



國立中山大學海洋環境及工程學系

碩士論文

Department of Marine Environment and Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

跑道式微藻培養系統之研究

Study on raceway pond for microalgae culturing system

研究生：林裕恆

Yu-Heng Lin

指導教授：黃材成 教授

Prof. Chai-Cheng Huang

中華民國 103 年 8 月

August 2014

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校海洋環境及工程學系碩士班

研究生林裕恆（學號：M015040025）所提論文

跑道式微藻培養系統之研究

Study on raceway pond for microalgae culturing system

於中華民國 103 年 8 月 22 日經本委員會審查並舉行口
試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 張祖辛 張祖辛 委員 黃材成 黃材成

委員 張嘉修 張嘉修 委員 陳慶能 陳慶能

委員 謝志敏 謝志敏 委員 _____

指導教授(黃材成) 黃材成 (簽名)

誌謝

本論文承蒙恩師 黃材成老師的細心指導與關心得以順利完成，讓我在學業與為人處事的態度上皆有所成長，研究面臨挫折與瓶頸時給予我專業的建議與真誠的鼓勵，在此致上最深的敬意，另外特別感謝國立成功大學生物科技中心微藻生技與工程實驗室提供場地與設施供本研究使用。

承蒙口試委員張嘉修老師、張祖辛老師、謝志敏老師及陳慶能老師在論文口試時以專業的角度提供寶貴的建議及指導，使得本論文內容更加的完善及充實，在此至上萬分的感謝。

在研究所求學的這段期間，感謝林義復學長、道琦學長、A峰學長、竣合學長、小鍾學長、僑鳴學長及鎧文學長於專業科目上的指導與建議，感謝研究所智湧同學、義傑同學及威仲同學在論文研究上相互鼓勵與討論，感謝研究室助理藍偉甄、旭慧及書羽在研究室事務的協助，感謝研究室煜凱學弟協助我進行實驗，感謝系辦人員素玉姐、朱姐、心心姐及明筑在行政事務上提供協助，由衷感謝在中山海工遇到的每個人，使我能夠順利完成學業。

最後，感謝我的父母及家人的支持是我最大的動力使我無後顧之憂得以勇敢向前，讓我能夠順利的完成學業。

摘要

本研究以 FLOW-3D 計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)軟體模擬跑道式微藻培養系統，研究對象為國立成功大學生物科技中心 微藻生技與工程實驗室位於成大安南校區水工試驗所的跑道式微藻培養系統。

研究內容主要分現場試驗與數值模擬兩部分:現場試驗為驗證 FLOW-3D 數值模擬的準確性並且調整相關參數設定。數值模擬則針對系統進行一系列的分析，如粒子徑線、上下游斷面平均能量損失、流場平均流速與水車能量轉換效率等。藉由各種渠道設計下的流場表現與水車能量損耗提供該跑道式微藻培養系統的優化建議，以做為日後改善工程與研究方向建議之參考。

經由本研究得知，該跑道式微藻培養系統因渠道設計規畫不良，彎道容易出現大面積的低流速死區而造成藻體堆積。經由本研究進行渠道的設計優化後，可望大幅降低死區覆蓋率提升藻體循環效率。

目前常用於跑道式微藻培養系統的造流水車為改良自養殖魚池的曝氣水車，能量轉換率約只有 19 %。經由縮小水車葉片與底床間由目前 7 cm 之間距降至 2 cm 並且改善葉片角度呈 45⁰後造流水車的能量轉換效率提升至 26 %，雖然流場流況及死區縮減效果顯著，但是水車能量轉換效率仍舊偏低。

最後本研究建議，欲建置跑道式微藻養殖系統前應先進行數值模擬，以便找出該環境與設備限制下最佳的系統設計。日後可針對其他造流設施或其它形式之水車設計應用於跑道式微藻培養系統之效率進行研究。

關鍵字:跑道式微藻培養系統、死區、水車、能量轉換效率

Abstract

The aim of this research is to use the FLOW-3D Computational Fluid Dynamics (CFD) software to simulate the raceway style microalgae cultivation system, which is built at Microalgae Biotechnology and Engineering Laboratory, located in Annan Campus, and conducted by the University Center of Bioscience and Biotechnology of National Cheng Kung University.

The content of research is mainly divided into two parts, i.e., field test and numerical simulation: The field test is to verify the accuracy of numerical simulation of FLOW-3D and to adjust the settings of CFD parameters. The numerical simulation is to conduct a series of analysis for the system, such as the pathlines of fluid particles, average energy losses for up- and down-streams' cross-sections, mean velocity of flow field and energy conversion efficiency of waterwheel and so on. Based on the results of the flow patterns in the raceway channel and the efficiency of energy conversion of waterwheel, it could provide suggestions of the optimal design of the microalgae cultivation system and the direction of research.

The results of this research indicate that the curve of the raceway style microalgae cultivation system, due to poor design of channels, tends to have large areas of low-speed dead zones which cause the accumulation of algae. After conducting the design optimization of channels, it is expected to significantly reduce the coverage rate of dead zone and improve circulation efficiency of algae.

The waterwheel commonly used in the microalgae cultivation system is originated from the aeration waterwheel for fish pond, and the energy conversion rate is about 19% only. This research has reduced the gap between the lowest waterwheel blade and bottom of channel from present 7 cm to 2 cm and changed the blade angle from 0 degree to 45 degree. The result of the energy conversion efficiency of

waterwheel increases to 26%. Although the effects of the phenomenon of flow patterns and the reduction of dead zone are significant, the waterwheel energy conversion efficiency is still relatively low.

Finally, this research suggests that if it wants to build a new microalgae cultivation system, the numerical simulation model should be carried out first to find the optimal design of system under the environment conditions and equipment limitations. For further studies, it recommends to explore other flow-making equipments or other style waterwheels for the raceway system to improve the energy conversion efficiency.

Keyword: Raceway style microalgae cultivation system, dead zone, waterwheel, energy conversion efficiency



目錄

誌謝.....	I
中文摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	V
圖次.....	VIII
表次.....	XII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的.....	2
1.4 文獻回顧.....	3
1.4.1 渠道設計.....	3
1.4.2 造流水車.....	8
1.5 研究方法與研究流程.....	10
1.6 本文組織.....	11
第二章 數值模擬介紹.....	12
2.1 FLOW-3D 軟體簡介.....	12
2.2 FLOW-3D 理論背景.....	12
2.2.1 Navier-Stokes 之控制方程式.....	12
2.2.2 FLOW-3D 之控制方程式.....	13
2.2.3 FLOW-3D 物理模式.....	16
2.2.4 網格處法.....	20
2.2.5 障礙物處理法.....	20

2.2.6 網格邊界條件.....	21
2.2.7 離散方法.....	22
2.3 電腦輔助設計.....	23
第三章 數值方法與驗證.....	24
3.1 數值模擬.....	24
3.1.1 現場測量.....	25
3.1.2 CAD 繪圖軟體建模.....	26
3.1.3 FLOW-3D 數值模擬設定.....	28
3.2 現場試驗與數值驗證.....	35
3.2.1 設備.....	35
3.2.2 實驗步驟.....	37
3.2.3 試驗結果.....	38
3.2.4 網格獨立性測試.....	38
第四章 結果與討論.....	40
4.1 數值模擬與流況分析.....	40
4.1.1 平均流速.....	41
4.1.2 流體粒子徑線.....	42
4.1.3 自由液面高度.....	44
4.1.4 水頭損失.....	45
4.1.5 養殖池內的水車能量消耗.....	47
4.1.6 小結.....	48
4.2 數值模擬設施改善.....	48
4.2.1 渠道改良設計.....	50
4.2.2 數值模擬結果.....	51
4.2.3 小結.....	65

4.3 造流水車效率.....	65
4.3.1 設備說明.....	66
4.3.2 跑道式微藻培養系統水車效率計算.....	67
4.3.3 水車改良.....	71
4.3.4 小結.....	74
第五章 結論與建議.....	75
5.1 結論.....	75
5.2 建議.....	76
參考文獻.....	77

圖次

圖 1-1	跑道式養殖池.....	4
圖 1-2	彎道水位高度計算值.....	5
圖 1-3	無導流板時死區主要分佈位置.....	5
圖 1-4	跑道池結構與尺寸.....	6
圖 1-5	三片式導流板彎道設計.....	7
圖 1-6	TLEN=0.35 時流場速度分佈.....	7
圖 1-7	TLEN=1.05 時流場速度分佈.....	8
圖 1-8	民國 55 年的龍骨水車.....	9
圖 1-9	定槳明輪.....	9
圖 1-10	動槳明輪.....	10
圖 1-11	研究流程圖.....	11
圖 2-1	自由液面示意圖.....	15
圖 2-2	二維直角網格面積和體積比例係數計算示意圖.....	16
圖 2-3	鏈結網格與巢狀網格.....	20
圖 2-4	網格切割後的跑道式微藻養殖池與造流水車.....	21
圖 2-5	不同網格密度下的球型結構物.....	23
圖 3-1	FLOW-3D 操作流程圖.....	24
圖 3-2	雷射轉速計.....	25
圖 3-3	雷射量尺.....	25
圖 3-4	HOBO.....	25
圖 3-5	捲尺.....	25
圖 3-6	HOBO 溫度-時間變化圖.....	26
圖 3-7	於 SolidWorks 之養殖池二維平面圖.....	27

圖 3-8	於 SolidWorks 之養殖池三維立體圖	27
圖 3-9	於 SolidWorks 之水車三維立體圖	28
圖 3-10	粒子分佈示意圖	29
圖 3-11	網格劃分示意圖	33
圖 3-12	參數分析儀	36
圖 3-13	電磁式流速計	36
圖 3-14	流速計架設(一)，測量點(4)	36
圖 3-15	流速計架設(二)，測量點(5)	36
圖 3-16	儀器架設配置示意圖	36
圖 3-17	測量點 X-Y 方向平面相對位置圖	37
圖 4-1	微藻養殖池二維平面配置圖	40
圖 4-2	水車規格	41
圖 4-3	平均流速分佈	42
圖 4-4	流場粒子徑線	42
圖 4-5	一號水車流場粒子徑線	43
圖 4-6	二號水車流場粒子徑線	43
圖 4-7	現場一號彎道死水區淤積情形	44
圖 4-8	現場二號彎道死水區淤積情形	44
圖 4-9	現場一號彎道淤積情形	44
圖 4-10	現場四號彎道淤積情形	44
圖 4-11	自由液面高度	45
圖 4-12	斷面分佈示意圖	46
圖 4-13	具半圓弧導流板的微藻養殖池	49
圖 4-14	機翼剖面型彎道頭隔板	49
圖 4-15	改良設計雛型(T-1 型)	50

圖 4-16	T-2 型改良設計.....	51
圖 4-17	T-3 型改良設計.....	51
圖 4-18	T-4 型改良設計.....	51
圖 4-19	T-1 型平均流速分佈.....	52
圖 4-20	T-2 型平均流速分佈.....	53
圖 4-21	T-3 型平均流速分佈.....	53
圖 4-22	T-4 型平均流速分佈.....	54
圖 4-23	T-1 型流體粒子徑線.....	55
圖 4-24	T-2 型流體粒子徑線.....	55
圖 4-25	T-3 型流體粒子徑線.....	56
圖 4-26	T-4 型流體粒子徑線.....	56
圖 4-27	T-1 型自由液面高度分佈.....	57
圖 4-28	T-2 型自由液面高度分佈.....	58
圖 4-29	T-3 型自由液面高度分佈.....	58
圖 4-30	T-4 型自由液面高度分佈.....	59
圖 4-31	T-1 型斷面分佈示意圖.....	60
圖 4-32	T-2 形斷面分佈示意圖.....	61
圖 4-33	T-3 型斷面分佈示意圖.....	62
圖 4-34	T-4 型斷面分佈示意圖.....	63
圖 4-35	成大微藻培養系統造流水車.....	66
圖 4-36	水車規格示意圖.....	66
圖 4-37	流體流過一控制體積.....	67
圖 4-38	斷面及水車分佈示意圖.....	68
圖 4-39	水車造流剖面圖(1).....	69
圖 4-40	水車造流剖面圖(2).....	69

圖 4-41 水車造流剖面圖(3).....	70
圖 4-42 水車造流剖面圖(4).....	70
圖 4-43 水車造流剖面圖(5).....	72
圖 4-44 調整葉片角度後的水車示意圖.....	72
圖 4-45 水車造流剖面圖(6).....	73

表次

表 3-1	現場測量所需器材.....	25
表 3-2	General 設定表.....	28
表 3-3	Physics 設定表.....	29
表 3-4	一號水車粒子座標位置表.....	30
表 3-5	二號水車粒子座標位置表.....	31
表 3-6	fluid material 設定表.....	32
表 3-7	Component Translations 設定表.....	32
表 3-8	網格劃分位置表.....	33
表 3-9	靜水位高度與轉軸設定表.....	34
表 3-10	Output 設定表.....	34
表 3-11	Numerics 設定表.....	34
表 3-12	測量點座標位置表.....	37
表 3-13	驗證結果.....	38
表 3-14	網格獨立性測試結果.....	39
表 3-15	數值模擬電腦設備.....	39
表 4-1	基本設定條件.....	41
表 4-2	斷面位置及斷面平均水頭表.....	46
表 4-3	水車消耗功率.....	48
表 4-4	T-1 型斷面位置及斷面平均水頭表.....	60
表 4-5	T-2 型斷面位置及斷面平均水頭表.....	61
表 4-6	T-3 型斷面位置及斷面平均水頭表.....	62
表 4-7	T-4 型斷面位置及斷面平均水頭表.....	63
表 4-8	各養殖池平均流速.....	64

表 4-9 各養殖池水車消耗功率表較表.....	64
表 4-10 各水車之能量轉換效率表.....	74

第一章 緒論

1.1 前言

根據經濟部能源局能源統計手冊記載，民國 101 年能源總供給中，自產能源僅占 2.18%，進口能源占 97.82%；若按能源別區分，則石油占 47.96%，煤炭占 29.69%，天然氣占 12.14%，生質能及廢棄物占 1.32%，水力發電占 0.38%，核能發電占 8.32%，地熱、風力及太陽能光電占 0.11%，太陽熱能占 0.08%。由以上數據可知台灣高度依賴進口能源其中又以石油能源的進口最為大宗，近年產油國限制石油開採與國際局勢動盪促使原油價格居高不下，直接影響航運業與製造業的營運成本造成民生物價起漲經濟成長率趨緩，對於倚賴進口石油的台灣來說影響甚大。

國際社會為了因應原油價格走升，無不積極探勘新礦坑或新油井，甚至研究開採新興能源。2011 年日本東北大地震引發的核安問題更促使多國政府重新檢討能源政策，強調環境保護與永續發展的綠色能源被視為未來主流。此外，台灣地區地狹人稠非但不適合發展石化重工業且島內能源蘊藏量也非常稀少，如欲在這場國際能源戰爭中勝出甚至徹底擺脫石油經濟的枷鎖，發展能夠自給且極具規模的綠色能源是必要的選擇。

綠色能源包含太陽能、水力能、風力能、海洋能、地熱能、氫能和生質能，大多數綠色能源皆以電能儲存能夠直接供給民生用電，而生質能主要提煉生質柴油與生質酒精等化學能，可供給高度倚賴石油化學能的交通運輸產業。提煉生質能源時能夠中和大氣中的二氧化碳，對於改善溫室效應有極大效益，生質能源提煉生質酒精與生質柴油更是替代石油的最佳方式。

提煉生質能源的作物不該選用目前主要經濟作物，以免造成該作物價格攀升影響供給，加劇民生物價惡化。研究顯示，油性微藻油脂含量豐富繁衍快速且非

目前主要經濟作物，日後進行大規模養殖提煉生質燃料並不會直接造成其他經濟作物價格上漲，如可永續穩定供應大量的廉價生質燃料更能促使比價效應發酵，抑制石油價格。

目前國內藻類養殖主要供應生技營養食品，對於發展生質能源相關研究尚落後於其他先進國家，有關當局應加快腳步研究自有技術降低生產成本提高產製效率，除了能減少進口高價能源提高能源自給率更能做為生質能源的技術輸出國提高國際地位。

1.2 研究動機

近年來石油天然氣價格不斷攀升，不止對航運業與製造業產生重大的負擔，也間接衝擊民生物價的穩定與經濟成長率。由此可知，積極尋找替代能源是擺脫石油經濟的捷徑，眾多科學家無不致力於研究各種新興能源投入市場的可行性，其中替代能源必須是低成本、大量且快速的產業，以符合商業價值與市場規模。

尋找替代能源應避免重蹈石油經濟所造成的物價波動、環境汙染、資源無法永續經營之覆轍，以能夠永續經營且環境衝擊低的生質能源為首要考量。油性微藻養殖是近年生質能源的熱門話題，油性微藻並非目前的經濟作物故不會影響糧食價格且生長速度快、環境的適應性高，行光合作用時能吸收降低工廠的二氧化碳排放量。跑道式微藻培養系統又能提供大量生產油性微藻的條件，結合閒置土地的開發將有效降低油性微藻養殖成本，由此可知跑道式微藻培養系統與油性微藻的結合是極具科學與商業價值的研究議題。

1.3 研究目的

如欲提煉油性微藻成為具有經濟價值且達到一定商業規模的生質柴油，面臨的挑戰在於如何尋找低成本、大量且品質穩定的藻水來源。微藻養殖分為開放式戶外養殖與封閉式光生物反應器，封閉式光生物反應器具有良好的培養條件，不

論是光照強弱、溫度、營養鹽濃度、防止外來汙染，皆可以人為控制以保持藻水的穩定，但是成本支出相對提高許多，養殖設備的密度也較低，養殖空間利用率低。而開放式戶外養殖設備簡易養殖空間利用率高，具有大量且低成本的優勢，唯獨養殖環境難以控制易影響藻水穩定。

台灣中南部地區日照充足廉價的閒置土地多，人力資源與物價水平相對低廉，發展生質能源產業極具競爭力，其中又以戶外開放式的養殖方式最適合這些土地的利用，因為不需要搭建廠房或是興建大型建物，能直接就地開挖適合的養池池。不僅養殖設備取得成本低廉且空間規劃又有彈性，往後如需進行搬遷或是土地重新規劃利用都很方便快捷。

本研究選定跑道式微藻培養系統做為研究主軸，除了環境變因以外，跑道式微藻培養系統最為重要的兩個關鍵是造流水車與養殖池的設計，符合造流條件的水車能夠持續穩定地提供養殖池穩定流速，設計良好的養殖池提供藻水優異的循環條件使藻類穩定增長，如果有效減少養殖池內藻水的流速衰減則能降低水車的功率消耗，水車與養殖池設計是跑道式微藻培養系統兩個關鍵因素，找到這兩者間的最佳化設計方案有助於提升微藻養殖的科學與商業價值，更能促使油性微藻養殖在生質能源產業中占有一席之地。

1.4 文獻回顧

1.4.1 渠道設計

1950 年代，加州大學柏克萊分校的 W.J.Oswald 教授首創名為”high rate ponds”(HRPs)的養殖裝置用於廢水處理與生質燃料生產，並於 1960 年代在加州的汙水處理廠進行商業運轉。1970 年代，柏克萊大學的生物科技研究團隊第一次使用”paddle-wheels”為大型跑道式養殖池進行混合攪拌(圖 1-1)，之後跑道式養殖池大多以此為雛型發展。

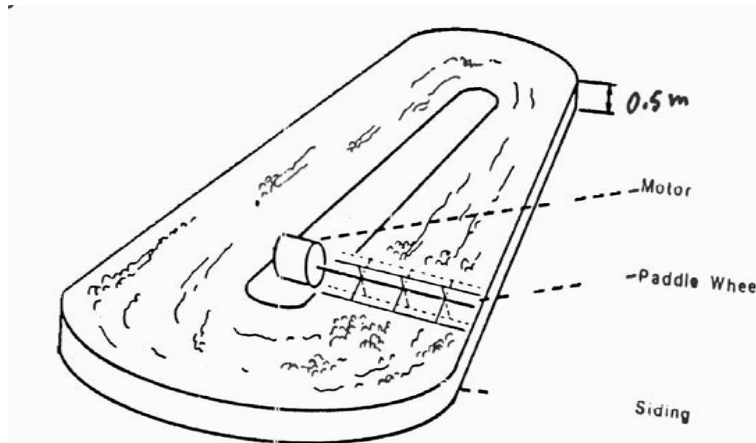


圖 1-1 跑道式養殖池，Oswald (1984)

根據 J. R. Benemann 與 I. C. Woertz 等人在 2011 年發表的” A techno-economic analysis of open pond microalgae biofuels production”(開放式微藻養殖池的生質燃料生產技術經濟分析)指出，開放式微藻養殖是目前主要的商業化生產方式。開放式養殖藻水深度為 25 至 35 公分，流速為每秒 20 至 30 公分，藻水濃度需控制在 20% 至 40%，Ph 值則介於 7.5 至 8.5 之間，並且適合養殖於日間攝氏溫度 10 至 22 度夜間溫度 4 至 10 度長日照之地區。

跑道式微藻養殖池為循環裝置，設計上避免不了彎道的產生。彎道的曲率半徑決定藻水在彎道處的流場表現及是否會有強烈的環流出現影響藻水循環及造成流速衰減。根據李愛香等人在 2009 年使用 Fluent 流體力學計算軟體並進行水工試驗發表「U 型彎道水流試驗及數值模擬」研究論文，該篇研究指出，彎道水流具有極複雜的三維水流特徵，進行數值模擬時彎道水流常出現較為明顯的橫向比降的自由液面並且經由現場試驗證明 U 型彎道環流出現了較為明顯的雙渦環流變化過程，也證明了 Fluent 的雷諾應力模型(Reynolds Stress Model,RSM)能較好地模擬彎道雙渦環流變化過程，故現行計算流體力學(Computational Fluid Dynamics ,CFD)軟體進行跑道式養殖池的數值模擬具有相當程度的準確性。

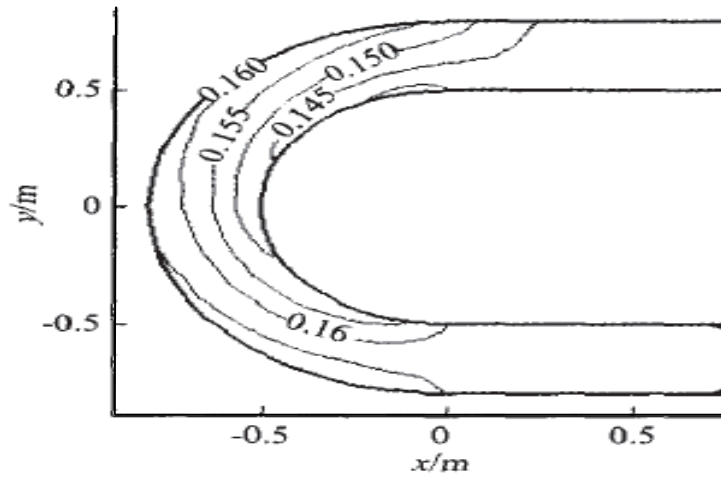


圖 1-2 彎道水位高度計算值，李等人(2009)

根據 Michael A, Borrowitzka 與 Navid R. loheimani 發表的「Algae for Biofuels and Energy」一書中提到，水車運轉時做為藻水瀑氣之用是提升跑道式微藻養殖池運轉效率的最佳方式。養殖池裡一般擺放單一個八葉片式水車，葉片大致為平板型狀也有少部分使用具彎曲弧度的葉片。水車擺放位置為離養殖池底部間距與兩側間距皆為兩公分以內，當靜水位高度為三十公分時每一個葉片高度約為四十二公分，葉片材質可以由鋼鐵或是其他強韌的塑料防止水車轉動的過程中葉片產生彎曲。跑道式養殖池常會有流速偏低的死區產生，易導致藻體沉澱溶氧降低甚至使藻類死亡故跑道設計的主軸為減少死區。

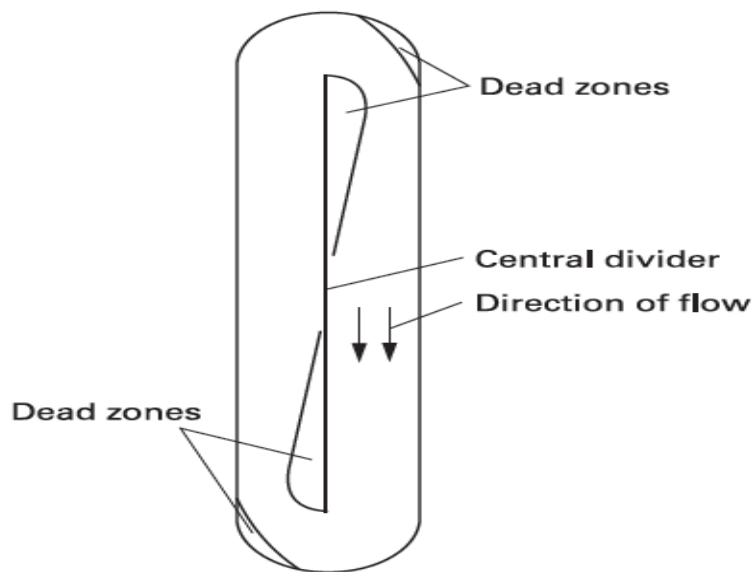


圖 1-3 無導流板時死區主要分布位置，Navid R. loheimani(2013)

由 Peterson 在 1999 年發表的” Benthic shears stress and sediment condition”研究論文表示：流場中死區(Dead zone)現象應該避免，因為死區的現象產生會使得水體沉積物造成厭氧現象，使得水體耗氧率增加，而生活於此水體的生物則因缺氧而死亡，一般將流速低於 2cm/s 之區域稱為死區。

2012 年，華東理工大學化學工程聯合國家重點實驗室諸發超等人發表了「敞開式跑道池光生物反應器的 CFD 模擬與優化」研究論文，採用 ANSYS ICEM 12.0 進行模擬。該研究指出，於彎道處架設雙重的半圓弧型導流板並且將進流處導流板向外延伸長度達 1/2 跑道池寬度時，跑道池平均速率最大、流速偏低的死區比例最少且功率輸入最少。平均速率較無導流板時提高了 13.8%，死區比例為無導流板時的 4.6%，水車功率僅為無導流板時的 49%。模擬結果初步為跑道式養殖池的優化設計做了一個結論並且提供可以套用的經驗式，但是並未進行現場驗證該數值模式，而水車的能量轉換效率也未做進一步的探討。

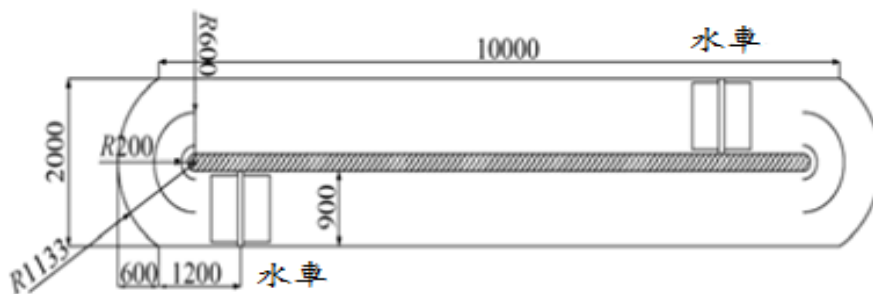


圖 1-4 跑道池結構與尺寸(單位:mm)，諸發超等人(2012)

2012 年，由 Kawisra Sompech 等人也運用 ANSYS 進行數值模擬發表「Design of raceway ponds for producing microalgae」論文中提到，用最少三個向外延伸的半圓弧導流板設置於彎道處為最節能的設計方式還能夠完全消除流速偏低的死區。該論文研究分別在彎道處放置一片至三片半圓弧型導流板並向外延伸進行數值模擬，結果顯示放置三片導流板死區比例最小，且當轉速相同時平均流速最高水車能源消耗最少。但是該研究並沒有分析流體粒子的徑線軌跡，降低死區比例並不完全代表能提高藻體的循環效率，且較小型的跑道式養殖池是否需要設置多達三片的半圓弧型導流板還需進行後續研究。

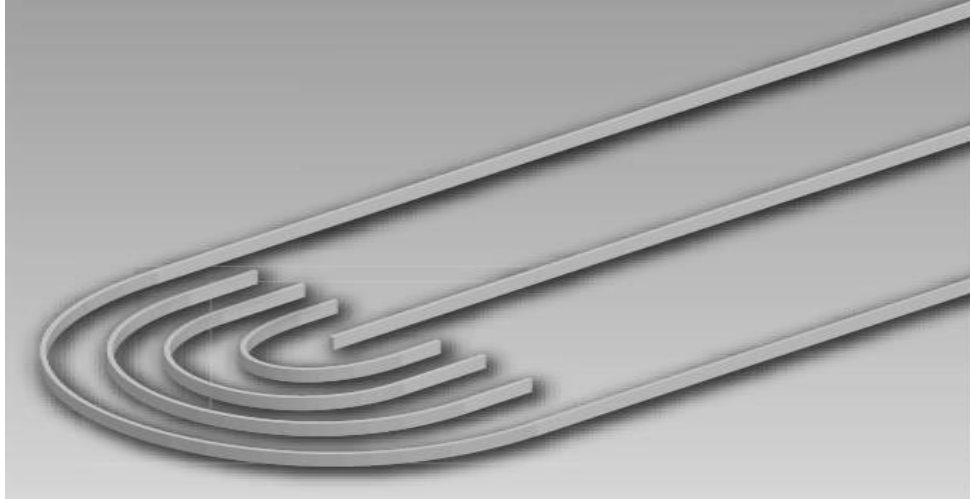


圖 1-5 三片式導流板彎道設計，I.C.Woertz(2010)

進行流體的數值模擬時，常常發生紊流區的計算不能與現場實際情形相符合。主要原因經常是網格數不足或是未設定理想的紊流項參數值。根據林義復、曾以帆與李忠潘於 2013 年發表的「防波堤附近波流場與渦流分佈之探討」一文中表示，以 FLOW-3D 進行底床沖刷預設模擬時，計算域的速度項通常在 z 方向最小，以 z 方向之網格邊界長度的 7% 做為紊流控制項中 Maximum turbulent mixing length，即如果有效的水位高度為 50m 則 Maximum turbulent mixing length 設定值為 3.5m。

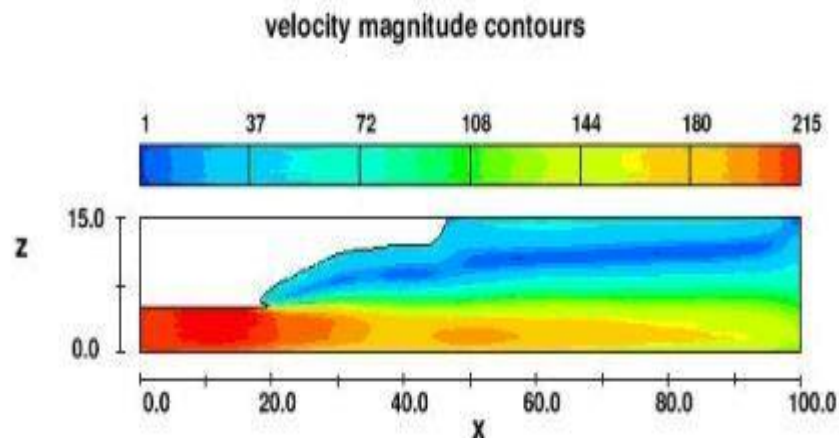


圖 1-6 TLEN=0.35 時流場速度分佈(取自 FLOW-3D Users Site)

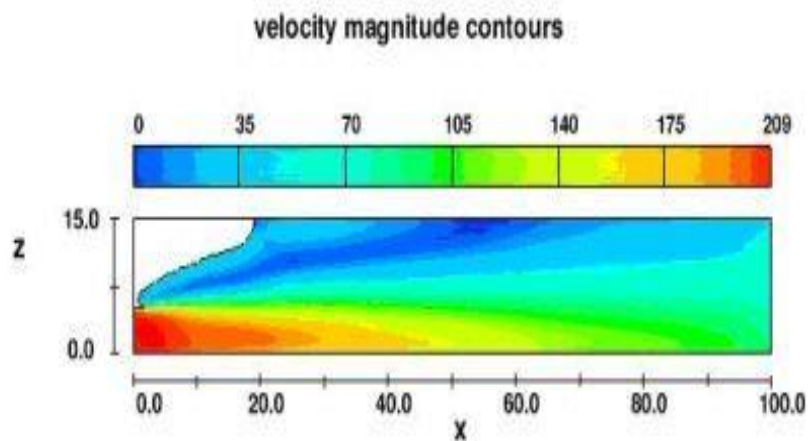


圖 1-7 TLEN=1.05 時流場速度分佈(取自 FLOW-3D Users Site)

FLOW-3D 官方提供 TLEN 也提供設定值的說明供使用者參考，如果 TLEN 太大時紊流損失能量將大幅增加。圖 1-6 與圖 1-7 可說明不同的 TLEN 值於數值模擬時的差別，當液體以 210 cm/s 之流速經由直徑 5cm 水管入射至流場時，圖 1-6 以水管直徑之 7%即 0.35cm 為 TLEN 設定值，圖 1-7 則以 z 方向網格邊界長度之 7%即 1.05cm 做為 TLEN 設定值，當 TLEN 設定值過大時，明顯看出流場紊流分佈範圍被過度預測。

1.4.2 造流水車

中國自古以農業立國，相關的科學技術發展甚早。水利設施與農業關係最為緊密因此歷代朝廷無不花費心力與金錢用於發展農業水利技術，也造就了許多依然沿用至今的水利設施。

水車最早記載於《莊子·外篇·天地篇》，取一根木支一端綁上重物另一端繫上水瓢以槓桿原理的方式運作，主要用於汲水供農業灌溉使用，到了東漢末年以人力或獸力推動具有輪軸葉板等基本裝置的水車正式問世，除了同樣具備低水高送的功能外運轉效率更是大幅提升，影響中國往後數百年的農業灌溉史。如下圖 1-8 所示，以人力驅動的龍骨水車在台灣被沿用至民國 60 年代政府大力推行農業機械化為止。



圖 1-8 民國 55 年的龍骨水車，Les Duffin

中國古代時將水車裝置於船上則稱為「明輪」，以人力驅動水車運轉向後推動水體讓船向前航行，因此具有明輪裝置的船稱為「輪船」。西方國家於十九世紀時廣泛將明輪裝設在蒸汽機船上，明輪適用於吃水淺、航速低且在水流平穩的內河航行之船舶。

明輪又分為「定槳明輪」與「動槳明輪」，定槳明輪雖然在推力上略勝動槳明輪但是能量轉換效率卻不及動槳明輪。定槳明輪由於葉板在入水出水時與水面的夾角問題消耗很多能量且無助於輪船前進，因此為了改善定槳明輪過於耗能的問題而有了動槳明輪的誕生，動槳明輪將輪體與槳板以鉸接的方式連結並且通過偏心複合運動改善槳板入水與出水的角度以降低能源消耗提高運轉效率。但是，明輪依然不適用於大洋海域而且限制了輪船航行速度，隨著高效率的螺旋槳推進器問世而逐漸消失於各大河流與各大洋的船艙上。

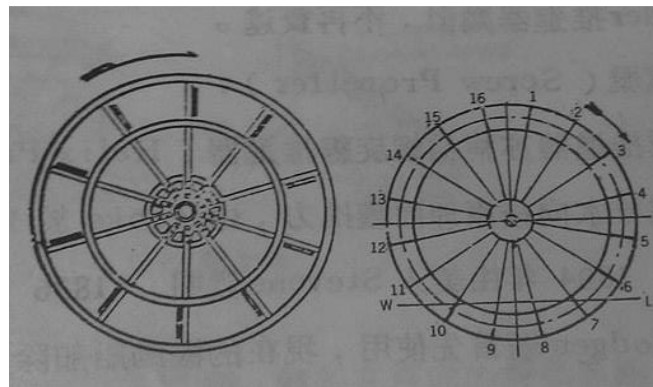


圖 1-9 定槳明輪，船舶螺旋槳理論與實務，丁錫鏞(1983)

現今的跑道式養殖池其造流水車在結構上即等同於定槳明輪，根據丁錫鏞發表的著作「船舶螺旋槳理論與實務」提到，明輪推進器雖然構造簡單維修容易但

是使用時除了轉速不可過高以外，能源轉換效率隨著吃水深度增加而遞減；如欲藉由跑道式微藻養殖池進行大規模生質能源開發，養殖過程中的能源消耗勢必深入研究，因此跑道式微藻養殖池渠道設計與造流設施的優劣直接影響其商業價值。現行的跑道式微藻養殖池研究文獻不論是現場進行實驗或是以數值方法進行模擬，用以造流的裝置幾乎均為明輪式水車且相關研究文獻多數著重於渠道設計。因此，探討造流水車的消耗功率與設計方法為本研究另一個重要的課題。

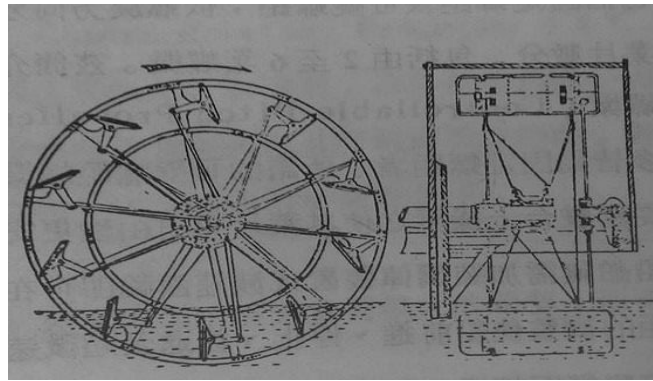


圖 1-10 動槳明輪，船舶螺旋槳理論與實務，丁錫鏞(1983)

1.5 研究方法與研究流程

本文研究主題為跑道式微藻培養系統的規劃與設計，研究過程分為文獻蒐集、數值模擬與驗證、現場試驗及設計改善四個階段。

文獻資料蒐集主要針對國內外跑道式養殖池的設備規劃與設計進行探討，數值模擬與驗證使用 FLOW-3D 數值模擬軟體，計算養殖池內明渠流場流速狀況並且試算水車運轉所需功率與明渠流場的水頭損失。現場試驗乃借用國立成功大學生物科技中心微藻生技與工程實驗室位於國立成功大學水工試驗所的 FPR(Fiber Glass Reinforced Plastic，玻璃纖維)跑道式微藻培養系統，進行流場流速的量測並與數值模擬的結果進行驗證。設計改善則是依現場試驗與數值模擬驗證後所得到的 FLOW-3D 參數設定經驗為基礎，藉由數值模擬針對水工試驗所的跑道式微藻養殖系統進行改善工作，力求降低能源損耗並提高水循環效率。研究流程如圖 1-1 所示：

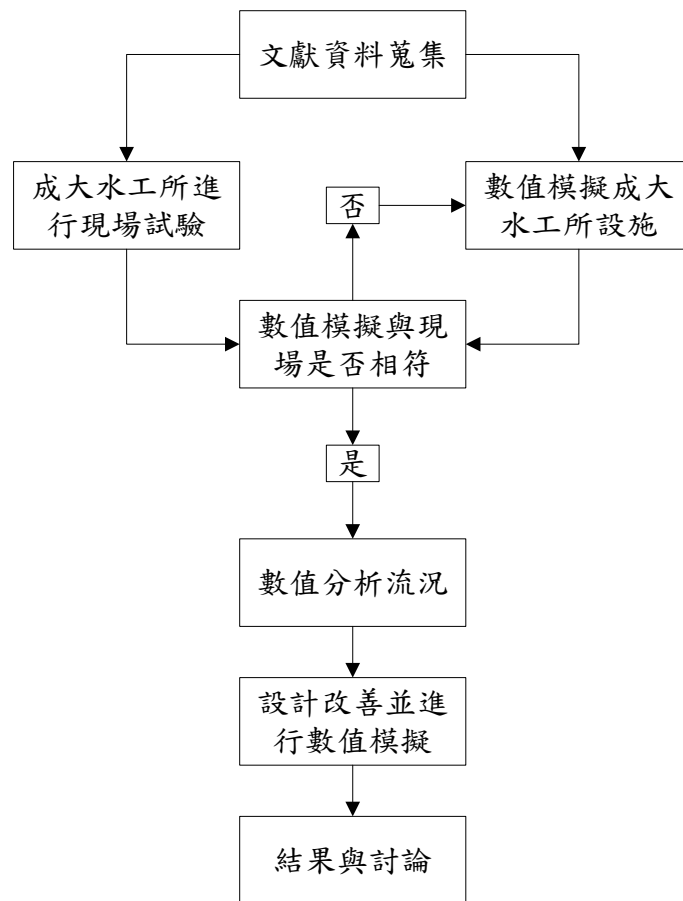


圖 1-11 研究流程圖

1.6 本文組織

第一章:緒論，包含前言、研究動機、研究目的、文獻回顧、研究方法與流程以及本文組織。

第二章:數值模擬介紹，包含 FLOW-3D 簡介、FLOW-3D 理論背景與電腦輔助設計，簡敘本研究使用的數值模擬軟體 FLOW-3D 的運算概念與程式背景。

第三章:數值模擬方法與驗證，包含數值模擬、現場試驗與數值驗證，描述本研究數值模擬與現場試驗如何進行，比較數值模擬與現場實驗之誤差。

第四章:結果與討論，包含系統的數值模擬與水車改良，探討原設計對流場造成的缺陷與流體能量在跑道池中的衰減變化以及水車的能量轉換效率。

第五章:結果與討論，敘述本研究的主要成果，並且針對後續研究提供建議。

第二章 數值模擬介紹

2.1 FLOW-3D 軟體簡介

1963 年，美國國家實驗室(Los Alamos National Laboratory, LANL)的 Dr.C.W.Hirt 開創了幾個非常重要的流體力學方法，提高運算穩定性和獨有的自由表面跟蹤技術(Volume of Fluid, VOF)。1980 年，Dr.C.W.Hirt 創辦了 Flow Science Inc.，開發了新一代的流體動力學數值模型，應用於工業和科學領域。在水利及海洋工程方面，可以使用 FLOW-3D 來模擬明渠流之流況或海上結構物運動情形。

1985 年，Dr.C.W.Hirt 正式發表 FLOW-3D[®]，提供使用者進行固體、液體與氣體間的互制運動行為。其軟體主要理論背景基於質量守恆方程式、動量方程式與能量守恆方程式等，並搭配其特有的 FAVOR[™] 結合有限差分技巧處理正交結構網格上複雜的幾何問題，TruVOF[®] 技術提供準確的自由液面模擬，多區塊結構性網格(Multi-Block Grids)減少運算時間並降低記憶體使用空間。FLOW-3D 因具備完整的理論基礎與數值結構能滿足不同領域使用者的需要，近幾年被廣泛運用在航太工業、船舶、微機電工程、鑄造與水利環境工程領域。

2.2 FLOW-3D 理論背景

FLOW-3D 理論基礎在於質量守恆方程式、動量守恆方程式與能量守恆方程式並遵守 Navier-Stokes Equation。現今之解析法仍未能完全解析此偏微分方程式故採用數值方法來模擬，以下幾節描述 FLOW-3D 相關控制方程式。

2.2.1 Navier-Stokes 之控制方程式

在古典力學中，物質體系所遵循的物理法則是「質量守恆」及「動量守恆」，對於三維不可壓縮黏性流體其連續方程式與動量方程式在直角坐標系統下的形式為：

(1) 連續方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

(2) 動量方程式

在 x 方向， y 方向和 z 方向分別表示如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \end{aligned} \quad (2.2)$$

上式中 (u, v, w) 分別表示水平和垂直方向之速度分量， (x, y, z) 分別為水平和垂直方向之座標， P 為壓力，而 ρ 、 ν 分別為流體之密度和運動黏滯係數(kinematic viscosity)，在數值模擬過程中假設不受其他因素之影響而保持定值。

2.2.2 FLOW-3D® 之控制方程式

(1) 質量連續方程式(Mass Continuity Equation)

質量連續方程式的一般形式如下：

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2.3)$$

V_F 是流體體積比， ρ 是流體密度， R_{DIF} 是紊流擴散項， R_{SOR} 是質量源項， (u, v, w) 是 (x, y, z) 座標方向的流體速度， A_x, A_y, A_z 分別是 x, y, z 方向流動的通量面積比。

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (2.4)$$

上式中係數 v_ρ 等於 $\frac{c_p \mu}{\rho}$ ， μ 是動量擴散(momentum diffusion)(ie: 黏度)， c_p 是紊流施密特數(turbulent Schmidt number)倒數的常數項。 R 表示固定參考半徑的比值， ξ 為座標系統指標，若是使用笛卡爾座標時 ξ 與 R 皆等於 0。

在(2.3)式中， R_{SOR} 可被當作密度源項，例如模擬質量穿越多孔障礙物時。對於求解可壓縮流體時則必須對(3.3)式給定密度傳輸方程式。對於不可壓縮流時，流體密度 ρ 是常數，則(2.3)式可簡化為不可壓縮流的情況：

$$R_{SOR} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (vA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} \right) \quad (2.5)$$

(2) 動量方程式(Momentum Equations)

以笛卡爾座標的形式將 Navier-Stokes Equation 展開可得 (x, y, z) 三個方向的流體速度 (u, v, w) ：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2.6)$$

上式中 $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ 是流場中模擬物體之運動速度， (G_x, G_y, G_z) 是物體之加速度， $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ 是流體表面速度， δ 為壓力源項型式指標，若為靜壓力(static pressure) $\delta = 1.0$ ，若為停滯壓力(stagnation pressure)，即流體進入計算領域之流速為0，則 $\xi = 0$ 。 (f_x, f_y, f_z) 為 x, y, z 三個方向的黏滯項，即

$$\begin{aligned} \rho V_F f_x &= w_s x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \\ \rho V_F f_y &= w_s y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} + A_y \tau_{xy}) \right\} \\ \rho V_F f_z &= w_s z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

上式中 τ_{ij} 代表流體剪應力(shear stress)，第一下標 i 為作用面，第二下標 j 為作用方向，其中

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\
\tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\
\tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

(3) 流體界面與自由液面

以數值方法處理自由液面(free surface)變化相當不容易，因為自由表面非為固定而是隨時間移動，流體體積法(Volume of Fluid,VOF)提供了經由固定網格追蹤流體界面的方法，且能準確處理介面，換句話說，流體體積法是對自由表面或二種流體界面的一種數值處理方法。

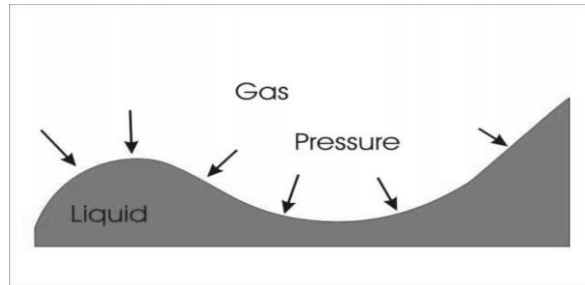


圖 2-1 自由液面示意圖

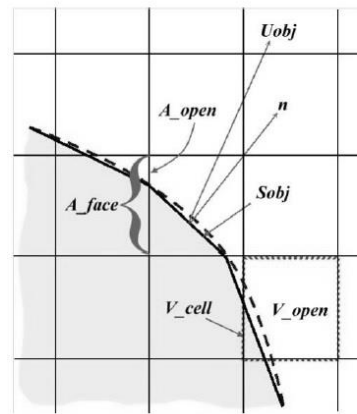
流體體積法由 Hirt 和 Nichols(1981)所創，是將計算之網格點額外再定義一流體比例函數 $F(x, y, z, t)$ ， F 之位置與壓力變數相同，皆位於網格中心點，其值介於 0 和 1 之間，若 $F = 1$ 表示流體完全充填；若 $F = 0$ 表示沒有流體；若 F 介於 0 和 1 之間表示部分充填，而其部分充填的元素就是流體界面， F 函數值之控制方程式為：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \nabla \cdot (F \bar{u} A_f) = 0 \tag{2.9}$$

上式中 V_f 是體積比， A_f 是面積比， \bar{u} 是流速。

由於自由表面會隨時間而移動，因此每一網格之 F 值也跟著變化才能反映此表面之變動。目前大部分的 CFD 軟體，在自由液面運動的計算多是根據此一方法

進行開發。FLOW-3D 在自由液面的模擬更加完整，稱為 TrueVOF。可以使得網格建立容易、減少記憶體的使用量、減少電腦計算時間，也可以使得網格元素有效適應一般的幾何形狀。



體積比：

$$V_f = \frac{V_{open}}{V_{cell}}$$

面積比：

$$A_f = \frac{A_{open}}{A_{face}}$$

來源項：

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} = \frac{\bar{U}_{obj} \cdot \bar{n} S_{obj}}{V_{cell}}$$

圖 2-2 二維直角網格面積和體積比例係數計算示意圖(林，2008)

如上圖所示，虛線部分表示自由液面的真實情況， A_f 和 V_f 表示自由液面在計算網格所佔比例， S_{obj} 為表面積、 \bar{n} 為表面向量， \bar{U}_{obj} 表示自由液面在網格間移動的速度， V_{cell} 表示每一立方網格之總體積。

2.2.3 FLOW-3D 物理模式

(1) 物體運動模式(General Moving Object Model,GMO)

如需在 FLOW-3D 製造波浪一般是使用內建的造波邊界來造波，但也可運用物體運動模式(GMO)在網格內插入 STL(Standard Template Library)物件，再給定運動速度、位置、方向等條件進行模擬造波板造浪。

在 GMO 模式中可使物體做出與流體的耦合運動或是依照所給定的運動方式使物體運動，並且可由固定軸或固定點來做六個維度的運動。在一個模擬問題中可讓多個物體做不同型式的獨立運動，但還是有其限制，例如：運動物體必須是固體(solid)、不可為有孔隙物體(porosity)、具固定軸(fixed axis)且必須平行座標系統的軸。

在 GMO 模式下，物體系統座標(body system)建立在每個運動物體上且座標軸平行於空間系統座標(space system)。若物體是六個自由度的運動其物體系統座標建立在質心 G 上，兩個系統的座標轉換如下：

$$x_s = [R] \cdot x_b + x_G \quad (2.10)$$

x_s 和 x_b 分別為在空間系統座標和物體系統座標中，點的位置向量， x_G 為在空間系統座標中質心的位置向量， $[R]$ 為正交座標轉換張量其型式為：

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

一向量 A 轉換方式如下：

$$A_s = [R] \cdot A_b \quad (2.12)$$

$[R]$ 的計算方法如下：

$$\frac{d[R]}{dt} = [\Omega] \cdot [R] \quad (2.13)$$

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 分別為在空間系統座標中物件的角速度。

根據動力學，剛體運動可被分離成兩種位移，分別為直線運動(translational motion)與轉動運動(rotational motion)。在剛體中任何一點的直線位移速度和轉動角速度皆相等，所以將 p 當作運動物體上的任一點時，其速度關係與質心速度 V_G 和角速度 ω 有關，其關係如下：

$$V_p = V_G + \omega \times R_{p/G} \quad (2.15)$$

其中 $R_{p/G}$ 為質心 G 到 p 的距離向量，而剛體運動的兩種位移方程式如下所示：

$$F = m \frac{dV_G}{dt} \quad (2.16)$$

$$T_G = [J] \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \times ([J] \cdot \omega) \quad (2.17)$$

其中 F 為總合力、 m 為剛體質量、 T_G 為質心總合力矩、 $[J]$ 為在物體座標系統中的

質量慣性矩張量，其型式如下：

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

其中 J_{11} 、 J_{22} 、 J_{33} 為質量慣性矩，其他元素組成方式如下：

$$J_{11} = \int (y'^2 + z'^2) dm, \quad J_{22} = \int (x'^2 + z'^2) dm, \quad J_{33} = \int (x'^2 + y'^2) dm \quad (2.19)$$

$$J_{12} = J_{21} = - \int x'y' dm, \quad J_{13} = J_{31} = - \int x'z' dm, \quad J_{23} = J_{32} = - \int y'z' dm \quad (2.20)$$

(2) 紊流模式

在 FLOW-3D 中提供了五種紊流模式，分別是 Prandtl 混合長度模式、單一方程(one-equation)，二方程之 $k - \varepsilon$ 和 Re-Normalisation Group(RNG)模式，以及大渦模擬(LES 模式)。部分紊流模式提供了模擬包含與非慣性加速度之浮力效應(buoyancy effects)。

單一方程紊流傳輸模式包含了與紊流速度擾動相關之紊流動能傳輸方程式

$$k_T = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.21)$$

其中 u' 、 v' 、 w' 為對應 x 、 y 、 z 方向上與紊流擾動有關的流體速度，係數 1/2 是由三個座標方向上的紊流動能擾動總和而來。

傳輸方程式包含紊流能量的對流與擴散，紊流能量的乘積是由剪應力與邊界影響，能量消散式由於黏滯力損失伴隨著紊流漩渦，以上皆包含在模式當中；浮力的產生只能發生於流體為不均勻密度時，包含了重力和非慣性加速度的影響，傳輸方程式為：

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_T - \varepsilon_T \quad (2.22)$$

其中 k_T 為紊流動能， V_F 、 A_x 、 A_y 、 A_z 為 FLOW-3D 中 FAVORTM 方程式之參數， P_T 為紊流動能生成項

$$P_T = CSPRO \left(\frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{array}{l} 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left(R \frac{\partial x}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \right] \\ + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

其中 $CSPRO$ 式紊流參數，其預設值為 1.0， R 和 ξ 與圓柱座標系統有關，而浮力產生項為：

$$G_T = -CRHO \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (2.24)$$

$CRHO$ 為另一個紊流係數，其預設值為 0.0，但模擬與熱氣浮升流體有關的問題時預設值為 2.5 擴散形式為：

$$Diff_T = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \right\} \quad (2.25)$$

其中 v_k 為擴散係數，是根據局部紊流所推估的。使用者定液係數 $RMTKE$ 為黏滯度的乘數用來計算紊流傳播係數(預設值為 1.0，除了在 RNG 模式下為 1.39)，消散率 ε_T ，在 $Prandtl$ 混合長度模式中與紊流動能 k_T 有關。

$TLEN$ 值在預設的情況下為網格邊界最小尺寸的 7%，但根據 *Shojaee Fard* 及 *Boyaghchi*(2007)建議設定流體最小域的 7%代表流動的特徵長度。流體的最小域在管流中相當於水管的直徑，而在明渠中則為水流的深度。

$k - \varepsilon$ 模式被廣泛利用，包含紊流能量 k_T 傳輸方程式和消散項 ε_T 。在許多不同的流體條件下已被證實提供了合理的近似值(*Rodi*,1980)。藉由增加傳輸方程式求解紊流消散，其 ε_T 求法如下：

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1}{k_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_\varepsilon - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (2.26)$$

其中 $CDIS1$ 、 $CDIS2$ 、 $CDIS3$ 為可調整的無因次參數，在 $k - \varepsilon$ 模式中預設值分別為 1.44、1.92、0.2。而消散傳播 $Diff_\varepsilon$ 其求法如下：

$$Diff_\varepsilon = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\varepsilon A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_\varepsilon A_x \varepsilon_T}{x} \right\} \quad (2.27)$$

FLOW-3D 另外提供建立在 RNG 方法之紊流模式，藉由適當的統計方法得出平均的紊流數量，如紊流能量和消散率。RNG 模式運用類似 $k - \varepsilon$ 模式的方程式。但是， $k - \varepsilon$ 方程式中的常數由實驗獲得而 RNG 模式則是以理論推導其常數值。RNG 可以說是 $k - \varepsilon$ 模式的改良版，其計算出的結果更能近似於現場實際的紊流模式。本研究選用 RNG $k - \varepsilon$ 模式做為數值模擬時的紊流方法，其他紊流模式不再詳述。

2.2.4 網格處理方法

FLOW-3D 生成正交網格，正交矩形網格具有生成容易且易於存取之特點，而在此計算流體力學模式中，提供了非均勻網格設定功能，提供複雜流場中較為彈性之網格設計。另外也可生成多個網格再進行鏈結形成鏈結網格如圖 2-3，針對流況較為複雜之區域增加網格密度有效減少網格數目，鏈結後網格與幾何現狀自動耦合，精確、穩定且加快運算的收斂性。

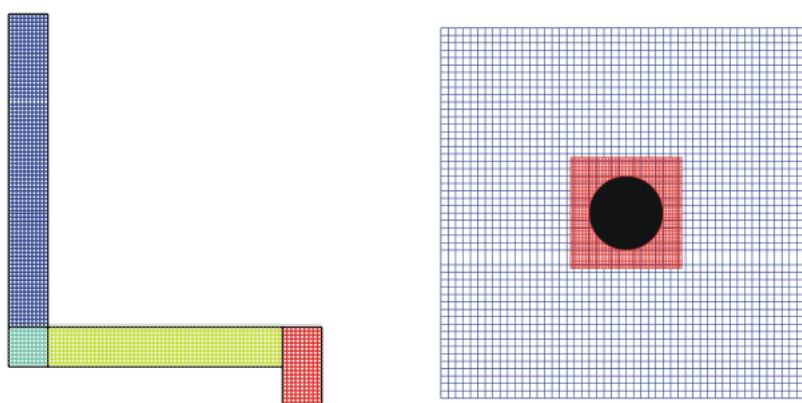


圖 2-3 鏈結網格（左）與巢狀網格（右）

2.2.5 障礙物處理法

數值方法常使用有限差分法(Finite Difference Method, FDM)有限體積法(Finite Volume Method, FVM)、有限解析法(Finite Analytic Method, FAM)、有限元素法(Finite Element Method, FEM)和邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)。其中有限差分法離散對流、擴散項概念清晰計算簡單能保證物理量守恆，故 FLOW-3D[®] 數值方法採用有限差分法。但是，有限差分法缺點在於其建立的網格

屬正交矩形網格，對於結構幾何複雜的物件邊界上難以精確描述。

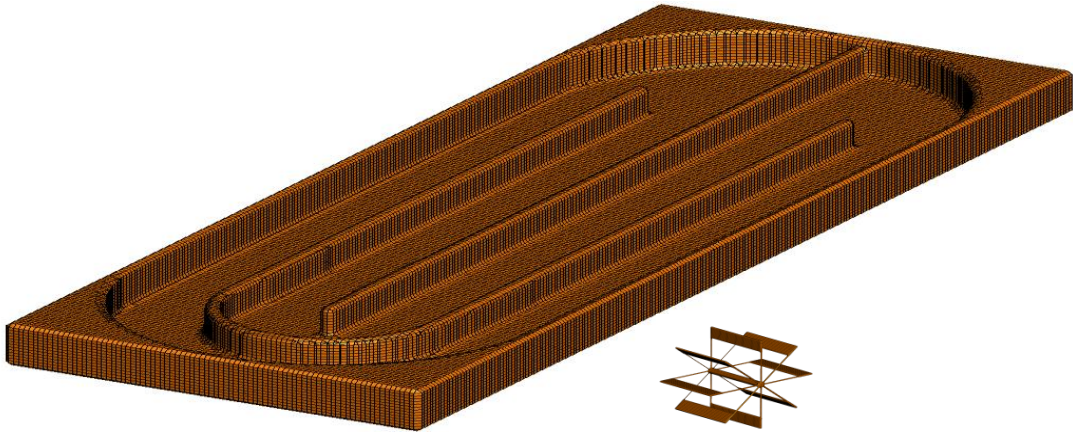


圖 2-4 網格切割後的跑道式微藻養殖池與造流水車

FAVORTM 定義矩形網格內一般幾何形狀的區域，利用矩形立方體構成的網格定義複雜的幾何物體，描述每一個矩形立方體六個面的流通面積比與自由出入的體積。這些部分面積與體積將會結合到有限體積的運動方程式中，例如在兩個元素的公共面上，對流的質量、動量與能量通量必須包含此面可讓流體自由通過的面積當作一個乘數，倘若沒有可讓流體自由通過的面積則不可能有對流的通量。FAVOR 的優勢在於它提供建立模型時的彈性。對於不可壓縮、黏性流而言，FAVOR 以下列方程式表示：

$$\nabla \cdot (\vec{A}\vec{u}) = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{V} (\vec{A}\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho V} (\nabla \vec{A}) \cdot (\mu \nabla) \vec{u} + \vec{g} \quad (2.29)$$

其中

$$\vec{A}\vec{u} = (A_x u_x, A_y u_y, A_z u_z) \quad (2.30)$$

$$(\nabla \vec{A}) = \left(\frac{\partial}{\partial x} A_x, \frac{\partial}{\partial y} A_y, \frac{\partial}{\partial z} A_z, \dots \right) \quad (2.31)$$

上式中 \vec{A} 是流體可自由進出的部分面積， V 表示可自由進出的部分體積， ρ 是密度， P 是壓力， \vec{u} 表示速度， μ 為流體黏滯係數， \vec{g} 為重力場。

2.2.6 網格邊界條件

FLOW-3D 提供十種邊界條件可選擇，分別是對稱邊界(Symmetry)、牆壁邊界

(Wall)、週期性邊界(Periodic)、連續邊界(Continuative)、出流邊界(Outflow)、壓力邊界(Pressure)、速度邊界(Velocity)、流量邊界(Volume Flow Rate)、造波邊界(Wave)及網格接續邊界(Grid Overlay,GO)。

對稱邊界:流體或熱量都無法穿越且邊界上剪應力為零，可有效減少對稱問題的計算量；牆壁邊界:流體無法穿越該邊界且需給定黏滯係數計算邊界上的黏滯剪應力，可給定溫度但無法給定表面粗糙度(roughness)；連續邊界:靠近邊界的流場不隨空間變化，邊界上梯度為零 $\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial x}, etc \dots\right) = 0$ ；出流邊界:可延伸計算區域到下游邊界外的幾個網格，但無法設定尾水(tailwater)高度；壓力邊界:邊界壓力值可以為定值或是隨時間變化且壓力均勻分佈；速度邊界:可選擇由整個邊界或是給定水流高度匯入流體，但是無法給定速度剖面只能均勻入流；流量邊界:流量為純量需使用向量來決定流體進出 $(V = Q_{specified}/A_{open})$ ；造波邊界:包含線性波、Stokes波、孤立波與不規則波等選項；網格連續邊界(GO):只適合檔案接續分析時使用，GO邊界上的變數與先前接續的檔案變數相同；週期性邊界:利用邊界條件替代所選部分系統受到周邊環境的影響，將具有時空週期性的物理問題簡化為單元進行處理。

2.2.7 離散方法

FLOW-3D主要以有限差分法(或有限體積法)數值方法離散控制方程式。方程式中大部分的項使用當時的時間軸計算局部變量，稱為顯式法。但是簡單而有效的數值技巧卻受限於時間步進(Time Step)設定來保持計算結果的穩定性和精度；另外FLOW-3D也提供相對穩定的隱式法求解。

當顯式法求解壓力項的問題時，流場壓力和流場速度透過隱式法耦合下一時刻動量方程式中的壓力項及質量連續性方程式的速度項，這種「半隱式法」可有效解決計算效率過低與不可壓縮流的問題，但是耦合方程組必須透過迭代求解。

FLOW-3D提供3個這樣的數值技巧，較簡單的是超鬆弛SOR法(successive over-relaxation)，而在某些情況下需要更多的隱式法求解時則採用SADI法(special

alternating-direction,line implicit)。廣義最小殘量GMRES法(generalized minimal residual method)則具有良好的收斂性、對稱性與運算效率，但是計算時電腦所需的內存容量較多。

2.3 電腦輔助設計

在進行數值模擬時如需建模，FLOW-3D內建幾種簡單幾何形狀繪圖。對於複雜的幾何圖形也可以由許多3D繪圖軟體，例如:AutoCAD、SolidWorks、Pro/Engineer、Rhinomarine等軟體繪製圖檔再轉存為STL(Standard Template Library)檔儲存匯入FLOW-3D。

不同的繪圖軟體使用於不同領域的圖型建模，例如Rhinomarine軟體專門針對船模進行繪製，SolidWorks則常應用於細部零件或組零件建模，AutoCAD則是適合於大型結構物或建築物結構方面。值得注意的是，不管是由FLOW-3D內建幾何圖形建模或是由外部繪圖軟體匯入STL圖檔，皆須注意運算網格生成在模型上的細密度。幾何形狀複雜的模型如果沒有相對細密的網格做切割，之後進行數值模擬時將會失去原物件應展現出的幾何形狀數值模擬的結果也可能會失真。

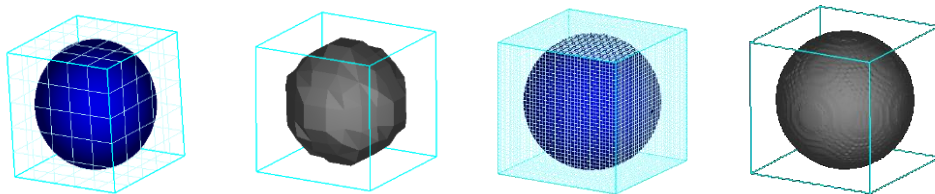


圖2-5 不同網格密度下的球型結構物

如圖2-5所示，經由STL檔繪入的球型結構物在不同的網格密度下實際進行數值模擬時結構物呈現的幾何形狀大不相同。圖2-5中，左二與右一兩圖為經由FAVOR模式下呈現出的結構物實際幾何圖形。網格數量的多寡常左右數值模擬的準確度，但是網格數量過多則會降低運算效率，如何在網格數量與運算效率間取得平衡除了依賴過往經驗外也需配合數值模擬時的邊界條件設定與預設的尺度大小。

第三章 數值模擬方法與驗證

本研究分為數值模擬與現場試驗兩部分。數值模擬對象為國立成功大學微藻生技與工程實驗室的跑道式微藻培養系統，依照現場測量所得之水槽與水車尺寸、水車轉速、水體溫度、靜水位高度之數據進行數值模擬。現場試驗則是使用二維電磁式流速計進行流速量測，測量水平方向流速供數值模擬驗證。

3.1 數值模擬

FLOW-3D 數值模擬主要流程分別為，(1)CAD 軟體建模(2)FLOW-3D 參數與模式設定(3)數值結果輸出詳細流程如圖 3-1 所示：

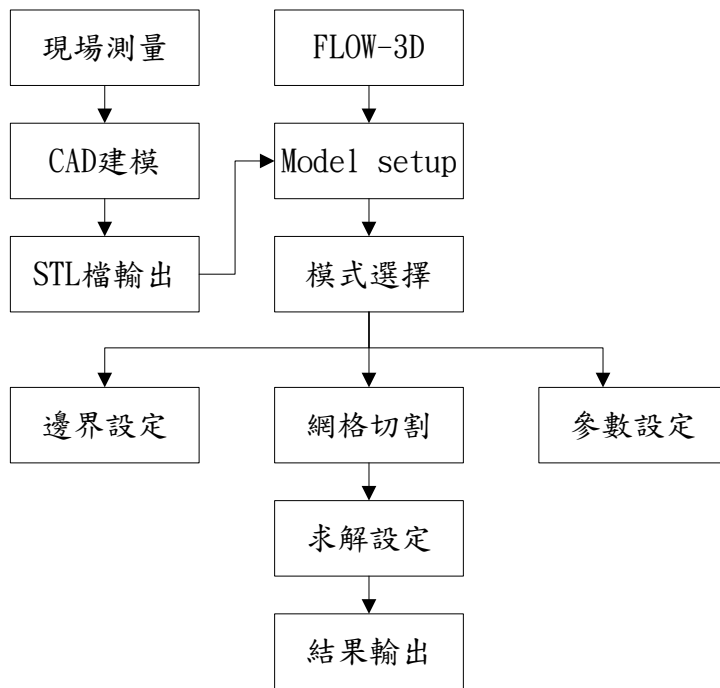


圖 3-1 FLOW-3D 操作流程圖

3.1.1 現場測量

該微藻養殖系統為國立成功大學微藻生技與工程實驗室的既有設施，系統的尺寸數據並沒有被特別記錄，設備供應商方面也未握有足以提供 CAD 繪圖軟體建模與數值模擬所需的數據資料。故進行數值模擬前需現場測量水槽與水車尺寸、水體溫度、水車轉速、靜水位高度，以便提供繪製 CAD 物件與數值參數設定使用。所需器材與用途如表 3-1 所示：

表 3-1 現場測量所需器材

品項	雷射轉速計 (圖 3-2)	雷射量尺 (圖 3-3)	HOBO 紀錄器 圖(3-4)	捲尺 (圖 3-5)
用途	測量水車轉速	測量長度	記錄水體溫度	測量靜水位高度



圖 3-2 雷射轉速計



圖 3-3 雷射量尺



圖 3-4 HOBO



圖 3-5 捲尺

除了現場量測跑道式養殖池水槽與水車的尺寸以外，為了因應 FLOW-3D 對流體物理性質的要求，投入兩個 HOBO 固定於池中測量藻水溫度以供數值模擬時參數調整使用。圖 3-6 為 HOBO 所測得之藻水溫度與時間變化圖，橫軸為 24 小時制時間，縱軸為攝氏溫度。

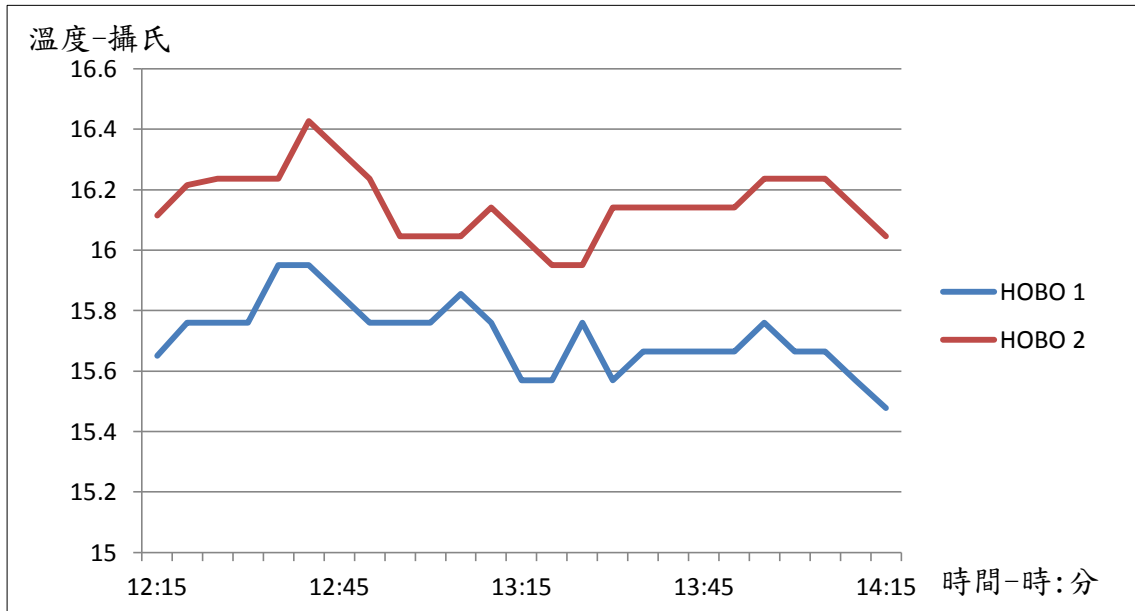


圖 3-6 HOBO 溫度-時間變化圖

由上圖 3-6 得知，所測得之數據平均溫度各為攝氏 15.75 度與 16.18 度，兩數據誤差在攝氏 0.5 度內，故取整數值攝氏 16 度為平均溫度供日後模擬參數調整使用。

3.1.2 CAD 繪圖軟體建模

本研究使用 SolidWorks 繪圖軟體進行建模，依據現場所測得之數據進行電腦繪圖。SolidWorks 為達梭(Dassault Systemes S.A.)其下子公司所開發的三維電腦輔助設計(Computer Aided Design)軟體。

跑道式微藻養殖池長度 9.3 公尺寬度 3.4 公尺，左右各為半圓弧之設計，可容納約 10 公噸水量。池內由寬度 12 公分之隔板劃分成四個流道在池內經由水車以 30rpm 之轉速進行藻水循環。

經由電腦繪圖後所呈現的跑道式養殖池二維平面圖與三維立體圖如下圖 3-7 與圖 3-8 所示，先行繪製二維(X-Y)平面圖之後於 Z 方向生成三維立體模型。

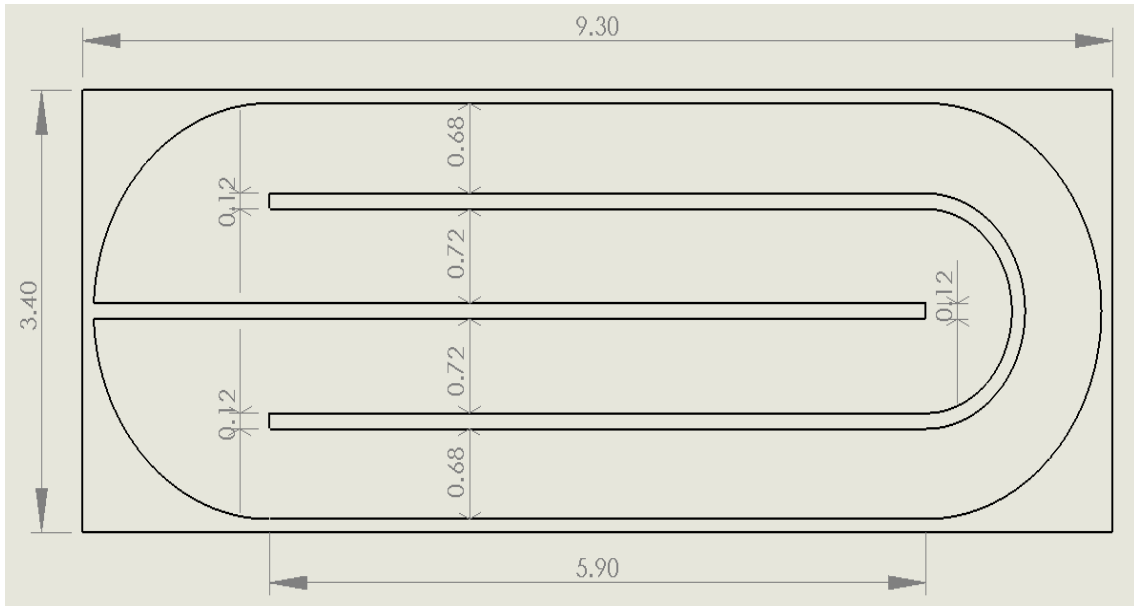


圖 3-7 於 SolidWorks 之養殖池二維平面圖(單位:m)

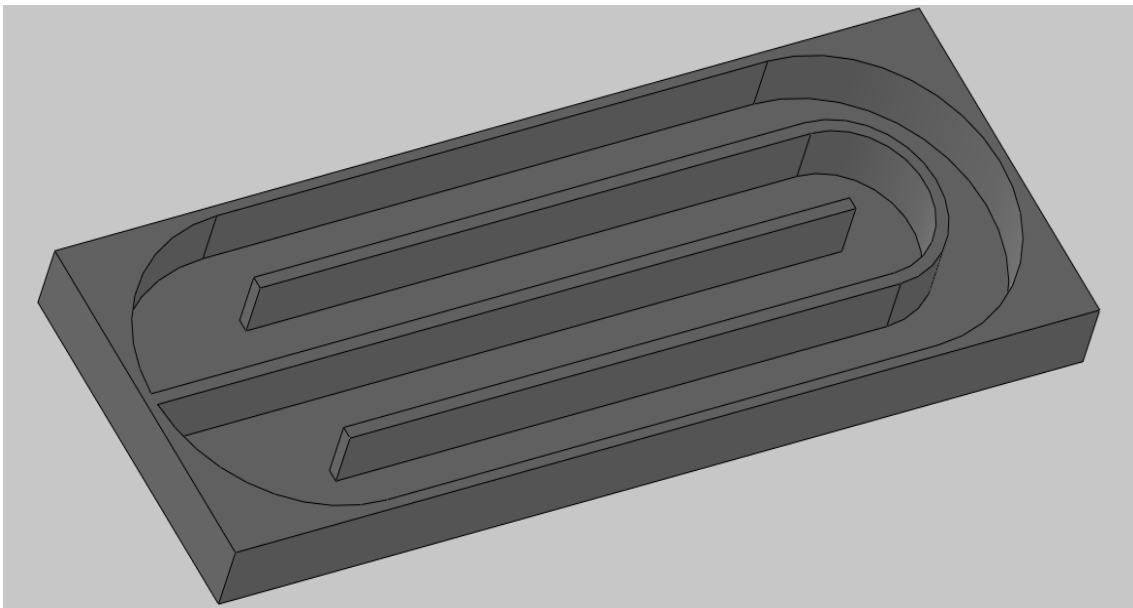


圖 3-8 於 SolidWorks 之養殖池三維立體圖

除了跑道式養殖池外還需對水車進行建模，因為繪製過程較為複雜不另進行敘述。水車主要由八個長度 12 公分寬度 52 公分厚度 1.5 公分之壓克力板組成，直徑為 92 公分，轉軸離地高度為 53 公分。

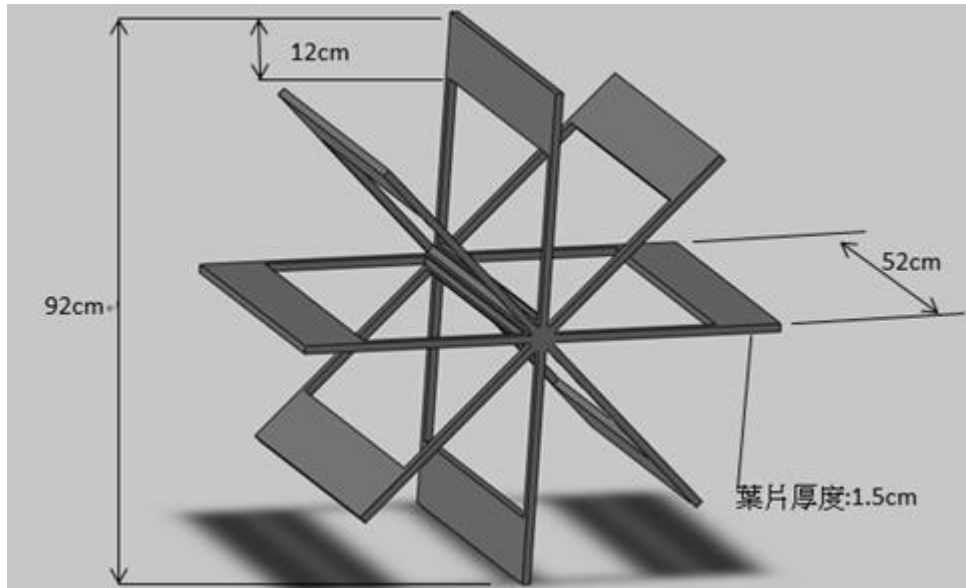


圖 3-9 於 SolidWorks 之水車三維立體圖

進行 FLOW-3D 數值模擬時物件檔案格式必須是 STL(Standard Template Library)檔，故需將繪製好的物件於 SolidWorks2010 中轉化成 STL 格式儲存。

3.1.3 FLOW-3D 數值模擬設定

經由 CAD 繪圖軟體所完成之模型以公尺為單位，故在 FLOW-3D 軟體中單位使用 SI 制。本文所使用模式與參數以對應方式整合為總表，需特別注意 Viscosity and turbulence 項目中的 Maximum turbulent mixing length。一般情況下 FLOW-3D 預設值為網格 z 方向邊界長度的 7%，本研究中在 z 方向的網格邊界為 0.4m 但是實際靜止水位高僅有 0.18m，如果選擇預設值則紊流區的計算將會失真。故本研究為了提高紊流區的計算精確度，自行設定 Maximum turbulent mixing length 改為實際靜止水位高度的 7% 即 0.0126m。

表 3-2 General 設定表

項目	設定內容	項目	設定內容
Finish time	60s	Flow mode	Incompressible
Units	SI	Number of fluids	One fluid

表 3-3 Physics 設定表

項目	設定內容
Gravity	Z component: -9.81 m/s^2
Moving and simple deforming objects	Moving object/fluid coupling: Explicit
Viscosity and turbulence	Renormalized group(RNG) model Maximum turbulent mixing length = 0.0126 m
Particles(繪製流體粒子之徑線用)	Particle initialization:30 History particles Type:Marker particles Initialization: Random Void interaction: cannot escape to voids Fluid interaction: partial fluid particle

由上表 3-3 可知,於模擬時置入 30 個物理性質與流體相同且初始速度皆為 0 m/s 之粒子進行追蹤。15 個粒子為一組,共有兩組;以 Y-Z 方向斷面均勻分布於兩個水車前三倍水深之距離外。各粒子分佈位置與大小如下表 3-4 與表 3-5 所示:

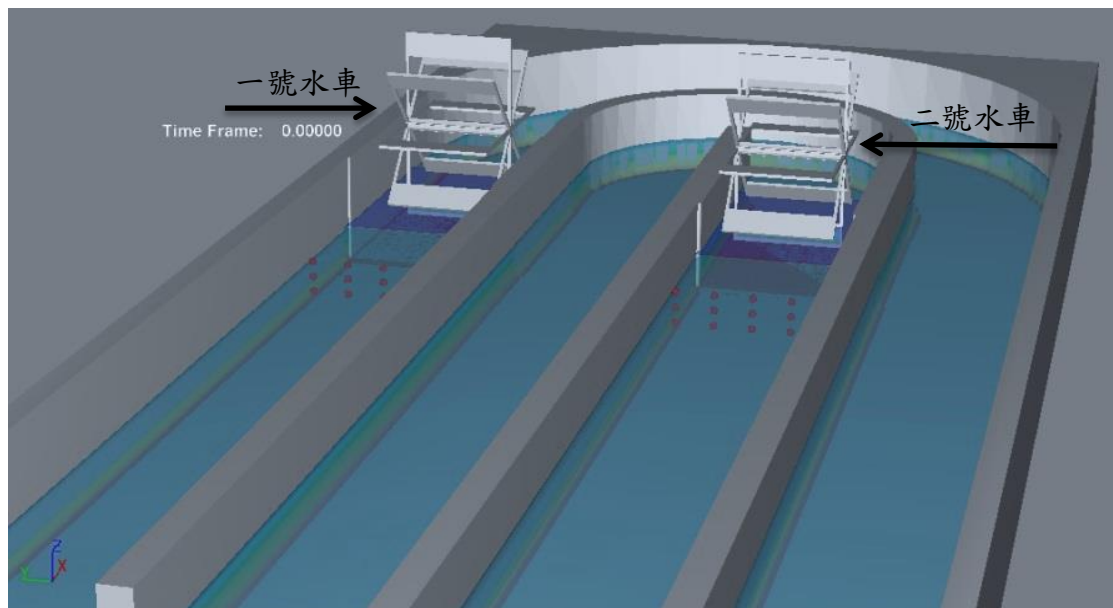


圖 3-10 粒子(紅色顆粒者)分佈示意圖

表 3-4 一號水車粒子座標位置表

粒子編號	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	5.70	3.280	0.02
2	5.70	3.115	0.02
3	5.70	2.950	0.02
4	5.70	2.785	0.02
5	5.70	2.620	0.02
6	5.70	3.280	0.09
7	5.70	3.115	0.09
8	5.70	2.950	0.09
9	5.70	2.785	0.09
10	5.70	2.620	0.09
11	5.70	3.280	0.16
12	5.70	3.115	0.16
13	5.70	2.950	0.16
14	5.70	2.785	0.16
15	5.70	2.620	0.16

表 3-5 二號水車粒子座標位置表

粒子編號	X(m)	Y(m)	Z(m)
16	5.70	1.62	0.02
17	5.70	1.54	0.02
18	5.70	1.28	0.02
19	5.70	1.11	0.02
20	5.70	0.94	0.02
21	5.70	1.62	0.09
22	5.70	1.54	0.09
23	5.70	1.28	0.09
24	5.70	1.11	0.09
25	5.70	0.94	0.09
26	5.70	1.62	0.16
27	5.70	1.54	0.16
28	5.70	1.28	0.16
29	5.70	1.11	0.16
30	5.70	0.94	0.16

流體物理性質設定方面根據陳、諸等人(2012)研究指出，一般藻水於室溫下動力黏滯係數為 0.9~1.2 mPa·s，密度 1000~1030 kg/m³ 與水的物理性質相近。為了提高模擬結果的精確性故自行設定流體性質，主要是參考純水於攝氏溫標 16 度時的物理性質進行設定，如下表 3-6 所示。

表 3-6 fluid material 設定表

項目	設定內容
Density	998.8 kg/m ³
Thermal expansion	0.00016252 1/K
Specific heat	4186 J/kgK
Thermal conductivity	0.589 W/mK
Surface tension coeff	0.0734146 N/m
Viscosity	1.125 mPa·s

本研究有三個主要物件分別是兩個水車與一個跑道式養殖池，將已繪製好的 STL 圖檔匯入 FLOW-3D 裡，設定圖 3-11 上綠色點處為原點(0,0,0)位置插入物件，物件詳細位置如表 3-7 所示。

表 3-7 Component Translations 設定表

物件編號	物件位置(m)
Component 1(跑道式養殖池)	Translations X:0 Y:0 Z:-0.1
Component 2(水車)	Translations X:6.39 Y:2.664 Z:0.07
Component 3(水車)	Translations X:6.39 Y:1.049 Z:0.07

網格劃分與物理性質設定為數值模擬最重要的一塊，符合求解需求的網格大小能真實地表現實際流體運動情形，也可以縮短運算時間，增加運算效率。本研究將跑道式微藻養殖池劃分六個網格區塊，並將流況較為複雜的區域提高網格密度且網格邊界皆設定為 Symmetry，網格劃分與設定內容如下圖 3-11 與表 3-8 所示。

表 3-8 網格劃分位置表

網格編號	網格座標範圍 (m)			Size of cells(m)
Mesh block 1	X:0~6.21	Y:0~3.4	Z:-0.1~0.5	0.030
Mesh block 2	X:7.31~9.3	Y:0~3.4	Z:-0.1~0.5	0.030
Mesh block 3	X:6.21~7.31	Y:0~0.85	Z:-0.1~0.5	0.030
Mesh block 4	X:6.21~7.31	Y:0.85~1.7	Z:-0.1~1	0.010
Mesh block 5	X:6.21~7.31	Y:1.7~2.55	Z:-0.1~0.5	0.030
Mesh block 6	X:6.21~7.31	Y:2.55~3.4	Z:-0.1~1	0.010

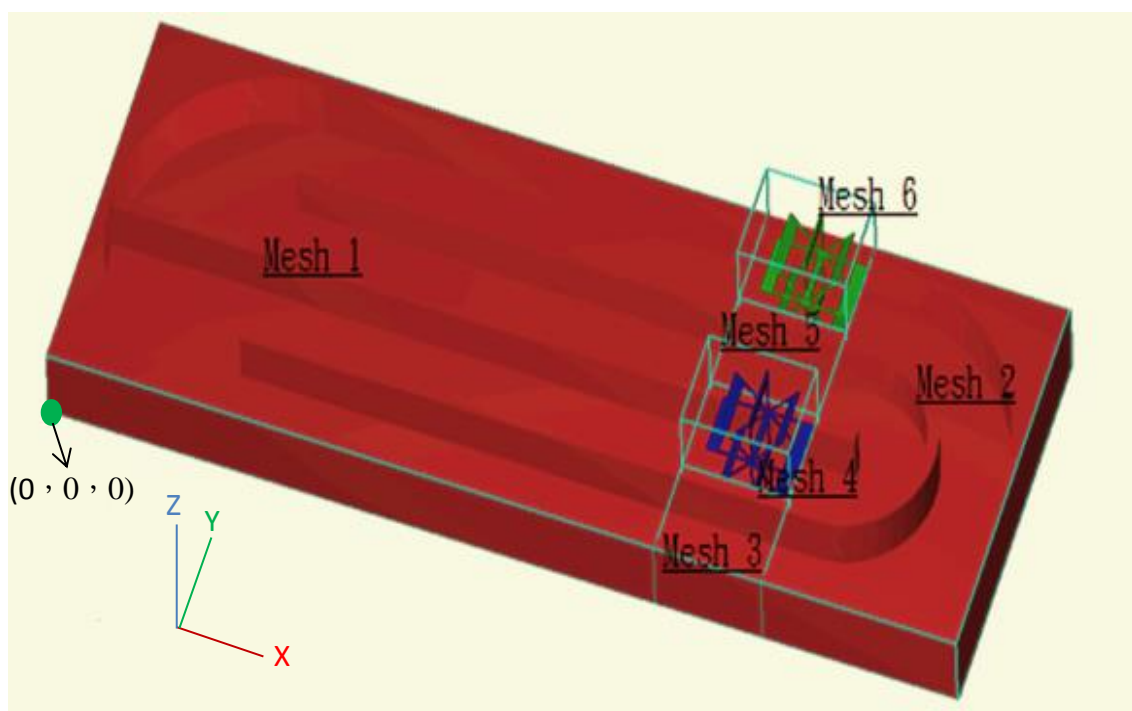


圖 3-11 網格劃分示意圖

網格劃分後需設定水體靜水位的高度與壓力性質，並且設定水車轉軸位置與轉速如下表 3-9 所示。

表 3-9 靜水位高度與轉軸設定表

項目	設定內容
Fluid initialization	Initial fluid elevation:0.18(m)
Pressure	Hydrostatic pressure
Motion Constraint (Fixed y-axis rotation)	Fixed axis X coordinate:6.85(m) Fixed axis Z coordinate:0.53(m)
Angular velocity components (Y:Non-sinusoidal)	3.1415926 rad/s (每分鐘 30rpm)

最後進行求解設定、運算單位時間與數值輸出內容設定，FLOW-3D 裡除了基本的速度、壓力等數值輸出以外如果還有其他數值需求必須另外在 Output 選項裡進行點選設定。另外對於運算時的顯性與隱性設定則是不須更動，FLOW-3D 會自行設定最佳的求解方式，詳細設定內容如下表 3-10 與表 3-11 所示。

表 3-10 Output 設定表

項目	設定內容
Fraction interval	Fluid velocities/Hydraulic data/Particle information/Total hydraulic head/Turbulent kinetic dissipation rate/Turbulent kinetic energy/Volume of entrained air/Particle information
Additional output	Hydraulic data/Dynamic viscosity/Total hydraulic head

表 3-11 Numerics 設定表

項目	設定內容
Initial time step	0.001 s
Minimum time step	1e-10 s

完成 FLOW-3D 以上各設定後回到 Simulation Manager，點選此次數值模擬檔案名稱按右鍵點選 Preprocess Simulation 載入設定內容並進行總網格計算，完成後再按右鍵點選 Run Simulation 開始進行運算。本研究使用 3022656 個網格進行模擬，其中包含 2607896 個有效網格。

3.2 現場試驗與數值驗證

本研究現場試驗於民國 102 年 12 月 19 日上午進行，基於流速計的使用限制與現場環境挑選五個點進行 X 方向的流速測量。

3.2.1 設備

(1) 電磁式流速計(圖 3-13)

製造商:JFE ALEC CO.,LTD.

型號:ACM2-RS

測量項目:X-Y 雙向流量

測量範圍:±250 cm/s

測量精度:±2%或 0.5 cm/s

(2) 參數分析儀(圖 3-12)

製造商: JFE ALEC CO.,LTD.

型號: ACM-4IF

(3) 筆記型電腦

製造商:ASUS

型號:F81

CPU:Duo T6400

OS:VistaPremium

(4) 訊號擷取軟體

軟體名稱:WinLabEM Ver1.1



圖 3-12 參數分析儀

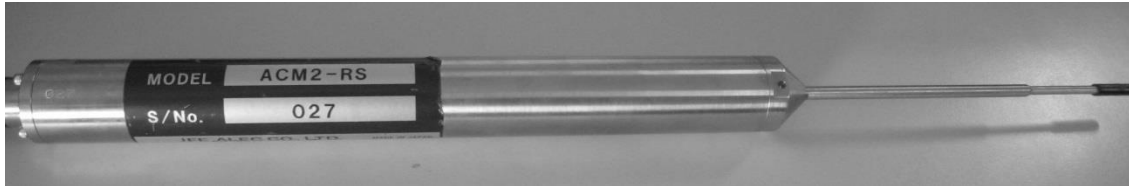


圖 3-13 電磁式流速計



圖 3-14 流速計架設(一), 測量點(4)



圖 3-15 流速計架設(二), 測量點(5)

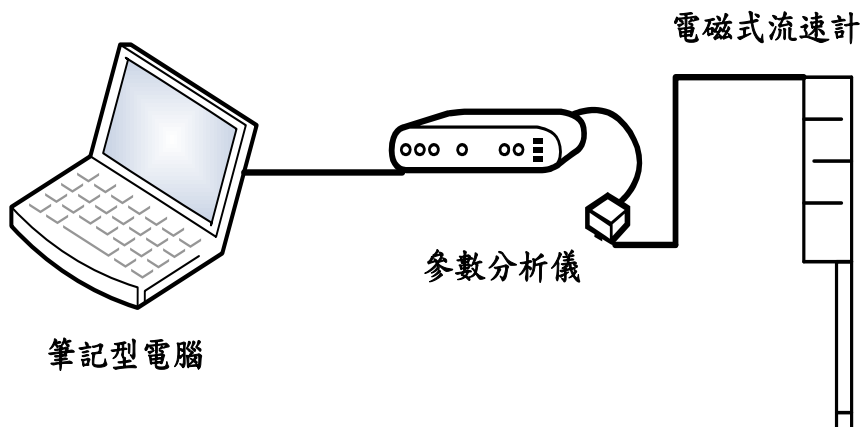


圖 3-16 儀器架設配置示意圖

3.2.2 實驗步驟

本實驗分別測量跑道式微藻養殖池內五個點的平均流速，因應流速計使用上之限制故不進行彎道處流速量測，進行流速量測之實驗步驟如下所示：

- (1) 架設流速計於水槽斷面，將流速計上紅點調整至迎流方向。
- (2) 將流速計探頭上之 Y⁺ 感測點移至欲測位置(如圖 3-17 與表 3-12)。
- (3) 打開參數分析儀並且開啟訊號擷取程式。
- (4) 設定擷取頻率、擷取流速範圍
- (5) 啟動流速計擷取流速資料，每一量測點約擷取流速訊號 30 秒。

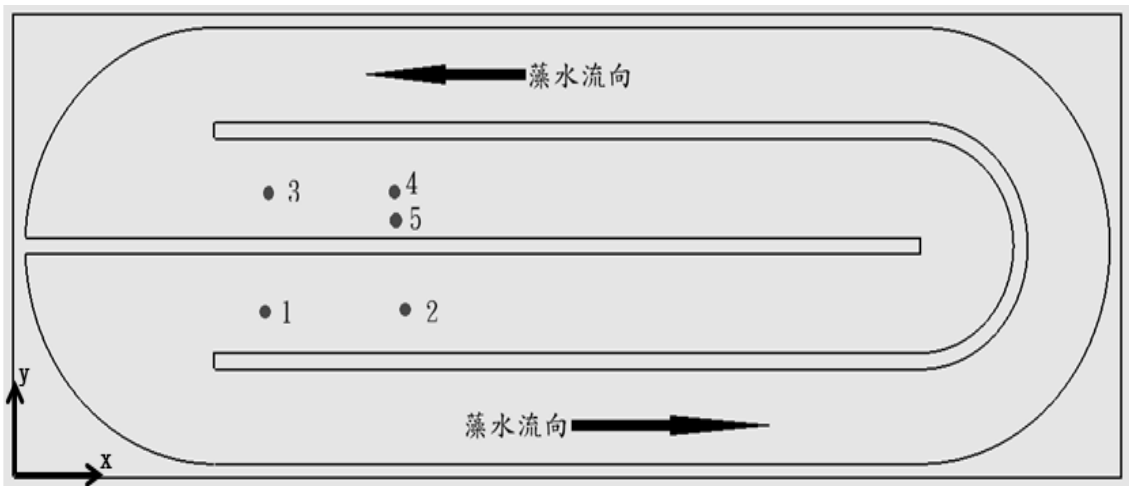


圖 3-17 測量點 X-Y 方向平面相對位置圖

表 3-12 測量點座標位置表

測量點編號	座標位置(X, Y, Z)(m)
1	(1.76, 1.21, 0.05)
2	(3.458, 1.21, 0.05)
3	(1.76, 2.05, 0.05)
4	(3.373, 2.05, 0.05)
5	(3.373, 1.94, 0.05)

3.2.3 試驗結果

本研究現場實驗共測量池內五點的平均 X 方向流速供數值模擬進行驗證，各點的平均 X 方向流速、座標位置與數值模擬結果之對照如下表 3-13 所示。

表 3-13 驗證結果

測量點編號	座標位置(m)	現場流速	數值模擬結果	與現場誤差
1	(1.76, 1.21, 0.05)	44.43 cm/s	48.80 cm/s	+9.84%
2	(3.458, 1.21, 0.05)	37.99 cm/s	37.80 cm/s	-0.5%
3	(1.76, 2.05, 0.05)	69.05 cm/s	65.10 cm/s	-5.72%
4	(3.373, 2.05, 0.05)	77.83 cm/s	69.30 cm/s	-10.95%
5	(3.373, 1.94, 0.05)	89.06 cm/s	80.00 cm/s	-10.17%

由上表 3-13 可知，本研究應用 FLOW-3D 數值模擬跑道式微藻養殖池與現場測量流速驗證趨勢符合一致，誤差值約在正負十個百分點之間。影響誤差間距之因素可分為數值模擬與現場試驗兩個部分，數值模擬時網格密度愈高且加入的現場環境條件如邊界粗糙度等參數愈多則數值模擬時的誤差必然會降低。現場試驗時，水溫與風向隨時間變化且造流水車的瞬時轉速也易受馬達變頻器影響；雖有以上可能產生誤差的因素存在，數值模擬的可信度依然頗具水準。

3.2.4 網格獨立性測試

進行數值模擬時網格數多寡經常左右數據的精確度，但是網格數過多會造成運算時間增加而降低運算效率。網格獨立性測試為針對同一個數值模式以不同網格數進行運算，找尋兼顧運算時間與精確度的總網格數。

經由下表 3-14 可說明，測試編號一的數值模擬誤差最多達 18.44%，明顯高於測試編號二的 10.95% 與測試編號三的 10.21%。測試編號三各測量點的誤差範圍雖然有正負十個百分點內的水準，但是總網格數最多運算時間也最長，而測試編號二的各測量點誤差雖然較測試編號三個點微幅增加，但是總網格數與運算時

間皆在可容許的範圍以內數值模擬的運算效率也相對較高，因此，本研究進行數值模擬時總網格數皆為 3022656 個。

表 3-14 網格獨立性測試結果

網格獨立 測試編號	總網格數 (個)/運算 時間(小時)	測量點 1 (cm/s)/ 誤差(%)	測量點 2 (cm/s)/ 誤差(%)	測量點 3 (cm/s)/ 誤差(%)	測量點 4 (cm/s)/ 誤差(%)	測量點 5 (cm/s)/ 誤差(%)
一	2597852/51	47.30/ +6.460	36.70/ -3.400	62.80/ -9.050	63.45/ -18.44	74.10/ -16.80
二	3022656/75	48.80/ +9.840	37.80/ -0.500	65.10/ -5.720	69.30/ -10.95	80.00/ -10.17
三	4728824/98	48.50/ +9.160	37.05/ -2.470	66.60/ -3.550	69.85/ -10.21	82.50/ -7.356
現場流速 測量數據	N/A	44.43	37.90	69.05	77.80	89.06

表 3-15 數值模擬電腦設備

項目	規格	項目	規格
CPU	I7-3930K	作業系統	Windows7(64bits)
主機板	ASUS P9-X79PRO	FLOW-3D	10.1 版
顯示卡	NVIDIA Quadro K2000D	記憶體	32GB

第四章 結果與討論

本章分為三個部份進行討論，第一部分探討以 FLOW-3D 進行數值模擬後的國立成功大學生物科技中心微藻生技與工程實驗室之跑道式微藻養殖池，針對養殖池內的彎道損失水頭、平均流速分佈、自由液面高度與流體粒子徑線分佈、水車能源消耗進行分析。第二部分討論該跑道式微藻養殖池的渠道改善，主要方向為降低彎道損失水頭、減少流速偏低的死區、降低自由液面高度差與增加粒子循環效率。第三部分則是著重於造流水車的能量轉換效率，分析目前於跑道式微藻養殖池常用的造流水車之運轉效率與改善的建議。

4.1 數值模擬流況分析與討論

本節針對跑道式微藻養殖池進行流況分析與討論，詳細模擬方法與設定內容如第三章所示，二維平面配置如圖 4-1 所示，而造流水車基本規格如圖 4-2 所示。

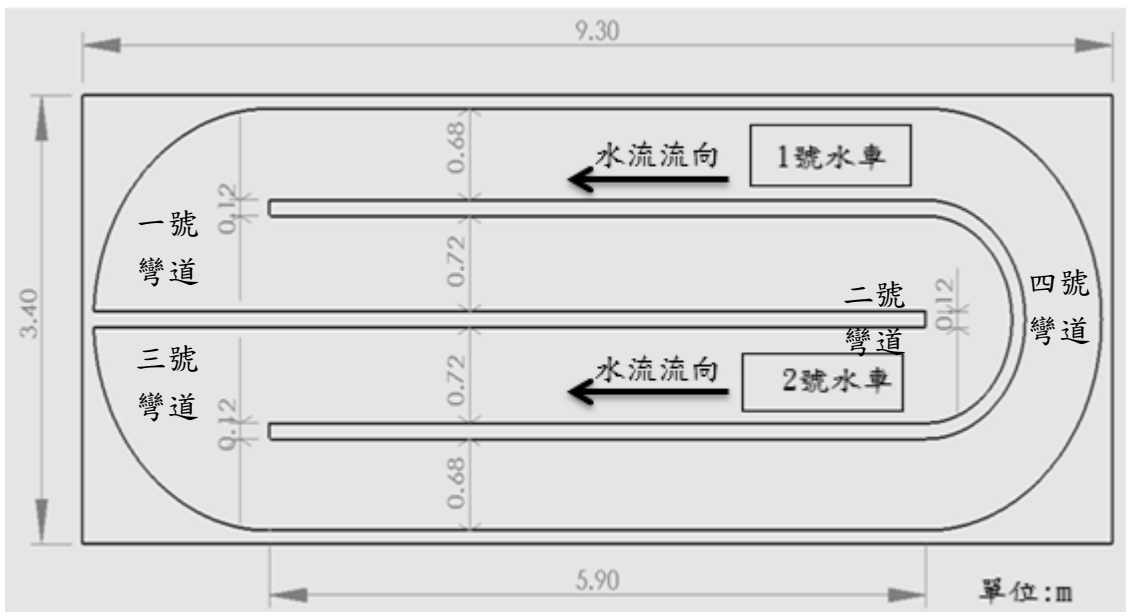


圖 4-1 微藻養殖池二維平面配置圖

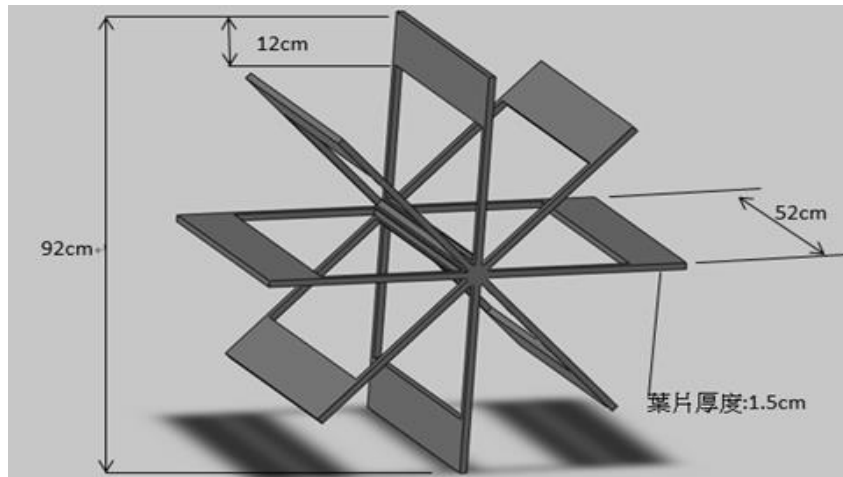


圖 4-2 水車規格

現場實際配置為兩台水車經由同一馬達帶動同軸旋轉，由於本研究分析水車能量轉換效率，故有必要故將兩台水車分開置入養殖池內。基本設定條件如下表 4-1 所示。

表 4-1 基本設定條件

名稱	設定內容
Pressure	Hydrostatic pressure
Gravity	Z component: -9.81 m/s^2
Viscosity and turbulence	Renormalized group(RNG) model Maximum turbulent mixing length=0.0126 m
Fluid initialization	Initial fluid elevation:0.18(m)
Angular velocity components	3.1415926 rad/s (每分鐘 30RPM)

4.1.1 平均流速分佈

由圖 4-3 可知，左半邊一號與三號彎道有大片流速偏低的藍色區域俗稱「死區」，且一號、二號與三號彎出口皆有流速集中的情形，造成該處流場的流速極不均匀容易產生紊流，根據諸(2012)發表的研究記載該流體在轉彎的過程中受慣性力與離心力作用下彎道出口能量向外側集中，越靠近彎道出口外側流速越高而越

靠近彎道出口內側流速越低，促使彎道出口內側邊界上形成死區；右邊外側的 U 型四號彎道區域流速分佈則相對平均，是因為曲率半徑要比內側二號彎道大上許多；經由水車推動流出的水流可明顯發現能量集中在渠道中間(黃色部分)，水流出口處兩側邊界上流速比起渠道中心約有每秒 30 公分左右的落差。

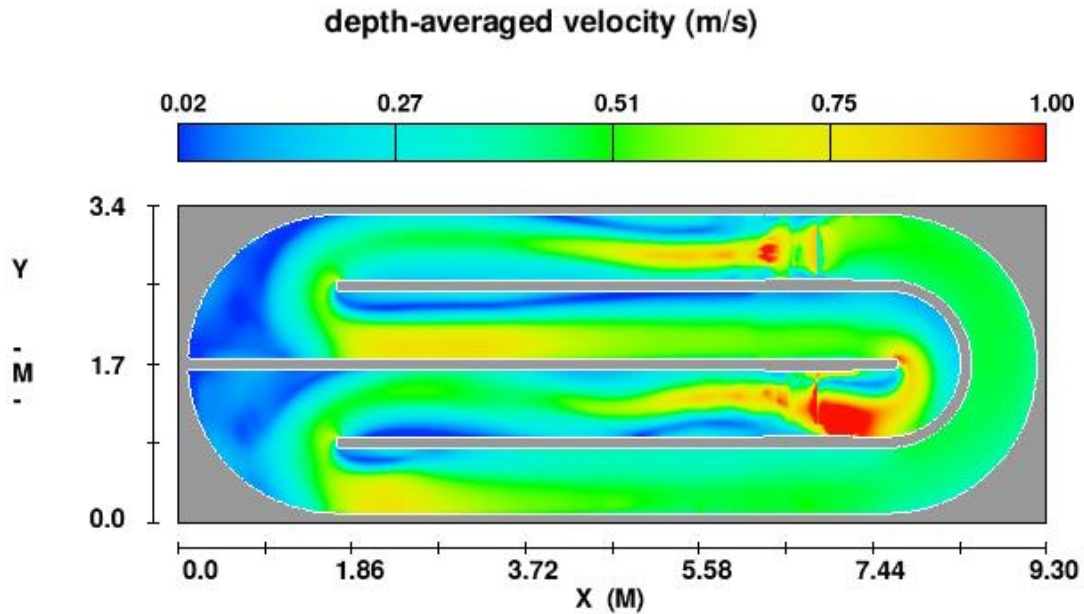


圖 4-3 平均流速分佈

4.1.2 流體粒子徑線

本研究在兩台水車下游三倍水深距離之斷面均勻置入 15 顆密度與水相同之粒子共 30 顆，主要模擬微藻於養殖池內的循環路徑。

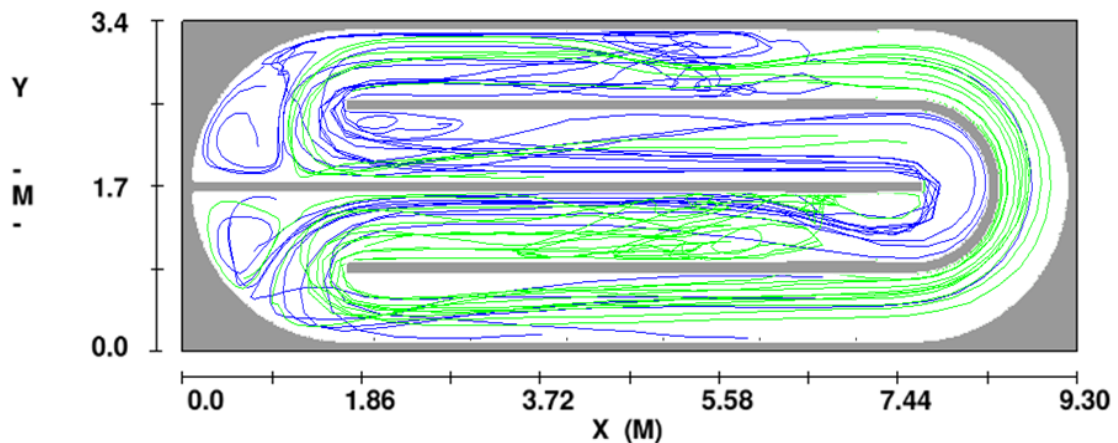


圖 4-4 流場粒子徑線

由圖 4-4 可發現，左半邊一號與三號彎道皆有明顯的渦流產生，此現象容易造成微藻沉澱於該處，形成粒子不易進入的區域。圖 4-4 藍色代表從一號水車下游三倍水深距離處之渠道斷剖面均勻釋出的粒子，而綠色徑線從二號水車下游三倍水深距離處之渠道斷剖面均勻釋出的粒子。分開觀察兩剖面之粒子流動情況如圖 4-5 與圖 4-6 所示：由一號水車釋放出的粒子經過了一號彎道後約有三分之一的粒子滯留在彎道渦流內，而粒子滯留於三號彎道內的數量則略少於一號彎道，二號水車前三倍水深外之距離釋放出的粒子最先通過三號彎道，僅有少數粒子滯留於該處，由此可見三號彎道的粒子循環效果優於一號彎道。於成大水工所跑道式微藻養殖池現場亦發生上述彎道淤積的情形如圖 4-7 與圖 4-8，尤可證明 FLOW-3D 數值模擬具有相當程度的參考價值。

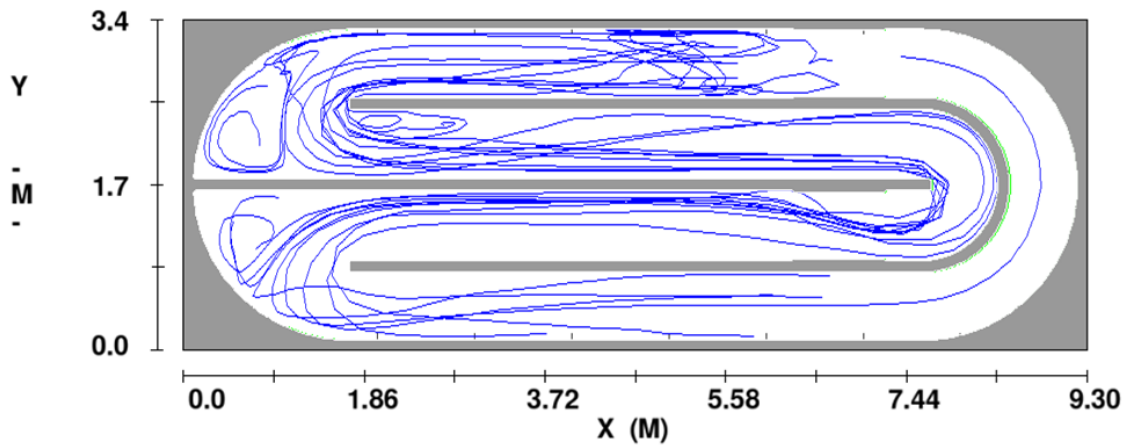


圖 4-5 一號水車流場粒子徑線

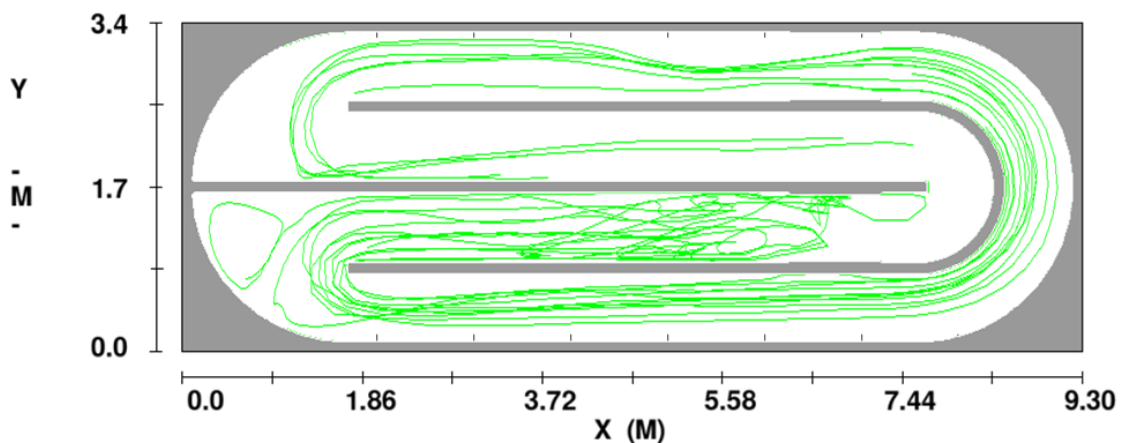


圖 4-6 二號水車流場粒子徑線



圖 4-7 現場一號彎道死水區淤積情形



圖 4-8 現場三號彎道死水區淤積情形



圖 4-9 現場四號彎道淤積情形

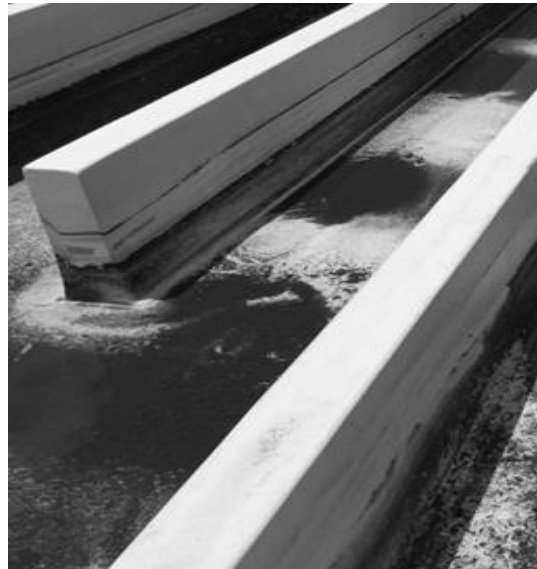


圖 4-10 現場一號彎道淤積情形

4.1.3 自由液面高度

由圖 4-11 可知，該跑道式微藻養殖池的自由液面大致分成三個區域如顏色所示，造成流場具有此一情形歸咎於一號彎道與三號彎道設計不良所致，如 4.1.1 節所示一號彎道設計上的缺陷使得水體更容易堆積於該處，平均水位高度約 22 公分遠高於靜水位 18 公分。二號彎道頭的隔板處出現水位斷面落差，於該處產生的水位斷面落差可能因強烈的渦流現象而產生較大的紊流能量損失。

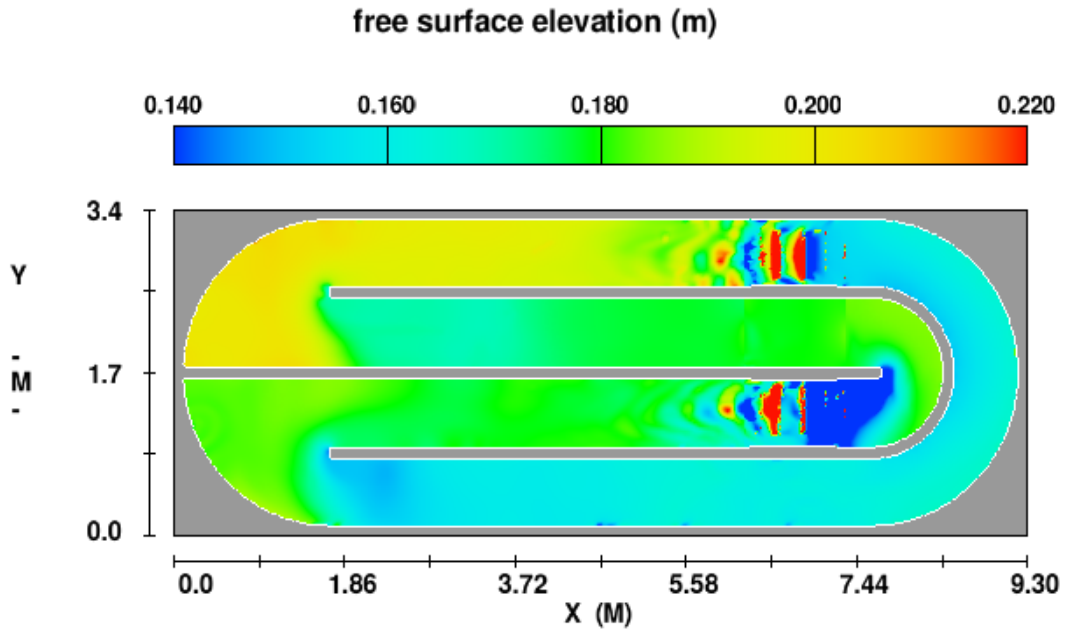


圖 4-11 自由液面高度

4.1.4 水頭損失

根據伯努利(Bernoulli equation)定理，當流體為穩流(Steady flow)、不可壓縮流(Incompressible flow)、無摩擦流(Frictionless flow)且流體沿著流線流動(Flow along a streamline)時，於同一條流線上取任一點代入伯努力流體運動方程式恆等於某一常數，如(4.1)式所示：

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} = Const \quad (4.1)$$

其中 γ 為流體的單位重， $\frac{p}{\gamma}$ 稱為壓力水頭(pressure head)， z 稱為高度水頭(elevation head)， $\frac{V^2}{2g}$ 稱為速度水頭(velocity head)。若流體由斷面 A 流向斷面 B 的過程中有能量損失(黏性摩擦損失) h_{loss} ，則伯努力方程式可改寫成：

$$\frac{p_A}{\gamma} + z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\gamma} + z_B + \frac{V_B^2}{2g} + h_{loss} \quad (4.2)$$

本模擬於渠道內選取 12 個 Y-Z 方向的斷面進行斷面平均總水頭的觀察，斷面位置分佈如圖 4-12 所示，斷面位置及平均總水頭如表 4-2 所示。

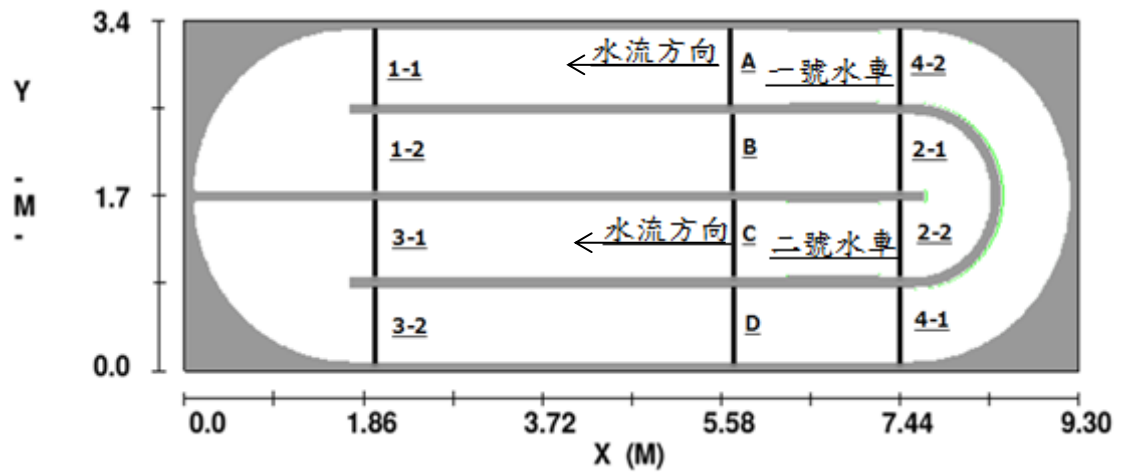


圖 4-12 斷面分佈圖示意圖

表 4-2 斷面位置及斷面平均水頭表

斷面編號	X 軸位置(m)	Y 軸範圍(m)	Z 軸範圍(m)	斷面平均總水頭(m)
1-1	2.087	2.636~3.261	0~0.215	0.20
1-2	2.087	1.804~2.429	0~0.185	0.183
2-1	7.402	1.804~2.429	0~0.185	0.186
2-2	7.402	0.9714~1.596	0~0.155	0.154
3-1	2.087	0.9714~1.596	0~0.185	0.182
3-2	2.087	0.1388~0.7632	0~0.155	0.163
4-1	7.402	0.1388~0.7632	0~0.155	0.165
4-2	7.402	2.636~3.261	0~0.155	0.166
A	5.694	2.636~3.261	0~0.215	0.196
B	5.694	1.804~2.429	0~0.185	0.184
C	5.694	0.9714~1.596	0~0.185	0.182
D	5.694	0.1388~0.7632	0~0.155	0.166

當流體流線有分離現象時(Flow separation)伴隨著產生渦流，渦流擾動(eddy turbulence)通常向下游繼續運動相當長之距離直到受流體黏性阻滯而逐漸消失，渦流發生時將能量轉換成內能存在於流體中造成流體熱含量增加或是逸散至大氣中，因此渦流造成的能量損失稱為「黏性摩擦損失」，於伯努利方程式則歸類為「摩擦損失水頭」。

由表 4-2 可發現水頭損失情形在直線段上微乎其微，如斷面 1-2 至斷面 2-1 與斷面 3-2 至斷面 4-1 發現水頭不僅沒有降低反而微幅增加，此一情形可能是二號彎道發生壅塞造成，但仍然可以證明直線段的水頭損失情況並不劇烈；彎道段如斷面 1-1 至斷面 1-2、斷面 2-1 至斷面 2-2、斷面 3-1 至斷面 3-2 與斷面 4-1 至斷面 4-2 則是有較明顯的水頭損失，其中又以 2 號彎道最為嚴重推測其原因在於該彎道曲率半徑最小，水流急產生較大的紊流。而一號彎道與三號彎道雖然已知其設計不良易造成水體堆積但正因為有體積龐大的靜止水體於彎道邊界上而降低了邊界上的摩擦損失，使得該兩處彎道的損失水頭略少於二號彎道，四號彎道的水頭損失則是最小。

4.1.5 養殖池內的水車能量消耗

當藻水於循環中損失的能量越低則回流至水車後方時，可以推動水車以降低水車能源消耗，當水車以定速運轉時，水車消耗功率則可以表示為： $P = T \times \omega$ 其中 P 為消耗功率(w)， T 為轉軸上扭矩($\frac{N \cdot m}{s}$)可由 FLOW-3D 計算結果取得， ω 為水車轉動角速度($\frac{rad}{s}$)，因此可以藉由水車轉軸上的扭矩($\frac{N \cdot m}{s}$)及已知的水車轉速計算水車的消耗功率，本養殖池各水車消耗功率以下表 4-3 表示。經由表 4-3 可以發現，當水車轉動角速度 $\omega = \pi \frac{rad}{s}(30rpm)$ 時，合計兩水車的總消耗功率達 134.14 w。

表 4-3 水車消耗功率

	一號水車	二號水車
轉軸扭矩(N·m/s)	27.50	15.20
水車消耗功率(w)	86.39	47.75
平均流速(cm/s)	37.80	

4.1.6 小結

由上列 4.1.1 節至 4.1.4 節的分析研究可發現，不管是流體粒子徑線、平均流速分佈、自由液面高度變化或是水頭損失，四號彎道的表現皆優於其他彎道。一號彎道與三號彎道容易因為彎道形狀因素造成環流與流速極低的死區使得藻體易沉澱於該處，而二號彎道則是因為曲率半徑小造成損失水頭較為明顯，由此可知曲率半徑越大的彎道流場表現最好且損失的能量最少；在直線段上的水頭損失雖然極小但是平均流速仍不均勻，部分邊界上的流速仍然偏低，且一號與三號彎道頭的外壁處也有死區的存在。由上述的數值模擬結果歸納該跑道式微藻養殖系統的渠道改善方向為降低死區比例、減少彎道的損失水頭與減緩流速不均勻的現象產生。

4.2 數值模擬設施改善

進行該養殖池渠道的優化先決條件為在跑道池上進行改善且不減少該池的容量，主要的設計重點為保留四號彎道並將原有的一號與三號彎道進行整併，二號彎道可以增加半圓弧型導流板甚至將導流板向外延伸得以引導水流分離削減彎道渦流強度。

根據 Kawisra Sompech (2012)的「Design of raceway ponds for producing microalgae」與諸發超等人(2012 發表的「敞開式跑道池光生物反應器的 CFD 模擬與優化」兩研究論文皆表示於彎道中置入半圓弧型導流是改善彎道流場的最佳方

式，且於同一彎道上放置越多層導流板亦或是將導流板向外延伸至直線段約二分之一跑道池寬度，皆能有效減緩彎道處的摩擦損失、提高平均流速與降低流速死區的面積。



圖 4-13 具半圓弧形導流板的微藻養殖池(Aban Infrastructure Pvt Ltd)

另外，為了改善彎道頭死水區可將該區段的隔板形狀進行調整，依照死區形狀繪製隔板外觀成類似機翼段剖面，將原來滯留於該處的水體排開，如圖 4-14 所示。



圖 4-14 機翼剖面型彎道頭隔板，Neil Savage(Nature 2011)

4.2.1 渠道改良設計

以數值模擬方法研究進行微藻養殖池渠道改善，在不減少水體容量與養殖池整體長寬高的前提下，將微藻養殖池劃分成內外兩池能有效提升藻水循環效率並以下圖 4-15 之設計為雛型，進行養殖池的數值模擬改善工作。

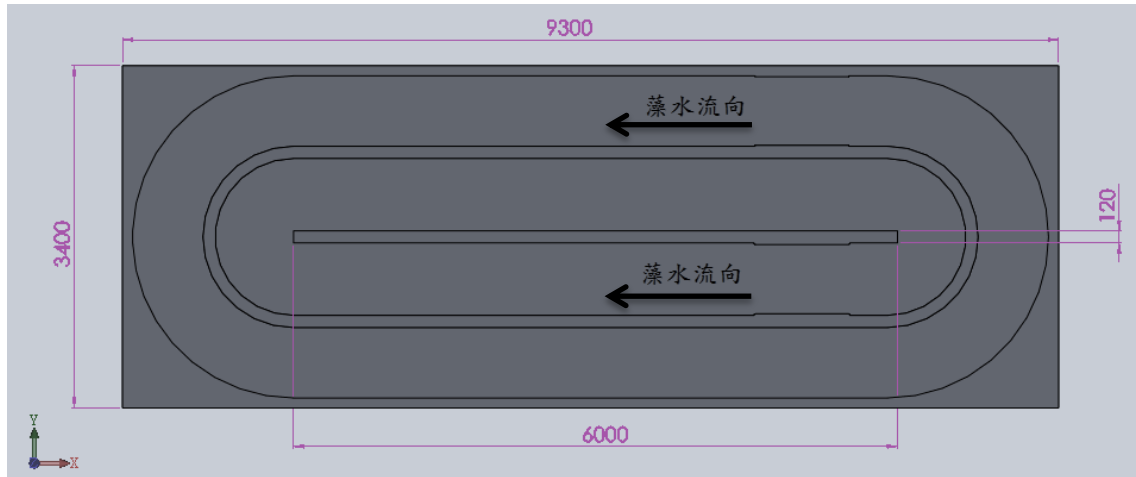


圖 4-15 改良設計雛型(T-1 型)(單位:mm)

圖 4-15 為養殖池渠道設計改良的雛型，本研究稱為 T-1 型養殖池。主要結構為內外兩池之設計，內池水體順時針循環，而外池水體則逆時針循環，可直接沿用舊有之水車且不需調整裝設位置，各渠道寬度、隔板厚度及整體可容納之藻水體積皆與原型相同；模擬改善工作以 T-1 型為主要設計，另外增設半圓型導流板、延伸導流翼或加入機翼頗面型之彎道頭隔板進行後續模擬，如圖 4-12 與表 4-2 選定各斷面觀察水頭損失情形。本研究之各類型養殖池渠道設計及簡稱如下。

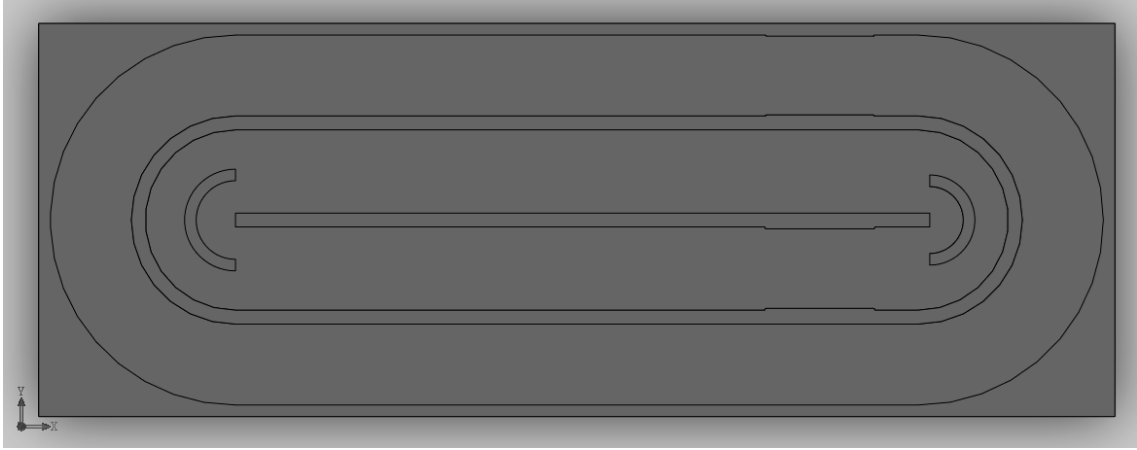


圖 4-16 T-2 型改良設計



圖 4-17 T-3 型改良設計

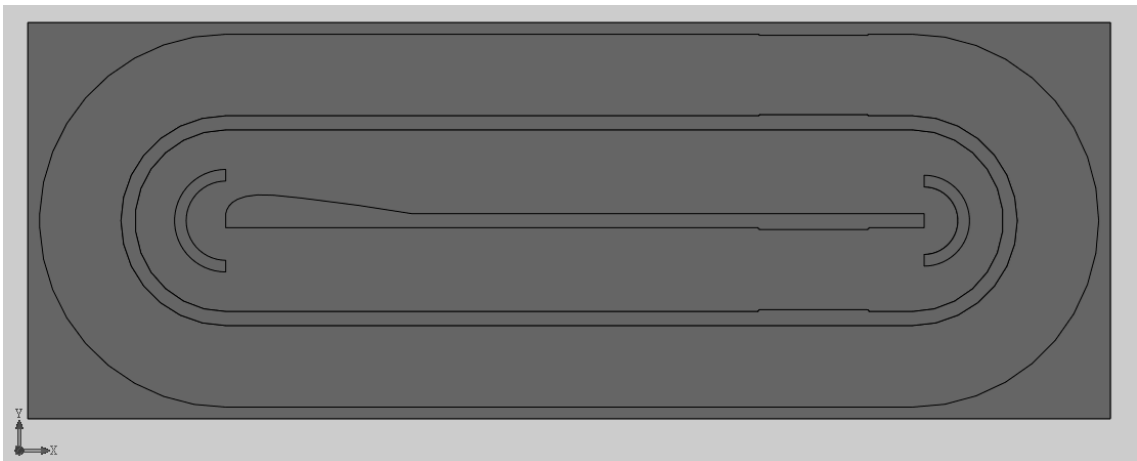


圖 4-18 T-4 型改良設計

上列設計之 T-2 型為半圓弧型導流板設計，T-3 型為參考諸(2012)等人之設計規範，增設半圓弧型導流板並且在迎流處向外延伸導流板長度約二分之一跑道池寬。T-4 則是根據 Nature OUTLOOK (2011)發表的專題圖示上，將跑道頭外側隔板做適型設計排開死水區域；進行模擬的各項設定條件如：靜水位高度、流體溫度與物理性質、水車轉速與設置位置、網格數量與邊界條件、紊流模式等設定皆完全與第三章所示之各項設定相同。

4.2.2 數值模擬結果

(1) 平均流速分佈

圖 4-19 為 T-1 型渠道設計之平均流速分佈圖，可發現外池流體除了水車出流處附近邊界上的流速度分佈落差較為明顯外，整體流速均勻。觀察內池流況發現極不均勻的彎道流速分佈，且伴隨著產生流速偏低的死區。

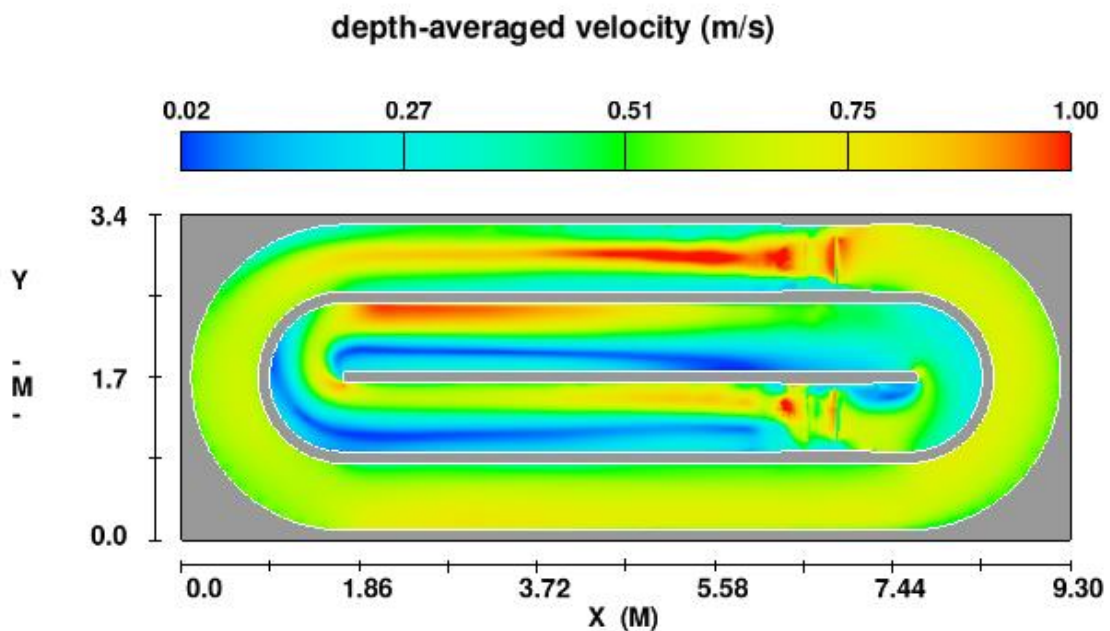


圖 4-19 T-1 型平均流速分佈

下圖 4-20 為 T-2 型平均流速分佈圖，可發現於內池彎道中心增設半圓弧型導流板後，彎道處的流速分佈較為均勻且深藍色的死區比例降低許多。

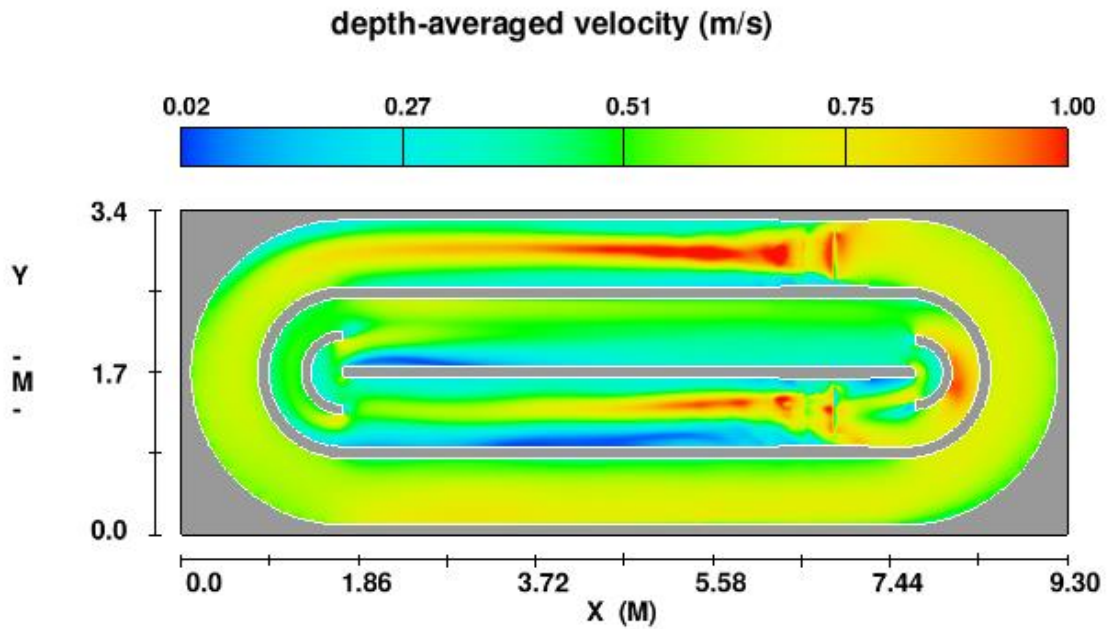


圖 4-20 T-2 型平均流速分佈

下圖 4-21 為 T-3 型平均流速分佈圖，內池半圓弧型導流板在彎道迎流處向外伸長二分之一內池寬度。雖然諸(2012)等人之研究表示該設計有效降低死區產生，但是相對 T-2 型設計並無明顯差異。

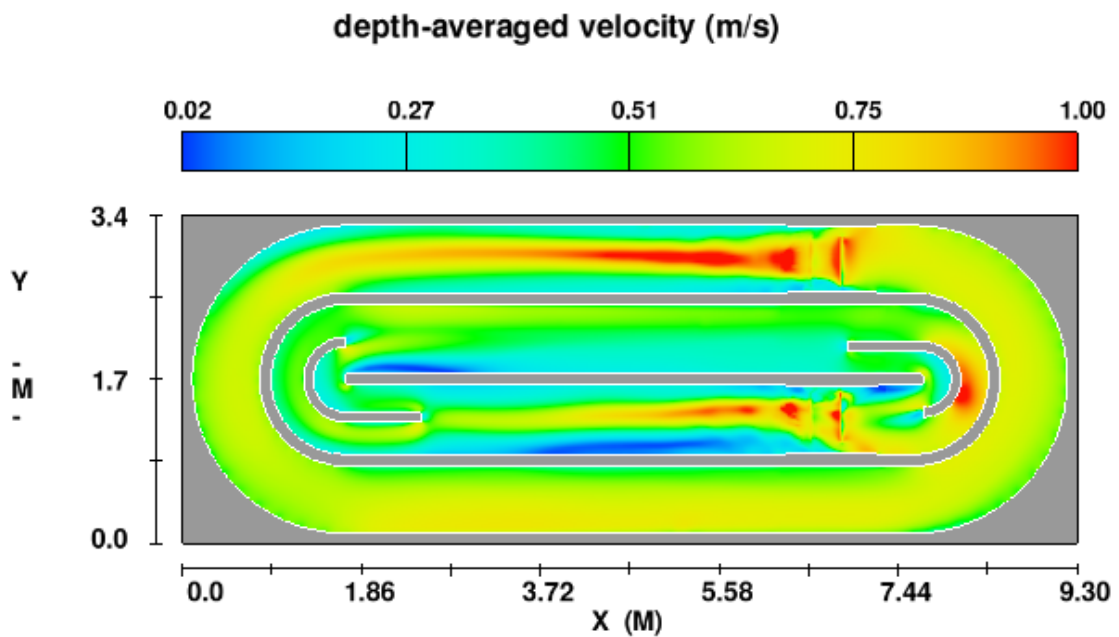


圖 4-21 T-3 型平均流速分佈

圖 4-22 為 T-4 型平均流速分佈圖，內池的彎道頭隔板附近針對流速偏低的死區增加了適型設計，與 T-2 型設計比較明顯發現深藍色的死區完全在該區域消失。

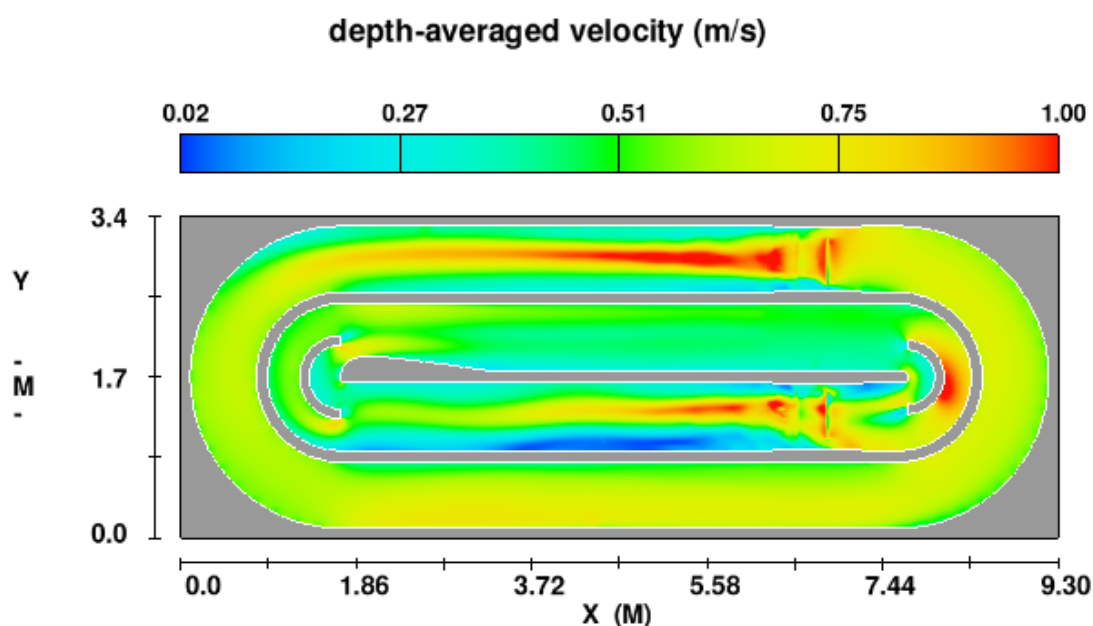


圖 4-22 T-4 型平均流速分佈

經由以上各圖之比較，可發現於內池彎道中加入半圓弧型的導流板確實有助於改善彎道區域流速不均勻的問題，但是將導流板向外延伸的設計於該養殖池並無明顯效果，而在彎道死區發生的位置增加適型的設計有效控制死區產生讓該區流場更均勻；外池除了水車出流處邊界上有速度落差，其餘部分流速分佈均勻。

(2) 流體粒子徑線

圖 4-23 為 T-1 型流體粒子徑線圖，可發現外池流場的表現依然優異幾乎沒有流體粒子未曾進入的區域。內池流場則發現兩彎道頭的隔板皆有不小的機翼剖面型區域流體粒子不易進入，容易造成該處水體循環不佳導致藻體沉澱，且彎道邊界上的流體粒子徑線表現也不佳；水車出流區的粒子徑線略為混亂，推測為水車葉片對水體作用的方式使部分在邊界上的粒子因慣性作用先向後移動一段距離後再順著渠道中央的水流向前移動。

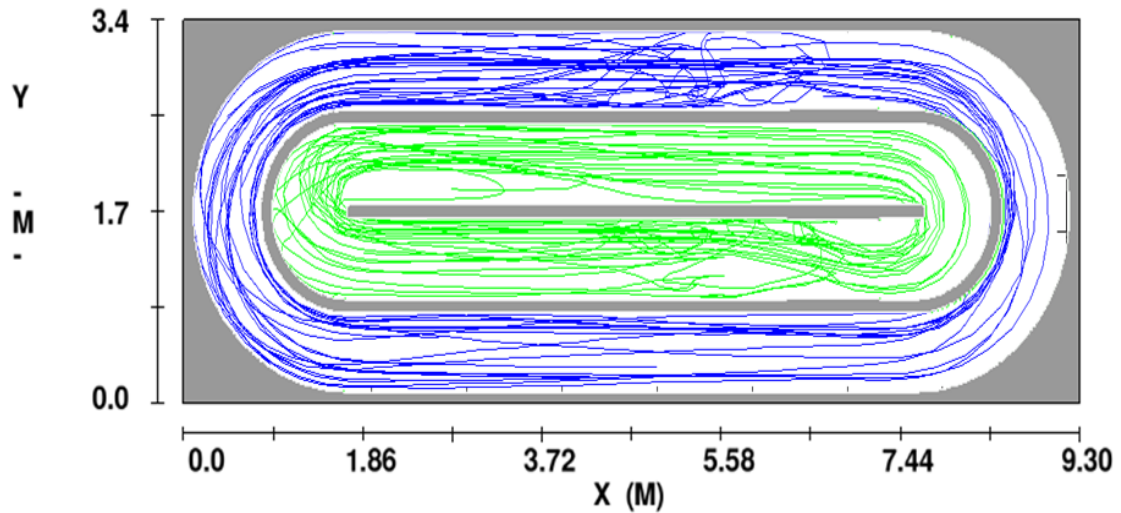


圖 4-23 T-1 型流體粒子徑線

圖 4-24 為 T-2 型流體粒子徑線圖，與圖 4-23 比較發現增設半圓弧型的導流板後，內池兩彎道頭隔板處的機翼頗面型空白處明顯縮小，雖然整體流體粒子的徑線更為均勻，但是內池多數流體粒子皆經由外側的 U 字型彎道通過彎道區。

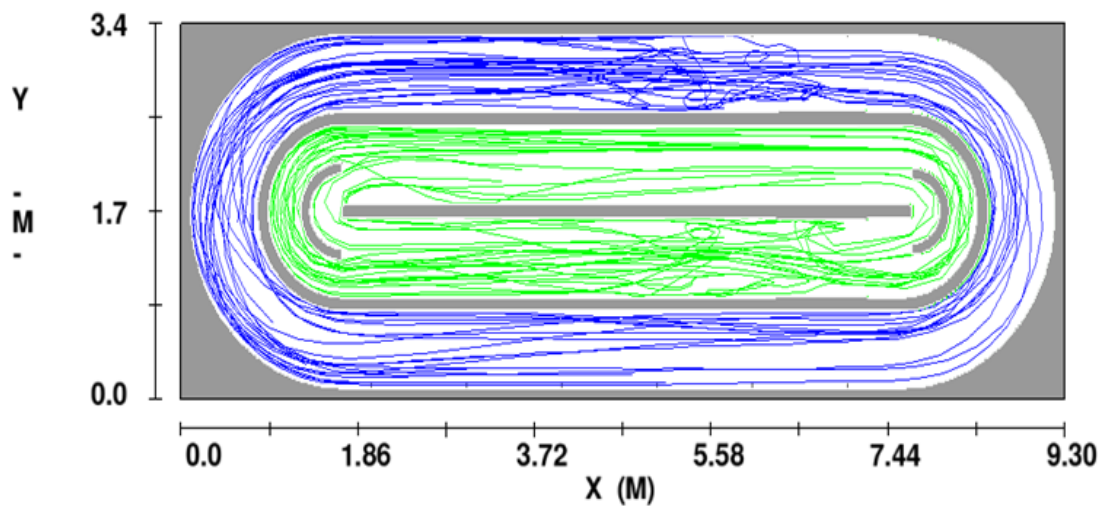


圖 4-24 T-2 型流體粒子徑線

圖 4-25 為 T-3 型流體粒子徑線圖，內池增設向外延伸的導流板後與圖 4-24 比較發現流體粒子於通過彎道時均勻分佈在導流板內外兩側的彎道上，顯示增加向外延伸的導流板有助於提升粒子循環的效率與粒子徑線的均勻度，但是內池兩彎道頭隔板處的機翼頗面型空白處依然存在。

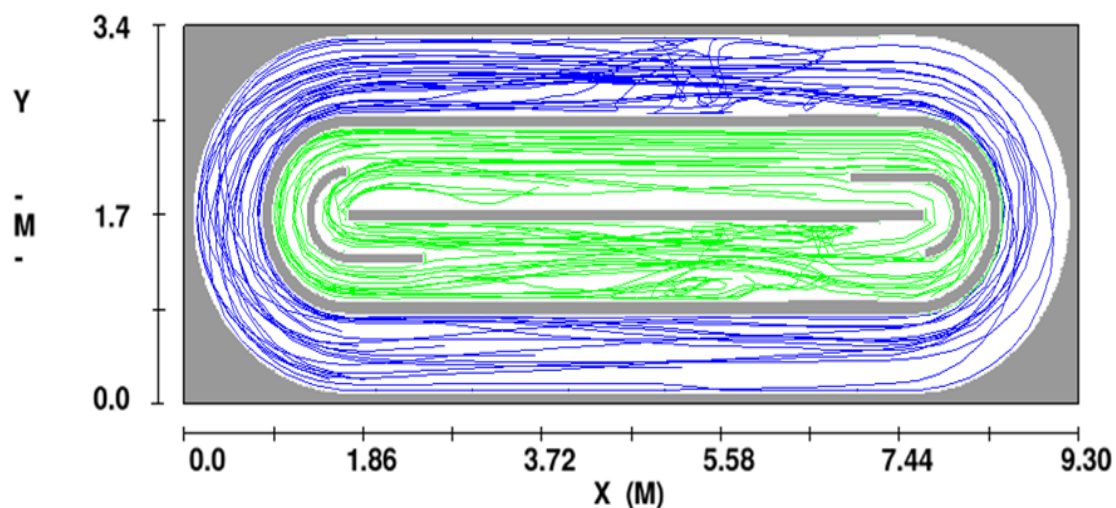


圖 4-25 T-3 型流體粒子徑線

圖 4-26 為 T-4 型流體粒子徑線圖，該設計於內池彎道頭隔板外側按圖 4-25 的彎道頭空白處做適型設計並且保流半圓弧型導流板，可明顯發現左側彎道頭的隔板處已無流體粒子循環不佳的空白區域。雖然導流板未向外延伸但是流體粒子依然如同圖 4-25 一樣均勻的通過彎道，可證明於彎道頭隔板的適型設計可讓水體粒子均勻通過彎道且消除彎道頭水體粒子循環不佳的區域。

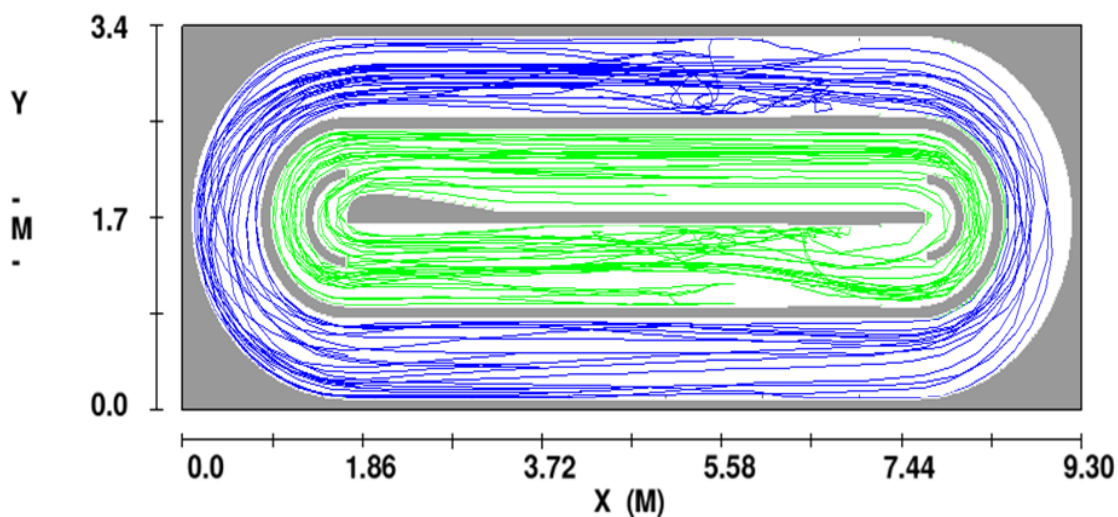


圖 4-26 T-4 型流體粒子徑線

由以上各圖可了解於彎道中增設半圓弧型導流板確實有效改善內池彎道的徑線集中情形，但多數粒子反而經由導流板外側通過彎道，雖然延長導流板有助粒

子均勻通過彎道但仍然無法消除彎道頭粒子循環不佳的空白處。而圖 4-26 T-4 型養殖池針對該處彎道流場的適型設計不僅可以促使流體粒子徑線均勻分佈在彎道上且原有的空白處粒子循環不佳的區域也隨之消失。

(3)自由液面高度

圖 4-27 為 T-1 型自由液面高度分佈圖，由於離心力作用的關係彎道外側邊界的自由液面高度普遍高於其他區段，水體在左側第一個彎道邊界上的堆積效果比右側第二個彎道嚴重，內池彎道更有明顯的橫向自由液面高度落差，而自由液面落差越大越容易在斷面處產生更大的紊流能量損失。由此可知，曲率半徑越小的彎道自由液面高度落差會越顯著，能量損失也會更明顯。

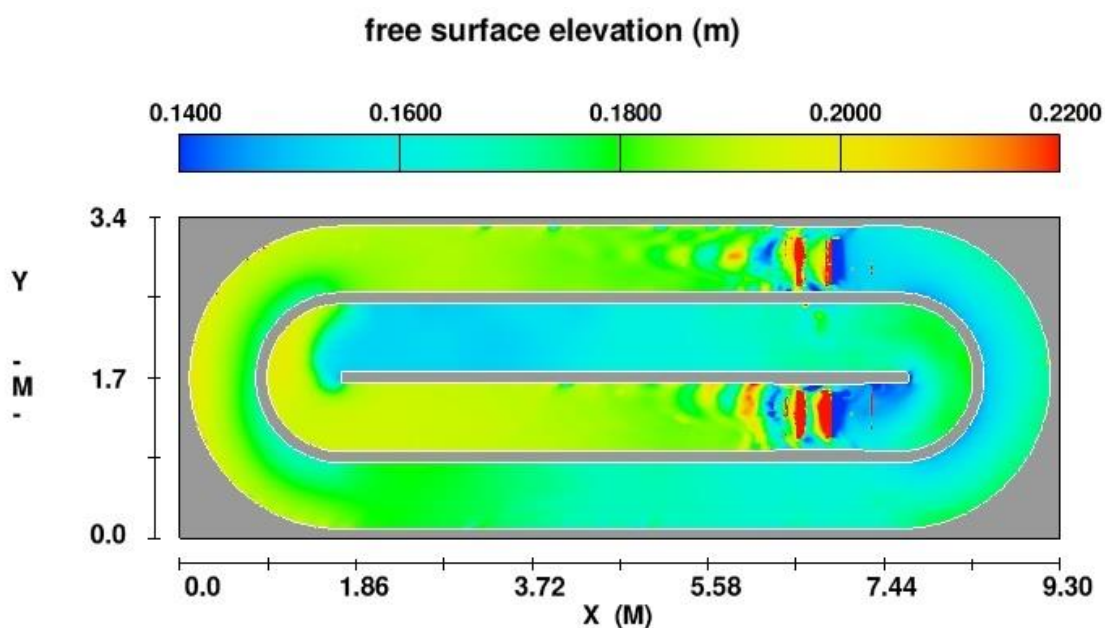


圖 4-27 T-1 型自由液面高度分佈

圖 4-28 為 T-2 型自由液面高度分佈圖，增設半圓弧型導流板大幅改善了內池彎道的橫向自由液面落差，也促使內池自由液面高度分佈較均勻且自由液面與靜水位高度(0.18m)落差縮小。但是水車後方的自由液面高度依然低於靜水位高度，推測原因有二：當水流由造流水車流出後在第一個彎道外側邊界上堆積，而使得回流到水車後方第二個彎道上的水體變少降低了自由液面高度；同時內池水車將水向前推動空出部分空間，而造成如水車後方的自由液面高度低於靜水位高度。

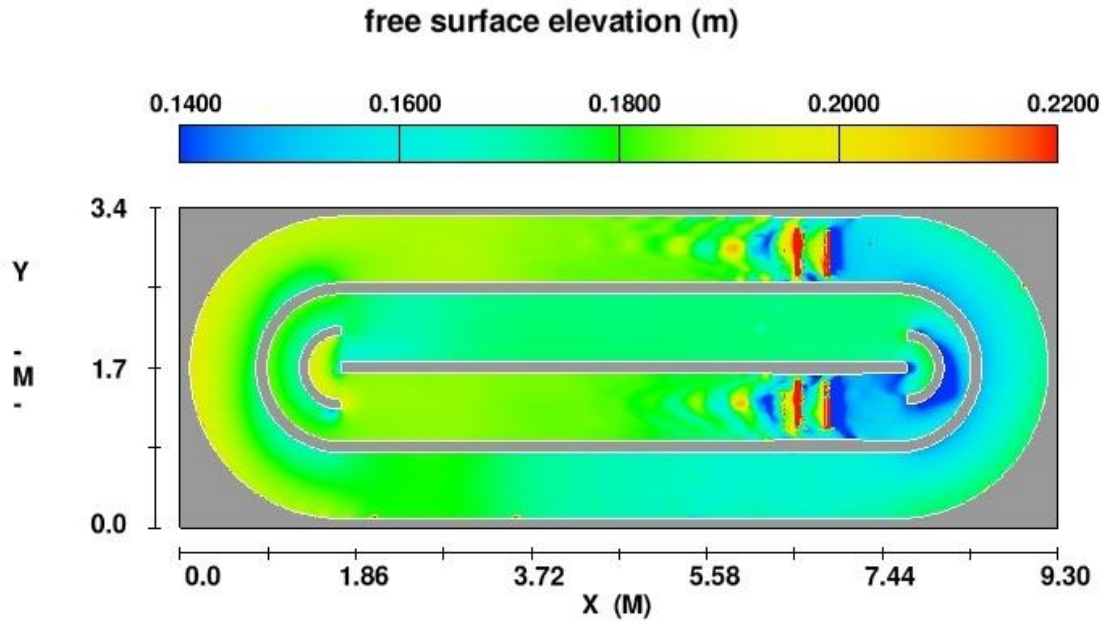


圖 4-28 T-2 型自由液面高度分佈

圖 4-29 為 T-3 型自由液面分佈圖，其自由液面高度的分佈情形幾乎與圖 4-28 相仿，這顯示於內池彎道迎流處向外延長導流板對於降低整體自由液面高度的落差並無明顯成效，多數水體依然容易堆積在左側彎道邊界上且外池的 U 型彎道也有相同情形。

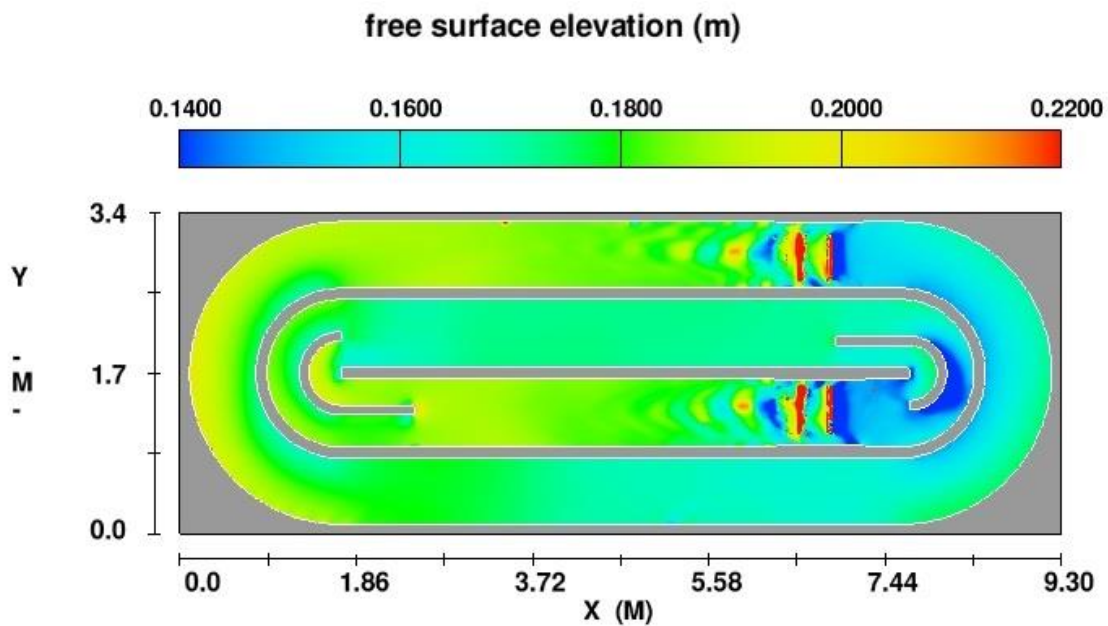


圖 4-29 T-3 型自由液面高度分佈

圖 4-30 為 T-4 型自由液面分佈圖，整體自由液面高度分佈情形與圖 4-29 或圖 4-28 類似，內池彎道頭隔板的適型設計也無助於改善彎道外側邊界的水體堆積情形。這顯示彎道邊界上的水體堆積是無可避免的現象，之後進行其他的跑道式微藻養殖池設計時應該盡量提高彎道的曲率半徑或是提高養殖池的長寬比。

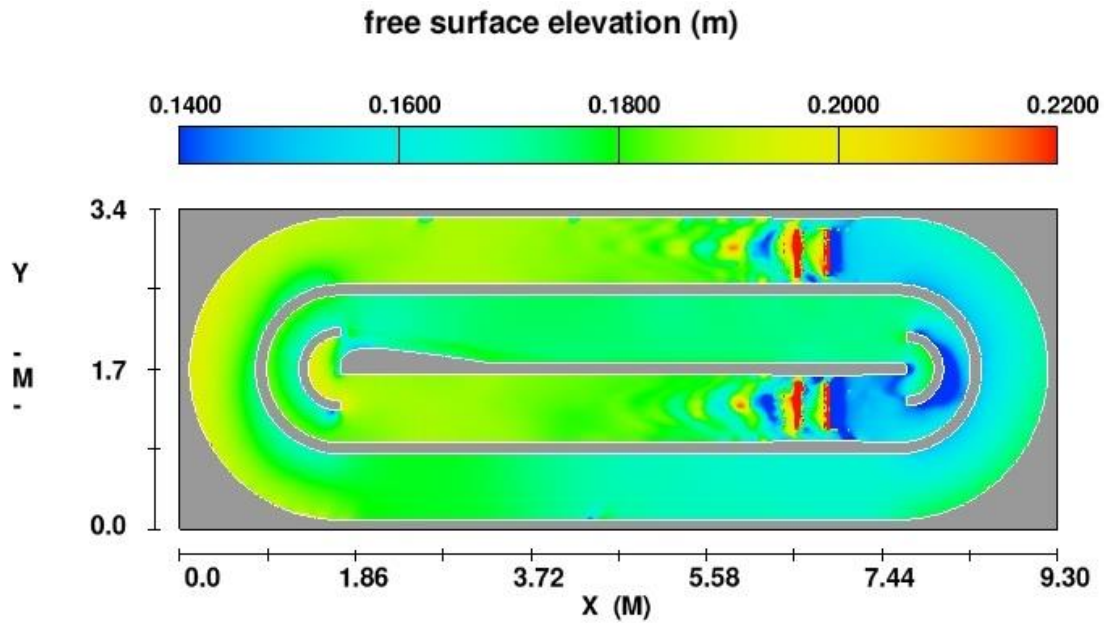


圖 4-30 T-4 型自由液面高度分佈

總結以上各圖之比較可歸納幾點結論：於內池彎道增設半圓弧型導流板有助於降低該處的橫向自由液面落差減緩紊流產生的損失，但是彎道外側邊界上的水位堆積仍然明顯且即使將迎流處導流板向外延伸或是彎道頭隔板做適型設計皆無法有效改善。彎道水位堆積的現象主要是受離心力影響，造成彎道斷面上外側水位高於內側水位，進而可能影響彎道出口的斷面平均水頭。

(4) 斷面平均總水頭

由圖 4-31 與表 4-4 之比較可發現，外池的平均總水頭落差於斷面 2-4 到斷面 2-6 較為明顯，但是水車前斷面 2-1 與水車後斷面 2-6 平均總水頭落差僅 0.024m。而內池水車前斷面 1-1 與水車後斷面 1-6 間的平均總水頭落差達 0.032m；綜觀以上敘述與數據資料可發現，內池的損失水頭較外池增加約 50%，且回流到水車後面的水體攜帶的能量越多則水車定速運轉時所需要的能量越少，即內池水車平均每

秒消耗的功率會大於外池水車。另外，流體會在彎道上造成較多的水頭損失，而直線段的水頭損失微乎其微，因此，思考如何降低彎道上的水頭損失為跑道式微藻養殖池最重要的課題。

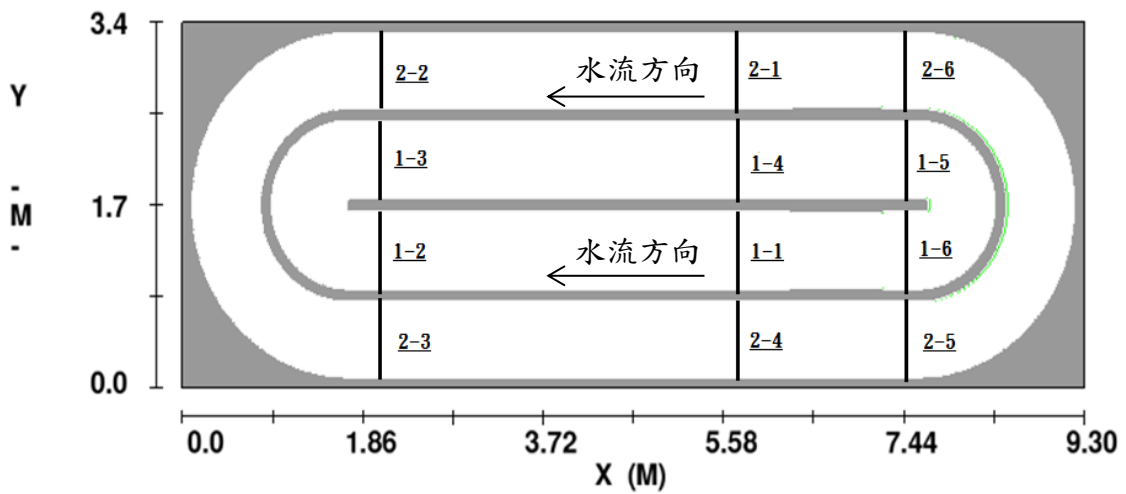


圖 4-31 T-1 型斷面分佈示意圖

表 4-4 T-1 型斷面位置及斷面平均水頭表

斷面編號	X 軸位置(m)	Y 軸範圍(m)	斷面平均總水頭(m)
1-1	5.694	0.9714~1.596	0.195
1-2	2.087	0.9714~1.596	0.200
1-3	2.087	1.804~2.429	0.173
1-4	5.694	1.804~2.429	0.173
1-5	7.402	1.804~2.429	0.179
1-6	7.402	0.9714~1.596	0.163
2-1	5.694	2.636~3.261	0.200
2-2	2.087	2.636~3.261	0.207
2-3	2.087	0.1388~0.7632	0.200
2-4	5.694	0.1388~0.7632	0.188
2-5	7.402	0.1388~0.7632	0.188
2-6	7.402	2.636~3.261	0.176

由下圖 4-32 與表 4-5 可發現內池彎道出入口間的損失水頭明顯降低，且內池水車前後的斷面水頭落差縮到至 0.022 m。即可證明，增設導流板有助於降低彎道的摩擦損失水頭。

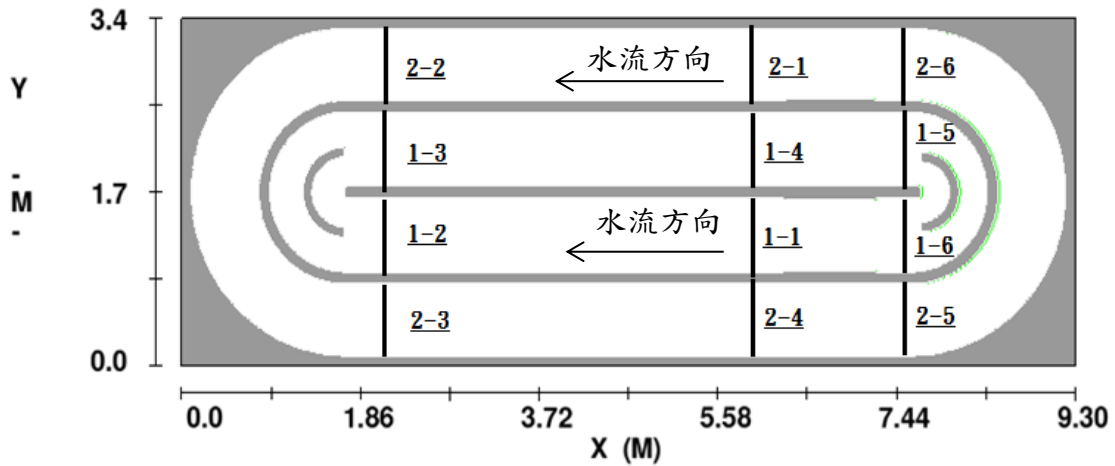


圖 4-32 T-2 型斷面分佈示意圖

表 4-5 T-2 型斷面位置及斷面平均水頭表

斷面編號	X 軸位置(m)	Y 軸範圍(m)	斷面平均水頭(m)
1-1	5.694	0.9714~1.596	0.195
1-2	2.087	0.9714~1.596	0.196
1-3	2.087	1.804~2.429	0.184
1-4	5.694	1.804~2.429	0.185
1-5	7.402	1.804~2.429	0.184
1-6	7.402	0.9714~1.596	0.173
2-1	5.694	2.636~3.261	0.200
2-2	2.087	2.636~3.261	0.208
2-3	2.087	0.1388~0.7632	0.200
2-4	5.694	0.1388~0.7632	0.188
2-5	7.402	0.1388~0.7632	0.187
2-6	7.402	2.636~3.261	0.176

經由下圖 4-33 與表 4-6 可發現與 T-2 型比較，將導流板向外延伸可降低內池彎道的損失水頭達 50%以上，且內池水車前後的斷面水頭落差僅有 0.019 m。

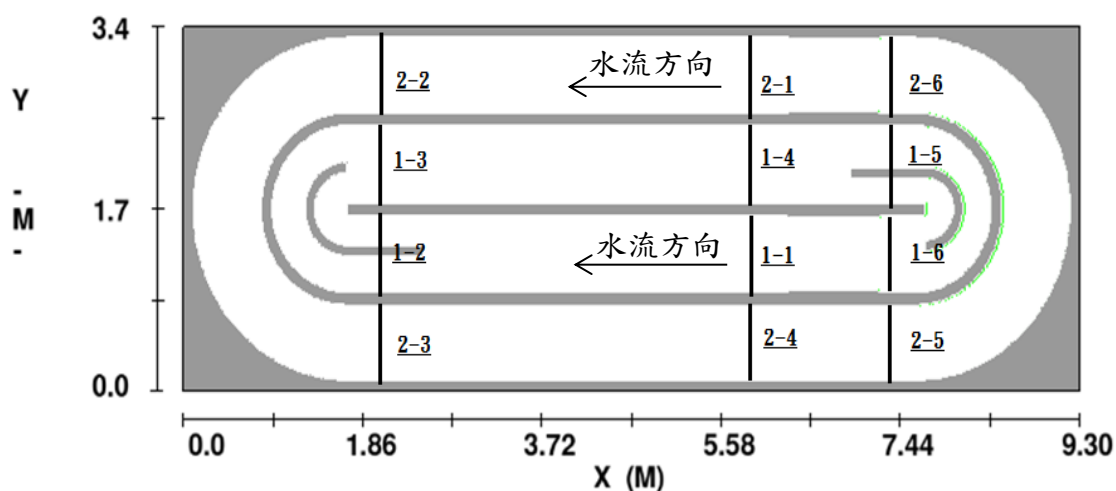


圖 4-33 T-3 型斷面分佈示意圖

表 4-6 T-3 型斷面位置及斷面平均水頭表

斷面編號	X 軸位置(m)	Y 軸範圍(m)	斷面平均總水頭(m)
1-1	5.694	0.9714~1.596	0.185
1-2	2.087	0.9714~1.596	0.186
1-3	2.087	1.804~2.429	0.183
1-4	5.694	1.804~2.429	0.182
1-5	7.402	1.804~2.429	0.171
1-6	7.402	0.9714~1.596	0.166
2-1	5.694	2.636~3.261	0.200
2-2	2.087	2.636~3.261	0.208
2-3	2.087	0.1388~0.7632	0.200
2-4	5.694	0.1388~0.7632	0.189
2-5	7.402	0.1388~0.7632	0.188
2-6	7.402	2.636~3.261	0.176

由下圖 4-34 與表 4-7 可發現，當內池左側彎道頭隔板為機翼頗面型設計時，該彎道的損失水頭與 T-3 型比較時稍微增加，但與 T-2 型比較時則改善許多。T-4 型的設計讓死區消失，水車前後的斷面水頭落差更僅有 0.017 m。

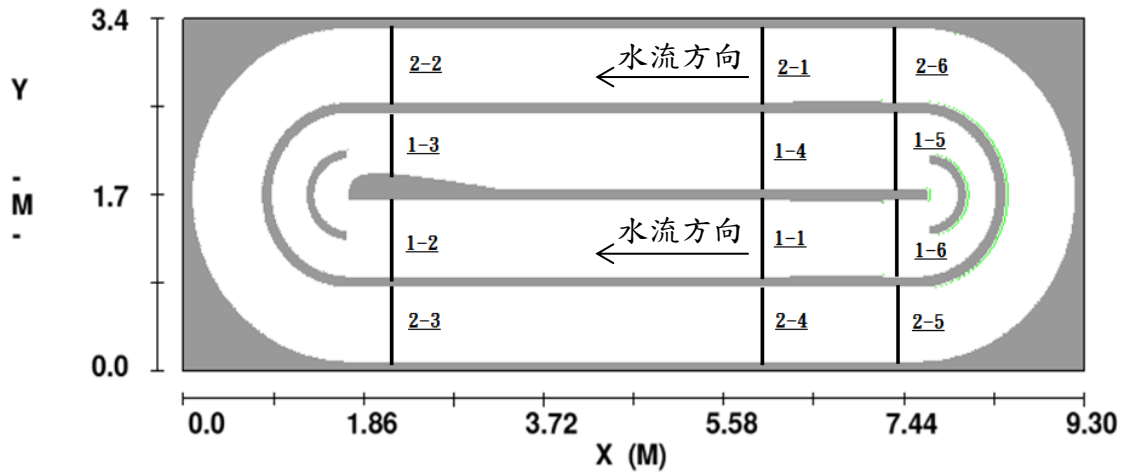


圖 4-34 T-4 型斷面分佈示意圖

表 4-7 T-4 型斷面位置及斷面平均水頭表

斷面編號	X 軸位置(m)	Y 軸範圍(m)	斷面平均總水頭(m)
1-1	5.694	0.9714~1.596	0.185
1-2	2.087	0.9714~1.596	0.187
1-3	2.087	1.804~2.429	0.181
1-4	5.694	1.804~2.429	0.181
1-5	7.402	1.804~2.429	0.180
1-6	7.402	0.9714~1.596	0.168
2-1	5.694	2.636~3.261	0.200
2-2	2.087	2.636~3.261	0.208
2-3	2.087	0.1388~0.7632	0.195
2-4	5.694	0.1388~0.7632	0.184
2-5	7.402	0.1388~0.7632	0.183
2-6	7.402	2.636~3.261	0.176

(5) 養殖池內的水車能源消耗

已知養殖池內的水體於循環時流速衰減越少則回流至水車後方時更能順勢推動水車而減少水車消耗功率，經由比較水車之能源消耗可以直接比較何種養殖池的設計最能有效提供藻水優異的循環並且降低紊流能量損失。已知當水車以定速 30 rpm 運轉時，水車消耗功率則可以表示為： $P = T \times \omega$

其中P 為消耗功率(w)，T 為轉軸上扭矩($\frac{N \cdot m}{s}$)， ω 為水車轉動角速度($\frac{rad}{s}$)，因此可以藉由水車轉軸上的扭矩($\frac{N \cdot m}{s}$)計算水車的消耗功率，當水車轉動角速度 $\omega = \pi \frac{rad}{s}(30rpm)$ 時，各養殖池設計之平均流速與水車消耗功率如下表 4-8 及表 4-9 所示：

表 4-8 各養殖池平均流速

養殖池編號	T-1	T-2	T-3	T-4
平均流速(cm/s)	45.60	47.30	47.20	47.40

表 4-9 各養殖池水車消耗功率比較表

養殖池邊號	T-1 型內池	T-2 型內池	T-3 型內池	T-4 型內池	外池
轉軸扭矩(N·m/s)	27.10	17.90	15.80	16.50	17.0
水車消耗功率(w)	85.14	56.23	49.64	51.84	53.41

由表 4-7 可以發現，T-1 型設計確實造成水車的消耗功率明顯較多，T-3 型設計的養殖池其內池水車消耗功率最低，但是與 T-4 型內池水車差距不多。由此可證明於彎道處進行相關的導流設計絕對有助於降低藻水能量衰減，T-3 型設計與 T-4 型設計在水車消耗功率的表現相當，合計內外池水車的總消耗功率可降低至 103 w 到 105.3 w 間。

4.2.3 小結

藻類養殖必須避免發生藻體沉澱或堆積的情況發生，故設計跑道式微藻養殖池應要盡量避免藻水循環時產生過大的死區而讓藻體有機會沉澱堆積於該處。

經由上列各種設計上的模擬可以發現死區面積較大的彎道雖然容易讓藻體沉澱於該處，但是損失水頭卻比較小相對水車耗能也較少，而幾乎沒有死區的彎道雖然邊界上的摩擦損失水頭稍為大了一點，卻可以有效且均勻的讓藻體循環通過。如比較 T-2 型與 T-4 型在內池左側彎道的設計，可發現 T-4 型在左側彎道上只稍微比 T-2 型多一點摩擦損失水頭，但是整體循環的均勻度與死區比例都表現的非常良好。內池右側彎道受到水車位置的影響無法如左側彎道設計上靈活，故於該彎道設計半圓弧型導流板較能兼顧流體粒子徑線分佈的均勻度與減少彎道摩擦損失水頭；設計良好的跑道式養殖池能提高藻水的平均流速達 25.39%，減少水車能源消耗約 22%，經由本研究之數值模擬結果綜合各項流場數據與水車消耗功率分析並進行討論比較，認為 T-4 型跑道式養殖池設計為最佳改善方案。

4.3 造流水車效率

如欲藉由跑道式微藻養殖系統進行替代能源的運用與商業生產，必須提高系統能源運用效率。跑道式微藻養殖系統的水體循環動能皆來自於造流水車，故造流水車的運轉效率直接影響了整個系統的商業價值，目前大多數的跑道式微藻養殖系統都是改良自傳統的魚池瀑氣水車進行藻水循環的工作。此種型式的造流水車是否具有能源使用效率目前並無直接研究，根據文獻記載目前常用於微藻養殖系統的造流水車其型式上可以歸類為「定槳明輪」，即兩百年前用於「輪船」上的推進系統。定槳明輪因為運行轉速低與推進效率不佳早已在主流航運界淘汰，但其構造簡單製作容易卻成為微藻養殖系統最主要的流體動能來源。

本節將以成功大學微藻培養系統的造流水車為主軸，探討該造流設備的運行效率與使用情況並提供改善之建議。

4.3.1 設備說明

成功大學微藻養殖系統之造流水車翼展長為 92 公分，主要由八個扇葉構成每片扇葉長 12 公分寬 52 公分厚 1.5 公分，均勻分佈在不鏽鋼構成的鋼圈圓周上，轉軸距離池底 53 公分葉片最小離底間距 7 公分。



圖 4-35 成大微藻培養系統造流水車(晉弘強化塑膠公司)

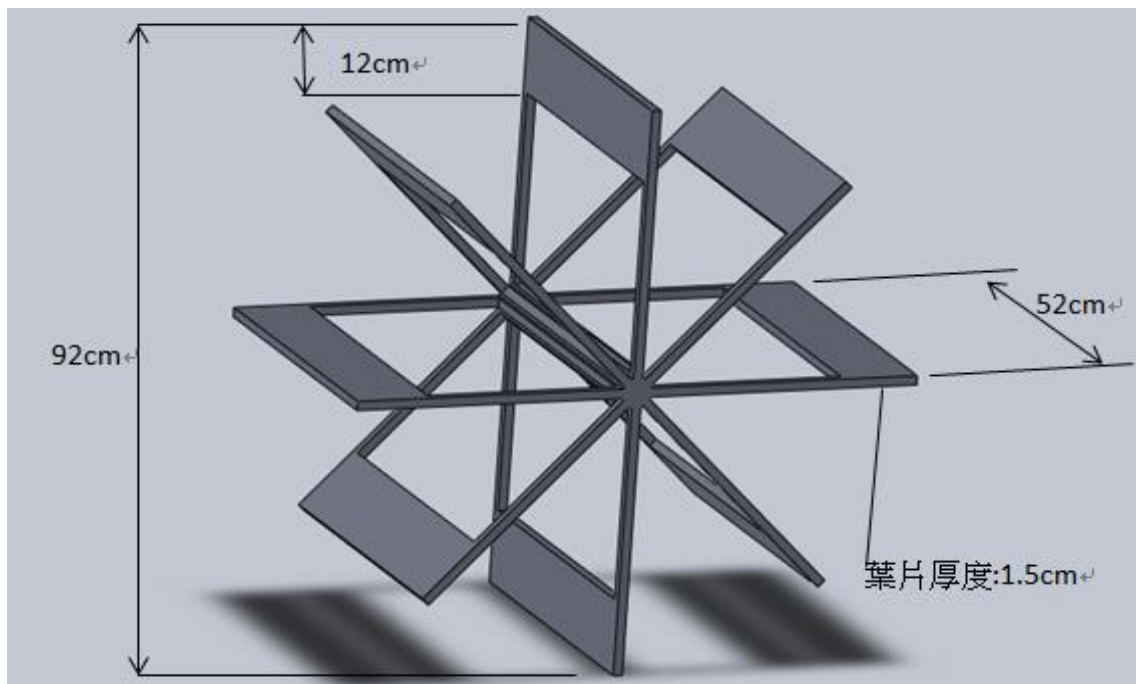


圖 4-36 水車規格示意圖

4.3.2 跑道式微藻培養系統水車效率計算

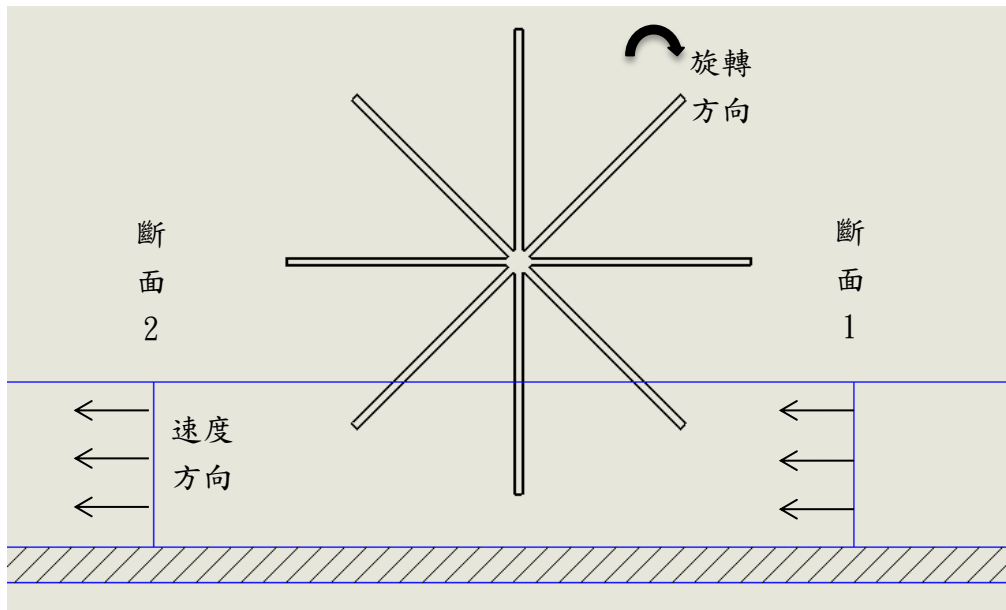


圖 4-37 流體流過一控制體積

如圖 4-37 所示，當一控制體積中具有能量損失與機械能做功時，伯努利方程式可以改寫成能量公式：

$$\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 - \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = h_s - h_L = \Delta h \quad (4.4)$$

其中 $\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$ 為流出控制體積斷面 2 的平均總水頭(m)， $\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1$ 流入控制體積斷面 1 的平均總水頭(m)， h_s 為控制體積內機械做功產生的能量水頭(m)， h_L 控制體積內包含各種型式上的總損失水頭(m)。

將(4.4)式乘以重力加速度 $g(\text{m/s}^2)$ 與質量流率 $\dot{m}(\text{kg/s})$ 即為控制體積的能量守恆方程式：

$$\left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 - \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right) \dot{m}g = \Delta \dot{E} = P_{out} \quad (4.5)$$

微藻養殖系統模擬中取一號水車前斷面 A(即斷面 2)至水車後斷面 4-2(即斷面 1)為一控制體積，並透過能量守恆方程式計算水車輸入控制體積內的功率。

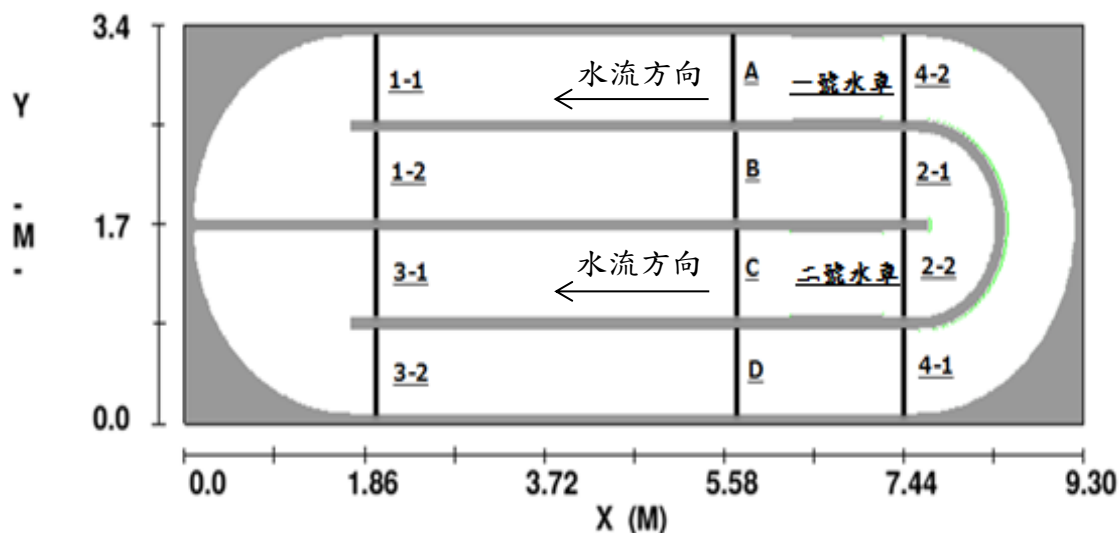


圖 4-38 斷面及水車分佈示意圖

FLOW-3D 計算結果已知斷面 A 上的平均總水頭為 0.196m，斷面 4-2 上的平均總水頭為 0.166m，控制體積內質量流率 $\dot{m} = 51.40 \frac{kg}{s}$ ，帶入(4.5)式得控制體增加的功率 $P_{out} = 15.16w$ 。

經由 FLOW-3D 擷取水車轉軸方向上的扭力可推算水車轉動時所需的能量，即 $P = T \times \omega$ ，P 為消耗功率(w)，T 為轉軸上扭矩($\frac{N \cdot m}{s}$)， ω 為水車轉動角速度($\frac{rad}{s}$)；已知一號水車轉軸上平均扭矩為 $25.1 \frac{N \cdot m}{s}$ ，水車轉動角速度為 $\pi \frac{rad}{s}$ ，且代入 $P = T \times \omega$ 中即可得水車輸入功率 $P_{in} = 78.85w$ 。

已知能量轉換效率百分比 $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$ ，則本數值模擬之水車能量轉換效率百分比 $\eta = \frac{15.16}{78.85} \times 100\% = 19.23\%$ 。經由上列各式計算即可了解目前廣泛運用於跑道式微藻養殖系統之水車，能源轉換效率不佳故不利於日後的商業性養殖。

推測其能源轉換效率過低的問題可能在於葉片出水與入水的角度，如圖 4-39 及圖 4-40 所示，造成水位在短時間內被抬升並對水車做負功，迫使定速運轉的水車必須輸出更多能量以維持正常轉速。另外，被水車抬升的水體多數溢流至葉片後方，且因水車葉片離水底有 7 cm 距離，此空間之水體發現會向後流動。

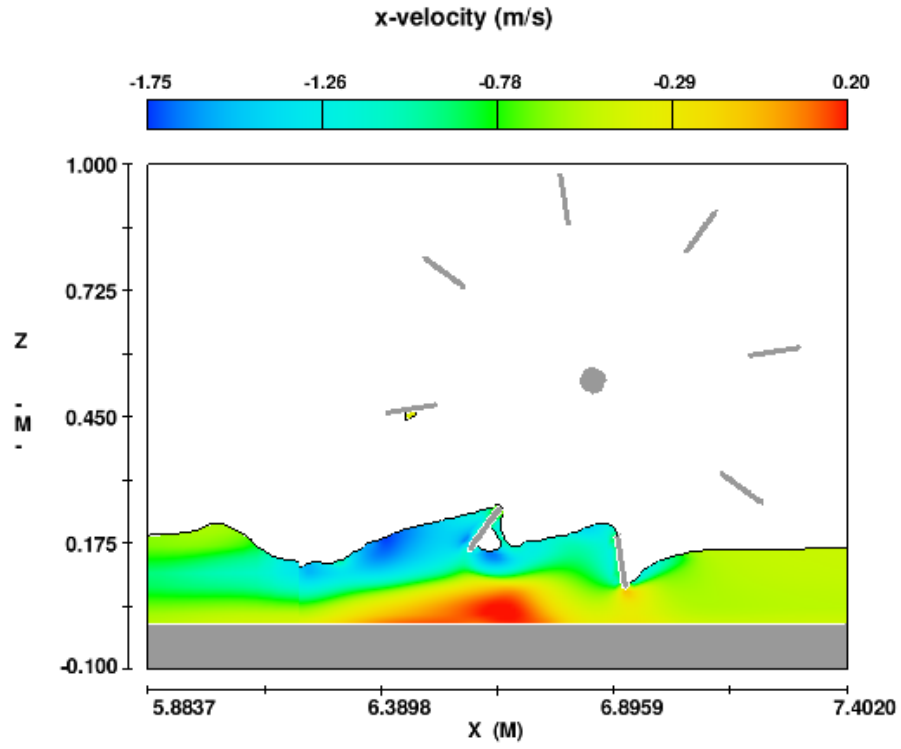


圖 4-39 水車造流剖面圖(1)

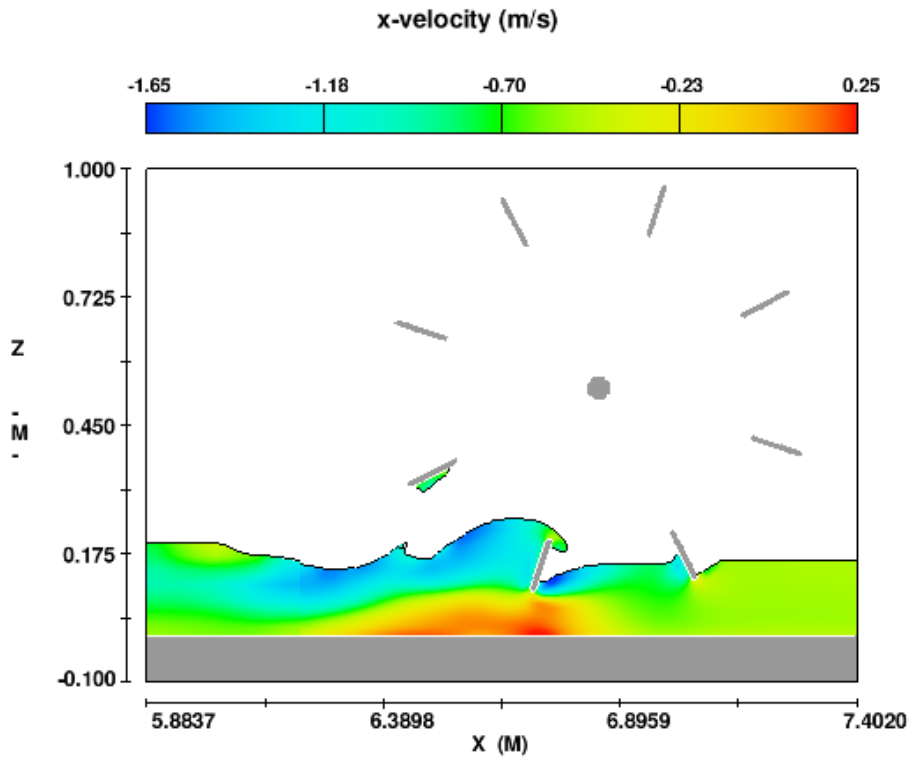


圖 4-40 水車造流剖面圖(2)

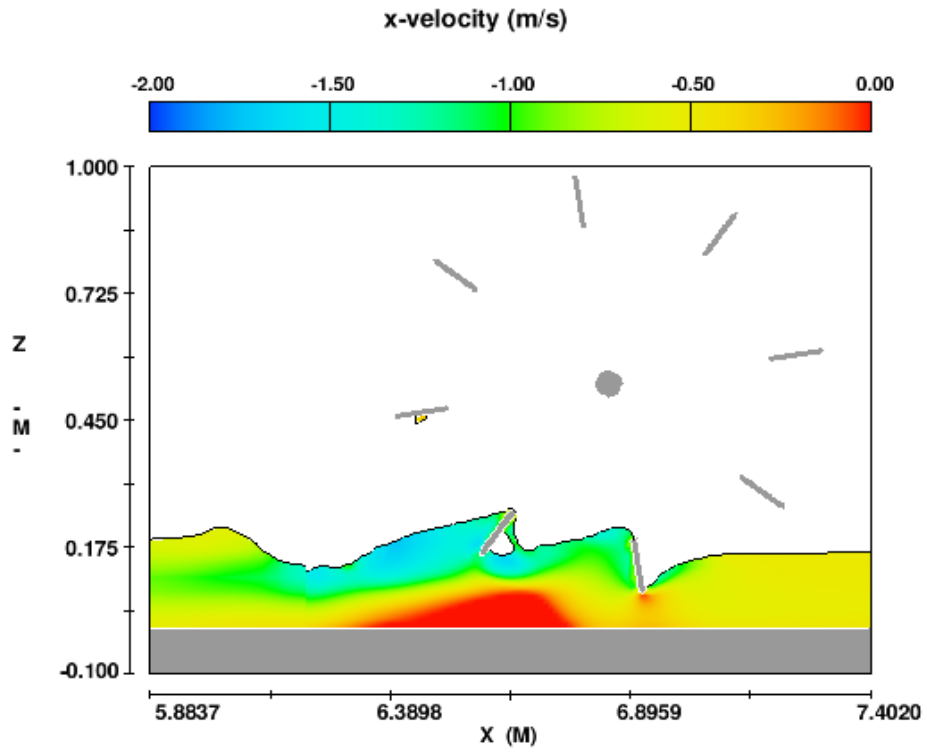


圖 4-41 水車造流剖面圖(3)

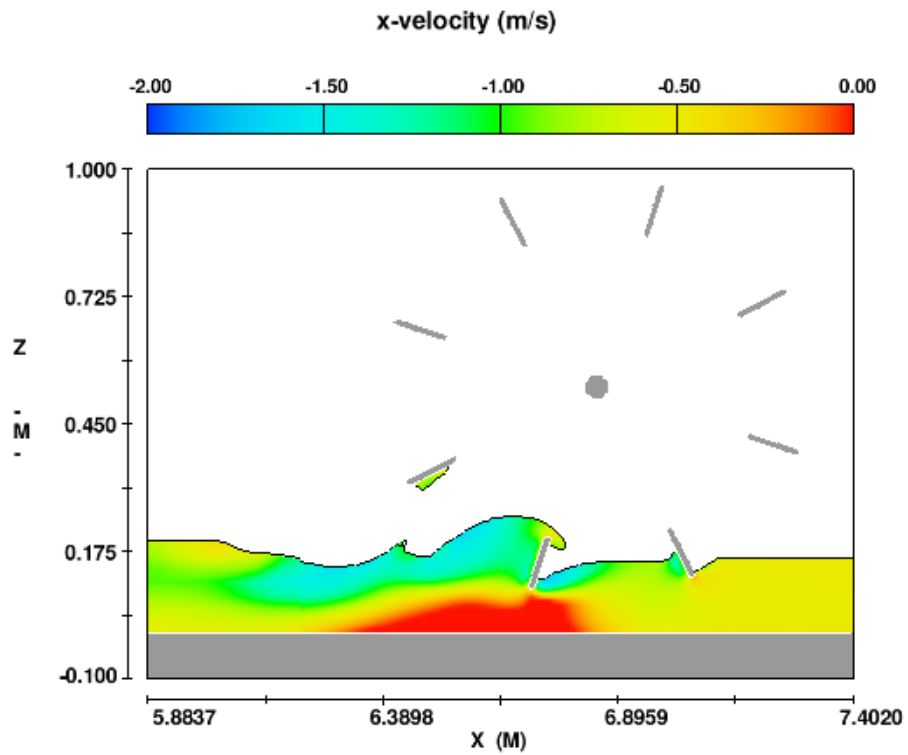


圖 4-42 水車造流剖面圖(4)

由圖 4-39 及圖 4-40 可發現池底邊界上有部分流速與造流方向相反的水體，其因乃葉片離池底尚有七公分之距離，水車轉動時池底的水體朝壓力低的方向流動。經由調整顯示的速度範圍可以觀察圖 4-41 與圖 4-42 紅色區域即為流場速度方向與造流方向相反的流體。若於池底產生與造流方向相反的流場可能會增加流體的摩擦損失，導致部分經由水車輸入的動能無法傳遞出控制體積，而於該處散失。

4.3.3 水車改良

(1) 調整葉片離底最小間距

經由 4.3.2 節討論可知本研究數值模擬時的靜水位僅有 18 公分，但是造流水車葉片與池底最小間距達 7 公分，池底出現大面積的逆流現象而增加剪應力做功造成能量損失。

根據 Navid R.loheimani(2013)等人表示:水車擺放位置為葉片離養殖池底部最小間距應在 2 公分以內；本小節經由降低轉軸離底高度 5 公分使水車葉片與池底最小間距縮小至 2 公分進行模擬，並且於斷面 A 與斷面 4-2 間取一控制體積計算水車的能源效率。

FLOW-3D 計算結果已知斷面 A 上的平均總水頭為 0.196m，斷面 4-2 上的平均總水頭為 0.135m，控制體積內質量流 $m = 48.48 \frac{kg}{s}$ ，代入(4.5)式得 $P_{out} = 28.54w$ 為控制體增加的功率。已知一號水車轉軸上平均扭矩為 $37.2 \frac{N \cdot m}{s}$ ，水車轉動角速度為 $\pi \frac{rad}{s}$ ，代入 $P = T \times \omega$ 中即可得水車輸入功率 $P_{in} = 116.9w$ ，水車能量轉換效率百分比 $\eta = \frac{28.54}{116.9} \times 100\% = 24.41\%$ 。

如圖 4-43 所示，縮小葉片最小離底間距後池底的逆流場範圍明顯縮小許多，但是葉片出水時依然會抬升部分水體造成水車不必要的能量消耗而影響能量轉換效率。

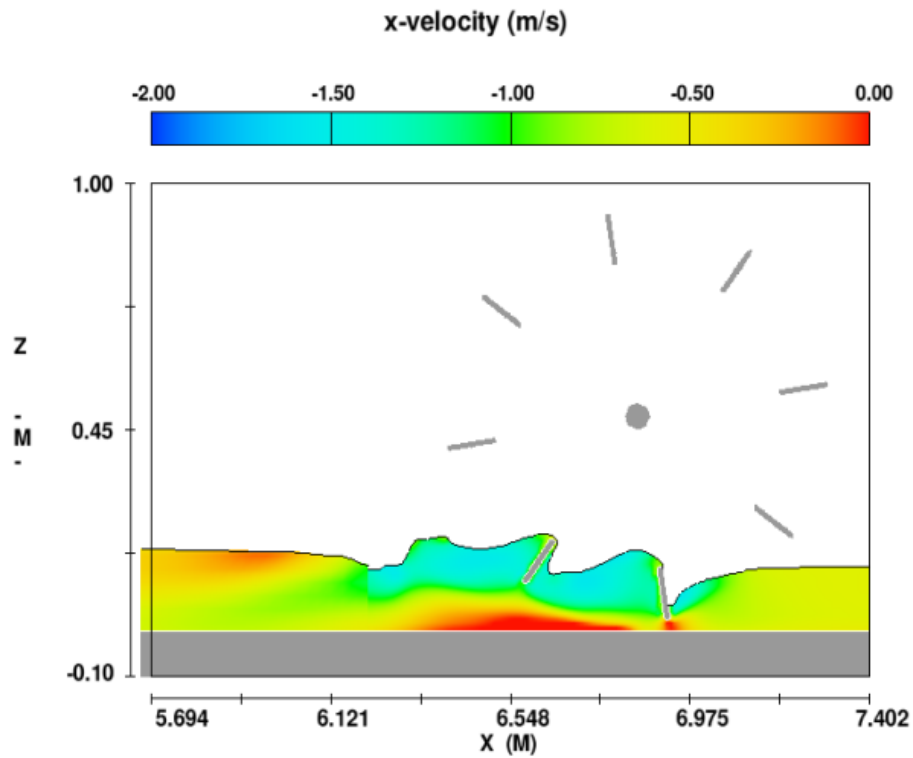


圖 4-43 水車造流剖面圖(5)

(2) 調整葉片角度

由 4.3.4 節可知縮小葉片的離底間距有助於提升水車的能量轉換效率，但是葉片離開水面時的角度可能會造成不必要的能量消耗。為解決改善葉片抬升水體對能量轉換效率的影響，本研究擬將葉片向後調整 45 度角架設如圖 4-44 所示。

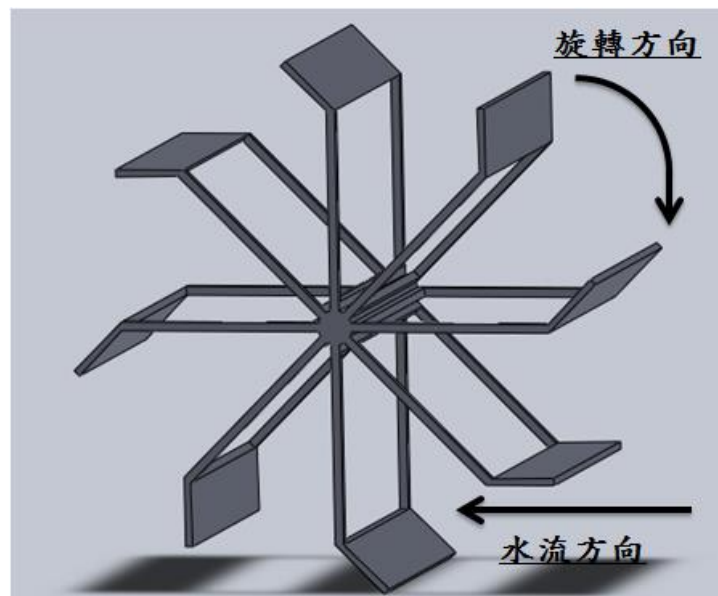


圖 4-44 調整葉片角度後的水車示意圖

當葉片調整角度後且最小離底間距為 2 公分時，FLOW-3D 計算結果已知斷面 A 上的平均總水頭為 0.206m，斷面 4-2 上的平均總水頭為 0.172m，控制體積內質量流率 $\dot{m} = 65.08 \frac{kg}{s}$ ，代入(4.5)式得 $P_{out} = 21.71w$ 為控制體增加的功率。

由 FLOW-3D 可知一號水車轉軸上平均扭矩為 $26.9 \frac{N \cdot m}{s}$ ，水車轉動角速度為 $\pi \frac{rad}{s}$ ，水車輸入功率 $P_{in} = 84.51w$ 。能量轉換效率百分比 $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$ ，水車改良後能量轉換效率百分比 $\eta = \frac{21.71}{84.51} \times 100\% = 25.69\%$ 。由圖 4-45 可發現，當葉片離開時水面時與水面垂直故水體抬升情形也較不明顯，池底的逆流場更幾乎消失。

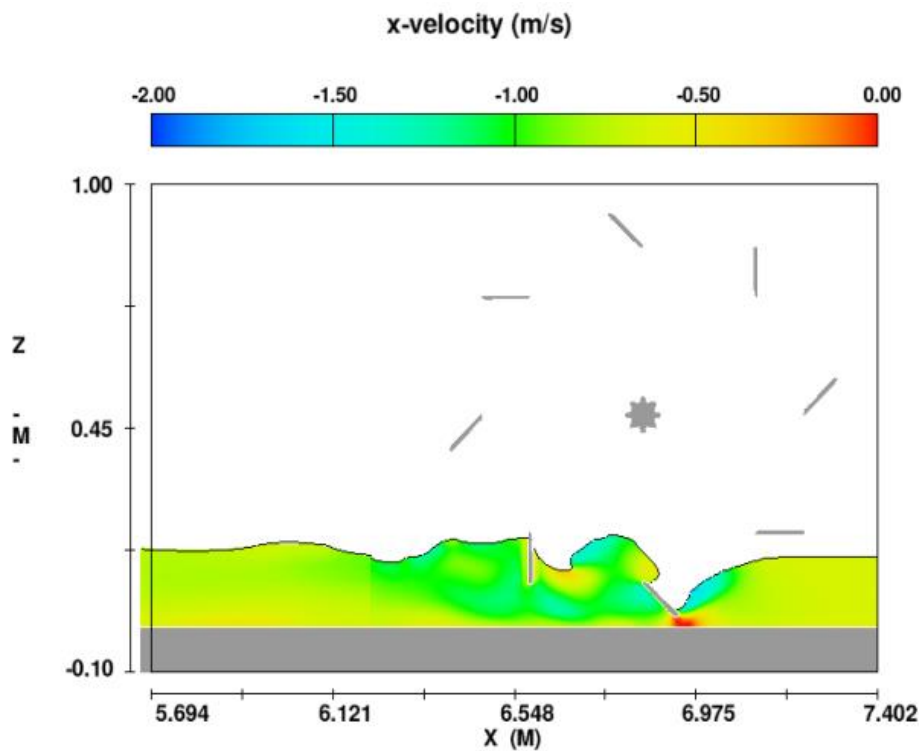


圖 4-45 水車造流剖面圖(6)

經由上列計算結果可知，調整葉片角度後水車的能源轉換效率稍有提升，縮小葉片的最小離底間距會增加葉片與水體的接觸面積而提高水車轉動時所需能量 P_{in} ，但是能源轉換效率提高由 19% 上升至 25% 左右，這顯示葉片離底間距直接影響了水車的能源效率。

4.3.5 小結

跑道式微藻培養系統運轉時唯一的能源消耗來自於造流水車，因此造流水車的能源使用效率至關重要。

當不計水車的質量慣性矩時，水車轉動時所需的扭矩越大則消耗的能量越多，由本研究得知縮小葉片的最小離底間距會增加葉片與水體的接觸面積而增加水車轉動扭矩提高能量消耗 P_{in} ，但是能量轉換效率由 19.23% 上升至 24.41%，這顯示葉片離底間距直接影響了水車的能源效率，並且經由調整葉片角度改善水體抬升現象減少水車能源消耗後，能量轉換效率可達 25.69%。

表 4-10 各水車之能量轉換效率表

水車型式	原型水車	原型水車	葉片改良
離底間距(cm)	7	2	2
轉速(rpm)	30	30	30
轉軸扭矩(N·m/s)	25.10	37.20	26.90
水車輸入功率 P_{in} (w)	78.85	116.9	84.51
控制體增加的功率 P_{out} (w)	15.16	28.54	21.71
能量轉換效率(%) $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$	19.23	24.41	25.69

第五章 結論與建議

本研究為針對跑道式微藻培養系統進行數值模擬，並且探討該養殖池渠道的各式改良設計及造流水車的能源轉換效率，以供該系統改善之參考並做為日後進行跑道式微藻養殖之研究使用。

5.1 結論

1. 跑道式微藻養殖池的彎道區域容易發生藻體堆積、水位高程落差與能量衰減等不利於藻水循環的問題，經由置入半圓弧型導流板與彎道頭隔板的適型設計明顯改善上述情形，但是彎道區域表現仍不及直線區域段優異。
2. 雖然過去曾有研究文獻指出進行數值模擬時，於彎道處裝設多達三個半圓弧型導流板可幾乎將死區完全消除並且降低水車能量消耗，但是經由本研究與數值模擬之結果，設計方法因各養殖池之條件限制而異，建議欲尋找最佳的改善方法還需經過數值模擬與現場試驗做印證。
3. 經由數值模擬該跑道式微藻養殖系統渠道優化後，大約可以提高系統平均流速 25.39%且降低能源消耗 23.19%，即可證明改善渠道設計增加水體的循環效率確實有助於降低能源消耗。
4. 成功大學跑道式微藻培養系統之改良，短期規劃建議參照本研究結果 T-4 型跑道池設計進行，而目前使用的造流水車雖然可以增加藻水曝氣但能量轉換效率過低，未來可斟酌其他設施代替。
5. 縮小水車葉片離底間距可降低池底的逆流場大小有助於提升水車能量轉換效率，原水車離底間距達 7 公分能量轉換效率僅有 19.23%，經調整離間距至 2 公分後能量轉換效率上升至 24.42%。
6. 水車運轉時，葉片離開水面的角度會造成多於能量消耗降低能量轉換效率，經由調整葉片角度後明顯改善運轉時的能量消耗且能量轉化效率達 25.69%。

5.2 建議

1. 經由本研究得知藻水的能量衰減大多發生在彎道處，因此往後規劃建置跑道式微藻養殖系統時因當盡量提高跑道池的長寬比以減少彎道區域佔整體養殖池面積的百分比。
2. 每個跑道池的彎道頭隔板適型設計可能不盡相同，必須先進行數值模擬才能找出最有效降低流速死區且促進粒子均勻循環的設計。
3. 本研究已證明普遍使用於跑道式微藻培養系統的水車其能源轉換效率低於 30%，因此嘗試經由其他設施提供藻水動能提高能源轉換效率為日後進行跑道式微藻培養系統研究的重要課題。
4. 如因設備限制仍需使用傳統的水車進行造流，需要盡量降低葉片離底的最小間距，並且改善葉片與水體接觸的角度避免不必要的能量損失。
5. 目前最常用於水下推進系統的裝置為螺旋槳，日後可以針對螺旋槳推動藻水之循環效率與能源消耗進行研究。

參考文獻

1. 丁錫鏞. 1983. 船舶螺旋槳理論與實務. 聯經出版事業公司. 台北市
2. 丁錫鏞. 1977. 船用螺槳設計. 徐氏基金會. 第二版. 台北市.
3. 李祥. 2008. 流體力學觀念剖析. 鼎茂圖書. 第九版. 台北市.
4. FLOW SCIENCE. 2012. User's Manual. FLOW SCIENCE,INC. New Mexico
5. 龍震工作室. 2011. SolidWorks 2011 進階設計. 龍震工作室. 初版. 新北市
6. 汪慶安. 2012. 內波與三角型底床互制作用之數值模擬. 海事資訊科技研究所. 碩士. 國立高雄海洋科技大學. 高雄市.
7. 林義復. 2008. 應用計算流力模擬船舶岸壁效應之研究. 航海科技研究所. 碩士. 國立高雄海洋科技大學. 高雄市.
8. 陳俊合. 2012. FLOW-3D 應用於孔隙結構物消波特性之研究. 海洋環境及工程學系. 碩士. 國立中山大學. 高雄市.
9. 林煒程. 2011. FLOW-3D 模式運用於異重流運移數值模擬. 土地管理與開發學系. 碩士. 長榮大學. 台南市.
10. 楊政翰. 2008. FLOW-3D 應用於土石流防砂壩前流場即衝擊力研究. 水利及海洋工程學系. 碩士. 國立成功大學. 台南市.
11. 蘇如垣. 2013. 流場增速器對水輪機輸出功率增進的研究. 航空太空工程學系. 碩士. 國立成功大學. 台南市.
12. 洪聖翔. 2011. 正交曲線座標擬似三維水理模式於彎道水流之模擬研究. 土木工程學系. 碩士. 國立交通大學. 新竹市.
13. 林源堂. 2007. 長寬比對矩形葉片自轉運動之影響. 材料與製造工程系. 碩士. 逢甲大學. 台中市.
14. 郭平巧. 2009. 養殖水車配置數值模擬研究. 水利及海洋工程研究所. 碩士. 國立成功大學. 台南市.

15. 黃國文. 1995. 以有限體積法模擬彎道水流之研究. 水利及海洋工程研究所. 碩士. 國立成功大學. 台南市.
16. 徐駿豪. 2007. 唐宋朝代至 1950 年代龍骨水車的發展與運用-以江蘇為考察重心. 歷史研究所. 碩士. 國立成功大學. 台南市.
17. 陳俊哲. 2008. 彎道湧波模擬之參數適用性分析. 土木工程學系. 碩士. 國立交通大學. 新竹市.
18. 林義復. 曾以帆. 李忠潘. 2013. 防波堤附近流場與渦流分佈之探討. 第四屆海峽兩岸水動力學研討會. pp. c1~c.11.
19. 諸發超. 黃建科. 陳劍佩. 李元廣. 2012. 敞開式跑道池光生物反應器的 CFD 模擬與優化. 化工進展. 第 31 卷第 6 期. pp. c.1184~c.1192.
20. 李愛香. 孫一. 趙小娥. 劉同宦. 王協康. 2009. U 型彎道水流試驗及其數值模擬. 長江科學院院報. 第 26 卷. 第 9 期. pp. c.29~c.34.
21. 劉曾姜. 吳俊校. 黃國如. 2008. 河川彎道緩流水面曲線計算探討. 水利水運工程學報. 第 2 期. pp. c.54~c.59.
22. 方春明. 2003. 考慮彎道環流影響的平面二維水流泥沙數學模型. 中國水利水電科學研究院學報. 第 1 卷第 3 期. pp. c.190~c.193.
23. 劉明德. 徐玉珍. 2012. 台灣亟需有遠見的再生能源政策與做法-德國經驗的啟示. 公共行政學報. 第 43 期. pp. c.127~c.150.
24. 經濟部能源局. 2013. 2012 年能源產業技術白皮書. 政策與措施.
<http://web3.moeaboe.gov.tw/>
25. 吳南靖. 郭平巧. 陳佳德. 張君名. 陳永為. 2012. 新型養殖活氧機運轉下之養殖池流場研究. 第 34 屆海洋工程研討會論文集. pp. c.469~c.473.
26. 劉娟妮. 胡萍. 姚領. 王雪青. 2006. 微藻培養中光生物反應器的研究進展. 食品科學. 第 27 卷第 12 期. pp. c.772~c.777.
27. 經濟部能源局. 2013. 中華民國 101 年能源統計手冊. pp. c.10~c.11.

28. Scott C.James. Varun Boriah. 2010. Modeling Algae Growth in an Open-Channel Raceway. *Journal of Computational Biology*. Volume 17 Number 7. pp.cc.895~c.906
- 29.Mario R.Tredici. 2012. Energy balance of microalgae cultures in photobioreactors and ponds. *Life Cycle Analysis of Algal Based Biofuels*. .
- 30.T.J.Lundquist. I.C.Woertz. N.W.T.Quinn. J.R.Benemann. 2010. A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production. University of California Berkeley. California.USA.
- 31.J.R.Benemann. I.C.Woertz. T.J.Lundquist. 2011. A techno-economic analysis of open pond microalgae biofuels production. *MicroBio Engineering,Inc*. California.USA.
- 32.Michael A,Borrowitzka. Navid R.loheimani. 2013. Algae for Biofuels and Energy. Murdoch University. Australia.
- 33.Ami Ben-Amotz. 2012. Large Scale Open Algae Ponds. The National Institute of Oceanography. Seambiotic.Ltd.
- 34.Olivier Bernard. 2012. A 2D Model for Hydrodynamics and Biology Coupling Applied to Algae Growth Simulations.
- 35.Yusuf Chisti. 2013. Raceways-based production of algal crude oil. Massey University Library.
36. Yusuf Chisti . 2013. *Journal of Biotechnology*. Massey University Library.
- 37.Kawisra Sompech. 2012. Design of raceway ponds for producing microalgae. Massey University Library. *Biofuels 2012*. pp.c.387~c.397.
- 38.Donald.F.Young. Bruce R.Munson. Theodore H.Okiishi. 2012. *Fluid -Mechanics*.m JohnWiley&Sons,Inc.
- 39.Anirban Banerjee. Rohit Sharma. U.C.Banerjee. 2002. Aenewable Source of

- Hydrocarbons and Other Chemicals. Massey University Librar. Biotechnology
2002. pp.c.245~c.279.
- 40.Eric L.Peterson. 1999. Benthic shear stress and Sediment condition. Aquacultural
Engineering. Volume 21 Issue 2. pp.c.85~c.111.
- 41.Hirt.C. Nichols.B. 1981. Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of
Free Boundaries. J of Comp. Physics. pp.c.201~255.
- 42.Rodi W. 1980. Turbulence models and their application in hydraulics. MH DELFT.
THE Netherlands.
- 43.M.H. Shojaee Fard. F.A. Boyaghchi. 2007 Studies on the influence of various
blade outlet angles in a centrifugal pump when handling viscous fluids. American
journal of applied sciences. pp.c.718~724.
- 44.Neil Savage. 2011 Algae:The scum solution. Nature. Volume474. Issue7352.