

# 2024 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

## 普高組 成果報告表單

### 題目名稱：環環相扣——半渦環結構與行進狀態探討

#### 一、摘要

以盤子於水面上撥動時形成半渦環(Semi-Vortex Ring)。本研究通過量化半渦環的施力裝置及半渦環的位置，探討半渦環特性與穩定性，為半渦環的形成機制以及不同條件下的行為提供推測與實驗性結果。

#### 二、探究題目與動機

以圓盤於水面上撥動時將產生成對渦旋並行前進，而渦旋水底下流體將按照規律的軌跡旋轉，連接兩個成對旋轉的渦旋，形成半渦環(Semi-Vortex Ring)。據研究，半渦環具穩定儲存能量與減少能量損失的特性，使其可持續保持結構。我們對於半渦環此特性深感好奇，期盼量化半渦環的起始狀態與環境設置，探討運動特性與規律，啟發更多應用。

#### 三、探究目的與假設

- (一) 觀察半渦環結構。
- (二) 研究深度對半渦環前進狀態與穩定性影響。
- (三) 研究施力量值大小對半渦環前進狀態與穩定性影響。

#### 四、探究方法與驗證步驟

##### (一) 文獻探討:

1. 渦環：渦旋環是流體中的環形渦旋，其內部流體圍繞假想的閉環軸線旋轉。
2. 半渦環：

以盤子在水面上撥動時產生，表面成對渦旋並行前進，水下流體按規律軌跡旋轉，連接兩個成對渦旋。

##### (二) 半渦環於水中的結構觀察

##### 1. 方法：

手持光碟片在水面上推動，以形成半渦環。對準半渦環在水面呈現的成對渦旋（圖一與圖二）滴入顏料。錄影並紀錄水中擴散的情形（圖三）。



圖一水面上之雙渦旋圖



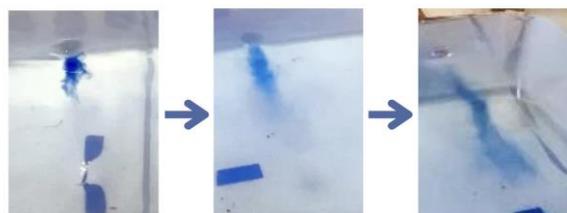
圖二 雙渦旋凹下處側視圖



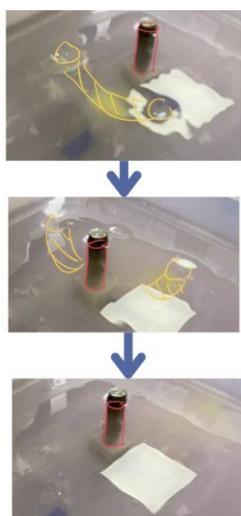
圖三 染色分析示意圖

另外，於水中添加柱狀障礙物，觀察障礙物對於半渦環狀態的影響。

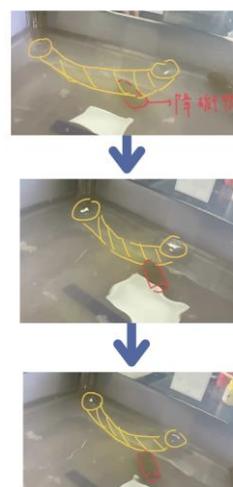
2. 結果與現象：



圖四 染色分析結果



圖五 大型障礙物破壞半渦環



圖六 小型障礙物破壞半渦環

數據說明：

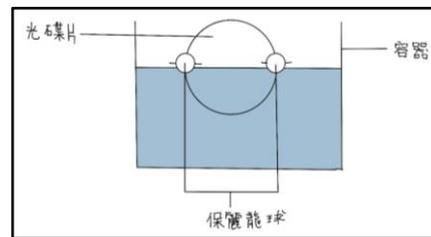
顏料在水中沿著特定軌跡連接兩個渦旋。由許多個獨立的環組成，非螺旋狀態，如圖四。半渦環遇柱狀障礙物而破壞時，若障礙物接觸半渦環面積大（如圖五），半渦環將形成兩個直立的渦旋後消失；而若障礙物較小，半渦環可恢復為原本完整的半渦環，繼續前行（如圖六）。

半渦環在經過水面下的圓柱後，會使撞擊到圓柱的水減速，而未受阻的水繼續前進。因此通過圓柱後的瞬間，若底部的水體能夠透過其自身的能量帶動被阻礙的水體轉動，則半渦環可恢復原始形狀；反之，如果半渦環被分割成兩部分，由於旋轉水體內部的壓力小於外部靜止水體的壓力，這兩部分分開的半渦環會形成兩個直立的漩渦，然後迅速消散。

### (三) 半渦環前進軌跡與狀態的分析

#### 1. 量化半渦環驅動的裝置設計

以電力作驅動動力，以半徑 0.90cm 保麗龍球放於圓盤二側（如圖八）。在半渦環形成時，保麗龍球吸附於水面上兩渦旋凹下處，隨之移動。此外保麗龍球兩側插入長度 0.25 cm 竹籤作為觀察轉動之轉軸（圖七）。

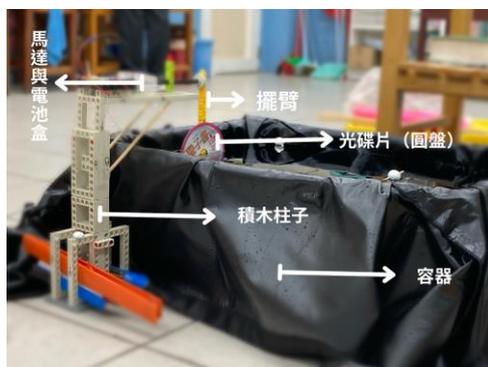


圖七 轉軸示意圖(研究者繪製)

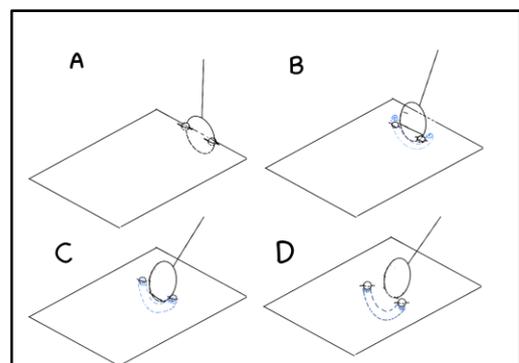
圖八 保麗龍球放置位置示意圖(研究者繪製)

設置：以電力驅動馬達，轉動馬達上擺臂，產生半渦環。裝置設置如下圖九所示。長 665 mm\*寬 450 mm\*高 255 mm 盒內裡面裝水，盒壁上貼著黑色窗簾以便觀察保麗龍球。馬達與電池固定在積木柱子架上。透明壓克力板置於容器上，並垂直俯拍記錄水面情況。

操作方法：啟動開關驅動馬達，形成半渦環，以影片紀錄分析。(圖十)



圖九 渦環裝置(研究者拍攝與繪製)



圖十 半渦環操作演示(研究者自行繪製)

## 2. 影片中保麗龍球移動情況分析方式

影像處理使用應用程式 Video Physics，記錄影片中移動的保麗龍球位置（圖十一），利用其數據進行後續的計算和分析。



圖十一 分析保麗龍球位置示意圖

## 3. 不同變因調整方式：

- (1) 調整水深：同步調整擺臂裝置的位置和容器中的水深。
- (2) 不同施力量值：分別改變電力驅動渦環裝置之電流強度。

## 4. 分析方式

### (1) 渦旋平移速度計算

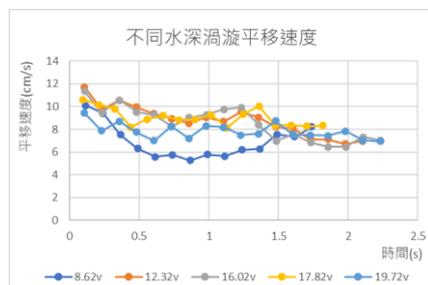
二顆保麗龍球中心之位置（左與右）分別得出其位置變化量，並除以其時間間隔得出二顆保麗龍球之平移速度。各邊分別取五次算出。

### (2) 渦旋中心之間之間距計算

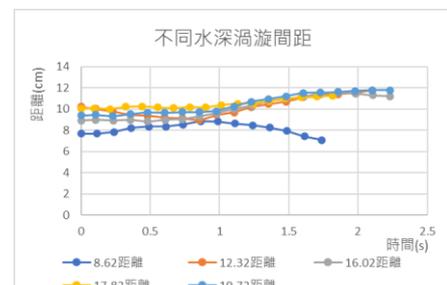
左右二顆保麗龍球中心位置根據  $x$  與  $y$  座標下變化取兩者中心位置的距離，即為兩者渦旋中心之間距離，間隔將五次實驗取其平均。

## 5. 實驗結果與現象：

### (1) 水深

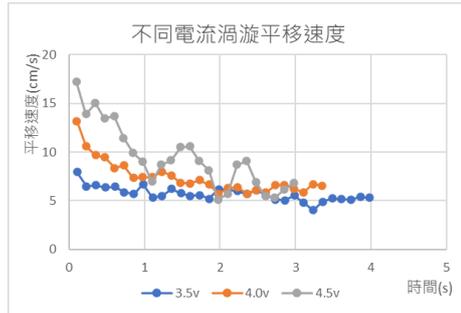


圖十二 不同水深平移速度對時間作圖

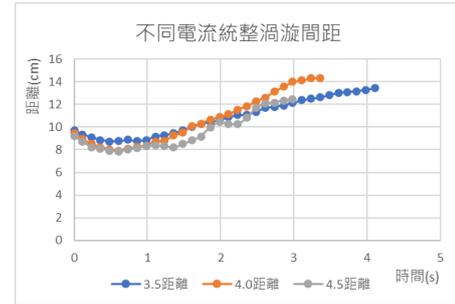


圖十三 不同水深渦旋間距對時間作圖

## (2) 施力量值



圖十四 不同施力平移速度對時間作圖



圖十五 不同施力渦旋間距對時間作圖

## (3) 數據說明：

透過圖十二可發現最淺水深 8.62cm(二圖中深藍線段)趨勢與其他條件下不同。原因為水體具黏滯力，而其計算方式為： $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$ ，其中 $\mu$ 為黏滯係數， $\frac{\partial v}{\partial y}$ 為速度梯度，速度梯度愈大，黏滯力愈大。由於水體與接觸面的邊界條件已固定，因此水體速度相同時，愈淺的水深將使水體所受的黏滯力增加，因此過淺的水深無法形成半渦環。

透過圖十四可發現不同施力時半渦換初始速度不同，而後趨勢逐漸相似。同時間施以較大的力可以造成更大的速度，因此推斷出安培數較大的馬達推動的半渦環可獲得較大初速度；在水中運動的物體受阻力作用： $F = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$ ，而 $\rho$ 為水體密度， $v$ 為速度， $C_D$ 為阻力係數， $A$ 為接觸面積，通過迭代法可得知不同初速度於水中減速至相同速度的所需時間不同，但速度-時間趨勢都呈現相似，使後期各組條件的速度趨勢趨於統一。

由圖十三與圖十五可發現無論是改變水深或是施力量值，間距皆有緩慢上升的趨勢，其原因為馬格納斯效應：當一個物體旋轉並向前移動時，將受一個馬格納斯力作用： $F = s(\vec{\omega} \times \vec{V})$ ，而 $s$ 為阻力係數， $\vec{\omega}$ 為角速度。透過外積的方向判定可得知當前方為半渦環行進方向時，左方凹面受向左的力，右方凹面反之，使間距逐間增加。

## 五、結論與生活應用

1. 半渦環為多個個獨立的環組成。
2. 半渦環遇柱狀障礙物而破壞時，若障礙物小則可恢復為原本完整的半渦環，若障礙物較

大時則回形成兩個直立的渦旋然後消散。

3. 因水的黏滯力，因此半渦環的產生有最小深度限制，符合此限制則可穩定向前。
4. 不同速度下，因水阻力影響，初速度雖不同，後期速度仍會維持在相同定值。
5. 因馬格納斯效應，半渦環的兩渦旋會隨時間增加而有上升的趨勢。

#### 參考資料

Vilquin, A., Caballero, Samuel Hidalgo, pagneux, V., Maurel, A., & Petitjeans, P. (2022). Formation and Dynamics of a Semi Vortex Ring Connected to a Free Surface. ArXiv, 1–2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.06162>

Piumsuwan, T., Yapo, S., & Pussadee, N. (2018). Investigation of Half-Ring Vortices Generated by Half-Submerged Thin Circular Plate Using Digital Particle Image Velocimetry Method. *Journal of Physics Conference Series*, 1144(1), 2–3. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1144/1/012172>

Steinmann, T., Cribellier, A., & Casas, J. (2021). Singularity of the water strider propulsion mechanisms. *Journal of Fluid Mechanics*, 915, A118.

Kiehn, R. M. (1987). Falaco Solitons. Cosmic strings in a swimming pool.

Reynolds, O. (1876). On the resistance encountered by vortex rings, and the relation between the vortex rings and streamlines of a disk. *Nature*, 14, 477–579.

Sullivan, I. S., Niemela, J. J., Hershberger, R. E., Bolster, D., & Donnelly, R. J. (2008). Dynamics of thin vortex rings. *Journal of Fluid Mechanics*, 609, 319-347.

孤對漩渦觀察實驗. 2023 年科學探究競賽-這樣教我就懂

<https://sciexplore2022.colife.org.tw/2023/work.php?t=C0528>