

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科

052413

運用機器學習和軟體模擬優化泵浦旋葉

學校名稱：國立中科實驗高級中學

作者：	指導老師：
高二 張誠隆	李柏翰
高二 陳弘哲	何家齊
高一 廖盛君	

關鍵詞：冷卻泵、CFD 模擬、機器學習

摘要

本研究主要整合實驗測量、田口實驗與人工智慧機器學習等方法，發展優化泵浦旋葉技術。首先以 3D 列印開發多種相異外型族群與不同葉片數目共計 82 種設計，以實驗探討旋葉構造形狀與泵浦之流量、揚程及效率，進而找出效率較佳的旋葉並作為基底，過程中應用電腦輔助分析軟體進行旋葉內部流場與應力場分析驗證，搭配透明運轉泵浦觀察不同轉速下旋葉內部流體流動狀態，田口法研究結果發現由信噪比與均值分析結果顯示入口斜率為最重要的影響參數、其次分別為旋葉數與出口斜率，影響最小則是上蓋厚度，且優化設計旋葉 T3C-10-2-4-4 最佳。機器學習方面，經由多元線性回歸訓練模型預測出未知的旋葉效率(Y 值)，訓練完成後得到平均絕對誤差 Mean Absolute Error (MAE)皆小於 1.5。

壹、前言

一、研究動機與目的

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。

因旋葉之細部結構跟泵浦效率有密切的關連[1,2]，本研究將著重於旋葉的設計。封閉式旋葉能產生較大效率[3]，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。小數據模型訓練 (Few shot learning) 興起[4]，期望藉由人工智慧應用預測總效率，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、揚程及耗電功率之值有關聯，期望提出最佳效率之旋葉。
- (二)從 82 種旋葉中挑選最佳的旋葉，並用田口實驗計畫法二階優化，以得最佳旋葉。
- (三)透過機器學習中的監督式學習方法嘗試在有限的數據中建立參數優化相關模型以預測效率。
- (四)用 COMSOL Multiphysics 軟體模擬驗證實測結果是否相符。

二、文獻回顧

(一)泵浦基本介紹

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，以及流固耦合移動邊界之旋轉機械分析，其構造可分為開放式、半開放式與封閉式三大類，封閉式旋葉在葉片上下兩側裝置平面遮罩，迫使流體可以確實往相鄰葉片間之通道流動，不僅機械強度大，更能容許較大的熱膨脹變形[5,6]。

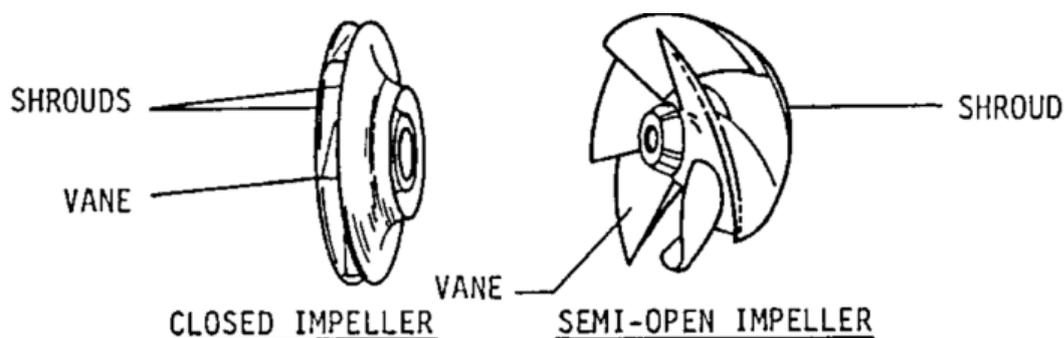


圖 1 封閉式與半開放式旋葉[4]

(二)原理探討

相關研究楊富翔以計算流體力學套裝軟體進行數值計算[7]，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[8]。Elyamin 等人使用 Fluent 軟體分析探討旋葉數量對泵性能之影響[9]。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[10]。大多文獻只針對單一外型旋葉來探討，減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。

(三)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。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[11]，概念圖如表 1 所示。

表 1 田口法的概念圖(L93⁴)

Experiment Number	Column			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

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[12]，藉由此方法，最佳參數組合可以被評估。

(四)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。我們選擇監督式學習中的多元線性迴歸方法，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： $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e$ [13]。

X：自變數（分析對象）、Y：應變數（對應結果）、 β ：權重、e：偏差值。

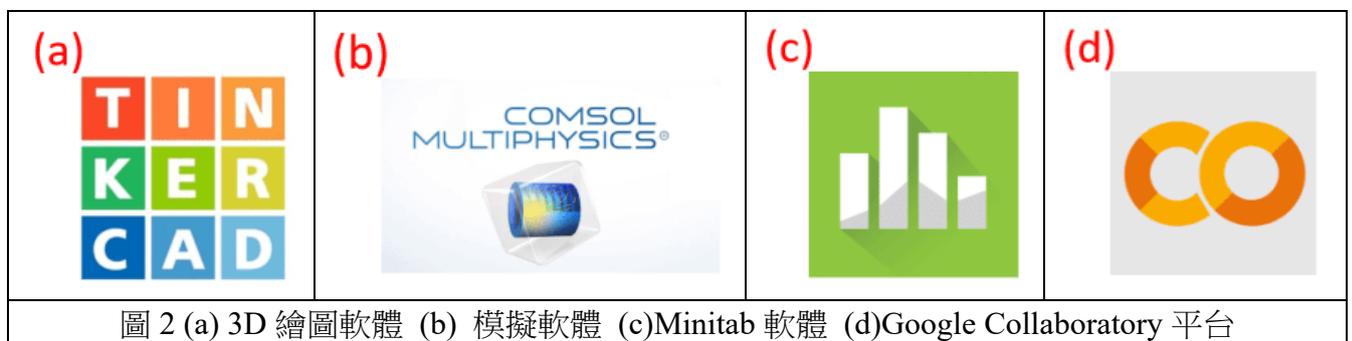
在本研究中，將旋葉數、厚度、入口直徑、入口角度、出口直徑和出口角度設成 X 變數（旋葉數為 X_1 、厚度為 X_2依此類推），並將效率值設為 Y 變數。 β_0 為 Y 截距（起始值）， $\beta_1 \sim \beta_p$ 為未知且須估計的迴歸係數。以平均絕對誤差(MAE)來評估 AI 模組的準確性。最終透過輸入參數(X)至模型可得到預測之效率值(Y)，便能減少實驗成本與時間。

貳、研究設備及器材

本研究使用之軟硬體設備及實驗檢測儀器如下說明。

一、電腦輔助設計分析軟體

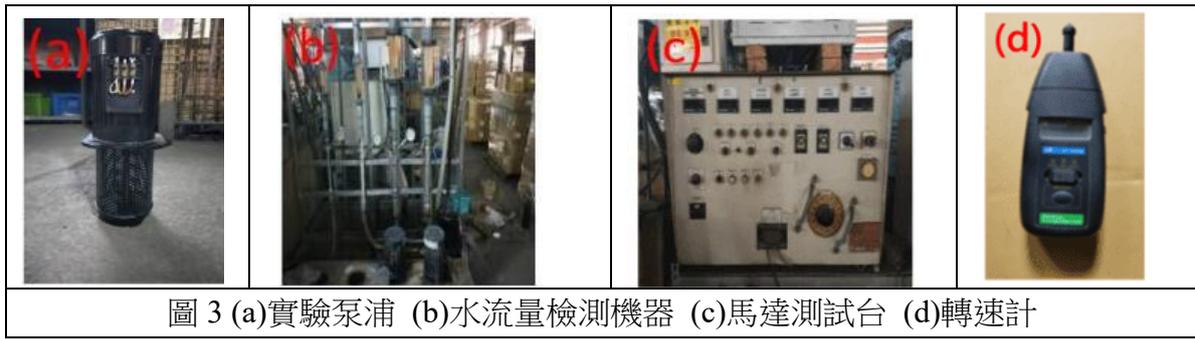
本研究使用 TINKERCARD 3D 繪圖軟體設計如圖 2(a)。另外，泵浦內部流場研究採用 COMSOL Multiphysics 軟體，如圖 2(b)，在田口法中使用 Minitab 來分析實驗數據如圖 2(c)，接著使用 Google Collaboratory 來編寫機器學習模型如圖 2(d)。



二、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。



參、研究過程或方法

一、研究流程

以下是研究流程，結合田口計劃法及流體模擬分析優化旋葉，並利用實驗所得參數數值，建立預測模型，預測總效率，詳細如圖 4 所示。

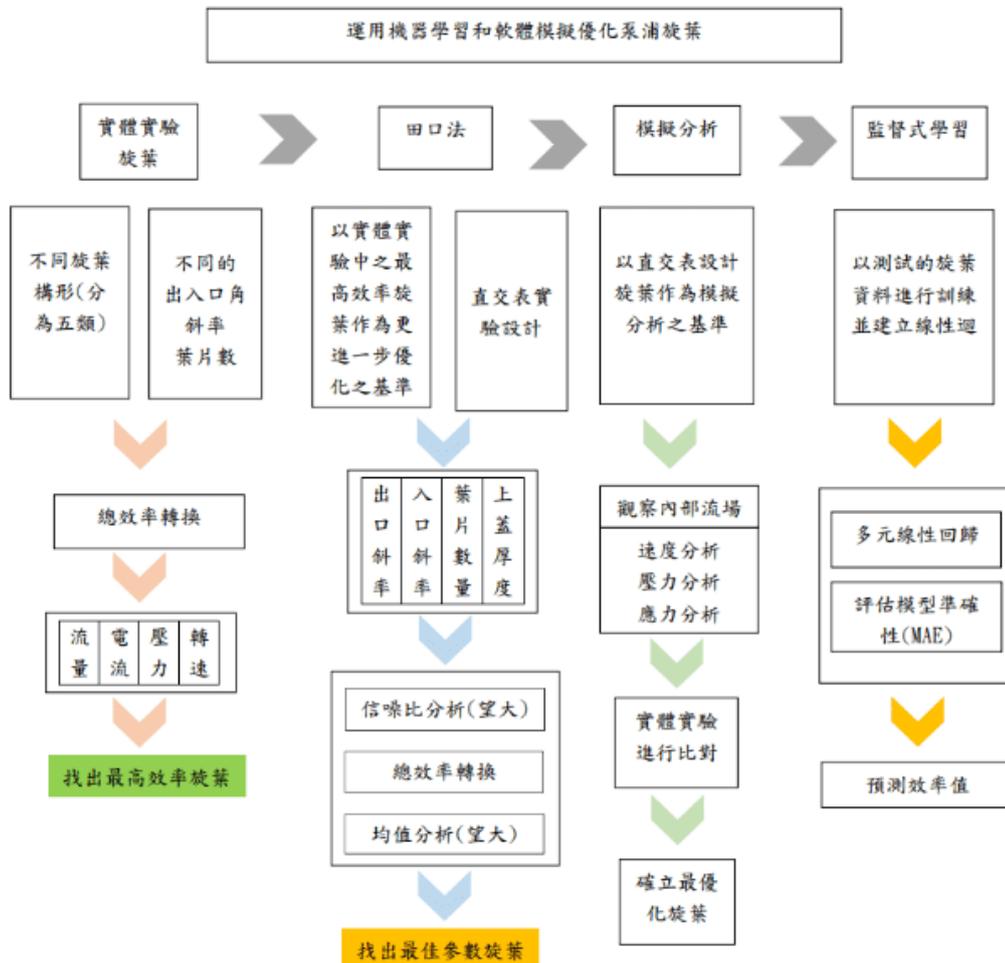


圖 4 泵浦旋葉優化研究流程

二、實際測量之數據

泵浦之總效率考慮到揚程、流量率、及電功率的計算公式，因為判別旋葉的優劣可以從很多面向，例如揚程大的旋葉可讓我們將水打往高樓層，而流量率大的旋葉則可以幫助我們在道路積水時，快速地將水排出，電功率小的旋葉則可幫助一般用戶使用時耗費較小的電能，而總效率則是同時採納這些面向，而衍生出一種計算方式。

(一)效率計算

泵揚程 H

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

(Z_3-Z_4): 泵前後端壓力測量點高度差 (m); H: 揚程，單位(m); g : 重力加速度 $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$;

在本實驗 $Z_3 - Z_4 = 0.53 \text{ (m)}$; $V_3 = V_4$ (管徑相同); γ : 水比重量 (1000 kg/m^3);

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

(二)電功率 L (kW)

$$L = \frac{IV}{1000} \quad (3)$$

I 電流 (A); V 電壓 (V)

(三)水馬力 L_w (Water Horse Power)

$$L_w = \frac{\gamma HQ}{102} \quad (4)$$

L_w : 水馬力 (kW); γ : 水比重量 (1000 kg/m^3); Q : 泵流量 (m^3/s)

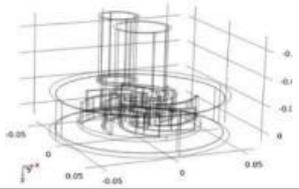
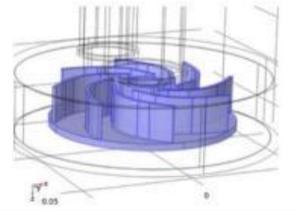
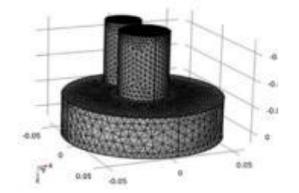
(四)總效率 η_{gr}

$$\eta_{gr} = \left(\frac{Lw}{L} \right) \times 100\% \quad (5)$$

三 流體模擬 COMSOL Multiphysics 分析程序

模擬 COMSOL Multiphysics 分析軟體的建模及分析過程[13]以表 2 介紹。

表 2 模擬 COMSOL Multiphysics 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，並選定尺寸及模擬每個不同的區域所要用的材質。
設定物理條件		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。
訂定網格		對分析空間進行切割，並評斷硬體設備的性能及此模擬與實測間的準確度決定網格的粗細。

四、實驗的變因

(一)控制變因

- 1.用同一顆泵浦，電動機的馬力規格相同， $\frac{1}{2}$ 馬力。
- 2.水的供應量充足，供水液位高度相同，高度 24 公分。
- 3.旋葉底盤大小及厚度相同，基礎旋葉直徑是 8.2 公分。

(二)操作變因

- 1.旋葉形狀及葉片數量

本研究初期先製作出 327 個實驗旋葉，如圖 5，扣除列印不佳等取其中 82 個做討論，而我們將這 82 個分為 5 類：半開放式圓弧形(Type A)、半開放式橢圓弧形(Type S)、半開放式直立形(Type T)、封閉式圓弧形(Type AC)、封閉式直立形(Type TC)。



圖 5 本研究 3D 列印之所有旋葉 (327 個)

(1) 半開放式圓弧形(Type A)旋葉共 18 種設計，其俯視圖、及參數表如表 3 所示。而在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。而族群 A 的命名方式:出口角(ea)入口角(ia)-葉片數。

表 3 半開放式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

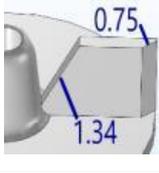
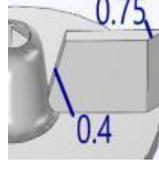
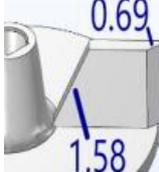
(2) 半開放式橢圓弧形(Type S)葉片共 18 種設計，其俯視圖、不同葉片設計成型及參數如表 4 所示。而在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。

表 4 半開放式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- ia911-5	S4-ea539- ia911-6	S4-ea539- ia911-7	S4-ea539- ia911-8

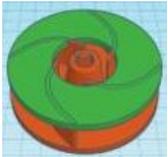
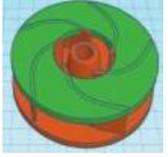
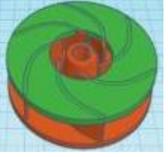
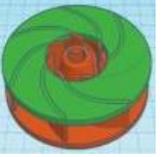
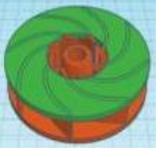
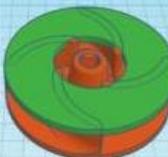
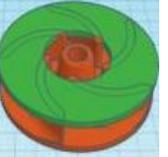
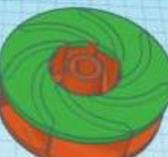
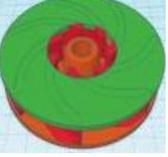
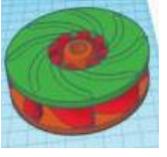
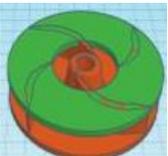
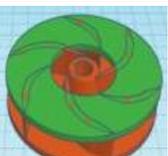
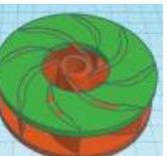
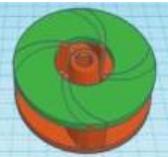
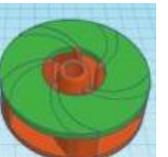
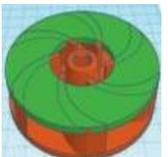
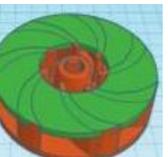
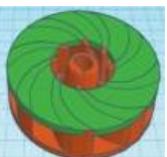
(3) 半開放式直立形(Type T)旋葉共 14 種設計，其俯視圖、不同葉片設計成型及參數如表 5 所示，而命名方式族群 T-出口斜率(es)入口斜率(is)-葉片數。在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。

表 5 半開放式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

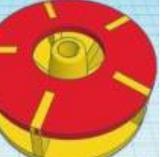
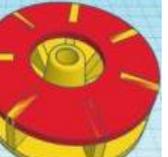
(4) 封閉式圓弧形旋葉(Type AC)旋葉共 18 種設計，其設計基底是將圓弧形的旋葉形狀為基底，在旋葉上端加蓋，使其為封閉式旋葉，其俯視圖、及參數表如表 6 所示。族群 AC 的命名方式:出口角(ea)入口角(ia)-葉片數，而在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。

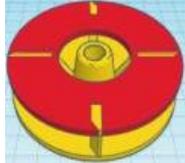
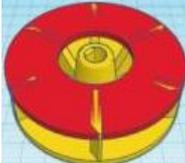
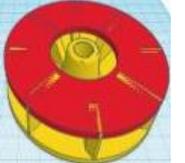
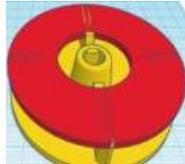
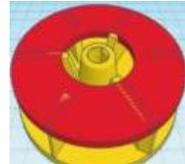
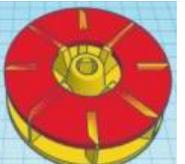
表 6 封閉式圓弧形旋葉編碼總表

				
A1C-ea327- ia266-4	A1C-ea327- ia266-5	A1C-ea327- ia266-6	A1C-ea327- ia266-7	A1C-ea327- ia266-8
				
A2C-ea281- ia279-4	A2C-ea281- ia279-5	A2Cea281- ia279-6	A2C-ea281- ia279-7	A2C-ea281- ia279-8
	none		none	
A3C-ea277- ia341-4		A3C-ea277- ia341-6		A3C-ea277- ia341-8
				
A4C-ea336- ia494-4	A4C-ea336- ia494-5	A4C-ea336- ia494-6	A4C-ea336- ia494-7	A4C-ea336- ia494-8

(5) 封閉式直立形旋葉(Type TC)旋葉共 14 種設計，其設計基底是將直立形的旋葉形狀為基底，在旋葉上端加蓋，使其為封閉式旋葉，其俯視圖、及參數表如表 7 所示。族群 AS 的命名方式:出口角(ea)入口角(ia)-葉片數，而在下文，會以種類及葉片數代稱(標示粗體部分)。

表 7 封閉式直立形旋葉編碼總表

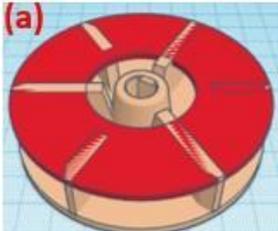
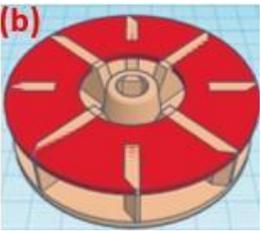
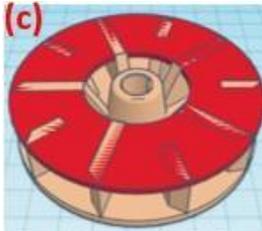
				
T1C-ea327- ia266-4	T1C-ea327- ia266-5	T1C-ea327- ia266-6	T1C-ea327- ia266-7	T1C-ea327- ia266-8

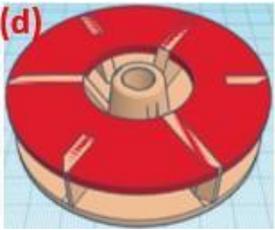
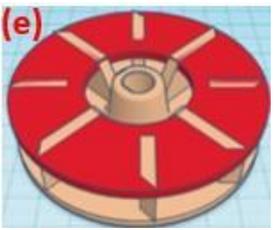
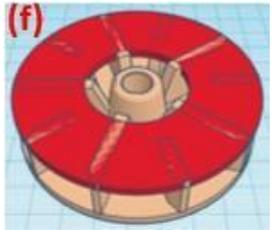
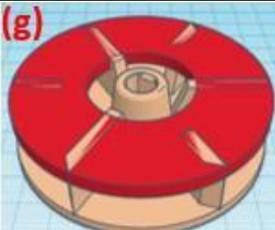
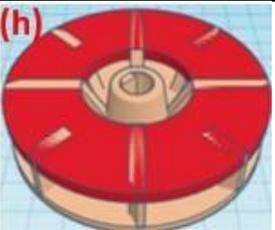
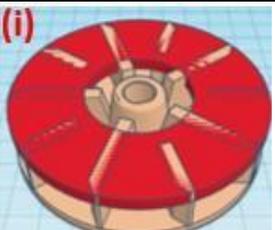
	none		none	
T2C-ea281-ia279-4	T2C-ea281-ia279-5	T2Cea281-ia279-6	T2C-ea281-ia279-7	T2C-ea281-ia279-8
	none		none	
T3C-ea277-ia341-4		T3C-ea277-ia341-6		T3C-ea277-ia341-8
	none		none	
T4C-ea336-ia494-4	T4C-ea336-ia494-5	T4C-ea336-ia494-6	T4C-ea336-ia494-7	T4C-ea336-ia494-8

2. 直交表的操作變因

以本研究所設計的直交表如表 8。更改的參數有旋葉數、上蓋厚度(毫米)、出口斜率及入口斜率，而 **T3C-8(效率最佳)** 為基底做參數改變，而命名方式為 **T3C-旋葉數-上蓋厚度-出口斜率-入口斜率**，以 T3C-6-2-2-4 為例，便是旋葉數 6 葉、上蓋厚度 2 毫米、出口斜率 2、入口斜率 4。

表 8 直交表之旋葉編碼

		
T3C-6-2-2-4	T3C-8-2-3-6.5	T3C-10-2-4-9

		
T3C-6-3-3-9	T3C-8-3-4-4	T3C-10-3-2-6.5
		
T3C-6-4-4-6.5	T3C-8-4-2-9	T3C-10-4-3-4

(三)應變變因：

旋葉的總效率、旋葉的流量率、旋葉的壓力與旋葉的耗電功率。

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 6 所示。

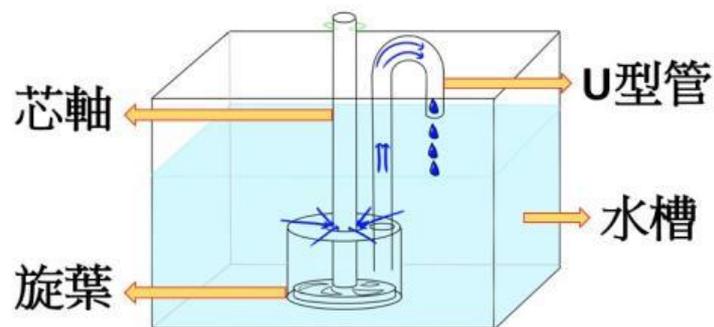


圖 6 簡易泵浦設計草稿

肆、研究結果

表 9、表 10、表 11 為各旋葉之總效率、流量率、揚程之數據，總效率最高為 T3C-8(29.21%)，而流量率最高為 A2-7(109.3 L.P.M)，揚程最高則為 T4-8(15.4 m)。

表 9 半開放式圓弧形(Type A)與封閉式圓弧形(Type AC)之總效率、流量率、揚程

編號	總效率 (%)	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)	編號	總效率 (%)	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)
A1-4	27.19	103.8	14.5	A1C-4	24.90	102.7	13.7
A1-5	27.08	107.5	14.6	A1C-5	22.79	103.3	12.6
A1-6	26.82	107.2	14.7	A1C-6	25.90	104.8	13.5
A1-7	27.44	108.7	15.0	A1C-7	25.80	106.2	13.5
A1-8	26.39	108.0	14.6	A1C-8	24.20	105.3	13.5
A2-4	27.71	106.3	14.7	A2C-4	26.36	101.8	13.7
A2-5	25.98	107.0	14.7	A2C-5	26.80	105.0	13.5
A2-6	25.84	107.5	15.0	A2C-6	24.19	100.0	12.5
A2-7	25.92	109.3	14.8	A2C-7	26.06	103.5	13.5
A2-8	28.33	107.3	15.1	A2C-8	25.32	102.7	13.5
A3-4	26.37	100.7	14.3	A3C-4	23.92	99.7	12.6
A3-6	27.08	103.5	14.7	A3C-6	26.70	100.8	13.4
A3-8	27.97	105.8	14.9	A3C-8	25.15	102.0	12.8
A4-4	26.08	101.0	13.8	A4C-4	24.78	100.0	12.5
A4-5	27.06	100.7	14.2	A4C-5	24.99	100.0	12.5
A4-6	28.30	105.0	14.7	A4C-6	24.73	100.0	12.1
A4-7	27.35	103.8	14.5	A4C-7	26.95	103.5	12.5
A4-8	26.83	101.7	14.2	A4C-8	26.47	100.3	12.6

表 10 半開放式直立形(Type T)與封閉式直立形(Type TC)之總效率、流量率、揚程

編號	總效率 (%)	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)	編號	總效率 (%)	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)
T1-4	23.50	100.3	13.4	T1C-4	24.41	101.0	12.7
T1-5	24.73	102.2	13.7	T1C-5	26.17	103.7	13.0
T1-6	25.36	104.0	14.5	T1C-6	27.69	107.3	13.5
T1-7	25.47	104.7	13.5	T1C-7	26.63	104.5	14.4
T1-8	26.75	106.2	14.6	T1C-8	27.45	106.7	13.7
T2-4	23.08	100.0	13.3	T2C-4	24.29	99.8	13.7
T2-6	24.95	102.7	14.6	T2C-6	27.20	102.0	13.5
T2-8	25.33	105.8	15.0	T2C-8	27.31	104.5	13.6
T3-4	24.34	100.0	13.5	T3C-4	25.67	100.0	13.1
T3-6	25.67	103.3	14.2	T3C-6	28.01	104.3	13.6
T3-8	27.48	107.5	14.8	T3C-8	29.21	107.7	14.2
T4-4	24.82	100.5	13.8	T4C-4	24.45	102.3	13.06
T4-6	26.45	106.3	14.8	T4C-6	26.01	104.3	13.50
T4-8	26.46	107.8	15.4	T4C-8	25.44	107.5	14.70

表 11 半開放式橢圓弧形(Type S)之總效率、流量率、揚程數據

編號	總效率 (%)	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)	編號	總效率 (%)	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)
S1-4	21.30	100.0	13.3	S3-5	23.31	99.5	13.4
S1-5	24.01	100.0	13.0	S3-6	25.02	100.0	14.5
S1-6	24.40	100.3	14.0	S3-7	24.19	100.2	14.0
S1-7	25.14	100.3	13.6	S3-8	25.47	100.0	14.9
S1-8	24.97	97.2	14.4	S4-4	23.15	98.8	13.1
S2-4	24.22	99.0	13.6	S4-5	22.79	99.3	14.2
S2-6	23.72	100.3	13.9	S4-6	25.13	100.0	14.4
S2-8	25.25	102.8	14.5	S4-7	25.30	100.5	14.6
S3-4	23.47	98.7	13.3	S4-8	24.93	100.0	15.0

一、各旋葉總效率之分析

在文獻[12]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，各版型旋葉中都有 15 個以上的旋葉，而圖 7 是以最高

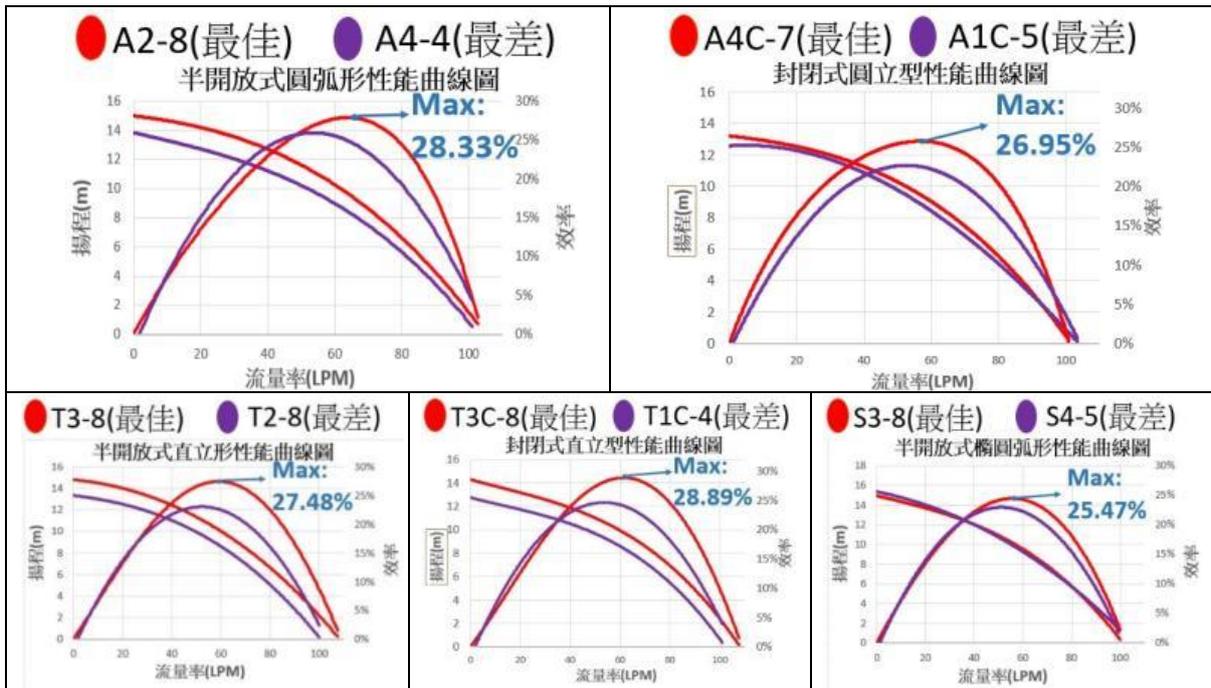


圖 7 各版型旋葉中，最佳及最差旋葉之性能曲線圖

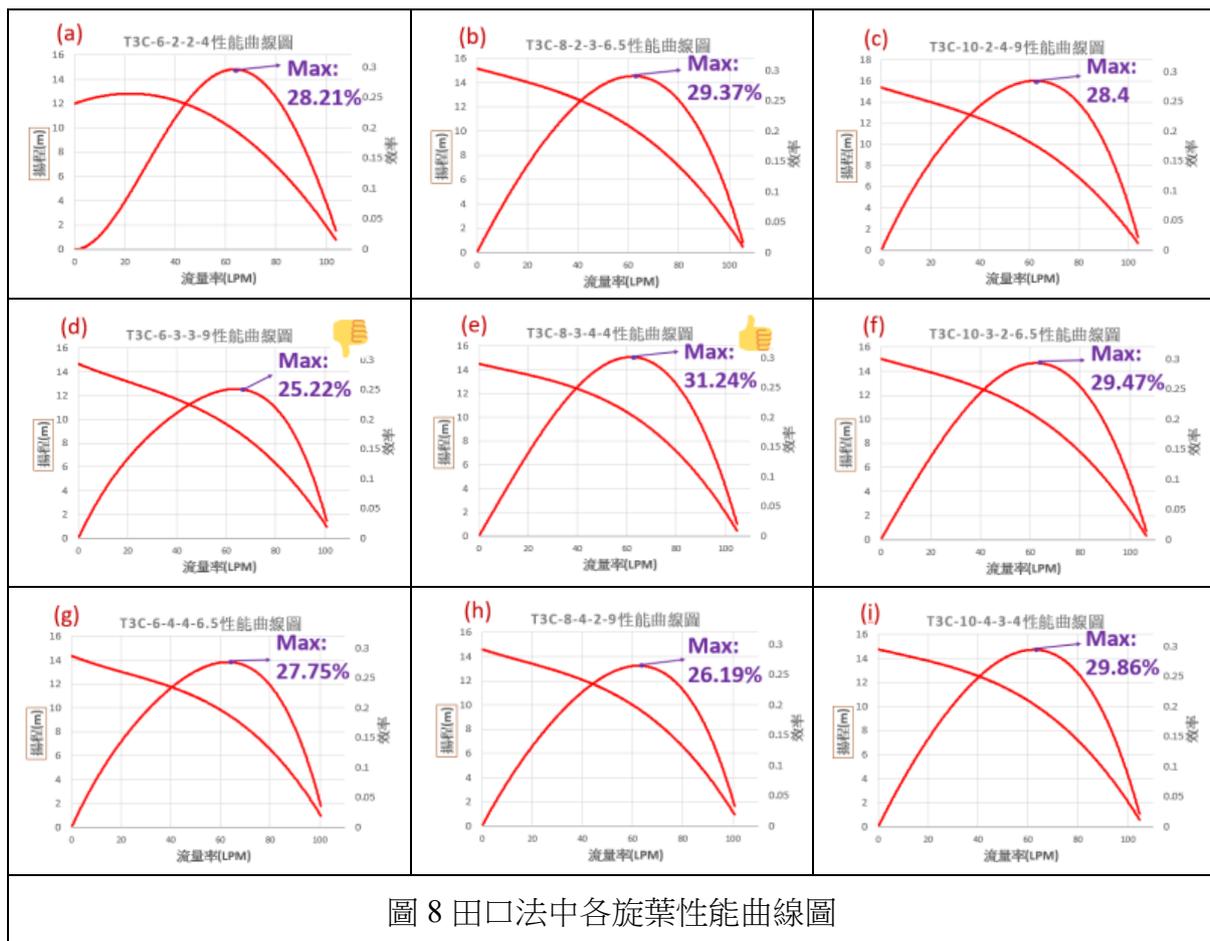
1. S3-8 為橢圓弧形效率最高，在增加了底板的橫槓後，揚程有很大的提升，也間接導致效率的上升，而在直立形第四版中也有增加了這樣的設計，揚程也提升了 3.8 %，但卻相對直立形第三版耗電，因此 T3-8 為半開放式直立形效率最高。

- 封閉式旋葉效率最高的旋葉葉片數是 5、6、7 葉，和半開放式旋葉效率最高的葉片數是 8 葉有所差異，由此可證明封閉式旋葉需要較少的葉片數來帶動水流，而較少量的葉片數能使水在旋葉中有更大的容量。
- 參考文獻發現封閉式旋葉能產生較大揚程[3]，但本實驗揚程卻低於半開放式的旋葉，推測是上蓋的入口半徑不夠大，導致水流無法順利流入旋葉，因此無法產生高揚程，效率也不高。

二、田口法分析

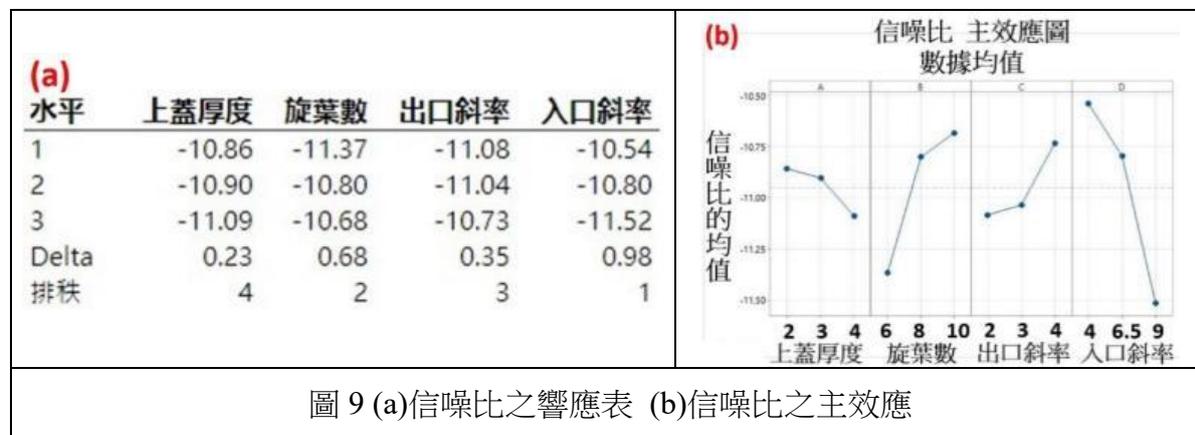
(一)實驗資料分析

如圖 8，由趨勢線可看出 T3C-8-3-4-4 為田口法中效率最高的旋葉，總效率為 32.91%，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。



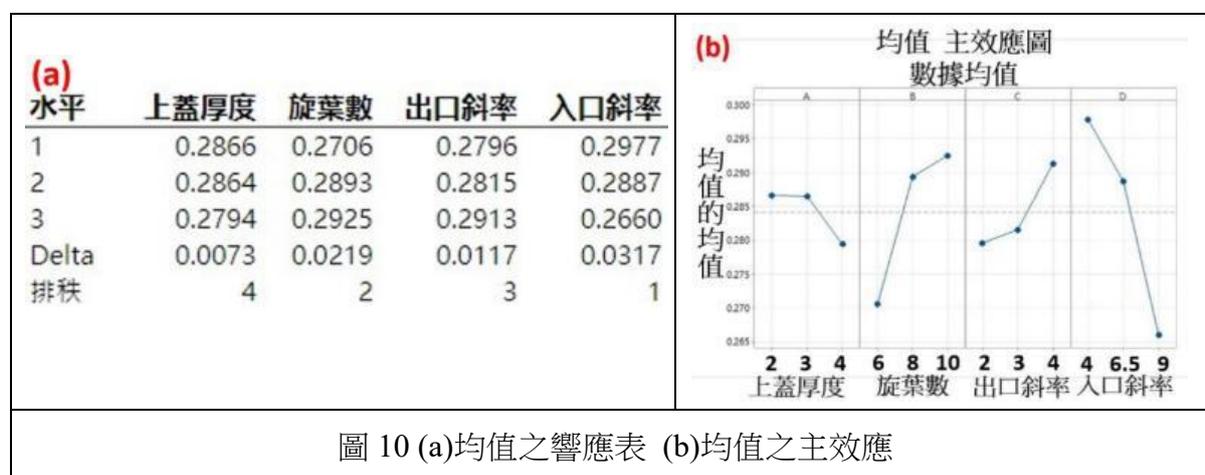
(二)信噪比分析

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，因此信噪比應該越高越好。在信噪比響應表中，發現排秩 1 的因子(入口斜率)之差值大於其他三個因子，由此可發現入口斜率的效應為最大，如圖 9(a)及 9(b)所示。



(三)均值分析

均值響應表中，發現排秩 1 的因子(入口斜率)之差值大於其他三個因子，由此可知入口斜率的效應為最大，其次為旋葉數，接著是出口斜率、入口斜率，最後是上蓋厚度，如圖 10(a)及 10(b)所示。



由圖 9(a)-(b)、圖 10(a)-(b)田口法的結果，得出**最佳參數旋葉為旋葉數 10 葉、上蓋厚度 2 毫米、出口斜率 4、入口斜率 4。**

三、比較導入田口法優化旋葉的前後差異

如表 12，田口法得出的最佳參數組合 T3C-10-2-4-4，其總效率為 32.24 %，相較

第一階段優化時的最佳旋葉，總效率為 29.21 %，提高了 10.95 %，雖最大流量率由原先 107.70 (L.P.M)上升至 106.33 (L.P.M)，下降 1.29 %，而揚程由 14.20 (m)上升至 14.53 (m)，提升 2.32 %，可知利用田口法的實驗使我們的結果有卓越的進步。

表 12 導入田口法旋葉的前後差異比較

	T3C-8 (82 種實驗最佳)	T3C-10-2-4-4 (田口法最佳)
流量率 (L.P.M)	107.70	106.33
揚程 (m)	14.20	14.53
總效率 (%)	29.21	32.44

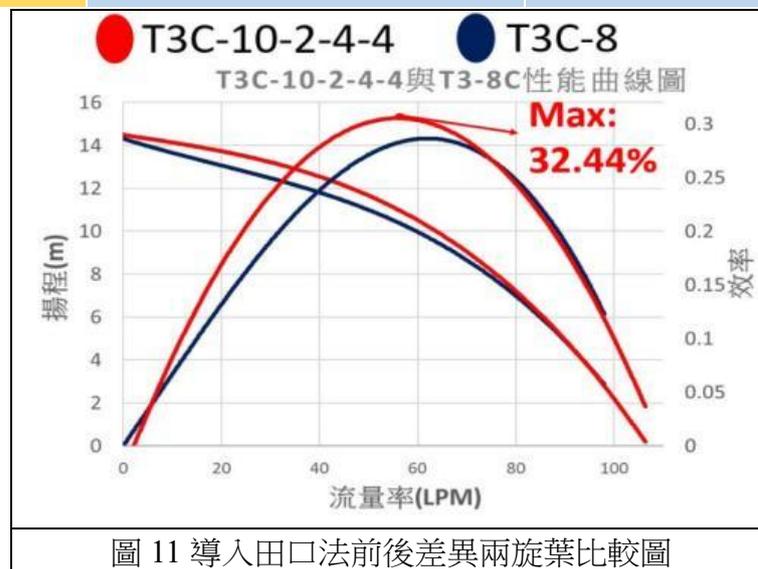


圖 11 導入田口法前後差異兩旋葉比較圖

(四) 機器學習多元線性迴歸分析

一、模型訓練結果

本研究以 python 語言撰寫，程式如附錄一所示，開發環境為 google colaboratory，使用套件有 sklearn、seaborn、matplotlib、pandas、numpy，將旋葉實測資料分成半開放式和封閉式分別為 195 筆和 132 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)的流量率、揚程及效率(Y 值)，總共 6 個模型，其中 MAE 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。

且透過模型方程式中的權重(如表 13、14)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 12)，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[15]，用此種方式來調整參數，以達到最佳效率的目的，此外，可發現六個模型的 MAE 都很小，可證實模型有一定的可信度。

表 13 半開放式旋葉的流量率、揚程、效率參數權重表 (紅色為影響最大的參數)

	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)	效率 (%)
X1 葉片數	1.0518	0.2772	0.0103
X2 寬度	-0.3880	0.0152	-0.0005
X3 入口半徑	0.0600	-0.0133	-0.0030
X4 入口角	0.0240	0.0009	0.0004
X5 出口半徑	9.7250	-0.8280	-0.0089
X6 出口角	-0.0747	-0.0057	0.0006
平均絕對誤差 (MAE)	1.9303	0.3650	0.0157

表 14 封閉式旋葉的流量率、揚程、效率參數權重表 (紅色為影響最大的參數)

	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)	效率 (%)
X1 葉片數	0.8642	0.1890	0.0052
X2 寬度	-0.3588	-0.0354	0.0036
X3 入口半徑	0.0714	-0.0268	-0.0012
X4 入口角	-0.1100	-0.0268	0.0001
X5 出口角	0.1057	0.0430	0.0005
X6 上蓋厚度	-1.3976	0.1651	-0.0012
平均絕對誤差 (MAE)	1.1623	0.3959	0.0115

見圖 12，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 13 的橫軸是實驗與預測誤差的大小，誤差在-1 %為高峰。

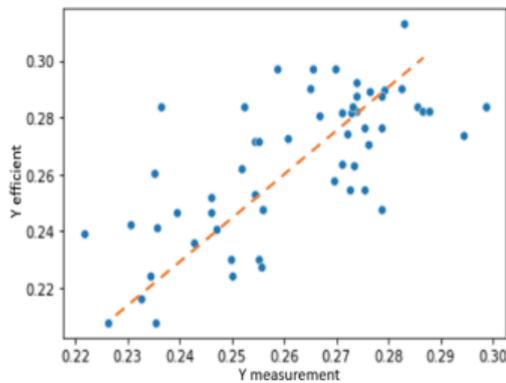


圖 12 模型的迴歸(以半開放式旋葉效率為例)

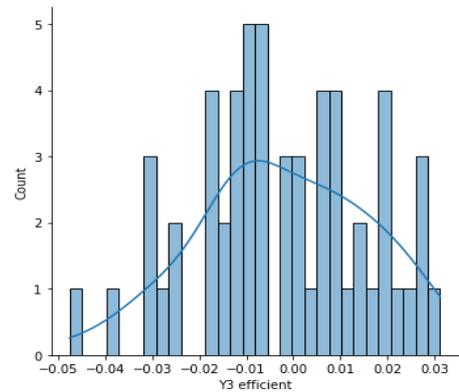


圖 13 實驗與預測的誤差

最後，透過輸入各旋葉參數，能預測出旋葉效率，便能大大節省實驗時間與成本，圖為輸入 A2-8 的參數得到的效率。

```
[74] test2={
      "X1 fans ": [8] ,
      "X2 Width ": [3.8] ,
      "X3 Inlet diameter ": [28.8] ,
      "X4 Angle of inlet ": [27.93] ,
      "X5 exit diameter ": [82] ,
      "X6 Angle of exit ": [28.12]
    }
test=pd.DataFrame(test2)
test

      X1 fans  X2 Width  X3 Inlet diameter  X4 Angle of inlet  X5 exit diameter  X6 Angle of exit
0         8         3.8             28.8             27.93             82             28.12

model.predict(test)
array([0.28906794])
```

圖 14 輸入參數預測效率(以 A2-8 為例)

二、半開放式旋葉驗證

得到各個旋葉參數後，將影響最大的參數套到半開放式與封閉式最佳的旋葉中，並做實測，以了解是否能真正優化旋葉，如表 15，若忽略出口半徑(註 1)，影響半開放式的流量率、揚程與效率最大的參數皆為旋葉數，且其值皆為正，因此我們將旋葉由 8 葉增加至 9、10 葉，並觀察其表現，如圖 15。

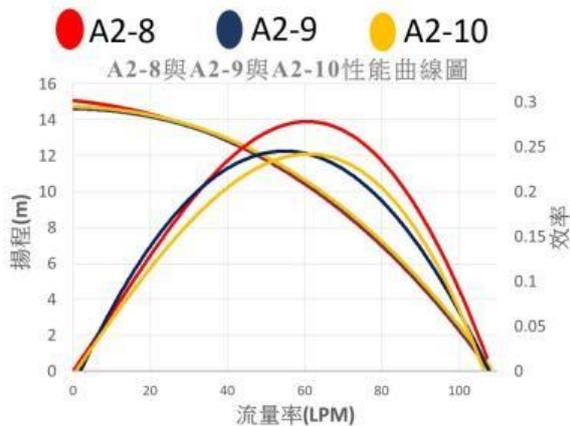


圖 15 A2-8、A2-9、A2-10 性能曲線圖

由圖表可得知流量率是符合模型的判斷，但揚程與效率皆與模型相反，是下降的。

三、封閉式旋葉驗證

而影響封閉式旋葉流量率最大的參數為上蓋的厚度，數值為負因此將厚度由 3 毫米改為 2 毫米，如圖，揚程與效率方面影響最大的參數皆為旋葉數，將葉數由 8 改為 10 葉(對稱性)，如圖 16。

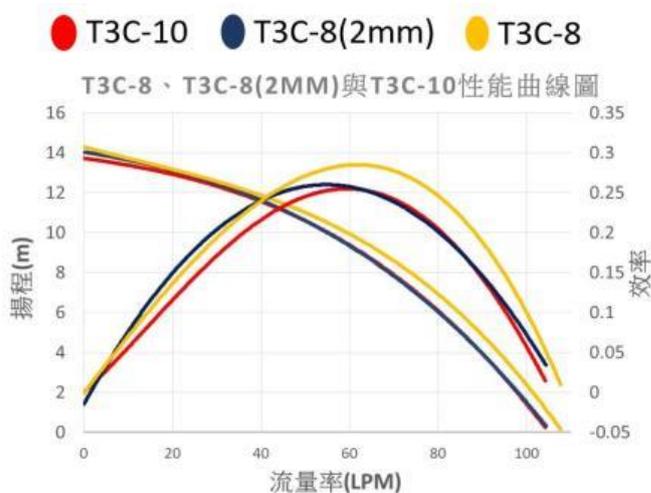


圖 16 T3C-8、T3C-8 (2mm)、T3C-10 性能曲線圖

由圖表可得知流量率與揚程是符合模型的判斷，但效率與模型相反，是下降的。

五、軟體模擬分析

(一) 速度分析

表 17 為我們的實測數據，我們將半開放式及封閉式中流量率最高的旋葉，匯入

表 15 各個旋葉數據比較(紅字:與模型預測不符)，流量率 (L.P.M.)、揚程 (m)、效率 (%)

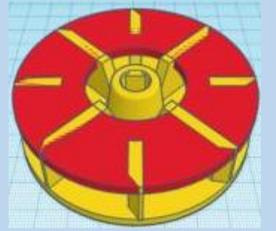
	A2-8	A2-9	A2-10	趨勢
流量率	107.25	107.83	108.33	上升
揚程	15.08	14.63	14.73	下降
效率	0.2769	0.2537	0.2537	下降

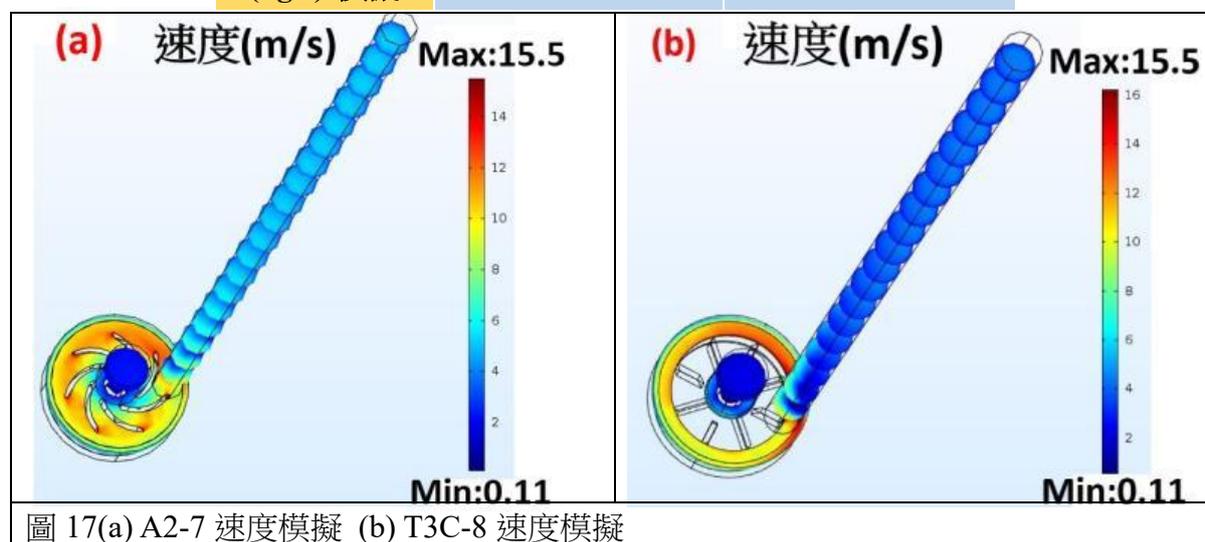
表 16 各個旋葉數據比較(紅字:與模型預測不符)，流量率 (L.P.M.)、揚程 (m)、效率 (%)

	T3C-8	T3C-8 (2mm)	T3C-10	趨勢
流量率	107.67	104.33	104.17	下降
揚程	14.23	14.14	14.63	上升
效率	0.2921	0.2604	0.2537	下降

COMSOL Multiphysics 軟體模擬速度流場分布，來驗證實測的結果，如圖 17(a)、(b)。

表 17 兩旋葉的流量率比較

編號	A2-7	T3C-8
圖片		
流量率 (L.P.M.)-實測	109.3	107.66
質量流率 (kg/s)-模擬	1.8452	1.6931

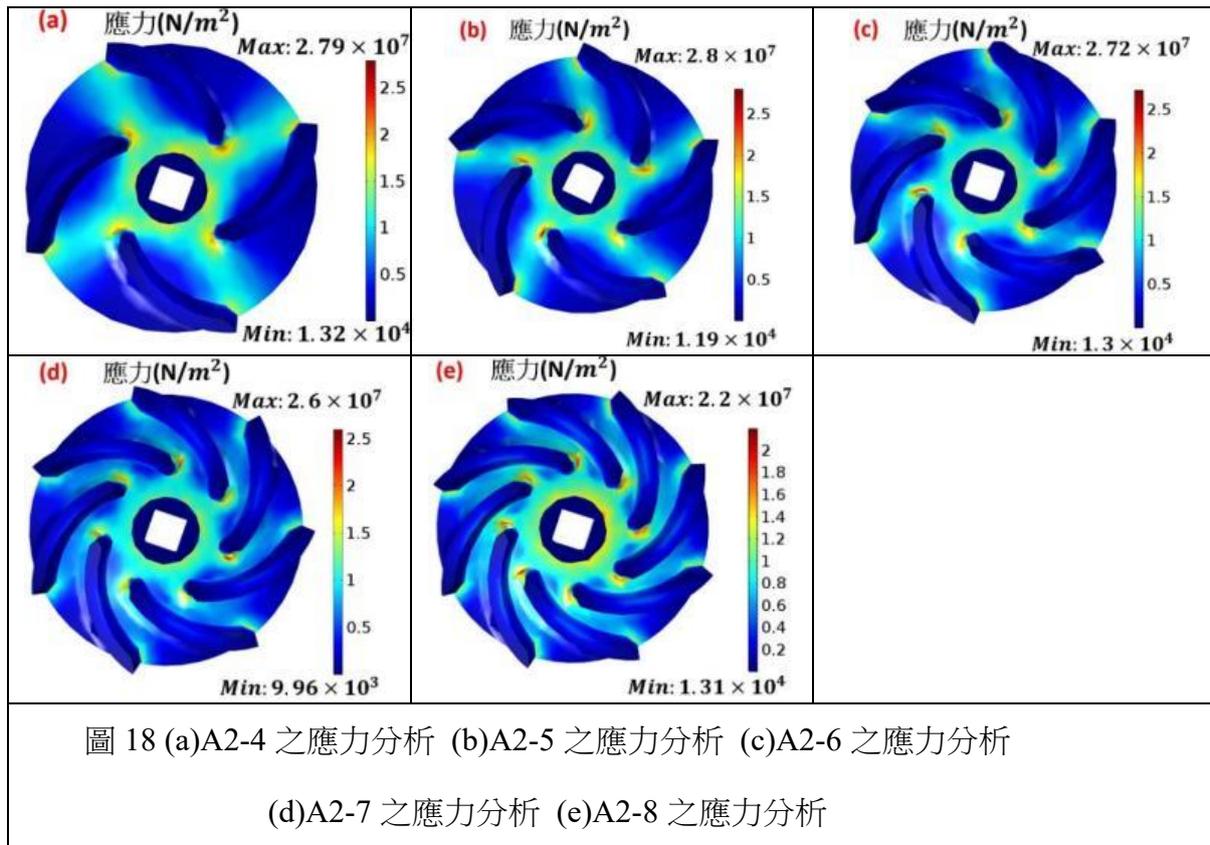


COMSOL Multiphysics 軟體模擬如圖 17(a)、(b)，而我們再在出口處設定表面積分，而其方程式為 $(n_x \times u + n_y \times v + n_z \times w) \times \text{rmspf} \cdot \text{rho}$ 代表出口處之質量流率 (kg/s)[15]，A2-7 為 1.8452 (kg/s) > T3C-8 的 1.6931 (kg/s)，流量率實測結果為 109.3 > 107.66 L.P.M，便能驗證模擬與實測具有相同結果。

(二) ABS 屈服強度

經由 COMSOL 模擬，如圖 18，我們也分析出旋葉在運轉時所受到的應力，來分析 ABS 塑料是否適合用在泵浦上，以 TypeA2 的旋葉模擬作為範例，經模擬發現各旋葉數的旋葉受到的最大應力在 22 到 28 兆帕之間，而市面上 ABS 塑料的屈服強度為

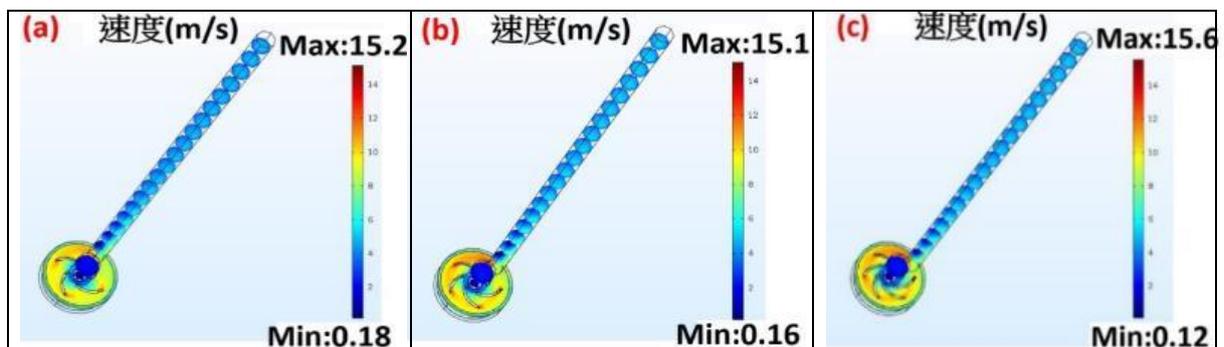
42.5-44.8 兆帕[15]，表示此旋葉在運轉時並不會發生形變。

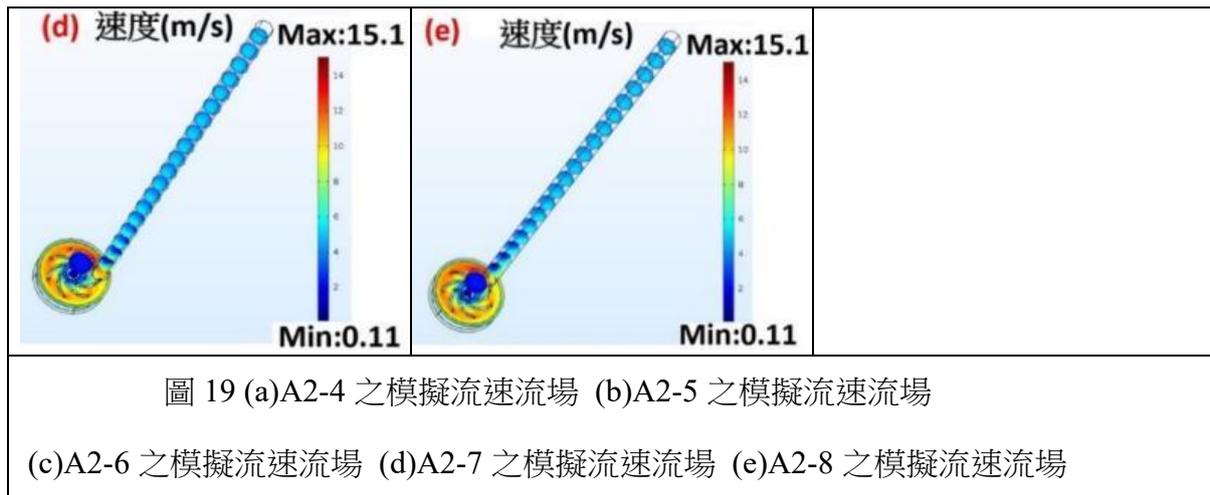


六、檢測軟體與實測結果是否相符

我們將 82 個旋葉匯入軟體模擬中，而我們發現實測與誤差的值差異不大，這邊我們將 TypeA2 的旋葉模擬作為範例，比較各旋葉數與實測的誤差，詳情如表 18。

圖 19 為 TypeA2 的 4-8 旋葉數之模擬圖，而我們實測設備之流量率檢測計位設置在泵浦上方約 0.83 m 處，於是在建構模型中，我們便將出口管長度也設定成 0.83 m，以便我們在計算誤差時，不用因公式(理想情況下:不耗能)而成為誤差增大的因素。





此模擬中，與實測結果誤差皆在 3 % 以內，如表 18，代表此模擬具有相當的準確性，而未來若只要了解旋葉之流量率的大小時，便能先利用模擬比較各旋葉優劣，最後在挑出幾個進行量測印證，這樣便能大大減少 3D 印表機印製的時間及塑料成本。

表 18 表示 A2 圓弧形第 2 代 葉片 模擬與實驗的誤差比較

	實際實驗 (L.P.M.)	軟體模擬 (kg/s)	誤差 (%)
A2-4	106.25	1.7384	1.83
A2-5	107	1.8154	1.80
A2-6	107.5	1.8340	2.36
A2-7	109.3	1.8452	1.30
A2-8	107.25	1.8360	2.71

此模型結構與實測設備誤差皆 < 5 %，像是在旋葉轉動到進入導管的地方，實測設備有設計類似弧面的曲面，以利水流流動，然而在模擬中則沒有建構此模型，也會使得水流流動較不順暢，而在實測的導管中，並不是完全平滑(使用過久導致部分材質耗損)，所以實際測量上可能會有紊流甚至是渦流產生，但在模擬中卻是設定平滑光面，這也是造成誤差的因素之一，未來可以朝這些方向努力。

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 20、21。

(一)以亮粉表示流體於泵浦內的行徑路線



圖 20 (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

(二)實際泵浦運作測試

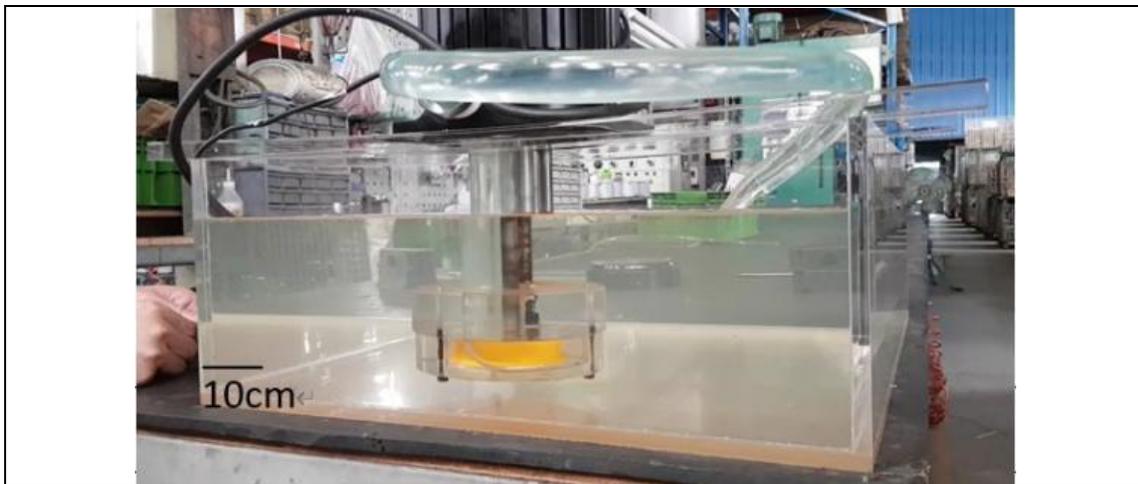


圖 21 透過旋葉旋轉將水加壓後打出泵浦 (水箱80 × 40 cm)

八、塑料旋葉和塑鋼旋葉的數據差異

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 19。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。

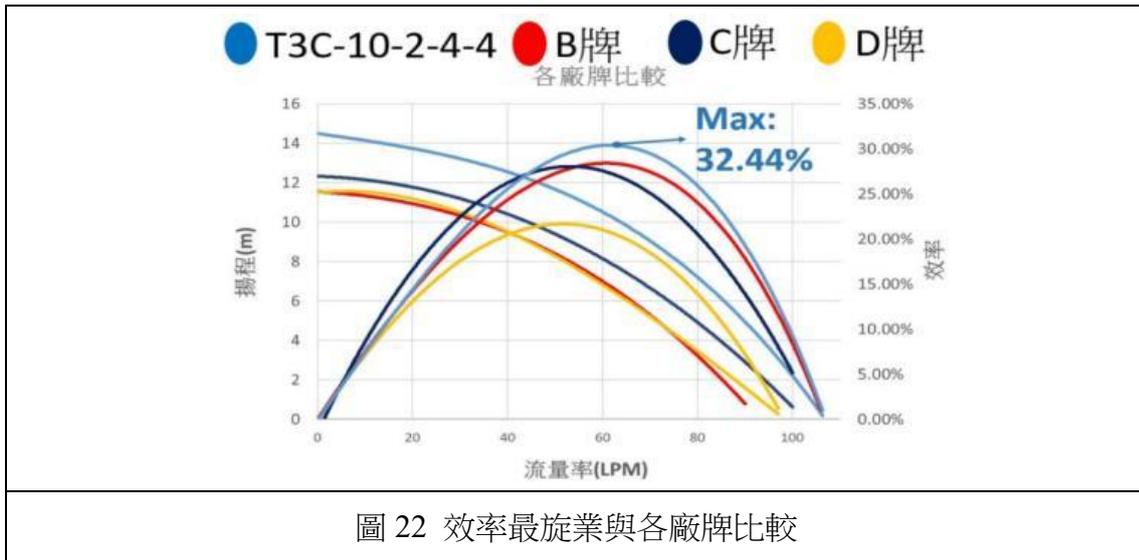
表 19 使用兩不同材質實驗時的誤差

旋葉材質	塑鋼旋葉 流量率 (L.P.M.)	ABS 塑料旋葉 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

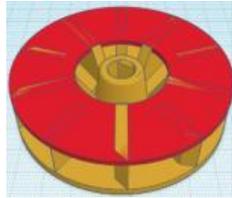
九、研究貢獻

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 品牌及 C 品牌來表示，如圖 22 表示其總效率圖。



流量率方面，T3C-10-2-4-4 旋葉相較 B 品牌旋葉提高了 0.31 %，而揚程低於 B 品牌旋葉 3.33 %，總效率方面，T3C-10-2-4-4 提高 15.65 %，每項數據皆有一定的優化，如表 20 為 T3C-10-2-4-4 及各廠牌各個數據表。

表 20 T3C-10-2-4-4 及各廠牌各個數據表

型號	T3C-10-2-4-4	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)	106.33	106	100	97
揚程 (m)	14.53	15.03	12.33	7.53
總效率 (%)	32.44	28.05	27.66	22.04

伍、討論

一、旋葉出口方向影響流量率

剛開始設計旋葉時失誤，搞錯旋葉旋轉方向，導致流量率的表現不佳，參考文獻發現將後傾式旋葉作成前傾式，前傾式出口角度大於 90 度，且葉片數通常需要比較多，而後傾式則相反，將方向修正後，發現流量率和效率皆有明顯提升。

二、本研究流程和傳統研究流程差異

相較傳統研究以模擬來得到最佳參數，最後再進行實測以印證模擬結果，本實驗先以實測方式來找出較佳的旋葉形狀及版數，套入到田口法當中得出最佳參數組合，並用 COMSOL 軟體模擬驗證實測結果。

三、直立形第四版改良前後差異

直立型旋葉在第四版中加入了橫槓底版，如圖 23，底版使水流在流動時有更大壓力，揚程提升了 3.8 %，也將葉片突出底版，如圖 24，增加對水的加速時間，以提升流量率。

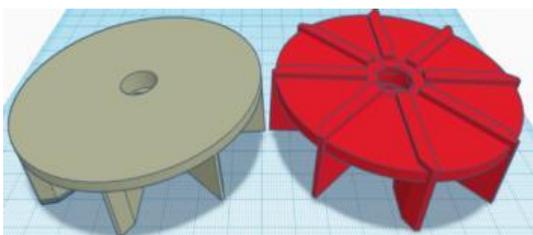


圖 23 直立形三四版底版差異

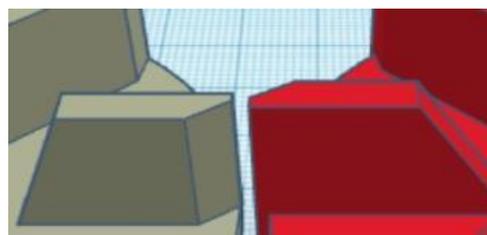


圖 24 直立形三四版葉片與底版關係

四、未來展望

(一)將提案和廠商合作，提供機器學習中多元線性回歸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。

(二)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。

(三)在實測封閉式旋葉時，我們意外發現其運轉噪音相較半開放式旋葉小聲很多，未來便也可以發展出低躁音、適合家庭用戶之旋葉。

陸、結論

本研究主要探討對泵浦優化之相關研究，而我們先設計出 82 種旋葉，然後利用總效率公式挑出最佳旋葉(T3C-8)，接著利用田口法更改細微參數進一步優化，最後得出最佳旋葉為 T-10-2-4-4，此外我們將封閉式及半開放式中流量率最高的旋葉匯入 COMSOL Multiphysics 軟體模擬中檢測流量率的數據是否與實測結果相符，接著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、擴增旋葉形狀設計參數之探討

我們參考文獻發現[7]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[8]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**封閉式直立型**。

二、導入田口法提升總效率

在挑出最佳旋葉後，我們將之旋葉數-上蓋厚度-出口斜率-入口斜率參數做更改，試著將總效率提高，而我們最後得出最佳旋葉為 T3C-10-2-4-4 總提升效率 10.95 %。

三、實測結果與軟體模擬相符

將封閉式及半開放式中流量率最高的旋葉匯入 COMSOL Multiphysics 模擬軟體中，與實驗做比對，最後透過速度模擬證明我們的實測與模擬實驗相符，誤差值皆在 3 %以內。

四、市面泵浦與本研究中最佳旋葉泵浦之比較

本研究選擇三間在台灣製作的泵浦廠商，我們購買了出水口徑相同及同馬力的泵

浦，接著與 T3C-10-2-4-4 進行比較，結果是 T3C-10-2-4-4 相較第二名之泵浦效率高出 15.65 %，效率上已更優化突破。

五、透過監督式機器學習預測泵效率值

利用實驗獲得的數據來訓練迴歸模型，藉由平均絕對誤差 MAE 來評估模型準確性，並藉由輸入參數來直接預測效率值，減少大幅實驗時間與成本。

六、封閉式旋葉效率有優化顯著表現

在本實驗果發現結果發現，封閉式圓弧形的效率、揚程、流量率相較半開放式旋葉沒有顯著的表現，然而封閉式直立型在效率上有很大的提升，T3C-10-2-4-4 更是本研究效率最高的旋葉。

七、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，來觀察旋葉打水的紊流動軌跡。

柒、參考文獻資料

- [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]ACCA PUMPS, *Types of lemper in pumps-selection and consideration*,ACCA PUMPS Katy,TX。 <https://accapumps.com/types-of-impeller-in-pumps-selections-and-considerations/>
- [4]如何用少量 AI 數據，做好機器學習? <https://ai-blog.flow.tw/2021-aia-at-flow-few-shot-learning>，111/1/1 擷取。
- [5]J.- M Chapallaz、P. Eichenberger、G. Fischer(2021)*Manual on Pumps Used as Turbines*。SKAT，瑞士。

- [6]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。
- [7]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。
- [8]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.
- [9]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.
- [10]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*, 385809, 1-7.
- [11] Dale Hsieh(2011 年 3 月)。 *實驗設計---田口法介紹*。 Slideshare。
<https://www.slideshare.net/DaleHsieh1?>
- [12]D.C. Montgomery (2009) . *Design and analysis of experiments*, 7th ed., John Wiley & Sons (Asia), Hoboken, New Jersey.
- [13]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。
- [14]AI4kids(2020)。 *學 AI 真簡單(I)：初探機器學習*。全華圖書。
- [15]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。

【評語】 052413

採用 3D 列印開發不同外型及葉片數目設計，使用電腦輔助軟體分析旋葉內部流場與應力場分析，實驗量測泵浦之流量、揚程及效率，田口實驗計畫法二階優化，以獲得效率最佳之旋葉，由信噪比與均值分析結果發現，入口斜率為最重要影響參數、其次為旋葉數與出口斜率，藉由人工智慧機器學習建立參數優化相關模型，以預測總效率。幾個建議和待改進的方向：

1. 宜強化機器學習的線性迴歸模型分析。
2. 對於模擬的軟體宜更加詳述使用的來源和該軟體的操作原理。
3. 研究做法順序(實驗、模擬、機器學習)並未能顯示機器學習的優點。而對於半開放式與封閉式旋葉驗證出的結果與預期不同，可再進行分析，看是何種原因導致不如預期。
4. 內文用詞沒有統一，且部分內容遺失。Ex. 前面使用訊噪比，後面使用信噪比；在圖 7 前的內文：「而圖 7 是以最高……」後文遺失。
5. 在表 10 中，T3C-8 的最高總效率為 29.21%，但在圖 7 中，T3C-8 的最高總效率則為 28.89%，前後資料不符。在圖 8 前的內文寫：「如圖 8，由趨勢線可看出 T3C-8-3-4-4 為田口法中效率最高的旋葉，總效率為 32.91 %」，但圖 8 中 T3C-8-3-4-4 的總效率為 31.24%，內文與圖表不符。

作品簡報

運用機器學習和軟體模擬

優化泵浦旋葉

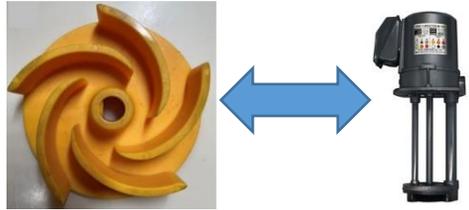
科別:工程學科

組別:高級中等學校

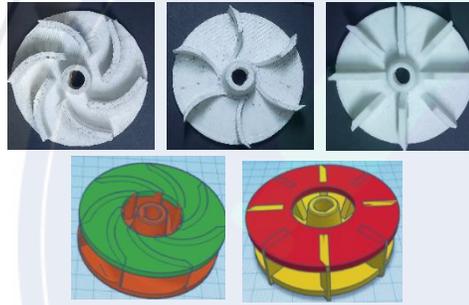
研究動機與目的

研究動機

發現旋葉結構跟
泵浦效率有關連



希望將不同幾何
形狀旋葉來比較



並利用田口法優化，
透過Minitab軟體分析

Experiment Number	Column			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1



增進泵浦
之競爭力



研究目的

- (一) 探討用3D列印的旋葉構型對泵浦總效率之影響效應，期望提出最佳效率之旋葉。
- (二) 從82種旋葉中挑選最佳的旋葉，並用田口實驗計畫法二階優化，以得最佳旋葉。
- (三) 運用監督式學習方法嘗試在有限的數據中建立參數優化模型以預測效率。
- (四) 用COMSOL Multiphysics軟體模擬驗證實測結果是否相符。

研究方法

本研究設計82種旋葉，將其分為五類，如圖1(a)~(e)，同時設計葉片數目由4到8片，捨棄其中無對稱性部分。

(a)	A1C- <i>ea327-ia266-4</i> to <i>ia266-8</i>					A2C- <i>ea281-ia279-4</i> to <i>ia279-8</i>					A3C- <i>ea277-ia341-4</i> to <i>ia341-8</i>					A4C- <i>ea336-ia494-4</i> to <i>ia494-8</i>				
(b)	T1C- <i>ea327-ia266-4</i> to <i>ia266-8</i>					T2C- <i>ea281-ia279-4</i> to <i>ia279-8</i>					T3C- <i>ea277-ia341-4</i> to <i>ia341-8</i>					T4C- <i>ea336-ia494-4</i> to <i>ia494-8</i>				
(c)	Type A1: <i>A1-ea327-ia266-4</i> to <i>ia266-8</i>					Type A2: <i>A2-ea281-ia279-4</i> to <i>ia279-8</i>					Type A3: <i>A3-ea277-ia341-4</i> to <i>ia341-8</i>					Type A4: <i>A4-ea336-ia494-4</i> to <i>ia494-8</i>				
(d)	Type T1: <i>T1-es0-is102-4</i> to <i>is102-8</i>					Type T2: <i>T2-es75-is134-4</i> to <i>is134-8</i>					Type T3: <i>T3-es75-is40-4</i> to <i>is40-8</i>					Type T4: <i>T4-es69-is158-4</i> to <i>is158-8</i>				
(e)	Type S1: <i>S1-ea885-ia852-4</i> to <i>ia852-8</i>					Type S2: <i>S2-ea988-ia94-4</i> to <i>ia94-8</i>					Type S3: <i>S3-ca661-ia51-4</i> to <i>ia51-8</i>					Type S4: <i>S4-ea539-ia111-4</i> to <i>ia111-8</i>				

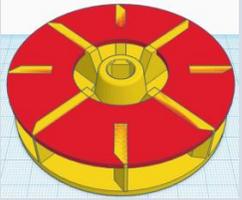
圖1 編碼總表 (a)封閉式圓弧形 (b)封閉式直立形 (c)半開放式圓弧形 (d)半開放式直立型 (e)半開放式橢圓弧形

研究結果1-實測結果

經由實測得到半開放式與封閉式最高效率旋葉的性能曲線圖，如圖2、3所示。

- 流量率與效率關係曲線
- 流量率與揚程關係曲線

表1 半開放式與封閉式最高旋葉比較表

旋葉種類	A2-8	T3C-8
比較項目		
流量率 (L.P.M)	107.3	107.70
揚程 (m)	15.1	14.20
總效率 (%)	28.33	29.21

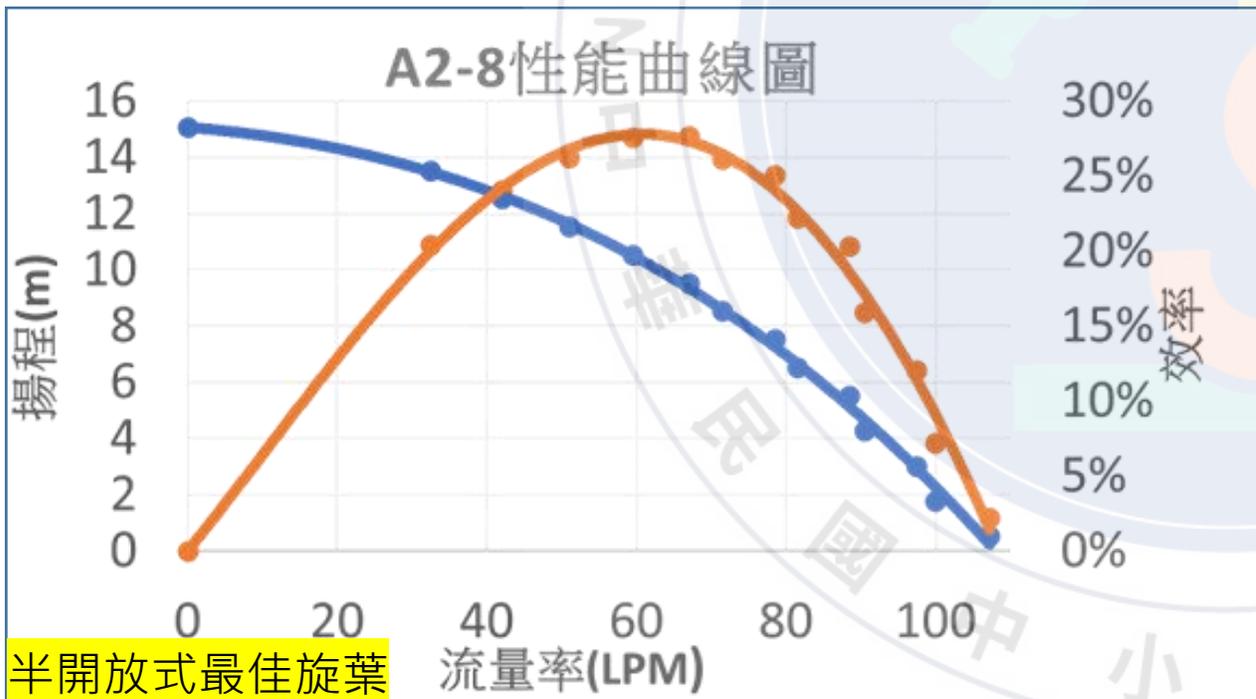


圖2 A2-8性能曲線圖

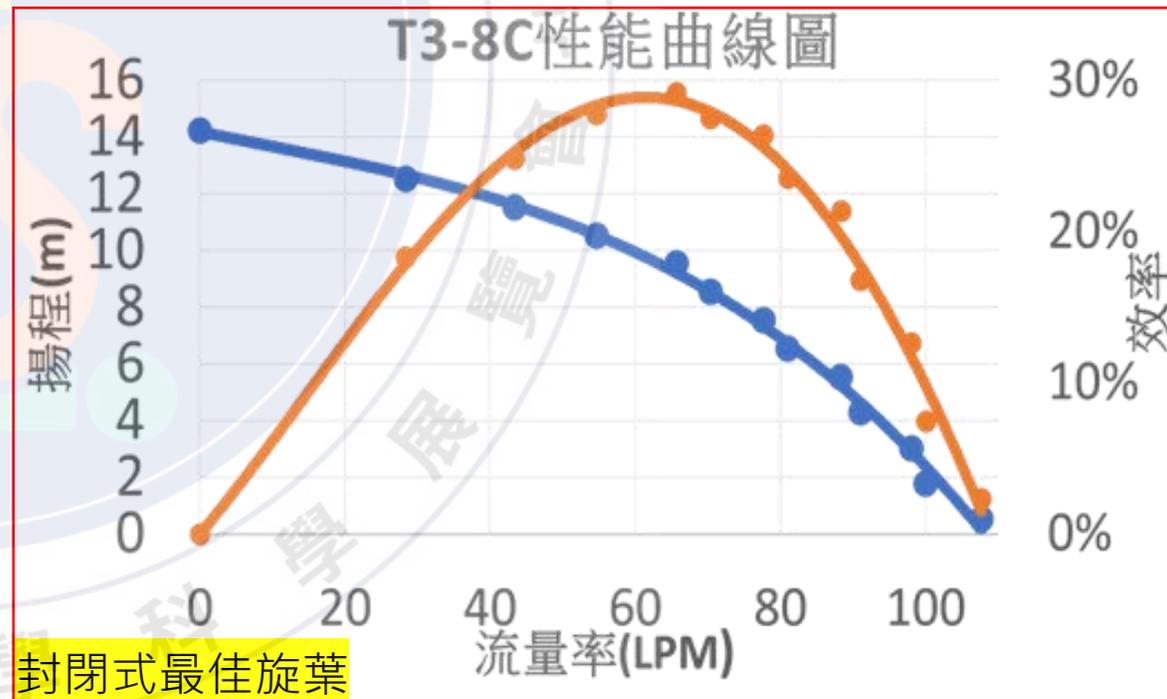


圖3 T3C-8性能曲線圖

研究結果2-田口法優化

得到效率最佳的T3C-8後，以其為基準設計一個 $L_9 3^4$ 的田口法實驗，如表 2。目標是望大。

表2 $L_9 3^4$ 的田口法

上蓋厚度 (mm)	旋葉數	出口斜率	入口斜率
2	6	2	4
2	8	3	6.5
2	10	4	9
3	6	3	9
3	8	4	4
3	10	2	6.5
4	6	4	6.5
4	8	2	9
4	10	3	4

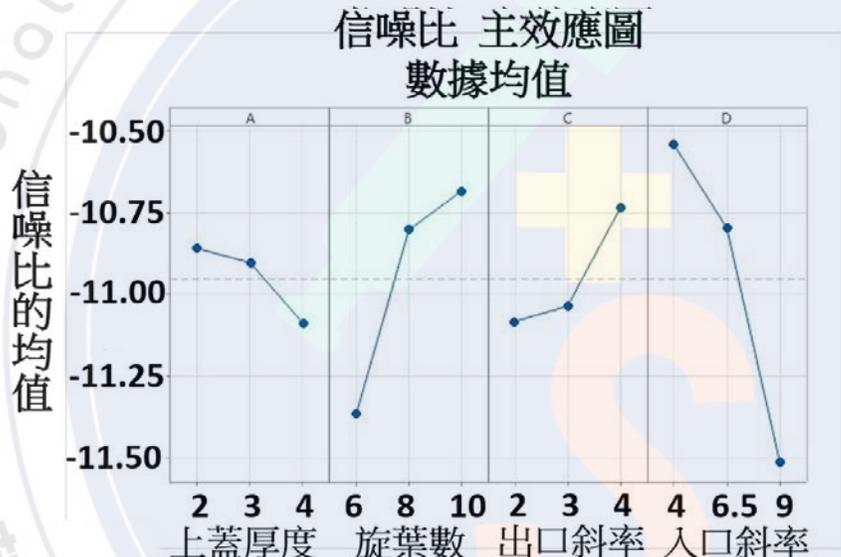


圖4 信噪比主效應圖

參數影響大 小

入口斜率	旋葉數	出口斜率	上蓋厚度
4	10	4	2

最佳參數組合

表3 導入田口法旋葉的前後差異比較

旋葉種類	T3C-8 (82種最佳)	T3C-10-2-4-4 (田口法最佳)
比較項目		
流量率 (L.P.M)	107.70	106.33
揚程 (m)	14.20	14.53
總效率 (%)	29.21	32.44

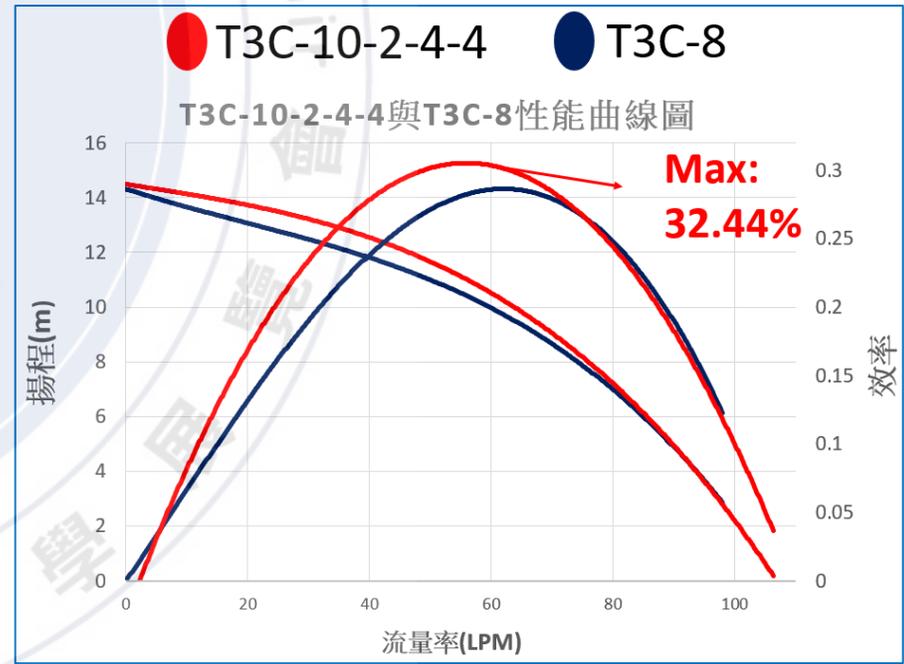


圖5 導入田口法前後差異兩旋葉比較圖

研究結果3-軟體模擬

將半開放式及封閉式中流量率最高的旋葉，匯入COMSOL Multiphysics軟體驗證實測的結果

表4 兩旋葉的流量率比較

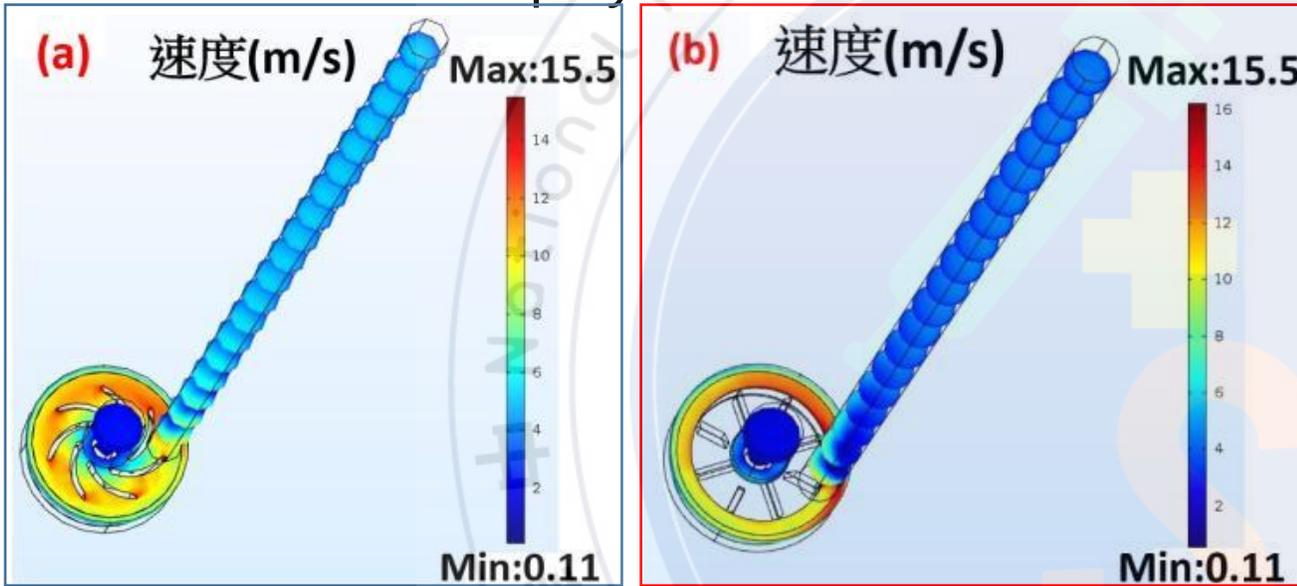


圖6 模擬流速流場 (a)A2-7 (b)T3C-8

編號	A2-7	T3C-8
圖片		
流量率 (L.P.M.)- 實測	109.3	107.66
質量流率 (kg/s)- 模擬	1.8452	1.6931

- 1.在旋葉上方0.53m的出口管表面處，計算此表面積分，如表4，實測得出的流量率與模擬的質量流率皆是A2-7大於T3C-8，表示此模擬結果與實測數據是相輔相成的。
- 2.圖6(a)在出水口的整體流速較圖6(b)快，也再一次證明了實測結果(A2-7的流量率 > T3C-8的流量率)。

研究結果3-軟體模擬

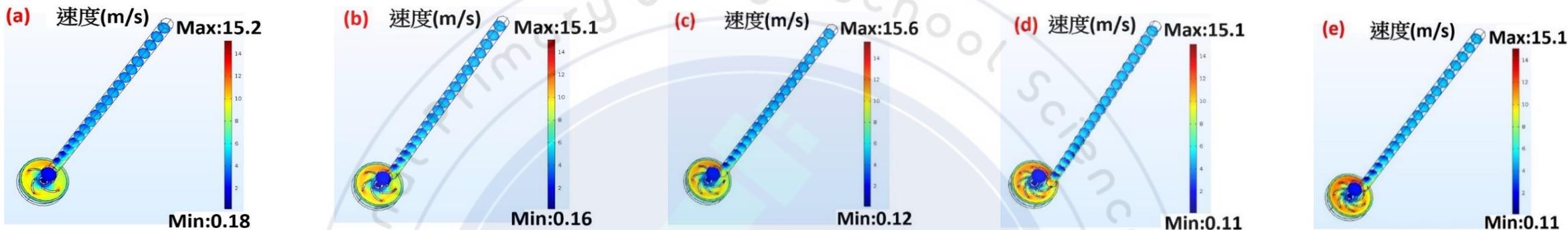


圖7 模擬流速流場 (a)A2-4 (b)A2-5 (c)A2-6 (d)A2-7 (e)A2-8

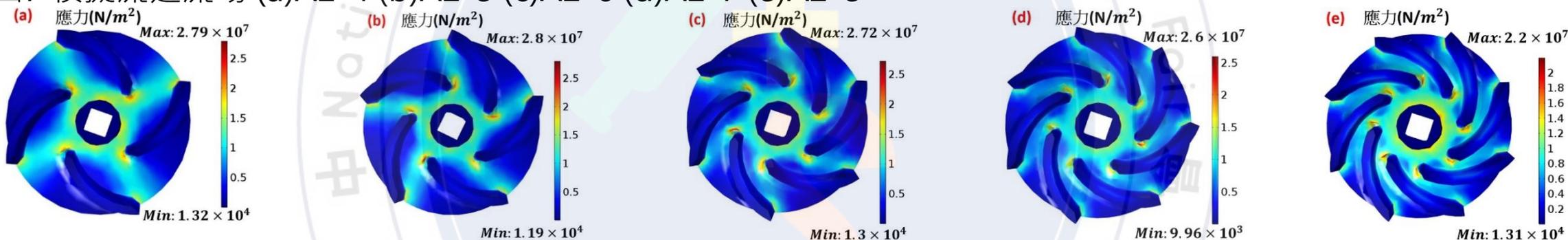


圖8 應力分析 (a)A2-4 (b)A2-5 (c)A2-6 (d)A2-7 (e)A2-8

表5 模擬與實驗的誤差比較

1. 如表5，此模擬與實測的誤差皆在3%以內。

2. ABS塑料屈服強度遠大於旋葉所受到的最大應力。

3. 實際測試時，旋葉也鮮少發生斷裂的情形。

編號	實際實驗 (L.P.M.)	軟體模擬 (kg/s)	誤差 (%)	最大應力 (兆帕)	ABS塑料屈服強度(兆帕)
A2-4	106.25	1.7384	1.83	27.9	42.5-44.8
A2-5	107	1.8154	1.80	28	
A2-6	107.5	1.8340	2.36	27.2	
A2-7	109.3	1.8452	1.30	26	
A2-8	107.25	1.8360	2.71	22	

研究結果4-機器學習

旋葉資料集共276筆，切分訓練70%、測試30%。透過訓練的模型預測出未知的旋葉參數(X值)的流量率、揚程和效率(Y值)。透過模型方程式中的係數得知各項參數優化方向，MAE代表預測值與實際值的誤差。



相關係數越低(深色)越好

表6 參數權重表(紅色代表影響最大之參數)

比較項目 參數	流量率 (L.P.M.)	揚程 (m)	效率 (%)
X1 葉片數	0.8642	0.1890	0.0052
X2 寬度	-0.3588	-0.0354	0.0036
X3 入口半徑	0.0714	-0.0268	-0.0012
X4 入口角度	-0.1100	-0.0268	0.0001
X5 出口角度	0.1057	0.0430	0.0005
X6 上蓋厚度	-1.3976	0.1651	-0.0012
平均絕對誤差 (MAE)	1.1623	0.3959	0.0115

圖9 相關係數熱度圖

研究結果4-機器學習

1. 透過輸入各旋葉參數，預測出旋葉**流量率、揚程和效率**。
2. 將影響最大的參數套到封閉式最佳的旋葉中，並做實測。
3. **流量率與揚程是符合模型的判斷**，但**效率與模型相反**，是下降的。

表7 T3C-8、T3C-8(2mm)與T3C-10數據比較表

	T3C-8	T3C-8(2mm)	T3C-10	趨勢
流量率	107.67	104.33	104.17	下降
揚程	14.23	14.14	14.63	上升
效率	0.2921	0.2604	0.2537	下降

模型與實測相違背

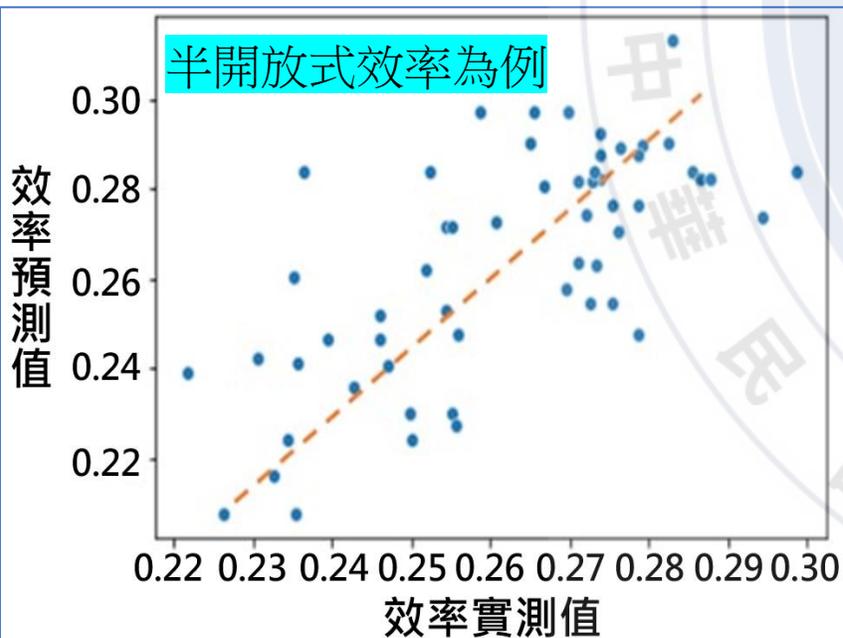


圖10 模型的迴歸

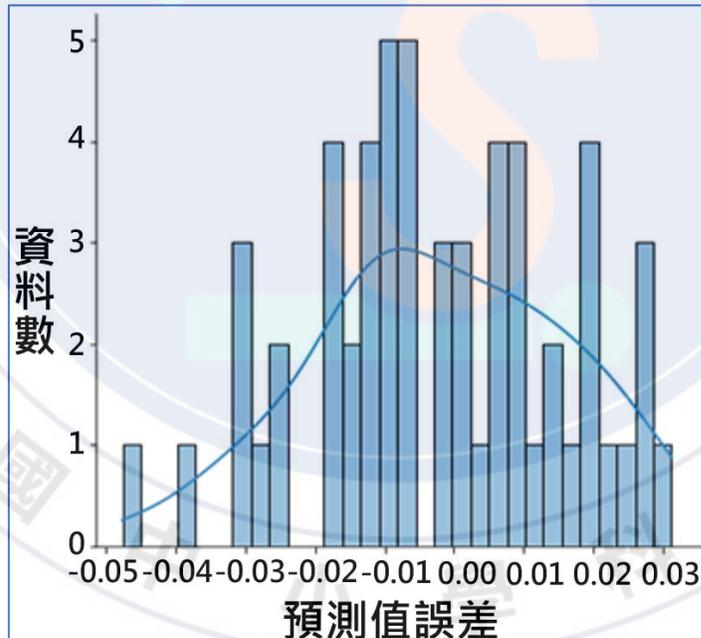


圖11 模型回歸誤差

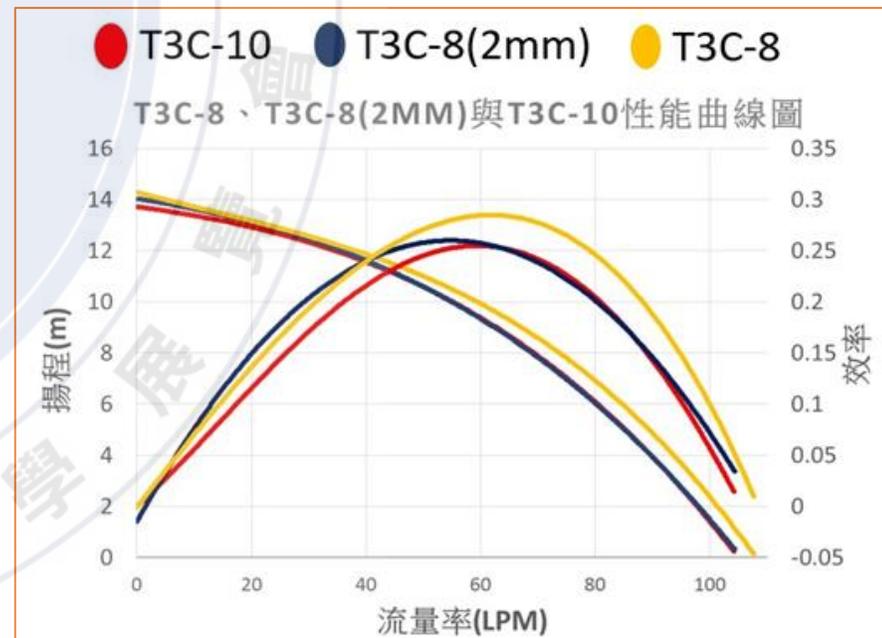


圖12 三種旋葉性能曲線圖

對於結果的解釋

1. 實測方面: 將最佳旋葉和其他廠牌比較，流量率方面，T3C-10-2-4-4相較B品牌提高了0.31%，而揚程低於B品牌3.33%，總效率方面，則提高15.65%。
2. 在機器學習方面: 得出的模型預測在效率上不如預期，推測是資料不足所導致，而多元線性回歸模型的缺點是無反曲點，需藉由參考文獻設定參數的上下限。

表8 各廠牌數據比較

型號	T3C-10-2-4-4	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)	106.33	106	100	97
揚程 (m)	14.53	15.03	12.33	7.53
總效率 (%)	32.44	28.05	27.66	22.04

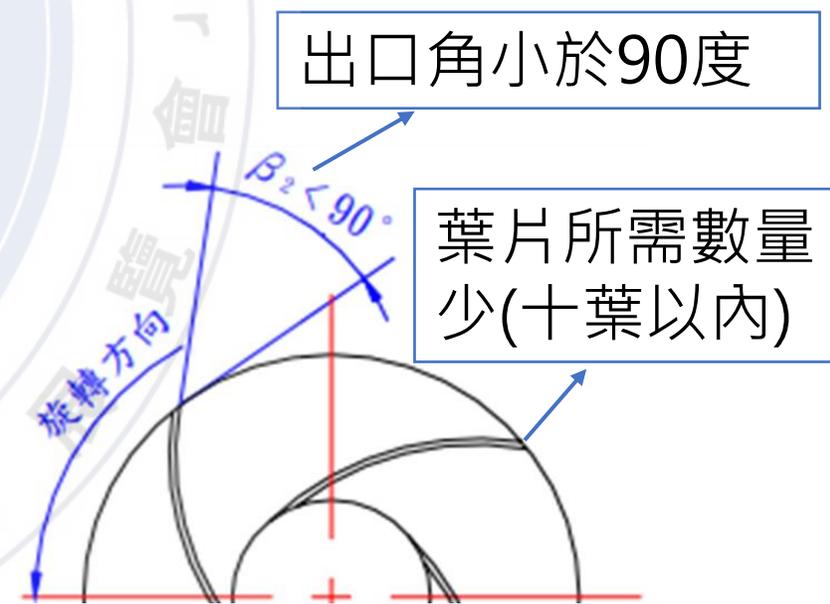


圖13 後傾式旋葉特徵

結論

一、導入田口法提升總效率

將T3C-8的旋葉數-上蓋厚度-出口斜率-入口斜率參數做更改，最後得出最佳旋葉為T3C-10-2-4-4提升**效率10.95%**。

二、市面泵浦與本研究中最佳旋葉泵浦之比較

購買三種出水口徑相同及同馬力的泵浦，接著與T3C-10-2-4-4進行比較，結果是**T3C-10-2-4-4**相較第二名之泵浦**效率高出15.65%**。

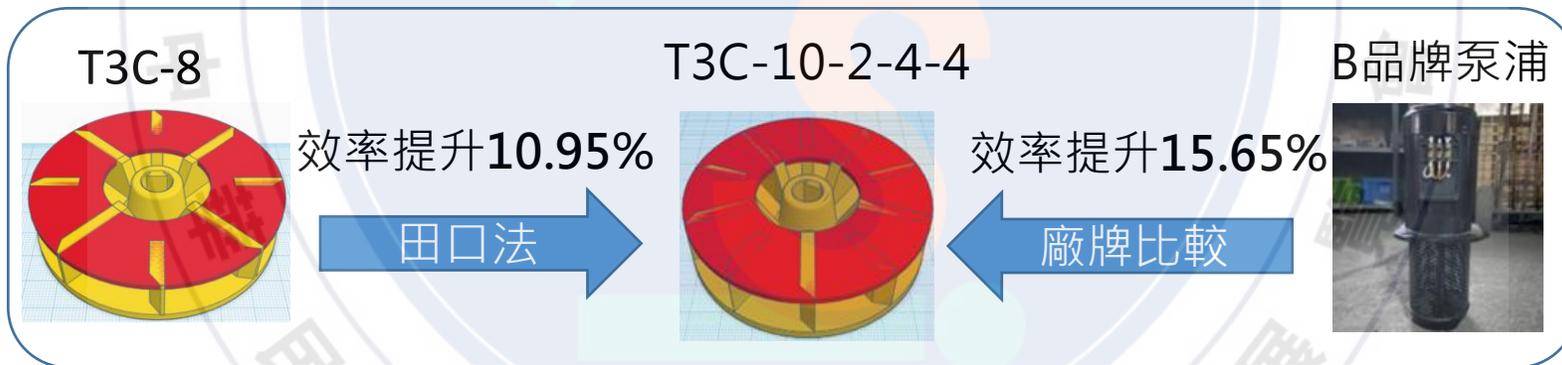


圖14 最佳旋葉、田口法目標旋葉與其他廠牌泵浦比較

三、封閉式旋葉效率有優化顯著表現

實驗結果發現，**封閉式直立型在效率**上有很大的提升，**T3C-10-2-4-4**更是本研究**效率最高的旋葉**。

四、透過監督式機器學習預測泵效率值

用實驗數據來訓練迴歸模型，得知旋葉優化方向，並藉由輸入參數來直接預測效率值。

五、實測結果與軟體模擬相符

將速度模擬與實驗做比對，證明我們的實測與模擬實驗相符，誤差值皆在3%以內。



參考資料

- [1]王希伯(1991)。流體機械。新北市：文京圖書有限公司。1
- [2]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。
- [3]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。
- [4]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.
- [5]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.
- [6]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, 385809, 1-7.
- [7]D.C. Montgomery (2009). Design and analysis of experiments, 7th ed., John Wiley & Sons (Asia), Hoboken, New Jersey.
- [8]AI4kids(2020)。學AI真簡單(I)：初探機器學習。全華圖書。