

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100013

參展科別 工程學

作品名稱 旋葉構型對泵浦抽水優化之探討

得獎獎項 四等獎

就讀學校 國立中科實驗高級中學

指導教師 何家齊、李柏翰

作者姓名 張誠隆、蔡寬儒、陳弘哲

關鍵詞 旋葉構型、泵浦、總效率

作者簡介



大家好，我們是來自台中的高二生，很開心能有這個機會參與國際科展。高一時，三位個性截然不同的我們認識了彼此，並一起經歷了一段繁忙又不乏趣味的時光。我們對實驗充滿了興趣，希望能藉由這次的研究，增加泵浦在工業上的競爭力。從這次組隊中，我們增加了團隊間溝通的能力，希望這次能在國際科展中有滿滿的收穫。

摘要

旋葉之細部結構跟泵浦效率有密切的關連[1,2]，本研究專注探討不同幾何形狀旋葉構型之效應，我們先利用 3D 列印快速成形之技術優勢，做出 50 種不同的旋葉，分別有圓弧形、橢圓弧形及直立形進行實驗測試，並計算其總效率找出最高值的旋葉，編碼為 A2-ea281-ia279-8。

將最高值旋葉，套入田口法進行優化，目標是望大。經過信噪比及均值分析後，發現影響總效率之最大參數是旋葉數，其次是出口角，最後是入口角，田口法中得出，重新設計的更細部參數的最佳旋葉是 A2-ea28-ia23-8，同時利用機器學習建立迴歸函數模型，透過訓練的模型，預測出效率值，最後經過 COMSOL Multiphysics 軟體模擬檢測出 A2-ea28-ia23-8 依然保持最佳的內部流場狀況，並運用自行設計之簡易透明泵浦，進行測試與印證。

Abstract

There is a close relationship between the structure of the pump impeller and the pump efficiency [1,2]. This study will focus on the effect of different geometrical shape of the impeller's configuration. By using 3D printer, first, we produced fifty kinds of shapes of pump impellers, including circular ones, elliptical ones and vertical ones, to test. In addition, the maximum pump efficiency was found and labeled as A2-ea281-ia279-8 at the first stage.

We chose the one which has the best overall efficiency from the fifty kinds of shapes to perform the Taguchi method. The goal of the optimization was the larger-the-better characteristic. After the process of the signal-to-noise ratio and the average of objective value, the parameters effecting the pump efficiency were ranked as the number of the pump impellers, the blade exit angle and the blade inlet angle. From the results of the Taguchi method, we found the fact that the optimized one is A2-ea28-ia23-8. The Machine leaning of statistics are used to analyze by a regression function model. Through the trained model, we are able to predict the efficiency value. In addition, some tests were validated by the analysis of COMSOL Multiphysics. The inner flow field of optimized impeller was also tested by our designed pump.

一、前言

泵浦的運作原理，是藉由對液體做功使水達到運輸的效果，在日常生活中使用十分廣泛，園藝的灑水器、魚缸的循環過濾泵浦、或家中的抽水馬達，都可見到泵浦的蹤跡，工業應用方面如煉油廠與化工廠之流體輸送及工具機械之潤滑都需要借助泵浦的操作，可見泵浦扮演角色的重要性，如同心臟是維持生物生命現象的最基本要素。

一般泵浦輸出的效能涉及馬達設計、旋葉設計及泵殼的設計，其中旋葉設計的好壞在整體系統運轉中影響輸出效能最大，因為它是與所輸送的流體做直接接觸與能量轉換，過程中需要應用到流體力學三維黏性不可壓縮的擾流現象探討，以及流固偶合移動邊界之旋轉機械分析，故本研究將著重於旋葉的設計。藉由改良及擴充現有旋葉設計，並應用快速成形與先進輔助分析與優化設計軟體，以提升泵浦的流量及總效率，進而增進泵浦相關領域產業競爭力。

本研究主要目的有以下四點：

- (一)探討用 3D 列印的旋葉構型對泵浦總效率之影響效應，而總效率與流量率、揚程、耗電功率之值有關聯，期望提出最佳效率之旋葉。
- (二)經由田口實驗計畫法優化，以進一步優化旋葉。
- (三)透過機器學習中的監督式學習方法建立相關模型，嘗試用實驗數據標記總效率來預測效率。
- (四)用 COMSOL Multiphysics 軟體模擬[3]驗證實測結果是否相符。

二、研究方法或過程

(一) 文獻探討

1. 原理探討

離心泵浦以電力驅動馬達帶動內部旋葉轉動，流體由旋葉軸心區域，因葉片曲面

連續造型產生之離心力與壓力，驅使流體往旋葉外側與機殼間的通道流動，至泵浦出口處獲得壓力提升而成為所輸送泵流體之揚程。在內部流場的流動現象極為複雜多變，是一種在流體力學中所稱三維不可壓縮的擾流現象，統御方程式為非線性偶合之連續方程式與動量方程式[4]，相關參數包含三維方向的速度場與壓力變化，如欲以實驗方式量取這些數值極為困難。

在文獻[5]中，楊富翔先生以計算流體力學套裝軟體進行數值計算，分析流場現象與性能曲線，並以全因子實驗法進行泵浦設計參數之數值優化預測。Bozzi 等人探討應用於生醫領域磁力懸浮直立型扇葉離心泵之流體動力學與血栓潛勢特性[6]。Elyamin 等人使用 Fluent 軟體分析探討旋葉數量對泵性能之影響[7]。Zhou 等人結合計算流體力學與田口法進行離心泵葉片優化研究[8]。大多文獻只針對單一外型旋葉來探討，甚少文獻同時探討多種幾何構型，由於離心泵浦運轉時內部流體流動現象與旋葉構型設計有極高的關聯，進而對整體泵浦性能表現有密切的影響。

2. 田口實驗計畫法

田口法是一個透過實驗來進行參數最佳化的方法，是由 1950 年代日本田口玄一博士首創立的一種低成本、高效益的質量工程方法。利用簡單的直交表實驗設計，以少量的實驗數據來進行分析[9]。

田口法的獨立分析：根據表 1 的直交表，當無人在分析因子 1 對實驗結果的影響時，我們可以將實驗 1+2 的平均值與 3+4 的平均值比較即可，不必擔心因子 2、3 是否在其中干擾，因為在實驗 1+2 中，因子 2 的水準在 1、2 出現的次數，與 3+4 中因子 2 的水準 1、2 出現的次數相等，我們稱此為可獨立分析之特性[10]。

表 1 田口法的概念圖(L42³)

Experiment Number	Column		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

田口法被應用來決定我們旋葉的設計參數對於總效率的影響，而且最佳參數組合會使總效率最大，L4(2³)直交表被選用來當做實驗設計法，其中，每一個參數是兩水準，所以要執行四組實驗，如表 1 所示。

為了要獲得最大化總效率，在田口法訊噪比 S/N ratio 的研究採用望大，基於以下公式：

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

其中，y_i 是第 i 組葉片設計參數所量測到的總效率，n 是測試數，此變異數分析 (ANOVA) 是經由 Minitab 軟體計算所得到的參數設計對於總效率的影響[10]，藉由此方法，最佳參數組合可以被評估。

本研究擬以實驗方法量測旋葉整體輸出效能，再透過電腦輔助分析軟體協助獲得內部速度、壓力與應力分佈，進一步優化主要設計參數來解釋實驗量測結果，達成研究目的。

3. 機器學習法應用於旋葉量測

機器學習是人工智慧的子領域，透過資料特徵建立預測模型，以協助人類在各領域解決問題。機器學習可分為監督式學習、非監督式學習以及半監督式學習。我們選

擇監督式學習中的多元線性迴歸 (Multivariate linear regression) 方法，利用測試的旋葉資料進行訓練並建立線性迴歸模型，一般模型為： $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e$ 。

X：自變數 (分析對象)、Y：應變數 (對應結果)、 β ：權重、e：偏差值。

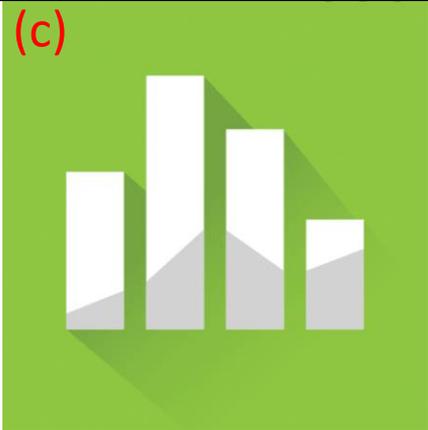
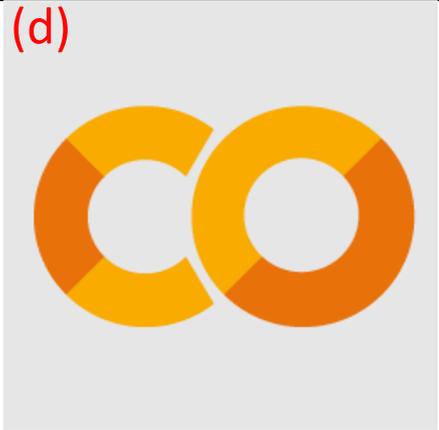
在本研究中，將旋葉數、厚度、入口直徑、入口角度和出口角度設成 X 變數 (旋葉數為 X_1 、厚度為 X_2依此類推)，並將效率值設為 Y 變數。 β_0 為 Y 截距 (起始值)， $\beta_1 \sim \beta_p$ 為未知且須估計的迴歸係數。以均方誤差(MSE)來評估 AI 模組的準確性。最終透過輸入參數(X)至模型可得到預測之效率值(Y)，便能減少實驗成本與時間。

(二) 研究設備及器材

本研究使用之軟硬體設備及實驗檢測器材如下說明。

1. 電腦輔助設計分析軟體

泵浦旋葉具有複雜的立體曲面外型，欲製作或研究此種不規則的三維旋葉構造，最重要的第一步就是要在電腦上進行 3D 建模，本研究使用 TINKERCARD 3D 繪圖軟體如圖 1(a)，設計各式不同外觀造型旋葉。另外，在旋葉效能分析預測與泵浦內部流場研究採用 COMSOL Multiphysics 軟體，如圖 1(b)為國內首家將系統模擬概念導入業界，提供工業 4.0 解決方案的動態模擬軟體，在田口法中使用 Minitab 來分析實驗數據如圖 1(c)，而我們使用 Google Collaboratory 來編寫機器學習模型如圖(d)。

<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 
<p>圖 1(a) Tinkercad</p>	<p>圖 1(b) COMSOL Multiphysics</p>
<p>(c)</p> 	<p>(d)</p> 
<p>圖 1(c) Minitab</p>	<p>圖 1(d) Google Colaboratory</p>

2. 3D 列印與旋葉材質

建模完成後利用 3D 印表機列印旋葉，如圖 2(a)，使用的塑料為 ABS 塑料，如圖 2(b)。而 ABS 塑料的優缺點比較，如表 2 所示。

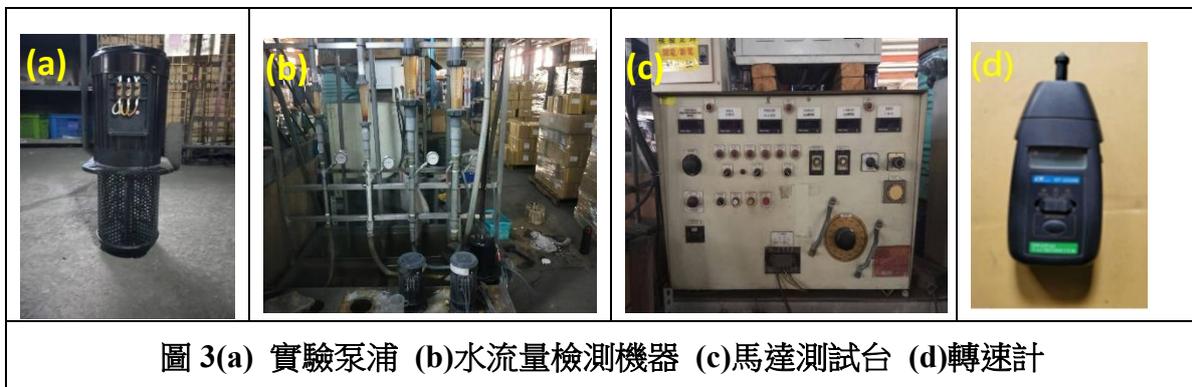
<p>(a)</p> 	<p>(b)</p> 
<p>圖 2(a) 3D 列印機(Makerbot) (b)列印 ABS 塑料</p>	

表 2 ABS 塑料優缺點

優點	缺點
耐水	遇冷收縮
有耐熱性	列印時會產生有毒味
耐化學藥品性	耐候性較差
列印快速	

3. 實驗檢測器材

組裝泵浦如圖 3(a)，應用水流量檢測機器如圖 3(b)，馬達測試台如圖 3(c)及轉速計如圖 3(d)所示。馬達測試台是經 SGS 協會檢驗合格，量取 R 相電流、S 相電流、T 相電流，取平均電流並做電壓檢測，基於安全考量本量測須在專業人員協助下進行。



(三) 研究流程

以下是我們的研究流程，如圖 4 所示。

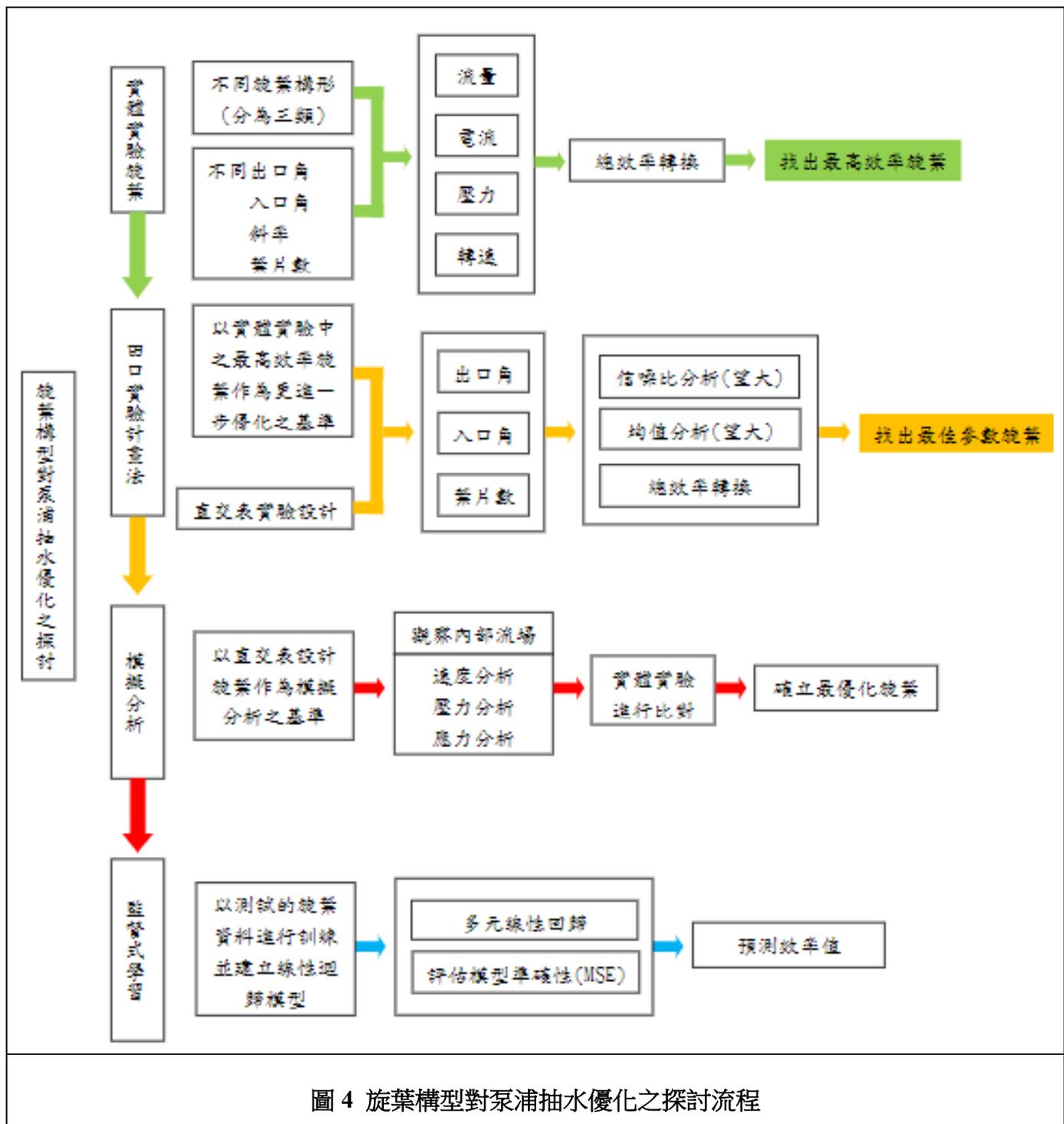


圖 4 旋葉構型對泵浦抽水優化之探討流程

1. 實際測量之數據

(1) 資料分析

製作出的數值皆為三次之平均，加上標準差，並分析比較各數據差異。

(2) 效率計算

泵揚程 H

$$H = (Z_3 - Z_4) + \frac{(P_3 - P_4)}{\gamma_{H_2O}} + \frac{(V_3^2 - V_4^2)}{2g} \quad (2)$$

本實驗中: $(Z_3 - Z_4)$: 泵前後端壓力測量點高度差 (m); H: 揚程單位 (m);

$\gamma_{H_2O} = \rho_{H_2O} \cdot g$; ρ_{H_2O} : 水密度 997.0751 (kg/m³); g: 重力加速度 9.81 (m/s²)

由於本實驗是以壓力錶量測進出口壓力，因此 P_3 , P_4 直接以壓力錶量到的數值帶入可得:

$$H = 0.53 + \frac{(P_3 - P_4)}{\gamma_{H_2O}} \quad (3)$$

在此 $Z_3 - Z_4 = 0.53$ (m); $V_3 = V_4$ (管徑相同)

(3) 電功率 L(kW)

$$L = \frac{IV}{1000} \quad (4)$$

I 電流 (A); V 電壓 (V)

(4) 水馬力 L_w (Water Horse Power)

$$L_w = \frac{\gamma HQ}{102} \quad (5)$$

L_w : 水馬力 (kW); γ : 水比重量 (1000kg/m³); Q: 泵流量 (m³/s)

(5) 總效率 η_{gr}

$$\eta_{gr} = \left(\frac{Lw}{L} \right) \times 100\% \quad (6)$$

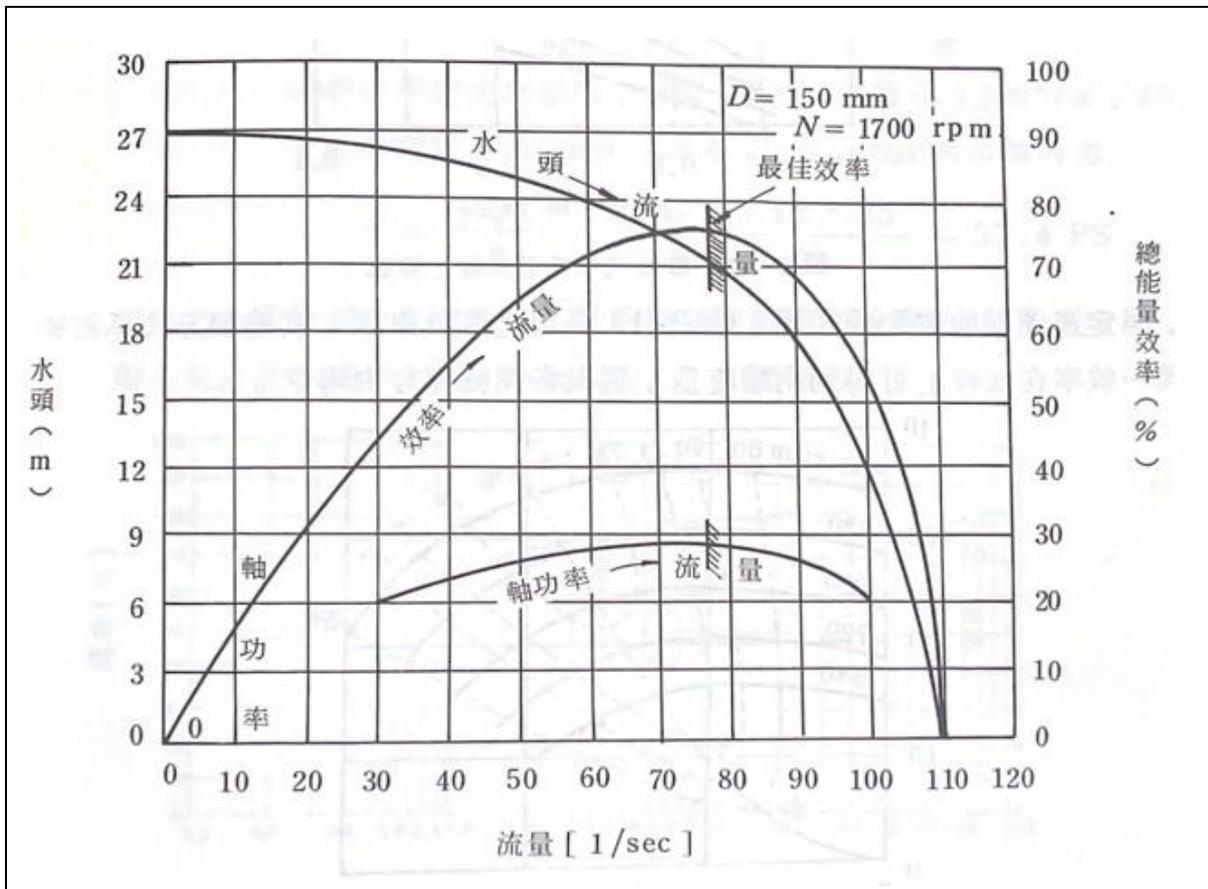


圖 5 單級雙吸式離心泵在固定轉速 1700 R.P.M.，直徑 150 mm 的旋葉之數據[2]

泵之特性曲線一般橫軸取流量，縱軸取揚程、效率及軸馬力，如圖 5，為固定轉速 1700 rpm，直徑 150 mm 之單級雙吸式離心泵特性曲線，此曲線可依相似定律，變動轉速，劃出其它特性曲線。由圖 5 顯示當流量為零時，揚程最大，此時稱關閉水頭，此時軸馬力稱關閉馬力。泵之運轉需根據特性曲線操作，且應選擇效率最大處，如圖效率最大時流量約 75 L/s，此時依 H-Q 曲線可選出相對揚程 22m。

2. 軟體模擬

(1) 模擬軟體 COMSOL Multiphysics 對於流體流動問題解決方式

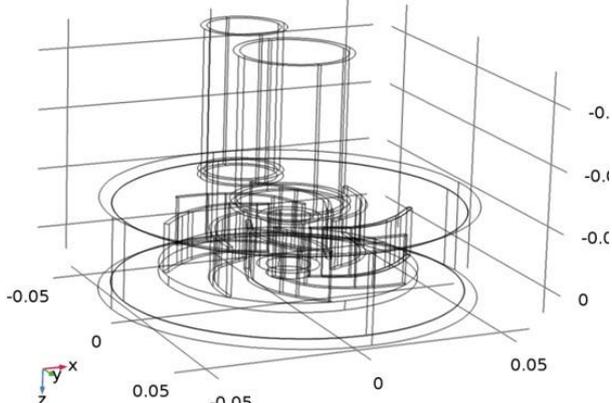
流體流動可以通過動量、質量和能量守恆定律來準確描述。描述這些方式最準確的是偏微分方程式(PDE)，且是非線性的，然而大多數情況中這些方程式無法求解的，但我們可以在空間和時間上進行離散化處理，這樣就可以以代數方程式的形式獲得偏微分方程的近似值，亦即用數值模型來近似數學模型。對於空間方面的數值計算問題，COMSOL Multiphysics 是使用有限元素方法完成空間離散的[3]。

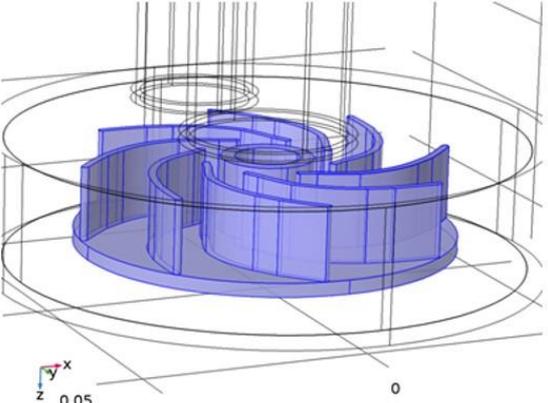
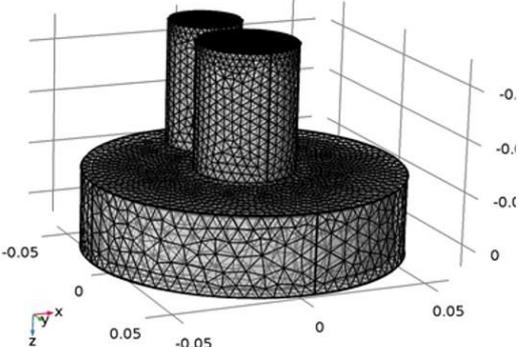
(2) 分析軟體 COMSOL Multiphysics 模擬分析程序

COMSOL Multiphysics 模擬分析軟體的建模及分析過程[11]以表 3 介紹。

COMSOL Multiphysics 是以有限元素法為基礎架構所發展的數值模擬分析平台，涵蓋聲學、電磁波、熱傳、疲勞、結構力學、非線性結構材料 多體動力學、計算流體力學、電池與電燃電池、波光學、電化學、半導體等 30 餘種工程模擬分析應用模組，且針對多重物理量模擬於實際工程應用上的需求，其所發展之多重物理耦合模擬分析功能，提供使用者能以更具彈性的方式來處理各領域交互作用的多重物理耦合模型分析，將使得電腦輔助工程技術能更精確也更有效率的模擬工程上的實際現象。

表 3 COMSOL Multiphysics 模擬分析軟體的建模及分析過程

過程	圖例	功能
幾何模型		繪製 3D 圖形，包括流場區域及旋葉本體，並選定尺寸以及模擬每個不同的區域所要用的材質。

<p>設定物理條件</p>		<p>訂定物理條件包括旋轉區域、旋轉速度、旋轉方向、開放邊界、流動連續、旋轉框架、邊界負載、固定約束、流速等等。</p>
<p>訂定網格</p>		<p>對分析空間進行適當切割，並評斷硬體設備的性能以及此模擬與實測間的準確度決定網格的粗細。</p>

(四) 實驗的變因

1. 控制變因:

- (1)使用同一顆泵浦，電動機的馬力規格相同。
- (2)水的供應量充足，供水液位高度相同。
- (3)旋葉底盤大小及厚度相同，基礎旋葉直徑是 8.2 公分。

2. 操作變因:

(1) 旋葉形狀及葉片數量

本研究先製作出 350 個旋葉如圖 6，再取其中 50 個做討論，而我們將這 50 個分為三類：圓弧形、橢圓弧形及直立形，再依相關形狀參數發展四種不同版本，同時設計葉片數目由 4 到 8 片，捨棄其中無對稱性部分如表 5、7 及 9，以 none 表示。



圖 6 本研究 3D 列印之所有旋葉 (約 350 個)

(2) 圓弧形旋葉及各版本時程發展差異，如表 4 所示，Type A1 代表圓弧形第一版。

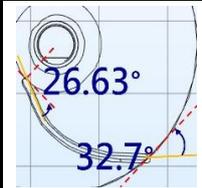
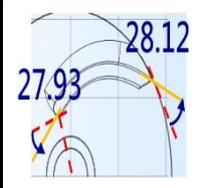
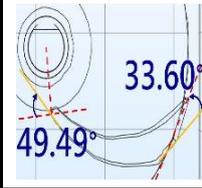
表 4 圓弧形旋葉版次與發展差異

版次	發展差異
Type A1	標準旋葉，尾端切齊，採用後傾式設計，通常旋葉數量少(旋葉數量 10 片以內)，可產生較大揚程[12]。
Type A2	厚度加厚，有弧度。
Type A3	考量葉片數增加時，可能會造成流道狹窄問題，將旋葉改成一長一短。由於第二及四種設計為奇數葉片，無法設計出對應的旋葉。
Type A4	每葉旋葉流道寬度固定，尾端拉長，後面加厚。

本族群(Type A)旋葉共 18 種設計，其俯視圖、不同葉片設計成型、及參數表如表 5 所示。而在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。(族群 AS 與族群 T 的命

名方式有所不同，如：族群 AS-出口角(ea)入口角(ia)-葉片數；族群 T-出口斜率(es)入口斜率(is)-葉片數)。

表 5 圓弧形旋葉編碼總表

					
Type A1	A1-ea327- ia266-4	A1-ea327- ia266-5	A1-ea327- ia266-6	A1-ea327- ia266-7	A1-ea327- ia266-8
					
Type A2	A2-ea281- ia279-4	A2-ea281- ia279-5	A2-ea281- ia279-6	A2-ea281- ia279-7	A2-ea281- ia279-8
		none		none	
Type A3	A3-ea277- ia341-4		A3-ea277- ia341-6		A3-ea277- ia341-8
					
Type A4	A4-ea336- ia494-4	A4-ea336- ia494-5	A4-ea336- ia494-6	A4-ea336- ia494-7	A4-ea336- ia494-8

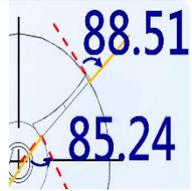
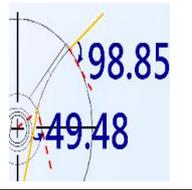
(3) 橢圓弧形旋葉及各版本發展時程差異，Type S1 代表橢圓弧形第一版。

表 6 橢圓弧形旋葉版次與發展差異

版次	發展差異
Type S1	考量弧形旋葉耗電功率小、直立形旋葉流量率大的各自優勢，將旋葉一邊採橢圓弧狀，一邊採直立狀以期達成最佳旋葉構型之設計。
Type S2	利用前傾式旋葉流量大和後傾式旋葉總效率高的優勢，採對稱型設計，增加了後傾式之旋葉，設計前傾及後傾式旋葉組合。
Type S3	增加各旋葉底端與水接觸面積，藉此提高流量率。
Type S4	改變旋葉的擺放角度(出口角)，藉由角度差異，試圖改善旋葉的性能。

本族群(Type S)葉片共 18 種設計，其俯視圖、不同葉片設計成型及參數如表 7 所示。而在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。

表 7 橢圓弧形旋葉編碼總表

					
Type S1	S1-ea885-ia852-4	S1-ea885-ia852-5	S1-ea885-ia852-6	S1-ea885-ia852-7	S1-ea885-ia852-8
		none		none	
Type S2	S2-ea988-ia494-4		S2-ea988-ia494-6		S2-ea988-ia494-8

					
Type S3	S3-ea661- ia451-4	S3-ea661- ia451-5	S3-ea661- ia451-6	S3-ea661- ia451-7	S3-ea661- ia451-8
					
Type S4	S4-ea539- ia911-4	S4-ea539- ia1911-5	S4-ea539- ia911-6	S4-ea539- ia911-7	S4-ea539- ia911-8

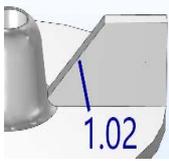
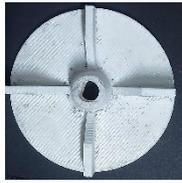
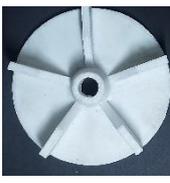
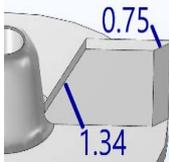
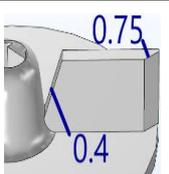
(4) 直立形旋葉及各版本發展時程差異如表 8 所示，Type T1 代表直立形第一版。傳統旋葉設計以圓弧造型為主，本研究嘗試以長短交替直立葉片設計，檢視泵浦性能是否有所突破及改良。

表 8 直立形旋葉版次與發展差異

版次	發展差異
Type T1	標準直向式旋葉。
Type T2	將旋葉改為長短交替葉，增加泵內部流體體積。
Type T3	將第二版旋葉的斜率增加，檢視其提高流量率效果。
Type T4	在旋葉底部增加一條橫槓，並將葉片突出底板，以增加打水面積。

本族群旋葉共 4 種設計，其俯視圖、不同葉片設計成型及參數如表 9 所示。在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。

表 9 直立形旋葉編碼總表

					
Type T1	T1-es0- is102-4	T1-es0- is102-5	T1-es0- is102-6	T1-es0- is102-7	T1-es0- is102-8
		none		none	
Type T2	T2-es75- is134-4		T2-es75-is134- 6		T2-es75-is134-8
		none		none	
Type T3	T3-es75- is40-4		T3-es75- is40-6		T3-es75- is40-8
		none		none	
Type T4	T4-es69- is158-4		T4-es69- is158-6		T4-es69- is158-8

(5) 直交表的操作變因

以本研究所設計的直交表實驗為例，為 4 實驗，3 因子，2 水準的直交表，如表

10 所示，常記為 $L_4(2^3)$ 。若以正規的實驗方法，則需要進行 8 次實驗，考慮試驗中的偏差，進行多次測量，實驗次數的差異將成等差的形式上升。

表 10 直交表操作變因

實驗次數	A2-ea23-ia23-7	A2-ea23-ia28-8	A2-ea28-ia23-8	A2-ea28-ia28-7
旋葉形狀圖				
葉片出口角(度)	23	23	28	28
葉片入口角(度)	23	28	23	28
葉片數目	7	8	8	7

3. 應變變因：

(1) 旋葉的總效率 (2) 旋葉的流量率 (3) 旋葉的壓力 (4) 旋葉的耗電功率。

(五) 泵浦草圖設計

設計旋葉置於一透明壓克力盒，旋轉芯軸帶動旋葉，並連結一透明管使水能沿著管道順利運送，最後設計一 U 型管使水回流至水箱中，形成一個簡單不斷循環之泵浦裝置，如圖 7 所示。

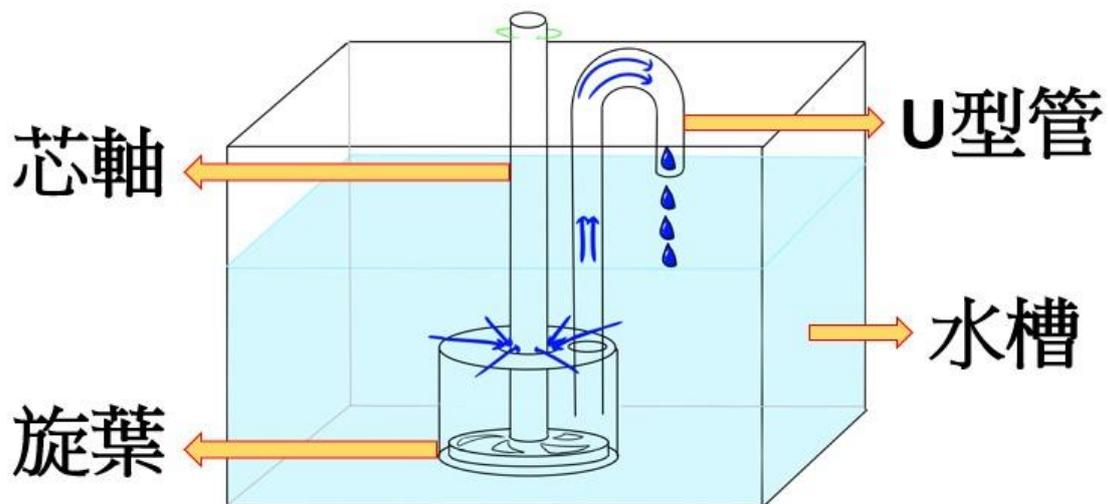


圖 7 簡易泵浦設計草稿

三、研究結果與討論

本研究透過實驗量測所有旋葉輸出流量率、揚程與總效率等數據如圖 8，以獲取不同構型設計對泵浦輸出性能之效應比較，並擷取本階段之初期最佳旋葉構型與參數。



圖 8 本研究 3D 列印之旋葉

泵浦之總效率大小與流量率和揚程有密不可分的關係，經實驗獲得所有旋葉的最大總效率如表 11(最高為 A2-8)，而除了透過總效率來評比一個旋葉之綜合表現，分別

探討旋葉之流量率和揚程，也可區別每個旋葉適合用在哪個時機，像是若道路水溝積水，又快速地將水排出，則適合用流量率大的旋葉，表 12 為各旋葉的最大流量率(最高為 A2-7)，而當大廈想將水送往高層樓時，則適用於揚程大的旋葉，表 13 為各旋葉的最大揚程(最高為 T4-8)，而本研究主要探討不同旋葉設計對總效率之影響，因此後面將用圖表加以分析各個旋葉之總效率優劣。

表 11 各旋葉總效率比較

編號	效率值(%)	編號	效率值(%)	編號	效率值(%)
S1-4	21.30	A1-4	27.19	T1-4	23.50
S1-5	24.01	A1-5	27.08	T1-5	24.73
S1-6	24.40	A1-6	26.82	T1-6	25.36
S1-7	25.14	A1-7	27.44	T1-7	25.47
S1-8	24.97	A1-8	26.39	T1-8	26.75
S2-4	24.22	A2-4	27.71	T2-4	23.08
S2-6	23.72	A2-5	25.98	T2-6	24.95
S2-8	25.25	A2-6	25.84	T2-8	25.33
S3-4	23.47	A2-7	25.92	T3-4	24.34
S3-5	23.31	A2-8	28.33	T3-6	25.67
S3-6	25.02	A3-4	26.37	T3-8	27.48
S3-7	24.19	A3-6	27.08	T4-4	24.82
S3-8	25.47	A3-8	27.97	T4-6	26.45
S4-4	23.15	A4-4	26.08	T4-8	26.46
S4-5	22.79	A4-5	27.06		
S4-6	25.13	A4-6	28.30		
S4-7	25.30	A4-7	27.35		
S4-8	24.93	A4-8	26.83		

表 12 各旋葉流量率比較

編號	流量率(LPM)	編號	流量率(LPM)	編號	流量率(LPM)
S1-4	100.0	A1-4	103.8	T1-4	100.3
S1-5	100.0	A1-5	107.5	T1-5	102.2
S1-6	100.3	A1-6	107.2	T1-6	104.0
S1-7	100.3	A1-7	108.7	T1-7	104.7
S1-8	97.2	A1-8	108.0	T1-8	106.2
S2-4	99.0	A2-4	106.3	T2-4	100.0
S2-6	100.3	A2-5	107.0	T2-6	102.7
S2-8	102.8	A2-6	107.5	T2-8	105.8
S3-4	98.7	A2-7	109.3	T3-4	100.0
S3-5	99.5	A2-8	107.3	T3-6	103.3
S3-6	100.0	A3-4	100.7	T3-8	107.5
S3-7	100.2	A3-6	103.5	T4-4	100.5
S3-8	100.0	A3-8	105.8	T4-6	106.3
S4-4	98.8	A4-4	101.0	T4-8	107.8
S4-5	99.3	A4-5	100.7		
S4-6	100.0	A4-6	105.0		
S4-7	100.5	A4-7	103.8		
S4-8	100.0	A4-8	101.7		

表 13 各旋葉揚程之比較

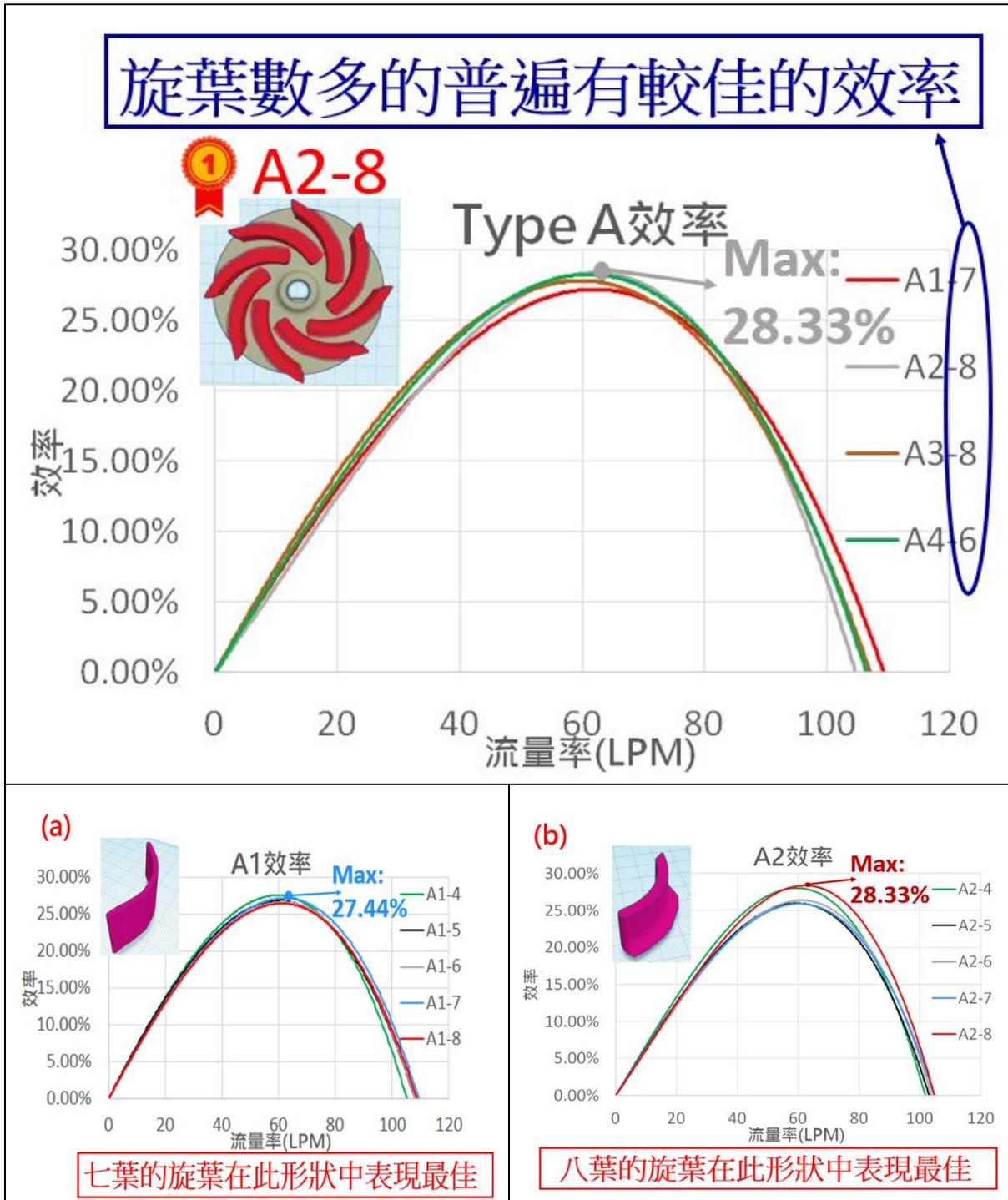
編號	揚程(m)	編號	揚程(m)	編號	揚程(m)
S1-4	13.3	A1-4	14.5	T1-4	13.4
S1-5	13.0	A1-5	14.6	T1-5	13.7

S1-6	14.0	A1-6	14.7	T1-6	14.5
S1-7	13.6	A1-7	15.0	T1-7	13.5
S1-8	14.4	A1-8	14.6	T1-8	14.6
S2-4	13.6	A2-4	14.7	T2-4	13.3
S2-6	13.9	A2-5	14.7	T2-6	14.6
S2-8	14.5	A2-6	15.0	T2-8	15.0
S3-4	13.3	A2-7	14.8	T3-4	13.5
S3-5	13.4	A2-8	15.1	T3-6	14.2
S3-6	14.5	A3-4	14.3	T3-8	14.8
S3-7	14.0	A3-6	14.7	T4-4	13.8
S3-8	14.9	A3-8	14.9	T4-6	14.8
S4-4	13.1	A4-4	13.8	T4-8	15.4
S4-5	14.2	A4-5	14.2		
S4-6	14.4	A4-6	14.7		
S4-7	14.6	A4-7	14.5		
S4-8	15.0	A4-8	14.2		

(一) 各旋葉總效率之分析

在文獻[13]中，作者利用總效率來評斷一個旋葉的優劣，而我們更加以分析比較不同構型、版次與旋葉數之差異。圖 9(a)、(b)、(c)、(d)、(e)為分析圓弧形旋葉，而圖 10(a)、(b)、(c)、(d)、(e)為分析橢圓弧形旋葉，圖 11(a)、(b)、(c)、(d)、(e)為分析直立形旋葉，而前面皆為縱向比較，最後將三種旋葉形狀中最佳的旋葉進行比對，如圖 12。

1. 圓弧形旋葉總效率



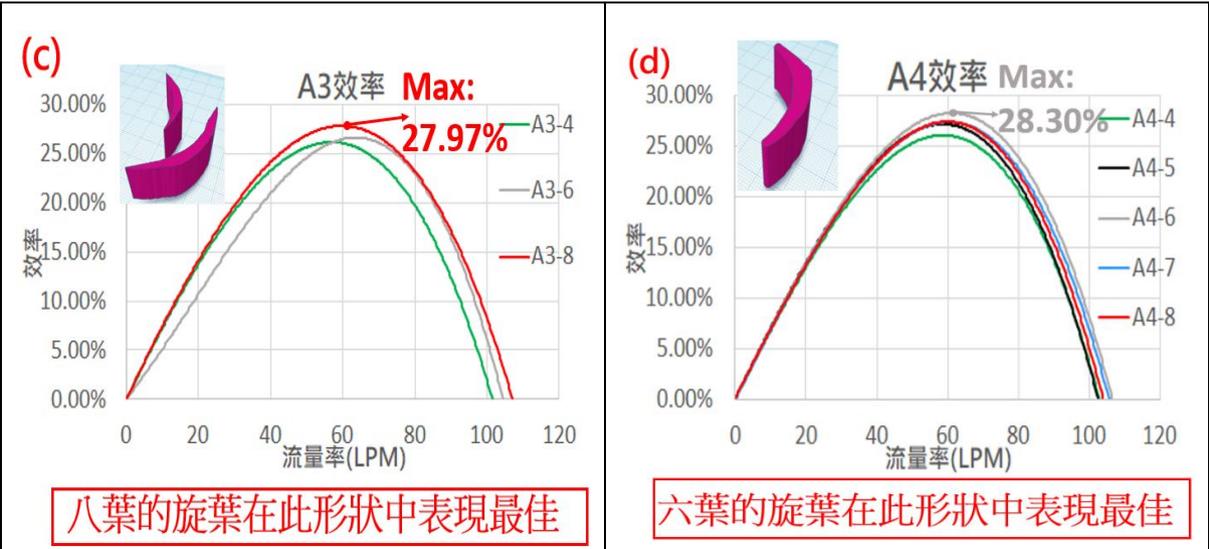
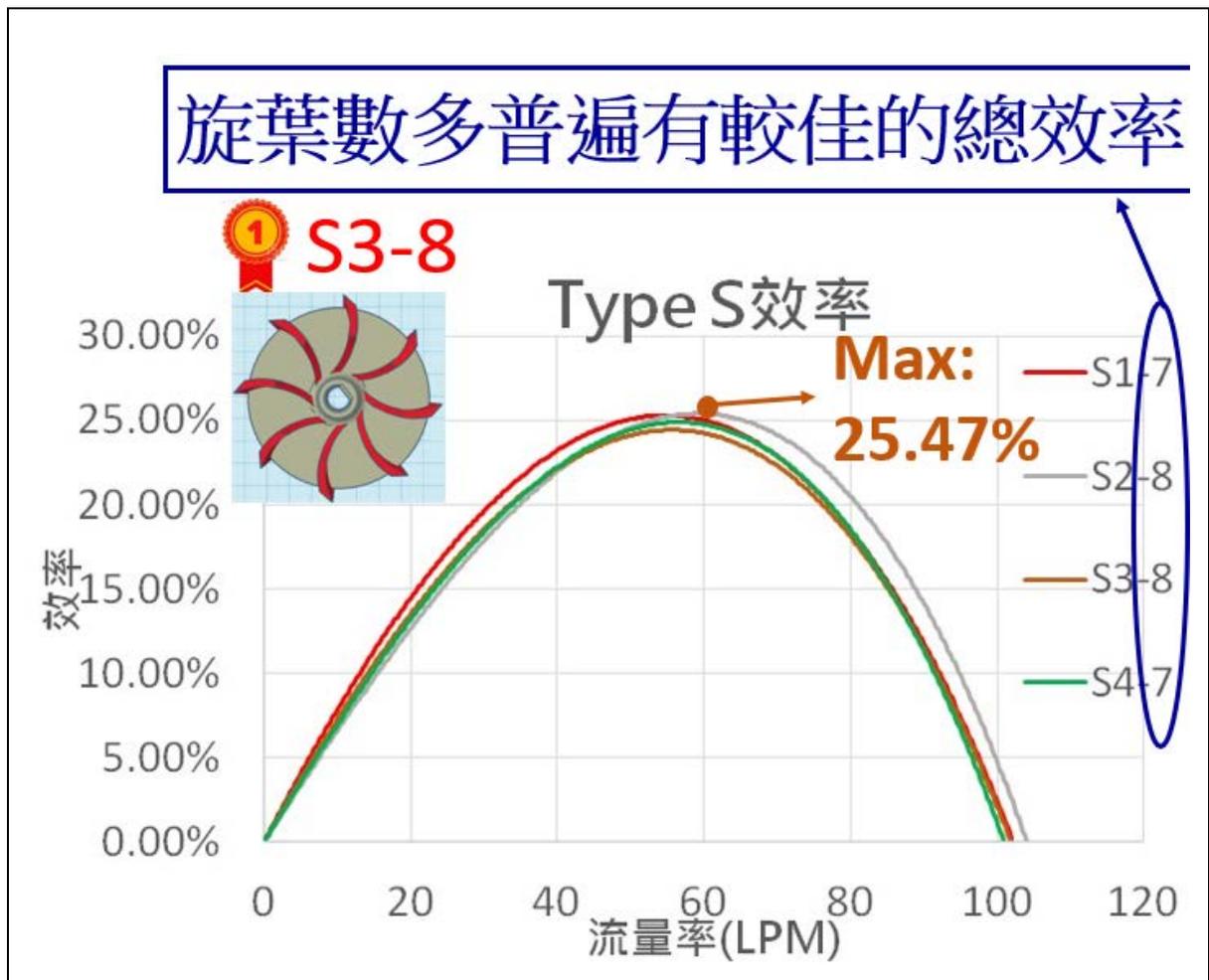
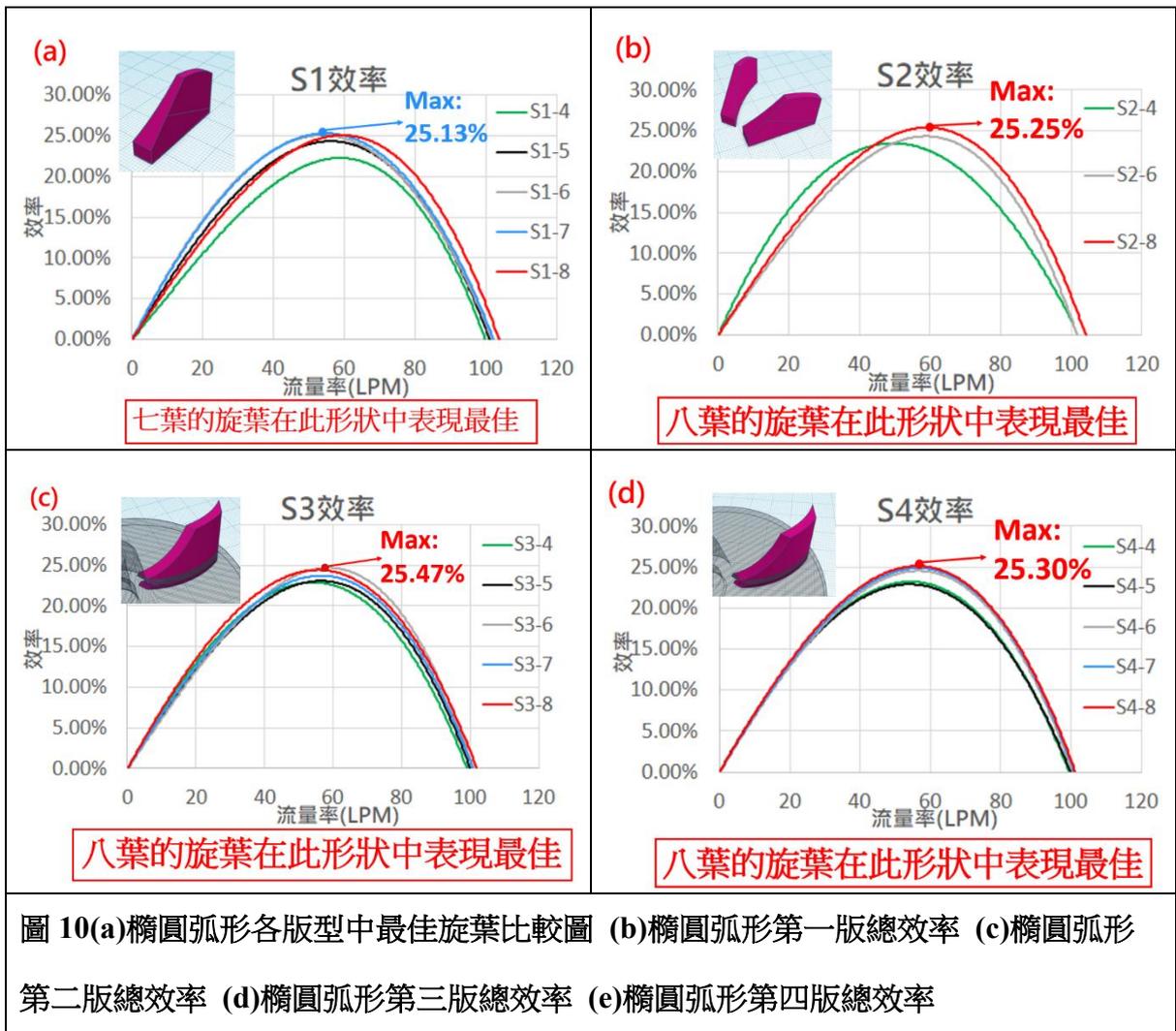


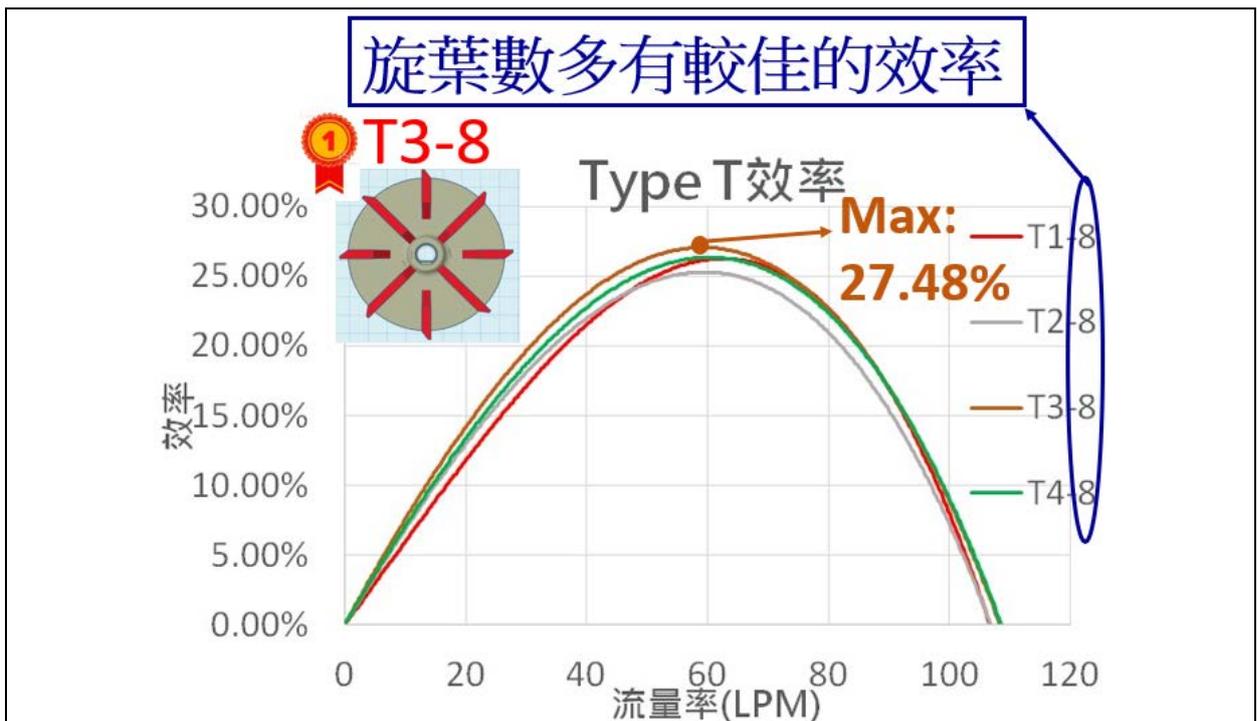
圖 9(a)圓弧形各版型中最佳旋葉比較圖 (b)圓弧形第一版總效率 (c)圓弧形第二版總效率 (d)圓弧形第三版總效率 (e)圓弧形第四版總效率

2. 橢圓弧形旋葉總效率





3. 直立形旋葉總效率



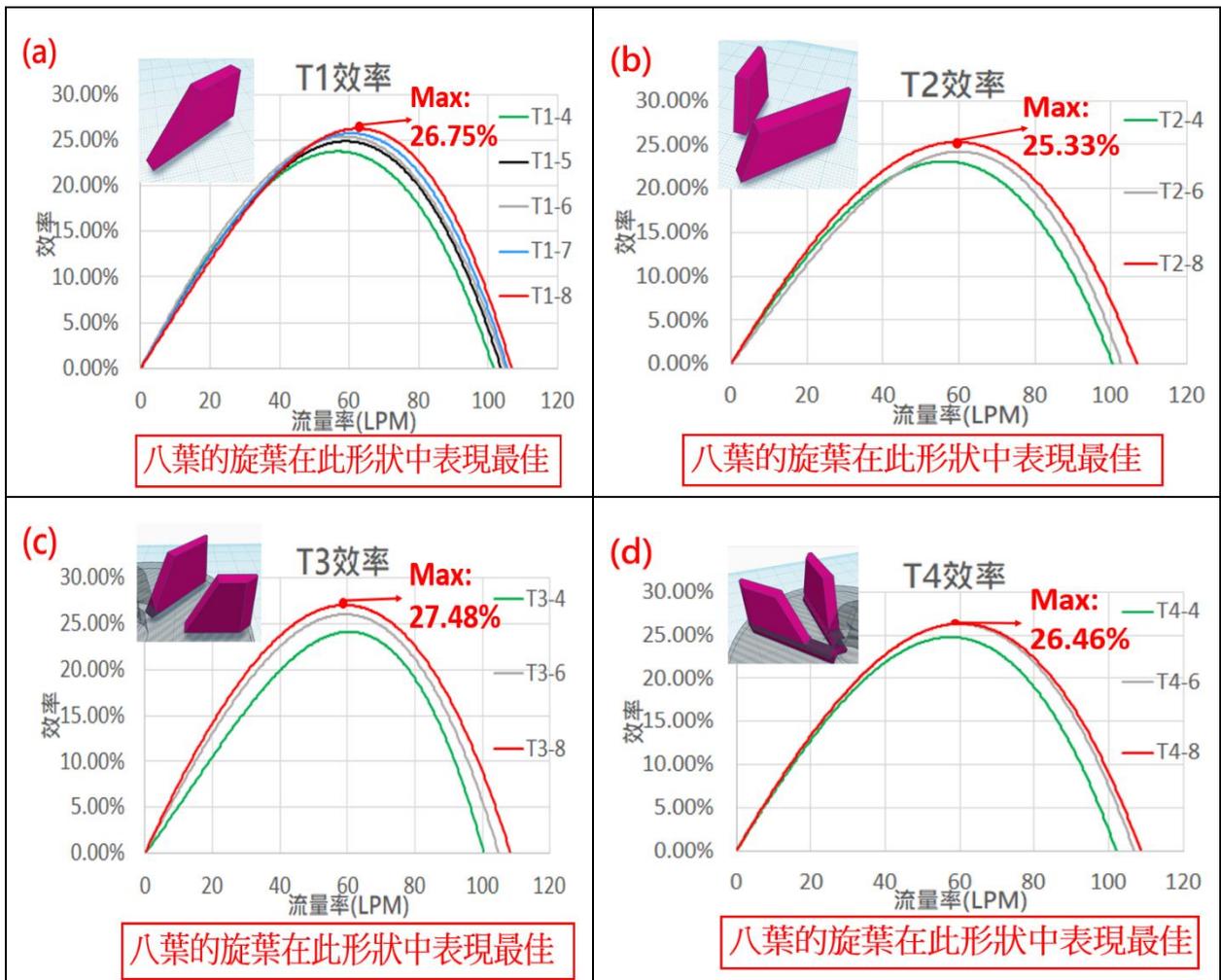


圖 11(a)直立形各版型中最佳旋葉比較圖 (b)直立形第一版總效率 (c)直立形第二版總效率 (d)直立形第三版總效率 (e)直立形第四版總效率

4. 各旋葉最佳總效率

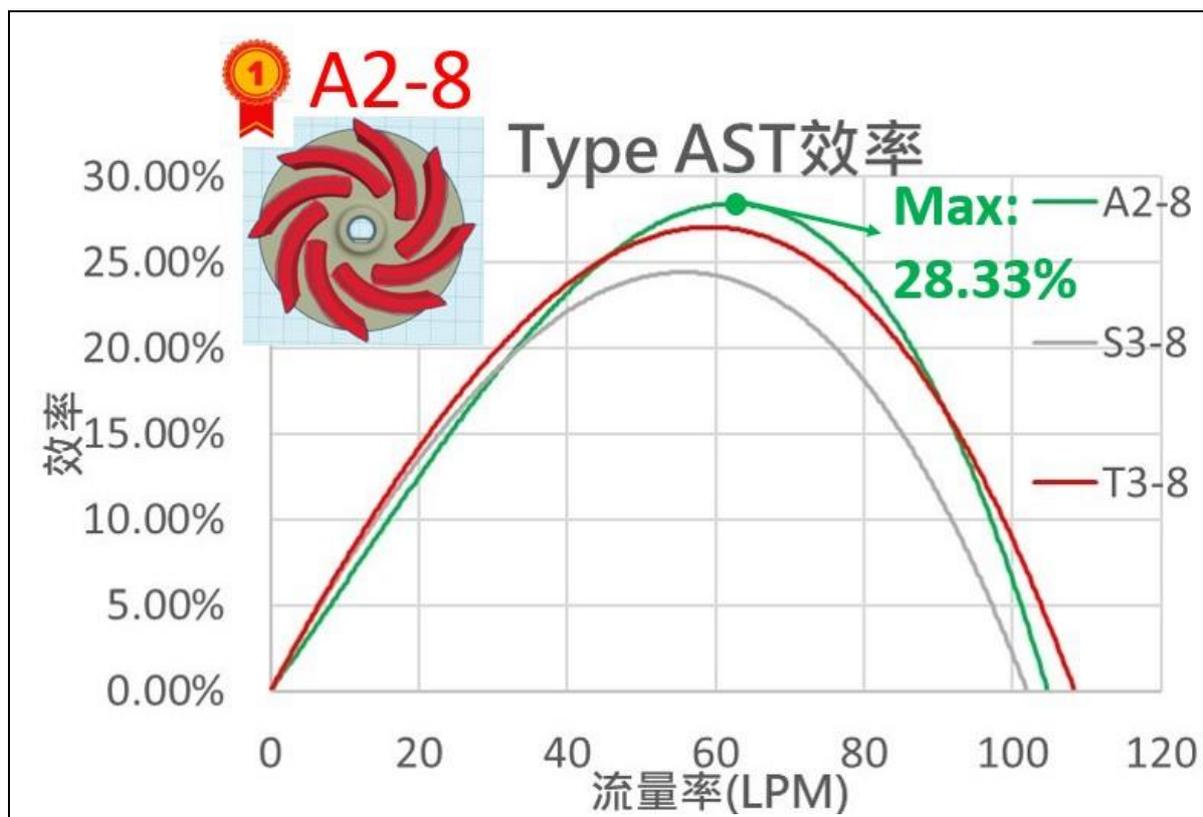


圖 12 各個形狀中最佳的旋葉之比較圖

圖 12 比較三種類型旋葉族群中，最佳版次與旋葉數之性能曲線，結果顯示圓弧形之旋葉設計輸出效率最高，其次為直立形旋葉，而橢圓弧形效率表現最差，推論此種旋葉設計因輪廓彎曲度太大，使水流在葉片間隙受到固體邊界推擠流動過程中快速剝離產生大面積之低壓渦流區域，因而消耗過多的馬達軸動力有關。

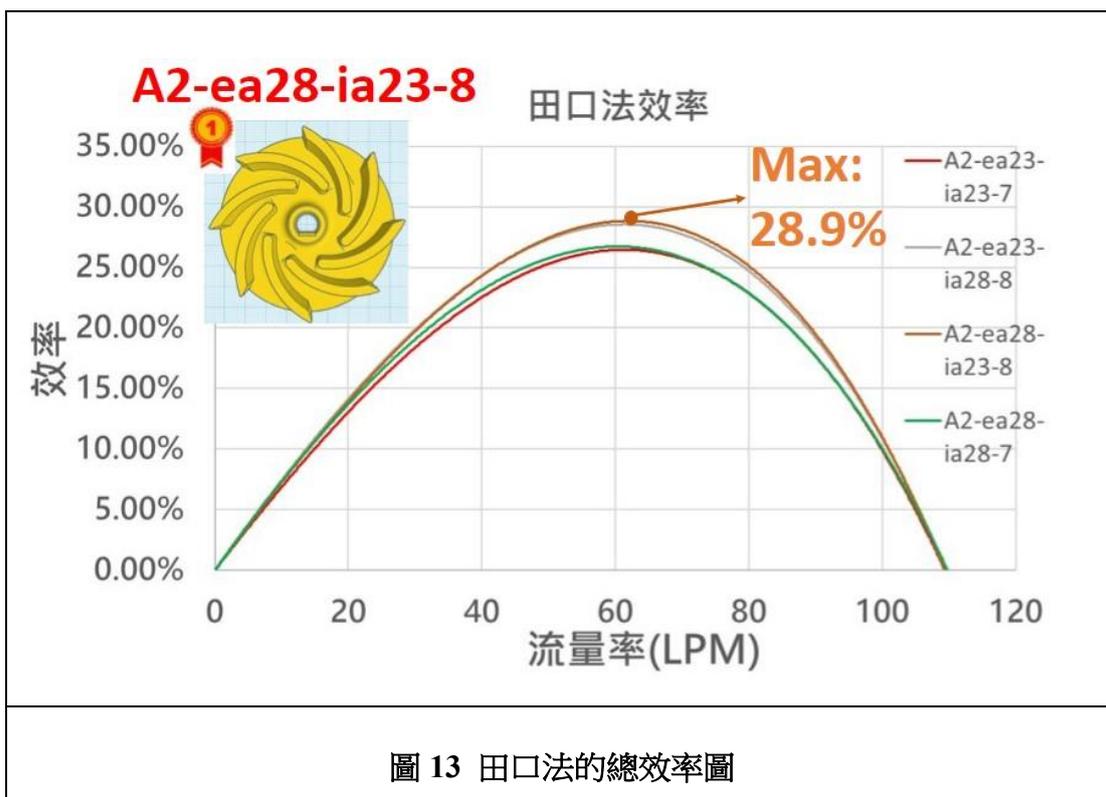
由圖 12 中，可以發現圓弧形效率最佳(28.33%)，第二名則為直立型(27.48%)，第三名則是橢圓弧形(25.47%)，相較之下，橢圓弧形即使是最好的其總效率也與另兩種形狀有較大的差距，而這也代表橢圓弧形在泵浦旋葉中無法有很好的總效率。

(二) 田口法分析

1. 實驗資料初步分析

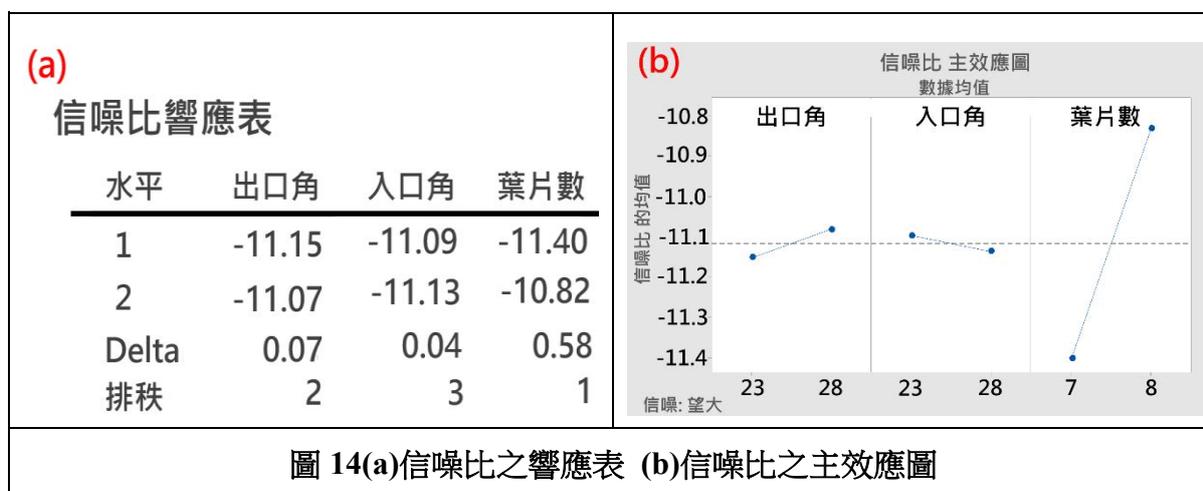
由趨勢線可看出 A2-ea28-ia23-8 為田口法中效率最高的旋葉，總效率為 28.89%，

而我們之後用 Minitab 將田口法分析的資料填入，計算何種旋葉參數組合最佳。



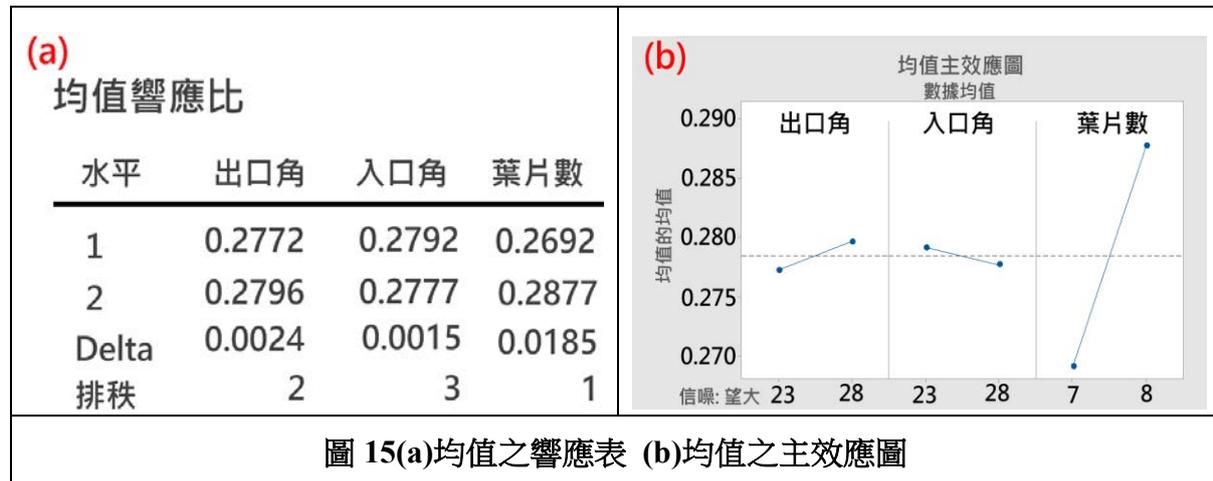
2. 信噪比分析

信噪比的計量單位是 dB，原是指一個電子設備或者電子系統中信號與噪聲的比例，也可以換算成電壓幅值的比率關係，因此信噪比應該越高越好)。在信噪比響應表中，我們發現排秩 1 的因子(葉片數)之差值大於其他兩個因子，由此可發現旋葉片數的效應為最大，如圖 14(a)及 14(b)所示。



3. 均值分析

在均值響應表中，我們發現排秩 1 的因子(葉片數)之差值大於其他兩個因子，由此可發現葉片數的效應為最大，其次為出口角，而入口角為效應最小的，如圖 15(a)及 15(b)所示。



(1) 由圖 14、圖 15 田口法的結果，得出**最佳參數旋葉依然為出口角 28 度、入口角 23 度及旋葉數是 8 片**。此旋葉參數即為 L_{42^3} 直交表中第 3 組，也可看出旋葉數的七、八葉有很大的差距，和其他兩因子比較，明顯看出旋葉數為影響最大的因子。

(2) 田口法有獨立分析之特性，將 A2-ea23-ia23-7 和 A2-ea23-ia28-8 的總效率相加，A2-ea28-ia23-8 和 A2-ea28-ia28-7 的總效率相加， $26.75\% + 28.37\% = 55.12\% < 28.89\% + 26.96\% = 55.85\%$ ，又 A2-ea28-ia23-8 和 A2-ea28-ia28-7 的出口角皆為 28 度，可得知出口角 28 度為較佳的變因。

(三) 比較導入田口法旋葉的前後差異

經田口法得出的最佳參數組合 A2-ea28-ia23-8，其總效率為 28.89%，相較第一階段優化時的**最佳旋葉**，總效率為 28.33%，提高了 1.97%，流量率由原先 102.67(LPM) 上升至 108.33(LPM)，提升 5.52%，而揚程由 14.90(m) 上升至 15.26(m)，提升 2.28%，

可知利用田口法的實驗使我們的結果有卓越的進步。經田口法得出的最佳參數組合 A2-ea28-ia23-8，其總效率為 28.89%，相較優化前的旋葉，總效率為 28.33%，提高了 1.97%，流量率由原先 102.67 (LPM) 上升至 108.33 (LPM)，提升 5.52%，而揚程由 14.90(m) 上升至 15.26 (m)，提升 2.28%，可知利用田口法的實驗使我們的結果有卓越的進步。

表 14 導入田口法旋葉的前後差異比較

	A2-ea281-ia279-8	A2-ea28-ia23-8
流量率(L.P.M)	102.67	108.33
揚程(m)	14.90	15.26
總效率(%)	28.33	28.99

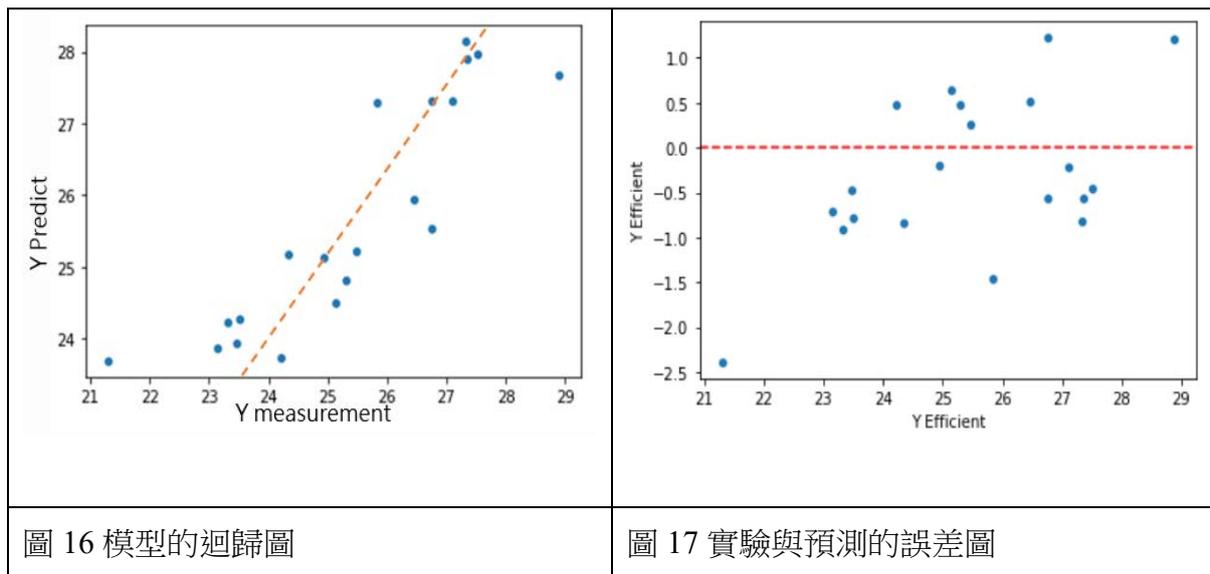
(四) 多元線性迴歸分析

本研究以 python 語言撰寫，程式如附錄一所示，開發環境為 google colab，使用套件有 sklearn、seaborn、matplotlib、pandas、numpy，旋葉實測資料共 65 筆，以實驗數據建立線性迴歸函數模型，資料集切分成七比三，訓練資料佔 70% 而測試資料佔 30%。透過訓練的模型預測出未知的旋葉模型(X 值)的效率(Y 值)。訓練完成後得到均方誤差 MSE 為 0.82，其中 MSE 代表預測值與實際值的誤差，越小表示預測模型有越好的準確性，因此評估此模型具有相當的準確性，且透過模型方程式中的權重(如表 15)可得知各項參數的優化方向，然而線性迴歸分析的缺點，是沒有反曲點(如圖 16)，導致我們調整參數時，會無限量增大或減小，因此我們參考相關文獻來設定上限，一般後傾式旋葉的葉數在十葉以內，而出口角在 30 度到 80 度之間[12]，用此種方式來調整參數，以達到最佳效率的目的。

表 15 權重係數

	權重
X1 葉片數	0.311252
X2 厚度	0.363596
X3 入口直徑	-0.090659
X4 入口角	-0.005910
X5 出口角	-0.004872

可見圖 16，線性迴歸模型的測試資料集分佈近似於一條直線($y=ax+b$)，而圖 17 的縱軸是實驗與誤差的大小，越靠近虛線表示實驗與預測越相近。



(五) 軟體模擬分析

在田口法中我們將最佳及最差的旋葉參數，分別為出口角 28 度、入口角 23 度，葉片數 8 葉；出口角 23 度、入口角 23 度、葉片數 7 葉匯入 COMSOL Multiphysics 軟體模擬速度流場分布、壓力流場分布及應力分布，來驗證實測的結果，如圖 18(a)、(b)、(c)、(d)及圖 19(a)和(b)為模擬結果。

表 16 兩旋葉的流量率及揚程

編號	A2-ea28-ia23-8	A2-ea23-ia23-7
圖片		
流量率 (L.P.M.)	108.83	109.00
揚程(m)	15.26	14.86

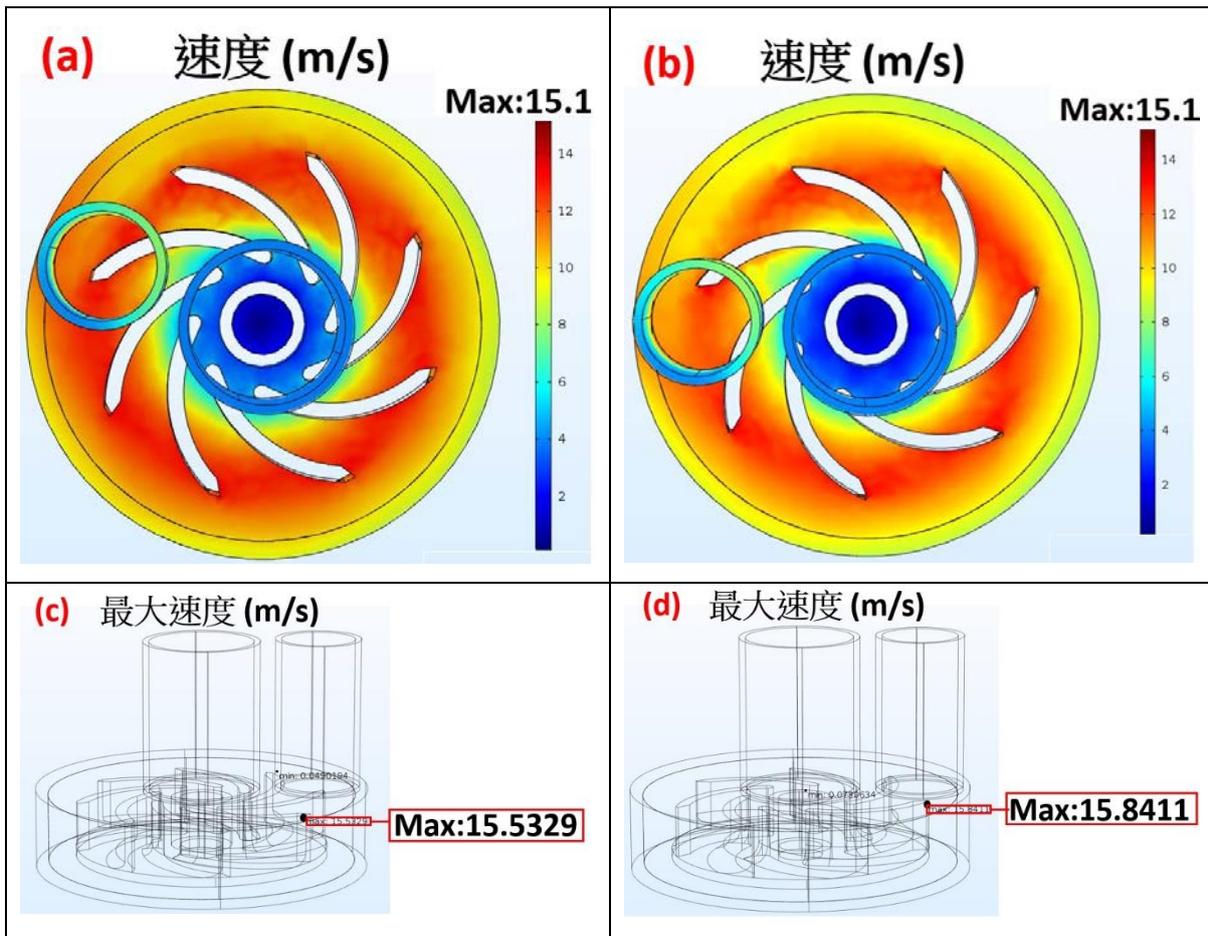


圖 18(a)田口法中總效率最好的旋葉(A2-ea28-ia23-8)速度模擬，田口法建議最佳參數
 (b)田口法中總效率最差的旋葉(A2-ea23-ia23-7)速度模擬，田口直交表第 1 組實驗
 (c) A2-ea28-ia23-8 之最大速度分佈 (d) A2-ea23-ia23-7 之最大速度分佈

COMSOL Multiphysics 軟體模擬分析中，速度的大小與實測中流量率有密切關係，如表 16 為兩旋葉實測之數據，而我們可以發現 A2-ea28-ia23-8 之流量率小於 A2-ea23-ia23-7 流量率($108.83 < 109.00$)，雖然在圖 15(a)、(b)中 A2-ea28-ia23-8 的紅色區域多於 A2-ea23-ia23-7，但在圖 15(c)、(d) 中 A2-ea23-ia23-7 之最大速度大於 A2-ea28-ia23-8(最大: $15.8411 > 15.5329$)，而我們認為判別速度是要看最大速度為準，因為水由入水口進入，透過旋葉轉動在旋葉內側開始受力，接著一直受力直到水脫離旋葉，而旋葉尾端是對水的最後施力，因此照理來說最大速度會發生在旋葉尾端(每分子的水最後都會在旋葉尾端獲得最大速度)，所以如果尾端能給予較大速度後，水就也能擁有較大速度，在往後不受旋葉施力的情況下運輸，因此本研究認為此模擬是與實際值互相驗證的，至於圖 18(a)、(b)的紅色區域多寡，本研究覺得影響最大的是旋葉數，因為有較多旋葉同時對水施力，所以加速也較快(還沒到旋葉尾端就能呈現紅色)，但無法保證水離開旋葉尾端時，能獲得較大的最大速度。

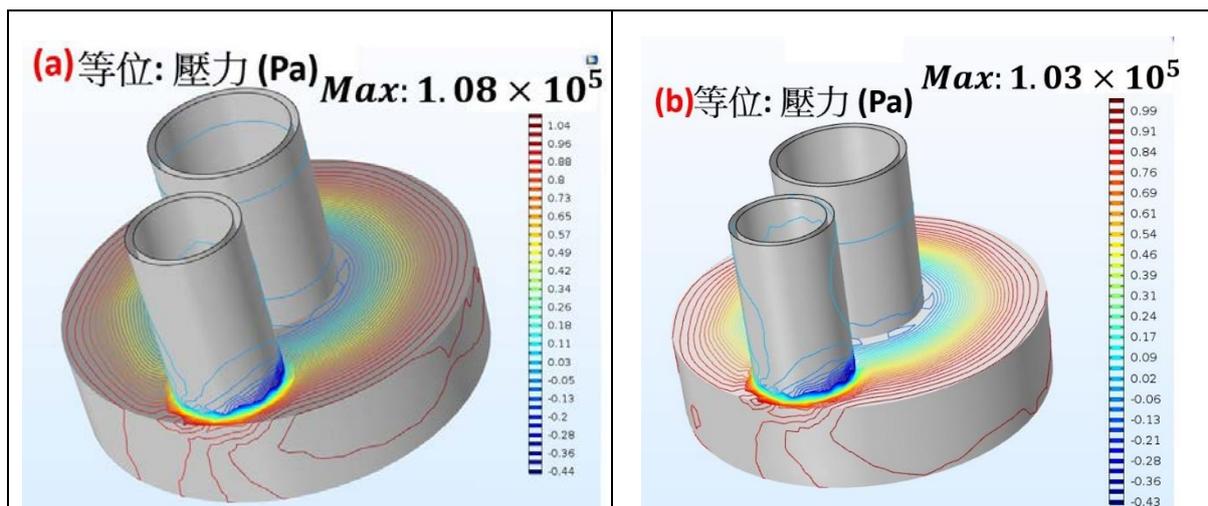
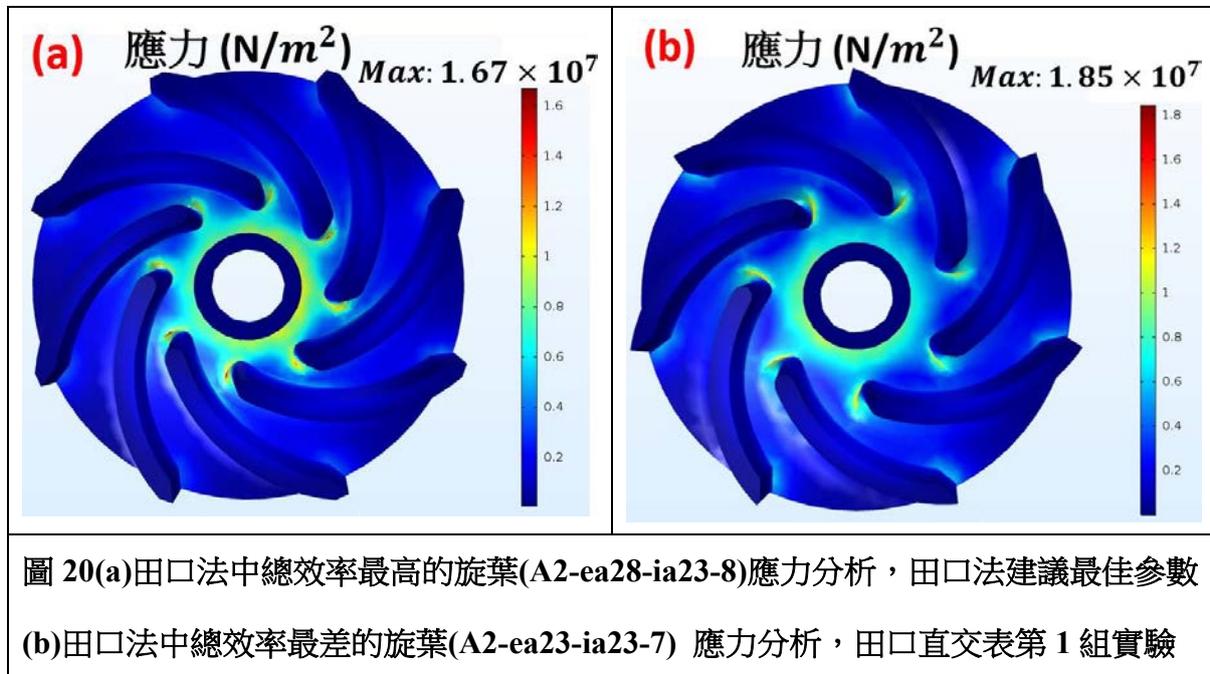


圖 19(a)田口法中總效率最高的旋葉(A2-ea28-ia23-8)壓力模擬，田口法建議最佳參數
 (b)田口法中總效率最差的旋葉(A2-ea23-ia23-7)壓力模擬，田口直交表第 1 組實驗。

壓力與實測中的揚程有密切關係，如表 16 的揚程 A2-ea28-ia23-8 大於 A2-ea23-ia23-7(15.3 > 14.9)，而在圖 19(a)、(b)壓力分析中也可看出無論最大壓力是 A2-ea28-ia23-8 高於 A2-ea23-ia23-7，便可證明我們模擬分析與實際測量結果相符。



由圖 19(a)、(b)中可以得知 A2-ea28-ia23-8 的壓力大於 A2-ea23-ia23-7，但在圖 20(a)、(b)中可以發現 A2-ea28-ia23-8 所受到的最大應力小於 A2-ea23-ia23-7，而我們認為與旋葉數有關係，旋葉數較多的每一葉，所需承受之應力相對較少，但壓力也不一定低於其他人，也可以發現當旋葉數多時，旋葉材質就不一定使用金屬，也可使用其他較低成本、硬度低的旋葉。

1.ABS 屈服強度

我們經由 Comsol 模擬田口法中，最佳及最差的旋葉之應力分析，如上圖 20(a)、(b)，來分析 ABS 塑料是否適合用在泵浦上，經模擬發現旋葉受到的最大應力分別為 16.7 兆帕及 18.5 兆帕，而市面上 ABS 塑料的屈服強度為 42.5-44.8 兆帕[14]，表示此旋葉在運轉時並不會發生形變，而在工業界中，此旋葉大多是由防酸鹼的塑鋼或是不

鑄鋼，此材質的屈服強度遠大於 ABS 塑料，因此變形機率更低。

(六) 檢測軟體與實測結果是否相符

1.實測方面:

以編碼 A2-ea28-ia23-8 之旋葉數據為例，流量率=108.83 LPM (L/min)，壓力=1.526 (kg/cm²)，而我們的出口截面積A₂=0.000285 (m²)，經公式(8)可得出出口速度V₂=6.364 (m/s)

$$A=\varphi^2 \times \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

在此 φ_2 (管內徑)=0.01905 (m)

$$Q=V \times A \quad (8)$$

在此Q₂ = 0.00181 (m³/s) ; A₂=0.000285 (m²)

以編碼 A2-ea28-ia23-8 之旋葉數據為例，我們的出口截面積A₁ = 0.000452 (m²)，在此 φ_1 (管內徑)=0.024 (m)

由連續方程知

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (9)$$

在此室溫為 25°C; 水密度 $\rho_1 = \rho_2 = 997.0751$ (kg/m³);

即 $0.000452 \times V_1 = 0.000285 \times 6.364$

得 出口速度V₁ = 4.009 (m/s)

若以截面S₁為基準面,則Z₁ = 0且Z₂ = 0.1215 (m)

由能量守恆方程知

$$P_1 + \rho g Z_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \rho g Z_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (10)$$

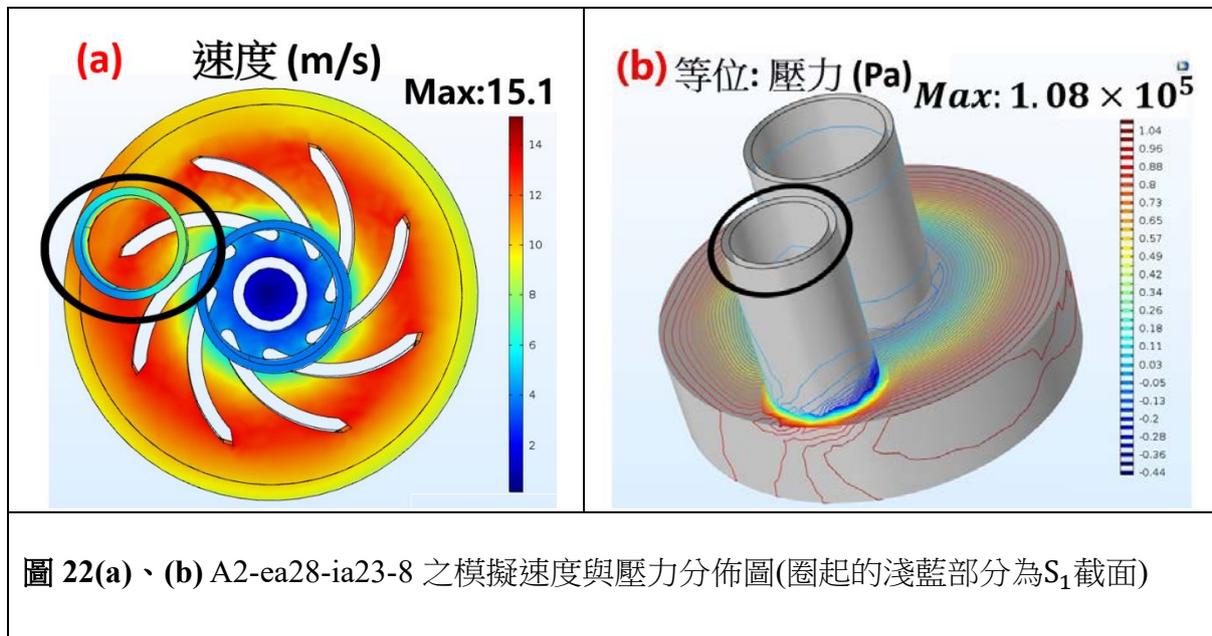
在此 水密度 $\rho = 997.0751 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; 重力加速度 $g = 9.81 \text{ (m/s)}$;

出口速度 $V_1 = 4.009 \text{ (m/s)}$; 出口速度 $V_2 = 6.364 \text{ (m/s)}$;

$P_2 = 149649.48 \text{ (N/m}^2\text{)}$; $Z_1 = 0 \text{ (m)}$; $Z_2 = 0.1215 \text{ (m)}$

即 $P_1 = 163016.40 \text{ (N/m}^2\text{)} \approx 1.63 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$

2. 模擬方面



由模擬之結果，如圖 22(a)、(b)，可得模擬與實測之速度誤差在 44.69%，而壓力值誤差在 34.9%，故可得知模擬之結果與實驗雖些有誤差，仍具有可分析之準確度。

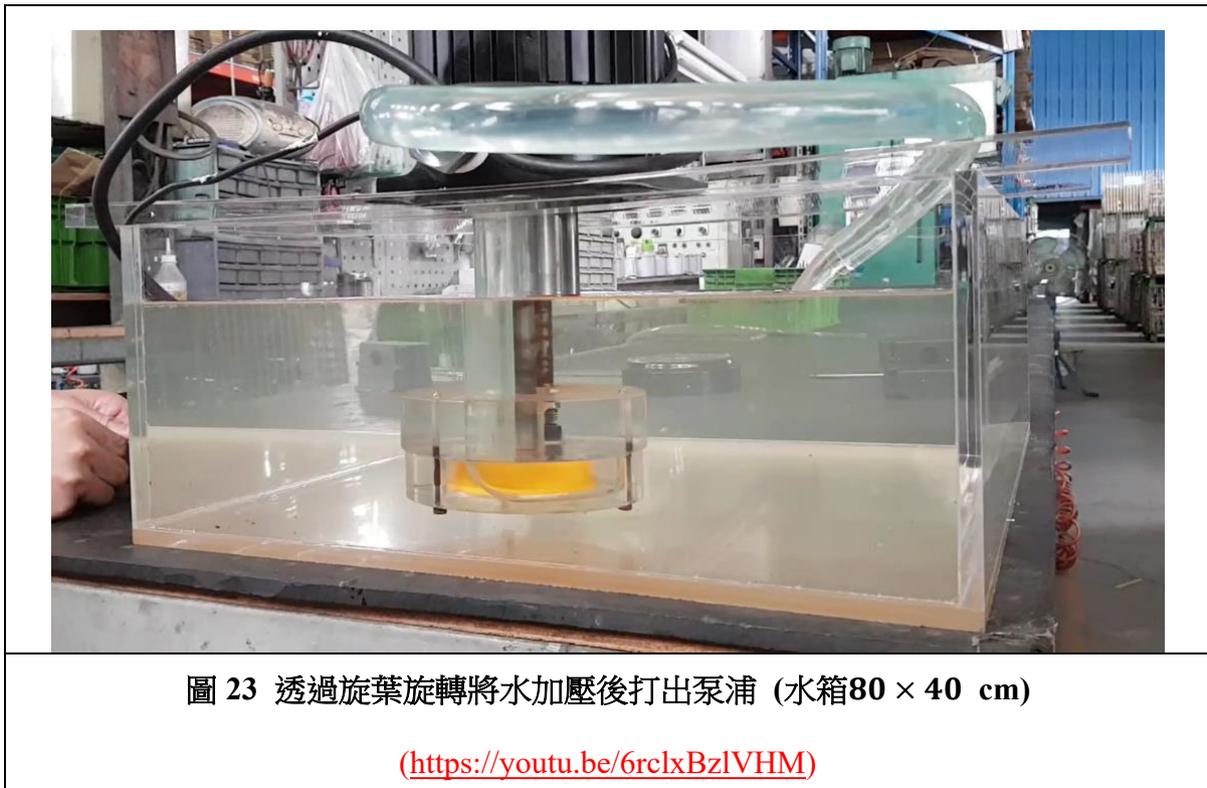
表 17 模擬與實驗的誤差比較

	實際實驗	軟體模擬	誤差(%)
壓力 (Pa)	1.63×10^5	1.08×10^5	33.74
速度 (m/s)	4.009	5.831	45.48

(七) 簡易泵浦運作展示

我們原本測試時，旋葉被包裹在黑色的泵殼裡，因此無法在實驗時看見內部的流場狀況，於是我們將泵殼改用透明塑膠製成，以利我們在測試時，能利用亮粉來觀察到內部流場狀況，如圖 23、24、25。

1. 實際泵浦運作測試



2. 以亮粉表示流體於泵浦內的行徑路線

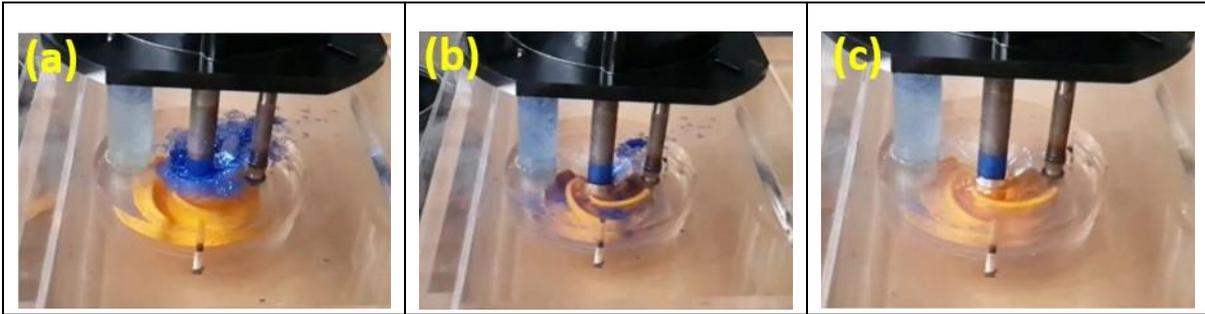


圖 24(a)亮粉由入水口進入 (b)旋葉運輸亮粉中 (c)亮粉已被帶離泵浦

(<https://youtu.be/q6ZueWY9cug>)

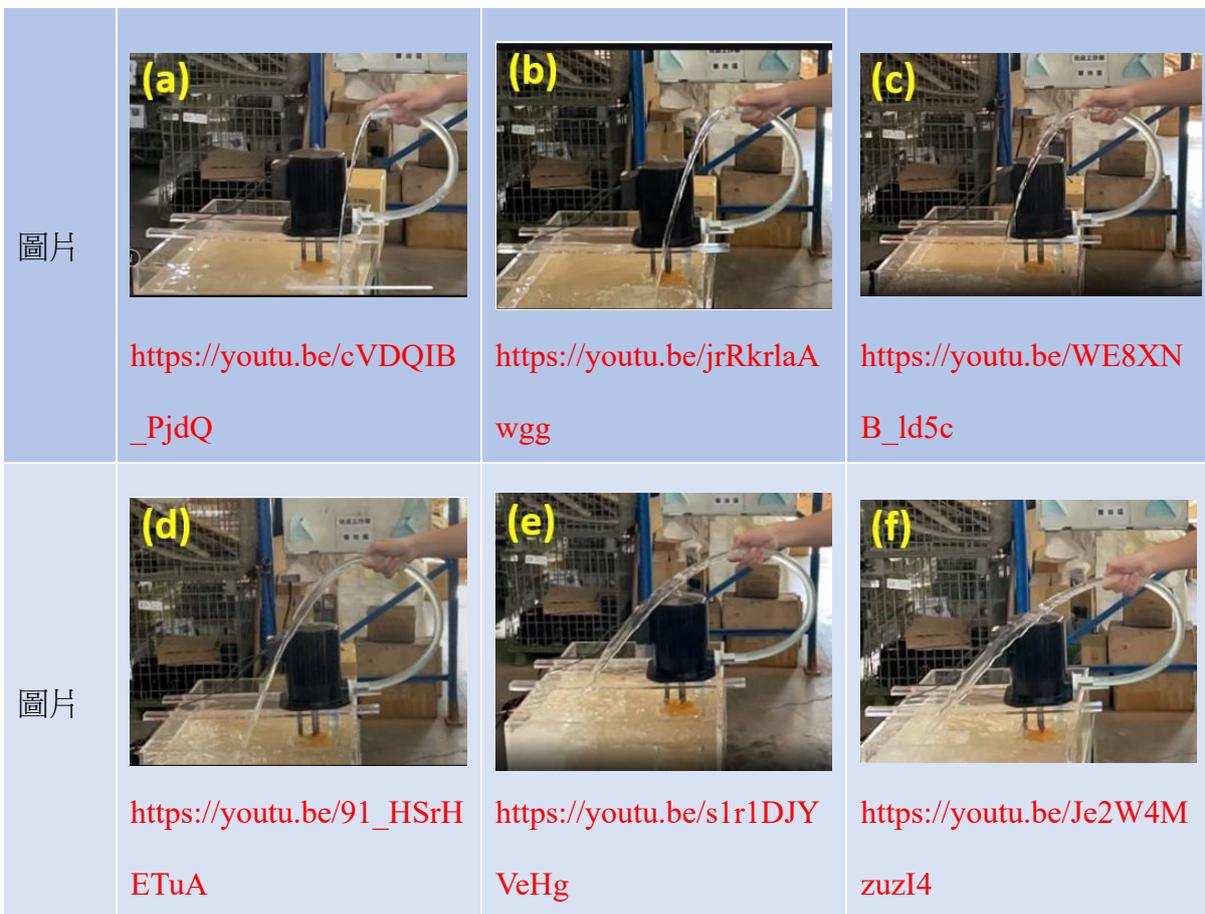


圖 25(a)轉速 50R.P.M.的情況下，旋葉所打出的水流狀況
 (b)轉速 60R.P.M.的情況下，旋葉所打出的水流狀況
 (c)轉速 70R.P.M.的情況下，旋葉所打出的水流狀況
 (d)轉速 80R.P.M.的情況下，旋葉所打出的水流狀況
 (e)轉速 90R.P.M.的情況下，旋葉所打出的水流狀況
 (f)轉速 100R.P.M.的情況下，旋葉所打出的水流狀況

(八) 塑料旋葉和塑鋼旋葉的數據差異

我們旋葉所使用的材料是 ABS 塑料，但一般工業界旋葉材質卻是塑鋼，塑鋼又稱纖維強化塑膠，於是我們要檢測這二種材質所製做的旋葉對流量率是否有差異？

在低壓泵浦實驗測試，檢測此兩種旋葉在相同旋葉結構上測試 3/4 英吋出水口，及 1 英吋出水口的流量率之差別，得出此兩種旋葉材質在數據表現上幾乎相同，如表 18。由結果可以證明最後測出的最佳旋葉，也可應用在工業實作塑鋼材質旋葉上。

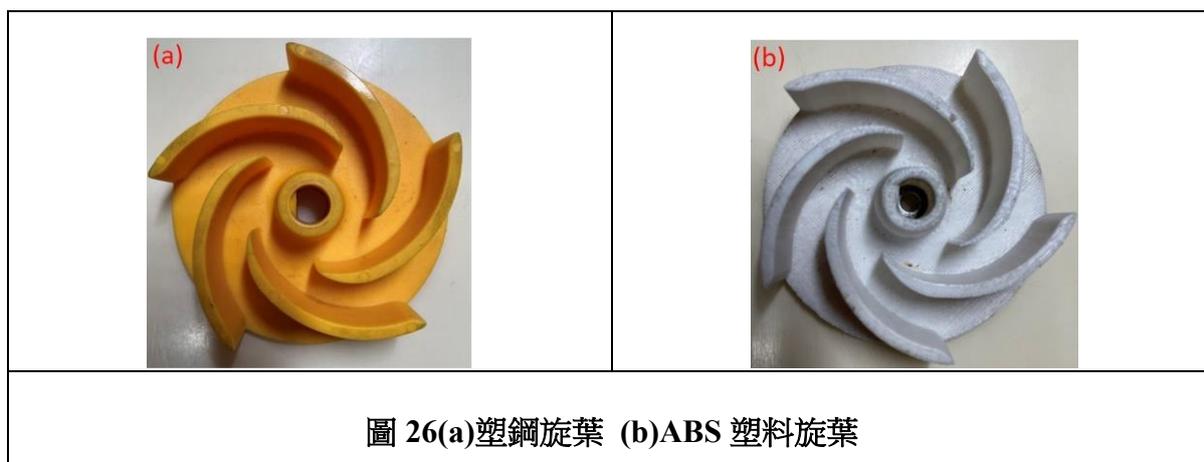


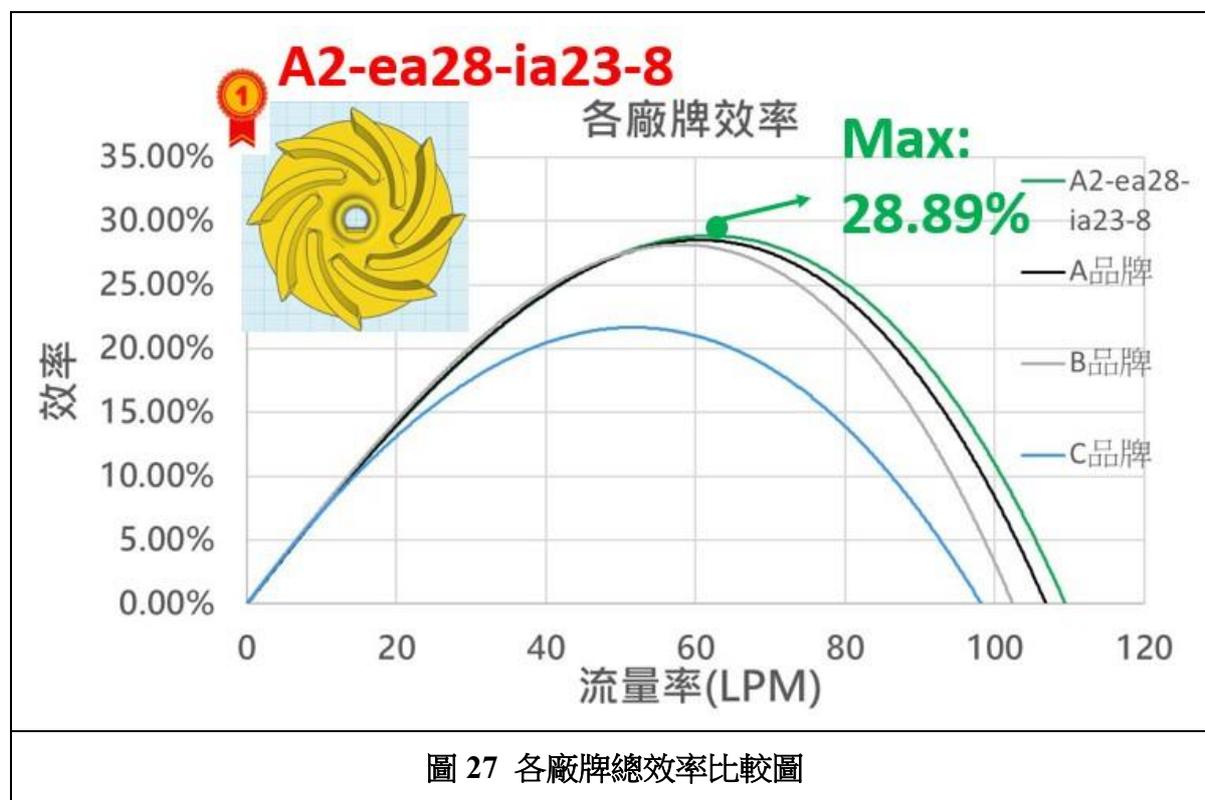
表 18 使用兩不同材質實驗時的誤差

	ABS 塑料旋葉 流量率 (L.P.M.)	塑鋼旋葉 流量率 (L.P.M.)	誤差(%)
出水孔 3/4"	103.5	103.5	0
出水孔 1"	158	159	0.63

(九) 研究貢獻

本研究應用兩階段程序，進行離心泵旋葉構型之最佳化設計與探討，並導入計算流體力學分析與開發透明實驗裝置，協助觀測機構運轉及評估。綜合上述比較分析，

本研究也做了市場調查，與其他廠商的旋葉做比較，而之後會以 A 品牌、B 品牌、C 品牌來表示，如圖 21 表示其總效率圖。



流量率方面，A2-ea28-ia23-8 旋葉相較 B 品牌旋葉提高了 2.67%，而揚程相較 B 品牌旋葉提升 1.53%，總效率方面，A2-ea28-ia23-8 提高 2.99%，每項數據皆有一定的優化，如表 19 為 A2-ea28-ia23-8 及各廠牌各個數據表。

表 19 旋葉性能優劣比較

型號	A2-ea28-ia23-8	B 品牌泵浦	C 品牌泵浦	D 品牌旋葉
形狀差異				
流量率 (L.P.M.)	108.83	106	100	97

揚程 (m)	15.26	15.03	12.33	7.53
總效率 (%)	28.89	28.05	27.66	22.04

流量率方面：A2-ea28-ia23-8 > B 品牌泵浦 > C 品牌泵浦 > D 品牌旋葉

揚程方面：A2-ea28-ia23-8 > B 品牌泵浦 > C 品牌泵浦 > D 品牌旋葉

總效率方面：A2-ea28-ia23-8 > B 品牌泵浦 > C 品牌泵浦 > D 品牌旋葉

四、結論與應用

本研究主要探討對泵浦優化之相關研究，而我們先設計出 50 種旋葉，然後利用總效率公式挑出最佳旋葉(A2-8)，接著利用田口法更改細微參數，來進一步優化，之後在將田口法中最佳旋葉(A2-ea28-ia23-8)匯入 COMSOL Multiphysics 軟體模擬中檢測是否與實測結果相符，使用監督式學習將實測獲得的數據建立迴歸模型，並藉由輸入參數來直接預測效率值。

(一)結果討論

1. 擴增旋葉形狀設計參數之探討

我們參考文獻時發現[5]是探討以圓弧形為基礎，來更改其入口角、出口角及旋葉數進而優化泵浦總效率，而[6]則是在直立形旋葉的情況下，更改其他變因，而本研究除了同時探討圓弧形和直立形，還增加了橢圓弧形，最後所得出最佳旋葉之形狀為圓弧形。

2. 導入田口法提升總效率

在挑出最佳旋葉後，我們將入口角、出口角、旋葉數之參數做更改，試著將總效

率在提高，而我們最後得出最佳旋葉為 A2-ea28-ia23-8 總提升效率 1.97%。

3. 實測結果與模擬相符

將田口法中最佳及最差的旋葉總效率，匯入 COMSOL Multiphysics 模擬軟體中，與實驗做比對，最後透過速度模擬和壓力模擬證明我們的實測與模擬實驗相符。

4. 利用透明泵浦觀察水流情況

將泵浦的外殼，以透明壓克力雕刻製作，並且經由直流無刷技術改裝成可自由調整轉速的泵浦，讓我們能以另一種視角，來觀察旋葉打水的流動軌跡。

5. 透過市場調查來比較本研究中最優旋葉

本研究選擇三間在台製作的泵浦廠商，而我們購買了出水口徑相同及同馬力的泵浦，接著與 A2-ea28-ia23-8 進行比較，結果是 A2-ea28-ia23-8 相較第二名之泵浦效率高出 2.99%。

6. 透過監督式學習預測效率值

利用實驗獲得的數據來訓練迴歸模型，藉由均方誤差 MSE 來評估模型準確性，並藉由輸入參數來直接預測效率值，以減少實驗時間與成本。

(二)未來展望

1. 將提案和廠商合作，提供 AI 的模型以提升產品效能，並蒐集廠商測試資料，以增加大數據資料，使迴歸函數模型更為準確。

2. 本研究是探討單層級泵浦，未來可以探討多層級泵浦，相信當多片旋葉同時運轉時，其水流參數會更複雜，更需藉助本研究所建置之測試與設計參數優化程序。

3. 增加任務型導向設計分類，歸納區別每個旋葉的類型，依據實驗獲得的性能曲線特徵，分為流量率型以及壓力型，並透過田口或進階人工智慧方法予以優化參數，藉此掌握每個旋葉設計於特定環境應用的優勢。

參考文獻

- [1] 林育正(2011)。離心式水幫浦流場分析。華梵大學碩士論文，新北市。
- [2] 王希伯(1991)。流體機械。新北市：文京圖書有限公司。
- [3] 皮托科技 (2014)。Comsol Multiphysics 電腦輔助分析模擬軟體學習寶典。彰化市：皮托科技股份有限公司。頁 23-26。
- [4] 王曉剛(2020)。流體力學究竟在說什麼? 簡單讀懂流體力學的奧妙。新北市：樂果文化。
- [5] 楊富翔(2010)。離心式水幫浦 CFD 及葉片最佳化設計。國立交通大學碩士論文，新竹市。
- [6] Silvia Bozzi, Simone Vesentini, Marco Santus et al. (2020). *Fluid dynamics characterization and thrombogenicity assessment of a levitating centrifugal pump with different impeller designs*. Medical Engineering and Physics, 83, 26-33.
- [7] Gamal R.H, Abo Elyamin, Magdy A, et al. (2019). *Effect of impeller blades number on the performance of a centrifugal pump*. Alexandria Engineering Journal, 58, 39-48.
- [8] Ling Zhou, Weidong Shi, and Suqing Wu (2013). *Performance Optimization in a Centrifugal Pump Impeller by Orthogonal Experiment and Numerical Simulation*. Advances in Mechanical Engineering.
- [9] Dale Hsieh(2011 年 3 月)。實驗設計---田口法介紹。Slideshare。
<https://www.slideshare.net/DaleHsieh1?>
- [10] D.C. Montgomery (2009) . *Design and analysis of experiments*, 7th ed., John Wiley & Sons (Asia), Hoboken, New Jersey.
- [11] 皮托科技 (2014)。COMSOL Multiphysics 有限元素分析快易通。彰化市：皮托科技股份有限公司。章 3-1，5-1。
- [12] 余國全(2005)。葉片出口角對後傾離心泵的性能影響之數值研究。國立臺灣科技大學碩士論文，臺北市。
- [13] 陳浩瑩(2006)。離心泵葉形曲線於流場特性及結構強度影響之探討。國立成功大學碩士論文，臺南市。
- [14] Sharon Olivera, Handanahally Basavarajiah Muralidhara et al. (2016). *Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a review*. Journal of Materials Science, 51, 3657-3674.

附錄一

一、監督式學習(Supervised learning) 程式碼

```
import numpy as np

import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

from sklearn.model_selection import train_test_split

from sklearn.linear_model import LinearRegression

from sklearn import metrics

%matplotlib inline

df=pd.read_csv('AI5.csv')

print(df)

df.head()

df.shape

df.info()

sns.pairplot(df)

X=df.drop('Y Efficient',axis=1)

y=df['Y Efficient']

X_train,X_test,y_train,y_test=train_test_split(X,y,test_size=0.3,random_state=42)
```

```

model=LinearRegression()

model.fit(X_train,y_train

pd.DataFrame(model.coef_,X.columns,columns=['權重'])

y_predict=model.predict(X_test)

model.intercept_

model.coef_[0]

MAE=metrics.mean_absolute_error(y_test,y_predict)

MSE=metrics.mean_squared_error(y_test,y_predict)

RMSE=np.sqrt(MSE)

MSE

RMSE

MAE

df['Y Efficient'].mean()

pd.DataFrame({'Y_test':y_test,'Y_predict':y_predict})

RES_test=y_test-y_predict

pd.DataFrame({'Y_test':y_test,'Y_predict':y_predict,'RES':RES_test})

sns.scatterplot(x=y_test,y=y_predict)

sns.scatterplot(x=y_test,y=RES_test)

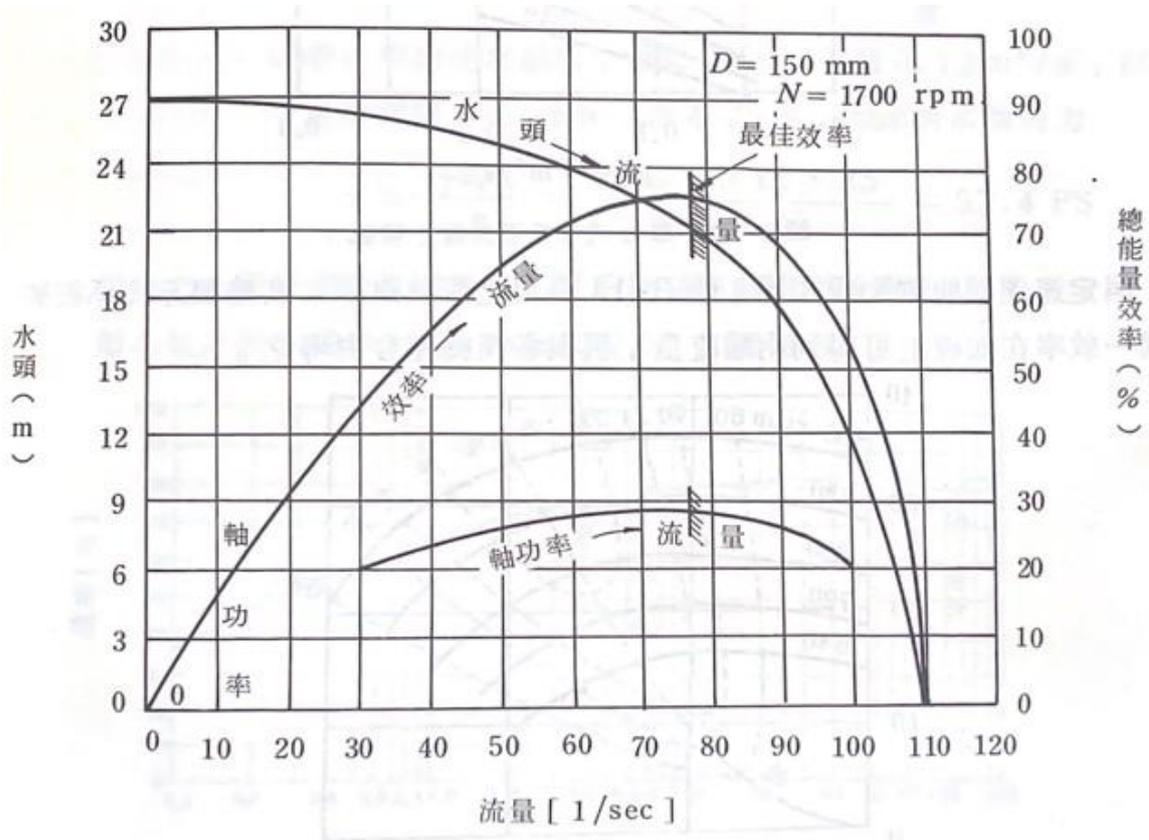
plt.axhline(y=0,color='r',ls='--')

```

圖片

Experiment Number	Column		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

表一 來源: 田口式實驗計畫—直交表(Orthogonal Array, OA) | Quality Taiwan 中文品質筆記 (wordpress.com)



圖五 來源: [2] 王希伯(1991)。流體機械。新北市：文京圖書有限公司。

【評語】 100013

本作品探討如何將旋葉構型優化以得到泵浦最佳的抽水效能。作品具有實用性，研究過程符合科學精神，研究結果亦有詳細的分析和探討，值得鼓勵，惟在理論原理模擬與實作實驗數據之間仍有明顯差距，較缺乏實驗前的優化設計流程。勉勵作者再接再厲，持續精進，可考慮實作實驗之前可進行較完整的參數優化，以期更有效率得到最佳的元件設計參數，讓作品更完整。