

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030113

「流」「擺」能生—探究穩定水流中單擺組合擺
盪機制與發電應用評估

學校名稱： 新北市立安溪國民中學

作者： 國二 鄭安倫 國二 鄭凱元	指導老師： 劉明元 解宗翰
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞： 渦流、單擺、電機效能

摘要

探究水流中單擺擺盪變因的影響，確認擺盪的物理機制，用於發電裝置優化調控。單擺實驗以動能轉換參數 $f \cdot X$ 評估效能高低，於實驗中發現阻礙物兩側流速差造成偏移力並產生渦流，若渦流結構完整，說明流速差大，偏移力大。擺長越長，渦流頻率(f)降低且擺幅增大；擺錘直徑增加使 f 降低、擺幅及渦流直徑增大。流速10cm/s下，最優單擺-擺錘直徑5cm、擺長20.5cm、33.7g。加阻流柱(擺)可降低 f 增加擺幅；水流速與共振擺長有量化關係。擺盪發電組的圓筒密度接近水時有較佳的發電效益，於不同流速下，改變擺長可調控發電組之震盪頻率使之共振，增加擋板可增加發電組擺幅使發電效能提升。

壹、前言

一、研究動機

每當學校升旗時，不時會看見國旗左右飄揚，像波浪一般的擺動，猜想是否因空氣流過國旗表面時，氣流擾動造成？而同樣為流體的水流，是否也有類似效應，在流過阻礙物體時，造成阻礙物擺盪的效果？

台灣水力發電多為渦輪式水力發電，是利用水位高低差，使渦輪旋轉後發電，但是渦輪的轉動可能造成魚類和其他水中生物的傷害，造成生態破壞。若水流經擺盪柱時可以使其擺盪，並利用此擺盪來進行發電，此裝置相較於渦輪式發電裝置應較不會造成生物的危害，若可以在河川底部或洋流底部進行擺盪發電，在利用綠能之餘，對環境的衝擊也能達到最小。

若由單擺裝置的角度思考：

水流流動造成擺盪，配合發電機組，能否在較低流速流量進行有效發電？

擺盪式發電機組的水流條件為何？造成擺盪發生的影響因子有哪些？

在面臨不同水流速、水流量時，如何以機械調整達到最佳發電效能，讓使用範圍擴大。這些問題是我們想要深入探究的！

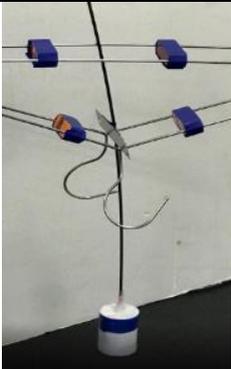
因此我們想由穩定的緩流切入，先探究水流流動與單擺擺動相關變因的影響趨勢，以此為基礎，建構水流擺盪發電機組的學理模型，再應用關學理進行裝置的優化調整，建構可以在不同流速水量下進行發電的擺盪機組。

二、研究目的

- 一、探究在特定流速下，分別改變單擺擺長、擺錘質量、擺錘直徑，觀察單擺、頻率、擺動動能與渦流的變化。
- 二、加裝阻流柱，分別改變阻流柱直徑與阻流柱和單擺的距離，觀察優化單擺擺盪幅、頻率、擺動動能與渦流的變化趨勢。
- 三、加裝阻流擺，以不同直徑擺錘的受測單擺進行組合，觀察受測單擺在距離改變幅、頻率、擺動動能與渦流的變化趨勢。
- 四、在受測單擺前加裝優化阻流柱及阻流單擺，以不同直徑擺錘的受測單擺進行受測單擺在距離改變時，單擺擺幅、頻率與擺動動能與渦流的變化趨勢。
- 五、改變水流速，觀察單擺擺幅、頻率、擺動動能與產生渦流的變化趨勢，測量最大對應擺長。
- 六、建構擺盪式水流發電裝置，分別探究在速下，改變擺長、擺筒密度、擺筒直徑、阻流檔板距離，對發電效能的影響並找出對應優化發電條件。
- 七、改變水流速，檢測發電效能，找出發電裝置對應的擺長、共振頻率，並作為建構發電效能調控及雙重擺組合發電的參數基礎。

貳、研究設備與器材

表一 實驗材料

實驗器材		耗材	儀器
沉水馬達A 2000 L/hr	輕質單擺組	線圈擺盪器	筆電、手機
沉水馬達B 3000 L/hr	擺盪式發電機組	PVC水管	流速計 檢流計
四尺玻璃缸 (緩流循環系統)	鋼角架	硬質吸管	三用電表
沉水馬達C 360 L/min	固定用木架	珍珠板	應用軟體 Tinkercad
六尺玻璃缸 (急流循環系統)	探照燈	波浪板	應用軟體 Excel
			
<p>圖1輕質單擺組 (照片由第一作者拍攝)</p>		<p>圖2擺盪式發電機組 (照片由第一作者拍攝)</p>	
			
<p>圖3滑動式發電機組 (照片由第一作者拍攝)</p>			

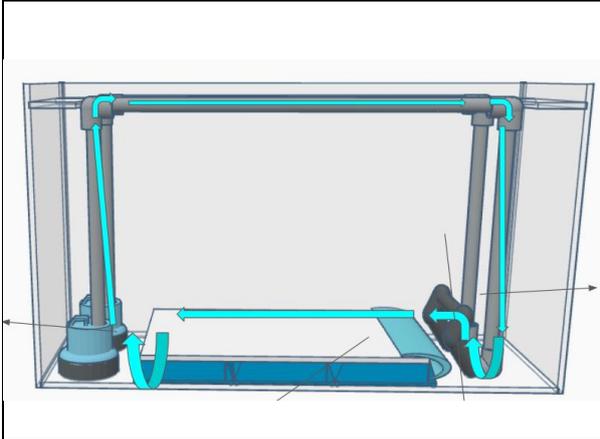


圖4 緩流循環水缸設計圖(單擺渦流試驗)
(圖片由第二作者由軟體Tinkercad製出)



圖5 緩流循環水缸完成圖(單擺渦流試驗)
(照片由第一作者拍攝)

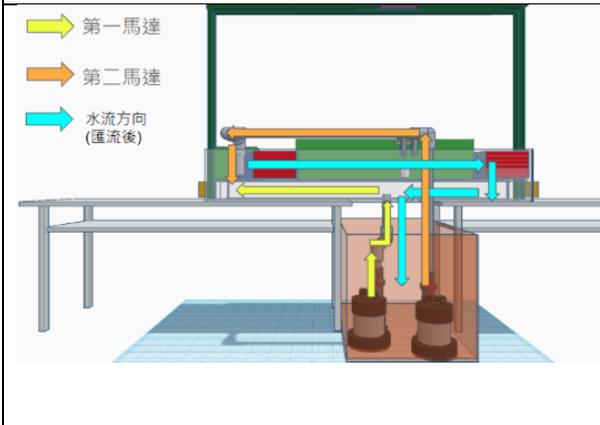
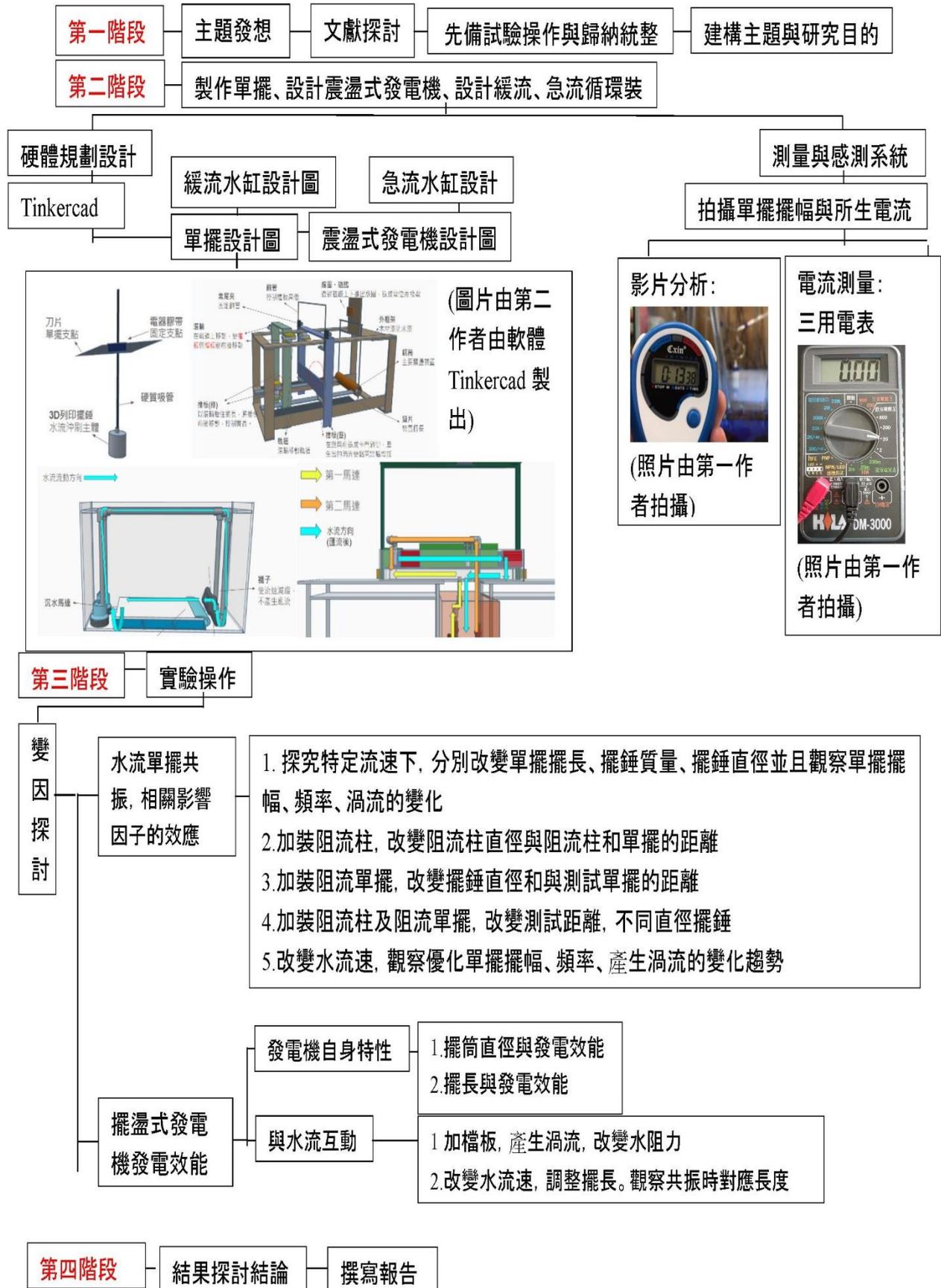


圖6 急流循環水缸設計圖(擺盪式水流發電)
(圖片由第二作者由軟體Tinkercad製出)



圖7 急流循環水缸完成圖(擺盪式水流發電試驗)
(照片由第一作者拍攝)

參、文獻探討與研究步驟



一、文獻探討初論

a. 卡門渦街的形成

在流體力學中，雷諾數 Re 是指流體的慣性力與黏性力的比值，公式如下

$$Re = \rho VL / \mu$$

V 是特徵速度（國際單位：m/s） L 是特徵長度(m)

μ 是流體動力黏度（Pa·s或N·s/m²） ρ 是流體密度（kg/m³）

在先備試驗中，觀察到單擺在水中未擺盪的時候，水流呈現左右擺盪的力學波動；但是單擺出現擺動時，擺錘表面水流在擺到最點時會脫離表面，順著擺錘回擺，水流會形成小漩渦，並且可會看到交錯排列的漩渦流動，查閱相關文獻得知為卡門窩街。因此推斷，卡門窩街的形成、變化與單擺擺動有密切關係。綜合文獻及試驗所得，卡門窩街的形成，應該會受到流速，流體慣性力、黏性力與擺錘相互作用

b. 白努力定律:

當水流流過阻流體時，會被迫轉彎，進而造成阻流體內外壓力不相同，外側壓力較大，因此內側造成渦流

c. 渦街頻率計算

由文獻得知，交替的渦流使阻流體兩側流速不同，壓力大小也不同，因此造成阻流體震盪。

由先備試驗觀察，阻流體(擺錘)兩側流速不同，造成壓力大小也不同，因此造成阻流體震盪。單擺在水流中產生最大擺幅，應該是出現了共振現象，但是測量其水流中的擺盪頻率，與單擺在空氣中的自然頻率並不相同。

由文獻中得知，物質受到強大外力作用，產生阻尼效果，造成物體自然振動頻率會發生變化。推測，水流和擺錘之間作用力的交互作用可能會影響擺動頻率變化。

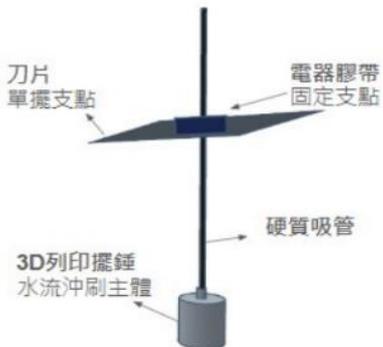
初步結論:可能影響擺錘擺盪幅度與頻率的可能變因，

擺長，擺錘質量，擺錘直徑，水流速，阻礙物(固定或擺盪，卡門渦街應有影響)。

二、研究步驟

(一) 輕質單擺設計

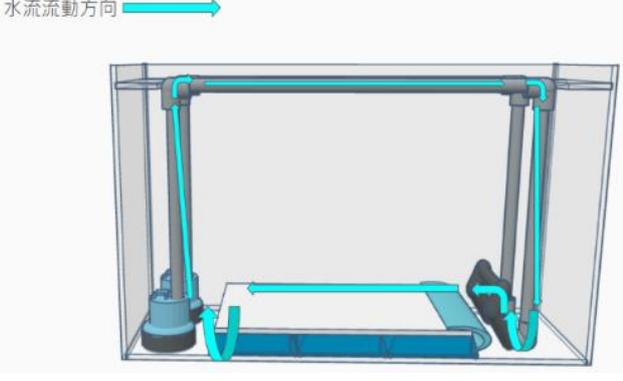
單擺由硬質吸管、刀片、塑膠擺錘組成，以V型架上凹槽為支點，V型架固定於緩流循環的玻璃缸；擺錘底深入淺水緩流1cm，產生擺盪再以注射針注入染劑，拍攝紀錄所生渦流以及測量擺幅和頻率。

	
<p>圖8 單擺設計圖 (圖片由第二作者由軟體Tinkercad製出)</p>	<p>圖9 單擺完成圖 (照片由第一作者拍攝)</p>

(二)水缸設計

A. 渦流觀察應用之緩流水缸設計

以4尺魚缸進行改裝，以沉水馬達作為水流循環動力，水管末端套接長襪作為緩流之用。裝置三組循環水管，以2000L/hr與3000L/hr兩種規格的沉水馬達進行組合，造成不同流速的緩流循環。底部以塑膠盆配合波浪板、護貝方格紙(1cm²)、彎曲鋁板，形成緩流觀察區水深約1.5cm。在觀察區上方架設探照燈，便於觀察渦流變化。

	
<p>圖10 水缸設計圖 (圖片由第二作者由軟體Tinkercad製出)</p>	<p>圖11 水缸實體圖 (照片由第一作者拍攝)</p>

B. 發電效能測試應用之急流水缸設計

設計緩流循環缸的目的是為了觀察單擺擺盪時渦流的變化，並且測量頻率與擺幅的變化，藉以瞭解影響窩流擺盪的物理機制(急流狀態下，水流穩定性較低，擾流較多，觀察測定較為不易)。

但是因為水流速較慢(10cm/min 到18cm/min)，單擺的質量較輕，擺動頻率慢，加裝磁鐵線圈後測到的電流極弱(10uA以下)，無法藉由電流的測量，觀察各項變因(擺長、擺錘重、擺錘直徑、水流速、頻率、擺幅)對發電效能的影響(有實作裝置及操作影片紀錄)。因此設計急流循環水缸及相對應的發電裝置，以先前渦流擺盪實驗結果為

基礎，測試改變擺長、擺筒直徑、阻流板距離所造成發電效能的變化趨勢是否相符。並且找出與水流速應對的調控關係，達到對應最大發電效能。

急流循環的動力為兩組360L/min沉水馬達，水缸為6尺長、兩尺寬、1尺高，分上下兩層；水流藉水管分別由水缸上方及下層注入，匯流後底經前整流管進入操作區，再由後整流管流入水缸下層，由底部排水孔排入水桶，完成循環。管路中設置水閘，調整水流速，操作區水流深度維持10cm。

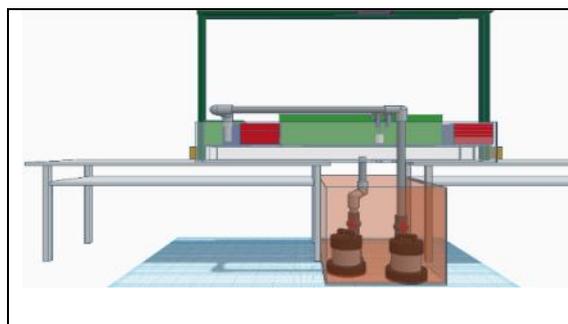


圖12 水缸設計圖

(圖片由第二作者由軟體Tinkercad製出)



圖13 水缸實體圖

(照片由第一作者拍攝)

水循環路徑:

- 1.水自橘色水箱由沉水馬達吸出
- 2.水分別由水缸上下匯流於整流管前
- 3.水流經過整流管經過實驗區
- 4.經過二次整流後流回原橘色水箱內

(三)發電機組設計

- 1.單擺式發電組:(緩流水缸中測試，除流速變因外，10cm/sec，水深2cm以下)

主要構造有單擺、磁鐵線圈組合及V型架，將磁鐵黏貼於單擺的擺錘上(重量取代擺錘內的螺帽配重)，並把線圈以硬質吸管懸吊的方式固定在V型架上，當單擺擺動時，架設於擺錘的磁鐵就會通過線圈，讓磁力線切割產生電位差進而發電，最後再利用微安培計連接線圈測得所產生之電流。

- 2.擺盪式發電組(上下擺，擺筒水平):

(急流水缸中測試，除流速變因外，30至20cm/sec，水深10至12cm)

主要構造包含**支持木頭框架**，**擺盪圓筒**，**磁鐵線圈組合**，**阻流擋板**四個部分；木頭框架是由上過亮光漆的硬質木條組裝，建構兩組滑輪軌道，分別用於調整擺盪圓筒的擺長(由鋁片組成)，以及調整阻流板與擺盪圓筒距離。擺盪圓筒由鋁片接合而成，插上細長鋁片組成單擺；圓筒側面連結硬質吸管支架，支架上固定強力磁鐵，在木架相對位置固定發電線圈，連接電阻與安培計，測量發電效能。

- 3.滑動式發電組(左右擺，擺筒垂直):

(水圳中測試，流速60至70 cm/sec，深約50cm)

主要構造是由角鋼架所組成的支架、滑軌以及彈簧製成；壓克力擺筒(30cm長)上下端固定於滑軌質塊，藉由質塊滑動使擺筒進行擺盪動作(擺筒垂直，左右擺)。擺筒上方固定強力磁鐵，板架上固定漆包線線圈，建構成發電裝置。在擺筒中央位置，左右兩側固定彈簧線圈，藉由改變彈簧圈數調整彈簧彈性，方便於調整擺盪系統的自然頻率，配合水流衝擊所造成的渦流頻率，達成共振的效果。

完成單組擺盪測試後(在書面報告繳交時，僅有初步數據，因裝置故障需修整與水圳水流條件變化，進一步的數據尚在努力中)，預定在原測試組前方加裝一組擺盪裝置，(阻流擺)藉以調整水流速(渦流自然頻率)，並提升發電組擺筒的擺盪幅度(組合部分實驗在繳交書面報告時尚在進行中，未有完整數據)，使發電效能更加提升。

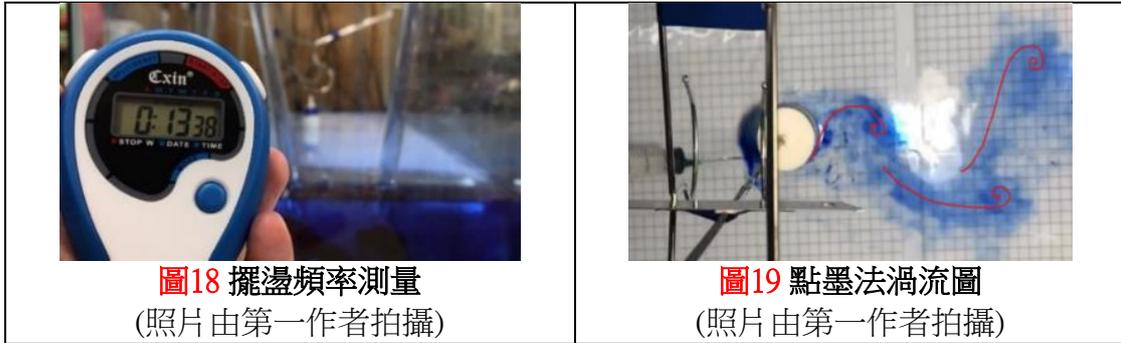


圖14 滑動式發電實際測試圖(照片由第一作者拍攝)

<p>圖15 單擺式發電組(緩流) (照片由第一作者拍攝)</p>	<p>圖16 擺盪式發電組(急流) (圖片由第二作者由軟體 Tinkercad製出)</p>	<p>圖17 滑動式發電組(水圳) (照片由第一作者拍攝)</p>

(四) 單擺實作檢測流程

- (1) 開啟馬達，使水流循環
- (2) 將單擺放至V型架上，調整V型架高度讓擺錘落入水面(單擺開始擺動)
- (3) 使用手機同步拍攝單擺與碼錶，測單擺擺動十下的時間，平均後得到週期，再換算成頻率(渦流頻率)。每一條件重複三次試驗。
- (4) 擺幅觀察:以擺錘垂直時邊緣為基準點，到擺動到最外側時的邊緣為止，定義為擺幅。測量是以雷射筆垂直投射，配合單位1cm²方格完成。
- (5) 數據分析中因單擺無法有明顯發電，因此以能量轉換效能作為單位，轉換效能以總能角度切入，總能為動能加上位能，因實驗中發現擺長夠長的情況下，擺盪高低差不顯著，故位能忽略計算。動能公式為 $E=1/2 * M * V^2$ ，轉換方程式 $E=1/2 * M * X^2/T^2$ (週期)，我們發現動能與頻率和擺幅有關，因此將擺幅和頻率相乘作為轉換效能。



- (6) 在單擺前加入水性染劑，觀察擺動時渦流大小及變動，攝影記錄再截圖
註:原本考慮用投影法，以透鏡折射原理(聚光、散光)進行渦流觀察，但因水流太淺(未超過1.5cm)，效果不顯著，故改用點墨法，以染劑分佈，進行渦流觀察判定，以下為渦流判定示意圖:

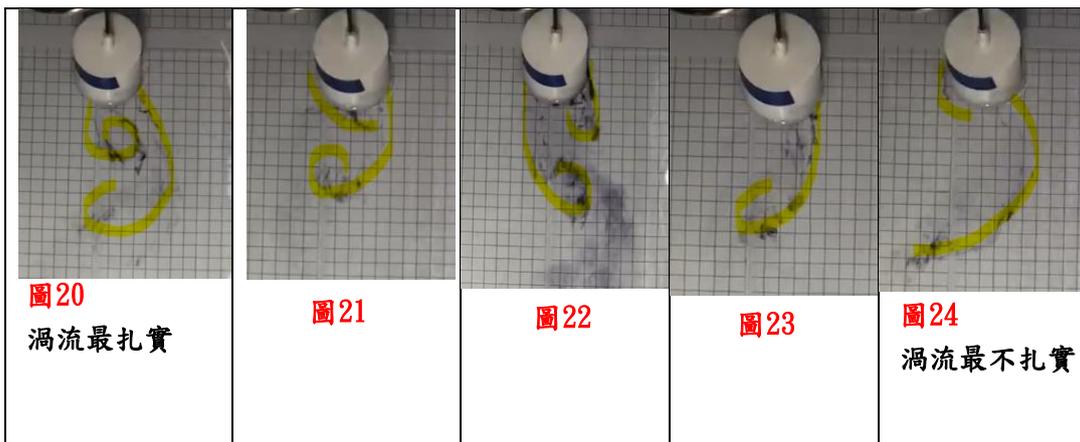


圖20-24 渦流變化圖(照片由第一作者拍攝)

- (7)單擺放置於空中，以(4)之方法測其自然頻率

(五)各項操作變因實作驗證

實驗一：探究在10cm/sec水流速，**擺錘直徑3cm**條件下，分別**改變單擺擺長、擺錘質量**

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因1: (擺錘重22.10g)

擺長: 12.5cm、16.5cm、18.5cm、20.5cm、24.5cm

操作變因2: (擺長12.5cm)

擺錘重: 22.10g、28.56g、35.01g、41.46g

註:

1. 擺長定義:指擺錘支點位置到擺錘二分之一位置的距離

(刀片中心點與V型架交界處到擺錘重心的距離)

2. 擺錘質量定義:固定螺帽在中空擺錘內(螺帽數量等差)，測量擺錘總重

實驗二：探究在10cm/sec水流速，擺錘直徑4cm條件下，分別改變單擺擺長、擺錘質量

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因1: (擺錘重29.9g)

擺長：8.5cm、12.5cm、16.5cm、20.5cm、24.5cm

操作變因2: (擺長20.5cm)

擺錘重：29.90g、39.60g、49.30g、59.0g、68.7g

實驗三：探究在10cm/sec水流速，擺錘直徑5cm條件下，分別改變單擺擺長、擺錘質量

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因1: (擺錘重33.7g)

擺長：8.5cm、12.5cm、16.5cm、20.5cm、24.5cm

操作變因2: (擺長20.5cm)

實驗四：探究在10cm/sec水流速，擺錘重33.7g，擺長20.5cm條件下，改變擺錘直徑

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因:

實驗五：探究在10cm/sec水流速，擺錘垂直徑5cm，擺錘重33.7g，擺長20.5cm條件下，在擺錘前方加裝固定阻流柱。

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因1:

阻流柱的直徑:有三種規格，分別為3cm、4cm、5cm。

操作變因2:

擺放的距離以阻流柱的渦流直徑為基準，0.5、1、1.5、2、2.5個渦流
(三種阻流柱的渦流直徑依序為2cm、3cm、4cm)

實驗六：

六之一：探究在10cm/sec水流速，測量擺擺錘直徑5cm，擺錘重33.7g，擺長20.5cm條件下，在擺錘前方加裝**阻流擺**。

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因：

擺放的距離以**阻流擺的渦流直徑**為基準，0.5、1、1.5、2、2.5個渦流
(阻流柱擺的直徑為5cm，渦流直徑為4cm)

六之二：探究在10cm/sec水流速，加裝阻流擺；**阻流擺擺錘直徑3cm**，擺長12.5cm，擺垂重35.0g。測量擺距離阻流擺1.5個渦流的距離。

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因：

測量擺擺錘直徑：3cm、4cm、5cm。

以單擺原本最優化條件(擺幅大頻率高)的質量、擺長進行操作。

實驗七：探究在10cm/sec水流速，擺錘垂直徑5cm，擺錘重33.7g，擺長20.5cm條件下，在擺錘前方加裝優化組合阻流柱及阻流擺**，阻流擺(擺錘直徑5cm)放置在阻流柱(直徑5cm)後方6cm(1.5個渦流)，測量擺(擺錘直徑5cm)**

觀察：單擺自然頻率，水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺動幅度，渦流型態變化。

操作變因：阻流擺與測量擺的距離

擺放的距離以**阻流擺的渦流直徑**為基準，0.5、1、1.5、2、2.5個渦流
(阻流擺的渦流直徑為4cm)

實驗八：擺錘直徑5cm，擺重33.7g，改變流速，調整擺長，使單擺達到最大擺幅**。**

觀察：水流擺盪頻率，擺動幅度，渦流型態變化

操作變因1：流速：有五種規格，分別為10cm/s、12cm/s、14cm/s、16cm/s、18cm/s

操作變因2：擺長：從擺長8.5開始，以公差2往上測量，直到測量出**優化擺長**

優化擺長定義：**擺幅最大**，若有相同擺幅的擺長，則取**頻率較快者**

實驗九：

九之一：探究擺盪式發電機組**改變擺長、擺筒密度(>1, =1, <1)、擺筒直徑(4.5cm, 5.8cm)、阻流擋板距離**，觀察各項物理因子對發電效能的影響。

九之二：以5.8cm擺筒進行不同流速下，發電效能測試。觀察對應擺長、共振頻率、最佳

發電效能。建構不同流速水流對應擺長、共振頻率調控參數模組。

九之三：建構滑動式擺筒發電機組，在實際溝圳中進行發電測試，改變彈簧彈性係數，控制擺筒的自然擺動頻率，藉以應對不同水流速所造成的渦流頻率，達成最佳發電效果。另外建構阻流擺組合，藉以調整發電擺筒接觸的水流速與提升擺動振幅。(註：實驗九之三在書面報告繳交時僅完成初步試驗，結果將列於討論中，完整數據將列於海報中。)

肆、研究結果



圖25實驗一之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

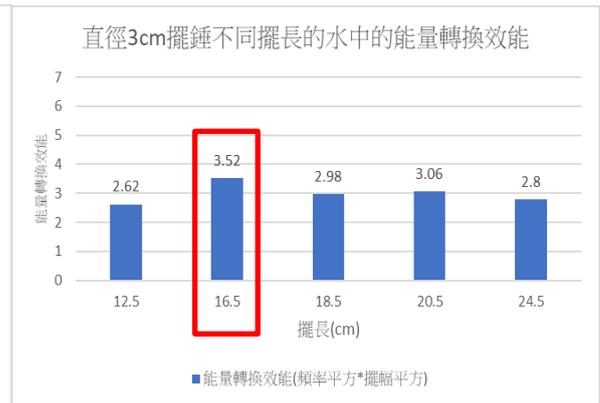
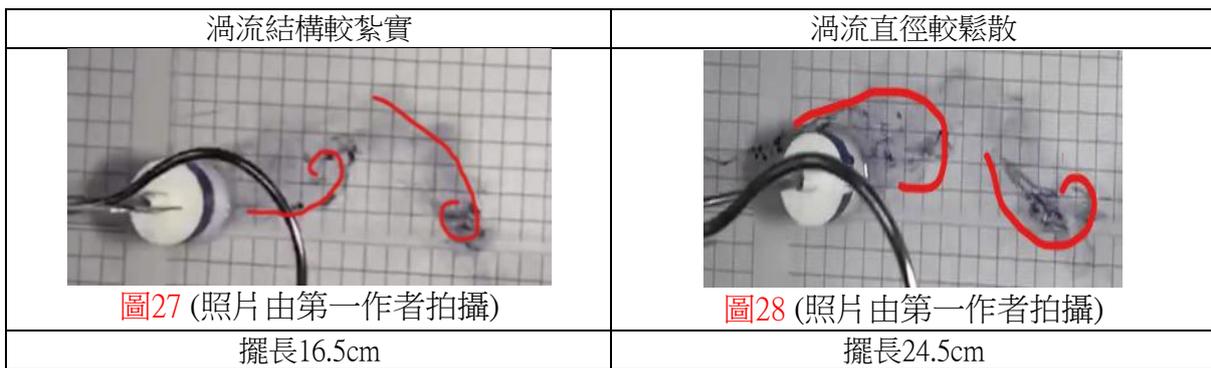


圖26實驗一之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)



- (1) 對應不同擺長，在水中的頻率變化不明顯，以結果而言頻率稍微下降
- (2) 3公分擺錘的自然頻率為擺長越長，自然頻率越低
- (3) 從渦流觀察可以發現當3公分擺錘在水中的擺動頻率越快時，渦流交錯越明顯
- (4) 從圖表中發現擺長為16.5公分的3公分擺錘其能量轉換效能最佳

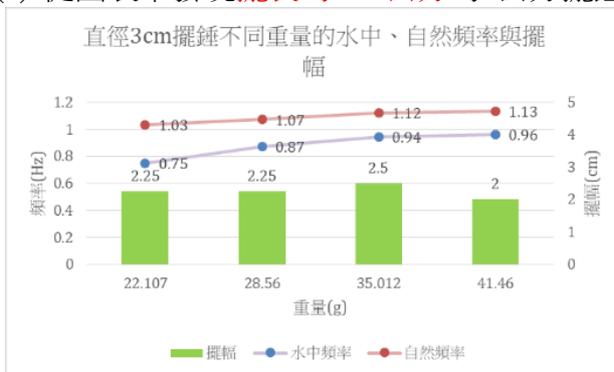


圖29實驗一之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

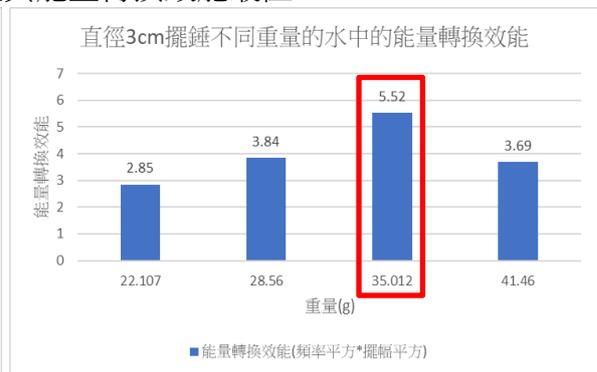
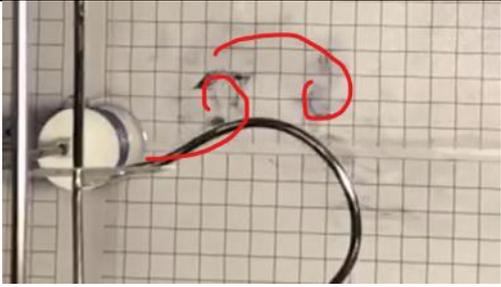
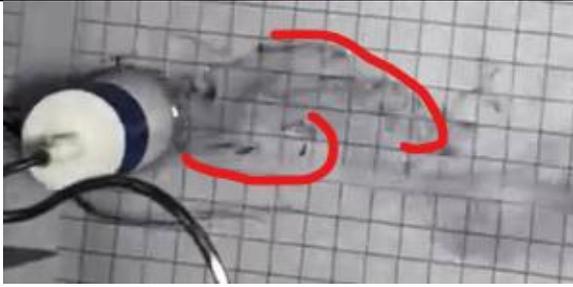


圖30實驗一之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖31(照片由第一作者拍攝) 擺垂質量35.012g	圖32(照片由第一作者拍攝) 擺錘質量41.46g

- (1) 3公分擺錘負載的**重量越重**，在水中的自然**擺動頻率略為提高**
- (2) 單擺總重於22至30克時擺幅無明顯差異，**總重為35克時**，擺幅為2公分波峰值
- (3) 3公分擺錘單擺得**擺幅越大**，渦流的**交錯現象越明顯**
- (4) 從圖表中發現**重量為約35克**的3公分擺錘其**能量轉換效能最為顯著**

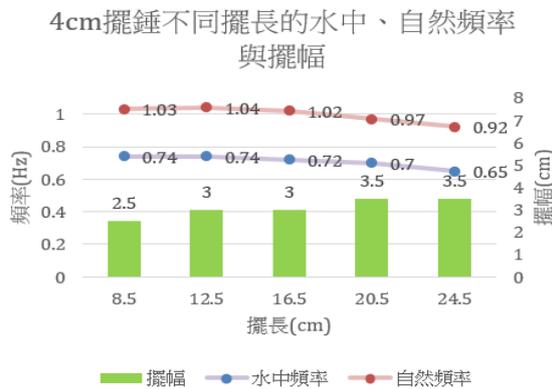


圖33實驗二之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

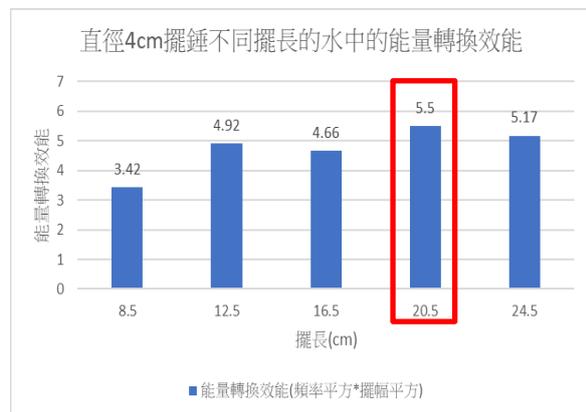
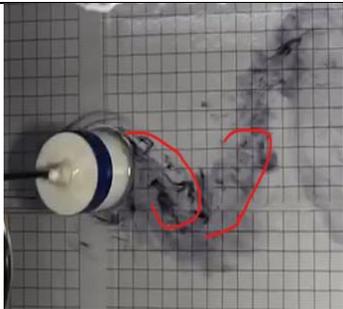
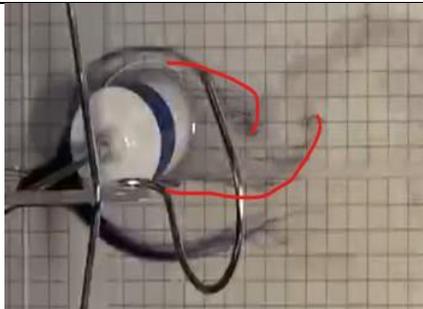


圖34實驗二之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖35(照片由第一作者拍攝) 擺長20.5cm	圖36(照片由第一作者拍攝) 擺長8.5cm

- (1) 4公分擺錘對應不同擺長在水中的頻率，為**擺長越長單擺的振動頻率有降低趨勢**。
- (2) 擺錘對應的**擺幅隨擺長上升之後增加**，並在20.5公分之後為最大值
- (3) 4公分擺錘單擺得**擺幅越大**，渦流的**交錯現象越明顯**
- (4) 從圖表中發現**擺長為20.5公分**的4公分擺錘其**能量轉換效能最為顯著**

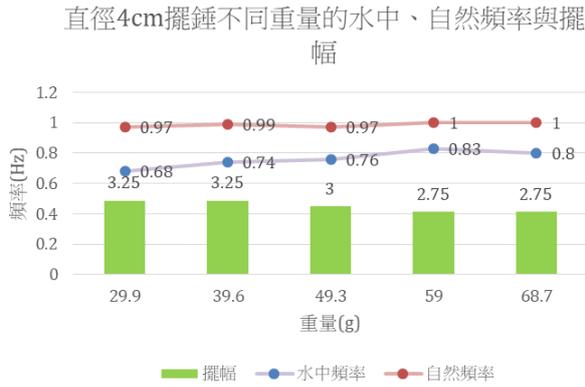


圖37實驗二之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

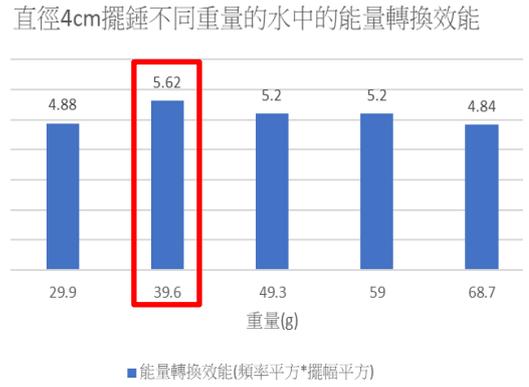


圖38實驗二之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
圖39 (照片由第一作者拍攝)	圖40 (照片由第一作者拍攝)
擺錘39.6g	擺錘68.7g

- (1) 4公分擺錘對應其單擺總重59克重量，在水中的擺盪頻率為所有重量變因中最高的。擺錘重量增加，頻率有升高趨勢
- (2) 4公分擺錘擺幅最大值在30-40克間最為顯著
- (3) 最大震幅時，對應的擺動頻率與改變擺長試驗中，最大擺幅所測得的範圍接近
- (4) 4公分擺錘單擺得擺幅越大，渦流的交錯現象越明顯
- (5) 從圖表中發現重量為約40克的4公分擺錘其能量轉換效能最為顯著



圖41實驗三之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

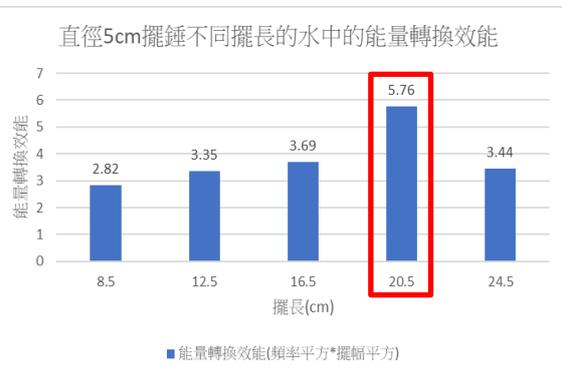
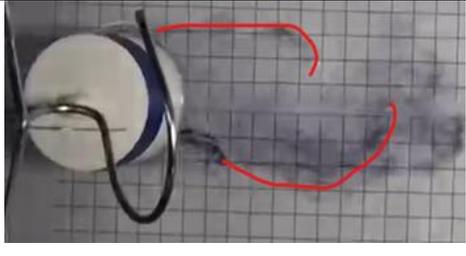


圖42實驗三之

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖43 (照片由第一作者拍攝) 擺長20.5cm	圖44 (照片由第一作者拍攝) 擺長12.5cm

- (1) 5公分擺錘在水中頻率波峰落在擺長16.5公分，且在空氣中的自然頻率隨擺長增加而頻率降低
- (2) 5公分擺錘在擺長20.5公分時，有明顯擺幅增大的情況
- (3) 取此數據最佳化條件為擺長20.5這組因其能量轉換效能最為顯著
- (4) 5公分擺錘單擺得擺幅越大，渦流的交錯現象越明顯

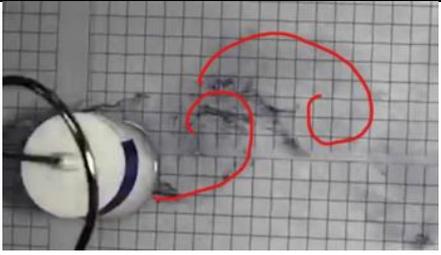
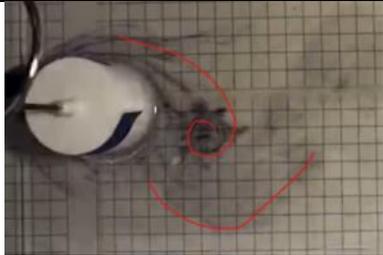


圖45 實驗三之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

圖46 實驗三之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖47 (照片由第一作者拍攝) 擺錘33.7g	圖48 (照片由第一作者拍攝) 擺錘43.3g

- (1) 5公分擺錘在不同單擺重的情況下，在水中的頻率隨重量的上升並無顯著變化，比自然頻率將了約0.36Hz。
- (2) 5公分擺錘在不同單擺重量下，在空氣中的自然擺動頻率在1上下，並無明顯起伏
- (3) 5公分擺錘如遇擺越重，其擺幅會減少
- (4) 5公分擺錘單擺得擺幅越大，渦流的交錯現象越明顯
- (5) 從圖表中發現重量為約34克的5公分擺錘其能量轉換效能最為顯著



圖49實驗四

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

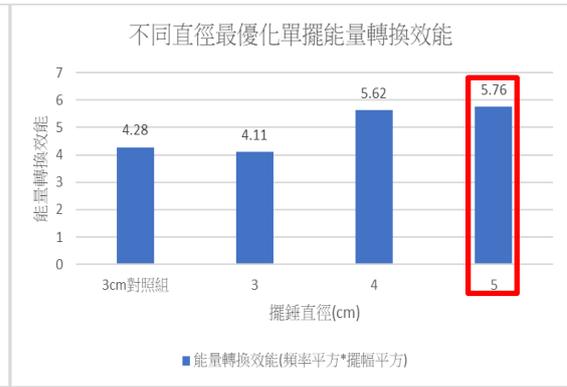


圖50實驗四

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

<p style="text-align: center;">渦流結構較紮實</p> <p style="text-align: center;">圖51(照片由第一作者拍攝)</p>	<p style="text-align: center;">渦流直徑較鬆散</p> <p style="text-align: center;">圖52(照片由第一作者拍攝)</p>
<p style="text-align: center;">擺錘直徑5cm</p>	<p style="text-align: center;">擺錘直徑3cm</p>

- 當擺錘直徑越大的時候，單擺在水中的擺幅越大，在三種擺錘直徑中擺幅最大者為5公分擺錘，其最大擺幅達到了4公分
- 當擺錘直徑越大的時候，單擺在水中的頻率會降低，在三種擺錘直徑中擺幅最大者為3公分擺錘，其頻率為0.92赫茲
- 3公分對照組(擺長12.5)與3公分實驗組並無擺幅的明顯差異，而頻率則稍微下降
- 從圖表中發現擺錘直徑為五公分時其能量轉換效能最為顯著

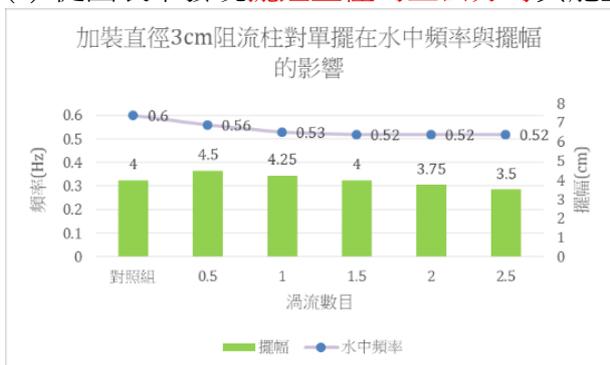


圖53實驗五之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

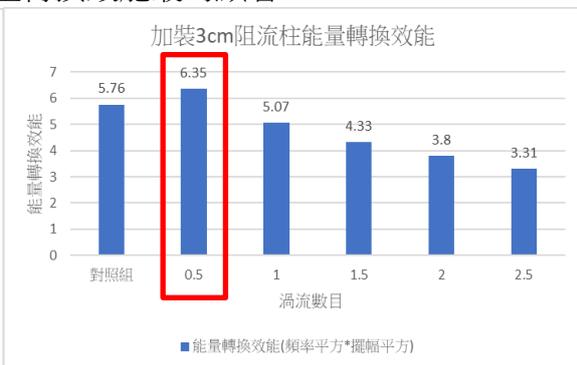
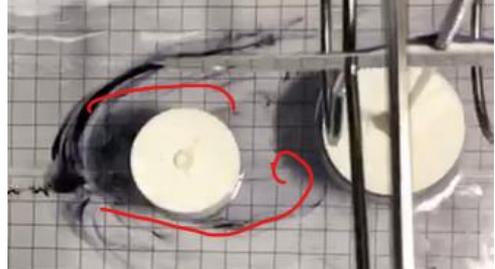


圖54實驗五之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

*註:對照組為直徑5cm優化單擺

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖55 (照片由第一作者拍攝)	圖56 (照片由第一作者拍攝)
阻流柱與測試擺間距為0.5個渦流長	阻流柱與測試擺間距為2個渦流長

- (1) 與對照組相比，頻率降低，並且當距離拉至1.5個渦流時，擺幅已與對照組相同，距離1.5個渦流後甚至出現擺幅較對照組較低的情況
- (2) 3公分阻流柱產生之渦流對5公分最優化擺錘擺幅影響為0.5個渦流最為顯著，隨著渦流數目的增加，擺幅也會隨之減少
- (3) 3公分阻流柱產生之渦流對5公分最優化擺錘水中頻率影響為1.5個渦流最為顯著
- (4) 當3公分阻流柱產生距離單擺0.5個渦流(最優條件)時，渦流的轉速以及圈數都比較快，導致單擺的擺幅較大以及頻率較大。
- (5) 從表中發現加裝3公分阻流柱後距0.5個渦流徑的5公分擺錘能量轉換效能最顯著

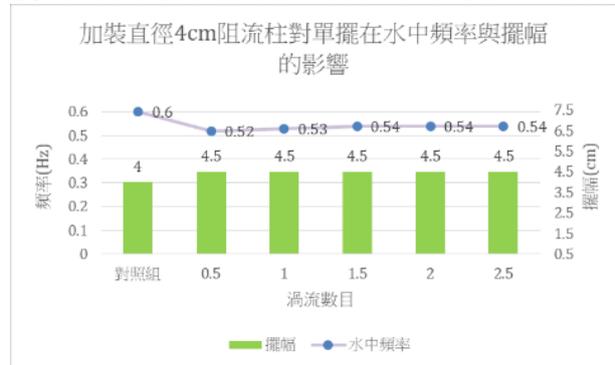


圖57實驗五之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

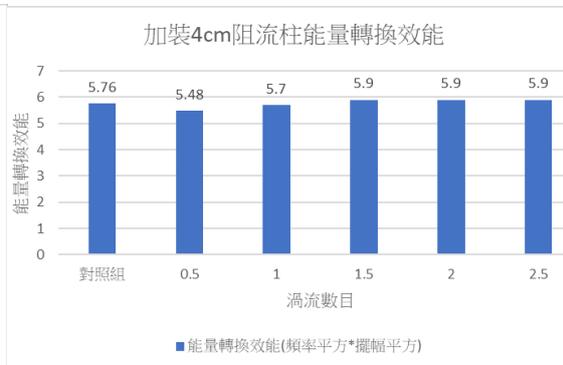
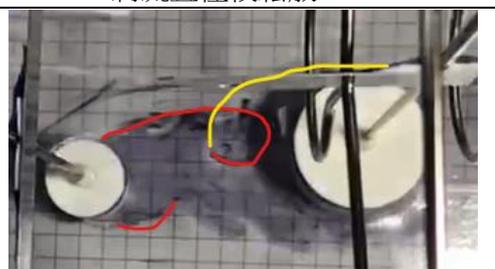


圖58實驗五之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

*註: 對照組為直徑5cm優化單擺

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖59 (照片由第一作者拍攝)	圖60 (照片由第一作者拍攝)
阻流柱與測試擺間距為0.5個渦流長	阻流柱與測試擺間距為2.5個渦流長

- (1) 相較於對照組，頻率雖然降低，但是擺幅皆有上升
- (2) 4公分阻流柱對產生之渦流對5公分最優化擺錘的擺幅影響具有增大效果，不過每個半個渦流所改變的值是趨近於零
- (3) 4公分阻流柱對5公分最優化擺錘的水中頻率影響為渦流數越多則水中的頻率增大

- (4) 當3公分阻流擺產生距離單擺2個渦流(最佳條件)時,恰好是兩個渦流的交集處,渦流的轉速較快以及圈數比較多,導致單擺的擺幅及頻率較大
- (5) 從表發現加裝4公分阻流柱後距離1.5個渦流徑的5公分擺錘能量轉換效能最顯著

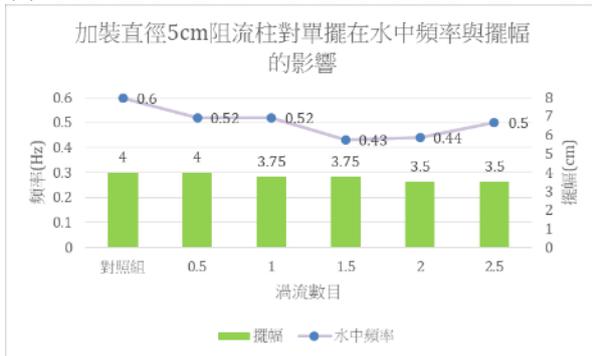


圖61實驗五之3

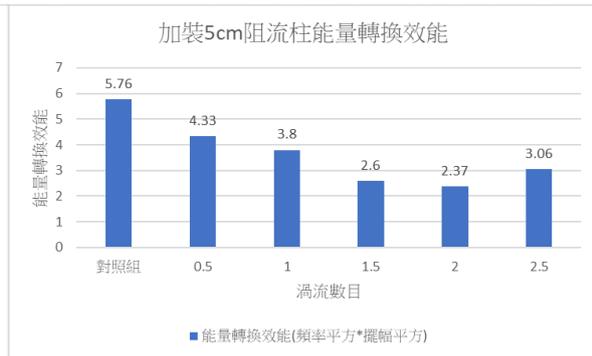


圖62實驗五之3

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

*註: 對照組為直徑5cm優化單擺

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
阻流柱與測試擺間距為0.5個渦流長	阻流柱與測試擺間距為2個渦流長

圖63 (照片由第一作者拍攝)

圖64 (照片由第一作者拍攝)

- (1) 與對照組比較, 加裝5公分阻流柱後頻率與擺幅都略為降低
- (2) 前阻流5公分柱對後5公分受測單擺的擺幅影響為0.5個渦流最為顯著
- (3) 幅影響為0.5個渦流最為顯著
- (4) 前阻流5公分柱對後5公分受測單擺在水中的頻率影響在0.5及1個渦流時測得的頻率最高, 在1.5個渦流時頻率降低, 每隔0.5個渦流測得的頻率逐次增高
- (5) 當5公分阻流柱產生距離單擺0.5個渦流(最優條件)時, 渦流的轉速以及圈數都比較快, 導致單擺的擺幅較大以及頻率較大, 又因距離較近, 因此阻流擺所產生的渦流在打到單擺之後所產生的渦流會繞回阻流擺, 讓阻流擺的擺幅比較大
- (6) 5公分阻流柱距離單擺2個渦流的時候, 雖然有產生渦流, 不過渦流的距離太遠
- (7) 從表發現加裝5公分阻流柱後距0.5個渦流徑的5公分擺錘能量轉換效能最顯著

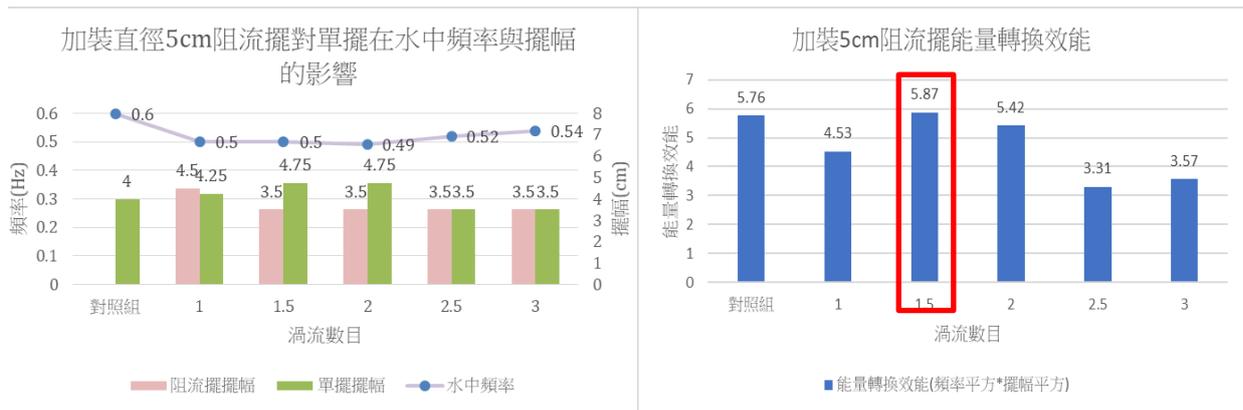


圖65實驗六之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

圖66實驗六之1

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

*註: 對照組為直徑5cm優化單擺

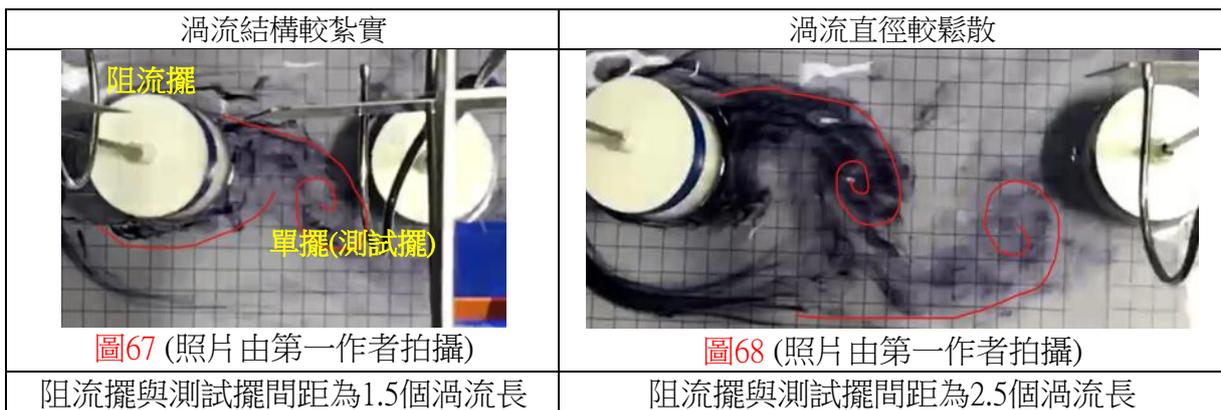


圖67 (照片由第一作者拍攝)

圖68 (照片由第一作者拍攝)

- (1) 與對照組相比頻率降低，在距離2.5個渦流前，擺幅都有明顯上升，而距離到了2.5個渦流以後，擺幅降低
- (2) 5公分阻流擺及後5公分受測單擺在距離1個渦流時會互相影響，除了阻流柱產生的渦流會使受測單擺，受測單擺同時也會將阻流擺的擺幅增加。在1.5及2個渦流間距時，受測單擺擺幅明顯比原擺幅還大，到了2.5個單擺，兩單擺逐漸沒有干涉
- (3) 5公分阻流擺和後5公分受測單擺在水中的頻率幾乎一致，隨兩單擺的距離拉開，在水中的頻率逐漸升高，回至原單擺在水中的擺盪頻率
- (4) 5公分阻流擺所產生的渦流在1.5個渦流時為渦流匯聚處，較能帶動單擺擺動
- (5) 從表發現加裝5公分阻流擺後距1.5個渦流徑的5公分擺錘其能量轉換效能最顯著

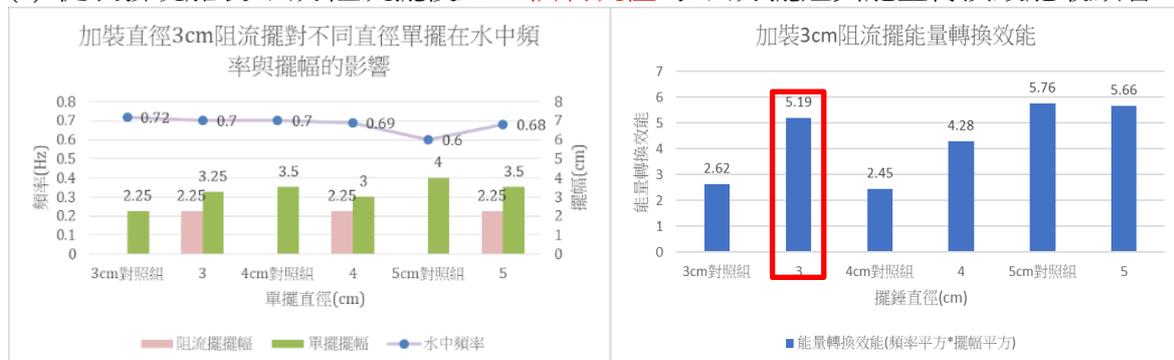


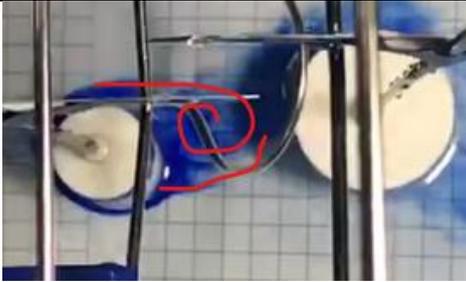
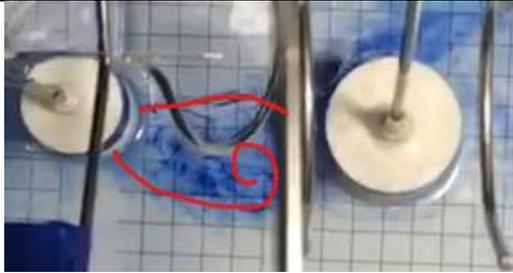
圖69實驗六之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

圖70實驗六之2

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

*註: 3、4、5cm對照組皆為該擺錘優化擺長

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖71 (照片由第一作者拍攝) 受測擺直徑為5cm時	圖72 (照片由第一作者拍攝) 受測擺直徑為4cm時

- (1)與對照組相比，各組頻率未有明顯改變，但除3公分擺錘擺幅增加外，其餘皆降低、3公分阻流擺對應後方5公分受測單擺擺幅最佳，其次是同為直徑3公分的擺錘
- (2)隨受測單擺直徑的增加，3公分阻流擺影響受測單擺在水中的頻率逐漸減少
- (3)因3公分渦流較小，因此渦流較容易打到受測單擺，進而將能量傳入受測單擺內部。受測單擺的擺幅也會比較多
- (4)從圖表中發現加裝3公分阻流擺後的5公分擺錘其能量轉換效能最為顯著

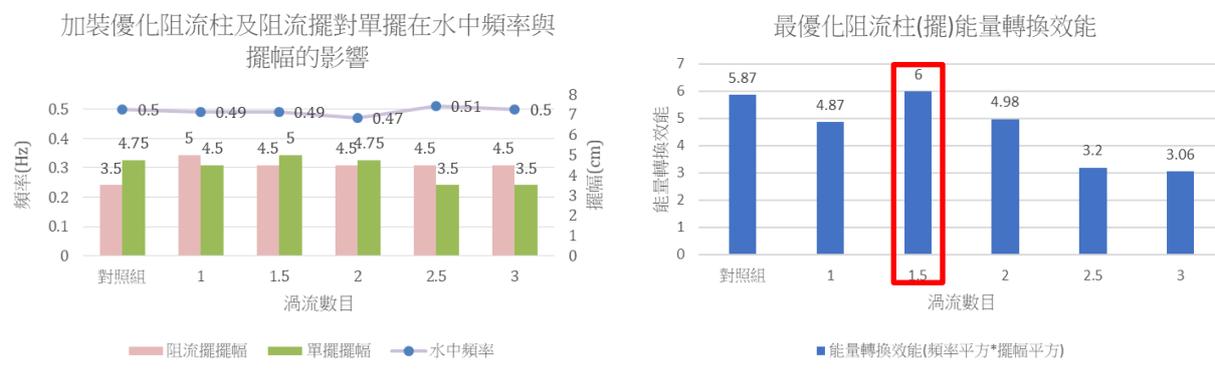
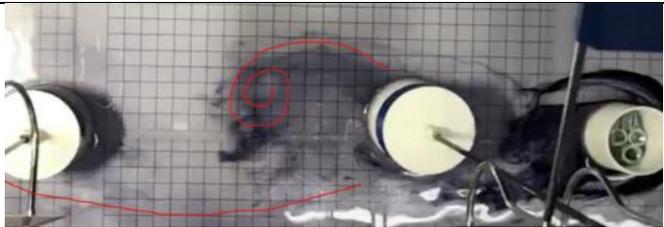


圖73實驗七

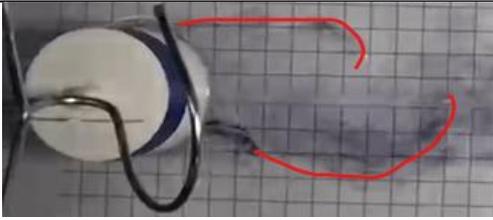
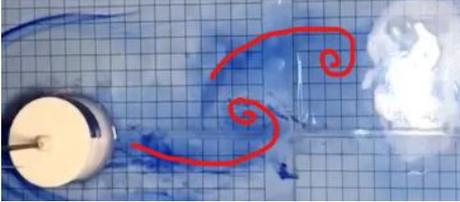
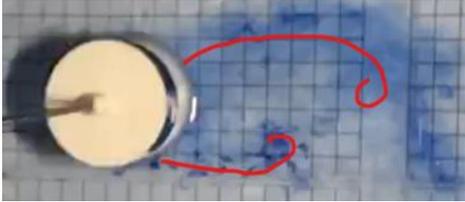
(圖片由第二作者由軟體excel製出)

圖74實驗七

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖75 (照片由第一作者拍攝) 阻流擺與測試擺間距為1.5個渦流長	圖76 (照片由第一作者拍攝) 阻流擺與測試擺間距為3個渦流長

- (1) 與對照組相比，頻率並無太大差異，在距離2個渦流前單擺擺幅都有增加，而距離2個渦流後則是減少的
- (2) 5公分受測單擺的振幅在距離阻流擺1.5個渦流時其擺幅最為顯著
- (3) 5公分受測單擺在水中的震盪頻率並沒有固定趨勢走向，波谷位於間距2個渦流的時候，其餘皆在0.5赫茲上下
- (4) 5公分阻流擺所產生的渦流在1.5個渦流時為渦流匯聚處，較能帶動單擺擺動
- (5) 從表發現加裝優化阻流柱(擺)後距1.5個渦流徑的5公分擺錘能量轉換效能最顯著

渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖77 (照片由第一作者拍攝) 擺長20.5cm	圖78 (照片由第一作者拍攝) 擺長12.5cm
流速:10cms	
渦流結構較紮實	渦流直徑較鬆散
	
圖79 (照片由第一作者拍攝) 擺長28.5cm	圖80 (照片由第一作者拍攝) 擺長16.5cm
流速:18cms	

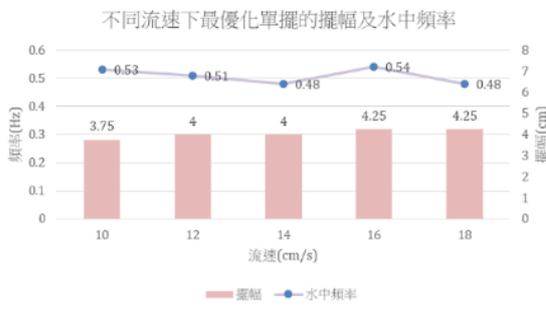


圖81 實驗八

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

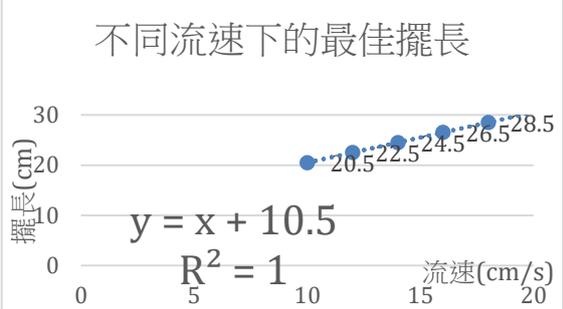


圖82 實驗八

(圖片由第二作者由軟體excel製出)

(1) 從圖表中得知，**水流速的增快**，產生最大擺幅的**優化擺長會逐漸地增加**，在測得最高流速時(18cm/s)測得的**最佳擺長為28.5公分**，流速與擺長變化呈現**線性關係遞增**。

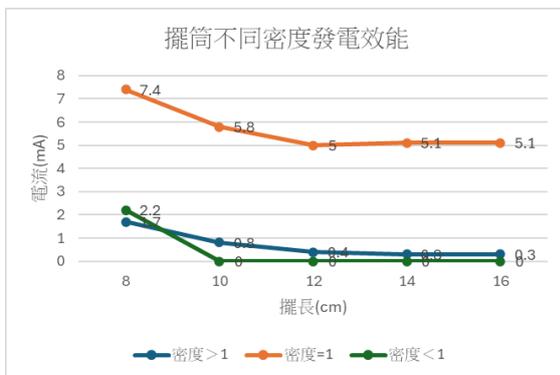


圖83 實驗九之1

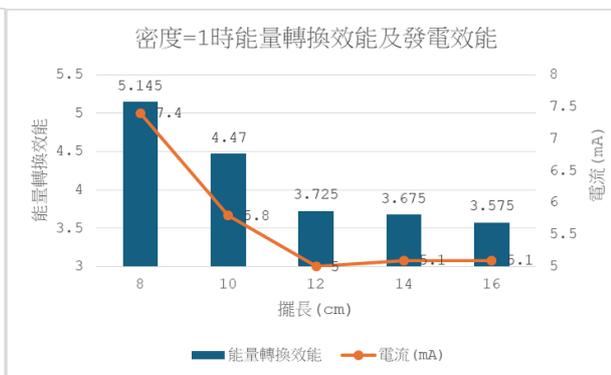


圖84 實驗九之1

(1) 從表中得知，擺筒**密度等於1**的擺盪式發電機所生電流較密度大於1及小於1突出

(2)從表中得知，擺筒密度等於1的產生電流在其擺長為8公分時為波峰值，其電流量為6.6毫安，在這之後產生電流量隨擺長上升而減弱

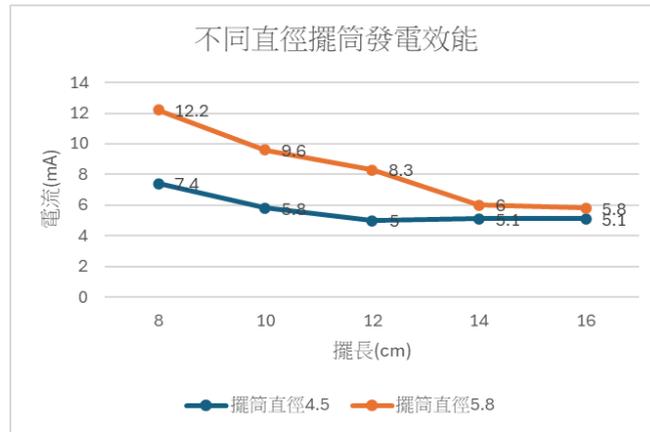


圖85實驗九之1(圖片由第二作者由軟體excel製出)

(1) 從表中得知，當擺筒的直徑越大，因接收能量越多，因此所生電流也較大，而在同樣擺長為8公分的情況下，其最大平均發電量到了12.2毫安

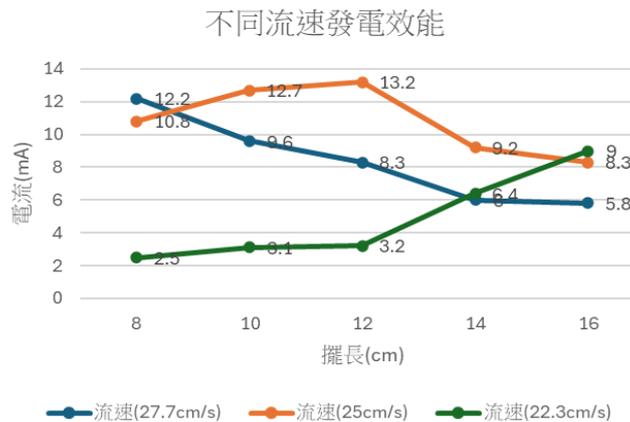


圖86實驗九之2-1(圖片由第二作者由軟體excel製出)

- (1) 從表中能發現各流速皆有一峰值，因是與該流速共振，且流速越高共振擺長越短
- (2) 由實驗得知最優化發電機的條件為擺筒直徑5.8公分，密度等於1且在流速每秒25公分的情況以擺長12公分擺盪，其最大平均發電量為13.2毫安

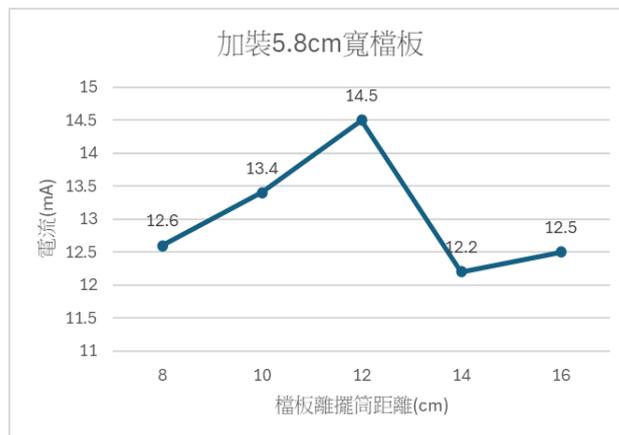


圖87實驗九之2-2(圖片由第二作者由軟體excel製出)

(1) 加裝與最佳化擺筒等高的檔板在擺長為12公分時其電流增幅最為明顯，較原最大平均電流大了1.3mA

伍、綜合討論

1.由文獻探討得知，物體受到外來作用力，會有能量傳入接收的現象；而這傳入的能量以不同的形式呈現，可能是物體運動狀態改變(動能)，可能是形變(彈力位能)，可能是高度改變(重力位能)，或者溫度提高(熱能)。單擺錘置入水中，擺錘因水流流動產生與水流方向不同(垂直)的擺動，很明顯擺動是由水流傳入能量所造成。

在先備試驗中發現，在固定流速下，要有一定條件(擺長、擺重、擺錘寬、擺錘在水中深度)的單擺才能發生擺盪；且只要條件改變，擺動的幅度頻率皆會發生變化；若流速改變，要出現最大擺幅與最快頻率的對應條件也會不同。

其次水流在通過圓柱時，水流前進方向會變成似力學波橫波一樣左右偏移，巨觀來看類似蛇擺。在流動水流當中常觀察到小渦流出現，小渦流會跟著水流方向左右偏移，一般渦流大多移動3到4個渦流直徑(渦流距)就消失。單擺出現顯著擺盪時，渦流直徑較大，呈現交錯對稱。在擺錘條件不同、是否擺動、流速不同時，水流擺動振幅及渦流大小、完整程度皆發生改變；在實驗過程中為觀察重點。

2.渦流的產生，由點墨法觀察可以確定，水流在通過擺錘表面時，左右兩側的水流速明顯不同，且在擺錘擺盪到最高點(投影最大振幅)時最為顯著(有影片確認)。依據白努利定律判斷，此時兩側速差最大，產生側壓力差也最大，形成反向作用力，單擺反向擺盪。此時兩側表面層流脫離擺錘表面，結合後因流速不同造成壓力差改變流向，由外側向內側(靠近擺盪平衡點一側)彎曲 形成渦流。渦流形成後會隨主水流擺向另一側。渦流產生與橫擺的頻率與單擺在水中擺盪的頻率相同。

由渦流的觀察可確認，水流單擺擺盪，與擺錘直徑、水流速關係密切。

3.在急流大水量條件下進行先備試驗，得知擺錘重量須達到一定標準才會發生擺盪現象，否則會出現漂擺及擺軸歪斜，無法正常擺盪，而過重也無法擺動，顯然有一個最優值的存在。另外也發現擺錘置入水中越深，擺動幅度越小，在先備試驗中，觀察到，擺錘底部沒入水中1cm效果最佳。推測可能與水流阻力增加有關，所以後面的正式操作皆以此為標準。由文獻得知，擺長會影響單擺自然擺動頻率，因此應該也會影響單擺在水流中的擺動。討論至此，我們確認以擺長、擺錘重、擺錘直徑、水流速作為探究水流單擺物理性質的操作變因。頻率(自然及水流擺動)、振幅、渦流觀察為應變因。由於在急流大水量條件下，擾流較多，渦流觀察不易，所以另外設計緩流淺水循

環進行相關試驗。而急流循環水缸則用於擺盪式發電機組變因測試。緩流擺盪頻率低擺盪慢，產生電流較弱(10uA以下)。

4.實驗一到實驗四，主要是比較在10cm/sec水流速下，分別改變單擺擺長、擺錘質量、擺錘直徑，造成擺錘水流擺盪頻率(渦流頻率)，擺幅及渦流型態變化。從渦流變化來看，水流頻率越快，不論渦流直徑大小，

渦流中心結構較為清晰完整，可以維持時間較久(時間約2-3個週期，移動約4到5個渦流距)；水流頻率慢，渦流較為鬆散，維持時間較短(時間約半個到1個週期，移動

約1到2個渦流距)。由此推論**渦流頻率快**，代表擺錘兩側流速差較大，水流因白努利效應產生的**推力也較大**。由力學角度看，水流對擺錘做功 ($E = F * S$)較大。振幅大，也代表水流做功大。

以投影法觀察擺錘擺盪所造成的直線簡諧運動，可以發現擺盪一次經過4個擺幅，若**頻率越快**，代表1sec內單擺所移動的路程量越大，也就是擺盪的**平均速率越快**。若以動能的角度思考， $E=1/2 * M * V^2$ ，動能大小與速率平方成比例，轉換方程式， $E=1/2 * M * X^2 / T^2$ ，動能與路程X(擺幅)平方成正比，與 $1/T$ (頻率)平方成正比。依此推論渦流擺盪，頻率快，擺幅大代表擺錘所獲得的動能較大，若以擺盪的方式進行發電的能量轉換，所得的電動勢(V)應該也是與擺盪頻率f平方成正比，與擺幅X平方成正比。此結果代表**要得到較好的發電效能，必需兼顧擺幅大，擺動頻率快。也許f*X可以作為電能轉換指標參數，值越高發電效能越佳**。單擺組合調整，可以朝頻率、擺幅提高思考。此一論述未考慮擺動時擺錘高度改變，重力位能變化的影響，主要是因為擺長長，擺角小，高度改變甚小，所以忽略其影響。

5.觀察實驗一到實驗四實驗結果比對，得知單擺自然頻率與**擺長**呈現負相關，與文獻所知趨勢一致。相同單擺，渦流擺盪頻率比自然頻率低(即擺動較慢)，推測可能在擺盪時，水流的阻尼效應較空氣顯著，擺錘受迫造成自然頻率發生改變。渦流擺盪頻率變化趨勢與自然頻率相同。

分別以**擺錘直徑** 3cm、4cm、5cm，進行擺長改變試驗，都有共同變化趨勢，即擺長變長，擺動頻率降低，擺幅變大；但是擺錘直徑3cm擺幅增加不顯著，幾乎相同。以**參數f*X比對擺長變長時**能量轉換效能變化趨勢，擺錘3cm大約是在1.62到1.67之間，相近。擺錘4cm大約是在1.85到2.28之間，效能提升。擺錘5cm大約是在1.68到1.86之間，效能提升。

進行擺錘**重量**不同測試，三種擺錘直徑表現除了5cm直徑以外，變化的趨勢也是相近，即擺錘變重，水流**擺動頻率均上升**(擺動變快)，可能是重量增加，克服水流阻力所造成。而直徑5cm擺錘，可能重量超過臨界值，質量變重，頻率是穩定不變，所以後續優化操作，5cm擺錘皆配重33.7g。沒有例外，**擺錘質量增加，擺幅均降低**。以能量轉換參數 $f*X$ 進行分析，質量增加3cm擺錘呈現效能提升的效果。(3cm 1.69-1.92)，

4cm呈現持平(2.2)，5cm呈現效能下降的效果(2.4-2.08)。推測原因應是重量增加擺幅下降較多所致。

進行擺錘直徑不同測試，根據實驗結果得知，擺錘直徑增加，擺動頻率會下降，根據圖形判斷，應有一次方線性關遞減，只是樣本只有三個變量，線性量化關係僅供參考。擺錘直徑增加，擺幅增加，且渦流徑亦增加。比對能量轉換參數 $f \cdot X$ 進行分析，3cm為2.70、而4cm及5cm均為2.4，轉換效能沒有顯著差異。

6.在單擺前方加裝阻留柱，阻流擺，主要是考慮到幾個效能，其一:阻留柱(擺)會消能可避免水流速過快，損壞發電裝置；其次阻流柱(擺)會造成渦流，若產生渦流可以被單擺接收，除了水流穩定，應可提升擺動效能，若用於發電組合，應可提升發電效能。實驗設計上，被測單擺擺放於阻流柱(擺)正後方，接收整流過後的渦流。

由實驗五結果得知，加阻流柱使單擺頻率降低，在3cm、4cm柱時，距離不同皆維持在0.52-0.54Hz之間，擺放位置會影響渦流組合，進而影響水流能量的傳遞。綜合觀察，距離0.5個渦流距時，擺幅多有提升，可能和距離近，渦流接合完整有關。而距離遠，擺幅多維持不變或些許下降，可能和阻流柱消能有關，而渦流接合的提升因距離遠加較少。整體而言，水流擺盪頻率降低，電能轉換參數 $f \cdot X$ 值均下降。

實驗六加裝阻流擺，當阻流擺與測試擺直徑相同(5cm)時，在1.5個渦流徑的距離時，渦流接合組合較為完整，此時擺動擺幅亦有所提升，在能量傳遞組合上效果良好；但是若換算電能轉換參數 $f \cdot X$ 值，則因水流擺動頻率降低，而未能進一步提升。加裝3cm直徑的阻流擺，三種直徑的單擺，可以看到擺動頻率下降較少，但是擺幅有顯著提升，整體而言電能轉換參數 $f \cdot X$ 值均有所上升。阻流擺的設置，由實驗結果判斷，阻流擺的直徑應稍小於被測擺，渦流組合較為完整，且擺盪頻率下降較少。(擺垂直徑短，頻率較高)

實驗七同時加裝阻流柱與阻流擺，測試時頻率略下降0.1Hz，且距離改變仍穩定維持在0.5Hz，在1.5個渦流徑的距離下，擺幅提升顯著；電能轉換參數 $f \cdot X$ 值，水流擺動頻率降低較少，但因擺幅上升較多，參數值稍有提升。(0.5個渦流徑因單擺裝置限制無法操作)。此一實驗觀察到，單擺距離和放置阻流柱時有一現象，即距離非完整波數 (0.5，1.5渦流距)，渦流接合效果較佳，擺幅有所提升。但如何減少頻率降低，藉以提升電能轉換參數 $f \cdot X$ 值，則是我們要進一步探究的問題。

7.實驗八，改變流速，測量5cm直徑單擺在發生最大擺幅(共振效應)時，觀察最優化的擺長變化，由實驗結果得知，流速越快，擺盪頻率變化不顯著(懷疑是否與擺長增加有關?原本預測流速快，頻率應該上升)，但是擺盪幅度增加。由電能轉換參數 $f \cdot X$ 值觀察，流速10cm/sec為1.98，流速16cm/sec為2.3，流速18cm/sec為2.1，流速高轉換效能有所提升。分析流速與相對擺長的應對關係，為一次方線性函數(遞增)，或許我們

可以利用此一性質，作為擺盪式發電機應對不同流速水流，可以調整擺長，達到最優發電效果。

8.擺盪式發電機組，在流速27.7cm/sec水流，擺筒直徑4.5cm、密度1.02g/cm³，擺長8cm，對應頻率1.47Hz，產生7.4mA的最大電流強度(10Ω)，當擺長改變為10cm，12cm，14cm，16cm時所測得電流均顯著較弱，配合擺幅的測量，確定在擺長8cm時擺盪機組與水流產生共振效果，且發電效果最佳。分別改用規格相同，以砝碼配重，造成擺筒密度大於水及小於水的情境，發現產生的感應電流均顯著下降，但是在8cm擺長時仍然測到最大電流強度(約1-3mA)；由此實驗得知擺筒密度並不影響裝置的自然振動頻率，發電效能的降低，應該是重力(D>1)及浮力(D<1)的作用，造成擺筒上下擺動的擺幅降低，使線圈磁通量變化降低，感應電流變弱。

9.將擺筒的直徑改為5.8cm進行測試，流速27.7cm/sec水流，在擺長8cm時，測到最大電流強度12.2mA(10Ω)，配合擺幅的測量，確認擺筒與水流產生共振效應，且所測到的共振頻率仍為1.47Hz。因為擺幅較直徑4.5cm的擺筒更大，線圈磁通量變化更顯著，產生的感應電流強度更大。

由此實驗得知，擺筒直徑不改變擺盪系統的自然振動頻率，但是會改變擺幅大小，推測是水流撞擊擺筒後，兩側表面水流速落差較大，依照白努利定律兩側的壓力差也會變大，使擺盪的作用力加大，擺幅加大。

但由前述單擺試驗得知，擺錘直徑變大造成擺動頻率降低，推測可能是流速較低(10/sec)造成渦流形成速率變化較顯著；而擺盪式發電組，可能因水流速高，擺筒直徑變化較小(1.3cm)，渦流形成速率變化不顯著，導致觀察到擺盪頻率未有變化(由單擺試驗得知，渦流形成頻率與擺筒擺盪頻率相同)。若流速較弱或直徑變化較大，應可測到頻率降低現象，**反之即可增加擺幅而頻率不降低。**

10.以擺筒直徑5.8cm進行流速變化測試，藉由調光器控制電流強度改變深水馬達功率，調整水流速。水流速25cm/sec，擺長12cm時測到最大電流強度為13.2mA(10Ω)，共振頻率為1.31Hz；水流速22.3cm/sec，擺長16cm時測到最大電流強度為9.0mA(10Ω)，共振頻率為1.19Hz；比較三種水流速實驗結果，水流速:共振頻率:擺筒擺長的對應變化量關係約為2.7cm/sec : 0.14Hz(平均) : 4cm。可以此為依據，偵測水流速，調整擺長造成發電裝置產生共振，達到最大發電功率。

水流速快對應的共振頻率高，對應的共振擺長較短；此一結果與前述單擺試驗似乎不相符合(流速變快，對應共振頻率變化不顯著，對應最優擺幅略變大，對應單擺長度變長)。除了實驗設計控制條件不同的影響，單以實驗結果比對，擺盪發電機組的結果可能更明確，也符合國中課程單擺實驗推論。而實驗中，水流速25cm/sec的發電最佳效能較27.7cm/sec為高，可能是擺長12cm的振動頻率更接近水流自然頻率(25cm/sec峰值)，而擺長8cm的振動頻率與水流自然頻率(27.7cm/sec峰值)差距略大。

11.滑動式發電組設計，是將原本水平放置上下擺盪的擺盪筒，改為直立放置固定在滑軌質塊上左右滑動。自然頻率調控由原本改變擺長長短，改為改變彈簧軟硬度。提升振幅的組流擋板則改為組流擺。初步數據因不夠完整，僅列於討論中做參考，完整數據將列於海報上。水圳表面流速經測量約60-70cm/sec，深度約50cm，上下層平均流速粗估約60cm/sec。壓克力管高度30cm，直徑

6cm。滑動壓克力管中央左右兩側均固定彈簧，以單位距離彈簧圈數來調控彈簧軟硬度。在水流速60cm/sec條件下，左右各6圈彈簧時，滑管滑動頻率(約2Hz)與振幅(10cm)均達到最大，是否達到共振有待進一步確認。因滑軌裝置因水流沖擊而導致歪斜鬆脫，滑軌摩擦力過大，無法再進行測量。需待裝置修整及水圳適合流速流量再進行操作。

以目前數據初估，每秒鐘衝擊滑管的水量約為10.8L，平均流速以0.6m/sec計算，每秒鐘水流衝擊的動能為1.94J；而擺柱加滑塊加磁鐵約0.6kg，平均擺速約0.8m/sec，換算成動能約每秒鐘0.192J，能量轉換效率約10%左右。轉換成電流約40-50mA(100Ω)。此結果僅供參考(有操作測量影片紀錄)。

陸、結論

1.在文獻探討中，我們發現動能公式為 $E=1/2*M*X^2*F^2$ ，動能與路程X(擺幅)和頻率F平方成正比，得知動能與擺幅和頻率都有係後，使用 $f*X$ 來換算我們的能量轉換效能。而實驗後觀測出的渦流則是越紮實，代表當單擺擺盪到最高點時擺錘兩側流速差越大，側壓力越大，形成反向作用力越大，擺幅越大。

2.在不同直徑擺錘中，擺長增加後，頻率降低而擺幅增加，唯獨直徑3公分擺錘擺幅無明顯變化，但能量轉換效能皆呈現成長趨勢。而渦流部分，擺長越長其交錯、蛇擺形狀越明顯，且渦流較紮實。

3.在不同直徑擺錘中，質量增加後3、4公分擺錘擺幅呈現下降趨勢，而頻率則有顯著增加，能量轉換效能皆為上升，而5公分擺錘頻率則無明顯變動，猜測是因重量超過臨界值。渦流部分重量越重，蛇擺越不明顯，且渦流較為鬆散。

4.不同直徑之擺錘，直徑較大時擺幅增加，頻率降低，經綜合後能量轉換效能並無明顯差異。直徑增加後，渦流之間間隔並無改變，但是渦流寬度皆呈現上升。

5.經過實驗一到四，歸納出在10cm/s中擺幅最佳的單擺為直徑5公分，重33.7克的擺錘，其渦流最大且紮實。

6.加裝不同直徑阻流柱後，發現在距離0.5個渦流徑時擺幅有較大提升，因距離較接近，渦流接合較完整，但是加裝阻流擺後因流速降低，頻率有下降。渦流部分發現，當渦流撞到後方擺錘，擺幅會較大，若是繞過擺錘則較小。

7.加裝5公分阻流擺後，距離1.5個渦流徑，後方同直徑單擺擺幅上升較顯著，但是頻率降低，綜合後能量轉換效能無明顯變動。而加裝3公分阻流擺擺幅皆有上升且頻率並無削減太多，綜合後能量轉換效能提升。渦流部分，到了2.5個渦流後就已無明顯影響。

8.同時加裝阻流柱與阻流擺時，頻率雖同樣下降，但距離不同個數渦流徑對頻率影響不大。另外，在距離1.5個渦流徑時為渦流匯集處，能量較為集中，擺幅最大，與頻率綜合後能量轉換效能提升。

9.流速上升的情況，各流速優化單擺頻率無顯著變化但擺幅有逐漸增加，綜合比對後能量轉換效能增加。在緩流單擺測試中，分析流速與對應優化擺長(動能轉化)有一次方線性函數： $y(\text{流速})=x(\text{擺長})+10.5$ 。若得知流速與發電機組擺長的對應關係，未來將可以應對不同流速改變擺長，達到最加發電效能

10.擺盪式發電裝置可藉由擺長調控對應特定水流速共振頻率達成最佳發電效能；擺筒密度需接近水密度，避免浮力與重力干擾；在一定範圍內擺筒直徑增加，可增加擺幅大小且頻率不會下降，提升發電效能。

11.擺盪式發電組對應較高流速，擺長調短，在較高的頻率達成共振。流速27.7cm/sec，擺長8cm，電流強度12.2mA(10Ω)，共振頻率為1.47Hz。水流速25cm/sec，擺長12cm，電流強度為13.2mA(10Ω)，共振頻率為1.31Hz；水流速22.3cm/sec，擺長16cm，電流強度為9.0mA(10Ω)，共振頻率為1.19Hz。

水流速:共振f:擺筒擺長 的對應變化量為2.7cm/sec : 0.14Hz : 4cm

柒、參考資料及其他

一、劉邦彥 黃子嘉 林義傑 (2016) 追風逐電-無扇葉型風力發電機

中華民國第56屆中小學科學展覽會

二、鐘胤展 鐘可恩 鐘若欣 (2020) 神鰭魔力“渦”最行?!

中華民國第60屆中小學科學展覽會

三、蔡立群 謝靚樺 李彥均 (2021) 鰭門遁水-仿生於鰭魚船隻航行上的應用與探究

中華民國第61屆中小學科學展覽會

四、周御翔 楊鈞凱 李彥辰 (2023) 搖頭擺尾-以仿生形式探究魴魚精子鞭毛螺旋的

運動模式111學年度新北市中小學科學展覽會

五、陳郁煊 廖芟秀 陳俊融 (2019) 震震有池-水塔阻尼器設計與減震效能探討

中華民國第59屆中小學科學展覽會

【評語】 030113

本作品探討穩定水流中單擺擺盪發電的各種變因，試圖找出最佳的發電條件，變數甚多，是個不容易探究的實驗，作者最後在其選定的變因參數範圍內探討出最佳的發電參數值。本作品主要利用卡門渦街效應來發電，雖非新意，但若能再加強探討這些最佳發電參數值其背後的物理原因，以及如何將其實驗結果歸結出較一般化的結論及建議，將會對綠能的發展有較大的貢獻。

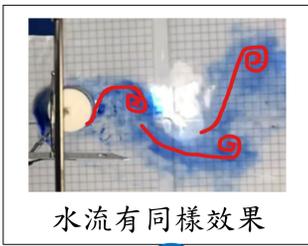
作品簡報

流擺能生

探究穩定水流中單擺擺盪機制與發電應用評估



國旗在空氣中左右擺盪



水流有同樣效果

為何會擺盪？
有哪些變因影響？



物理調控
水動能轉換為電能

發電優勢：

1. 在不同流速調控擺盪物理機制達最佳發電效能
2. 溪流進行微型發電，亦可放大進行洋流發電；環境副作用較小

1

2

3

4

5

貳、研究目的

- 一、探究在特定流速下，分別改變單擺擺長、擺錘質量、擺錘直徑，觀察單擺、頻率、擺動動能與渦流的變化。
- 二、加裝阻流柱，分別改變阻流柱直徑與阻流柱和單擺的距離，觀察優化單擺擺幅、頻率、擺動動能與渦流的變化趨勢。
- 三、加裝阻流擺，以不同直徑擺錘的受測單擺進行組合，觀察受測單擺在距離改變擺幅、頻率、擺動動能與渦流的變化趨勢。
- 四、受測單擺前加裝優化阻流柱(擺)，以不同直徑擺錘的受測單擺在距離改變時，觀察擺幅、頻率與擺動動能與渦流的變化。
- 五、改變水流速，觀察單擺擺幅、頻率、擺動動能與產生渦流的變化趨勢，測量最大對應擺長。
- 六、建構垂直擺盪發電裝置，探究在特定流速改變擺長、擺筒密度、擺筒直徑、阻流檔板距離，對發電效能的影響並找出對應優化發電條件。
- 七、改變流速，檢測垂直擺盪發電裝置效能，找出發電裝置的對應擺長、共振頻率作建構發電效能調控及雙擺組合發電參數基礎。
- 八、水圳測試，改變水平擺盪發電裝置與阻流物距離，並測定擺筒動能變化。

參、研究方法

第一部分-單擺測試



擺長 質量 擺錘直徑 阻流物

第二部分-垂直擺盪發電

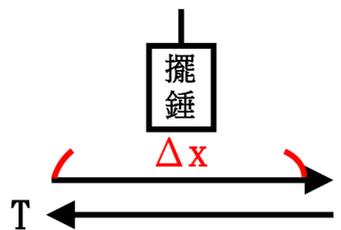


密度 擺筒直徑 擺長 擺筒與阻流物距離

第三部分-水圳測試



肆、裝置設置、分析方法與研究結果



變因探討- 能量轉換指數計方法

$$\text{動能公式 } E = 1/2 * M * V^2$$

$$V^2 = (2 \Delta x / T)^2 = (2 \Delta x * f)^2$$

以 $(\Delta x * f)^2$
作為能量轉換指數

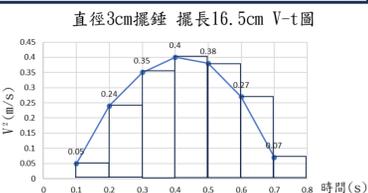


圖8 平均動能分析示意圖
長條圖總面積/總時間
=平均動能(M/2為常數)

變因觀察- 動能計算及分析比對

利用追蹤軟體tracker
分析單擺擺盪趨勢

製作v²-t圖
換算平均動能

與 $(\Delta x * f)^2$ 方式推算
所得動能值相近

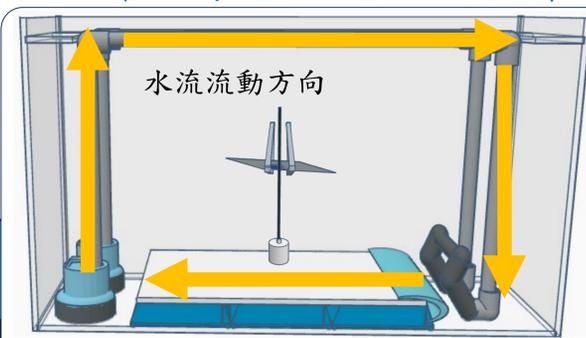


圖1-1、1-2
緩流水缸設計圖、
完成圖

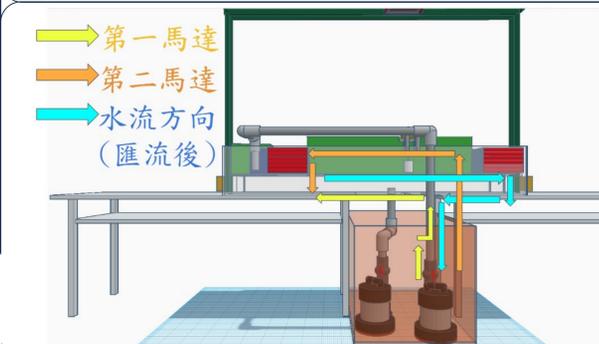


圖2-1、2-2
急流水缸設計圖、
完成圖

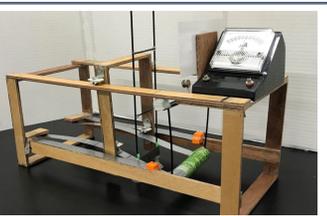
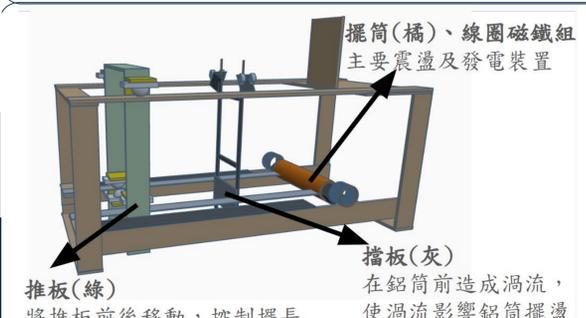


圖3-1、3-2
垂直擺盪發電裝置設計圖、
完成圖

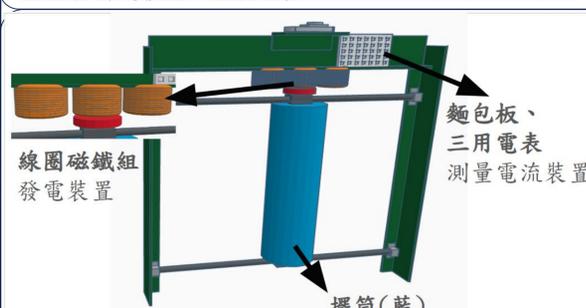


圖4-1、4-2
水平擺盪發電裝置設計圖、
完成圖

實驗步驟

1. 開啟馬達，使水流循環
2. 將單擺(發電機)擺放至固定測試位置上
3. 待擺盪穩定之後測量各應變變因

變因觀察-頻率測量

1. 測單擺擺盪10次的總時間(T)
2. 將10/T，得出頻率(f)



圖5 碼表測量示意圖

變因觀察-擺幅測量

1. 用雷射筆垂直打入水中
2. 查看單擺擺盪最大格數(Δx)

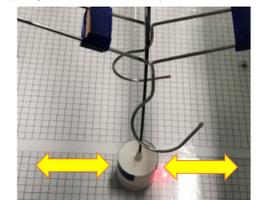


圖6 擺幅測量示意圖

變因觀察-渦流觀察

1. 在單擺前加入水性染劑
2. 慢動作觀察渦流大小及變化

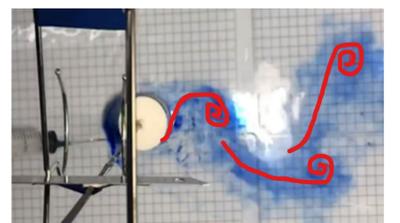
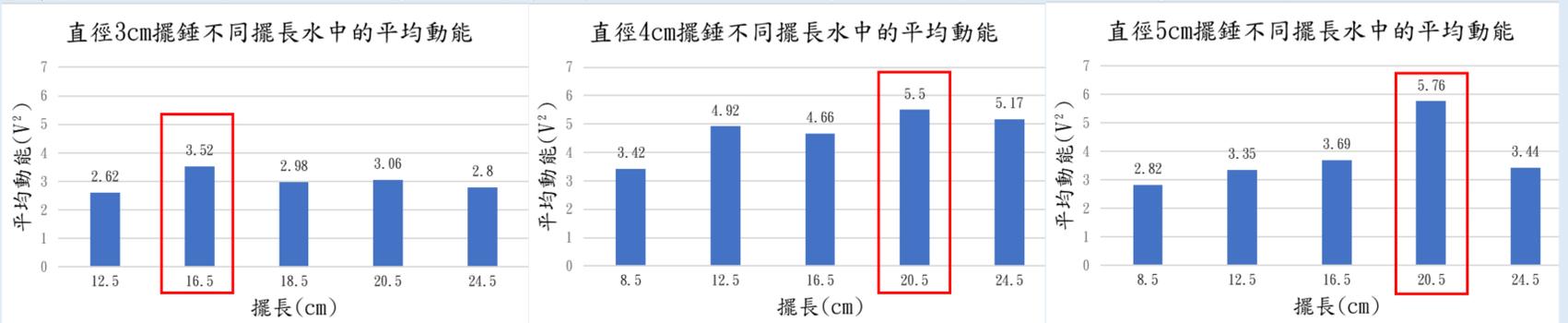


圖7 渦流示意圖

◎實驗1結果 擺長增加頻率降低、擺幅增加，平均動能有一極值



- 討論：
1. 不同直徑擺錘，擺長增加後頻率降低而擺幅增加，直徑3公分擺錘擺幅無明顯變化，但能量轉換效能皆呈現成長趨勢。而渦流部分，擺長越長其交錯越明顯，且渦流紮實。
 2. 從3個直徑擺錘發現有趨勢，皆有一峰值，猜測是因擺錘與水流產生共振現象。

◎實驗2結果 質量增加後擺幅降低、頻率增加，平均動能有一極值

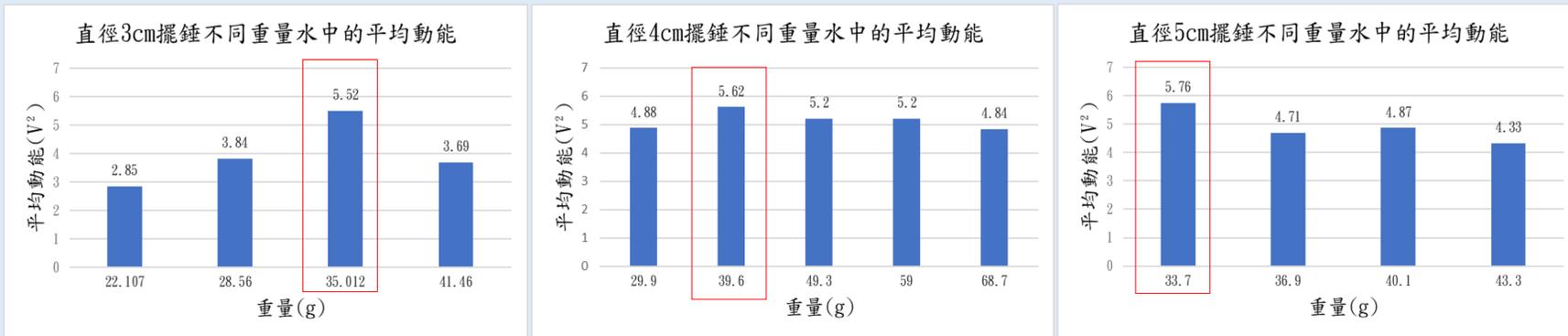


圖10-1, 10-2, 10-3 不同質量擺錘平均動能

討論:

1. 質量增加後擺幅下降、頻率增加，**能量轉換效能有一極值**。渦流部分，重量越重，蛇擺越不明顯，且渦流較鬆散
2. 猜測增加質量後，重心往下，與擺長增加同樣效果，因此頻率增加。

◎實驗3結果 直徑增加後擺幅增加、頻率降低，平均動能增加

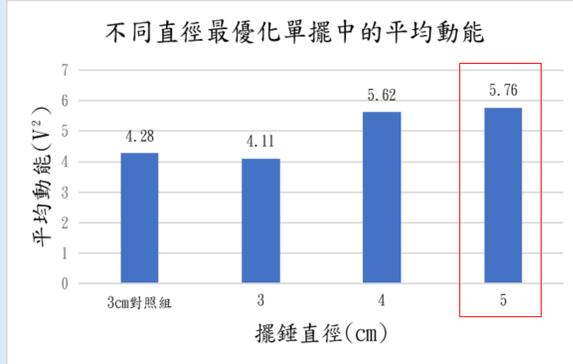


圖11 不同直徑最優化單擺平均動能

討論:

1. 直徑增加時擺幅增加，頻率降低，**能量轉換指數增加**。直徑增加後，是**渦流寬度上升**。
2. 據圖表判斷，不同直徑頻率 與擺幅應有一次方線性關係，但樣本過少線性關係僅供參考。

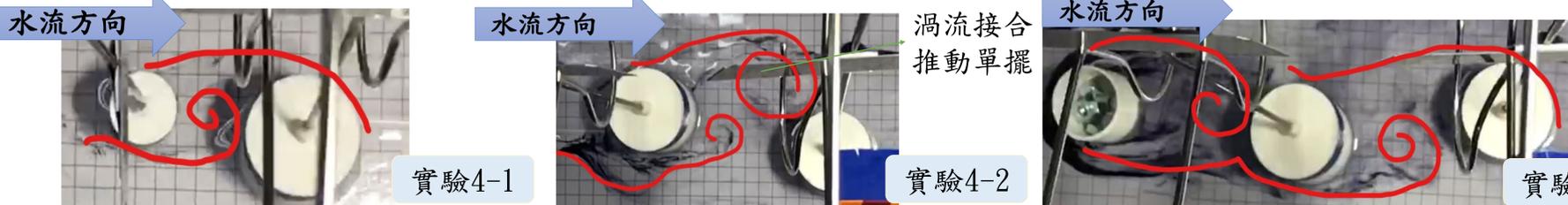


圖12-1 加裝阻流柱動能最大時渦流圖 圖12-2加裝阻流擺動能最大時渦流圖 圖12-3加裝優化阻流柱及阻流擺動能最大時渦流圖

◎實驗4-1結果 加裝阻流柱後與單擺距離0.5和1.5個渦流徑時平均動能最大

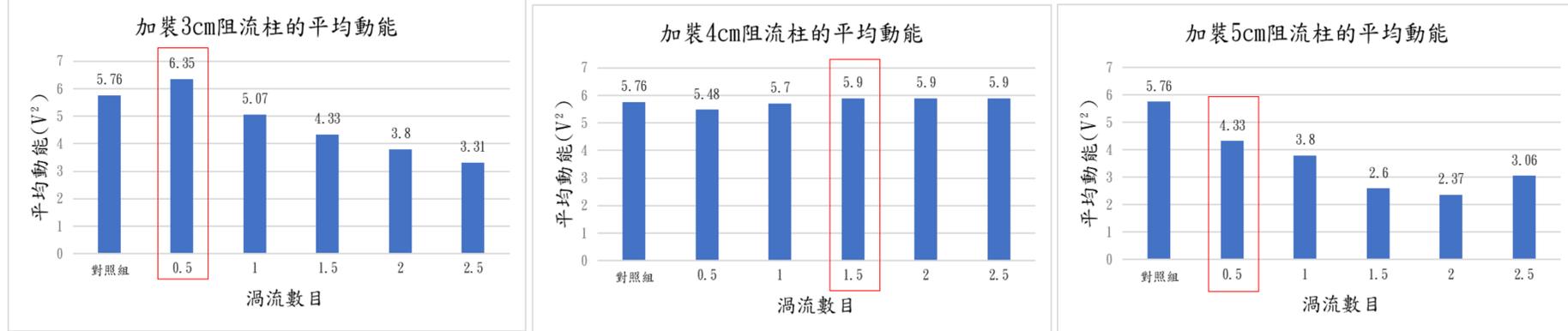


圖13-1, 13-2, 13-3 加裝不同直徑阻流柱後平均動能

討論:

1. 加裝直徑3公分阻流柱在距離**半個渦流徑**時擺幅有較大提升，但加裝阻流擺後頻率有下降。當渦流撞到後方擺錘，擺幅會較大。
2. 實驗發現在**0.5個渦流徑**時擺幅較大，猜測是因距離近，**渦流接合較完整**。而距離較遠猜測是因阻流柱使水流速下降，且渦流已漸漸消散而造成擺幅不變或下降。

◎實驗4-2結果 加裝阻流擺後與單擺距離1.5個渦流徑時平均動能最大

◎實驗4-3結果 加裝優化組合阻流柱及阻流擺後與單擺距離1.5個渦流徑時平均動能最大

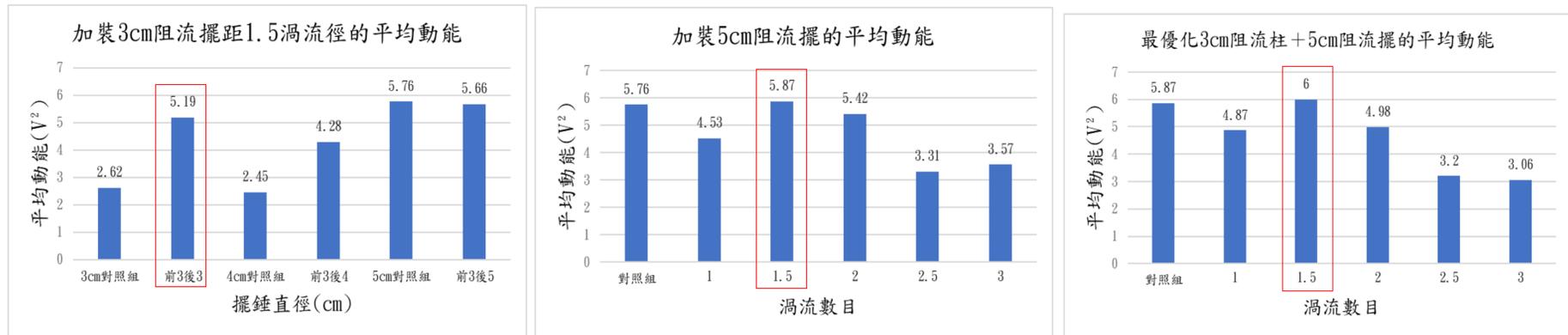


圖14-1, 14-2加裝不同直徑阻流擺後平均動能

圖15加裝優化組合阻流柱及阻流擺後平均動能

4-2討論:

1. 加裝3公分阻流擺後方3、4公分直徑單擺擺幅上升且頻率並無削減，且阻流擺與受測擺直徑相同時平均動能上升最明顯，加裝5公分阻流擺後，**距離1.5個渦流徑**，但頻率降低，能量轉換指數增加。渦流則到了**2.5個渦流徑後就已無明顯影響**。
2. 加裝5公分阻流擺(直徑與後方受測擺相同)在1.5個渦流徑時擺幅較大，猜測是因渦流接合完整，能量傳遞效果佳。

4-3討論:

1. 與對照組相比，頻率並無太大差異，在**距離2個渦流前單擺擺幅都有增加**，距離1.5個渦流徑時，能量轉換指數最大。
2. 在1.5個渦流徑時擺幅較大，猜測是因渦流接合完整，能量傳遞效果佳。

◎實驗7結果 流速上升，優化擺長長度增加

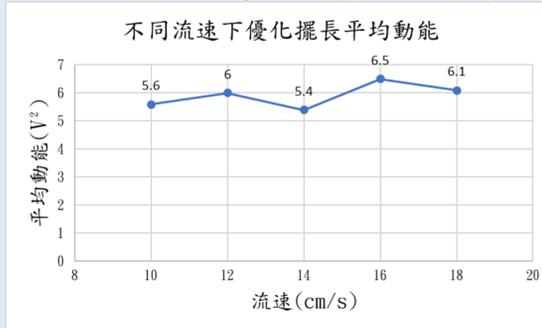


圖16 不同流速下頻率、擺幅

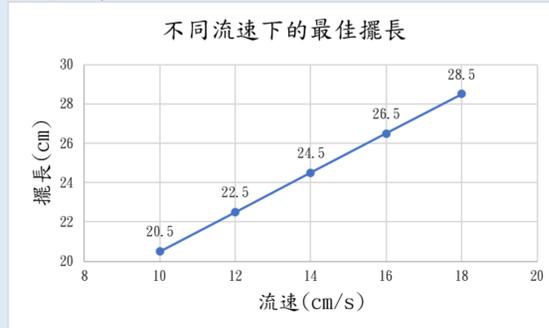


圖17 不同流速下擺幅最大擺長

討論:

1. 流速上升，各流速優化單擺頻率無顯著變化但擺幅及平均動能增加。分析**流速與其優化擺長關係為一次方線性函數**: $y(\text{流速})=x(\text{擺長})+10.5$ 。不同流速優化擺長渦流的共通點為渦流較扎實且交錯，蛇擺圖形明顯。
2. 在各流速優化單擺頻率無顯著變化，猜測是因其擺長不同而導致。**不同流速下有線性關係**，能以此性質，使垂直擺盪發電裝置對不同水流速調整擺長，達到最佳發電效果。

◎實驗8結果 擺筒密度=1時電流最強。

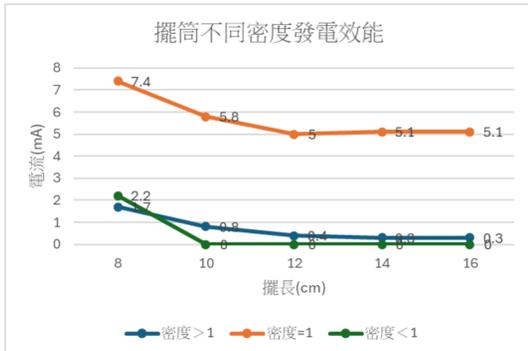


圖18 擺筒不同密度下發電效能

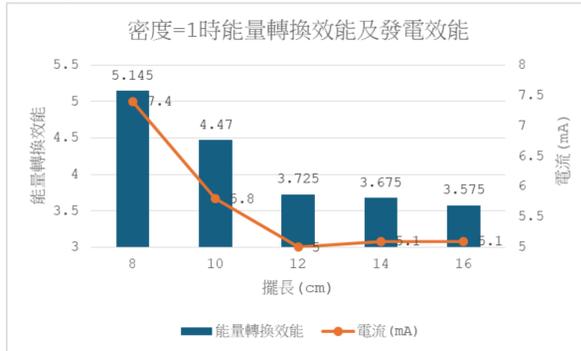


圖19 密度=1時的平均動能

討論:

1. 擺筒密度等於1的產生電流在其擺長為8公分時為波峰值
2. 發電效能的降低，應該是**重力(D>1)及浮力(D<1)**的作用，造成擺筒上下擺動的擺幅降低，使線圈磁通量變化降低，感應電流變弱

◎實驗9 擺筒直徑較大，電流較強

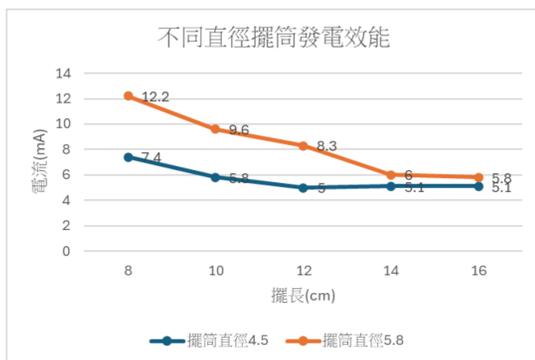


圖20 不同擺筒直徑的發電效能

◎實驗10 擺筒前加裝擋板，電流皆有增強

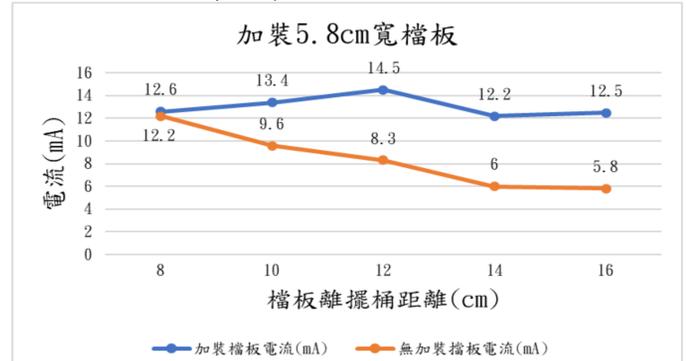


圖21 擋板與擺筒距離不同的發電效能

討論:

1. 擺筒直徑不改變擺盪系統的振動頻率，但是會**改變擺幅大小**，推測是水流撞擊擺筒後，兩側表面**水流速度差較大**，使擺盪的作用力及擺幅加大。

討論:

1. 加裝與最佳化擺筒等高的擋板在擺長為**12公分**時，因**位距1.5渦流徑**位置，其電流增幅最為明顯。

◎實驗11結果 流速越高共振擺長越短

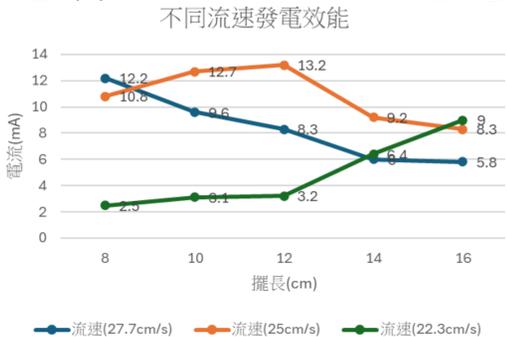


圖22 不同流速下的發電效能

討論:

1. 各流速皆有一峰值，因是與該流速共振，且**流速越高共振擺長越短**
2. 最優化發電機的條件為擺筒直徑5.8公分，**密度等於1**且在流速**每秒25公分**的情況以擺長12公分擺盪，其最大平均發電量為13.2毫安
3. 比較三種水流速實驗結果，水流速:共振頻率:擺長的對應變化量關係約為**2.7cm/sec : 0.14Hz(平均) : 4cm**。

◎實驗12結果 擺筒距離阻流物60公分處動能最大

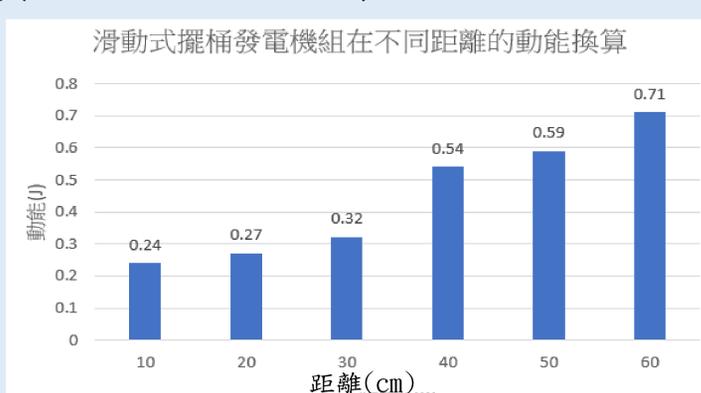


圖23 擺筒距離阻流物距離不同的平均動能

討論:

1. 操作過程中觀察到顯著且規律的簡諧運動，以擺幅中段**速率較快區段**作為線圈裝置區域。
2. 實驗後發現當發電機組距離組流柱**60公分**時，擺動幅度與速率顯著變大變快，所測得動能最大。估計應與**渦流徑比例**相關(約40公分，1.5倍)

伍、結論

1. 經過實驗一到四，歸納出在10cm/s中**擺幅最佳**的單擺為直徑5公分，重33.7克的擺錘，其**渦流最大且紮實**。
2. 加裝不同直徑阻流柱或阻流擺後，發現在**距離半個渦流徑**時擺幅有較大提升，因距離較接近，**渦流接合較完整**
3. 垂直擺盪發電裝置可藉由**調控擺長**，**阻流體距離**對應特定水流速共振頻率或對應渦流增加擺幅達成最佳發電效能；**擺筒密度需接近水密度**，避免浮力與重力干擾；在一定範圍內**擺筒直徑增加**，可增加擺幅以提升發電效能。
4. 垂直擺盪發電裝置對應水流速調整擺長，其對應變化量比例為**水流速2.7cm/sec : 頻率0.14Hz(平均) : 擺長4cm**
5. 平行擺盪發電裝置與阻流物距離60公分_1.5個渦流徑時動能最大，一個渦流徑約為40公分