU、80NTU、200NTU）之下，Ratio value最大之點的PACl添加量，所生成之膠羽其平均粒徑最大；其平均粒徑大小之變化由小變大，至最佳加藥量之後再變小，與PDA的Ratio value之

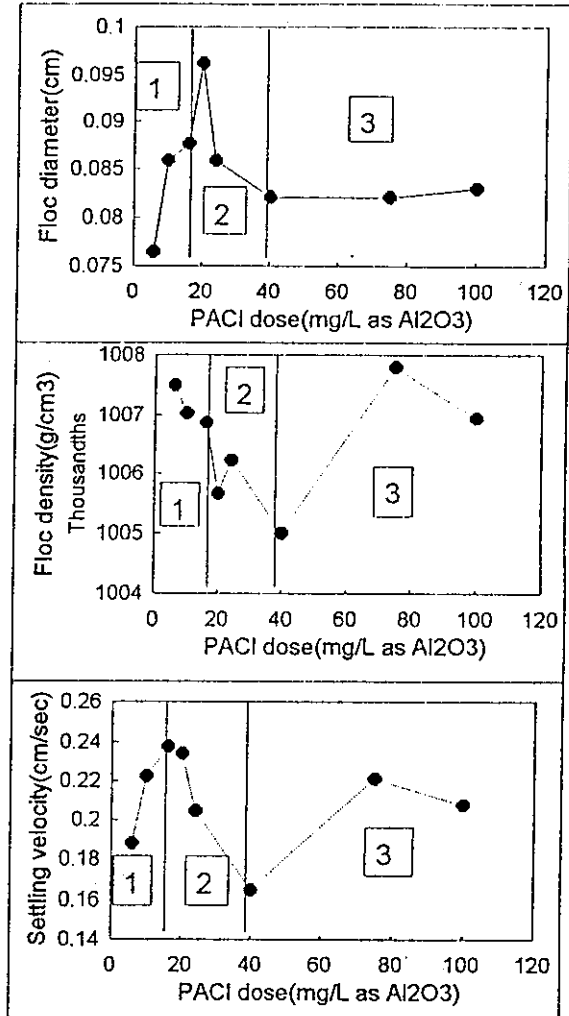
變化具有相同的趨勢，但在最佳加藥量下的膠羽其沈降速度卻相當的大，這可能是因為PACl對膠羽的吸附力強，結構更為緊密，使沈降速度變大。由實驗的結果發現，膠羽的平均粒徑大時，其平均密度小，而平均的沈降速度會因密度減小而減小；少量PACl就因其電性中和效果佳，雖然生成膠羽粒徑不大，但膠羽密度大，沈降速度大，可以達到低殘餘濁度；這就是為何一般水廠使用PACl為混凝劑時，用量都低於Alum的劑量，而不在最佳加藥量下操作的原因。由膠羽的物理特性分析，可以知道以Ratio value最大時之加藥量為最佳加藥量，的確可以維持很高的濁度去除效率，為最佳混凝狀態。

#### 4.3 連續流式模擬混凝加藥

經過批次的實驗後，已了解PDA監測系統，可以清楚的指示出膠凝過程中膠羽的粒徑變化，而Ratio value的穩定變化趨勢，更可用來當作加藥量判定的一種指標。因此連續流的試驗，主要探討PDA監測系統在進流水濁度連續變化的情形下，是否依然可以有效地指示膠羽粒徑變化；能否決定一適合加藥量，使濁度的沈澱去除效果合乎引用水的標準。

##### 4.3.1 混凝加藥之控制策略設計

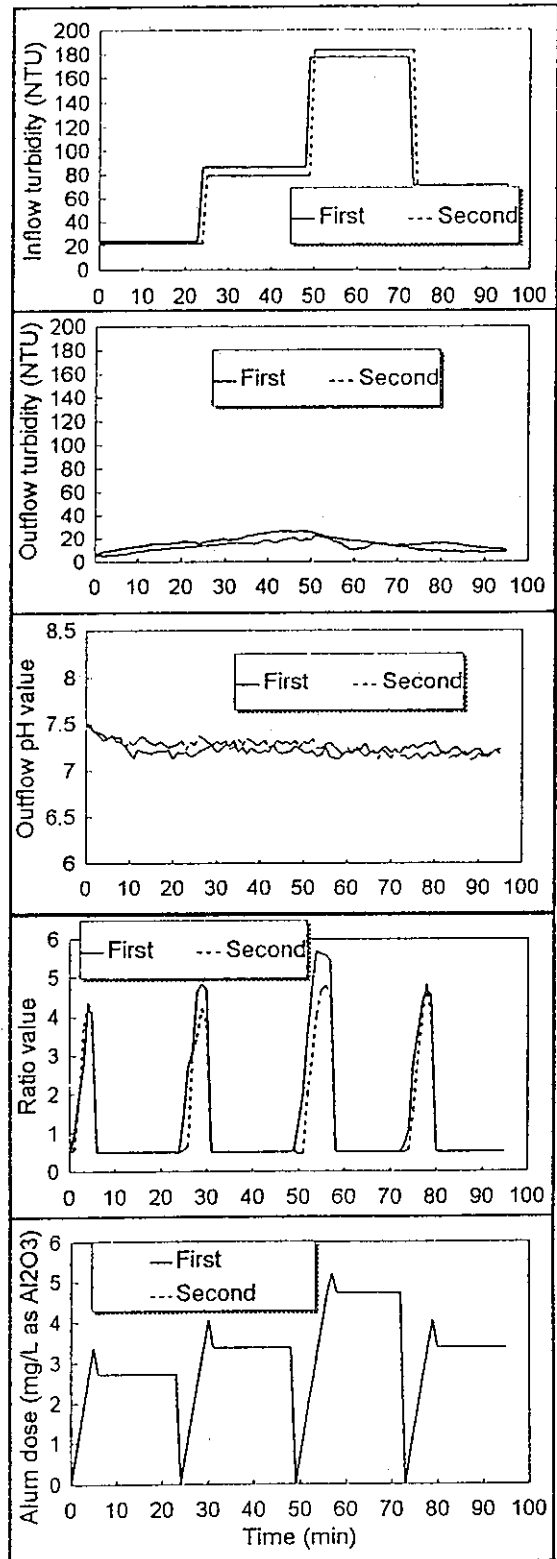
本研究中為簡化控制流程與縮短延遲時間，所以採用監測加藥後水質變化之順序控制方式(10)，作為整個混凝處理程序的控制基礎。由濁度計與電腦連線監測進流水的濁度變化，當濁度變化量大於設定值時(10 NTU)，電腦即啟動測試槽的加藥機加入混凝劑，PDA系統開始模擬膠凝作用，以階梯式加藥法增加加藥量，由電腦讀取各個加藥量下PDA的Ratio值，當後加藥量的Ratio值減前加藥量的Ratio值小於零時，後加藥量則為該濁度下的最佳加藥量，然後控制模型槽的加藥機自動加藥，並繼續監測沈澱出流水與進流水的濁度變化，構成整個控制系統的程序。



圖八 80NTU下PACl加藥量與(a)膠羽粒徑 (b)膠羽密度(c)膠羽沈降速度之關係

### 4.3.2 加藥量判定試驗

經由原水連續進流方式，原水濁度由20、80、200、500、1000至2000NTU之連續變化，PDA監控系統所判定加藥量的試驗結果，以圖九為代表。可以發現當進流水之濁度變動大於設定之10NTU時，PDA監測系統即開始運作，而自動監控系統則根據Ratio value的變化及預先設定的參數值，不管使用Alum或PACl當混凝劑，不管是在低濁度、高濁度或是超高濁度的進流水，皆能在五到十分鐘內即決定出最佳加藥量（如表二、三所列，加藥間隔為5%），如圖九所示，比起Jar test判定加藥法的時間更短、更有效率、同時也節省人力。而以此最佳加藥量混凝處理的原水，其沈澱出流水之濁度皆維持在20NTU以下，觀察沈澱出流水之濁度變化發現：每當進流水的濁度變高時，沈澱出流水之濁度稍微增大，這是因為PDA監測系統重新執行加藥量之測試，而模型槽之加藥機仍以前次的加藥量運作，舊的加藥量無法使新進的原水濁度達到最好的混凝效果，所以造成短暫的膠凝效果不佳，沈澱效率變差，使得殘餘濁度增大。一旦新的加藥量決定之後，加藥機便以新的加藥量操作，則沈澱出流水的濁度有明顯的降低，雖然整個沈澱效果不如批次實驗的好，但平均濁度去除效率亦達80%以上；若加長沈澱時間或加裝傾斜板、傾斜管等方法改善，即可增加濁度去除效率。在連續流的操作過程中，並未控制混凝的pH值，而沈澱出流水的pH值介於6.5到7.5之間且變動不大，表示原水的鹼度已足夠膠凝所需，由此結果說明即使不控制混凝時之pH值，即不額外加

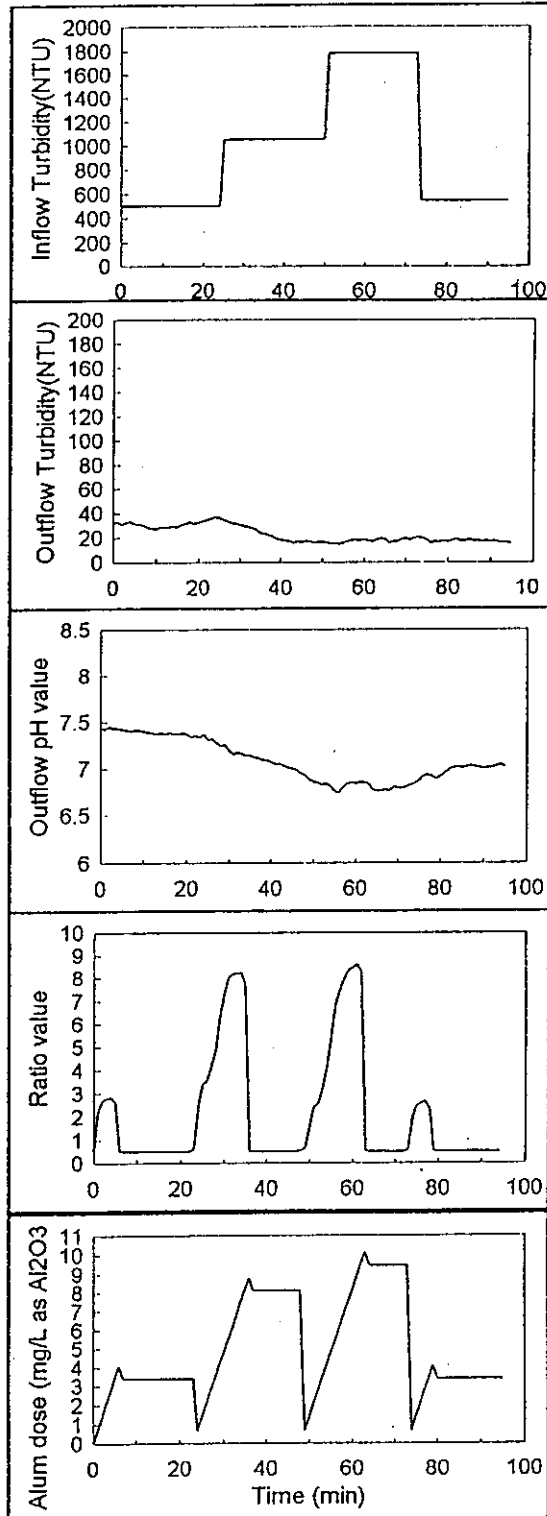


圖九 連續流式試驗(a)進流水濁度(b)出流水濁度(c)出流水pH值(d)Ratio值(e)加藥量隨時間之變化(以Alum為混凝劑，加藥間隔5%)

入鹼度，也不致影響PDA的判定結果。由以上的結果顯示，PDA監測系統對於進流水濁度的連續變化，皆可合理的判定一最佳加藥量，且濁度去除效果也合乎過濾處理的需求，而延遲處理時間大約5至10分鐘，合乎操作上的需求，因此PDA監測系統適用於實場替代人工操作。同時為了確保PDA監測系統模擬膠凝作用的準確度及可信度，因此再一次配製與前次實驗相同濁度變化的原水，再利用PDA監測系統作一次最佳加藥量測試，並觀察結果。茲將兩次的實驗結果作一簡單的比較，如圖九所示。在各種不同的濁度下，PDA監測系統所決定的兩次加藥量幾乎是相同的，而沈澱出流水的殘餘濁度值也差不多，也都能維持在20NTU以下，濁度變化的趨勢也相似；因為添加的加藥量相同，所以消耗的鹼度當然也相同，所以沈澱出流水的pH值也差不多，pH變化的趨勢也相同，皆維持在pH=6.5~7.5之間。因此在硬體設備相同，參數設定也相同的情況下，會影響到最適加藥量的變動因子為濁度的變化；以及使用不同的混凝劑；所以在不同的濁度下、使用不同的混凝劑，有不同的最佳加藥量，PDA監測系統的判定結果具有很高的可信度。

#### 4.3.3 PDA監測系統的穩定度及應變力試驗

PDA監測系統是為了取代人工的判斷，能夠在實廠24小時的連續操作，因此對於突發的狀況必須有足夠的應付能力，也需要有很高的操作穩定性，才能長時間不停的運作。舉例而言：面對暴雨使進流水在數小時內突增至數千個NTU濁度，也能在最短時間



圖十 應變力試驗(a)進流水濁度(b)出流水濁度(c)出流水pH值(d)Ratio值(e)加藥量隨時間之變化(以Alum為混凝劑，加藥間隔5%)

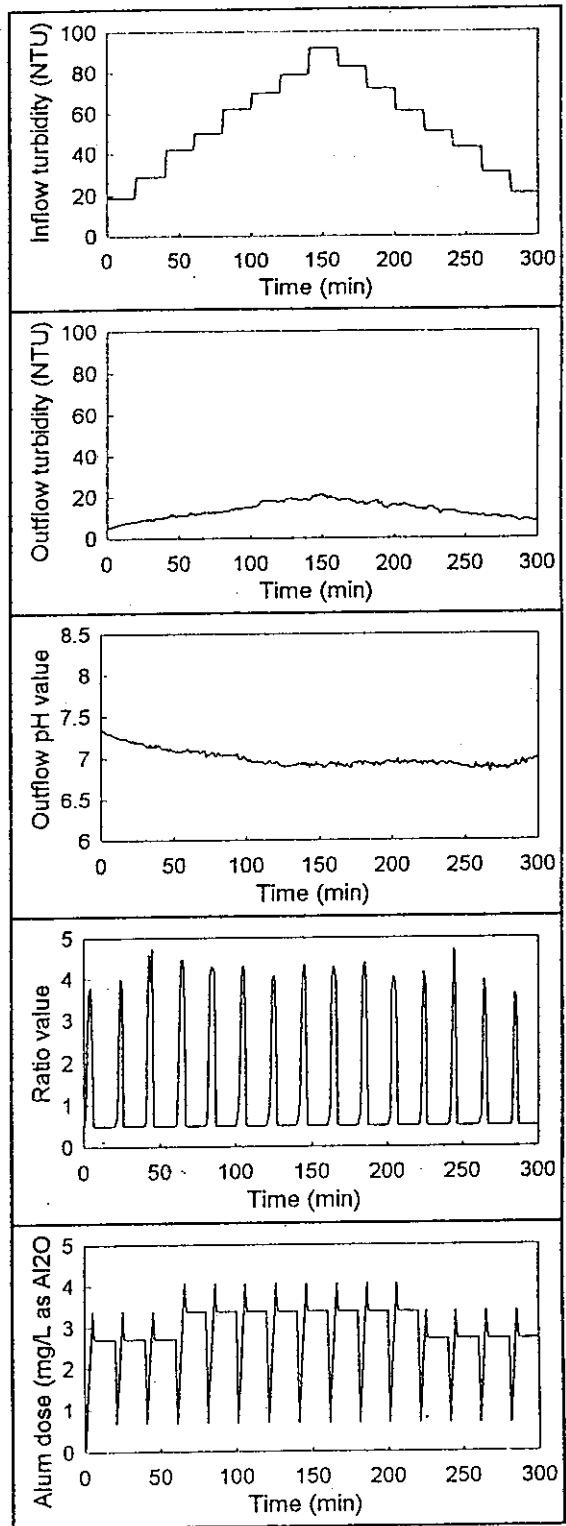
內決定一最佳加藥量，並不因為進流水水質的突變造成當機，或因判斷上的誤差造成混凝劑量過多或不足，使混凝效果變差。在實驗過程中，利用超高濁度（2000NTU）的變化、以及濁度微小的連續變化，每次變化10 NTU單位，來測試PDA系統的應變力與穩定性，結果如圖十、圖十一。處理高濁度的原水，PDA系統亦能決定出最佳加藥量；而沈澱出流水的殘餘濁度維持在20NTU以下，處理效果穩定，不因為濁度的突增，讓系統不及應變而使處理效果變差。在面對進流水濁度連續變化時，PDA監控系統可以靈敏地監

測到濁度發生變動，而啓動加藥機重新測試加藥量，在十分鐘之內即能完成決策工作，改變模型槽的加藥量，使處理效果維持穩定。經過此一連串的試驗，PDA監測系統之穩定性及應變能力獲得確認。

#### 4.3.4 加藥速率之修正試驗

##### 1. 設定起始加藥速率：

在前次的實驗中，因不確定各種濁度所需之加藥速率，所以設定初始加藥速率為零，但由其結果發現，在各種濁度下，所決定的最佳加藥量皆不低於加藥機20%的加藥速率（此加藥量為20NTU濁度的加藥速率），因此可將此加藥速率視為基本加藥量，將起始加藥速率固定在20%，並觀察利用此加藥量，來處理各種不同濁度進流水之後的殘餘濁度變化，其結果如圖十二所示。當進流水濁度在20NTU附近時，此加藥量仍能提供足夠的混凝劑量，因此膠凝效果佳，生成膠羽良好，有很好的沈降速度，殘餘濁度維持在10NTU以



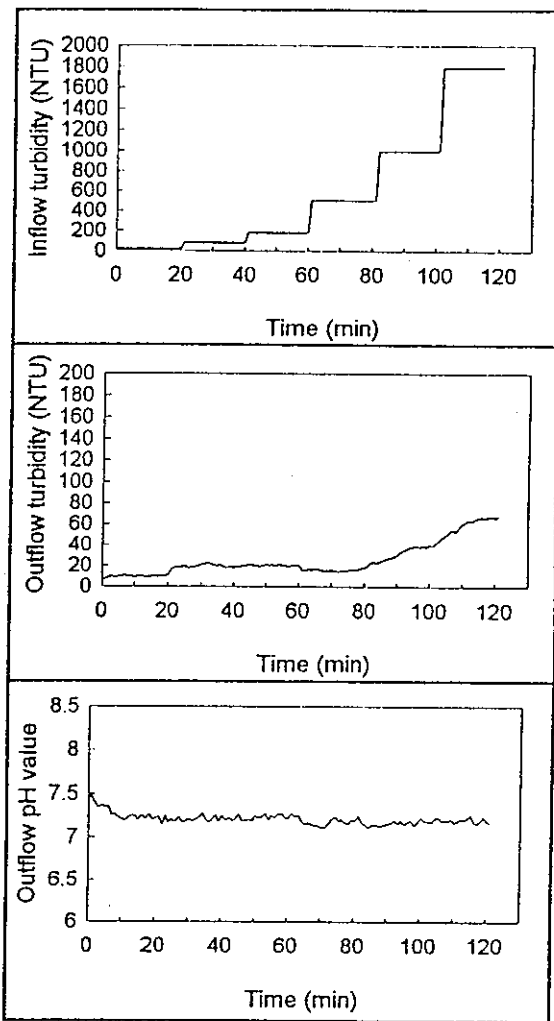
圖十一 穩定試驗 (a)進流水濁度 (b)出流水濁度 (c)出流水pH值 (d)Ratio值 (e)加藥量隨時間之變化(以Alum為混凝劑，加藥間隔5%)

下；但是隨著進流水濁度的增加，固定添加的混凝劑量已不足提供顆粒膠凝作用，因此膠凝效果變差，使殘餘濁度上升到20NTU以上，處理效果明顯變差，在處理高濁度的原水亦是相同的結果，沈澱出流水之濁度甚至高達50NTU以上（使用Alum當混凝劑時）。由此現象說明了，20%的加藥速率為基本添加量，隨著濁度增加時加藥量也須增加，但是可以將加藥機的起始加藥速率設定在20%，如此可以節省從零開始添加測試的時間，約可節省四分鐘的時間。

## 2. 改變階梯加藥間距：

在實驗一開始加藥機的加藥速率參數設定中，設定階梯式加藥法每次增加的間隔為5%，雖然系統的操作與處理效果穩定，但是因5%的加藥間距較大，當前一次加藥量已經很接近Ratio value最高點時，再增加5%時已經超過最高點，可能造成所決定的最佳加藥量偏離Ratio value最高值之加藥量，因此將加藥機每次增加的間隔減為2%及1%，測試在不同濁度下的最佳加藥量是否會改變，結果如圖十三。雖然加藥間隔改變，但PDA監測系統仍能在十分鐘內決定最佳加藥量，值得注意的是在同樣的進

流濁度下，改變加藥間隔之後，高濁度的最佳加藥量比5%加藥間隔的量減小，而且殘餘濁度也比較低，沈澱出流水的pH值仍維持在6.5到7.5之間，以2%加藥間隔的處理效果而言，200NTU的最佳加藥量比80NTU的少，2000NTU的最佳加藥量比1000NTU的少，如此的結果符合一般文獻<sup>(41)</sup>指出：在高濁度時使用的加藥量會比低濁度的少，這是因為高濁度的顆粒濃度大，顆粒之間的碰撞機率高，較少的混凝劑量雖未能完全中和顆粒表面電性，但是顆粒互相碰撞而凝集，達到去穩定的效果，仍能產生沈降性良好的膠羽。雖然用1%加藥間隔所決定的加藥量最少，但是Ratio value的變化卻不穩定，因為增加的混凝劑量太少，由於稀釋作用使混凝效果不及顯現，Ratio value即降低，而在高濁度時加藥量變化小，不會改變混凝狀態，使Ratio value又成穩定變化不會降低，致使延遲決定時間過久（約十到十五分鐘），反而不適宜最佳加藥量之判定。綜觀5%、2%、1%等三種不同加藥間距的整體處理效果，發現2%加藥間距是最理想的操

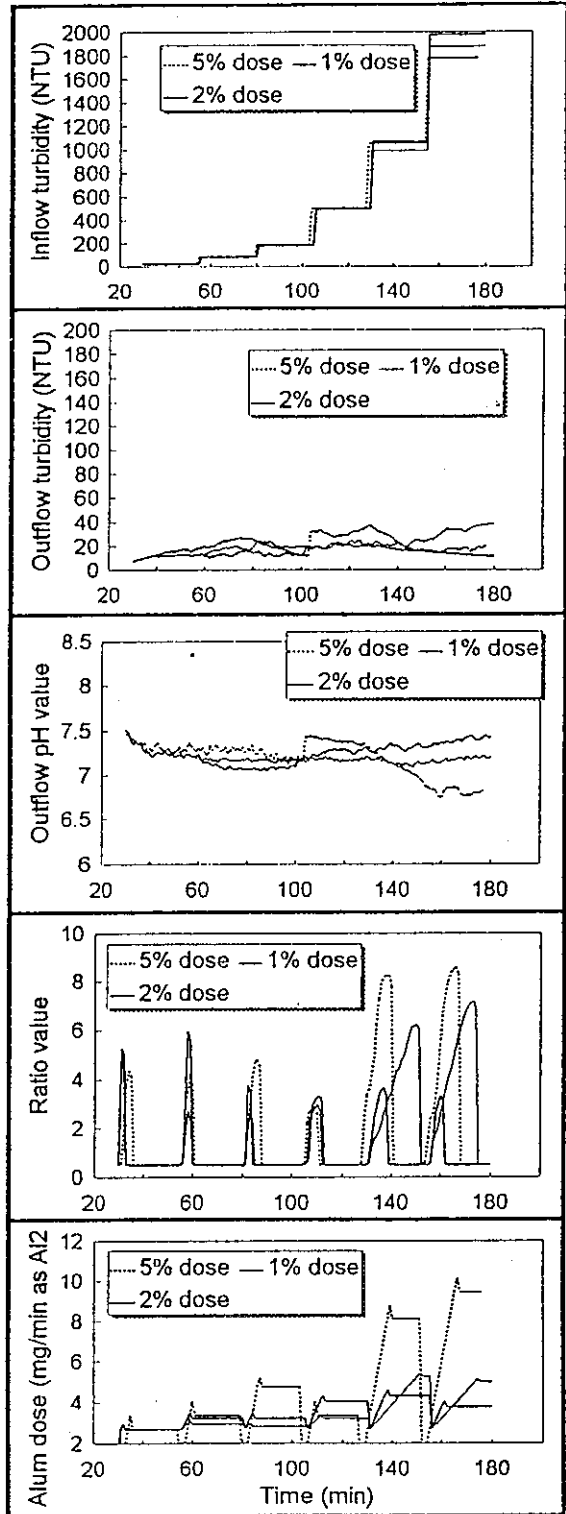


圖十二 相同加藥量試驗(a)進流水濁度(b)出流水濁度(c)出流水pH值隨時間之變化 (以Alum為混凝劑，加藥間隔20%)

顆粒之間的碰撞機率高，較少的凝劑量雖未能完全中和顆粒表面電性，但是顆粒互相碰撞而凝集，達到去穩定的效果，仍能產生沈降性良好的膠羽。雖然用1%加藥間隔所決定的加藥量最少，但是Ratio value的變化卻不穩定，因為增加的凝劑量太少，由於稀釋作用使凝劑效果不及顯現，Ratio value即降低，而在高濁度時加藥量變化小，不會改變凝劑狀態，使Ratio value又成穩定變化不會降低，致使延遲決定時間過久（約十到十五分鐘），反而不適合最佳加藥量之判定。綜觀5%、2%、1%等三種不同加藥間距的整體處理效果，發現2%加藥間距是最理想的操作參數，不僅可以維持理想的處理效果，又可減少凝劑的使用量。各種濁度下，不同加藥間距的最佳加藥量如表二、三所示，使用Alum及PACl當凝劑，以2%加藥間距所決定的最佳加藥量界於1%及5%加藥間距兩者之間。

### 五、結論

經過一連串的實驗與探討，PDA偵測器以Ratio為監測指標時，其儀器偵測極限為0.021，而方法偵測極限為0.03，可以用來當作一種監測用的儀器。在整個實驗中用來當作決定最適加藥量的重要指標為PDA的Ratio輸出值，實驗的結果說明：PDA的Ratio輸出值，可以正確地指示出膠凝過程中膠羽生成大小之變化趨勢，並可依照Ratio值的變化量，決定凝劑最適劑量。另一方面，PDA的D.C.輸出值與色土濃度成反比之關係，即色土濃度增大，濁度增大，而D.C.值降低。因此可以D.C.值表示水樣的濁度



圖十三 不同加藥量試驗(a)進流水濁度(b)出流水濁度(c)出流水pH值(d)Ratio值(e)加藥量隨時間之變化(以Alum為凝劑，加藥間隔5%、2%、1%)

變化，但D.C.值變化不如Ratio 值變化顯著及穩定，而且容易因膠羽附著在層流管的管壁而產生誤差。利用自由沈降法分析膠羽粒徑等物理性質時發現，膠羽之粒徑與膠羽之有效密度（膠羽密度－水密度）成一對數線性關係，當膠羽粒徑增加時，膠羽密度減小；而最適加藥量之膠羽平均粒徑最大，雖然密度較小，但仍具有高沈降速度，濁度沈澱去除效果良好，而殘餘的膠羽因具較大粒徑，也容易在過濾處理時被去除。

藉由連續流式的模擬操作試驗，在各種不同濁度變動之下，PDA監測系統都能決定一最適加藥量，減少了殘餘鋁量並達到良好的處理效果，可以24小時連續操作試驗，在穩定操作狀態下，不須人員監看可節省人力。PDA監測系統的最佳操作參數設定：起始加藥速率20%，加藥增加間隔2%，讀取膠羽指標時間60秒。將PDA監測系統應用於模型槽操作的結果，顯示出控制程式決策的過程不易出錯，且處理效果良好，亦具有良好的穩定度與應變力，且延遲時間只有5到10分鐘左右，面對高濁度的突變也可以迅速處理，為一快速且便利操作的監控系統，可用以取代人工操作，尤其在夜晚下班的時間不須額外人員監管。

表二：使用Alum為混凝劑之最適加藥量

濁度 (NTU)		20	80	200	500	1000	2000
最適加藥量 mg/min	5%	2.70	4.05	4.73	4.05	8.10	9.45
	2%	2.70	3.24	3.24	4.05	4.32	3.78
as Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1%	2.70	2.97	2.84	2.97	5.27	5.00

表三：使用PACl為混凝劑之最適加藥量

濁度 (NTU)		20	80	200	500	1000	2000
最適加藥量 mg/min	5%	2.70	3.38	4.73	4.05	4.73	6.08
	2%	2.70	3.51	3.24	4.05	4.05	3.78
as Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1%	2.70	3.24	3.24	3.51	3.78	4.05

## 六、參考文獻

1. Letterman, R.D., "Modeling the effect of hydrolyzed aluminum and solution chemistry on flocculation kinetics," *Env. Sci. Tech.*, 19, 673-681, 1985.
2. Bartby, J., "Toxicity of synthetic polyelectrolytes," in *Coagulation and Flocculation*, Upland Press, Ltd., England, 1980.
3. Gregory, J., "Flocculation in laminar tube flow," *Chem. Eng. Sci.*, 36, 1789-1794, 1981.
4. Grgory, J., "Turbidity fluctuations in flowing suspension," *J. Colloid Interface Sci.*, 105, 357-372, 1985.
5. Gregory, J. and W. D. Nelson, "Monitoring of aggregates in flowing suspension," *Colloid and Surfaces*, 18, 175-188, 1986.
6. Gregory, J., "Laminar dispersion and the monitoring of flocculation processes," *J. Colloid Interface Sci.*, 118, 397-409, 1987.
7. 張充鑫, 賴連康編著, 自動化概論, 全華科技圖書股份有限公司, 民國八十一年.
8. 寶居繁美, 松井捨和, 西田信幸, 監視控制系統技術, 復漢出版社, 民國八十三年.
9. Jackson, P. J. and E. J. Tomlinson, "Automatic coagulation control evaluation of strategies and techniques," *Wat. Supply*, 4, 55-67, 1986.

10. Norihito, Tabo. and Yoshimasa, Watanabe., "Physical characteristics of floc-I. the floc density function and aluminium floc," Wat. Res.,13,409-419,1979.
11. Masliy, J. H. and Polikar, M., "Terminal velocity of porous spheres," The Canadian J. of Chemical Eng.,58,299-303,1980.
12. Da-Hong Li. and Ganczarczyk, J. J., "Stroboscopic determination of settling velocity, size and porosity of activated sludge flocs," Wat. Res.,21,257-262,1987.
13. Dammel, E. E. and Schroeder, E. D., "Density of activated sludge solids " Wat. Res.,25,841-846,1991.
14. 陳蓋文, 廖英志, 謝之真, 李篤中., "以自由沈降測試估算污泥膠羽密度," Proceedings of Symposium on Transport Phenomena and Application Taipei.,375-380,1994.
15. 陳國聲, "光纖技術監測淨水膠凝行為之研究"交通大學環境工程研究所碩士論文,民國八十三年.
16. Photometric dispersion analyzer PDA2000 operation manual, Rank Brothers Ltd.,Cambridge,U.K.
17. Dentel, S. K., "Coagulation control in water treatment," Critical Rev. in Env. Control.,21,41-135,1991.
18. 黃志彬及陳建中, "流導電流儀在淨水混凝/膠凝程序中自動加藥控制之研究," 中國環境工程學刊,第五卷,第二期,1995.
19. Kaeding, U.W. Drikas, M., Dellaverde, P. J., Martin, D., and Smith, M. K., "A direct comparison between aluminum sulphate and polyaluminum chloride as coagulants in a water treatment plant," Wat. Supply.,10,119-132,1992.