

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040101

水錘與負水錘，與干涉

學校名稱：國立武陵高級中學

作者： 高二 邱政岡 高二 許禮翔 高二 黃志強	指導老師： 張峰誌
---	------------------

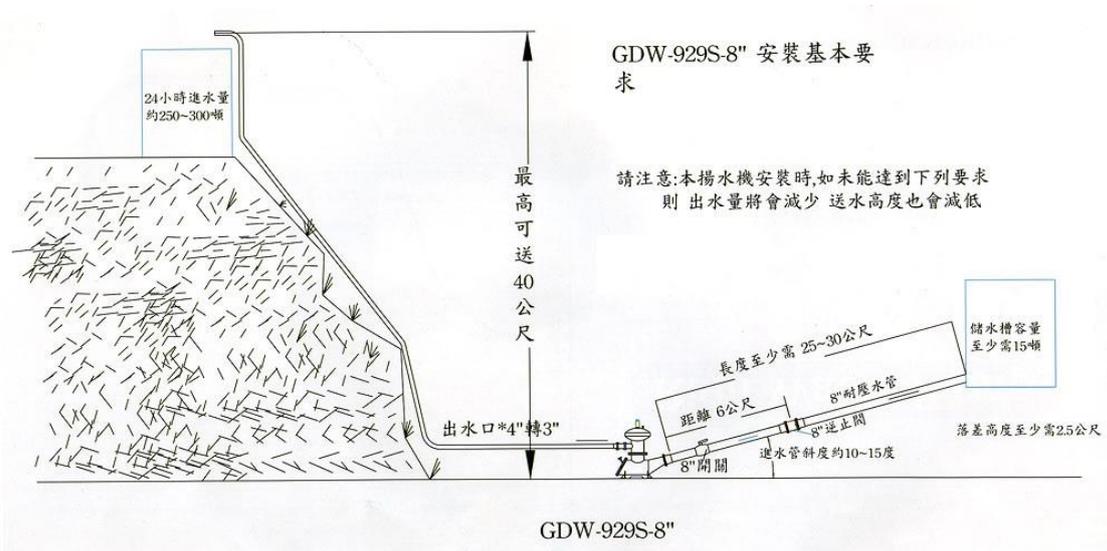
關鍵詞：水錘現象、負水錘現象、壓力波干涉

摘要

我們看到了一段關於水錘送水機影片，引發對水錘現象的興趣，在瀏覽過一些相關資料之後，我們決定設計實驗來進一步了解此現象，而最重要的壓力計在我們奔走於各學校之後終於有了著落，我們開始組裝實驗裝置，並且在實驗過程中遇上問題時不斷改裝它。我們以壓力計來測量閥門快速關閉時所產生的壓力波，並比較其對流速的關係及其遞減的圖形。而在過程中我們發現電磁閥關閉時產生的壓力波的第一個波峰特別小，於是我們也試著去探討造成此現象的原因。接著我們在一些文獻中發現快速打開閥門會造成類似水錘的負水錘現象，所以我們也利用分析水錘現象的方法來分析它。最後我們重新組裝一個能夠同時關上水管兩端閥門的裝置，來觀察二壓力波干涉的圖形。

壹、研究動機：

在網路上看到關於水錘送水機的影片，<http://youtu.be/NGoQKOs7oo0>，對於此能夠將水抬升至相當高度的現象我們感到相當好奇，於是開始找尋資料。水錘現象在高中課程中並無直接提及，但其主要的與水流的慣性相關，可以由動量方程式推導出。水錘現象現今已有一段時間的歷史，而當我們在討論前人所留下的文章時，我們發現大多數都是在處理「如何克服水錘現象所造成的壞處」，許多大樓的水塔、水管都有著這一問題，其主要是由於施工不當而造成的噪音，甚至是水管破裂。但這樣一個有趣的物理現象豈能因為這樣的缺點而被討厭呢？我們希望找出一個能夠更彰顯水錘優點的方法，來讓水錘現象能夠在生活中變得更加有用。總體來說，水錘作用常出現在生活之中，而它的好壞就看人們如何設計裝置來使用它，我們也希望能夠以更好的方式改善它所帶來的問題。（送水機概要，如下圖）



圖：送水機示意圖（來源：合通機械公司）

在實驗過程中，我們曾嘗試使用電磁閥，但其效果卻不如預期，主要是由於其在第一波峰有削減的情況，我們在嘗試聯絡其製造廠商後，得知現今電磁閥在設計上，為避免在過快關閉下造成過大水錘壓力，故有一定消除機制，我們亦希望找出其在削弱時所呈現的壓力與流速的關係。

此外，我們亦有找到提及「負水錘」的文章，但僅只有一段，內容講述當我們快速開啟閥門時，會產生負壓，雖其壓力大小不如水錘，但我們仍希望對其研究，來增加對水錘現象研究的完整性。

在最後的干涉現象，回應首段所提之彰顯水錘波的優點，我們希望能夠透過建設性干涉來讓壓力能有一定量的成長，以使得運用水錘波壓力的裝置能夠有更進一步的發展，這一點是我們相當重視的，也希望在這次實驗結束後，我們能夠提出具體、可行的方法。

貳、研究目的：

一、水錘實驗

- (一) 探討水流流速與水錘壓力波最大振幅之關係
- (二) 探討水錘壓力波遞減的情形

二、電磁閥

- (一) 探討電磁閥削弱水錘壓力波的原因

三、負水錘實驗

- (一) 探討水流流速與負水錘壓力波最大振幅之關係
- (二) 探討負水錘壓力波遞減的情形

四、干涉實驗

- (一) 觀察不同位置的壓力大小差異
- (二) 觀察不同時間差關閉閥門產生的壓力波圖形

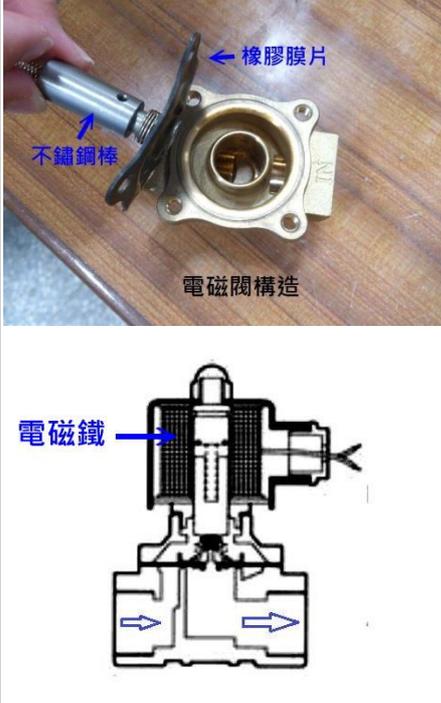
參、研究設備器材及實驗裝置：

一、研究器材

<p>1.白鐵管 (3/4 吋)</p> 	<p>2.螺紋水管轉接頭</p> 	<p>3. L 型水管轉接頭</p> 
<p>4. T 型水管轉接頭</p> 	<p>5.球閥</p> 	<p>6. 塑膠軟管</p> 
<p>7.扭力彈簧</p>  <p>用以使閥門可以快速且穩定的關閉或開啟</p>	<p>8.電磁閥</p>  <p>型號:UW-20-NO 配管口徑:3/4" 電壓:AC 110V</p>	<p>9.壓力計</p>  <p>型號:成都泰斯特 CY200 數位壓力感測器 測量頻率:一毫秒一數據 壓力範圍: 400cmH₂O</p>
<p>10.大型塑膠軟管</p> 	<p>11.矽利康</p> 	<p>12.束帶</p> 
<p>13.防水膠帶</p> 	<p>14.泡棉膠</p> 	<p>15.筆記型電腦</p> 
<p>16.碼表</p> 	<p>17.量筒</p> 	<p>18.加壓馬達</p> 

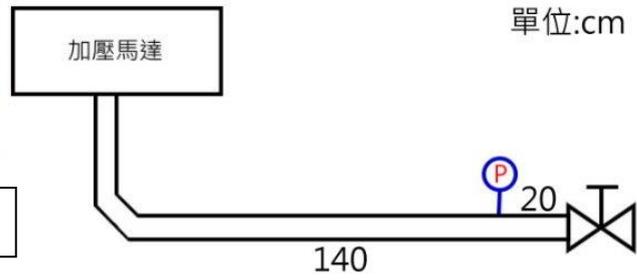
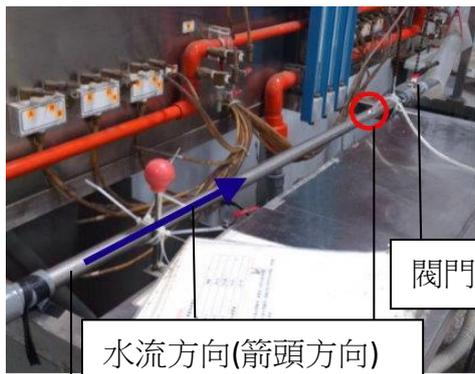
二、實驗裝置

(一) 閥門

閥門種類	說明	
速關型球閥		<p>將扭力彈簧以束帶及膠帶固定在閥門上，當閥門關閉時，彈簧為無彈力位能狀態。(如圖，一放手彈簧立即回復到關閉時緊繃的狀態)</p>
速開型球閥		<p>固定方式同速關型，當閥門開啟時，彈簧為無彈力位能狀態</p>
電磁閥		<p>電磁閥的上半部為一塊電磁鐵，內部有一根不銹鋼棒連著一塊橡膠膜片，不銹鋼棒的上方有一截彈簧，未通電時此彈簧擠壓不銹鋼棒，使膜片阻擋水流。下半部為水的進出口，但是水並非直線流過電磁閥，而是要先通過內部向上的開口。當電磁閥通電時，電磁鐵吸起不銹鋼棒和橡膠片，此時水便可通過開口。實驗過程中我們發現電磁閥有吸收水錘壓力的現象，可能與橡膠片有關，詳細過程會在實驗數據中說明。</p>

(二) 裝置

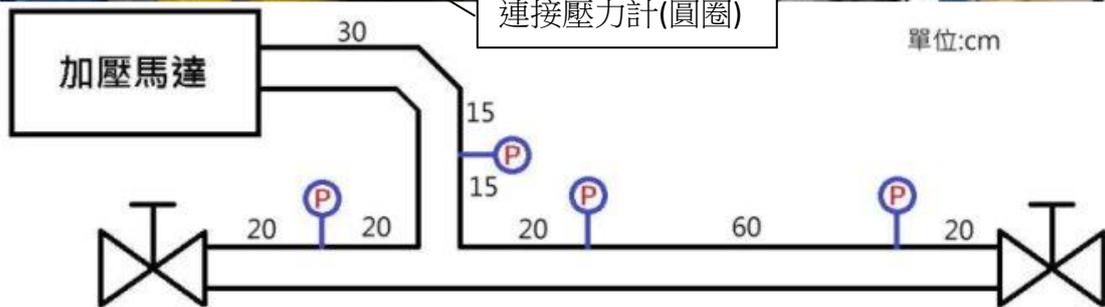
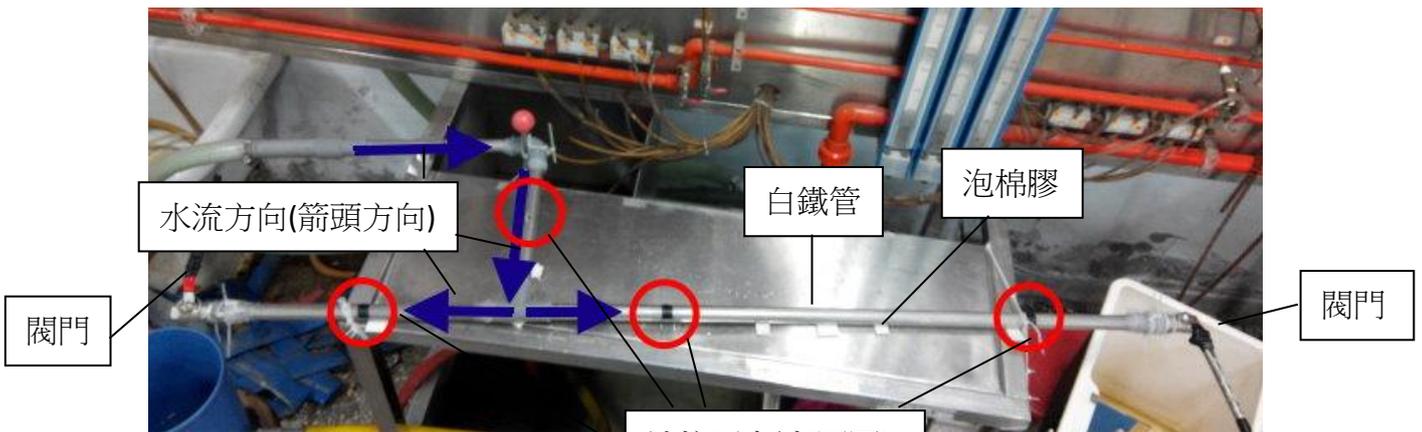
1. 水錘實驗、電磁閥實驗、負水錘實驗



白鐵管 連接壓力計(圓圈) (上圖左為實驗裝置圖 右為示意圖 單位:cm)

此裝置以加壓馬達連接白鐵管，白鐵管的側邊有一小孔可以塑膠軟管連接壓力計。為了降低閥門關閉時彈簧造成水管的震動，而影響我們要測量的壓力數值，我們將白鐵管用束帶和防水膠帶固定在平台上

2. 干涉實驗



(上圖為實驗裝置圖 下為示意圖 單位:cm)

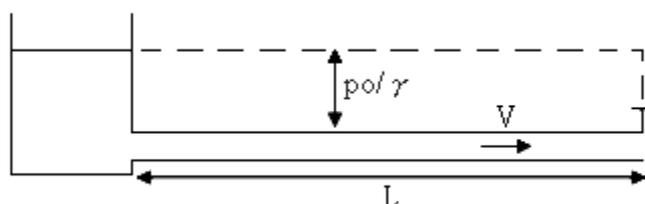
此裝置接出 30cm 的白鐵管後，以 L 型轉接頭在接上一截 30 公分的白鐵管，之後接上 T 型轉接頭，左邊接 40cm、右邊接 100cm 的白鐵管，此裝置共有 4 個連接壓力計的小孔，分別在左右閥門 20cm 前、T 型轉接頭右方 20cm 處、L 型到 T 型轉接頭中白鐵管的正中央。為了減少震動，除了和上一裝置相同的束帶和防水膠帶外，我們還使用泡棉膠黏住水管和平台，減緩震動，此外為了避免水錘現象造成的巨大壓力讓水從水管接縫中滲出，我們使用矽立康把水管和轉接頭間的縫隙堵住。

肆、原理

一、水錘現象

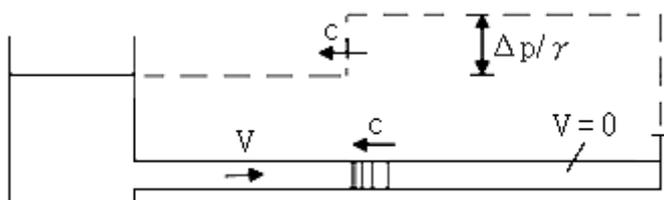
當一個水管的閥門快速關閉時，閥門端會產生一個壓力波，此壓力波會以聲速傳播，傳遞方向與原本的管流相反。此壓力波的壓力比原先穩流時的壓力還要大很多，此壓力波可能足以導致水管爆裂。這個產生壓力波的情形我們稱為水錘現象。以下我們考慮一個簡單的情況：

考慮一個水管中的水流，如下圖，一開始，在水管尾端的閥門是開啟的，因此水流有一個初始速度 V 和初始壓力 p_0 。



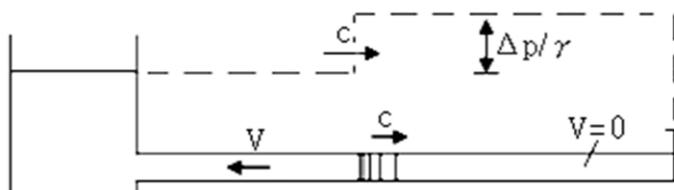
圖：起始狀態

當 $t = 0$ 時，閥門立即關閉，產生了一個壓力波，以聲速 c 傳遞至送水的水槽。在水槽和壓力波之間的水仍會有一個流速 V ，但在壓力波和閥門之間的水將會靜止，如下圖。



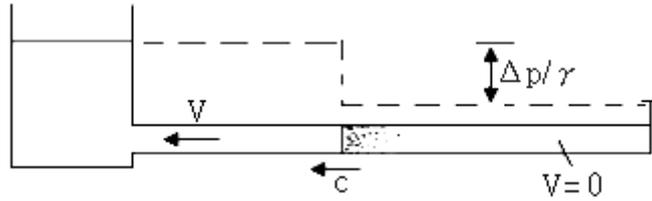
圖：壓力波從閥門端傳到水槽端

當經過了 $t = L/c$ 時，壓力波傳到了水槽端，此時管中的水都有一個壓力 $p_0 + \Delta p$ ，但水槽中的水只有 p_0 的壓力，兩端的壓力差將會讓管子中的水以 V 的速度往回流，回流水流則恢復成原 p_0 的壓力，即壓力波從水槽端回傳至閥門端，而水槽和第二個壓力波之間的水壓將回復成 p_0 ；壓力波和閥門之間的水仍靜止，且水保持壓力 $p_0 + \Delta p$ ，如下圖。



圖：壓力波從水槽端傳到閥門端

接著，時間在 $2L/c < t < 3L/c$ 時，因閘門處的水要保持靜止，所以閘門處產生一個負壓力波（ $p_0 - \Delta p$ ）傳遞至水槽端，如下圖六，當此壓力波傳遞至水槽時，在水管中的水壓將比水槽中的水壓較低，此壓力差將會使水管中的水再次流向閘門，此情況恰好和初始情況相同，因此這些情形會周期性的重複，直至壓力波的壓力逐漸因水流動能受管壁摩擦作用（我們稱其為黏性阻尼）吸收掉。

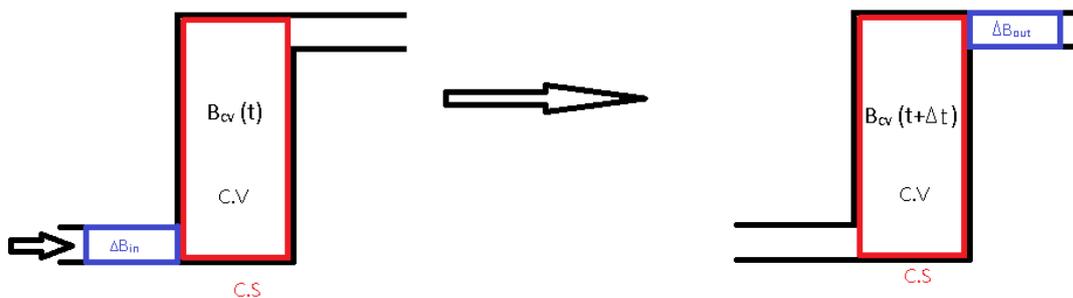


圖：振幅變小的負壓力波從閘門端傳到水槽端

接下來，我們要來分析水錘現象，我們必須要先由雷諾傳輸定理開始。

Reynolds Transport Theorem

雷諾傳輸定理



t 時刻系統性質

$$B_{\text{sys}}(t) = B_{\text{cv}}(t) + \Delta B_{\text{in}}$$

t+Δt 時刻系統性質

$$B_{\text{sys}}(t + \Delta t) = B_{\text{cv}}(t + \Delta t) + \Delta B_{\text{out}}$$

→ 性質 B 的變化率

$$\begin{aligned} \frac{dB_{\text{sys}}}{dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{B_{\text{sys}}(t+\Delta t) - B_{\text{sys}}(t)}{\Delta t} \right] \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{B_{\text{cv}}(t+\Delta t) - B_{\text{cv}}(t) + \Delta B_{\text{out}} - \Delta B_{\text{in}}}{\Delta t} \right] \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{B_{\text{cv}}(t+\Delta t) - B_{\text{cv}}(t)}{\Delta t} \right] + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{\text{out}}}{\Delta t} \times \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{\text{in}}}{\Delta t} \\ &\quad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \downarrow \\ B_{\text{cv}} \text{ 對時間 } t \text{ 微分} &= \frac{dB_{\text{cv}}}{dt} \quad B_{\text{out}} \dot{\quad} \quad B_{\text{in}} \dot{\quad} \\ \text{令 } B_{\text{net}} \dot{\quad} &= B_{\text{out}} \dot{\quad} - B_{\text{in}} \dot{\quad} \\ \therefore \frac{dB_{\text{sys}}}{dt} &= \frac{dB_{\text{cv}}}{dt} + B_{\text{net}} \dot{\quad} \end{aligned}$$

$$\text{又 } B_{cv} = \int_{cv} b \cdot dm = \oint_{cv} b\rho \cdot dV$$

$$B_{\text{net}} = \oint_{cs} b\rho\vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$$\therefore \frac{dB_{\text{sys}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{cv} b\rho \cdot dV + \oint_{cs} b\rho\vec{v} \cdot d\vec{A}$$

\downarrow 整個系統的變化率
 \swarrow cv 內變化率
 \searrow 通過 cs 的淨流率
 此為雷諾傳輸定理

並且以雷諾傳輸定理 (RTT) 來推導連續方程式
 連續方程式 (CE) 的通用型式：

→ 利用 RTT

$$\frac{dB_{\text{sys}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{cv} b\rho \cdot dV + \oint_{cs} b\rho\vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$$\text{取 } B_{\text{sys}} = M_{\text{sys}} \Rightarrow b = 1$$

$$\therefore \frac{dB_{\text{sys}}}{dt} = \frac{dM_{\text{sys}}}{dt} = 0 = \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho \cdot dV + \oint_{cs} \rho\vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$$\therefore \frac{d}{dt} \int_{cv} \rho \cdot dV + \oint_{cs} \rho\vec{v} \cdot d\vec{A} = 0$$

\downarrow cv 的質量累積率
 \downarrow cs 的質量淨流率
 流出為正
 此為積分型式的 CE

並且我們再以雷諾傳輸定理來推導動量方程式
 動量方程式

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

利用 RTT

$$B_{\text{sys}} = m\vec{v}_1$$

$$b = \frac{B_{\text{sys}}}{m} = \vec{v}_1 \quad \text{其中 } \vec{v}_1 \text{ 為相對於慣性座標的速度}$$

代入 RTT

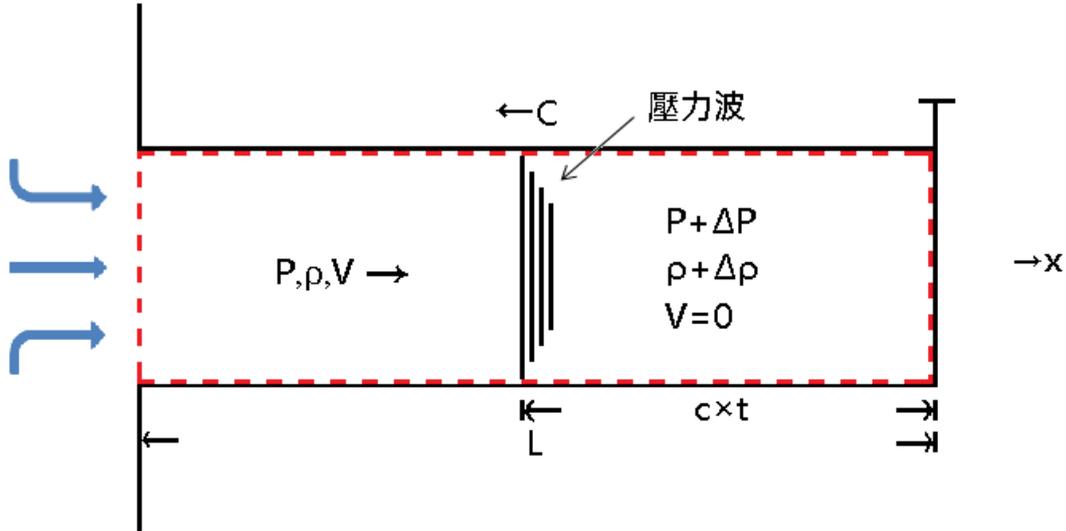
$$\Rightarrow \frac{d(m\vec{v}_1)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{cv} \vec{v}_1 \rho dV + \oint_{cs} \vec{v}_1 \rho \vec{v}_2 \cdot d\vec{A}$$

其中 \vec{v}_2 為相對通過控制表面的速度

$$\Rightarrow \Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{cv} \vec{v}_1 \rho dV + \oint \vec{v}_1 \rho \vec{v}_2 d\vec{A}$$

此為動量方程式

最後，綜合動量方程式及連續方程式，可得到水錘壓力大小及其波速。



分析 x 方向

動量方程(x 方向)

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= \frac{d}{dt} \int_{cv} V_x \rho dV + \oint V_x \rho \vec{v} d\vec{A} \\ &= \frac{d}{dt} \int_{cv} V_x \rho dV + \Sigma_{cs} \dot{m}_o V_{ox} - \Sigma_{cs} \dot{m}_i V_{ix} \end{aligned}$$

其中 $dV = (L - ct)A$

$$\Sigma_{cs} \dot{m}_o V_{ox} = 0$$

$$\Sigma_{cs} \dot{m}_i V_{ix} = \rho AV^2$$

$$\Rightarrow PA - (P + \Delta P)A = -V\rho cA - \rho AV^2$$

$$\Rightarrow -\Delta PA = -V\rho cA - \rho AV^2$$

$$\Rightarrow \Delta P = V\rho c + \rho V^2 \text{ (但 } c \gg V)$$

可簡化成 $\Delta P = \rho V c$

此為水錘壓力波的理论值

利用連續方程式

$$\frac{d}{dt} \int_{cv} \rho dV + \Sigma_{cs} \dot{m}_o - \Sigma_{cs} \dot{m}_i = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} [\rho(L - ct)A + (\rho + \Delta\rho)ctA] - \rho AV = 0$$

$$\Rightarrow -\rho Ac + \rho Ac + \Delta\rho Ac - \rho AV = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\rho cA = \rho AV$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{V}{c} \Rightarrow c = \frac{V}{\Delta\rho/\rho}$$

$$\text{利用 } E_V = \frac{\Delta P}{\Delta\rho/\rho} \Rightarrow c = \frac{VE_V}{\Delta P}$$

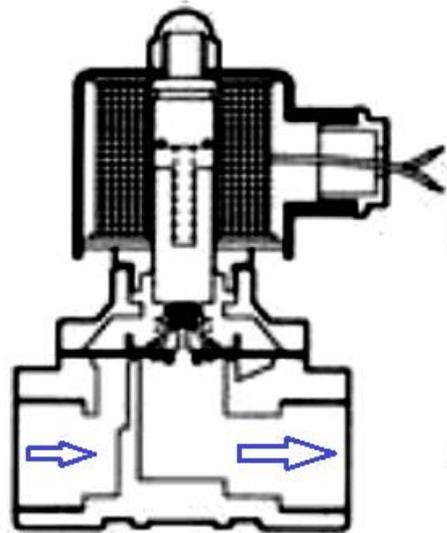
$$\text{由 } \Delta P = \rho Vc \Rightarrow c = \sqrt{\frac{E_V}{\rho}}$$

二、遞減函數

在本次實驗中，我們使用指數函數來作為我們實驗使用之趨勢線，其原因為自然界之能量因阻尼而衰減時，會以指數形式呈現。在我們這次實驗中，因無法使用相當精細的設備、儀器，故使阻尼係數有過大的問題，間接使得數據與理論有所偏差，但在多次重複實驗下，應有一定準確度。

此外，由於我們的數據皆為壓力，而壓力事實上並不等於能量，而是須先經一定函數轉換而得，但是這並無關乎我們直接使用壓力作為遞減圖形的問題，其主因為我們所使用的趨勢線為指數函數。根據文獻，能量 $E = \frac{p^2}{c^2\rho}$ ，假使 $p = Ae^{-kt} \cos(\omega t)$ ，則能量 E 仍為一指數函數，僅是在於 e 的次方會由 $-kt$ 變為 $-2kt$ 。

三、電磁閥



圖：電磁閥構造（圖片來源：UN i - D 網站）

在電磁閥的設計中，我們猜測其是有一減緩水錘波壓力的設計，畢竟電磁閥的關閉速度很快，若不處理水錘問題則易導致管線損壞，而最容易處理水錘的方式即為「不要過快關閉閥門」，在電磁閥的設計中，是使用一彈簧，其會在通電時被吸起，使膜片得以撐起使水流過，

斷電下則彈簧向下擠壓，使膜片擋住水。我們對其消除水錘波的方法有兩個解釋，而在此說明我們認為是正確的那一個：第一峰並無完全呈現，主要是因為在第一峰呈現時，管線中的水流並無完全停止，雖有所減緩但並不如以其他閥門實驗時一樣為完全靜止，而第二峰呈現時水流已完全靜止，故使其壓力較第一峰大。但其優點在於穩定，關閉時的準確率、震動皆有所控制，將實驗設備固定好後可以使遞減波形得以判讀的數據變多。

四、負水錘

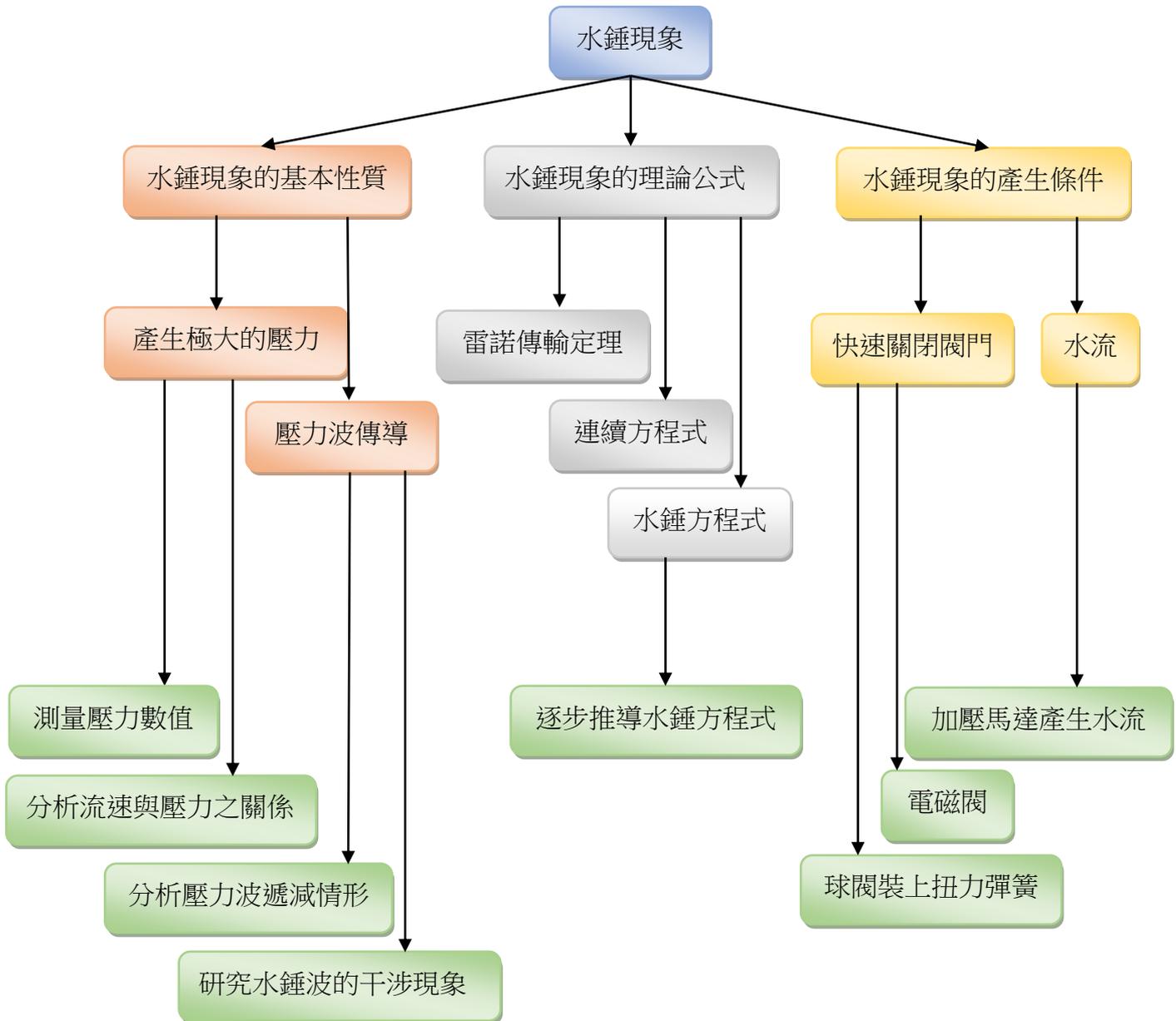
在文獻中，關於負水錘的資料是極少的，我們僅有查到一段關於負水錘的描述（來源：gongkung.com），「負水錘時，管道中的壓力降低，初會引起管道和設備振動。應力交遞變化，對設備有不利的影響，同時負水錘時，如壓力降得過低可能使管中產生不利的真空，在外界壓力的作用下，會將管道擠扁。」而我們對其的解釋為，當快速開啟閥門時，在最靠近閥門端（下游處）的水分子，會有一流速，然而第二排卻還沒有，因此造出一接近真空的狀態（最大負壓值）。而下一瞬間，第二排水分子有了流速，但第三排水分子尚未，以此方式持續進行使一負壓傳遞出去。

五、干涉

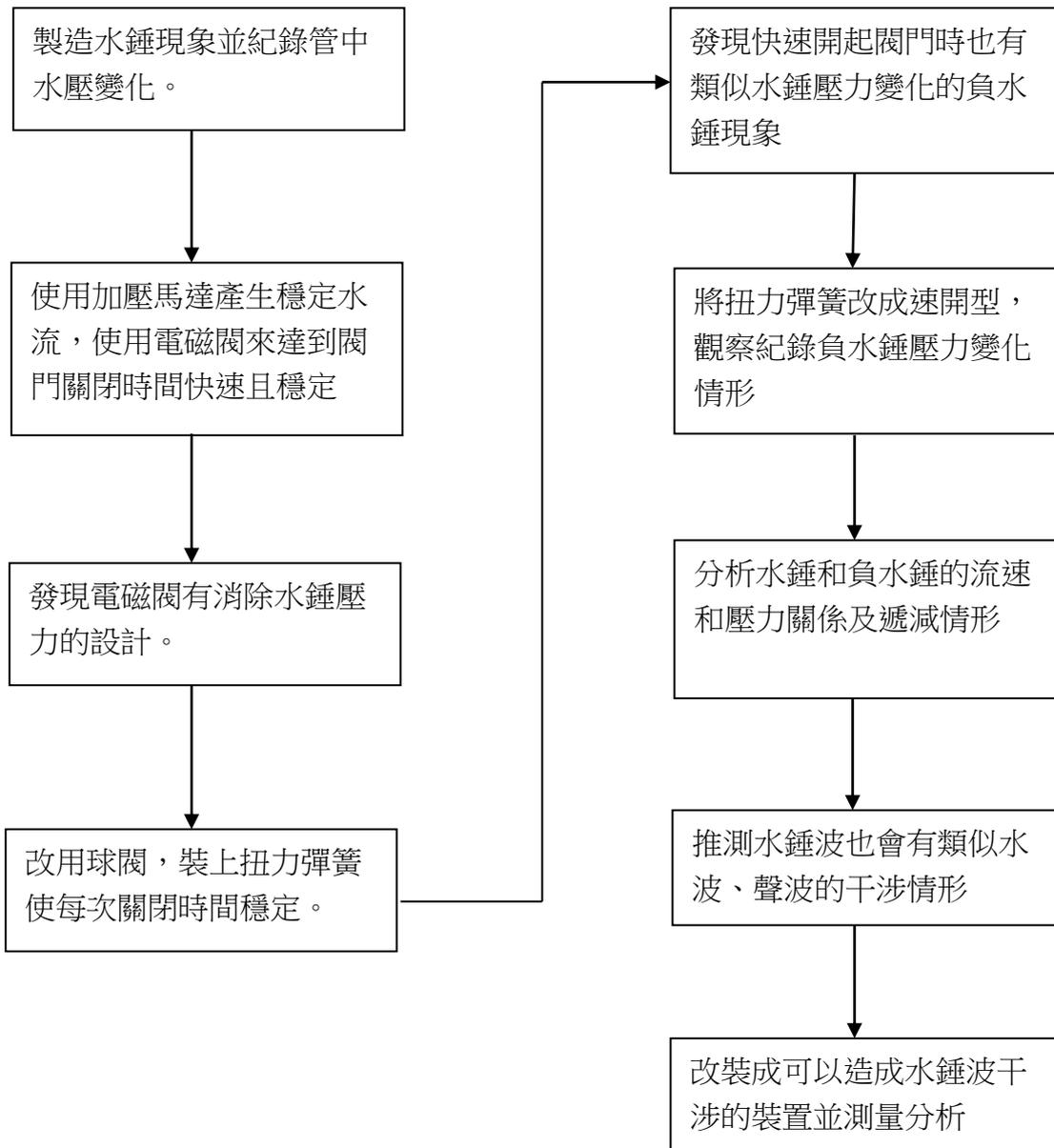
對於波，其應當會有干涉的性質存在，我們透過設計裝置使其產生兩個壓力波，並且嘗試使其有疊合的效果，藉以確定水錘壓力波是可以干涉的。

伍、研究方法及步驟：

一、研究流程圖：



二、研究過程



三、實驗步驟

(一) 水錘現象

1. 將壓力傳感器連接到電腦，並讓傳感器在空氣中讀取壓力值 10~15 分鐘，使傳感器暖機、穩定。
2. 打開抽水馬達，待穩流後使用量筒測量其固定秒速內的流量，流量除以時間及白鐵管截面積以得其流速。
3. 調整馬達轉速來控制流速，以測不同流速之數據。
4. 將傳感器接上不銹鋼管側邊的小管，並排除管內氣泡。
5. 讓壓力傳感器採取當時管內壓力做為零點，須採集 5~10 次讓壓力值更準確。
6. 先轉90°使扭力彈簧儲存力學能，在水穩流後放開，使其瞬間關閉，保存關閉閥門前後各 3 秒之壓力值數據。
7. 重複開關閥門並記錄數據十五次。
8. 調整馬達轉速，然後重覆步驟(5)~(7)。

(二) 電磁閥

1. 同水錘現象(1)~(5)調整好實驗設備
2. 其與測水錘壓力時的差別僅在與更換閥門，由球閥換成電磁閥。電磁閥的操作方式為通電與斷電，通電時開，斷電時關。

(三) 負水錘現象

1. 同水錘現象(1)~(5)調整好實驗設備
2. 將閥門上的扭力彈簧設計成瞬開型，測得的數據是為，穩流→轉動90°關閉閥門→壓力穩定後放手，使其瞬開→穩流後結束數據儲存。

(四) 水錘波干涉

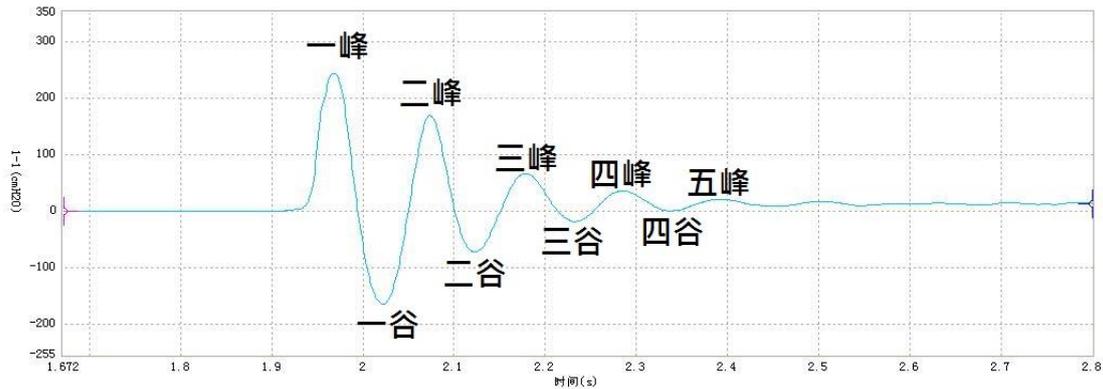
1. 同水錘現象(1)~(5)調整好實驗設備
2. 此實驗固定流速，待穩流後測量其流量
3. 白鐵管兩端均使用速關型球閥，壓力計以塑膠軟管連接 1 號小孔，其餘小孔以防水膠帶封住，左右各一個人操作閥門
4. 測量左右同時關、左比又先關、右比左先關的壓力數值
5. 分別將壓力計換至 2、3、4 號小孔，重複(2)、(3)步驟

陸、研究實驗數據：

一、水錘現象

(一) 流速和壓力波最大振幅的比較

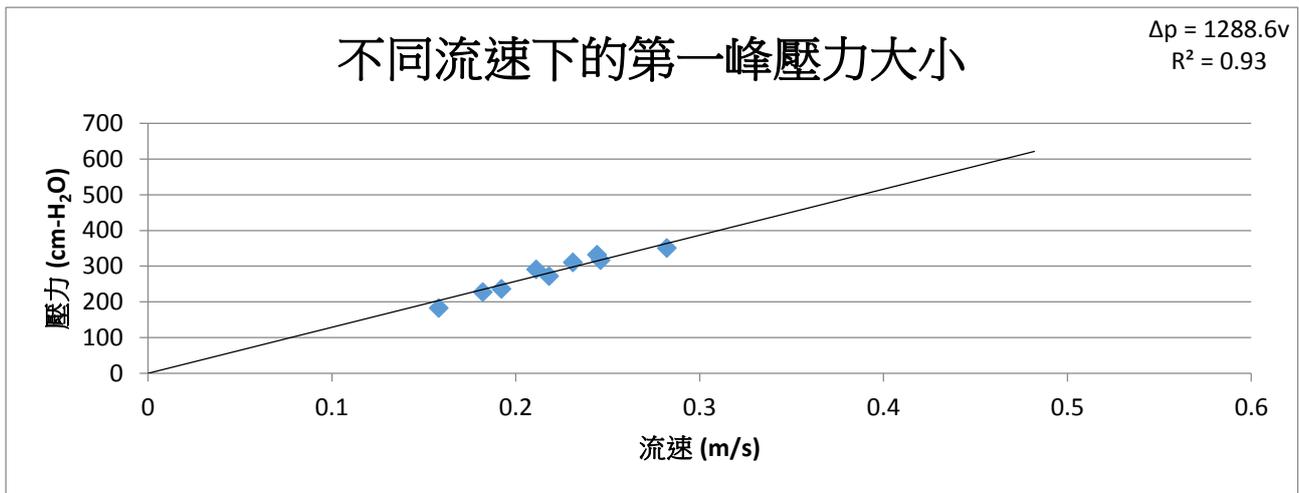
1. 我們所見到的圖形大略如下圖：



圖：水錘現象實驗所呈現之波

在實驗過程中，我們將壓力零點定在穩流時時壓力，因為水錘波主要是在於其 Δp ，故絕對壓力對於我們來說沒有意義，而在我們所得到的數據中，一個週期的時間為0.103s，水之傳聲速度在20°C時為1482m/s，密度為998.203kg/m²，而管長為1.4m，我們在實驗中流速為操縱變因，壓力為應變變因，其週期不因流速改變而有所變化。

2. 在實驗的第一項中，我們是取得到圖形之第一峰值，調整加壓馬達之轉速來做到控制流速，在得出十五組數據後加以分析，以流速作為橫軸，壓力作縱軸，我們得到：



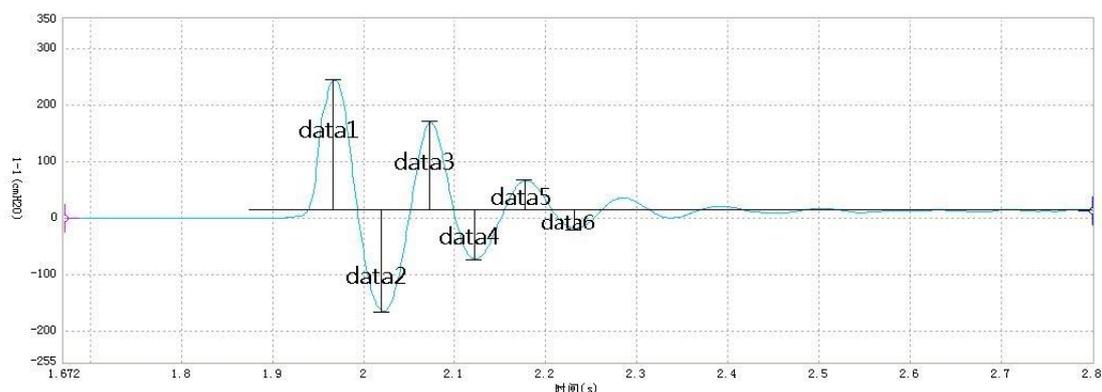
圖：水錘現象第一峰值與流速之關係圖

在我們測了許多數據後，發現正比的趨勢是確實的，其中，我們無法將流速調至過小是因為水管未滿流的問題，不將流速調更高是因為壓力計測數據的幅度有所限制（壓力為 4cmH₂O）。

(二) 壓力波遞減的圖形

1. 數據處理

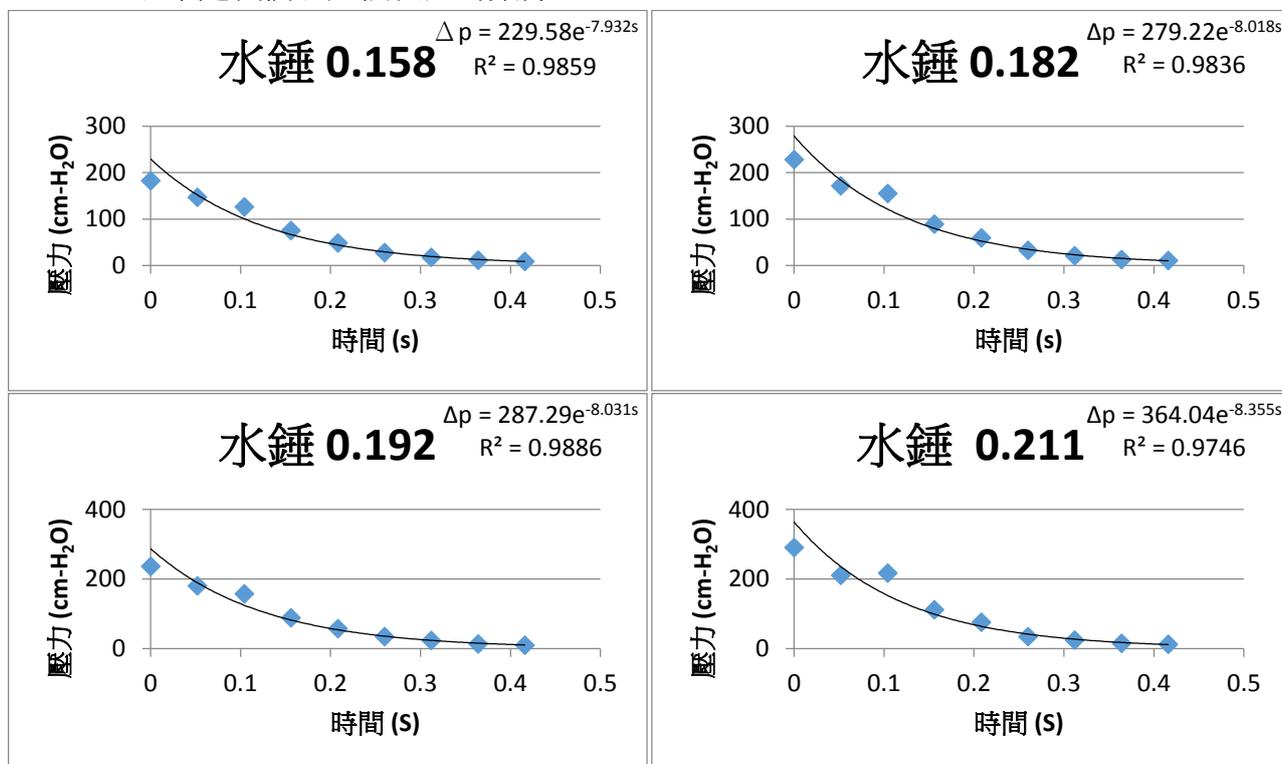
我們要先說明我們是如何處理這個數據的，壓力遞減所作出的圖形，其製作方法為：將峰、谷值減去平衡壓力後，將得出的數據取絕對值，使波谷數據上翻至正值。(如下圖所示)

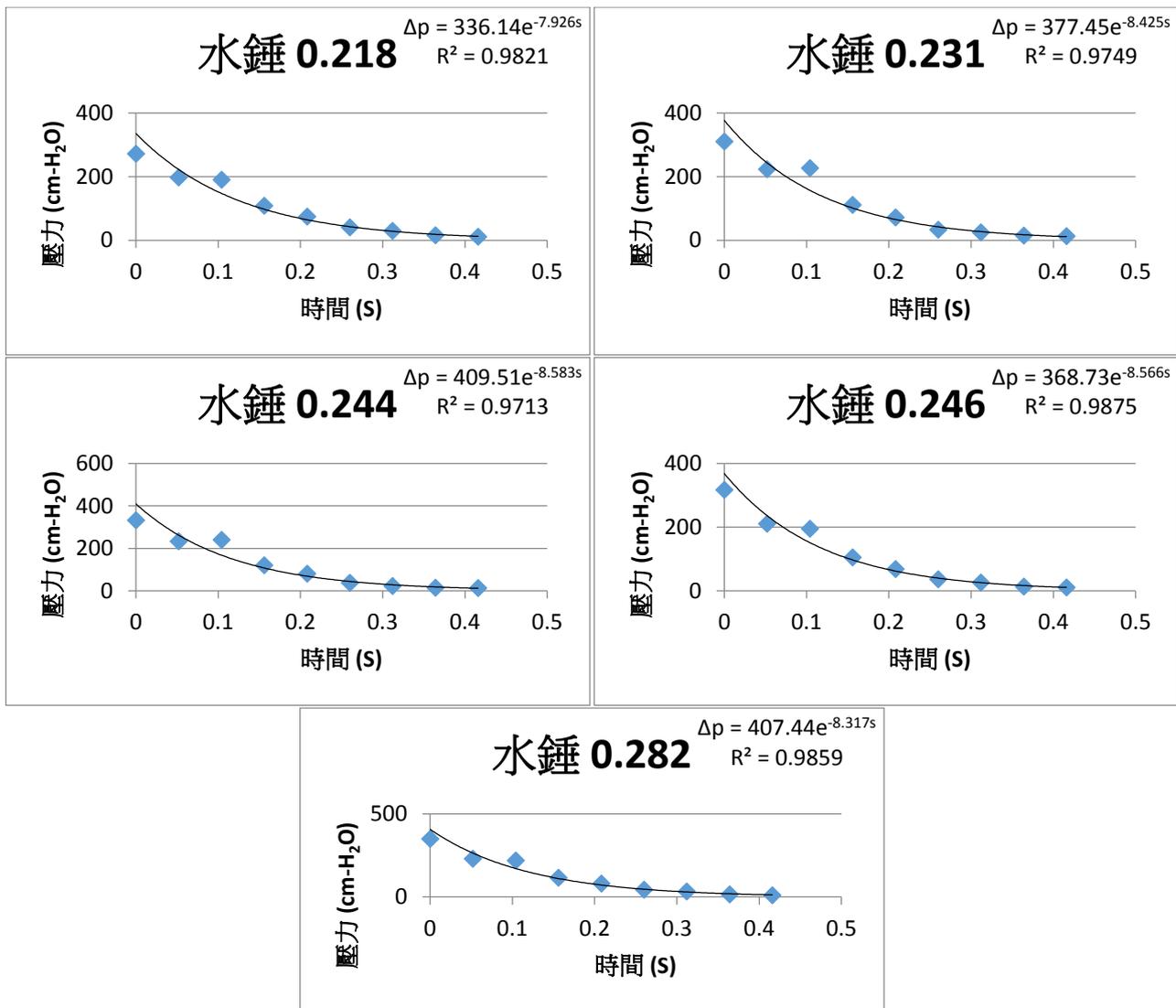


圖：取遞減波形數據的方式

2. 結果

以下是我們以九個流速的數據：





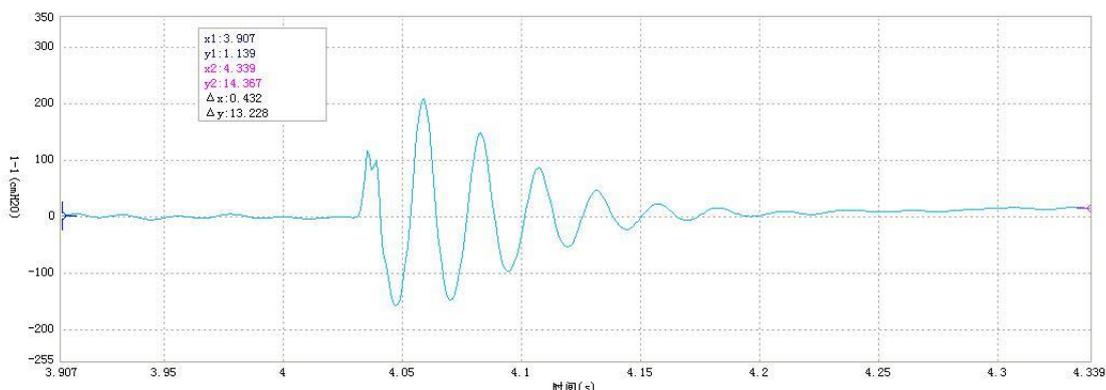
圖：水錘遞減波形 指數形式回歸

在指數函數的趨勢線下，我們的第一數據皆是低過趨勢線，而第三數據又皆為高於其。關於此點我們認為與關閉閥門時所導致的震動有關，使得前兩個壓力數據（一峰及一谷）有所偏差，因彈簧反彈時的力矩過大，即使我們以使用多條束帶來將白鐵管與平台綁死，其仍有一定震動的情況發生，亦間接帶動連接壓力計的小管有晃動情形。

在阻尼的影響下，壓力會呈現為一指數函數，依據我們所測得的數據，我們的在指數函數中，x 的係數為 -8.2392 。由於 $E = \frac{p^2}{c^2\rho}$ ，故我們的水錘裝置阻尼係數 -16.4784 。

(三) 電磁閥削弱水錘波的情形

1. 實際測到的數據 (PVC管):



圖：由電磁閥所測得的水錘波形

在前半段有不是很穩流的情況（相較於球閥），主要是因為電磁閥在設計構造上有水流轉彎的情形。

我們可以明顯看到第一壓力波有被削弱的情況，我們便是改變流速，來作比較，削弱後的圖形皆有兩個尖端，我的將其平均值來作為數據。

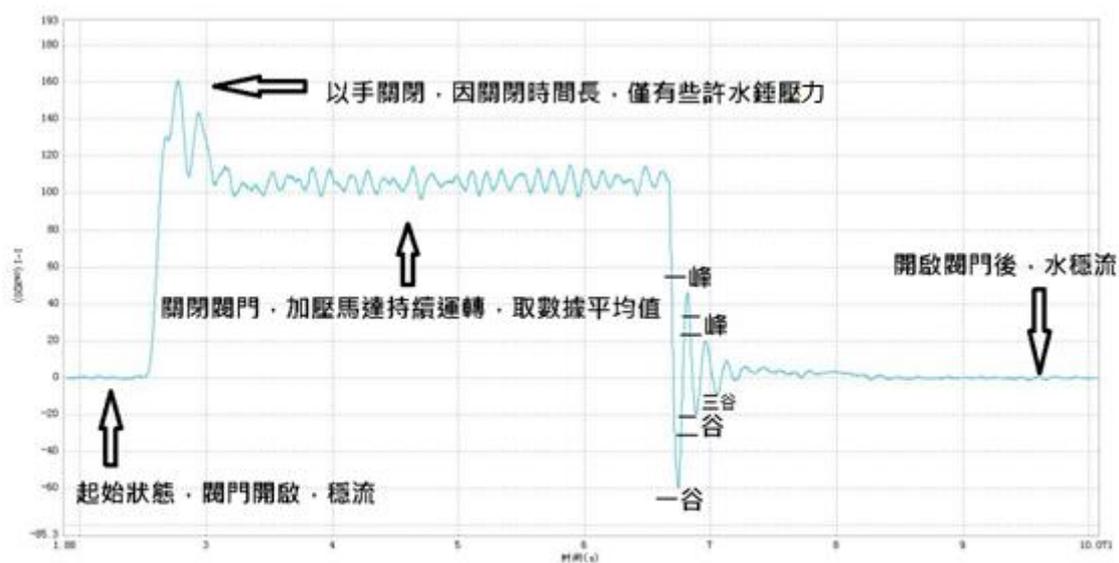
2. 數據

一峰	107.9	108.6	107.7
二峰	191.579	204.276	208.253
三峰	133.773	144.262	147.755
四峰	96.196	84.941	85.863
五峰	51.785	41.52	45.928
六峰	25.565	24.455	22.334
七峰	18.636	15.479	15.236
壓力單位： <i>cmH₂O</i>			

實際上，改變流速對於一峰的值是影響不大的，也許在調更低流速時會有更小的情況，但這對於我們實驗是無關緊要的，我們在意的是流速快時的情況。在一定的差距下皆無改變，我們推測電磁閥在大流速下會有相同情況，在第一峰呈現時將流速減緩一定程度。

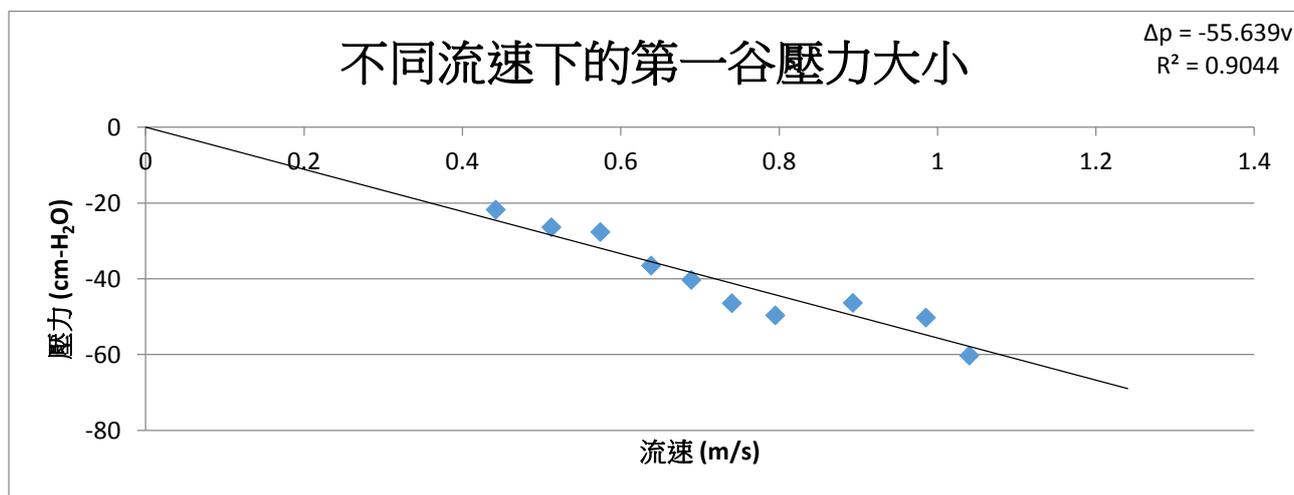
(四) 負水錘壓力與流速的關係

1. 我們所見到的圖形大略如下圖：



圖：負水錘現象實驗所呈現之波

2. 在此實驗中，我們取的是第一谷值。調整加壓馬達來得到不同流速的數據，加以分析後，我們得到如下面的圖形

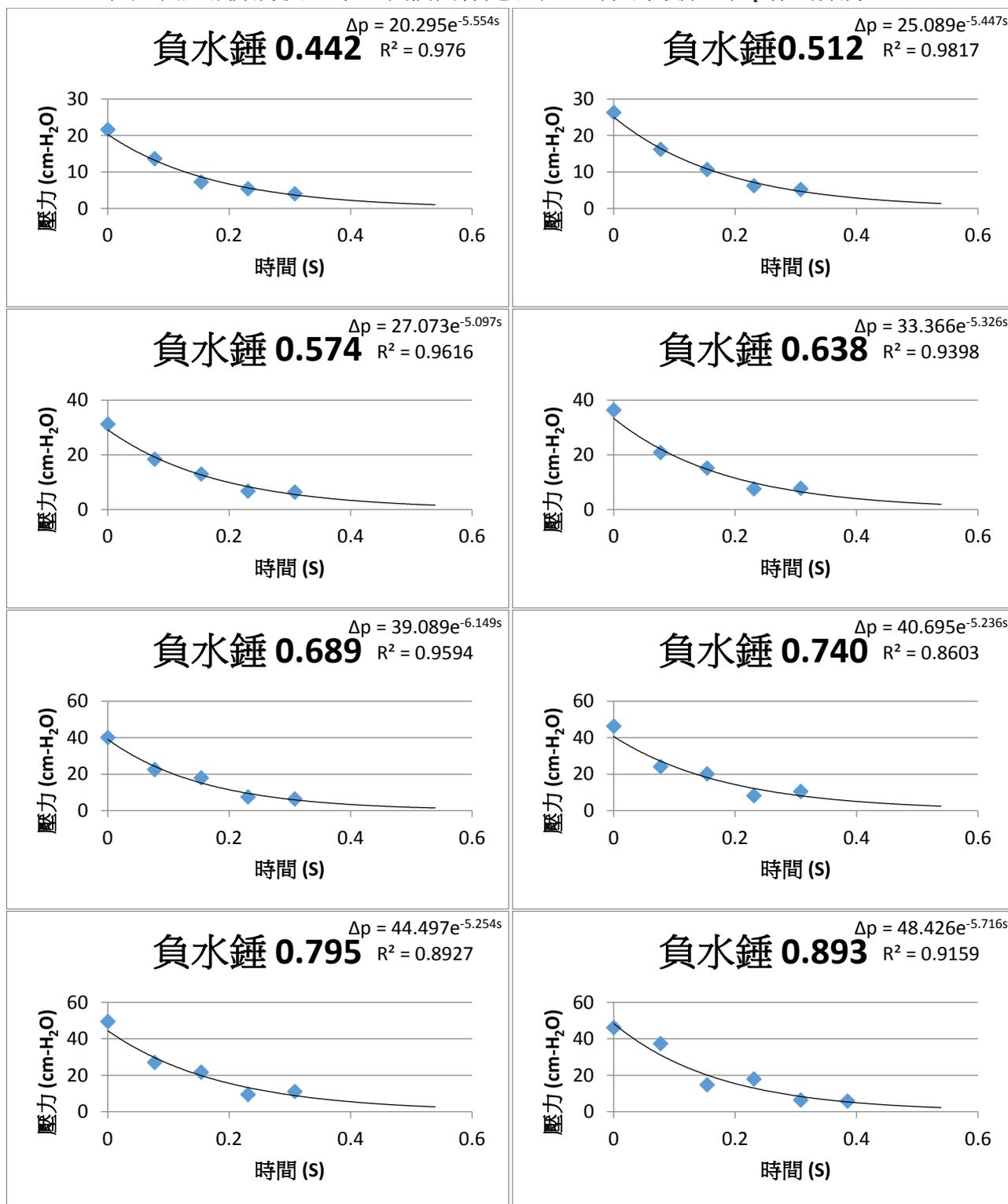


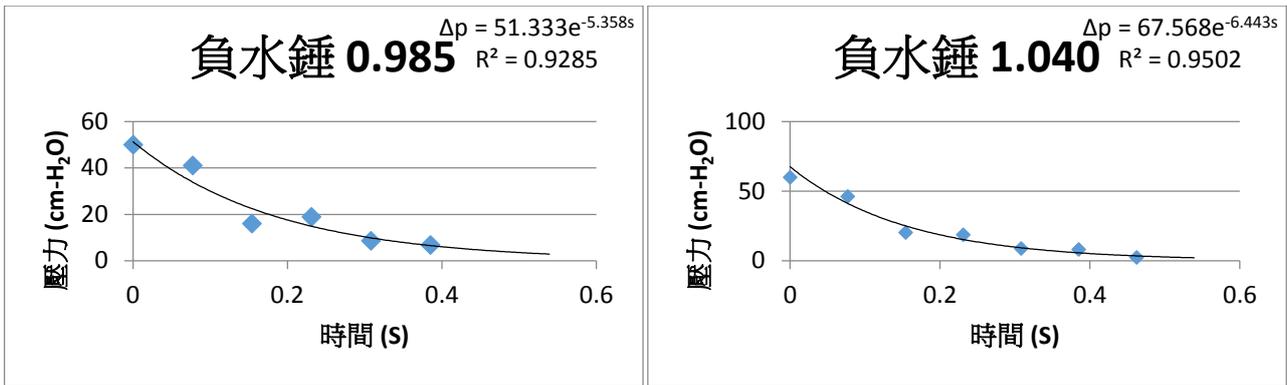
圖：負水錘現象第一谷值與流速之關係圖

(五) 負水錘壓力遞減的圖形

1. 結果

在此次遞減數據處理中，我們同樣是以谷、峰與平衡值的 Δp 作為數據。





圖：負水錘遞減波形，指數形式回歸

2. 說明：

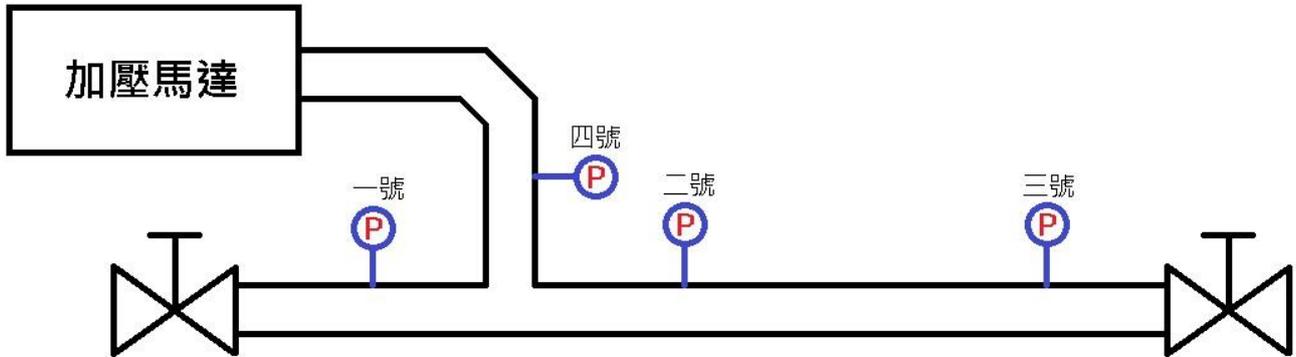
事實上，負水錘的壓力相較於水錘是屬於較小的，所以受到擾動情況所造成的影響也較大，故在低流速時我們刪除了幾個較小數據，使每一個數據點都有一定的量值。

而在阻尼方面，x 前的係數平均為-5.558，同樣根據 $E = \frac{p^2}{c^2 \rho}$ ，我們的負水錘裝置阻尼係數為-11.116。其與水錘遞減中的阻尼係數不同是因為，在負水錘中水有流動，而水錘中沒有，此外，其反射面亦有所不同。

(六) 干涉實驗

1. 壓力取樣點說明

我們分別在裝置的四個點連接壓力計，以改變相位差（調整左右閥門關閉時間）來觀察壓力波干涉情況，流速為 0.131m/s ，裝置簡圖如下

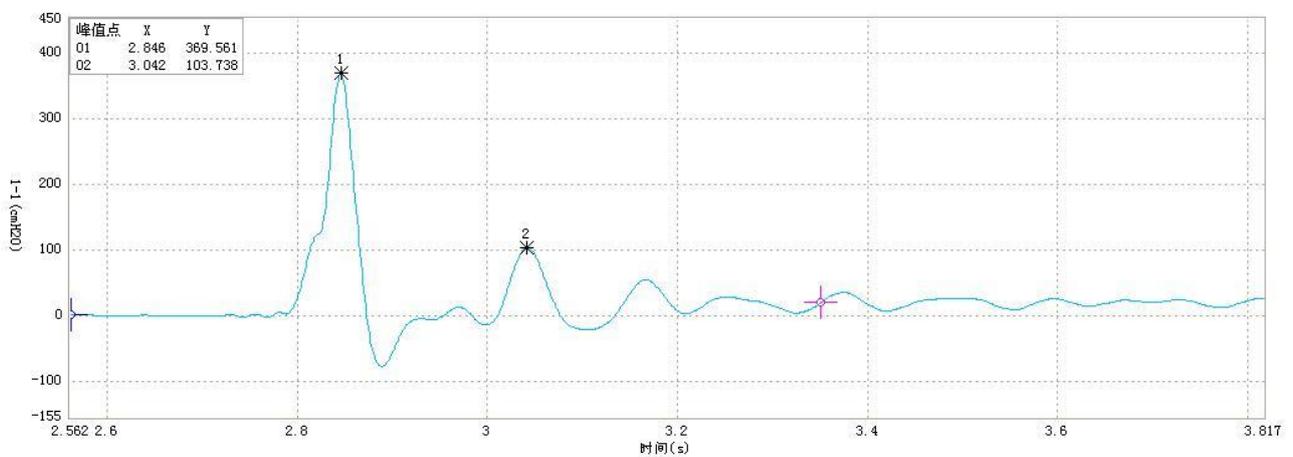
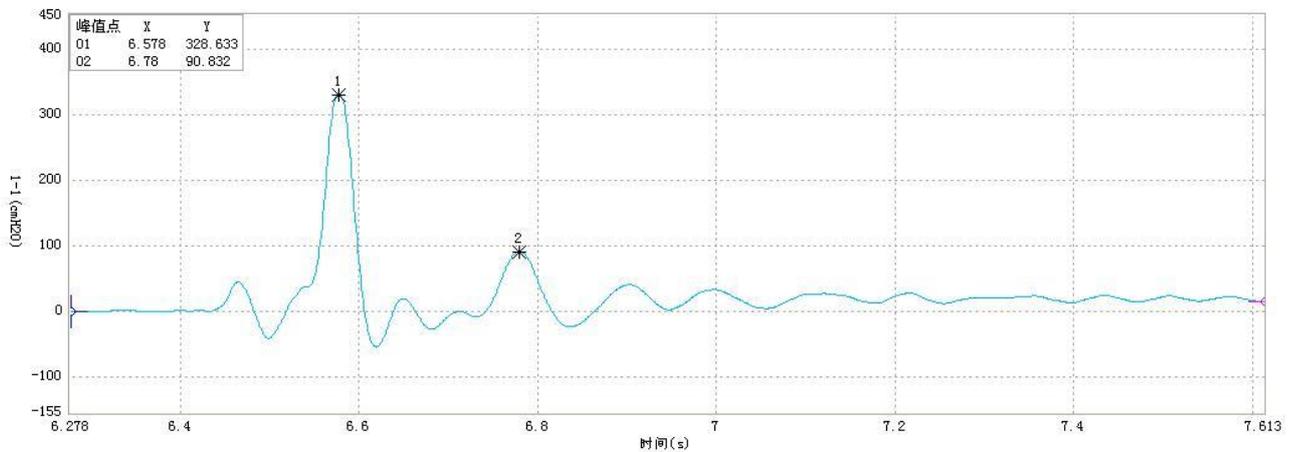


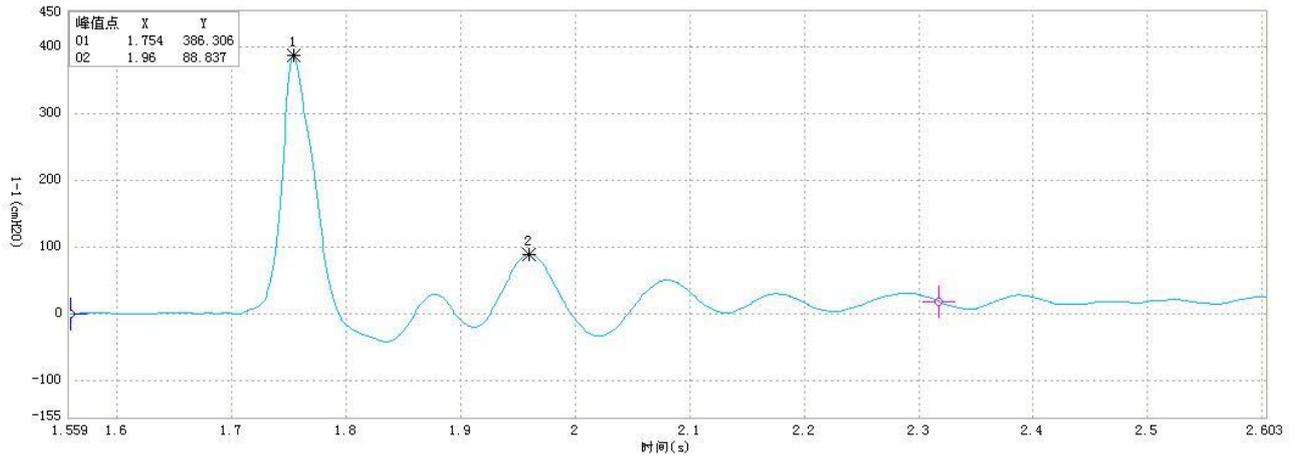
圖：干涉實驗壓力計數據編號

在之後敘述中，我們亦會用壓力計編號來方便說明。

2. 數據

(1) 一號壓力點

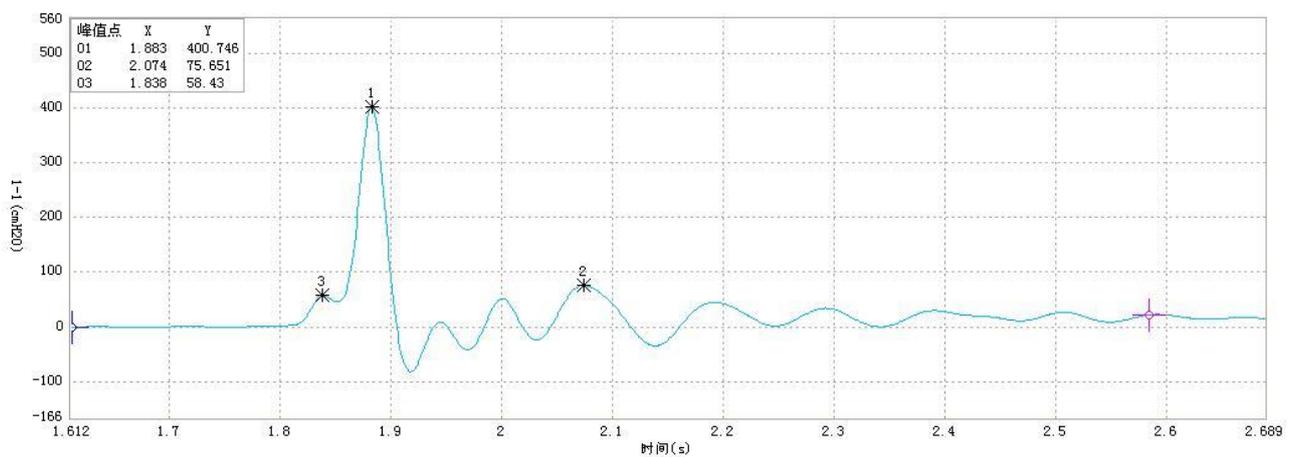
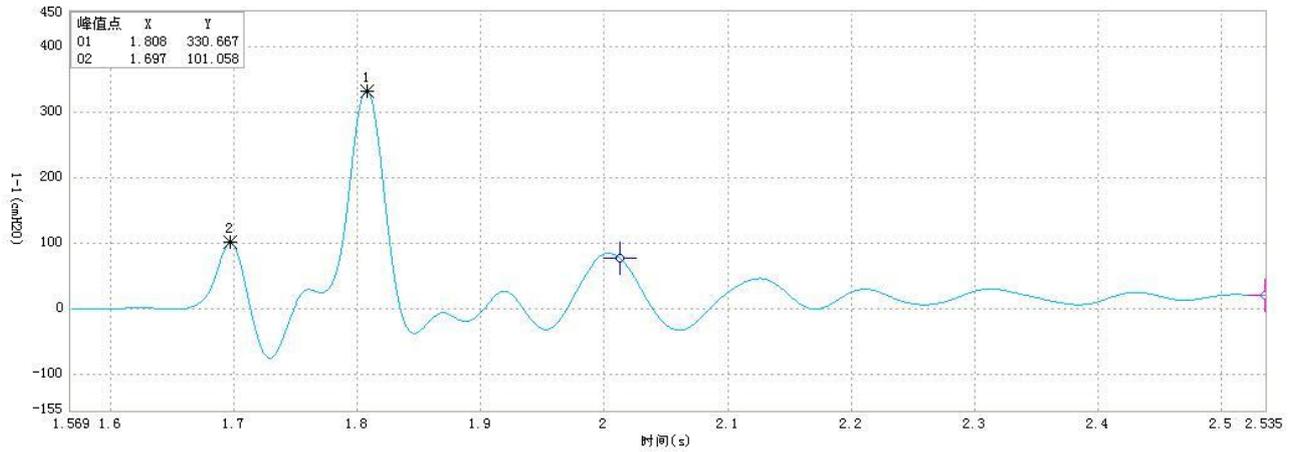




圖：一號壓力點在不同相位差下的壓力圖形

我們可以容易地觀察到，當相位差越接近0時，所得到的峰值越大。

(2)二號壓力點



圖：二號壓力點在不同相位差下的壓力圖形

在二號點的數據中，相位差接近0的數據皆超過我們所使用壓力計的上限值（約400cmH₂O），所以我們無法將其完整呈現出來。

(3)三、四號壓力點

在三、四號壓力點中我們所測得的數據與一、二號並無太大的不同，僅是在四號壓力點時，壓力有較小的情況（無相位差時約為 $340\text{cmH}_2\text{O}$ ）。

3. 分析

首先，前面的波似乎總是比後面的小，我們認為是因為在裝置中，壓力波傳播到的地方水已經是屬於靜止狀態了，所以壓力波傳播時並不會保持原有的壓力，而是傳播出去，但其仍有一定壓力（在流速為 0.131m/s 的情況下，我們測得約 $160\text{cmH}_2\text{O}$ ）。

再來，不論我們是在哪一個壓力點測數據時，皆會發生干涉現象。

最後，關於在主峰過後為什麼會那麼快就削減的問題，我們認為是因為我們的干涉裝置較為複雜，例如中間的 T 型連接管，事實上其會造成透射及反射的現象。我們的反射面相當多，故使得經反射後所測到的壓力較小、不平穩。

柒、討論

一、誤差的討論：

我們的實驗中有些地方有些誤差，我們推測原因可能為：

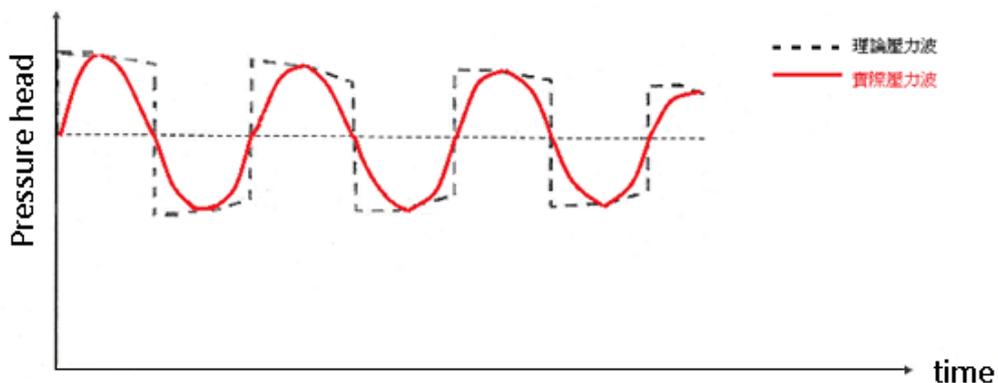
- (一)閥門關閉的時間並非和理論上的一樣趨近於零
- (二)閥門關閉時儀器會產生震動，導致壓力波前面的幾個波峰被吸收掉一些
- (三)我們量流速時，在控制時間上並非相當精準
- (四)每一次閥門關閉的時間僅到相當接近，而非完全相同
- (五)我們所使用的加壓馬達所提供的流速會有一點變動，這主要是因為我們並非使用獨立供電系統，當電力負荷突然改變時，馬達所提供的壓力會有一段時間不平穩
- (六)因我們的水管與閥門的轉接頭的管徑有一段會縮小，故造成有些微的壓力被反射或吸收掉



圖：轉接管，有改變截面積的情形

二、實際水錘壓力波圖形與理論圖形之比較：

我們從文獻上看到的水錘壓力波為一方波，但我們所測到的壓力波並不是方波，我們推測可能是因為我們所使用的壓力計始每1ms 採一個數據，故我們無法較精確測量到方波圖形，我們推測我們測到的部分可能如下圖。



圖：理論壓力波與實際壓力波的比較

三、為何我們是使用指數函數來分析壓力波的遞減情形

我們推測水錘現象所產生的壓力波可能和阻尼震盪相似，而阻尼震盪的波包函數為指數函數，故我們也用指數函數的分析法來分析水錘及負水錘壓力波波峰的遞減圖形。

四、為何使用電磁閥的水錘壓力波的第一波峰特別小

(一)我們一開始推測是因為水錘壓力波一開始是向下傳，撞擊到閥門導致壓力波被電磁閥吸收掉，但壓力波的第二波峰卻比第一波峰大，若根據我們的推論，壓力波應只是壓力變小，仍會維持其圖形，代表我們一開始的推論是錯的。

(二)後來我們推測可能是因為電磁閥在一開始並沒有完全關閉，而是經過一段時間之後才完全關閉，導致第一波峰較小，第二波峰之後才出現較完整的壓力波。(如實驗理論中所述)

五、為何閥門關閉後的壓力仍有震盪

我們認為是因為閥門關閉之後，加壓馬達仍繼續運轉，故會有一段不穩的壓力。

六、為何我們流速不能過大或過小

因我們所使用的水管在水流流速約在 $0.13m/s$ 以上時才會滿管，而在水錘實驗中，因我們所使用的壓力計在 $400cmH_2O$ 以上時就會測不到數據，而流速在 $0.28m/s$ 時所造成的壓力波的壓力就會達到 $400cmH_2O$ ，故我們在水錘實驗中的流速接介於 $0.13\sim 0.28m/s$ 之間。而在負水錘實驗中，因我們使用的供電系統無法讓加壓馬達的轉速過快，其臨界的流速約在 $1.1m/s$ ，而流速在 $0.3m/s$ 以下時負水錘現象並不明顯，故我們在負水錘實驗中的流速皆介於 $0.3\sim 1.1m/s$ 之間。

七、實際壓力波最大振幅單位換算後與理論值的比較

我們將我們的壓力波的最大振幅單位換算後和理論值去比較，發現有一定倍數差異，我們推測可能是因為我們的閥門關閉時間並非像理論一樣趨近於零，故造成實際值和理論值差了一個倍率關係

捌、結論

回到我們在研究動機所述，關於水錘送水機的裝置，其預先的水位為2.5m，設位能完全轉換成動能，其有流速7m/s，代回我們的實驗數據，約可達到90m的高度，即使此壓力僅維持相當短的時間，確實是能將水送至一定高度。也許其製作廠商的關閉閥門速度並不如我們所使用的扭力彈簧快，但在使閥門重複開關上又是另一巧思。而這個研究結果也映證了我們對水錘現象一開始的印象，它是有利有弊的，若是如此大的壓力持續對水管作用，必會發出噪音且在久經使用後會有爆管疑慮，但經過設計後卻又能將水送至高處。我們為能夠研究這個生活中的現象感到高興。

在實驗過程中，我們也曾使用過電磁閥作為阻斷水流的工具來作實驗，由於水錘現象已經有一定時間的歷史，像電磁閥這種快速關閉的閥門必定會考慮到這個現象，我們亦透過壓力計來得知其作用機制，了解到現代對於削弱水錘壓力的方法。

再來，我們研究負水錘，這在文獻資料中是相當少見的，因為它並不較水錘一般，會直接關係到我們的生活。但我們認為，既然要做一份研究就應該做得完整，我們改變扭力彈簧對球閥柄施力的方向，來進一步完成我們的報告，並也希望往後有人在研究水錘作用時，不會因為負水錘的資料過少而忽略它。

最後，我們實驗了干涉現象，我們的初衷就是希望能夠運用干涉，來使水錘送水機能夠把水送得更高。而實驗證明我們成功了，我們大約可以將壓力提升1.5倍左右，這是相當令我們高興的。

我們研究壓力波，這如同聲波、地震P波是一縱波，我們認為，當往後研究到這些時，應當會出現與我們現在所研究之水錘現象有相似之處。

以下以條列式簡述我們的研究成果。

- 一、水錘現象所造成的壓力波的最大振幅和流速成正比。
- 二、壓力波遞減應是因為黏性阻尼，其圖形為指數函數。
- 三、電磁閥的關閉一開始會使流速減緩，在使流速完全停止。
- 四、負水錘現象所造成的壓力波所造成的最大振幅和流速成正比。
- 五、負水錘現象所產生的壓力波振幅遞減的圖形為指數函數。
- 六、水錘壓力波干涉是可行的。

玖、未來展望

一、比較在相同條件下，有干涉的水錘壓力波與沒有干涉的水錘波的差異

二、製作能夠干涉的水錘送水機簡易模型

希望能夠藉此來推廣建設性干涉對水錘送水機的好處。

三、增加實驗數據的精準度

在未來，我們可以藉由多試幾次或是找尋新的量測方法來使我們的實驗數據更加的精準，讓我們可以精確的分析水錘及負水錘現象。

四、不同流體

希望未來可以嘗試不同性質的流體對於水錘及負水錘現象的影響。

五、水錘現象與其他縱波之關聯性

我們推測水錘壓力波可能和其他縱波的性質相似，例如：聲波、地震波，我們希望可以藉由觀察水錘現象來推廣到其他的縱波上，像是推測其遞減的情形或傳播情形。

拾、參考資料及其他

一、Halliday, Resnick, Walker. *Principles of Physics 9e*

二、Crowe, C.T., J.A. Roberson, D.F. Elger (2012). *Engineering Fluid Mechanics*

三、朱佳仁(2003)。環境流體力學。台北市。科技圖書。

【評語】 040101

本作品能以簡單手閘門的裝置探討水在管中流動受閘門阻斷產生的壓力，實驗中亦能探究正負向的壓力及干涉行為。唯對實驗數據的分析及解讀應可再更深入，而解析出物量參數量，以利定量物理特性之理解。