

# 奧特曼流量計流場數值模擬與驗證

陳建霖<sup>1</sup> 徐祥禎<sup>2</sup> 朱力民<sup>3</sup> 羅德偉<sup>4</sup>

1 助理教授 2,3 副教授 義守大學 機械與自動化工程學系

4 研究生 義守大學 機械與自動化工程學系

e-mail:james88@isu.edu.tw

## 摘要

奧特曼流量計因具有高準確性、可靠度和量程比，所以奧特曼流量計可應用在不同流體之流量量測。本文利用計算流體力學技術，對奧特曼流量計內速度場與壓力場做模擬與分析，並與符合國家標準的實驗室進行實驗驗證，結果顯示本研究進行葉輪流量計之數值模擬已有一定的能力。本文所建立的計算流體力學分析模式可合理預估流量隨出口壓力變化的關係，並分析此奧特曼流量計之模擬流場，發現到達一定流量時，K 值如預期會趨向於一穩定常數。

**關鍵詞：**奧特曼流量計、計算流體力學

## 1. 前言

台灣本島年降雨量雖十分充沛，但由於降雨量無論在地域、季節之分佈極不平均，且山坡陡峻，以及颱風豪雨雨勢急促，大部分的降雨量皆迅速流入海洋，因此容易造成乾旱的現象。事實上，在台灣我們每人每年分配到可利用的水量很少，只及世界平均值的六分之一，按目前世界標準，屬於缺水地區。然而依專家推估我們每年需增加一億立方公尺的生活用水與工業用水，水資源的保護與保育就相當重要。節約用水不僅是為因應缺水的問題，而且也為保護環境；因為節約用水可以減少開發新水庫，間接也保護環境[1]。然而台灣地區的自來管線是光復後逐年興建，大多老舊破損，目前漏水率高達 20% 以上。因此在水資源缺乏的今日，如何使用流量計量測正確水量以進行漏水評估或使用水資源，都是民生或工業上重要的課題。因而許多不同型式的流量計因應而生，如奧特曼流量計、渦流式流量計、電磁式流量計等等。

奧特曼流量計又稱軸流式葉輪流量計，由 1790 年 Woltmann 提出由葉片轉動而量得流量的原理，為紀念他的貢獻所以稱此類流量計為奧特曼流量計，在 1938 年[2]第一個葉輪流量計被發明出來量測流量。由於美國天然氣工業大量的使用葉輪流量計在大口徑、高壓的天然氣管路當中，所以 1940 到 1950 年葉輪流量計被大量推廣和蓬勃發展。從 1950 年到現在針對葉輪流量計性能分析方面有相當多的研究[3-6]，以 Thompson[3]所提出的 airfoil theory 被後來的學者研究並廣泛的應用在訂定葉輪流量計的性能曲線上面，以葉輪轉速( $\omega$ )與流體流量(Q)成正比，定義流量計因子 K 如下

$$K = \frac{\omega}{Q} \quad (1)$$

為奧特曼流量計量原理，也就是說此為設計所需之基本參數。在設計安裝葉輪流量計也有許多研究與規範[7-12]。葉輪流量計因具有高準確性、可靠度和量程比，所以葉輪流量計可應用在不同流體當中，除了水、天然氣，石油之外，包括生化、食品方面等等也有廣泛的應用。

自從具有精密運算功能的高速電腦被迅速發展與普及化後，使用計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的方法來解決科學與工程上的問題已經成為一項新的趨勢。一方面可減少設計與開發的時間與金錢，另一方面可深入探討無法經由實驗量測觀察的現象。目前已經有許多分析流場的 CFD 軟體，不管在學術或是工業上均廣泛被使用著。在流量計的流場分析[13-19]中也扮演重要的角色。

利用發展成熟的 CFD 軟體 Fluent[20-21]，輔助現有實驗能量進行模擬分析；以數值模擬分析奧特曼流量計的流場，並配合實驗數據進行分析驗證；以探討計算流體力學分析軟體在奧特曼流量計設計中的適用性與準確性。企望建立數值模型求解實驗難以進行部份，並藉此達到流量計準確度的驗證與提升，進一步可以輔助流量計之設計製造。

## 2. 理論分析

### 2.1 統御方程式

本研究在數值計算方面使用 CFD 商用軟體 FLUENT 為計算分析工具，求解在渦流流量計中的流場分佈。在使用數值方法進行模擬分析前，為了簡化數值模擬複雜性，將作以下幾點基本的合理假設：(1) 定常 (steady state) (2) 流體為不可壓縮流 (incompressible flow) (3) 流體與牆邊界為無滑動條件 (No-Slip condition) (4) 流體為冷流場無熱源產生，不考慮流體流動產生摩擦熱。在三維卡式座標系統 (3D Cartesian coordinate system) 下，其統御方程式的形式如下：

質量方程式：

(1) 連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

(2) 動量方程式：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho\phi u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\phi v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\phi w)}{\partial z} \right] = \nabla^2(\Gamma\phi) + S \quad (3)$$

其中在動量方程式右式第一項為擴散項(Diffusive term)，右式第二項 $S$ 為源項(Source term)，左式第二式為對流項(Convective term)，左式第一式為暫態項(unsteady term)，當假設為穩態時，此項不予考慮。符號 $\phi$ 則代表 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $k$ 和 $\varepsilon$ 等物理變數(dependant variables)，請參考表一所示； $\Gamma$ 則為各物理變數所對應之擴散係數。

## 2.2 紊流傳輸方程式

紊流所有的性質都會隨時間與空間的方向，在一個平均值上下迅速而且不規則的變動，所以在紊流的理論分析中，可將瞬時量視為時間平均與擾動部分之和。其主要可分為二種型態：單方程式模式與雙方程式模式。而雙方程式模式是以等方向之回流或紊流係數來表示，並以紊流動能 $k$ 與紊流動能擴散率 $\varepsilon$ 來計算。

$k-\varepsilon$ 模型是使用了一種叫“renormalization group”的數學方法配合暫態的 Navier-Stokes 方程式推導出來的它和標準模型很相似，其解析性是直接從標準模式演變而來。RNG 模型與標準模式的主要差異是 RNG 模式考慮到了紊流漩渦的修正，使其提高在漩渦這方面的精確度，另外針對紊流 Prandtl 數提供了一個完整解析公式，最後在紊流擴散方程中加了一個條件，使其有效的改善了標準模式的精確度，使流場具有較精確的表現。以下是 RNG 模式的方程式

紊流動能方程式  $k$ ：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

消散率方程式  $\varepsilon$ ：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (5)$$

上述  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  為紊流動能和紊流消散率的紊流 Prandtl 數， $\mu_{eff}$  為紊流等效黏滯係數  $R_\varepsilon$  是修正紊流黏度的條件參數  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  皆為經驗常數。

## 3. 實驗設備與方法

本研究使用弓銓公司生產之奧特曼流量計做為測試基礎式樣，於弓銓企業股份有限公司所建立之符合國家標準的實驗室進行測試，其測量系統如圖一，以下為設備資料：

1. 氣動閥(EV203、EV216、EV219、EV220、EV221)：利用電腦控制氣壓閥門調節流量。
2. 電動閥(EV202、EV224、EV206、EV208、EV209、EV204、EV207、EV205、EV217、EV218)：利用電腦控制電動閥門調節流量。

3. 手動流量調節閥(EV212、EV214、EV215、EV210、EV213、EV211、EV225)：可手動控制閥門調節流量。
4. 測試表：測試用之奧特曼流量計。
5. 夾表器：固定測試表之夾具。
6. 壓力表：量測表前及表後之壓力量測表。
7. 溫度表：量測測試段之水溫。
8. 4m<sup>3</sup>量槽：動態體積收集法之所需量槽。
9. 24 m<sup>3</sup>量槽：量測平均流量之量槽。

首先利用調節段中各閥門調整所需要的大概流量點，並且採用動態體積收集法(流量穩定後才開始收集)來測試。在測壓環架設攝影機拍攝換向器切換時，記錄表前及表後的壓力值。在體積收集測試時觀察奧特曼表顯示器每 40 秒的表值變化，即可求出奧特曼表在該流量點的轉速。利用量槽收集的體積和測試的時間，就可以計畫當時的平均流量值。依序測試所需流量點的葉輪轉速。實驗可測流速最小為 0.909m/s，最大到 7.799m/s 之間。

## 4. 數值方法

### 4.1 數值模型建立

本研究數值模擬模型是簡化圖 2 的幾何模型建立而成。圖 3 為經過簡化導角和圓孔的葉輪模型。利用 GAMBIT 軟體進行外型建構，由 SolidWorks 3D 所重建的模型轉換如圖 4；另外建構管道部份，為了避免流體前後端出入口影響至整體流場的變化，所以將前後端出入口各加長兩倍的管徑，以達到不影響內部流場其數值模型為圖 5；其工作流體為水。

本文利用國家標準實驗室可得到奧特曼流量計之進、出口速度、壓力值與流量，在 FLUENT 中入口邊界假設為速度入口，出口邊界假設為速度出口，如圖 6 所示將兩端設為流體出入口，而葉輪為旋轉機械，故設定為旋轉流體區域，葉輪以外為非旋轉流體區域。由於需要著重分析的部份在於葉輪旋轉部份且幾何形狀複雜，所以在葉輪附近的網格較為精細以非結構網格方式產生；出入口部份較不影響葉輪的轉動結果，建構較為寬疏的結構網格。最終建構出結構網格與非結構網格的混合系統。在建構網格時需考量到其收斂性、穩定性，所以必須考慮網格分佈之數目及正交性等。依以上條件建立數值模型之網格，最終建構的計算用網格數約為 1.33x10<sup>6</sup> 個，並以圖 7 的各視角之網格圖觀察整體模型的計算網格。

### 4.2 數值法則

研究中的工作流體為水，流速在次音速下可視為不可以壓縮流場，因此流場中的密度可以當作常數處理所以是求解連續方程式與 XYZ 方向的動量方程組；因此時統御方程組並無狀態方程式，用以連結連續與動量方程組，故常用壓力基準(Pressure-based)的數值方法進行模擬。壓力基準法是將速度與壓力視為變數的數值方法。但壓力只出現在動量方程式中，而動量方程式的變數是速度，壓力並無專屬的方程式。為了要求解壓力，須要一個壓力方程式，因此產生了壓力連結方程式

(Pressure-linked equation)的概念。壓力連結方程式是將離散後的動量方程式(discretized momentum equations)代入離散後的連續方程式(discretized continuity equations),所形成的方程式。然而解壓力連結方程式有不少方法,其中最著名的便是 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)系列的數值法則,因此在 Fluent 是以 SIMPLE 法則將統御方程式離散化並求解之。流場中模式為紊流,紊流流場在流體現象中是重要的一環,因此利用 Navier-stoker equation 在穩態下進行求解。本文利用 RANS 中 RNG 模組可使用於模擬奧特曼流量計中流場的現象。在流場中有旋轉機械葉輪裝置,所以在數值模型中分為兩個部份,旋轉移動的葉輪及固定的管道部份,使用 MRF (multiple reference frames)模式,將葉輪裝置與管道部份分開,定義葉輪裝置為旋轉流體區域,管道部份為非旋轉流體區。在旋轉流體區中給定一轉速,取得在旋轉流體區中穩定的流場。採用 segregated 進行對每個方程式分別求解,為了解析出奧特曼流量計出入口壓力差,故本研究將所有方程式以  $10e-3$  以下為收斂條件,並如圖 8 所示依出入口壓力差穩定辨別收斂依據。

## 5. 數值結果與討論

本文以實驗數據表 2 為模擬起始條件,以轉速 450 rpm 當作範例,展示 CFD 模擬結果。圖 9 顯示 YZ 平面之速度向量場觀察流體進入管內速度分佈,可觀察到流體經過葉輪轉動的情形;圖 10 顯示葉輪後 XY 平面速度向量場可觀測到葉輪旋轉所造成尾流現象;圖 11 顯示 ZY 平面之壓力場可觀察在葉輪前凹槽為壓力最大的區域;圖 12 顯示速度徑線圖觀察流體由入口流入從經由葉輪裝置,再從出口流出的運動軌跡。從數值模擬結果分析葉輪所造成的壓損,利用 CFD 可以求出葉輪流量計內流場情形並將其可視化,可以利用數值運算後的結果,探討相關參數如出入口壓力,最後可求得在 450 rpm 的出入口壓力差為 32913.83 pascal,所以本文進行葉輪流量計之數值模擬有相當的能力。將出入口更改設定為壓力出入口,分別設定壓力差值進行求解,可以從圖 13 的出入口流量差圖得知求解過程已穩定,繼續求解其他參數,圖 14 顯示由兩端出入口壓力所產生的壓差與轉速的關係圖,可以從出入口壓力差與實驗驗證,求得在流場中的相關資料。由出入口壓差與轉速再代入邊界條件,反求奧特曼流量計的流量,圖 15 顯示 K 值與流量關係圖,由圖中可看出數值結果與實驗數據之趨勢相當吻合。此也顯示同一個問題,但輸入不同位置的邊界,其逆向模擬的結果差異很小,是故本研究的 CFD 參數設定條件讓本問題的模擬有一致性。由圖中也可看出,低流量與高流量之間有一劇烈變化;經過流場雷諾數計算評估,此現象之發生極可能是層流與紊流現象所造成的特性。另外,圖 15 顯示流量到達一定值時,K 值會趨向於穩定常數值。事實上,此結果已預測了此特定奧特曼流量計的量程範圍,同時可作為設計上之考量。

## 6. 結論與未來工作

本文應用 Fluent 來模擬探討特定奧特曼流量計之流場,並利用符合國家標準之流量實驗室進行實驗驗證,經過數值參數分析,本研究有以下結果:

- I. 利用 CFD 分析奧特曼流量計的流場,可動態觀察流場細部特性,如壓力場、速度場,而且易於調整設計參數,可以有效率地輔助設計。
- II. 本文所建立的計算流體力學分析模式可合理預估流量隨出口壓力變化的關係。
- III. 模擬結果顯示,到達一定流量範圍,K 值會趨向於常數,這也是此流量計所預期之量程範圍。
- IV. 此流量計之特性曲線有劇烈變化,很可能是層流與紊流現象所造成,此一現象直得未來繼續探討。
- V. 未來將進一步使用 CFD 來進行奧特曼流量計之參數設計分析,整合如葉輪部份、整流器及擴縮管等等零件,從模擬的結果找此奧特曼流量計之系統最佳化參數。

## 7. 誌謝

本文所進行之實驗,是由弓銓股份有限公司所提供標準流量系統進行測試,並且協助 150mm 口徑之奧特曼流量計的實驗進行,在此感謝弓銓股份有限公司。本文乃義守大學機動系與弓銓股份有限公司所提出的提升產業技術及人才培育研究計畫之研究成果之一,計畫名稱是“CFD 輔助渦流流量計的國家測量標準之訂定”,於國科會之計畫編號為 96-2622-E-214-005-CC3,特此致謝。

## 8. 參考文獻

- [1.] 戴文達,“減少水資源浪費-管線偵漏技術-「淺談非破壞檢測」”,節水季刊第 43 期,pp 18-19, 2006 年 9 月。
- [2.] S. G. Harry, “The Development of the Turbine Flowmeter,” ISA Transactions, Vol.16, pp17-24, 1977.
- [3.] R. E. Thompson, J.Grey., “Turbine flowmeter performance model,” Trans. of ASME, J. Basic Engineering, Vol. 11, pp.712-723,1970.
- [4.] R.C. Baker, Turbine Flowmeters: II. Theoretical and Experimental published Information, Flow measurement and Instrumentation, Vol. 4, pp.123-144, 1993.
- [5.] L. Sun, T. Zhang, Z. Zhou, “Experimental Study on Turbine flowmeter's Performance Measuring Fluids with Different Viscosities,” Intelligent Control and Automation, vol.2, pp.5397-5401, 2006.
- [6.] H. Kametani, M. Takao, T. Setoguchi, "Characteristic evaluation of the flowmeter using the Wells turbine for measurement of respiration," Proceedings of the 41st SICE Annual Conference, Vol.1, pp.531-534, 2002.
- [7.] S. I. Fletcher, I. G. Nicholson and D. J. M. Smith “An investigation into the effects of installation on

the performance of insertion flowmeters,” Flow Measurement and Instrumentation, Vol.11, pp.19-39, 2000.

[8.] 奧特曼流量計，經濟部中央標準檢驗局 CNS14866, 2006.

[9.] International Organization for Standardization(ISO), Measurement of water flow in fully charged closed conduits -- Meters for cold potable water and hot water(ISO 4064) -- Part 1: Specifications, 2005.

[10.] International Organization for Standardization(ISO), Measurement of water flow in fully charged closed conduits -- Meters for cold potable water and hot water(ISO 4064) -- Part 2: Installation requirements, 2005.

[11.] International Organization for Standardization(ISO), Measurement of water flow in fully charged closed conduits -- Meters for cold potable water and hot water(ISO 4064) -- Part 3: Test methods and equipment, 2005.

[12.] ORGANISATION INTERNATIONALE DE METROLOGIE LEGALE (OIML), Water meters intended for metering of cold potable water Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Test methods. OIML-R49 , 2000.

[13.] W.Zhen, Z. Tao ,‘Computational study of the tangential type turbine flowmeter,’

[14.] Flow Measurement and Instrumentation, 2007.

[15.] G. Iaccarino, “Predictions of a turbulent separated flow using commercial CFD codes,” Journal of Fluids Engineering, Vol.123, pp.819–827, 2001.

[16.] G. Bobovnik, J. Kutin, I. Bajsi’ ,”Estimation of velocity profile effects in the shell-type coriolis flowmeter using CFD simulations,” Flow Measurement and Instrumentation, Vol.16 , pp.365–373, 2005.

[17.] S.B. Riffat, S.A. Omer, “CFD modeling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid,” International Journal of Energy Resevation, vol 25, pp.115-128, 2001.

[18.] A.C. Lua, Z. Zheng, “Numerical simulations and experimental studies on a target fluidic flowmeter,” Flow Measurement and Instrumentation , Vol.14, pp.43–49, 2003.

[19.] Seshadri, B.K. Gandhi, S.N. Singh, “Analysis of the effect of body shape on annular factor using CFD,” Measurement, Vol.35, pp.25–32, 2004.

[20.] GAMBIT 2.1 Documentation, Fluent Inc, 2005.

[21.] FLUENT 6.1 Documentation, Fluent Inc, 2005.

$R_\epsilon$	: 修正紊流黏度的條件參數
$\omega$	: 葉輪轉速
$\vec{v}$	: 速度向量
$\sigma_\kappa$	: 紊流動能的紊流 Prandtl 數
$\sigma_\epsilon$	: 紊流消散率的紊流 Prandtl 數
$k$	: 紊流動能
$\bar{\tau}$	: 應力張量
$\epsilon$	: 紊流動能消耗率
$\mu_{eff}$	: 紊流等效黏滯係數
$\rho$	: 密度

### 10. 圖表總彙

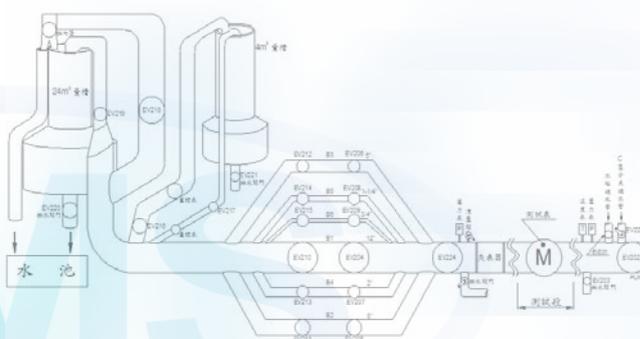


圖 1. 國家標準實驗室之設備

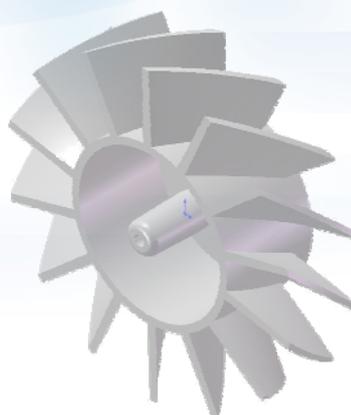


圖 2. 葉輪模型圖

### 9. 符號表

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$	: 經驗常數
$\bar{g}$	: 重力加速度
$K$	: 流量計因子
$p$	: 壓力
$Q$	: 流體流量

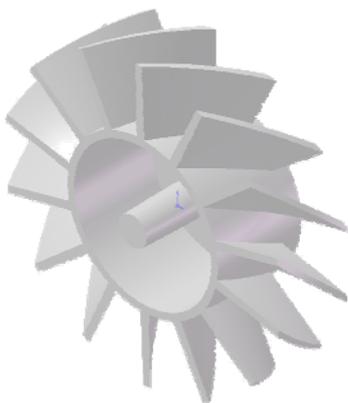


圖 3. 簡化後的葉輪模型圖

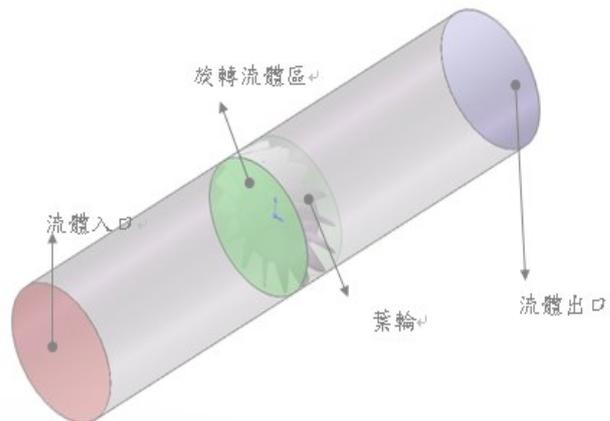


圖 6. 邊界條件設定圖

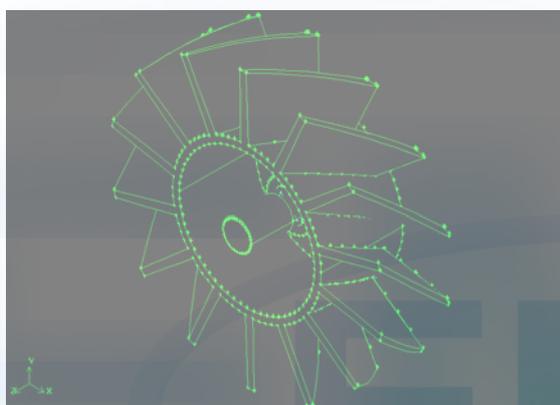


圖 4. 初步的葉輪數值模型圖

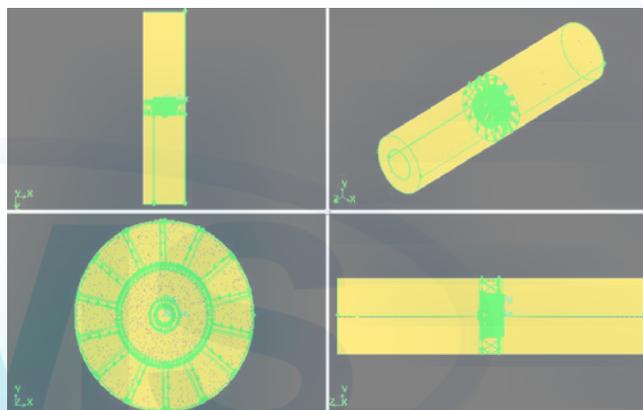


圖 7. 各視角之網格圖

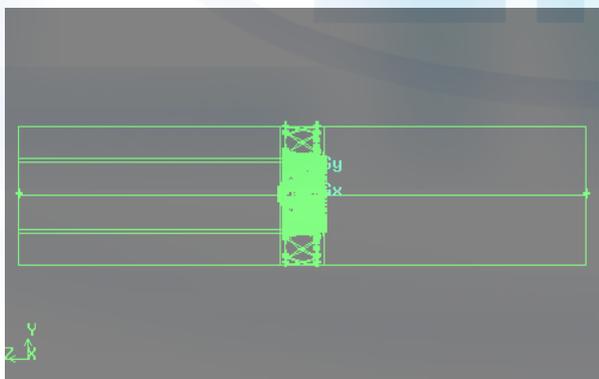


圖 5. 內部流場的數值模型

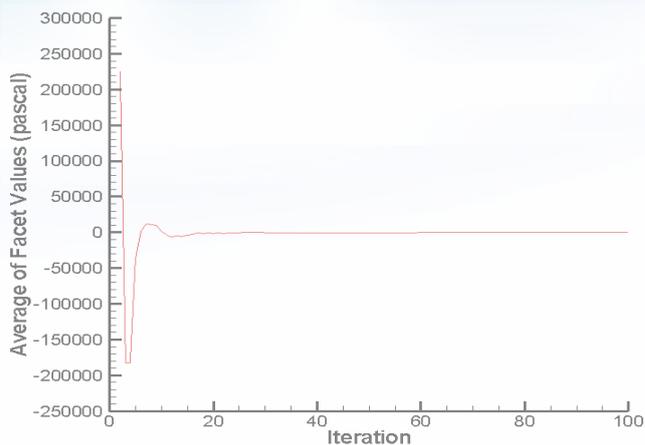


圖 8. 出入口壓力差圖

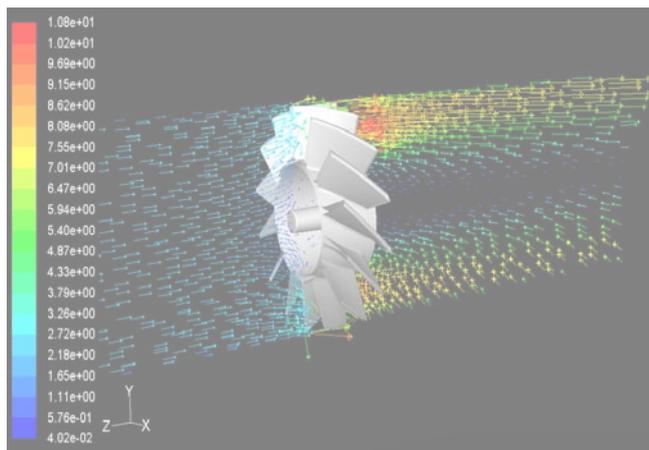


圖 9 YZ 平面之速度向量場

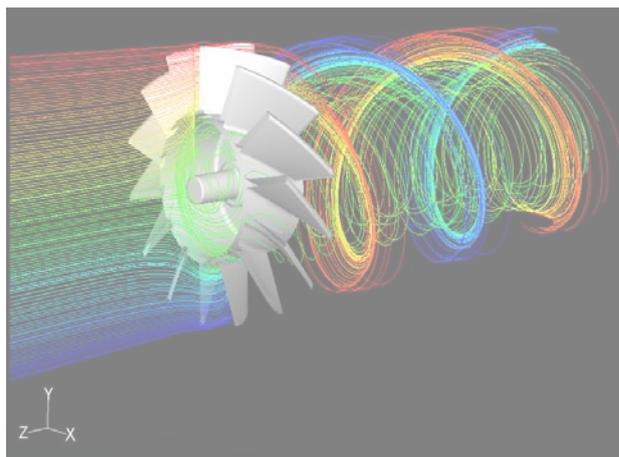


圖 12. 速度徑線圖

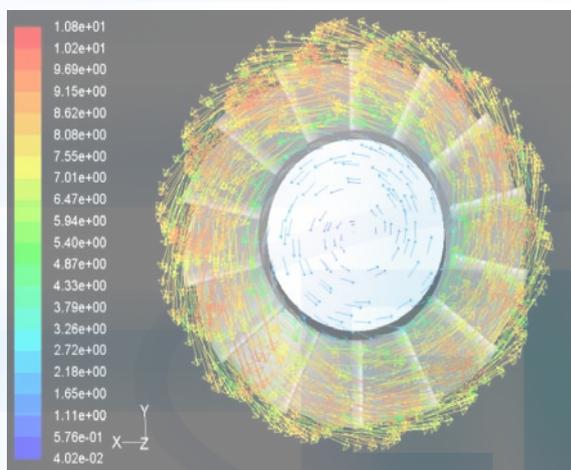


圖 10 葉輪後 XY 平面之速度向量場

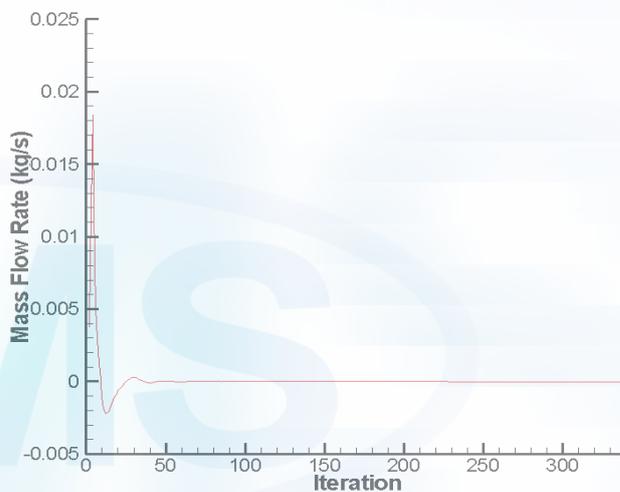


圖 13. 出入口流量差圖

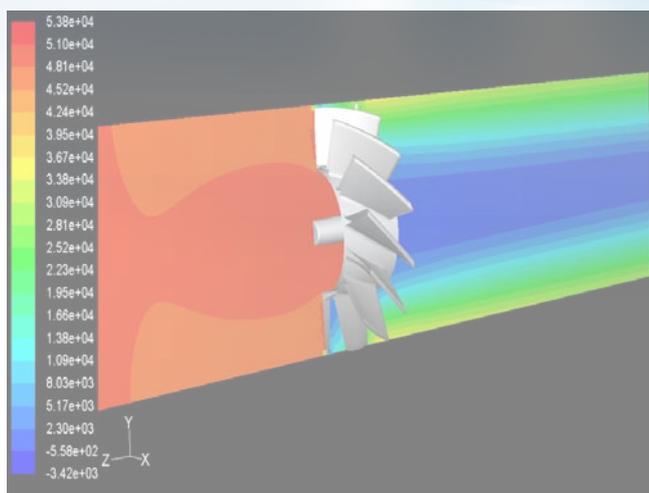


圖 11. ZY 平面之壓力場

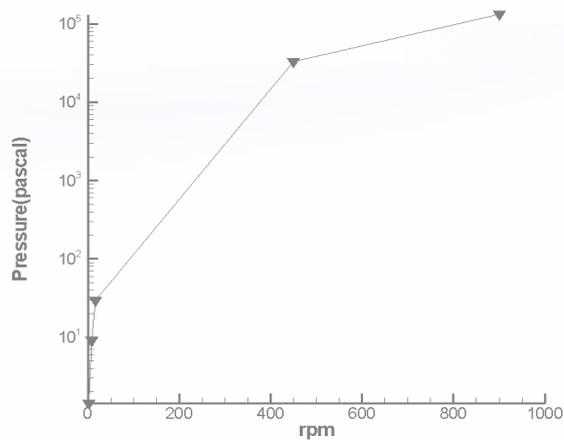


圖 14. 壓力差與轉速關係圖

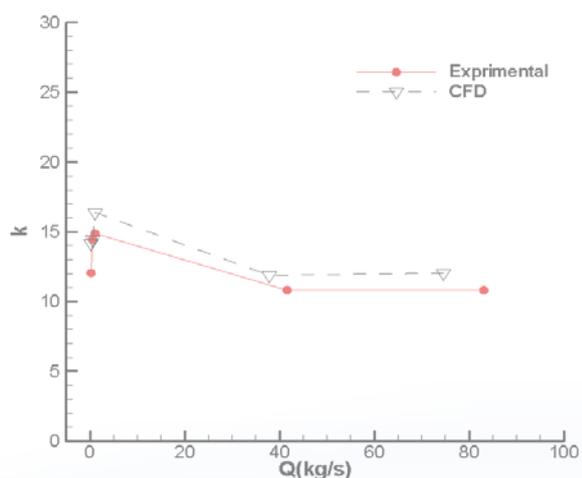


圖 15. K 與流量關係圖

表 1 變數  $\phi$  之對照表

Equation	$\phi$
Continuity	1
X-momentum	u
Y- momentum	v
Z- momentum	w

表 2. 實驗轉速流量表

轉速 (rpm)	Q (kg/s)	K ( $\omega/Q$ )	V (m/s)	Re
900	83.16667	10.82164329	4.714761	263783.2141
450	41.58333	10.82164329	2.357381	131891.6071
16.5	1.108889	14.87975952	0.062863	3517.1095
9	0.62375	14.42885772	0.035361	1978.3741
3	0.2495	12.0240481	0.014144	791.3496