

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030115

潛行悍將-無動力水下滑翔機之探討

學校名稱：新竹縣立自強國民中學

作者： 國二 邱翊華 國二 蔡明峰 國二 郭紹天	指導老師： 蔡鈴珍 羅梓洋
---	-----------------------------

關鍵詞：浮力、力矩、白努力定律

摘要

水下偵測機在偵測時需要動力補給，若可以使用無動力無聲無息地偵測又不消耗能源，那麼此偵測機就相當值得研究及探討，在搜尋資料過程中，無意間找到無動力水下滑翔機相關資訊，僅靠重力和浮力就能在水中前進。那麼如何增加它在水中移動的距離呢？這問題引起了我們研究及探討。

所以我們嘗試改變拋重和配重的位置、十元硬幣數量、機翼長寬、機身長短、水深、入水角度等等因素，發現拋重和配重的位置變化影響下潛距離最為明顯，加長機翼長度也能大幅增加無動力水下滑翔機下潛距離。另外我們又設計當水槽深度變成兩倍時，可讓無動力水下滑翔機的下潛距離會增加近三倍之多。

壹、研究動機

下課閒暇之餘，我們都會去借科學類的雜誌來看。有一次我們看到了無動力水下滑翔機的相關報導，內容為無動力水下滑翔機的運作原理和模型製作方法。我們覺得很新奇，因此引起了我們研究的動機。

在此篇文章中，他們利用硬幣當機身配重讓無動力水下滑翔機下沉，並利用拋重讓水下滑翔機在水底拋棄十元硬幣造成無動力水下滑翔機上浮。推測如果改變拋重和配重的硬幣位置是否會影響水下滑翔機在水中移動的距離呢？還有十元的數量、機翼、機身、入水角度等因素是否也會影響水下滑翔機的移動距離呢？針對這幾點，我們著手設計了幾項有關水下滑翔機的實驗，來尋求解答。

貳、研究目的

- 一、探討拋重和配重的位置和十元數量對水下滑翔機下潛距離的影響
- 二、探討機翼長或寬對水下滑翔機下潛距離的影響
- 三、探討機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響
- 四、探討下沉水深對水下滑翔機下潛距離的影響
- 五、探討入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響
- 六、探討機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

參、研究設備及器材

基本研究器材				
珍珠板	保麗龍	0.5cm 方格紙	尺	美工刀
剪刀	保麗龍膠	膠帶台與膠帶	雙面膠	護貝機
其他研究器材				
木板	鐵架底座	水槽	相機	雙軌滑道
				

肆、研究過程或方法

一、名詞解釋及簡記

(一) 無動力水下滑翔機：以下簡稱水下滑翔機。

(二) 拋重：掛在水下滑翔機前段的掛勾上，當水下滑翔機下潛到水底後會脫落的十元重量。

(三) 配重：黏在水下滑翔機後段的十元重量。

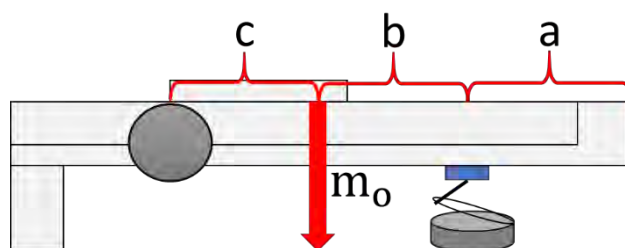
(四) m_0 ：沒有任何配件的原機質量。

(五) M_0 ：含有所有配件的原機質量。

(六) M_i ：原機拋重後的質量。

(七) G_0 ： M_0 的重心。

(八) G_i ： M_i 的重心。



$$\text{重心的公式： } G = \frac{a \cdot \text{拋重} + (a+b)m_0 + (a+b+c)\text{配重}}{\text{拋重} + m_0 + \text{配重}}$$

(九) 下潛距離：水下滑翔機下潛的水平移動距離。

(十) 上浮距離：水下滑翔機上浮的水平移動距離。

(十一) 下潛過程 (X_1)：水下滑翔機從水面到水底的過程。

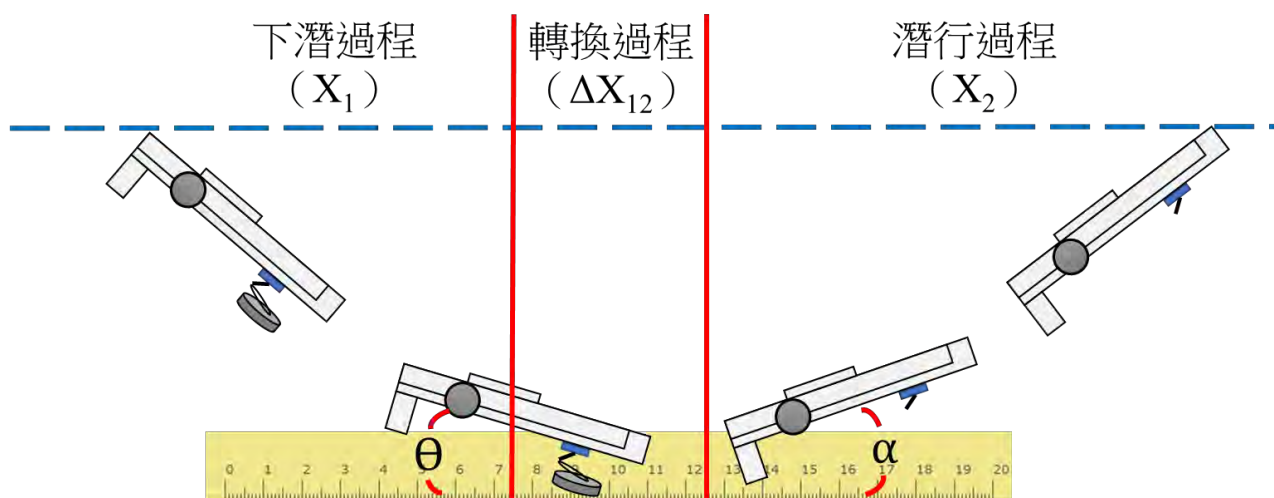
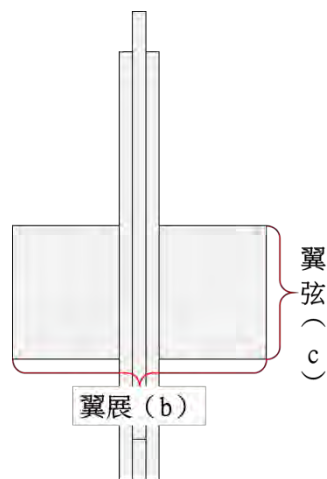
(十二) 轉換過程 (ΔX_{12})：水下滑翔機拋棄拋重的過程。

(十三) 潛行過程 (X_2)：水下滑翔機從水底到水面的過程。

(十四) θ ：水下滑翔機下潛時和水底的夾角。

(十五) 攻角 (α)：水下滑翔機上浮時和水底的夾角。

- (十六) 翼展 (b)：機翼長。
- (十七) 翼弦 (c)：機翼寬。
- (十八) 展弦比 (λ) = b/c 。
- (十九) F_B ：浮力。
- (二十) F_D ：阻力。
- (二十一) F_L ：升力。
- (二十二) N：正向作用力。



二、基本解說

(一) 水下滑翔機

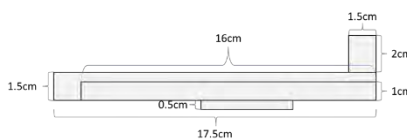
我們所設計的水下滑翔機是參考科學教育月刊第 304 期「無動力水下滑翔機之製作」中華民國 100 年 7 月中介紹的製作方法。

限制條件說明：

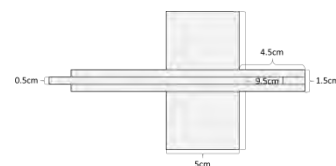
文稿中使用牛奶盒當機翼，但經沖洗後易腐敗，無法多次泡水使用，所以連機翼部分都是用 0.5 公分厚的珍珠板製造。



無動力水下滑翔機實際照片



無動力水下滑翔機側面圖



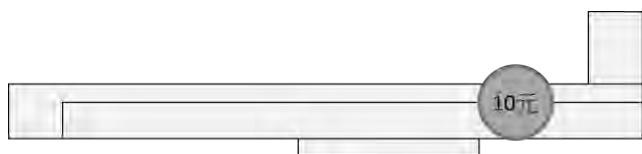
無動力水下滑翔機俯視圖

水下滑翔機基本資料						
機身全長	機翼長	機翼寬	重量	體積	十元重量	十元體積
17.5 公分	9.5 公分	5 公分	5.1 克	54.375cm ³	7.2 克	0.8 cm ³

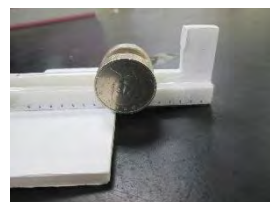
(二) 配重的黏貼方式

改良方式：

我們將配重的位置從機翼下方改成機身兩旁，使實驗方便操作及進行。另外，因機身有兩側，所以因應兩側平衡狀態，在配重時採偶數計量。



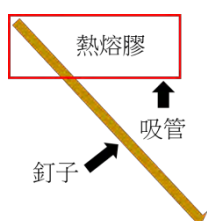
配重實際黏貼位置



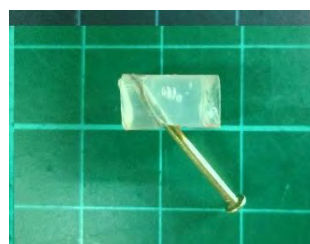
實際照片

(三) 掛勾的製作方式

為了方便移動掛勾且不傷害機身，我們將釘子插入吸管並灌入熱熔膠固定，如下圖所示。



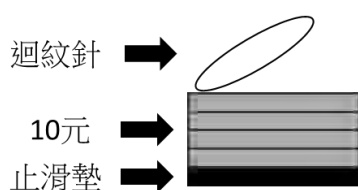
掛勾構造



實際照片

(四) 拋重的製作方式

為了不讓拋重在水中滑動造成影響記錄數據不準確，所以我們將拋重底下黏上少許止滑墊，防止拋重在水底滑動。



拋重構造



實際照片

(五) 掛勾和配重的位置

我們將水下滑翔機機身均分成兩段(如下圖所示)，前段(距離機頭 0~8.75 公分)黏掛勾，後段(距離機頭 8.75~17.5 公分)黏配重。



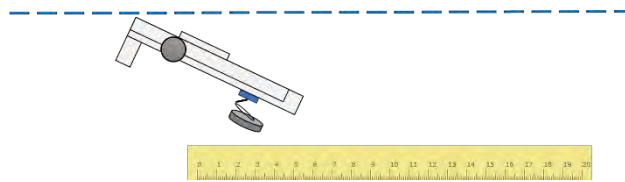
掛勾和配重位置示意圖

(六) 實驗水域的深度

以下實驗的標準水域深度為水槽的最大深度 14.8 公分。

(七) 入水的姿勢

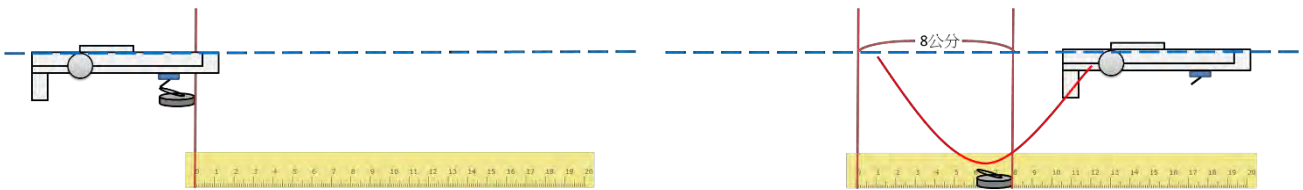
以下實驗水下滑翔機都是以水平的角度放入水中且不施加任何外加力量，我們發現水下滑翔機以機翼在上顛倒滑行比用文稿建議施放方式滑行更加穩定且不容易翻覆(如下圖所示)，所以以下的實驗皆都用『倒立而行』的方式滑行，以實驗得順利以進行。



滑翔機滑行姿態示意圖

(八) 記錄下潛距離的方式

記錄拋重移動的距離，示意圖如下。

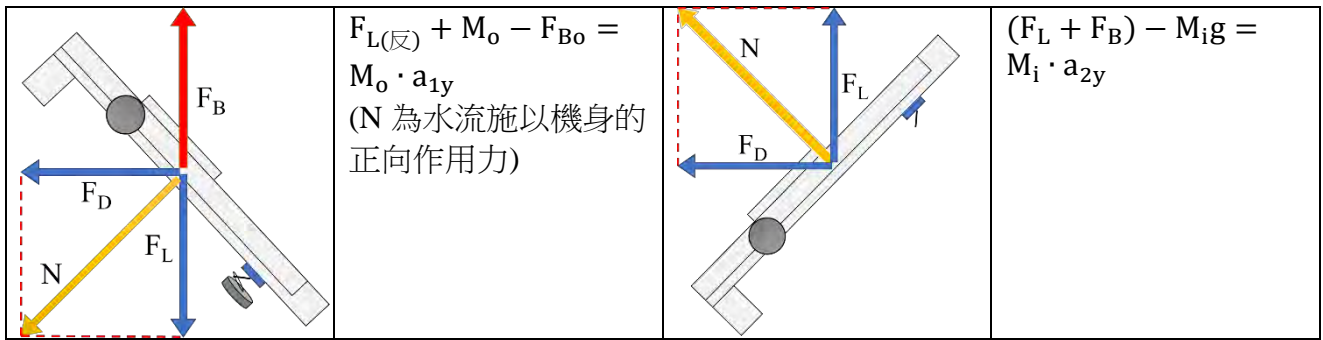


前端歸零

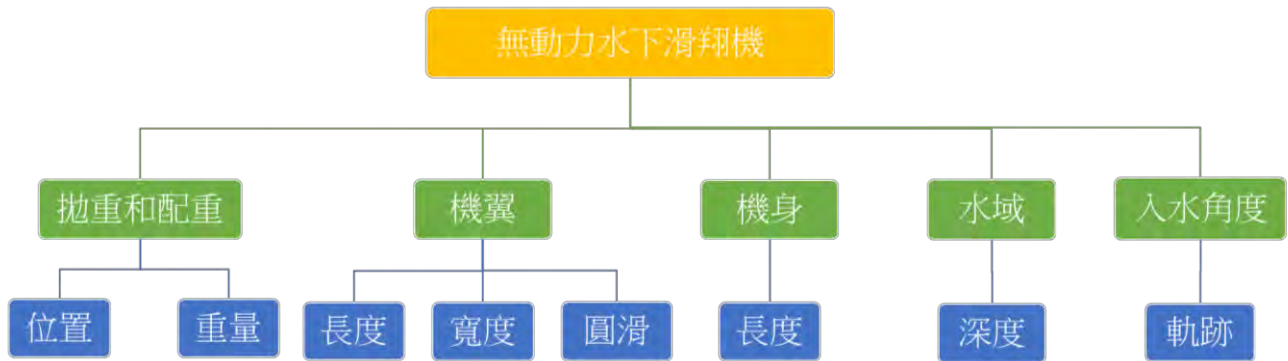
記錄前端位置

(九) 水下滑翔機下潛和上浮時力的分解與公式推導

下潛過程中	公式 (向下為正)	潛行過程中	公式 (向上為正)
	$V_x = V \cos \theta$ $V_y = V \sin \theta$ $X_1 = V_x \cdot t$ $Y = V \sin \theta \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_{1y} \cdot t^2$ $= V \sin \theta \cdot \frac{X_1}{V \cos \theta} + \frac{1}{2} \cdot a_{1y} \cdot \left(\frac{X_1}{V \cos \theta} \right)^2$ $Y = \tan \theta \cdot X_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{a_{1y}}{(V \cos \theta)^2} \cdot X_1^2$		$X_2 = V \cos \alpha \cdot t'$ $t' = \frac{X_2}{V \cos \alpha}$ $Y = (V_y) t' + \left(\frac{1}{2} \cdot a'_{2y} \cdot t'^2 \right)$ $= V \sin \alpha \cdot \frac{X_2}{V \cos \alpha} + \frac{1}{2} \cdot a'_{2y} \cdot \left(\frac{X_2}{V \cos \alpha} \right)^2$ $= \tan \alpha \cdot X_2 + \frac{1}{2} \cdot a'_{2y} \cdot \left(\frac{X_2}{V \cos \alpha} \right)^2$
下潛過程中	公式	潛行過程中	公式



三、研究架構圖



研究架構圖

四、實驗設計

(一) 探討拋重和配重的位置和十元硬幣數量對水下滑翔機下潛距離的影響

目的：為了探討配重的位置和比例對下潛距離的影響，我們分別改變機身配重的位置和比例來了解其與滑翔機下潛距離的關係。

1. 實驗一：探討拋重和配重的位置對水下滑翔機下潛距離的影響

- (1) 將滑翔機機身標上間距 5 毫米的記號
- (2) 將機身均分成前後兩段，掛勾黏在前段記號，配重黏在後段記號（拋重和配重十元硬幣數量比為 1 : 1）
- (3) 把滑翔機放入水中
- (4) 平放釋出記錄水下滑翔機下潛距離
- (5) 拆掉配重和掛勾黏在下一個記號上
- (6) 重複步驟 3~5

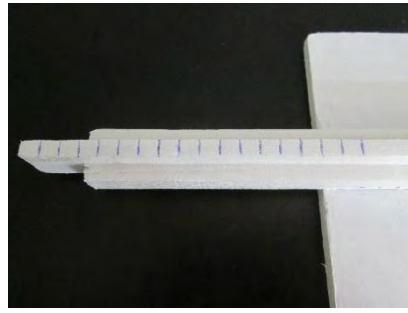
2. 實驗二：探討拋重和配重的十元硬幣數量對水下滑翔機下潛距離的影響

- (1) 將配重和掛勾黏在實驗一最符合文稿中滑翔機行徑姿態的位置上

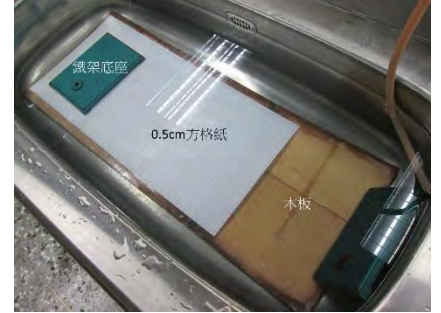
- (2) 把滑翔機放入水中
- (3) 平放釋出記錄水下滑翔機下潛距離
- (4) 改變拋重和配重的比例
- (5) 重複步驟 1~4



滑翔機放入水中的姿勢



滑翔機的標記



實驗場域

(二) 探討機翼長或寬對水下滑翔機下潛距離的影響

目的：為了探討機翼長寬對下潛距離的影響，我們將機翼的長度和寬度改成原來的 0.5 倍和 1.5 倍，探討其與滑翔機下潛距離的關係。

1. 實驗三：探討機翼長度對水下滑翔機下潛距離的影響（寬度不變）

- (1) 將珍珠板切割成長度分別為 4.75、9.5（原機）、14.25 公分的機翼各 1 片
- (2) 將機翼黏到機身上
- (3) 將每一台重複實驗一（只做每個配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置）和實驗二

2. 實驗四：探討機翼寬度對水下滑翔機下潛距離的影響（長度不變）

- (1) 將珍珠板切割成寬度分別為 2.5、5（原機）、7.5 公分的機翼各 1 片
- (2) 將機翼黏到機身上（重心不變）
- (3) 將每一台重複實驗一（只做每個配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置）和實驗二

(三) 探討機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響

目的：為了探討機身長短對下潛距離的影響，我們將機身長分別加長和縮短各 0.5 倍，觀察下潛距離的變化。

1. 實驗五：探討機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響

- (1) 將機身長分別做成 8.75、17.5 (原機)、26.25 公分各 1 根
- (2) 將機身黏到機翼上 (重心不變)
- (3) 將每一台重複實驗一 (只做每個配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置) 和實驗二

(四) 探討下沉水深兩倍對水下滑翔機下潛距離的影響

目的：根據相似三角形，當水深加深時，下潛距離應該會加長，所以我們改變水深為原來的兩倍，再做進一步的探討。

實驗六：探討下沉水深對水下滑翔機下潛距離的影響

- (1) 將水箱注入深度為 29.6 公分深的水
- (2) 重複實驗一 (只做每個配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置) 和實驗二

(五) 探討入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響

目的：為了探討入水角度對下潛距離的影響，我們改變不同的入水角度，探討其與滑翔機下潛距離的關係。

實驗七：探討入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響

- (1) 入水角度從 0 度到 90 度每 5 度測量下潛距離
- (2) 利用工具:威力導演 14，每 1/15 秒截取一次實驗的移動軌跡，以紅色、藍色標示拋重前後重心的位置。

(六) 探討機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

目的：為了減少水下滑翔機在水中產生的阻力，我們模仿飛機，將機翼磨成和飛機機翼的形狀一樣，探討它對下潛距離的影響。

實驗八：探討機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

- (1) 將水下滑翔機的機翼磨成和飛機的機翼形狀一樣 (圓滑端朝下)
- (2) 重複實驗一 (只做每個配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置) 和實驗二

(七) 探討機翼再加長對水下滑翔機下潛距離的影響

目的:為了探討機翼若增加為 2、3 倍時，下潛距離是否增加更多。

實驗九: 探討機翼再加長後，是否造成水下滑翔機下潛距離有增長效應

- (1) 將珍珠板切割成長度分別為 9.5（原機）、19、28.5 公分的機翼各 1 片
- (2) 將機翼黏到機身上
- (3) 將每一台重複實驗一（只做每個配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置）和實驗二

（八）上浮距離的測量

目的: 探討改變配重位置、十元硬幣數量是否造成影響水下滑翔機上浮情形

實驗十: 探討拋重和配重的十元硬幣數量對水下滑翔機上浮時的距離影響

(1) 改變配重位置的實驗步驟：

- ① 將配重黏在離機頭 10.5~12.5 的位置上
- ② 平放釋出並記錄水下滑翔機上浮距離
- ③ 拆掉原配重和掛勾再黏到下一個記號上

(2) 改變配重硬幣數的實驗步驟 ① 重複實驗二（只改變配重） ② 紀錄上浮距離

伍、研究結果

一、探討拋重和配重的位置和十元硬幣數量對水下滑翔機下潛距離的影響

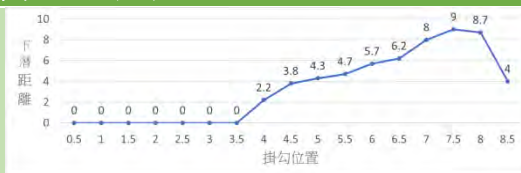
（一）實驗一：探討拋重和配重的位置對水下滑翔機下潛距離的影響

在實驗的過程中，水下滑翔機拋重和配重十元硬幣數量本為各 4 個，再減少數量水下滑翔機就無法下沉，但下滑緩慢容易受到干擾，造成下潛距離不穩定，因此我們再增加為各 6 個，使下潛距離穩定。掛勾位置和配重位置都是以離機頭的距離表示。實驗結果如下。



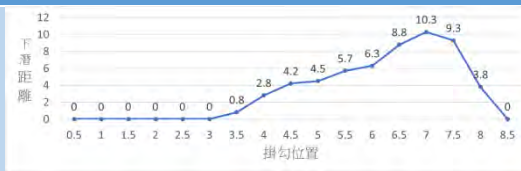
配重離機頭 10 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0	0	0	0	0	2.2	3.8
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	4.3	4.7	5.7	6.2	8	9	8.7	4	



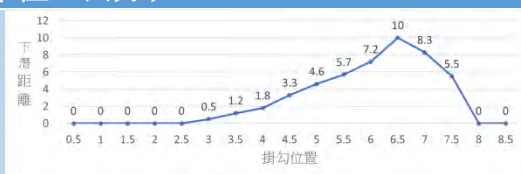
配重離機頭 10.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0	0	0	0	0.8	2.8	4.2
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	4.5	5.7	6.3	8.8	10.3	9.3	3.8	退	



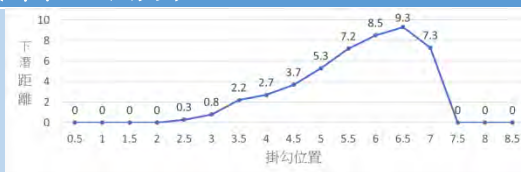
配重離機頭 11 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0	0	0	0.5	1.2	1.8	3.3
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	4.6	5.7	7.2	10	8.3	5.5	退	退	



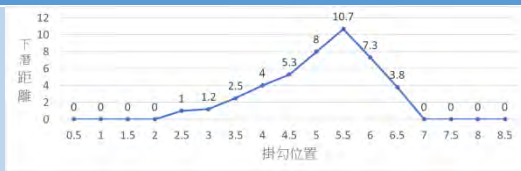
配重離機頭 11.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0	0	0.3	0.8	2.2	2.7	3.7
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	5.3	7.2	8.5	9.3	7.3	退	退	退	



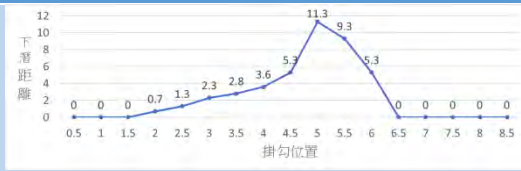
配重離機頭 12 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0	0	1	1.2	2.5	4	5.3
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	8	10.7	7.3	3.8	退	退	退	退	



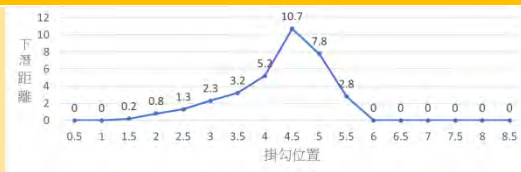
配重離機頭 12.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0	0.7	1.3	2.3	2.8	3.6	5.3
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	11.3	9.3	5.3	退	退	退	退	退	



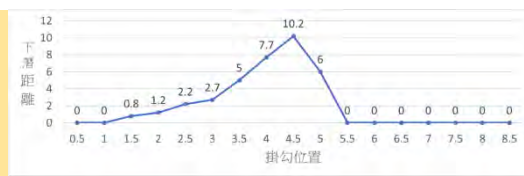
配重離機頭 13 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0.2	0.8	1.3	2.3	3.2	5.2	10.7
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	7.8	2.8	退	退	退	退	退	退	



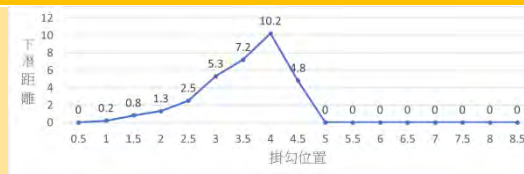
配重離機頭 13.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0	0.8	1.2	2.2	2.7	5	7.7	10.2
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	6	退	退	退	退	退	退	退	



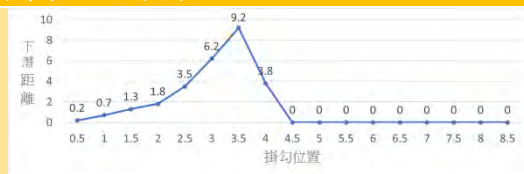
配重離機頭 14 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0	0.2	0.8	1.3	2.5	5.3	7.2	10.2	4.8
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



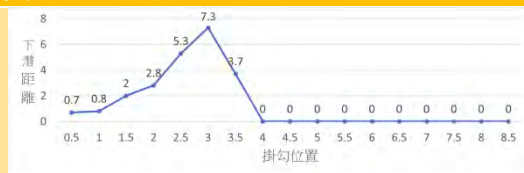
配重離機頭 14.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0.2	0.7	1.3	1.8	3.5	6.2	9.2	3.8	退
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



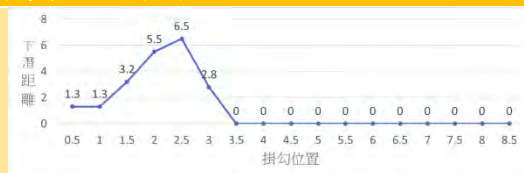
配重離機頭 15 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	0.7	0.8	2	2.8	5.3	7.3	3.7	退	退
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



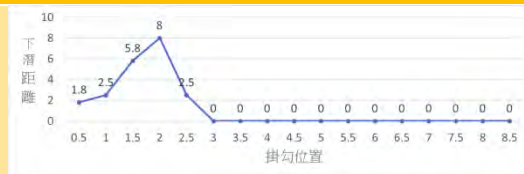
配重離機頭 15.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	1.3	1.3	3.2	5.5	6.5	2.8	退	退	退
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



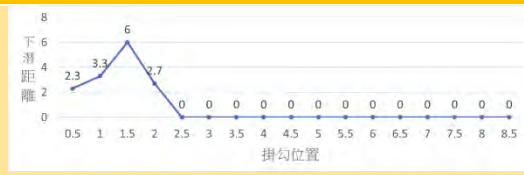
配重離機頭 16 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	1.8	2.5	5.8	8	2.5	退	退	退	退
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



配重離機頭 16.5 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)

掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	2.3	3.3	6	2.7	退	退	退	退	退
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



配重離機頭 17 公分時不同掛勾位置的平均下潛距離 (單位：公分)									
掛勾位置	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
下潛距離	3.3	5.3	5.2	退	退	退	退	退	退
掛勾位置	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
下潛距離	退	退	退	退	退	退	退	退	



【實驗分析】：

- 上浮情形：配重離機頭 9.5 公分以下時(橘色表格)，滑翔機會往後浮出。10 公分上時 (綠色表格)，滑翔機機身以幾乎水平的角度浮出水面。12.5~10.5 公分時 (藍色表格)，有明顯前進。13 公分以上時 (黃色表格)，上浮幾乎沒有前進。
- 當掛勾和配重離機頭的距離相加大於等於 19 公分下潛時會往後退。
- 配重離機頭 13.5 公分以上時，掛勾和配重離機頭的距離相加等於 18 公分時下潛距離最遠。13 公分以下時，相加等於 17.5 公分時下潛距離最遠。
- 當掛勾和配重離機頭的距離各為 7 公分和 10.5 公分時，水下滑翔機行進的方式最符合文稿。

(二) 實驗二：探討拋重和配重的十元硬幣數量對水下滑翔機下潛距離的影響

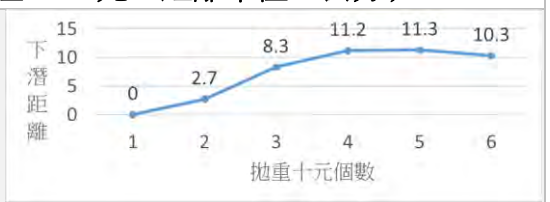
實驗時滑翔機的拋重和配重硬幣數最多為 6 個，實驗結果如下。

配重硬幣數為 2 個，只有拋重硬幣數為 6 個時水下滑翔機才能下潛，且下潛距離為 8.2 公分，其餘拋重硬幣數皆無足夠的重量讓水下滑翔機下潛。

配重硬幣數為 4 個不同拋重的平均下潛距離 (重量單位：10 元，距離單位：公分)			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	11	10.8	10.5



配重硬幣數為 6 個不同拋重的平均下潛距離 (重量單位：10 元，距離單位：公分)			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	2.7	8.3
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	11.2	11.3	10.3



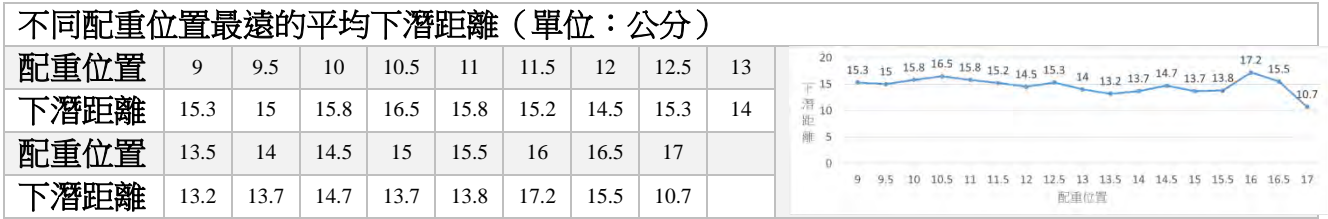
【實驗分析】： 拋重與配重硬幣數相差 2 個以下時，下潛距離較高。

二、探討機翼長或寬對水下滑翔機下潛距離的影響

(一) 實驗三：探討機翼長度對水下滑翔機下潛距離的影響

1. 加長機翼長度的實驗結果（機翼長度為 14.25 公分）

(1) 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）



(2) 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個十元硬幣時，任何拋重硬幣數皆無足夠重量讓水下滑翔機下潛。

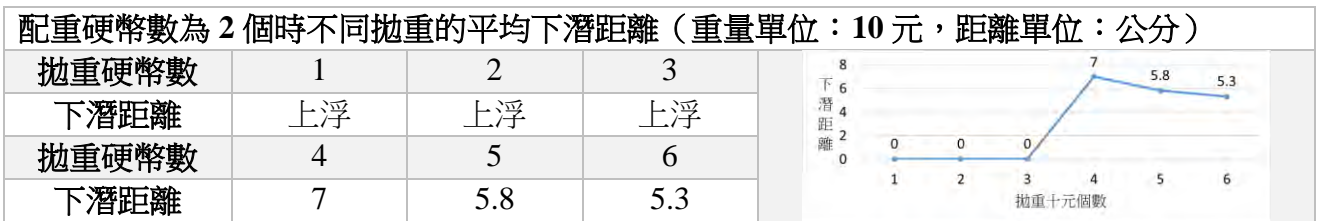


2. 減少機翼長度的實驗結果（機翼長度為 4.75 公分）

(1) 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 4 個）



(2) 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離



配重硬幣數為 6 個時重量太重，水下滑翔機無法浮出水面。

【實驗分析】：加長機翼長度時會造成水下滑翔機下潛距離有明顯增加（最大下潛距離從 11.3 增加為 17.2 公分）。

(二) 實驗四：探討機翼寬度對水下滑翔機下潛距離的影響

1. 加長機翼寬度的實驗結果（機翼寬度為 7.5 公分）

(1) 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）



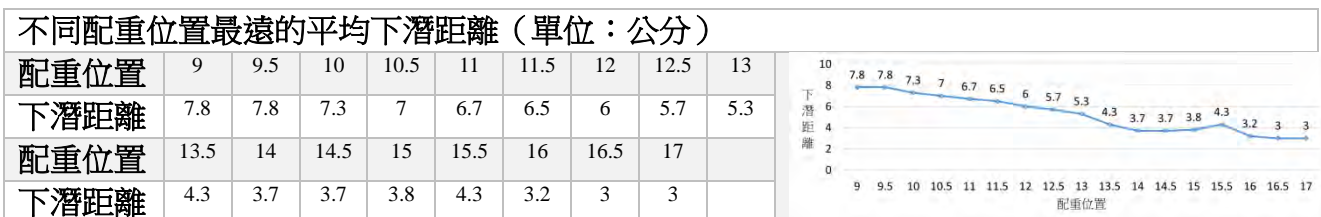
(2) 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個十元硬幣時，任何拋重硬幣數皆無足夠重量讓水下滑翔機下潛。



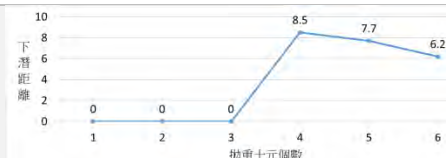
2. 減少機翼寬度的實驗結果（機翼寬度為 2.5 公分）

(1) 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 4 個）

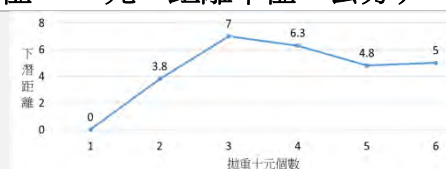


(2) 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	8.5	7.7	6.2



配重硬幣數為 4 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	3.8	7
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	6.3	4.8	5



配重硬幣數為 6 個時重量太重，水下滑翔機無法浮出水面。

實驗分析：機翼寬度不論加長或減短皆沒有明顯增加。

三、探討機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響

（一）實驗五：探討機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響

1. 加長機身長度的實驗結果（機身長為 26.25 公分）

（1）改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）

不同配重位置最遠的平均下潛距離（單位：公分）									
配重位置	13.5	14.25	15	15.75	16.5	17.25	18	18.75	19.5
下潛距離	-	-	8	8	7.3	6	5.8	5.3	4.2
配重位置	20.25	21	21.75	22.5	23.25	24	24.75	25.5	
下潛距離	4.7	3.8	3.2	2.8	2.2	2.2	1.7	1.5	



註：配重位置為 13.5、14.25 時，因下潛距離最遠的掛勾位置離機頭較遠，導致機頭會比拋重先碰到水底，無法拋下配重。

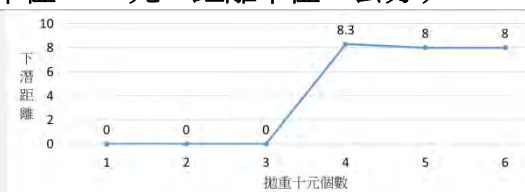
（2）改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個十元時，任皆無足夠重量讓水下滑翔機下潛。

配重硬幣數為 4 個時，只有拋重硬幣數為 6 個時水下滑翔機才能下潛，且

下潛距離為 7.5 公分，其餘皆無足夠的重量讓水下滑翔機下潛。

配重硬幣數為 6 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	8.3	8	8



2. 減少機身長度的實驗結果（機身長為 8.75 公分）

(1) 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 4 個）

任何配重位置中下潛距離最遠的掛勾位置下潛時都會往後退。

(2) 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個時，拋重硬幣數為 3 個以下時重量太輕無法下潛，4 個以上時皆為後退。

配重硬幣數為 4 個時，拋重硬幣數為 1 個時無法下潛，2 個以上時皆為後退。

配重硬幣數為 6 個時重量太重，水下滑翔機無法浮出水面。

【實驗分析】：加長機身長度時下潛距離會有些微減少，縮短則會導致下潛都往後滑行。

四、探討下沉水深兩倍對水下滑翔機下潛距離的影響

(一) 實驗六：探討下沉水深對水下滑翔機下潛距離的影響

1. 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）

配重位置	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
下潛距離	31.5	30.3	30.2	29.7	30	29.2	28.5	30	30.8
配重位置	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	
下潛距離	19.5	23	19	15.7	20.5	17.5	16.7	14.3	

2. 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

當配重硬幣數為 2 個時，只有拋重硬幣數為 6 個時水下滑翔機才能下潛，且

下潛距離為 32.2 公分，其餘皆無足夠的重量讓水下滑翔機下潛。

拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	30.7	33.8	32.5

拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	退後	18.3
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	24.3	26.3	28.7

【實驗分析】：水深深度變為原來的兩倍時，水下滑翔機下潛距離明顯增加，為原來的近 3 倍

（最大下潛距離從 11.3 增加為 33.8 公分）。

五、探討入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響

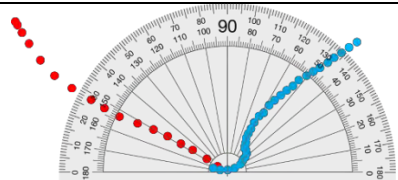
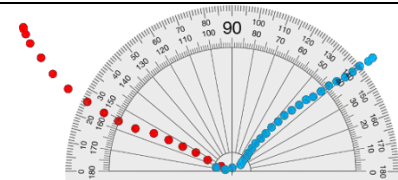
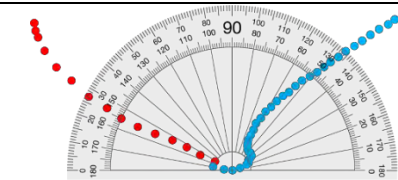
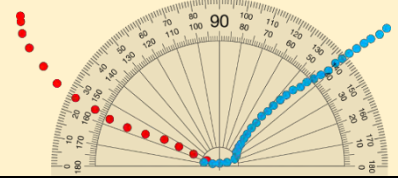
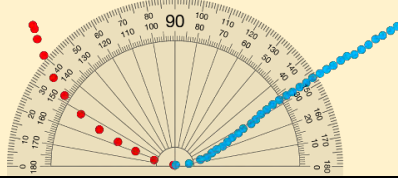
為了有明顯的數據和軌跡，所以實驗的水深深度為水槽的兩倍（29.6 公分），和實驗六水深加深實驗的深度一樣。

（一）實驗七：探討入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響

入水角度	0	30	35	40	45	50	55
下潛距離	29.7	35	35.5	36.3	36.2	34.8	34
入水角度	60	65	70	75	80	85	90
下潛距離	33.8	33.8	31.5	30	29.3	28.1	21.3

註：入水角度為 5 度到 25 度時，此範圍無法讓水下滑翔機滑動。

水中移動的截圖			
	0 度	30 度	35 度
	Θ : 34 度, α : 48 度	Θ : 34 度, α : 50 度	Θ : 36 度, α : 54 度
	40 度	45 度	50 度
	Θ : 36 度, α : 55 度	Θ : 36 度, α : 68 度	Θ : 39 度, α : 55 度
55 度	60 度	65 度	
Θ : 35 度, α : 63 度	Θ : 35 度, α : 65 度	Θ : 34 度, α : 70 度	

70 度	75 度	80 度
$\Theta : 32 \text{ 度}, \alpha : 64 \text{ 度}$	$\Theta : 27 \text{ 度}, \alpha : 66 \text{ 度}$	$\Theta : 27 \text{ 度}, \alpha : 64 \text{ 度}$
		
85 度	90 度	
$\Theta : 26 \text{ 度}, \alpha : 67 \text{ 度}$	$\Theta : 15 \text{ 度}, \alpha : 38 \text{ 度}$	
		

【實驗分析】：

1. 入水角度為 30 度到 45 度時，下潛距離較高。
2. 入水角度越大，造成 V_y 越大，讓機身一開始直接俯衝，過程中機身又受到水流分力之升力影響，導致機身突然拉升。

六、探討機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

為求明顯的數據，所以實驗的水深深度為水槽的兩倍（29.6 公分），和實驗六水深加深實驗的深度一樣。

（一）實驗八：探討機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

1. 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）

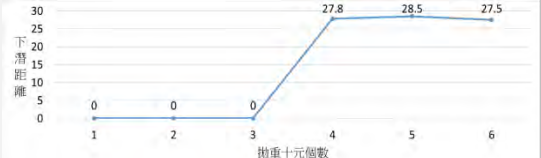
不同配重位置最遠的平均下潛距離（單位：公分）									
配重位置	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
下潛距離	25.3	23.8	25.3	25	24.2	23.5	24.2	23.5	22.3
配重位置	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	
下潛距離	12.7	15	12.8	14.5	13.3	15.2	14.8	13.2	



2. 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

當配重硬幣數為 2 個時，只有拋重硬幣數為 6 個時水下滑翔機才能下潛，且下潛距離為 28.8 公分，其餘皆無足夠的重量讓水下滑翔機下潛。

配重硬幣數為 4 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	27.8	28.5	27.5



配重硬幣數為 6 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	1.3	13.5
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	20.7	23.5	25



【實驗分析】：機翼圓滑會造成水下滑翔機下潛距離減少（最大下潛距離從 33.8 減少為 28.8 公分）。

七、機翼再加長的研究結果

實驗九:因加長機翼長度和增加水深都可讓水下滑翔機下潛距離大幅增加，所以我們把這兩項變因混和，還加長機翼長度為原來的 2 倍、3 倍，觀察其是否能讓水下滑翔機下潛距離繼續增加。

（一）水深加深 2 倍、機翼加長 1.5 倍（14.25 公分）的實驗結果

1. 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）

不同配重位置最遠的平均下潛距離（單位：公分）									
配重位置	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
下潛距離	41.3	40	41.2	40.5	41.5	41.2	41.7	40.5	41.7
配重位置	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	
下潛距離	39.5	39.3	38.5	36.5	36.7	36.8	35.2	28.5	



2. 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個十元硬幣時，任何拋重硬幣數皆無足夠重量讓水下滑翔機下潛。

配重硬幣數為 4 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	上浮	39.7	39.7



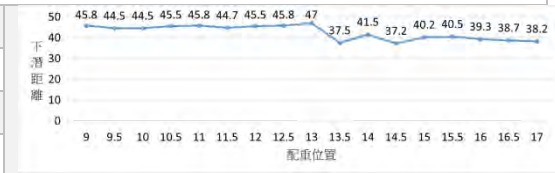
配重硬幣數為 6 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	39.5
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	42.2	41.8	40.5



（二）水深加深 2 倍、機翼加長 2 倍（19 公分）的實驗結果

1. 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 6 個）

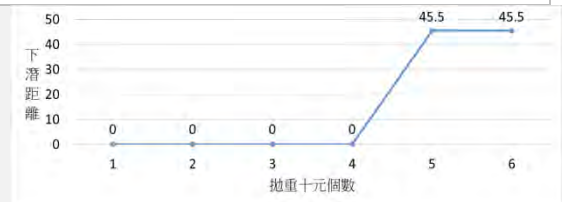
不同配重位置最遠的平均下潛距離（單位：公分）										
配重位置	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
下潛距離	45.8	44.5	44.5	45.5	45.8	44.7	45.5	45.8	47	
配重位置	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17		
下潛距離	37.5	41.5	37.2	40.2	40.5	39.3	38.7	38.2		



2. 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個和 4 個十元時，任何拋重硬幣數皆無足夠重量讓水下滑翔機下潛

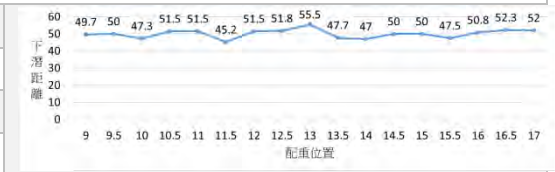
配重硬幣數為 6 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）			
拋重硬幣數	1	2	3
下潛距離	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	4	5	6
下潛距離	上浮	45.5	45.5



（三）水深加深 2 倍、機翼加長 3 倍（28.5 公分）的實驗結果

1. 改變拋重和配重位置的平均下潛距離（拋重和配重硬幣數各為 8 個）

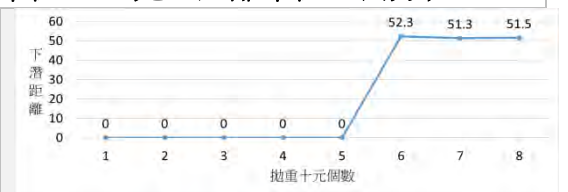
不同配重位置最遠的平均下潛距離（單位：公分）										
配重位置	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
下潛距離	49.7	50	47.3	51.5	51.5	45.2	51.5	51.8	55.5	
配重位置	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17		
下潛距離	47.7	47	50	50	47.5	50.8	52.3	52		



2. 改變拋重和配重硬幣數的平均下潛距離

配重硬幣數為 2 個、4 個十元時，任何拋重硬幣數皆無足夠重量讓水下滑翔機下潛。為 6 個十元時，只有拋重硬幣數為 8 個時水下滑翔機才能下潛，且下潛距離為 47.8 公分，其餘拋重硬幣數皆無足夠的重量讓水下滑翔機下潛。

配重硬幣數為 8 個時不同拋重的平均下潛距離（重量單位：10 元，距離單位：公分）				
拋重硬幣數	1	2	3	4
下潛距離	上浮	上浮	上浮	上浮
拋重硬幣數	5	6	7	8
下潛距離	上浮	52.3	51.3	51.5



【實驗分析】：機翼越長，下潛距離越遠。

八、上浮距離的測量

因以上實驗都無法呈現水下滑翔機上浮時的前進距離，且為求明顯的數據，我們測量了原型機在水深加深環境中的上浮距離，探討其和配重位置、個數的關係。

改變配重位置的實驗步驟：

1. 將配重黏在離機頭 10.5~12.5 的位置上
2. 平放釋出並記錄水下滑翔機上浮距離
3. 拆掉原配重和掛勾再黏到下一個記號上

改變配重硬幣數的實驗步驟：

1. 重複實驗二（只改變配重）
2. 紀錄上浮距離

（一）改變配重位置的平均上浮距離



（二）改變配重硬幣數的平均上浮距離



【實驗分析】：配重離機頭 10.5 公分時上浮距離最遠(33.3 公分)，10.5 公分以上時離機頭的距離越遠上浮距離遞減。

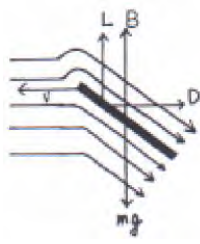
陸、討論

一、基本概念

（一）水下滑翔機的受力情形討論

運動物體在流體中之受力在流體中運動之物體所受之力除了重力、浮力外，必有因運動而和流體相互作用的力，其中作用於物體且與運動方向相反的力，稱為阻力(drag force)，而作用於物體且與運動方向垂直的作用力，稱為升力(lift force)，其示意圖如右所示，物體即在這四力的作用下進行它的運動。茲分述如下：

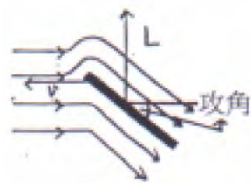
1. 重力：重力大小為 mg ， m 為物體質量， g 為重力場強度；方向為鉛直向下。



圓片在流體中之受力情形

2.浮力：浮力大小為 $V\rho g$ ， V 為物體體積， ρ 為液體密度， g 為重力場強度；方向為鉛直向上。

3.升力：由伯努力方程式 $p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$ 可知，在同一高度流體流速較大處壓力小，流速較小處壓力大； $\Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)$ ，當一物體在流體中運動時，如其面和運動方向有一夾角(稱為攻角)，將使流經其上下表面之流體流速不同，將使物體上下表面有一壓力差而產生一垂直運動方向的淨力，可表為 $F_L = C_L \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) A$ ，其中 C_L 為升力係數，隨攻角之增加而增加，但達失速點即急劇下降， A 為平行於自由流方向的最大截面積。



圓片在流體中之升力

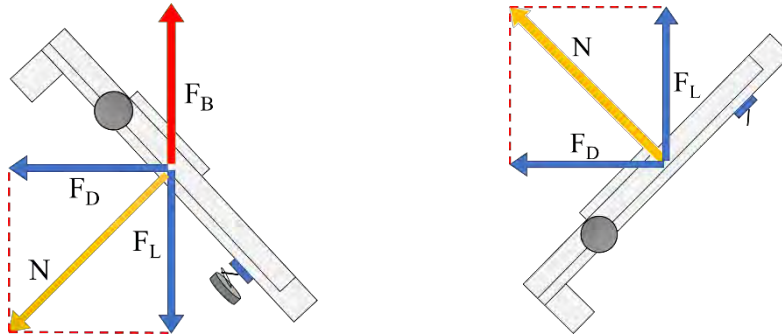
4.阻力：流體流動時作用於物體之阻力一般包含了摩擦阻力、壓力阻力和誘導阻力，摩擦阻力是由流體接近物體表面之薄層即所謂邊界層之剪應力所致，而壓力阻力亦稱為形狀阻力則是因為流體流經物體因剝離現象受到干擾而產生擾動尾流所致，誘導阻力發生在大攻角時，當攻角大於某一臨界角時空氣流之邊界層剝離，而造成一個大的擾動尾流而使阻力大增。阻力可表為 $F_D = C_D \left(\frac{1}{2}\rho v^2\right) A$ ，其中 C_D 為阻力係數， A 為垂直於自由流方向的最大截面積。



圓片在流體中之阻力

(二) 下潛過程與潛行過程

水下滑翔機下潛時根據浮力公式 $B = \rho Vg$ ，可以知道此時重量（含十元重量 91.5 克重）大於浮力（63.975 克重），所以水下滑翔機會往下沉。脫離拋重重量後上浮時重量（含十元重量 48.3 克）小於浮力（59.175 克重）所以水下滑翔機會往上浮。



(三) 機身拋重與配重的示意圖

水下滑翔機下潛時需要拋重的重量讓其能夠下沉，且根據力矩公式 $L=Fd$ 推斷，拋重所造成的力矩（順時針力矩）也可以抗衡配重的力矩（逆時針力矩），轉動機身讓機頭朝下導致前進。上浮時，配重的力矩會讓機身朝返方向轉動讓機頭朝上，也可導致前進。



(四) 倒立而行

水下滑翔機倒立而行時，因尖端在下，下潛時會把水劃開，能讓水下滑翔機能穩定的前進，代表在水中並不能像在空氣中一樣用飛機的姿勢順利滑行。

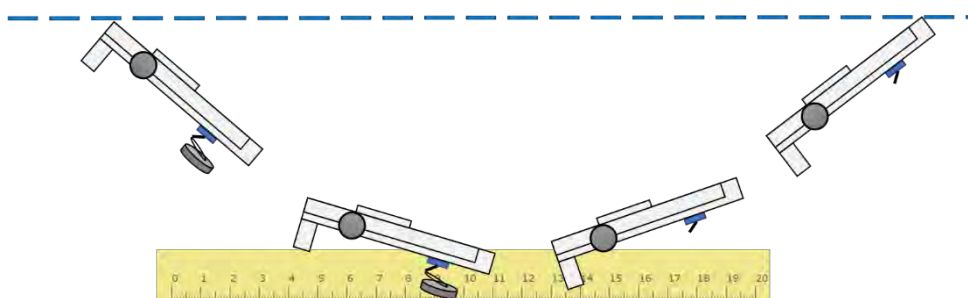
二、探討拋重和配重的位置和十元硬幣數量對水下滑翔機下潛距離的影響

(一) 探討拋重和配重的位置對水下滑翔機下潛距離的影響

在實驗過程中，我們發現水下滑翔機的配重在 10 公分上時，滑翔機機身上浮時會以幾乎與水面平行的角度浮出水面。我們認為如果把機身當成力臂，那麼

配重的位置應該在支點附近，導致力矩幾乎為零，力臂幾乎沒有轉動。因此以下支點都以 10 公分計算。

配重在離支點 3 公分以下時，順時針力矩比逆時針力矩多 108gw-cm 時下潛距離最遠；配重在離支點 3.5 公分以上時，順時針力矩比逆時針力矩多 86.4gw-cm 時下潛距離最遠。推測此力矩讓機身轉動的角度能把水往後推造成最大的下潛距離。而順、逆時針力矩分別為 129.6gw-cm 和 21.6gw-cm 時，滑翔機的移動軌跡最接近文稿上所講述的軌跡，如下圖所示。



順時針力矩比逆時針力矩多 43.2gw-cm 以下時，水下滑翔機下潛時就會往後退，認為因機身重心在後，讓機頭朝上所導致。

水下滑翔機上浮，順時針力矩為 21.6gw-cm 以上時，機身朝反方向轉動，上浮時會把水往前推，導致後退。為 0gw-cm 時，機身幾乎沒有轉動，但因下潛時的慣性，所以上浮時還是有些微前進，且以幾乎與水面水平的角度浮出水面。逆時針力矩為 21.6gw-cm~108gw-cm 時，逆時針力矩較小，機身轉動角度小，上浮時會把水往後推，所以有明顯前進。且力矩越小，上浮距離越遠。129.6gw-cm 以上時，因後逆時針矩太大，機身轉動角度大，導致機身失速讓機身幾乎與水面垂直，上浮幾乎沒有前進。

(順時針力矩為機頭朝下。逆時針力矩為機頭朝上。)

不同後段力矩的上浮情形 (力矩的單位：十元重量*公分)			
3gw-cm 以上(順)	0gw-cm	3gw-cm~15gw-cm(逆)	18gw-cm 以上(逆)

(二) 探討拋重和配重的十元硬幣數量對水下滑翔機下潛距離的影響

當拋重與配重硬幣數相差正負 2 個以下，也就是順時針力矩比逆時針多

64.8~115.2gw-cm 時水下滑翔機下潛距離較高。推測此範圍讓機身轉動的角度可造成水下滑翔機往前的動力。

(三) 探討水下滑翔機在水中的情況

1. 下潛過程：

水下滑翔機下潛時的速度 V_1 可以分解成 X 軸的 V_x 和 Y 軸的 V_y 。 V_x 越大下潛距離越遠。

除了力矩的影響，水下滑翔機下潛時也會受到水流打在機身上的正向作用力 (N)，正向作用力分解成的阻力 (F_D) 和反升力 ($F_{L(\uparrow)}$)，反升力讓水下滑翔機更快下沉，縮短下潛距離。

2. 轉換過程：

水下滑翔機拋棄拋重時，重心轉移，會讓水下滑翔機重新調整角度。在調整完角度前，水下滑翔機晃動，會造成機身些許不穩定。

3. 潛行過程：

水下滑翔機潛行時的速度 V_2 可以分解成 X 軸的 V_x 和 Y 軸的 V_y 。 V_x 越大代表上浮距離越遠。和下潛過程相似。

潛行時和下潛相似，會受到水流打在機身上的正向作用力 (N) 分解成的阻力 (F_D) 和升力 ($F_{L(\uparrow)}$)，升力及浮力會讓水下滑翔機更快上浮，縮短上浮距離。

三、探討機翼長寬對水下滑翔機下潛距離的影響

我們發現當機翼長度增長，下潛距離會有明顯的增加；最大下潛距離增加了 5.9 公分。而機翼寬度增加，下潛距離卻只有些微的增加；最大下潛距離增加了 1.2 公分。根據展弦比 (λ)，機翼加長的展弦比 2.85 較機翼加寬的展弦比 1.27 大。發現展弦比較大下潛距離較遠，代表機翼的長度對水下滑翔機的下潛距離具有較大的影響。

在機翼再加長實驗中，當機翼增加為原來的 2~3 倍時，倍數越多，下潛距離會越遠。且配合水深加深，當機翼增加為原來的 3 倍時，最大下潛距離竟能超過測量

範圍 55.5 公分，代表展弦比 (λ) 越大，下潛距離越遠。

四、探討機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響

機身加長時，下潛距離會減少許多，最大下潛距離減少了 3 公分。如果把加長的機身當成表標準來看的話，那麼就等於把機翼的長、寬縮小成原來的 2/3 倍。所以代表影響下潛距離的因素是機翼，而不是機身。

機身縮短時，下潛都往後滑行。我們認為應該是機身只有 8.75 公分的關係，且每個記號的距離減少為 0.25 公分。導致機身掛勾位置受影響，掛勾位置間接影響拋重和支點的距離，讓每次實驗下潛都往後滑行。

五、探討下沉水深對水下滑翔機下潛距離的影響

水深加深二倍，下潛距離幾乎增加了三倍，最大下潛距離增加了 22.5 公分。推斷因水下滑翔機下潛的軌跡並非是直線，而是向下凹的弧線拉長下潛距離。且因為下潛距離增加了近三倍，所以水下滑翔機在水域深的環境中下潛距離會非常的遠。

六、探討入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響

實驗結果得知，入水角度為 30 度到 45 度下潛距離較高。和 0 度角相比，下潛距離最多增加了 6.6 公分。45 度以上時，角度越大下潛距離遞減。推測入水角度小會讓 V_x 增大，加長下潛距離。而入水角度大會讓 V_y 增大，時間加快， V_x 減少，導致下潛距離減少。

根據水下滑翔機的移動軌跡我們發現，扣除機身剛入水、機身轉換過程和機身出水前，其他部分的移動軌跡曲線的確符合所推導公式的二元一次方程式:下潛過程

$$Y = \tan\theta \cdot X_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{a_{1y}}{(V\cos\theta)^2} \cdot X_1^2 \text{ 和 潛行過程 } Y = \tan\alpha \cdot X_2 + \frac{1}{2} \cdot a'_{2y} \cdot \left(\frac{X_2}{V\cos\alpha}\right)^2。$$

入水角度為 70 度以下， θ 角都大約相等。70 度以上，角度越大 θ 角會遞減。推測因 V_y 較大下潛軌跡會先俯衝，受到阻力的分力後讓機身拉升，所導致 θ 角減少，且入水角越大，水流造成機身拉升越明顯。

根據實驗結果， α 角和入水角較無明顯關係，在不同的入水角實驗中， α 角並沒有穩定變化，推測這是因為在轉換時段當重心轉換，機身會往反方向轉動，受到水流和阻力的影響導致轉動的角度都不一定所導致。

七、探討機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

機翼圓滑會讓下潛距離減少，最大下潛距離減少了 5 公分。我們認為因機翼圓滑讓機身受到水流阻力減少，導致 V_y 變大，讓水下滑翔機下潛時間更快，間接縮短下潛距離。所以不像在空中飛的飛機需要盡可能減少阻力，水下滑翔機需要一些阻力才能讓它在水中滯留更久，以便探測。

八、上浮距離的測量

在實驗中，發現配重位置在 ≥ 13 公分時，拋重後造成重心位置產生改變，與未拋重前的重心位置距離太大，造成機身 90° 垂直上浮產生失速情形；若配重在 ≤ 10.5 公分時，在拋重後與未拋重前的重心距離太接近，導致機身後退情形產生。

柒、結論

- 一、水下滑翔機的拋重與配重，有適當的位置和重量，會有較大的下潛距離。如拋重和配重位置各為 7 公分和 10.5 公分，此位置最佳。
- 二、機翼長寬和水下滑翔機下潛距離有關，長度增加，下潛距離會大幅增加。寬度增加，只有些微增加下潛距離。長度對水下滑翔機的下潛距離具有較大的影響。但機身長短對下潛距離沒明顯影響。
- 三、水深對水下滑翔機下潛距離造成影響，水越深就會下潛距離就越遠，所以當水深 2 倍時下潛距離會以 3 倍的方式增加，效果更佳。
- 四、以同一拋重與下潛角度 θ 角而言，拋重後，機身上揚的攻角 α ，主要是機身配重輕重與位置決定的。
- 五、圓滑的機翼與機身皆會增加下潛過程的速度，下速下潛時間，會間接縮短下潛距離。
- 六、本實驗探討後，讓我們了解，空中飛航與水下前行的基本原理。經實驗研究後，發現「水下滑翔機」潛行時，「倒立而行」的現象，卻與飛機騰空穩定飛行機身相反。感覺十分有趣。

捌、參考資料及其他

Paul G. Hewitt (2001)。觀念物理 2。台北市：天下遠見出版。

宋祚忠、林旻宜 (2011)。無動力水下滑翔機之製作。科學教育月刊，340 期 (頁 22~40)。

宋祚忠、郭振華 (2015)。水下機器人—探索深海秘境的超級武器。科學發展，507 期 (頁 14~21)。

桑子 研 (2012)。桑老師教你 123 解物理。新北市：世茂出版。

酒井高男 (2000)。力學的趣味實驗。新竹市：凡異出版。

高木任之 (2013)。圖解超簡單力學。新北市：世茂出版。

郭重吉 (主編) (2017)。國民中學自然與生活科技課本第四冊。臺南市：南一。

新竹女中 (2005)。水中圓舞曲。科展文稿。

潘子恆、黃世疇 (2010)。小型水下載具之設計與分析。工程科技與教育學刊，第七卷第五期。
(頁 731~744)

【評語】 030115

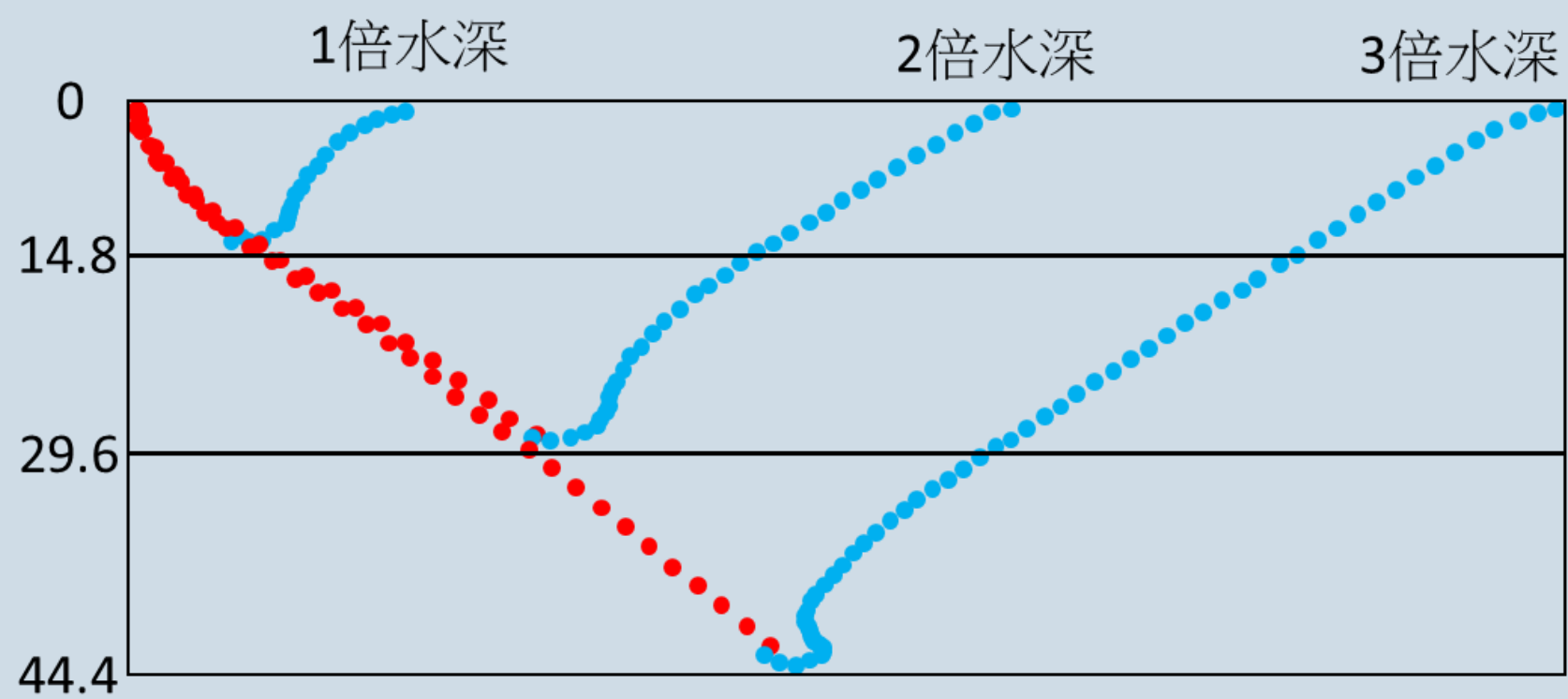
能從雜誌中的資訊，將作品自行製作成功，且設計不同變因來測量水下滑翔機隨著下潛與上浮過程中而前進的距離。相信更能進一步找出最大距離和定點「放置」配重的數據，發揮其實用的價值。

作品海報

- 入水角度越大，上浮距離越遠。
- 機翼圓滑會讓上浮距離增加。

十、不同水深的軌跡

我們利用原型機在不同水深的移動軌跡，並把軌跡重疊，探討水深和軌跡的關係。(拋重、配重位置各為7、10.5公分，重量各為6個硬幣)



【實驗分析】：水深加深，軌跡曲線會放大。

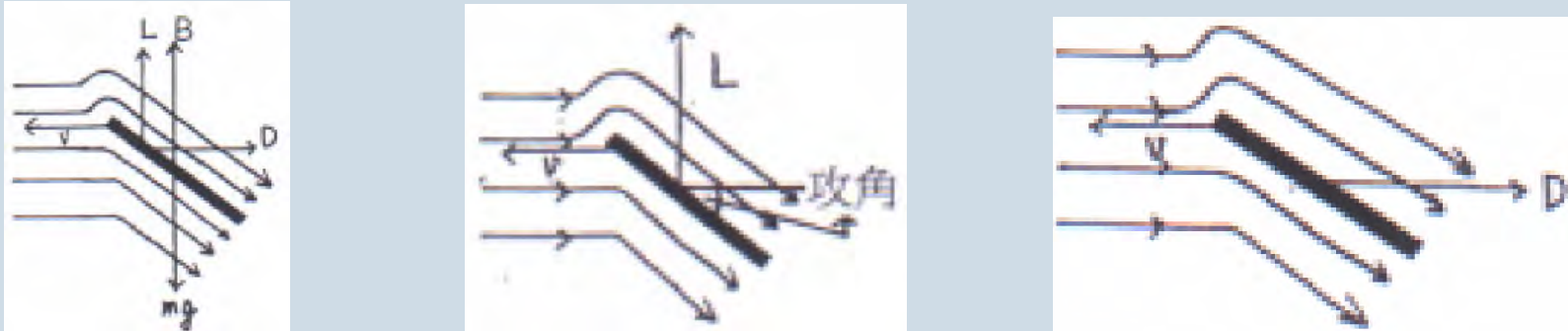
陸、討論

一、基本概念

(一) 水下滑翔機的受力情形討論

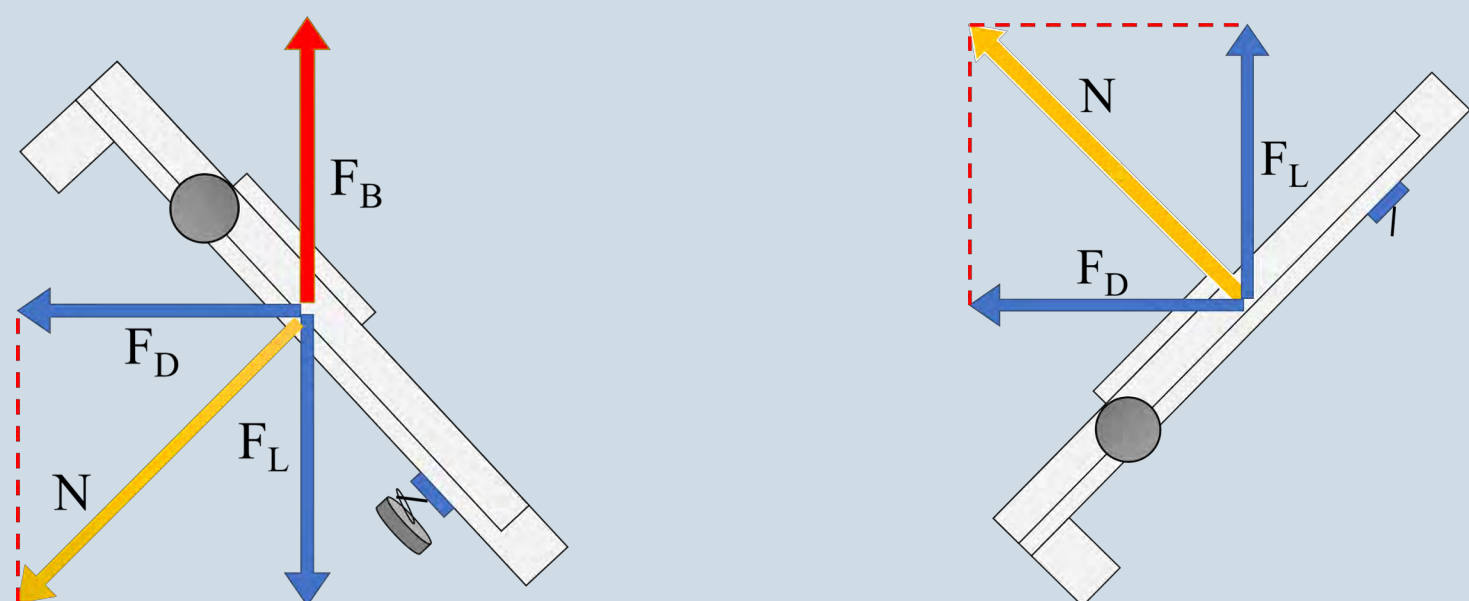
運動物體在流體中之受力在流體中運動之物體所受之力除了重力、浮力外，必有因運動而和流體相互作用的力，其中作用於物體且與運動方向相反的力，稱為阻力(drag force)，而作用於物體且與運動方向垂直的作用力，稱為升力(lift force)，其示意圖如下所示，物體即在這四力的作用下進行它的運動。茲分述下：

- 重力：重力大小為 mg ， m 為物體質量， g 為重力場強度；方向為鉛直向下
- 浮力：浮力大小為 $V\rho g$ ， V 為物體體積， ρ 為液體密度， g 為重力場強度；方向為鉛直向上。
- 升力：由白努力方程式可知，在同一高度流體流速較大處壓力小，流速較小處壓力大； $\Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)$ ，當一物體在流體中運動時，如其面和運動方向有一夾角(稱為攻角)，將使流經其上下表面之流體流速不同，將使物體上下表面有一壓力差而產生一垂直運動方向的淨力，可表為 $F_L = C_L(\frac{1}{2}\rho v^2)A$ ，其中 C_L 為升力係數，隨攻角之增加而增加，但達失速點即急劇下降， A 為平行於自由流方向的最大截面積。
- 阻力：流體流動時作用於物體之阻力一般包含了摩擦阻力、壓力阻力和誘導阻力，摩擦阻力是由流體接近物體表面之薄層即所謂邊界層之剪應力所致，而壓力阻力亦稱為形狀阻力則是因為流體流經物體因剝離現象受到干擾而產生擾動尾流所致，誘導阻力發生在大攻角時，當攻角大於某一臨界角時空氣流之邊界層剝離，而造成一個大的擾動尾流而使阻力大增。阻力可表為 $F_D = C_D(\frac{1}{2}\rho v^2)A$ ，其中 C_D 為阻力係數， A 為垂直於自由流方向的最大截面積。



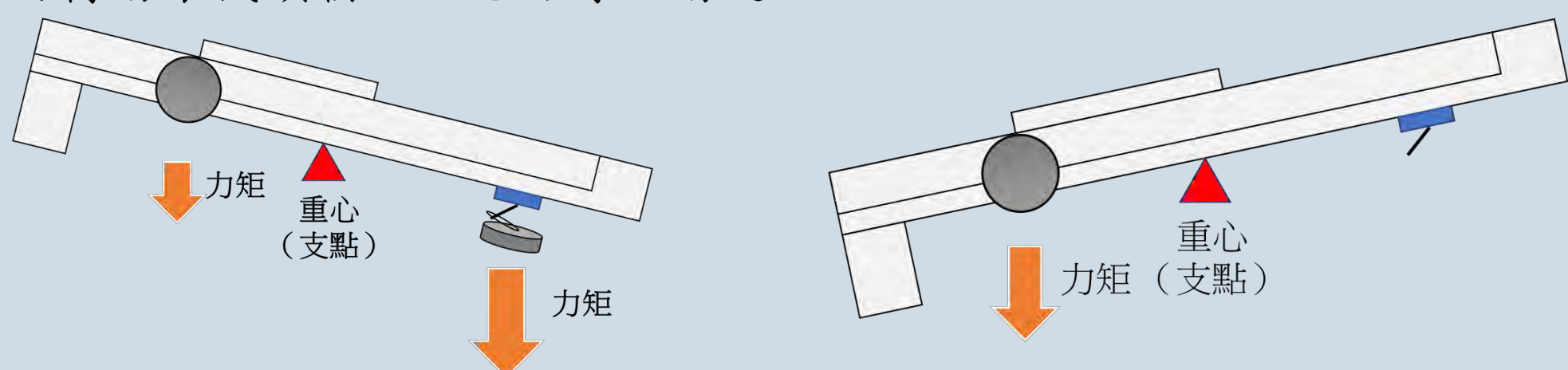
(二) 下潛與上浮

水下滑翔機下潛時根據浮力公式 $B=\rho Vg$ ，可以知道此時重量(含十元重量91.5克重)大於浮力(63.975克重)，所以水下滑翔機會往下沉。脫離拋重重量後上浮時重量(含十元重量48.3克)小於浮力(59.175克重)所以水下滑翔機會往上浮。



(三) 拋重與配重的用意

水下滑翔機下潛時需要拋重的重量讓其能夠下沉，且根據力矩公式 $L=Fd$ 推斷，拋重所造成的力矩(順時針力矩)也可以抗衡配重的力矩(逆時針力矩)，轉動機身讓機頭朝下導致前進。上浮時，配重的力矩會讓機身朝反方向轉動讓機頭朝上，也可導致前進。



(四) 倒立而行

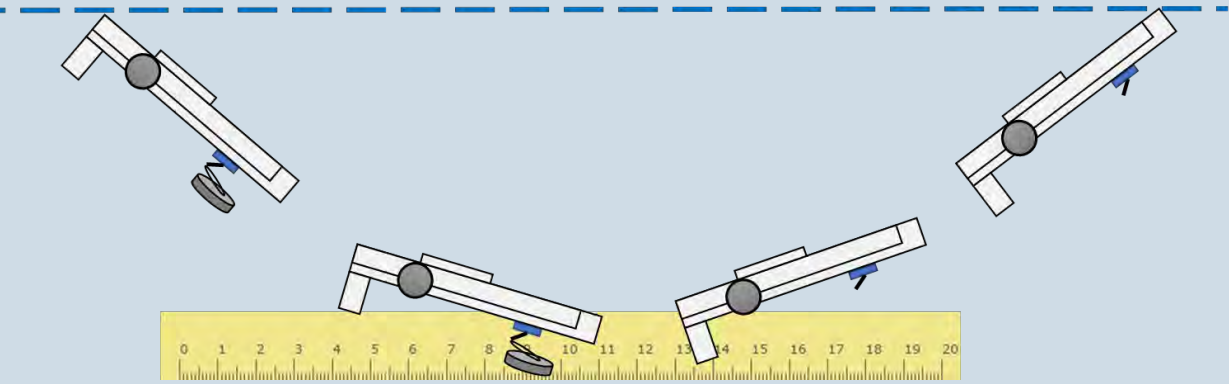
水下滑翔機倒立而行時，因尖端在下，下潛時會把水劃開，能讓水下滑翔機能穩定的前進，代表在水中並不能像在空氣中一樣用飛機的姿勢順利滑翔。

二、拋重和配重的位置和十元數量對水下滑翔機下潛距離的影響

(一) 拋重和配重的位置對水下滑翔機下潛距離的影響

在實驗過程中，我們發現水下滑翔機的配重在10公分以上時，滑翔機機身上浮時會以幾乎與水面平行的角度浮出水面。我們認為如果把機身當成力臂，那麼配重的位置應該在支點附近，導致力矩幾乎為零，力臂幾乎沒有轉動。因此以下支點都以10公分計算。

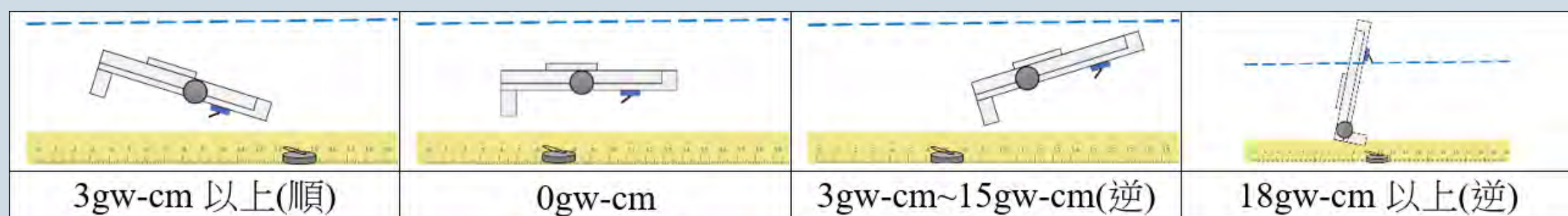
配重在離支點3公分以下時，順時針力矩比逆時針力矩多108gw-cm時下潛距離最遠；配重在離支點3.5公分以上時，順時針力矩比逆時針力矩多86.4gw-cm時下潛距離最遠。推測此力矩讓機身轉動的角度能把水往後推造成最大的下潛距離。而順、逆時針力矩分別為129.6gw-cm和21.6gw-cm時，滑翔機的移動軌跡最接近文稿上所講述的軌跡，如下圖所示。



順時針力矩比逆時針力矩多43.2gw-cm以下時，水下滑翔機下潛時就會往後退，認為因機身重心在後，讓機頭朝上所導致。

水下滑翔機上浮，順時針力矩為21.6gw-cm以上時，機身朝反方向轉動，上浮時會把水往前推，導致後退。為0gw-cm時，機身幾乎沒有轉動，但因下潛時的慣性，所以上浮時還是有些微前進，且以幾乎與水面水平的角度浮出水面。逆時針力矩為21.6gw-cm~108gw-cm時，逆時針力矩較小，機身轉動角度小，上浮時會把水往後推，所以有明顯前進。且力矩越小，上浮距離越遠。129.6gw-cm以上時，因後逆時針矩太大，機身轉動角度(α)大，導致機身失速讓機身幾乎與水面垂直上浮，沒有前進。

(順時針力矩為機頭朝下。逆時針力矩為機頭朝上。)



(二) 拋重和配重的十元數量對水下滑翔機下潛距離的影響

當拋重與配重硬幣數相差正負2個以下，也就是順時針力矩比逆時針多64.8~115.2gw-cm時水下滑翔機下潛距離較高。推測此範圍讓機身轉動的角度(α)可造成水下滑翔機往前的動力。

(三) 水下滑翔機在水中的情況

1. 下潛過程：

水下滑翔機下潛時的速度 V_i 可以分解成X軸的 V_x 和Y軸的

V_y 。 V_x 越大下潛距離越遠。

除了力矩的影響，水下滑翔機下潛時也會受到水流打在機身上的正向作用力(N)，正向作用力分解成的阻力(F_D)和反升力($F_{L(R)}$)，反升力讓水下滑翔機更快下沉，縮短下潛距離。

2. 轉換過程：

水下滑翔機拋棄拋重時，重心轉移，會讓水下滑翔機重新調整角度。在調整完角度前，水下滑翔機晃動，會造成機身些許不穩定。

3. 潛行過程：

水下滑翔機潛行時的速度 V_2 可以分解成X軸的 V_x 和Y軸的 V_y 。 V_x 越大代表上浮距離越遠。和下潛過程相似。

潛行時和下潛相似，會受到水流打在機身上的正向作用力(N)分解成的阻力(F_D)和升力($F_{L(R)}$)，升力及浮力會讓水下滑翔機更快上浮，縮短上浮距離。

三、機翼長寬對水下滑翔機下潛距離的影響

我們發現當機翼長度增長，下潛距離會有明顯的增加；最大下潛距離增加了5.9公分。而機翼寬度增加，下潛距離卻只有些微的增加；最大下潛距離增加了1.2公分。根據展弦比(λ)，機翼加長的展弦比2.85較機翼加寬的展弦比1.27大。發現展弦較大，下潛距離較遠，代表機翼的長度對水下滑翔機的下潛距離具有較大的影響。

在機翼再加長實驗中，當機翼增加為原來的2~3倍時，倍數越多，下潛距離會越遠。且配合水深加深，當機翼增加為原來的3倍時，最大下潛距離竟能超過測量範圍55.5公分，代表展弦比(λ)越大，下潛距離越遠。

四、機身長短對水下滑翔機下潛距離的影響

機身加長時，下潛距離會減少許多，最大下潛距離減少了3公分。如果把加長的機身當成標準來看的話，那麼就等於把機翼的長、寬縮小成原來的2/3倍。所以代表影響下潛距離的因素是機翼，而不是機身。

機身縮短時，下潛都往後滑，我們認為應該是機身只有8.75公分的關係，且每個記號的距離減少為0.25公分。導致機身掛勾位置受影響，掛勾位置間接影響拋重和支點的距離，讓每次實驗下潛都往後滑。

五、下沉水深對水下滑翔機下潛距離的影響

水深變深，因為水流對水下滑翔機的正向作用力變大，導致 V_x 變大，讓下潛距離增加很多，而且讓移動軌跡曲線有放大的效果，所以水下滑翔機在水域較深的環境中，會移動非常的遠。

六、入水角度對水下滑翔機下潛距離的影響

實驗結果得知，入水角度為30度到45度下潛距離較高。和0度角相比，下潛距離最多增加了6.6公分。45度以上時，入水角度越大下潛距離遞減。推測入水角度小會讓 V_x 增大，加長下潛距離。而入水角度大會讓 V_y 增大，時間加快， V_x 減少，導致下潛距離減少。

根據水下滑翔機的移動軌跡我們發現，扣除機身剛入水、機身轉換過程和機身出水前，其他部分的移動軌跡曲線的確符合所推導公式的二元二次方程式：下潛過程 $Y = \tan\theta \cdot X_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{a_{1y}}{(v_{c\theta})^2} \cdot X_1^2$ 和潛行過程 $Y = \tan\alpha \cdot X_2 + \frac{1}{2} \cdot a'_{2y} \cdot \left(\frac{X_2}{v_{c\alpha}}\right)^2$ 。

入水角度為70度以下， θ 角都大約相等。70度以上，角度越大 θ 角會遞減。推測因 V_x 較大下潛軌跡會先俯衝，受到阻力的分力後讓機身拉升，所導致 θ 角減少，且入水角越大，水流造成機身拉升越明顯。

根據實驗結果， α 角和入水角較無明顯關係，在不同的入水角實驗中， α 角並沒有穩定變化，推測這是因為在轉換時段，當重心轉換，機身會往反方向轉動，受到水流和阻力的影響導致轉動的角度都不一定所導致。

七、機翼圓滑對水下滑翔機下潛距離的影響

機翼圓滑會讓下潛距離減少，最大下潛距離減少了5公分。我們認為因機翼圓滑讓機身受到水流阻力減少，導致 V_y 變大，讓水下滑翔機下潛時間更快，間接縮短下潛距離。所以不像在空中飛的飛機需要盡可能減少阻力，水下滑翔機需要一些阻力才能讓它在水中滯留更久，以便探測。

八、上浮距離的測量

在實驗中，發現配重位置在 ≥ 13 公分時，拋重後造成重心位置產生改變，與未拋重前的重心位置距離太大，造成機身90°垂直上浮產生失速情形；若配重在 ≤ 10.5 公分時，在拋重後與未拋重前的重心距離太接近，導致機身後退情形產生。

入水角度越大，會讓下潛距離減少，但是因為 V_y 較大，下潛軌跡會先俯衝，然後拉升，讓 θ 角減少、 V_y 變小、 α 變小，上浮到水面的時間增加，經過轉換後大部分的速度都集中在 V_x ，會讓 V_x 變大，上浮距離有增加的趨勢，所以 α 角度大小與上浮距離有關。

九、機翼圓滑在不同入水角度對水下滑翔機下潛距離和上浮距離的影響

經過配合各種角度後，發現機翼圓滑因阻力較小、 V_i 較大，所以大部分的下潛距離都小於原機。上浮時因受到下潛時較大的速度影響，造成上浮時速度較快，且阻力較小讓 V_x 變大，能拖延水下滑翔機上浮，讓水下滑翔機在水中滯留更久，上浮距離大部分都比原機大。

柒、結論

- 無動力水下滑翔機，利用拋重下拉重力(重量)在水下潛行時，產生潛行速度與下降速度。待滑翔機觸底後拋棄拋重，會因機身的配重位置在機身後端，浮力與升力使機身反轉向上，產生上仰攻角潛行浮升至水面。
- 由實驗得知，無動力水下滑翔機，於水下潛行是倒立方式前進，與飛機飛行方式不同。
- 實驗分析得知，下潛速度的水平分量越大，會增大下潛距離；機身反轉攻角適當，可增大潛行距離。當反轉上仰，攻角太大，會失速而直接上浮。
- 水下滑翔機的拋重與配重，有適當的位置和重量，會有較大的下潛距離。如拋重和配重位置各為7公分和10.5公分，此位置最佳。
- 機翼長寬和 underwater 滑翔機下潛距離有關，長度增加，下潛距離會大幅增加。寬度增加，只有些微增加下潛距離。長度對水下滑翔機的下潛距離具有較大的影響。但機身長短對下潛距離沒明顯影響。
- 水深對水下滑翔機下潛距離造成影響，水越深就會下潛距離就越遠，所以當水深2倍時，下潛距離會以3倍的方式增加，水深3倍時，下潛距離會以5.1倍的方式增加，效果更佳。
- 水深加深，會讓水下滑翔機移動軌跡曲線具有放大的效果。
- 以同一拋重與下潛角度 θ 角而言，拋重後，機身上揚的攻角 α ，主要是機身配重輕重與位置決定的。
- 圓滑的機翼與機身因阻力較小，增加下潛過程的速度，加速下潛時間，間接縮短下潛距離，同時在下潛過程產生較大的速度，在潛行過程中因速度較大，阻力較小，讓 V_x 變大繼而增加上浮距離。
- 水下滑翔機須配合入水角度才有較大的下潛距離，尤其是30度到45度的範圍；相對之下，要產生較大的上浮距離，要配合較小的 α 角度。
- 本實驗探討後，讓我們了解，空中飛行與水下前行的基本原理。經實驗研究後，發現「水下滑翔機」潛行時，「倒立而行」的現象，卻與飛機騰空穩定飛行機身相反。感覺十分有趣。

捌、參考資料及其他

- Paul G. Hewitt (2001)。觀念物理2。台北市：天下遠見出版。
- 宋祚忠、林旻宜 (2011)。無動力水下滑翔機之製作。科學教育月刊，340期(頁22-40)。
- 宋祚忠、郭振華 (2015)。水下機器人—探索深海底境的超級武器。科學發展，507期(頁14-21)。
- 桑子 研 (2012)。桑老師教你123解物理。新北市：世茂出版。
- 酒井高男 (2000)。力學的趣味實驗。新竹市：凡異出版。
- 高木任之 (2013)。圖解超簡單力學。新北市：世茂出版。
- 郭重吉 (主編) (2017)。國民中學自然與生活科技課本第四冊。臺南市：南一。