

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

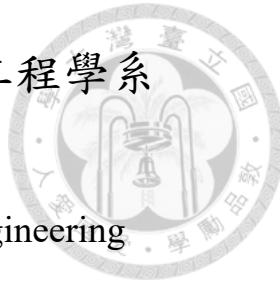
碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis



二維斷面水槽中主動消波控制系統的設計與實作

Design and Implementation of an Active Wave Absorption
Control System in a 2D Wave Flume

鄭博永

Bo-Yung Jeng

指導教授：羅弘岳 博士

Advisor: Hong-Yueh Lo, Ph.D.

中華民國 114 年 8 月

August, 2025

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

二維斷面水槽中主動消波控制系統的設計與實作

Design and Implementation of an Active Wave Absorption
Control System in a 2D Wave Flume

本論文係鄭博永（學號：R12525018）在國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 114 年 07 月 24 日承下列考試委員審查通過及口
試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Engineering Science and Ocean Engineering on
24th July 2025 have examined a Master's Thesis entitled above presented by Bo-Yung Jeng
(student ID:R12525018) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

署名處
(指導教授 Advisor)

江孟政

林宗志

系（所、學位學程）主管 Director:

趙仁政



謝誌



時光荏苒，碩士研究生涯即將劃下句點。回首過去兩年，不僅充實了我的專業知識，也讓我收穫了許多寶貴的人生經驗。在此，謹向所有在學術與生活上給予我指導與支持的師長、同儕與親友，致上最誠摯的謝意。

首先，衷心感謝我的指導老師羅弘岳教授。從研究方向的確立、實驗設計到論文撰寫的每一個環節，教授皆悉心指導、無私協助。教授嚴謹的學術態度、敏銳的研究視角與豐富的專業知識，讓我受益匪淺。能在教授的指導下完成本論文，是我碩士生涯中最重要的幸運與榮耀。

感謝實驗室的所有夥伴們，特別是在我研究卡關或實驗受挫時，總不吝給予建議與鼓勵的學長姐們。信瀚學長在機構設計上給予我極大的啟發，子喻學長在理論分析方面的深入剖析，也幫助我釐清不少難題。芝宇與欣怡學姊不僅貼心，也為實驗室帶來許多歡笑。一起努力的世煌，更是我在研究路上的重要支柱，無論是討論淺水波報告或實驗問題，總能給我明確的方向。學弟妹們則陪伴我們在球場上揮汗抒壓，使我得以調劑身心、持續前行。此外，也要感謝天隸的各位同仁與聖家學長，在大水槽架設與系統操作上提供我許多協助，讓我能迅速上手各項控制技術，順利完成研究任務。

最後，最深的感謝獻給我的媽媽陳瑩、外公銘章、外婆秀貞、妹妹雙悅與嘉恩。在我心情低落或遭遇實驗瓶頸時，總是耐心傾聽、給予安慰，拉我一把、鼓勵我繼續前行。你們的陪伴與支持，是我堅持到最後的最大動力。每當陷入低潮時，你們也總會適時帶我出門走走，讓我得以暫時脫離壓力，重新找回前進的勇氣。衷心感謝你們在我人生這段旅程中所付出的陪伴與理解。



摘要



實驗水槽受限於空間尺度，在造波板製造波浪後，會因為各種因素導致反射波在水槽內部不斷形成，持續干擾水槽波況，致使實際波形與預期目標產生偏差。被動式消波雖有製作成本低、材料容易取得等好處，但其三大缺點包含：在固定外形下，僅能針對特定波況消波、占據水槽體積較大、只能配置於水槽末端，因此各大研究單位與企業開始投入主動式消波的開發。主動式消波最大特點是可以直接整合於造波機結構上，使得消波控制不再侷限於水槽末端。其操作流程可概括為三個主要步驟：首先，透過感測元件即時量測並擷取反射波訊號；其次，藉由運算單元計算對應之消波軌跡；最後，將修正後之造波指令即時回授至造波系統，以同步達成造波與主動消波。對於需長時間維持穩定目標波況之水槽實驗而言，即時閉迴路主動消波系統被視為不可或缺，因此，附加主動消波功能的造波機逐漸成為實驗水槽中必要設備。本研究致力於實驗室二維平推式斷面水槽中，加裝主動消波系統的可行性評估、設計與實作。在實驗初期，本文於小型造波水槽，初步驗證主動消波之方法，為主動消波概念奠定基礎。其後，實際對大、小型造波水槽之原有設備加裝主動消波系統進行分析。最終，本文在實驗室大型造波水槽中，使用新型運動控制器，並自行研發出一套完全閉迴路的主動消波系統，成功以疊加消除法消除週期波與孤立波。經本文實測，使用分離式消除週期反射波，消波率至少可以達 75%，此外，更可以近乎完全的消除孤立波之反射波。而整合式主動消波可以消除絕大部分造波端的再反射波，足以證明此主動消波的回授控制系統成效顯著。

關鍵字：分離式主動消波、整合式主動消波、二維斷面水槽、閉迴路系統設計、回授控制





Abstract

Due to the spatial constraints of experimental wave flumes, waves generated by the wave paddle often result in reflected waves that continuously form within the flume, persistently interfering with the wave field and causing deviations between the actual and the target wave profiles. While passive wave absorption offers advantages such as low construction cost and easy material availability, it has three main disadvantages: it can only absorb specific wave conditions under a fixed shape, it occupies a large volume of the flume, and it can only be installed at the flume end. As a result, many research institutes and industrial sectors have begun investing in the development of active wave absorption. The greatest feature of active wave absorption is its ability to be directly integrated into the wave maker system, allowing wave absorption control to no longer be confined to the end of the flume. The operational process can be broadly divided into three main steps: first, real-time measurement and extraction of reflected wave signals using sensing elements; second, calculation of the corresponding absorption trajectory by the control unit; and finally, immediate feedback of the corrected wave generation commands to the wave maker system to achieve simultaneous wave generation and active absorption. For flume experiments that require long-term maintenance of stable target wave conditions,

real-time closed-loop active wave absorption systems are considered indispensable. Consequently, wave makers equipped with active absorption functions have gradually become essential equipment in experimental wave flumes. This study focuses on the feasibility assessment, design, and implementation of an active wave absorption system integrated into a laboratory two-dimensional piston-type wave flume. In the initial stage, a small-scale flume was used to preliminarily verify the concept of active wave absorption, thus laying the foundation for subsequent development. Following this, analyses were conducted to integrate the active wave absorption system into both small-scale and large-scale flumes. Ultimately, in a large-scale wave flume, a novel motion controller was employed, and a fully closed-loop active wave absorption system was self-developed. Using the superposition principle, both periodic and solitary reflected waves were successfully eliminated. Based on the experimental results, separate active wave absorption can achieve an absorption rate of at least 75% for periodic reflected waves. Moreover, it can almost completely eliminate reflected waves generated by solitary waves. On the other hand, integrated active wave absorption effectively suppresses most of the re-reflected waves from the wave generation boundary, clearly demonstrating the high performance of this feedback control system for active wave absorption.

Keywords: Separate active wave absorption, Integrated active wave absorption, 2D wave flume, Closed-loop system design, Feedback control

目次



Page

口試委員審定書	i
謝誌	iii
摘要	v
Abstract	vii
目次	ix
圖次	xiii
表次	xvii
符號列表	xix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 主動消波文獻回顧	3
1.2.1 主動消波原理	4
1.2.2 波高感測器種類	4
1.2.3 反射波提取技術	5
1.3 市售主動消波產品簡介	6
1.4 研究動機與目標	9
1.5 研究架構	10
第二章 波浪理論	11
2.1 孤立波	11
2.1.1 理論與解析解	12



2.1.2 平推式造波理論	14
2.1.2.1 波數種類	14
2.1.2.2 造波軌跡	15
2.2 週期波	17
2.2.1 波況與種類	17
2.2.2 Stokes wave 理論	20
2.2.3 線性造波理論	22
2.2.4 平推式二階造波理論	25
第三章 實驗設備與可行性分析	27
3.1 小型造波水槽	27
3.1.1 造波與消波機構	28
3.1.2 運動控制設備	30
3.1.3 超音波感測器	31
3.1.3.1 資料擷取	33
3.1.3.2 量測與校正	34
3.1.3.3 資料處理	35
3.1.4 孤立波造波結果分析與歸納	37
3.1.5 小水槽新設備驗證	40
3.1.6 主動消波原理測試	42
3.1.6.1 測試流程	42
3.1.6.2 時間反轉法	42
3.1.6.3 疊加消除法	45
3.1.6.4 本節小結	47
3.2 大型造波水槽	48
3.2.1 造波機構	49



3.2.2 運動控制設備	53
3.2.3 超音波感測與資料擷取器	54
3.2.4 回授控制系統	55
3.2.5 原設備試驗	56
3.2.6 新設備分析	59
3.2.6.1 閉迴路控制	59
3.2.6.2 比例積分微分控制器	60
3.2.6.3 新設備選擇	61
3.2.7 大水槽新設備驗證	64
第四章 實作成果與討論	67
4.1 新運動控制器與主動消波流程	67
4.2 分離式主動消波	69
4.2.1 虛擬軸	71
4.2.1.1 疊加消除法驗證	71
4.2.1.2 可調式時間序列	72
4.2.2 實體軸	73
4.2.2.1 孤立波	74
4.2.2.2 週期波	77
4.3 整合式主動消波	78
第五章 結論與未來展望	81
5.1 結論	81
5.2 未來展望	83
參考文獻	85



圖次



圖 1.1	主動式消波與水槽反射波示意圖（未依實際比例繪製）	2
圖 1.2	快速使水槽恆定（取自 AwaSys 官方網站）	7
圖 1.3	波浪在連續造波下仍維持目標波形（取自 AwaSys 官方網站）	8
圖 1.4	被動式消波-藤棉緩坡板部分實景	9
圖 2.1	孤立波示意圖	11
圖 2.2	GM 造波軌跡示意圖（搭配 k_B ）	15
圖 2.3	MMTM 造波軌跡示意圖（搭配 k_B ）	16
圖 2.4	使用 Zhao et al. (2024) 改良之適用範作圖（圓橘點：小型造波水槽、方綠點：大型造波水槽）	19
圖 3.1	小型造波水槽示意圖（未依實際比例繪製）	27
圖 3.2	小型造波水槽實景	28
圖 3.3	造波與消波機構	28
圖 3.4	造波端與消波端之步進馬達（取自祥貿科技企業有限公司官網）	29
圖 3.5	小型造波水槽運動控制設備	30
圖 3.6	I2C 連接配置圖	31
圖 3.7	Banner S18UUAQ 超音波感測器（取自 S18UUAQ 使用手冊）	32
圖 3.8	超音波感測器量測燈號	32
圖 3.9	輸出電壓與量測距離之轉換關係（取自 S18UUAQ 使用手冊）	33
圖 3.10	孤立波 lowpass 濾波前後之波高時間序列資料	36
圖 3.11	週期波 bandpass 濾波前後之波高時間序列資料	36
圖 3.12	靜水濾波前後之波高時間序列資料	37
圖 3.13	各造波方式之造波軌跡 ($\epsilon = 0.25$)	38
圖 3.14	各造波方式之無因次化波高對比 ($\epsilon = 0.25$)	39
圖 3.15	GMB、MMTMR 與理想波高解析解之無因次化對比 ($\epsilon = 0.3$)	39
圖 3.16	GMB、MMTMR 與理想波高解析解之無因次化對比 ($\epsilon = 0.35$)	40
圖 3.17	小水槽新設備驗證-左馬達實際 ϵ 為 0.2185 之 MMTMR 孤立波	41



圖 3.18 小水槽新設備驗證-左馬達實際 ϵ 為 0.2756 之 MMTMR 孤立波	41
圖 3.19 小水槽新設備驗證-左馬達實際 ϵ 為 0.3146 之 MMTMR 孤立波	41
圖 3.20 時間反轉法原理測試-孤立波 ($\epsilon = 0.25, H_{sol} = 0.0125$ 公尺)	43
圖 3.21 時間反轉法原理測試-孤立波 ($\epsilon = 0.3, H_{sol} = 0.015$ 公尺)	43
圖 3.22 時間反轉法原理測試-孤立波 ($\epsilon = 0.35, H_{sol} = 0.0175$ 公尺)	44
圖 3.23 時間反轉法原理測試-週期波 ($T = 0.85$ 秒, $H_{per} = 0.009$ 公尺)	45
圖 3.24 疊加消除法原理測試-製造三次週期波 ($T = 0.85$ 秒, $H_{per} = 0.009$ 公尺)	46
圖 3.25 疊加消除法原理測試-製造單次週期波 ($T = 0.85$ 秒, $H_{per} = 0.009$ 公尺)	47
圖 3.26 大型造波水槽實景	48
圖 3.27 大型造波水槽示意圖（未依實際比例繪製）	49
圖 3.28 安川伺服馬達 SGM7A-08AFA61（取自台灣安川電機股份有限公司官網）	50
圖 3.29 品宏減速機 DH090-L1-3-19K6-70-90-M6（取自品宏科技有限公司官網）	51
圖 3.30 上銀單軸致動器 KK13025P-1180A1-F2CS2（取自上銀科技官網）	51
圖 3.31 造波機構實景	52
圖 3.32 光遮斷器 Omron EE-SX674（取自京港電子官網）	52
圖 3.33 研華運動控制卡 PCIE-1203-10A（取自研華股份有限公司官網）	53
圖 3.34 安川伺服驅動器 SGD7S-5R5AA0A（取自台灣安川電機股份有限公司官網）	54
圖 3.35 造波系統總控制流程圖	54
圖 3.36 NI USB-6001 資料擷取裝置（取自 USB-6001 使用手冊）	55
圖 3.37 大水槽回授控制流程圖	56
圖 3.38 回授測試-週期同步位置運動	57
圖 3.39 運動控制卡之週期同步位置運動剖析	58
圖 3.40 比例積分微分控制器示意圖	61
圖 3.41 安川運動控制器 MP3300（取自台灣安川電機股份有限公司官網）	62

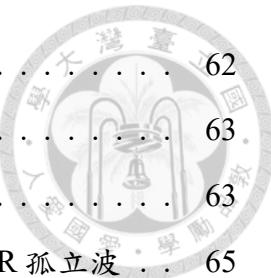


圖 3.42 Lenze 運動控制器 C520 (取自 C520 使用手冊)	62
圖 3.43 Lenze 運動控制器 C550 (取自 C550 使用手冊)	63
圖 3.44 新控制設備構想圖	63
圖 3.45 大水槽新設備驗證-控制器實際 ϵ 為 0.198 之 MMTMR 孤立波	65
圖 3.46 大水槽新設備驗證-控制器實際平均波高為 0.0364 公尺之週期波	65
圖 4.1 新運動控制器與主動消波流程圖	68
圖 4.2 壓克力垂直板	69
圖 4.3 方案一：波高計固定於指定位置	70
圖 4.4 方案二：波高計跟隨造波板移動	70
圖 4.5 虛擬軸之週期波疊加消除法驗證	71
圖 4.6 可調式時間序列-虛擬軸延遲 1 秒後作動	72
圖 4.7 可調式時間序列-虛擬軸延遲 5 秒後作動	73
圖 4.8 分離式主動消波-孤立波 ($\epsilon = 0.2$, $H_{sol} = 0.072$ 公尺, $d_{WG} = 0.55$ 公尺)	74
圖 4.9 分離式主動消波-孤立波波高計 2 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.55$ 公尺)	74
圖 4.10 分離式主動消波-孤立波 ($\epsilon = 0.2$, $H_{sol} = 0.072$ 公尺, $d_{WG} = 0.03$ 公尺)	75
圖 4.11 分離式主動消波-孤立波波高計 2 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)	76
圖 4.12 方案一 ($d_{WG} = 0.55$ 公尺) 與方案二 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺) 消波效果比較	76
圖 4.13 分離式主動消波-週期波 ($T = 1$ 秒、 $H_{per} = 0.04$ 公尺)	77
圖 4.14 分離式主動消波-週期波波高計 2 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)	77
圖 4.15 整合式週期波主動消波-波高計 1 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)	78
圖 4.16 整合式主動式消波示意圖 (未依實際比例繪製)	80
圖 4.17 垂直板反射波提取-波高計 1 撷取之歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)	80

圖 5.1 整合式週期波主動消波-波高計 1 表面高程歷時圖（雜訊干擾消
波軌跡計算）

83



表次



表 1.1 消波方式之優缺點比較	3
表 2.1 週期波波浪參數表	19
表 3.1 步進馬達規格表	29
表 3.2 Banner S18UUAQ 超音波感測器規格表	33
表 3.3 目標與左馬達造波後實際測得之孤立波參數對照表	40
表 3.4 安川伺服馬達 SGM7A-08AFA61 規格表	50
表 3.5 目標與實際測得之孤立波參數對照表	64
表 3.6 目標與實際測得之週期波平均波況對照表	65





符號列表

符號	符號意義	
η	自由表面高程	m
Δl	Goda 兩點法之兩支波高計的間距	m
d_{WG}	波高計與造波板之距離	m
η_{target}	目標表面高程	m
η_{actual}	實際表面高程	m
η_R	反射表面高程	m
η_{abs}	消波表面高程	m
M	緩坡外型常數	—
g	重力加速度 ($g = 9.81$)	m/s^2
T	週期	s
x	水平方向座標	m
t	時間	s
h_s	小水槽恆定水深	m
h_L	大水槽恆定水深	m
η_{sol}	孤立波表面高程	m
H_{sol}	孤立波目標波高	m
k_B	Boussinesq-type 波數	$1/\text{m}$
h_0	水槽恆定水深	m
c_{sol}	孤立波波速	m/s



π	圓周率 ($\pi \approx 3.1415926$)	-
λ	孤立波有效波長	
T_{sol}	孤立波有效週期	
ϵ	非線性參數	-
k_{sol}	孤立波波數	1/m
k_R	Rayleigh-type 波數	1/m
ξ_{GM}	GM 造波軌跡	m
ξ_{MMTM}	MMTM 造波軌跡	m
t_{wm}	孤立波造波總時長	s
S_{sol}	孤立波衝程	m
μ_1	MMTM 造波速度	m/s
η_1	MMTM 自由表面高程	m
ξ_{sol}	孤立波造波軌跡	m
μ_{abs}	消波速度	m/s
ξ_{abs}	消波軌跡	m
H_{actual}	實際波高	m
H_{per}	週期波目標波高	m
U_r	Ursell number	-
L	週期波波長	m
k_{per}	週期波波數	1/m
η_{per}	週期波表面高程	m
a	週期波振幅	m



ω	週期波角頻率	rad/s
θ	週期波相位函數	rad
ψ	週期波初始相位	rad
ξ_{1st}	線性造波軌跡	m
z	垂直方向座標	m
S_{per}	週期波造波最大位移	m
ϕ	週期波速度勢	m^2/s
k_{WM}	造波板波數	$1/m$
k_n	漸消波波數	$1/m$
ξ_{2nd}	二階造波軌跡	m
u	比例積分微分控制器輸出值	-
K_p	比例增益	-
K_i	積分增益	-
K_d	微分增益	-
e	誤差值	-
τ	取樣時間	s
η_{RR}	再反射波表面高程	m
c_{per}	週期波波速	m/s



第一章 緒論



1.1 研究背景

各種實驗水槽在產生波浪後，由於受限於其有限的尺寸，無法避免水槽內部會有多重反射波的累積，其不存在於真實的開放海域中。這些反射波可能來自水槽的側壁、尾端，或水槽內的結構物及待測物，並在能量消散之前持續傳播。如果我們不斷造波，隨著時間的推移，這些反射波的能量會逐漸積累，導致與目標波形產生顯著偏差，甚至在共振下形成駐波 (Schäffer and Klopman, 2000)。想要避免反射波的影響，最簡單的解決方案是在水槽內部首次發生反射前終止實驗。然而，對於較短的水槽或涉及不規則波浪的實驗，這種方法在實務上難以實現，且可能限制試驗條件的靈活性 (Andersen et al., 2016)。因此，如何有效控制或消除反射波，成為實驗水槽中維持目標波形的重要課題。

為了減少水槽內過多的反射波，研究人員常在實驗水槽的末端設置消波結構，以模擬自然界中波浪的衰減機制。例如，透過於水槽末端設置緩坡，以模擬天然沙灘的消波作用（如 OSU Directional Wave Basin）；在斜坡表面鋪設藤棉材料，以增加能量耗散（如台灣大學工學院海洋工程斷面波浪水槽）；或在陡坡上加裝網狀結構，以減少波浪反射（如 Lir National Ocean Test Facility）。這些方法皆屬於被動式消波技術 (passive wave absorption)，透過改變水槽末端的結構形態與材料特性來降低反射波的影響，進而提升造波結果與目標波形的一致性。

被動式消波具有設計簡單、維護成本低及實施便利等優勢。然而此類方法亦存在若干限制，例如為了將波浪反射率降低至 10% 以下，需要佔據水槽相當大的區域，進而縮減可供試驗使用的範圍 (Hughes, 1993)。此外，其結構通常針對特

定波浪條件進行設計，難以適應不同的波浪條件且不易進行動態調整（Hughes, 1993）。最為關鍵的是，被動式消波裝置僅能設置於水槽末端，無法有效抑制水槽中因結構物所產生之反射波。鑑於上述限制，於 20 世紀末，各大研究機構與企業逐步投入主動式消波 (active wave absorption) 技術的開發與應用，以提升消波效果與水槽實驗的靈活性。

主動式消波通常會與造波機相互結合，即整合式主動消波，如圖1.1所示。主動消波至少需要一支波高感測器來擷取反射波表面高程訊號，且此感測器不能距離造波機過遠，以確保表面高程資料與波浪接近造波板時之真實情況相似，這些波浪資料可以提取出需要消除的反射波大小，而提取技術將由1.2.3節介紹。反射波資料會透過運算單元即時處理成消波軌跡，並馬上回授給造波機以調整當前造波軌跡。若主動消波的軌跡與造波軌跡整合得當，則可在製造波浪的當下同時抑制圖1.1中之各種反射波（紅色箭頭），使波浪維持目標波形。

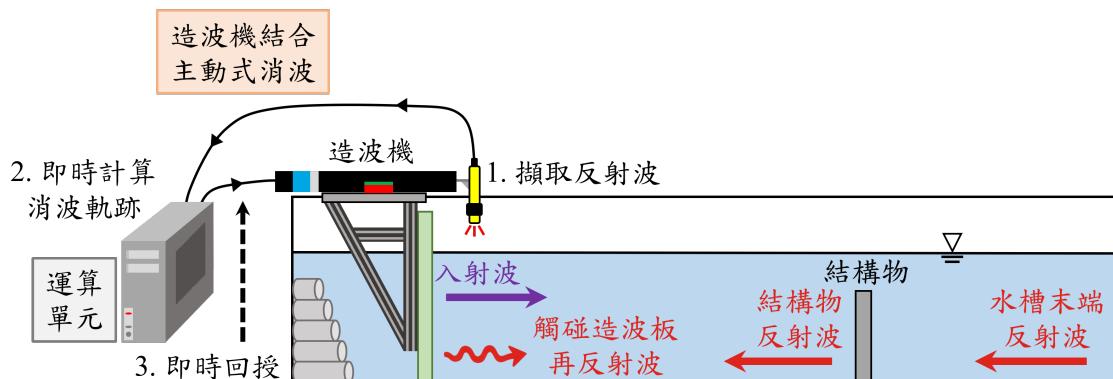


圖 1.1: 主動式消波與水槽反射波示意圖（未依實際比例繪製）

配備主動式消波的實驗水槽被視為可變形的水槽邊界，不僅能使水槽維內的波浪維持目標波形，亦能有效克服上述被動式消波的諸多限制。然而主動式消波系統涉及較高的建置與維護成本，並需設計閉迴路控制 (closed-loop control) 系統及確保感測器的精確量測，被動式與主動式消波之優缺點如表1.1所示。若系統時序產生誤差，只會產生更多的波浪反射，使水槽波場變得更加混亂。不過隨著設



備與理論的進步，透過適當的前期規劃與嚴謹的校準程序，主動式消波逐漸能應用於各類實驗水槽，以提升水槽的可適性。

表 1.1: 消波方式之優缺點比較

類別	被動式消波	主動式消波
裝置型態	藤棉緩坡、網狀結構	附加於造波機構
優勢	容易取得、 成本較低	靈活性高、 不占用額外空間
劣勢	針對特定波況、 所需空間大、 僅水槽末端消波	建置與維護成本高、 需事先校準感測器

1.2 主動消波文獻回顧

較早期之主動消波技術為Milgram (1970) 的研究，作者提出移動終端 (moving termination) 並搭配閉迴路系統來吸收水槽中的反射波。該方法僅於水槽末端加裝消波機，並依據電容式波高計所測量之自由表面高程 (η) 作動，屬於分離式主動消波。雖然此方案只針對單一方向傳播的波浪消波，但為後續主動消波的開發奠定了基礎。其後，Goda and Suzuki (1976) 與Mansard and Funke (1980) 陸續提出分離水槽中入射波與反射波的方法，此為合併造波機與消波機的關鍵技術。

經過一段時間的發展，Schäffer and Klopman (2000) 基於長波理論，將造波機結合主動消波的方式，透過分別計算造波與消波軌跡並加總，作為造波板最終的運動訊號，屬於整合式主動消波。隨後Schäffer and Jakobsen (2003) 提出單訊號控制 (single-signal control) 與雙訊號控制 (dual-signal control) 的方法計算出消波軌跡，使得主動消波的適用範圍可以涵蓋到非線性波浪。近年來Andersen et al. (2016) 考慮波高對波速的影響，改善Lin and Huang (2004) 波浪分離的計算方式，並推薦以有限脈衝響應濾波器 (FIR, Finite Impulse Response filter) 提取反射波，減少因累積



誤差而失真，使系統更為穩定。

接下來，本文將透過三個小節進行詳細探討，首先回顧主動式消原理的演進，其次分析各類波高感測器的特性及優缺點，最後針對感測器的反射波提取技術進行討論。

1.2.1 主動消波原理

Schäffer and Klopman (2000) 將實驗上的主動消波原理分成兩類。第一種是時間反轉法 (time-reversal method)，概念為反轉原本的造波軌跡，它就能夠吸收一個波，雖然理念上說得通，但是在週期波或更複雜的波形中，這並不是一個好的消波手段，因為它沒有一套轉換機制，將量測的自由表面高程資訊轉化為造（消）波板的運動軌跡。第二類為波浪的疊加消除法 (superposition principle)，使用波高感測器量測到的資訊，經過公式計算消波軌跡，產生與反射波相同振幅、相位相反的波浪，其可以直接與造波軌跡結合，達到一邊製造波浪一邊消除多於的反射波，使水槽中的波浪持續維持目標波形，這也是日後主動消波最常用的基本原理。另外，在數值模擬中，主動消波的概念被應用於開放邊界 (open boundary)，使波浪可以自由穿透造波板而不產生反射。

1.2.2 波高感測器種類

實驗水槽測量自由表面高程的方法可以分為四類，包含速度計、壓力感測器、電容式波高計及超音波感測器。然而速度計的測量方式並沒有被廣泛應用，因此本節針對後三類進行分析。

Salter (1984, 1981); Chatry et al. (1998); Spinneken and Swan (2009) 使用壓力感測器來量測自由表面高程，他們認為壓力感測對於局部擾動不敏感，具有較好的抗干擾能力。然而Bullock and Murton (1989) 提到，當反射波衝擊造波板時，槳板與壁面之間一定有一個充滿流體的小空間，該空間的流體運動將影響槳板的受



力，甚至可能出現共振現象。此外，Schäffer and Klopman (2000) 認為在高頻率的造波情況下，造波板所受到的慣性力大於波浪力，因此使用受力來偵測自由表面高程並不實際。

Milgram (1970) 選用電容式波高計，在當時的技術條件下，其為低延遲獲取水位變化的最佳方法。由於電容式波高計屬於侵入式量測，其對水位變化的靈敏度較高，不過作者自己也提到會有水膜依附在電容式波高計上，以致測量不精準，必須以震動的方式解決此問題。Higuera et al. (2015) 指出，在陡波時電容式波高計的測量誤差顯著增加，同時其易受水質及電場分佈的影響，需要頻繁校正。

De Mello et al. (2013) 採用超音波感測器擷取自由表面高程，這是一種非侵入式的量測方式，以減少對波場的干擾。隨著科技的進步，超音波感測器最少擁有毫米等級的精度，並且可提供上千的採樣頻率。雖然面對陡波也會產生誤差，但在一般波形下展現高精準度，此外，維護及校準上相較其他方法方便許多，因此本文將選取超音波感測器擷取水位變化。

1.2.3 反射波提取技術

感測器擷取的水位變化包含入射波與反射波，分離出正確的反射波成分對於主動消波影響甚大，因此本節將介紹其提取技術，也會對波高計的擺放位置進行回顧。

區分入射波及反射波最經典方式為Goda and Suzuki (1976) 所提出的兩點法（兩支波高計）。在均勻水深下，兩支波高計的間距 (Δl) 不能是波長 (L) 一半的整數倍，即應避免 $\Delta l = n(L/2), n = 0, 1, 2 \dots$ ，否則數據會產生發散。將兩支波高計之波浪資料透過傅立葉轉換後，即可擷取出反射波表面高程，此種方法適用於規則與不規則波。

Christensen and Frigaard (1994) 也選用兩支波高計分離反射波，其安裝位置距



造波板 1.8 及 2.1 公尺。該篇使用傅立葉轉換得出反射波高，以電腦搭配 A/D 控制卡，將造波與消波軌跡疊合，輸出訊號至造波機。然而，此種測量方法因距離造波板較遠，波浪在傳遞過程的衰減及相位變異，會造成主動消波的誤差，可能需要斟酌擺放位置或額外處理相位問題。

Schäffer and Klopman (2000) 只使用單支波高計來擷取波形，並跟隨造波機一起移動，使其不會受相位影響。作者透過即時的實際波形 (η_{actual}) 減去目標波形 (η_{target})，提取出反射波 (η_R)，可將其稱之為消波表面高程 η_{abs} 。此方式極為容易、計算量少、控制所需時間短，適用於線性波環境的主動消波，不過無法分辨波浪的行進方向，如果波高計的位置離造波板太遠，容易錯誤預估波浪的反射大小。

Andersen et al. (2016) 使用多支波高計並考慮波高對波速的影響，優化Lin and Huang (2004) 波浪分離技術且搭配 FIR 濾波器，可以較快速的分離出束縛 (bound wave) 與自由 (free wave) 的入射及反射波。這是一種準確且全面的分離方法，適用於多數的波浪參數。不過，這類型的主動消波系統需要能夠快速回授控制系統，因此作者建議可以適當增加，量測反射波波高計與造波板之的間距離 (d_{WG})，以維持系統穩定或彌補設備的延遲，不過此距離應限制在 10 公分以內 ($d_{WG} < 10$ 公分)，避免採集數據時誤差增加。此系統被應用於多間研究機構，其也開發出商用軟體 AwaSys 6，使操作者方便使用。

1.3 市售主動消波產品簡介

目前大型市售造波機廠商，大多有配備主動消波系統於造波機上。如 HR Wallingford 公司，其透過電阻式波高計並使用自行研發之 HR DAQ 來擷取電壓變化，藉此控制造波機的運動軌跡，達到主動消波。另外，Edinburgh Designs 的造波機則是應用於英國愛丁堡大學 (Edinburgh University) 的實驗水槽，其透過應變規 (strain-gauge) 以力反饋的形式來調整造波板的運動方式。



在主動消波軟體上，包含 Akamina Technologies 所開發的 WaveGen-Studio、而上小節所提及的 AwaSys 軟體，則由丹麥奧爾堡大學 (Aalborg University) 所開發，這些軟體同時整合造波控制、資料處理與回授、主動消波等功能。不過這些開發商主要是提供軟體服務，因此相關的硬體設備，如造波機、運動控制器與波高感測器等，則由第三方合作廠商提供。

其中，在 AwaSys 網站所提供的資料顯示，造波機配備主動消波的實驗水槽，不僅可以在短時間內使水槽水面穩定，如圖1.2所示，更能夠在連續造波下，使水槽內部波浪持續維持目標波形，如圖1.3所示。由此可知，對於要求維持固定波形的水槽實驗，造波機配備主動消波系統的重要性。

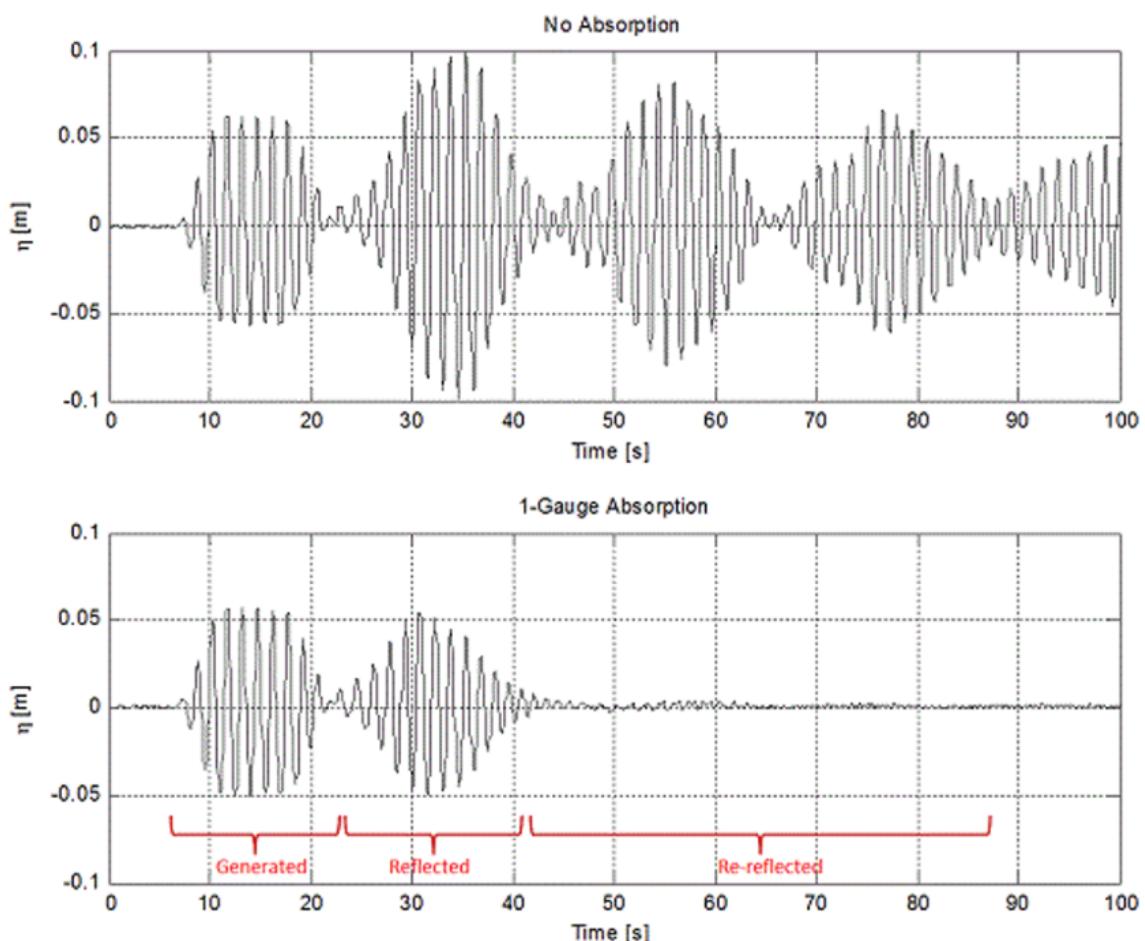


圖 1.2: 快速使水槽恆定（取自 AwaSys 官方網站）

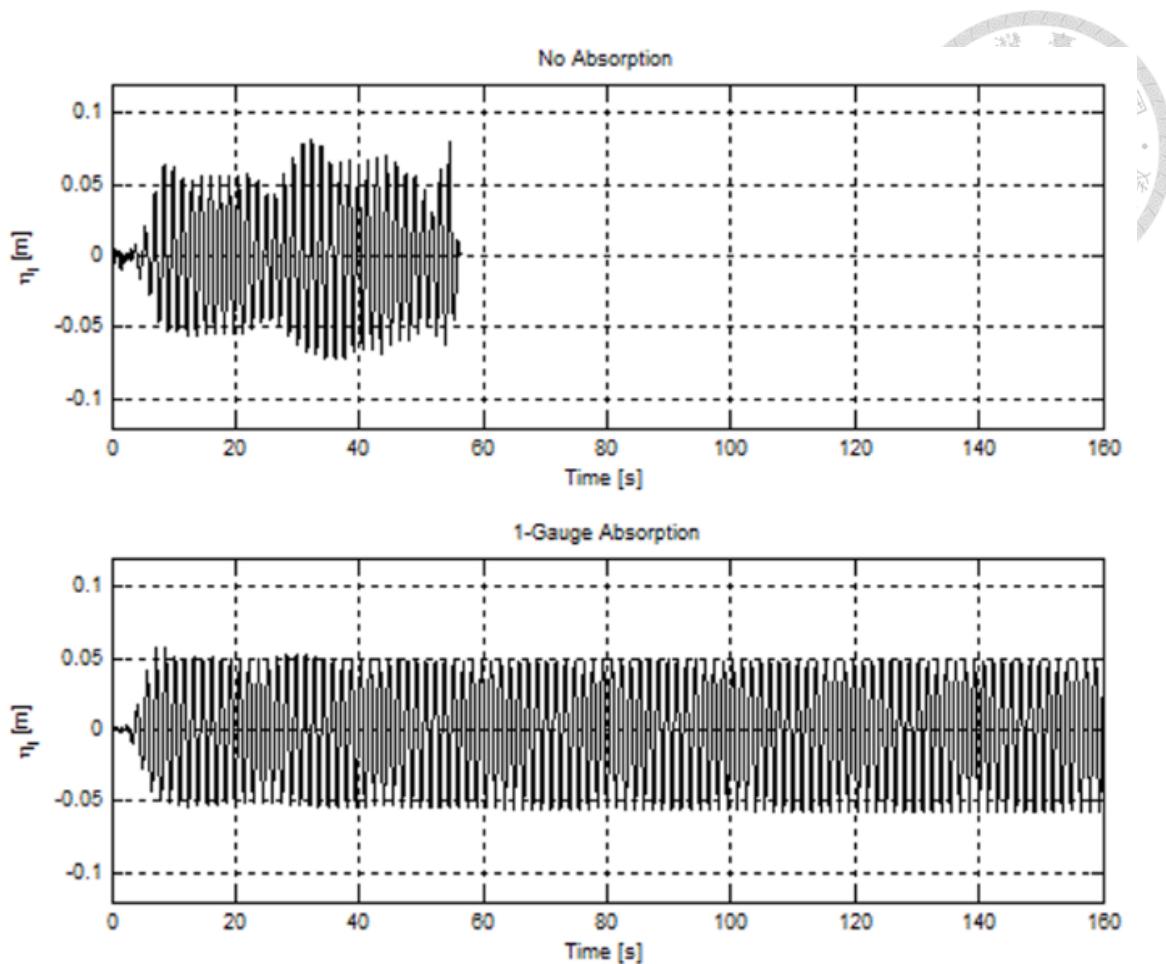


圖 1.3: 波浪在連續造波下仍維持目標波形（取自 AwaSys 官方網站）

雖然目前市面上已有多款附有主動消波之軟體或造波設備，然而本實驗室不直接採用。首先，這些開發商都有所合作之設備廠商，若整組更換無非是增加更多成本，其金額可達新台幣上百萬元。若只購買軟體，其可能無法完全契合實驗室水槽現存之硬體設備。其次，這些軟體的控制架構大多不能開源更動，將限制自行在學術上對控制邏輯與參數的研究與優化。最後，雖然直接購買成品可以快速整合主動消波於造波系統，然而實驗室本身沒有實質開發此項技術的經驗，因此後期的維護以及軟體更新將面臨額外開銷。綜上所述，本文研擬自行開發主動消波的控制系統。



1.4 研究動機與目標

被動式消波存在前述的限制，以台灣大學工學院海洋工程斷面波浪水槽末端所採用的藤棉緩坡板為例，其設計依據Hughes (1991)，建構斜率為 1/10 的緩坡結構。此外，邱信瀚 (2024) 於緩坡板上堆疊藤棉結構並使用棉繩固定，由於藤棉是可透水材質，其擺放方式僅約略參考Svendsen (1985) 所提出針對固體底床設計之拋物線方程式，

$$y = \left(\frac{M^2}{4gT^2} \right) x^2 \quad (1.1)$$

此為一條二次方程式，其中 M 為常數、 T 為波浪週期，令拋物線頂點位於靜止水面處並設 $M = 1$ ，由此式可以知，底床的架設方式會受到波浪週期的影響。然而藤棉重新綁設並不方便，且藤棉每次重新安裝均可能有微小誤差，這些變因將導致實驗不確定性，因此緩坡板上長期以特定外型架設藤棉，導致長週期的波浪消波效果較差，可參見邱信瀚 (2024)，安裝後的被動式消波裝置如圖1.4所示。除此之外，考量水槽高度為 0.5 公尺，若依坡度 1/10 設計，則斜板的長度需達 5 公尺，進一步限制有效實驗範圍。

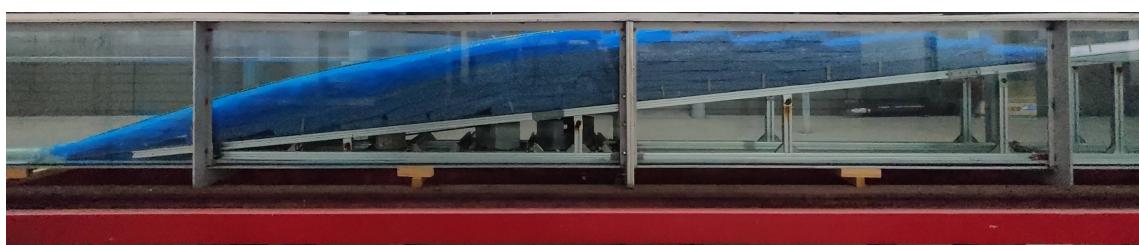


圖 1.4: 被動式消波-藤棉緩坡板部分實景

最為關鍵的是，被動式消波僅能裝設在水槽末端，無法整合於造波端。導致水槽內部結構或待測物所產生的反射波，沒辦法被有效抑制，這些反射波會多次再反射，導致場域波形混亂，與期望目標波形不符。為解決上述問題，本研究基



於1.2節之文獻回顧，考量本實驗室水槽的實際環境條件，評估加裝主動式消波系統的可行性，分析出最適合的設備配置及控制方法。而反射波提取技術將參考Schäffer and Klopman (2000) 所提出的方法，因其計算不太需要處理複雜的相位變異，以減少控制器之負擔，不過此方法之劣勢為無法分辨波浪的行進方向，因此波高計需要盡可能的離推板越近越好。最後，針對實驗室水槽建構一套初步的主動式消波系統，以消除實驗水槽中不斷再反射的波浪。

1.5 研究架構

本研究以實驗室小型造波水槽與大型造波水槽(皆為二維斷面平推式造波水槽)作為基礎，根據1.2節之文獻回顧，按部就班評估加裝主動消波系統的可行性。由小水槽試探性實驗重現主動消波的原理，再評估大水槽加裝主動消波的可行性。大水槽安裝主動消波系統前，需先針對原設備進行試驗分析，判斷原設備是否足以支持主動消波的閉迴路模式，若無法達成則提出新設備所需配置之構想。

本研究採取單支超音波感測器收集波高資訊，並以Schäffer and Klopman (2000) 的反射波提取方法為出發點，因其所需計算成本較低，雖然比較適用於線性波環境的消波，但是對於初步的主動消波可行性分析較為方便，此方法將於3.1.6.3節詳細介紹及測試。最終目標期望能找出穩定的主動消波設備，證實本實驗室大水槽加裝主動消波的可行性，設計出主動消波的回授控制系統，並完成初步實作以奠定本實驗室主動消波之基礎。



第二章 波浪理論

此章節將依序介紹本研究所使用之孤立波 (solitary wave) 與週期波 (periodic waves)。首先，於2.1.1 節說明孤立波理論架構與對應的解析解，進一步於3.1.4節探討兩種製造孤立波的方法，並針對其適用情境進行比較與總結。另一節將介紹週期波，由於其種類繁多，因應實驗需求，本文於2.2.2節將聚焦介紹 Stokes wave 理論。此外，在2.2.3節也會敘述週期波之造波理論。

2.1 孤立波

孤立波是一種具代表性的非線性波浪，主要特徵為僅具單一波峰，在固定水深傳播過程中維持穩定的波形與速度，不太會隨時間演進而產生顯著變形或能量衰減，其波形如圖2.1所示。此類平移波最早可追溯至 1834 年，由 John Scott Russel 首次記錄，孤立波自此成為流體力學與海洋工程中重要的研究對象，廣泛應用於海嘯與其他極端海洋事件之模擬。

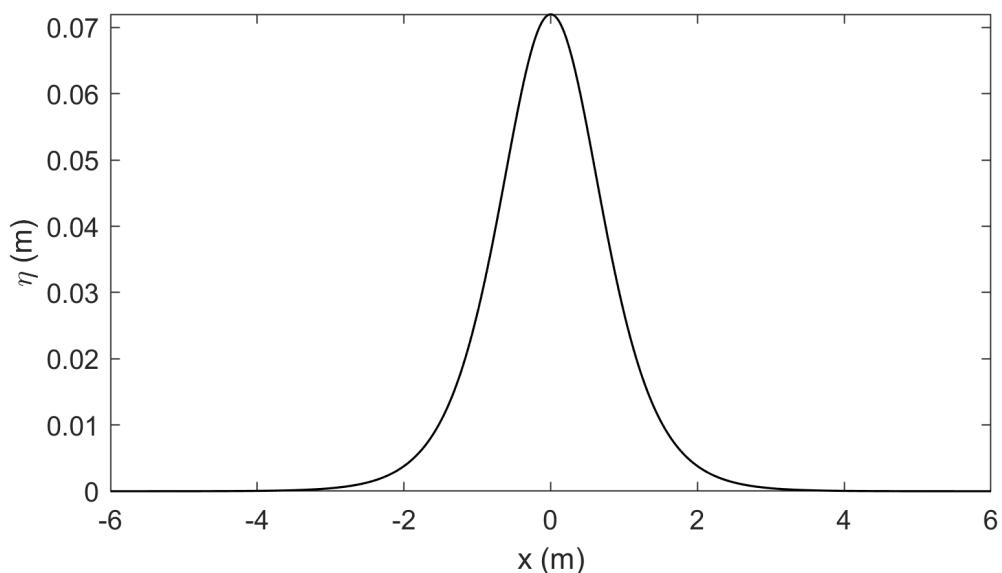


圖 2.1: 孤立波示意圖



2.1.1 理論與解析解

Boussinesq 於 1872 年提出弱非線性且弱頻散效應的波浪理論，為非線性波研究奠定基礎。隨後，Diederik Korteweg 與 Gustav de Vries 於 1895 年推導出 Korteweg-de Vries(KdV) 方程式，用以描述具有穩定波形之孤立波解。該方程式之一階解析解可表示為：

$$\eta_{sol}(x, t) = H_{sol} \operatorname{sech}^2(k_B(x - c_{sol}t)), \quad (2.1)$$

其中 η_{sol} 為孤立波自由表面高程、 H_{sol} 為孤立波的目標波高、 k_B 為 Boussinesq-type 的波數 (wave number)，其可表示為：

$$k_B = \sqrt{\frac{3H_{sol}}{4h_0^3}}, \quad (2.2)$$

其中 h_0 為恆定水深，另外式 2.1 中的 c_{sol} 代表孤立波波速，其可表示為：

$$c_{sol} = \sqrt{g(H_{sol} + h_0)}, \quad (2.3)$$

嚴格而言孤立波具有無限波長，然而為利於量化與實驗分析，實務上常定義其有效波長 λ 作為孤立波之近似波長：

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_B}, \quad (2.4)$$

因此孤立波的有效週期定義為：

$$T_{sol} = \frac{\lambda}{c_{sol}}, \quad (2.5)$$



另外，孤立波的非線性參數 ϵ 用來描述孤立波的大小，本身即為無因次。當非線性參數越大，波峰會變得更尖銳，同時波速也會因而提高。其定義如下：

$$\epsilon = \frac{H_{sol}}{h_0}. \quad (2.6)$$

KdV 方程對於小振幅且固定水深條件下擁有良好的孤立波傳播近似。然而孤立波常伴隨較高的非線性效應，此時一階近似無法充分描述波形演化與傳播特性。因此本研究以Grimshaw (1970) 提出之高階孤立波解析解作為基準，後續實驗所製造出的孤立波將與其進行對比。根據Liu et al. (2007) 之整理，考慮有一孤立波在 h_0 之恆定水深下傳播，其目標波高 H_{sol} 由式2.6而得，有效波長 λ 由式2.4計算可知。由於後續計算採用無因次形式，故以下所列參數均以上標 (*) 表示其對應之無因次量，相關定義如下：

$$x^* = \frac{x}{\lambda}, \quad t^* = \frac{\sqrt{gh_0}t}{\lambda}, \quad \eta^* = \frac{\eta_{sol}}{H_{sol}}, \quad h_0^* = \frac{h_0}{\lambda}, \quad (2.7)$$

在不考慮黏度下，三階孤立波解析解如下所示：

$$\eta^* = S_1^2 - \frac{3}{4}\epsilon S_1^2 S_2^2 + \epsilon^2 \left(\frac{5}{8}S_1^2 S_2^2 - \frac{101}{80}S_1^4 S_2^2 \right), \quad (2.8)$$

其中 S_1 與 S_2 之無因次參數定義如下：

$$S_1 = \operatorname{sech} \left(\frac{S_3}{h_0^*} (x^* - S_4 t^*) \right), \quad (2.9)$$

$$S_2 = \tanh \left(\frac{S_3}{h_0^*} (x^* - S_4 t^*) \right), \quad (2.10)$$



而 S_3 與 S_4 之無因次參數為：

$$S_3 = \sqrt{\frac{3\epsilon}{4}} \left(1 - \frac{5}{8}\epsilon + \frac{71}{128}\epsilon^2 \right), \quad (2.11)$$

$$S_4 = \sqrt{1 + \epsilon - \frac{1}{20}\epsilon^2 - \frac{3}{70}\epsilon^3}. \quad (2.12)$$

2.1.2 平推式造波理論

孤立波在平推式實驗水槽生成的技術隨著時間逐步演進。早期的造波方式如Goring and Raichlen (1980)，為最經典生成孤立波的方法。其雖具備實作簡便的優點，但在實驗室所生成之孤立波波高與解析解存在差距。為解決上述問題，Malek-Mohammadi and Testik (2010) 提出一套新的孤立波生成方法，具有波形穩定性高，可以應用於常見的平推式實驗水槽等特點。

實驗室原先採用Goring and Raichlen (1980)提出的方法產生孤立波，然而如前段所述，Malek-Mohammadi and Testik (2010)提出之新型造波技術在波形穩定性上具有更佳表現。因此，本文將於第 3.1.4 節中深入探討上述兩種造波方法之理論與實作差異，並綜合其適用條件進行歸納，作為後續實驗製造孤立波之依據。

2.1.2.1 波數種類

為求精簡，本文後續將Goring and Raichlen (1980) 的造波方法統稱為「GM」，而Malek-Mohammadi and Testik (2010) 提出之新型造波技術統稱為「MMTM」。此外，孤立波生成過程中另一項關鍵參數為波數 k_{sol} ，其常見定義可分為兩類，第一種為 Boussinesq-type，即先前提到的式2.2，本文稱之為 k_B ；另一種為 Rayleigh-type，在此稱為 k_R ，其公式如下：



$$k_R = \sqrt{\frac{3H_{sol}}{4h_0^2(H_{sol} + h_0)}}, \quad (2.13)$$

GM 與 MMTM 兩種造波方法之孤立波波數 k_{sol} 可任意搭配這兩種形式的波數，進而改變造波軌跡，使所生成之孤立波在特徵上呈現若干微小差別。

2.1.2.2 造波軌跡

GM 之造波軌跡 ξ_{GM} 如圖2.2所示，其公式如下：

$$\xi_{GM}(t) = \frac{H_{sol}}{k_{sol}h_0} \tanh(k_{sol}(c_{sol}t - \xi_{GM})), \quad (2.14)$$

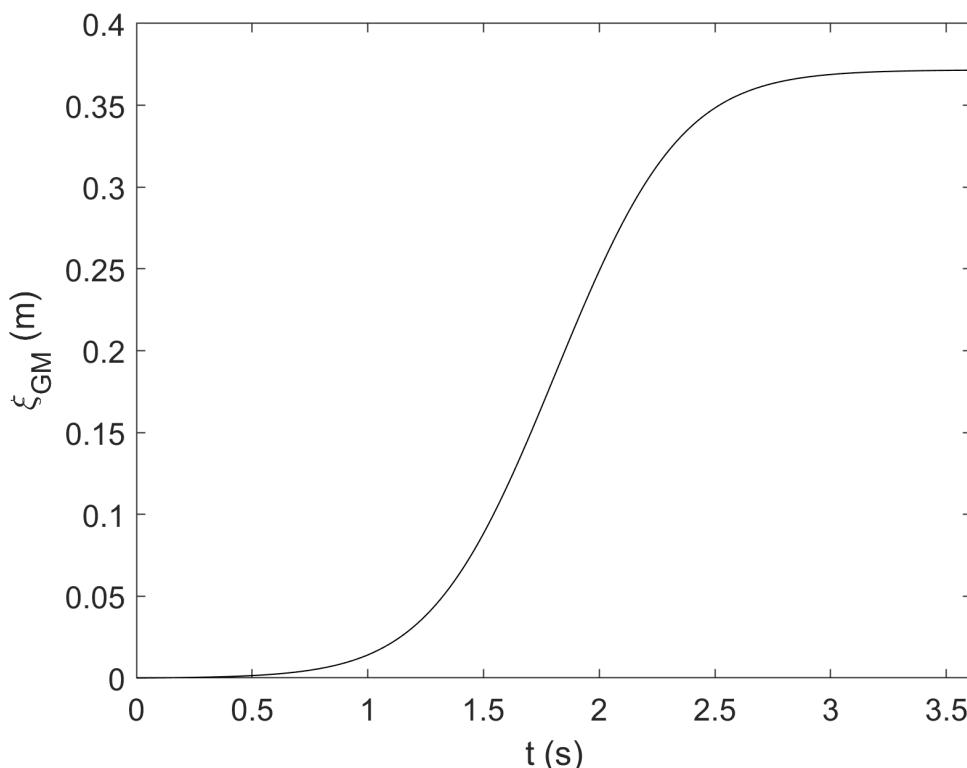


圖 2.2: GM 造波軌跡示意圖（搭配 k_B ）

其中孤立波目標波高 H_{sol} 可由2.6而得，波速 c_{sol} 由式2.3計算。而造波總時長以 t_{wm} 表示，其公式如下：



$$t_{wm} = \frac{2}{k_{sol}c_{sol}} \left(3.80 + \frac{H_{sol}}{h_0} \right), \quad (2.15)$$

造波推板必須在此時間內完成式2.14計算出的造波軌跡。此外，其一次完整造波過程中之移動距離 S_{sol} ，亦可由下式計算，該距離即為造波推板之孤立波衝程(stroke)：

$$S_{sol} = \frac{2H_{sol}}{k_{sol}h_0} = \sqrt{\frac{16}{3} \frac{H_{sol}}{h_0}} h_0. \quad (2.16)$$

新造波方式 MMTM，將造波速度 μ_1 積分即可求得軌跡 ξ_{MMTM} 如圖2.3所示，

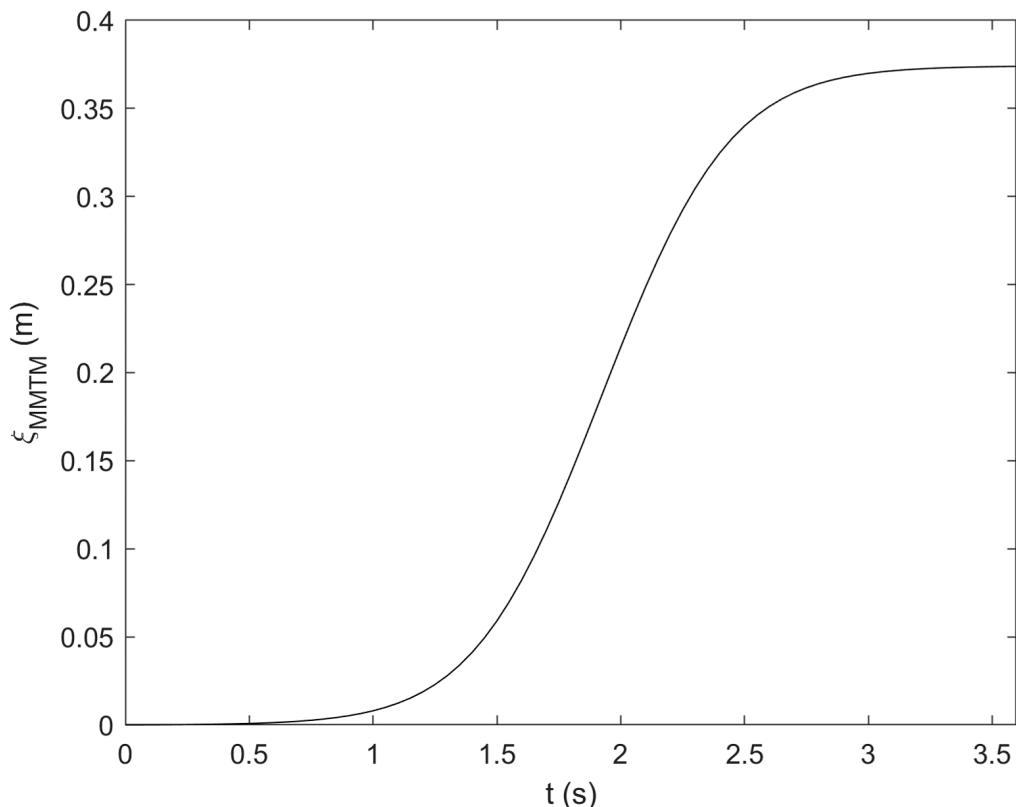


圖 2.3: MMTM 造波軌跡示意圖 (搭配 k_B)

其公式如下：

$$\mu_1 = \frac{d\xi_{MMTM}}{dt} = \sqrt{g \frac{\eta_1}{h_0} \left(h_0 + \frac{\eta_1}{2} \right) \left(\frac{\eta_1}{h_0 + \eta_1} \right)}, \quad (2.17)$$



其中 η_1 形式如下：

$$\eta_1 = H_{sol} \operatorname{sech}^2(k_{sol}(c_{sol} t - \xi_{MMTM})), \quad (2.18)$$

本文透過有限差分法將式2.17進行離散化，得以在每一個時間步長 (dt) 內逐步計算出對應之造波軌跡 ξ_{MMTM} 。

由於 MMTM 的波數也是搭配 k_B 或 k_R ，因此其對應之造波板總移動時間 t_{wm} 與移動距離 S_{sol} 分別和式2.15及2.16相同。兩種孤立波造波方式的造波結果分析，詳請參見3.1.4節。

2.2 週期波

週期波因易於重現及校正，因此常為海洋工程研究之對象。在實驗水槽中，可透過調整目標波高 (H_{per})、週期 (T) 及水深 (h_0) 等參數，藉此製造出不同週期性的波況。然而週期波涵蓋範圍廣大，在不同參數組合下，其對應的解析解亦有所不同。因此，本文將依據實驗需求，針對特定類型之週期波進行介紹。

2.2.1 波況與種類

不論在實驗水槽或是數值模擬，選擇合適的波浪理論作為基礎相當重要，以確保實驗結果或數值分析之準確性。最早的波浪理論指引為Le Méhauté (1976) 提出，此文獻整理週期波中 Stokes wave 與 cnoidal wave 理論的適用範圍圖，其被廣為引用至今。不過Le Méhauté (1976) 也自行指出，該張適用範圍圖的理論尚未在各自適用範圍內進行誤差量化分析，在劃分各階上缺乏明確的定義。

為了量化Le Méhauté (1976) 的各階適用範圍圖，近期Zhao et al. (2024) 透過嚴謹的週期波解析解來重製適用範圍圖，提供各階準確的劃分依據，其中階數大小是根據解中所包含的最高諧波 (harmonic) 來定義。該文獻提出可以透過 U_r 數



(Ursell number) 來衡量波浪中非線性效應與頻散關係，藉此判斷週期波波況屬於 Stokes wave 或 cnoidal wave， U_r 數的公式定義如下：

$$U_r = \frac{\frac{H_{per}}{L}}{\left(\frac{h_0}{L}\right)^3}, \quad (2.19)$$

其中 H_{per} 週期波目標波高、 L 為週期波波長、 h_0 為水槽恆定水深。而 L 的定義如下：

$$L = \frac{2\pi}{k_{per}}, \quad (2.20)$$

其中 k_{per} 為週期波的波數，其求解方法將於2.2.2節詳細敘述。

作者以 $Ur = 26$ 作為判斷 Stokes wave 或 cnoidal wave 理論適用性的界線。其中， $Ur > 26$ 時波浪偏向非線性，較適合以 cnoidal wave 描述；反之， $Ur < 26$ 時波浪則呈現較強的頻散關係，較符合 Stokes wave 理論。另外，Zhao et al. (2024) 也在 cnoidal wave 中多定義出不同階數的分界線。

為了方便實驗測試與觀察，本研究研擬選用週期適中且波高不要太小的週期波，再以Zhao et al. (2024) 改進後的適用範圍做為參考，接著就能計算出後續實驗可以使用的波況。本文最後選擇中間水深的 Stokes wave，詳細波浪參數如表2.1所示。在圖2.4中，圓橘點為小水槽所使用的波浪參數計算結果、方綠點為大水槽所使用的波浪參數計算結果。



表 2.1: 週期波波浪參數表

類別	小型造波水槽 (圓橘點)	大型造波水槽 (方綠點)
週期 T (s)	0.85	1
目標波高 H_{per} (m)	0.009	0.04
水槽恆定水深 h_0 (m)	0.05	0.36

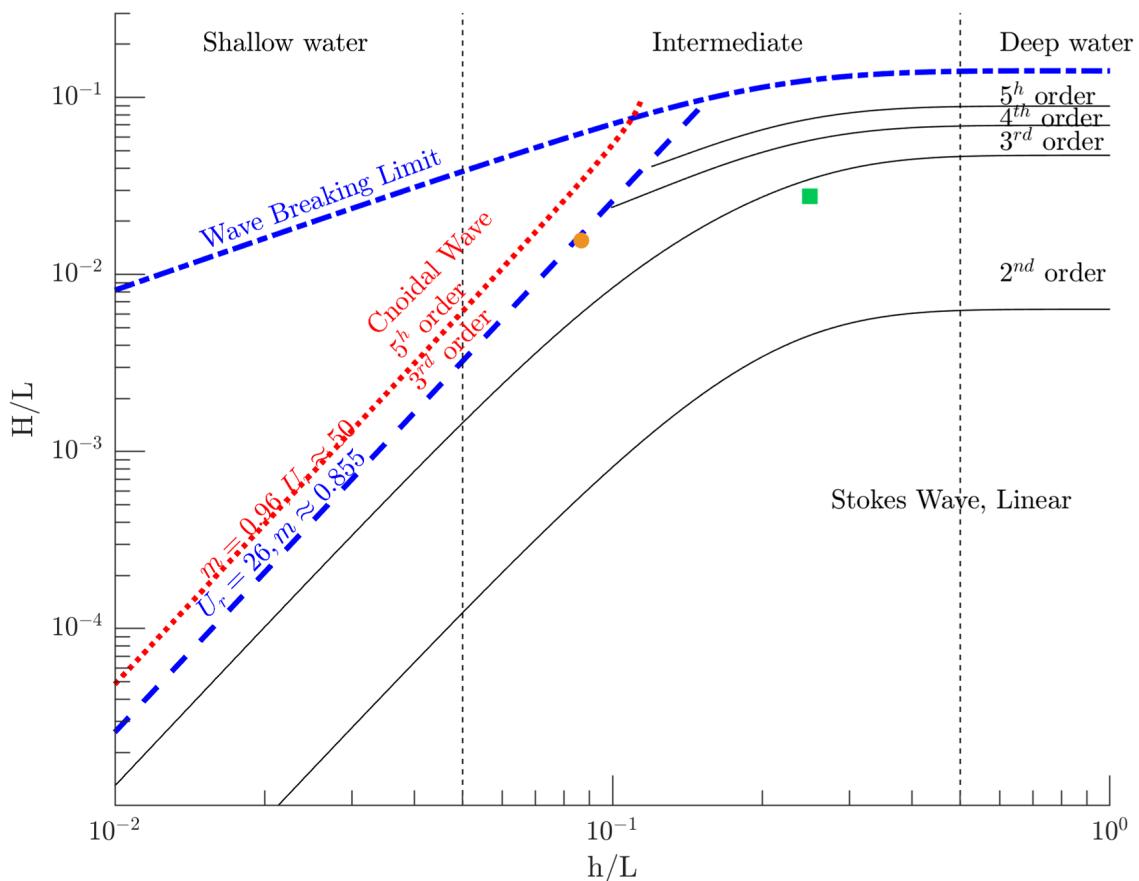


圖 2.4: 使用 Zhao et al. (2024) 改良之適用範作圖（圓橘點：小型造波水槽、方綠點：大型造波水槽）

經過圖2.4分析，實驗所選擇的波況皆為高階 Stokes wave，因此接續的小節將針對 Stokes wave 理論進行詳細的介紹。



2.2.2 Stokes wave 理論

Stokes (1847) 提出一種描述有限振幅波浪的方法，其考慮波峰比波谷高的現象，使之更貼近真實波浪，後來稱為 Stokes wave 理論。隨著理論的精進，學界陸續提出更高階的 Stokes wave 理論，近期 Zhao and Liu (2022) 重新推導並改良相關理論，借助 MATLAB 來計算出最高至五階的 Stokes wave 解析解，其可以由下列方程式表示：

$$\frac{\eta_{per}}{a} = \sum_{i=1}^5 A_i + O\left[\left(\frac{\pi H_{per}}{L}\right)^6\right], \quad (2.21)$$

其中 η_{per} 為週期波表面高程、 a 為週期波振幅。由於求解中為高階 Stokes wave， a 不再是 H_{per} 的一半，而是由下式表示：

$$H_{per} = 2a \left(1 + (B_{31} + B_{33}) k_{per}^2 a^2 + (B_{51} + B_{53} + B_{55}) k_{per}^4 a^4\right), \quad (2.22)$$

其中係數 B_{ij} 可參考式2.29所示。不過可以發現式2.22中包含 a 及週期波波數 k_{per} ，因此需搭配下方頻散關係式一起求解：

$$\omega = \omega_0 \left(1 + k_{per}^2 a^2 \omega_2 + k_{per}^4 a^4 \omega_4\right), \quad (2.23)$$

而係數 ω_i 為：



$$\begin{aligned}\omega_0 &= \sqrt{gk\sigma}, \\ \omega_2 &= \frac{2\beta^2 + 7}{4(\beta - 1)^2}, \\ \omega_4 &= \frac{20\beta^6 + 132\beta^5 + 20\beta^4 - 184\beta^3 - 243\beta^2 - 11\beta + 428}{32(\beta - 1)^5(\beta + 1)},\end{aligned}\tag{2.24}$$

又 β 及 σ 可表達為以下：

$$\beta = \cosh(2k_{per}h_0), \quad \sigma = \tanh(k_{per}h_0).\tag{2.25}$$

另外，式2.23之 ω 為週期波的角頻率，可由給定之波浪週期 T 並搭配下式計算得到：

$$\omega = \frac{2\pi}{T},\tag{2.26}$$

因此，由式2.22及式2.23聯立求解，即可計算出 a 與 k_{per} 。回到式2.21中， O 為高階誤差項，當值很小時可忽略不計，而 A_i 為一至五階的參數，如下所示：

$$A_1 = \cos \theta,$$

$$A_2 = k_{per}aB_{22} \cos 2\theta,$$

$$A_3 = k_{per}^2 a^2 (B_{31} \cos \theta + B_{33} \cos 3\theta),\tag{2.27}$$

$$A_4 = k_{per}^3 a^3 (B_{42} \cos 2\theta + B_{44} \cos 4\theta),$$

$$A_5 = k_{per}^4 a^4 (B_{51} \cos \theta + B_{53} \cos 3\theta + B_{55} \cos 5\theta),$$

其中 θ 為波的相位函數，可表示為：

$$\theta = k_{per}x - \omega t + \psi,\tag{2.28}$$



又 ψ 為波浪的初始相位。另外，在式2.22與2.27中的 B_{ij} 如下所示：

$$\begin{aligned}
 B_{22} &= \frac{3 - \sigma^2}{4\sigma^3}, \\
 B_{31} &= \frac{3 + 8\sigma^2 - 9\sigma^4}{16\sigma^4}, \\
 B_{33} &= \frac{27 - 9\sigma^2 + 9\sigma^4 - 3\sigma^6}{64\sigma^6}, \\
 B_{42} &= \frac{60\beta^6 + 232\beta^5 - 118\beta^4 - 989\beta^3 - 607\beta^2 + 352\beta + 260}{24(3\beta + 2)(\beta - 1)^4 \sinh 2kh}, \\
 B_{44} &= \frac{24\beta^6 + 116\beta^5 + 214\beta^4 + 188\beta^3 + 133\beta^2 + 101\beta + 34}{24(3\beta + 2)(\beta - 1)^4 \sinh 2kh}, \\
 B_{51} &= \frac{121\beta^5 + 263\beta^4 + 376\beta^3 - 1999\beta^2 + 2509\beta - 1108}{192(\beta - 1)^5}, \\
 B_{53} &= \frac{9(57\beta^7 + 204\beta^6 - 53\beta^5 - 782\beta^4 - 741\beta^3 - 52\beta^2 + 371\beta + 186)}{128(\beta - 1)^6(3\beta + 2)}, \\
 B_{55} &= \frac{5(300\beta^8 + 1579\beta^7 + 3176\beta^6 + 2949\beta^5 + 1188\beta^4 + 675\beta^3 + 1326\beta^2 + 827\beta + 130)}{384(\beta - 1)^6(12\beta^2 + 11\beta + 2)}. \tag{2.29}
 \end{aligned}$$

最後，將上述各式中的計算結果代入式2.21，即可求得 Stokes wave 一至五階的解析解。

2.2.3 線性造波理論

線性週期波之造波理論可追溯至 1960 年代，Dean and Dalrymple (1991) 對該理論進行系統化的整理，建立廣為引用的理論架構。因此，本文接下來將參照其所彙整之推導過程，對線性造波理論進行詳細介紹。首先，假設造波板在水平 x 方向上的簡諧運動為：

$$x = \xi_{1st}(z, t) = \frac{S_{per}(z)}{2} \sin(\omega t), \tag{2.30}$$

其中水平方向上的簡諧運動可視為線性造波板之軌跡 ξ_{1st} 、 z 為垂直水面方向的方
向座標，位於靜止水面時 $z = 0$ 且向下為負、 S_{per} 為造波板在製造週期波時的最



大位移、 ω 為週期波角頻率，可由式2.26求得。

波浪的速度勢可分為兩部分：

$$\phi(x, z, t) = \phi_1(x, z, t) + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{2,n}(x, z, t), \quad (2.31)$$

其中 ϕ_1 為主波，可以向遠處傳播、 $\phi_{2,n}$ 為漸消波 (evanescent waves)，這部分不會傳播，只會在靠近造波板的地方存在並隨 x 增加而迅速衰減。其各自之方程式如下：

$$\phi_1 = A_{\text{WM}} \cosh(k_{\text{WM}}(h_0 + z)) \sin(k_{\text{WM}}x - \omega t), \quad (2.32)$$

$$\phi_{2,n} = B_{\text{WM},n} e^{-k_n x} \cos(k_n(h_0 + z)) \cos(\omega t), \quad (2.33)$$

可以發現式2.33確實在空間中因 $e^{-k_n x}$ 而流逝。其中 A_{WM} 與 $B_{\text{WM},n}$ 如下所示：

$$A_{\text{WM}} = \frac{\int_{-h_0}^0 \frac{s_{\text{per}}(z)}{2} \omega \cosh(k_{\text{WM}}(h_0 + z)) dz}{k_{\text{WM}} \int_{-h_0}^0 \cosh^2(k_{\text{WM}}(h_0 + z)) dz}, \quad (2.34)$$

$$B_{\text{WM},n} = \frac{-\int_{-h_0}^0 \frac{s_{\text{per}}(z)}{2} \omega \cos(k_n^*(h_0 + z)) dz}{k_n^* \int_{-h_0}^0 \cos^2(k_n^*(h_0 + z)) dz}, \quad (2.35)$$

回到式2.32及式2.33中， h_0 為水槽恆定水深、 k_{WM} 為造波板的波數、 k_n 為漸消波波數，這兩種波數皆可由線性頻散關係式求得：

$$\omega^2 = g k_{\text{WM}} \tanh(k_{\text{WM}} h_0) = -g k_n \tanh(k_n h_0), \quad (2.36)$$



因此，自由表面高程 η 可表示為：

$$\begin{aligned}\eta &= -\frac{1}{g} \left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{z=0} \\ &= \frac{\omega}{g} A_{WM} \cosh(k_{WM} h_0) \cos(k_{WM} x - \omega t) + \frac{\omega}{g} \sum_{n=1}^{\infty} B_{WM,n} e^{-k_n x} \cos(k_n h_0) \sin(\omega t).\end{aligned}\quad (2.37)$$

造波板的種類大致可以分為平推式 (piston-type) 與拍打式 (flap-type)，在平推式中造波板整體會一起移動，而拍打式則是固定一端點使另一端不斷拍打水面。由於實驗室的大、小水槽皆裝設平推式造波機，因此接下來將針對線性平推式的造波方法進行推導。因為平推式造波機的推板是同時垂直水面作動，所以可以直接令 $z = 0$ ，並使用式2.30來計算線性造波板軌跡 ξ_{1st} ，且式2.34及2.35可被推導為：

$$A_{WM} = 2 \frac{S_{per}\omega}{k_{WM}} \left(\frac{\sinh(k_{WM} h_0)}{\sinh(2k_{WM} h_0) + 2k_{WM} h_0} \right), \quad (2.38)$$

$$B_{WM,n} = -2 \frac{S_{per}\omega}{k_n} \left(\frac{\sin(k_n h_0)}{\sin(2k_n h_0) + 2k_n h_0} \right), \quad (2.39)$$

且週期波遠場之目標波高 H_{per} 與造波板最大位移 S_{per} 的關係式如下：

$$\frac{H_{per}}{S_{per}} = 4 \frac{\sinh^2(k_{WM} h_0)}{\sinh(2k_{WM} h_0) + 2k_{WM} h_0}. \quad (2.40)$$

最後，將式2.40求解出的 S_{per} 代入式2.30，即可得到隨時間變化之線性造波軌跡 ξ_{1st} 。



2.2.4 平推式二階造波理論

在實驗水槽造波時，如果只使用線性造波理論，雖然可以產生穩定的主波向遠處傳遞，不過無法表現出真實水域可能會產生的非線性效應，也因為在後續實驗中皆使用到高階 Stokes wave。因此，本研究引用 Madsen (1971) 所延伸的造波理論，其推導之二階造波軌跡 ξ_{2nd} 如下：

$$\xi_{2nd} = \xi^{(1)} + \xi^{(2)} = -\xi_0 \left(\cos(\omega t) + \frac{1}{2} \frac{a}{h_0} \frac{1}{N} \left(\frac{3}{4 \sinh^2(k_{WM} h_0)} - \frac{N}{2} \right) \sin(2\omega t) \right), \quad (2.41)$$

其中 ξ_{2nd} 為一階與二階理論相加而得、 ω 為週期波角頻率，可由式2.26求得、 a 為週期波振幅、 h_0 為水槽恆定水深、 k_{WM} 為造波板波數，可由式2.36計算出來、而係數 ξ_0 可由下式表示：

$$\xi_0 = \frac{Na}{\tanh(k_{WM} h_0)}, \quad (2.42)$$

其中式2.41與式2.42中的係數 N 可表示為：

$$N = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_{WM} h_0}{\sinh(2k_{WM} h_0)} \right). \quad (2.43)$$

最後，在造波前只需要給定 h_0 、 a 、週期 T 、 g 四個參數，並代入式2.41，即可求得隨時間變化之二階造波軌跡 ξ_{2nd} 。



第三章 實驗設備與可行性分析



本章將詳述實驗室內小型與大型二維斷面平推式造波水槽之相關設備與軟體，並基於現有軟硬體架構進行主動消波原理之測試。隨後，將評估主動消波閉迴路系統於原設備中應用的可行性，若原設備無法滿足需求，將提出新設備所需配置之建議。

3.1 小型造波水槽

在裝設複雜及高穩定的主動消波系統前，先以實驗室小型造波水槽進行可行性實驗。此水槽為二維斷面水槽，水槽可使用區域總長 2.2 公尺，寬 0.2 公尺，側壁高度及厚度分別為 0.25 公尺與 0.015 公尺，水槽底部鋪有玻璃基板。水槽左右兩端各架設一組造波（消波）機構，於3.1.1節詳盡介紹。此外，小水槽配有兩支超音波感測器，將在3.1.3節陳述。小水槽的側面及俯視示意圖如圖3.1所示，實際樣貌如圖3.2所示。

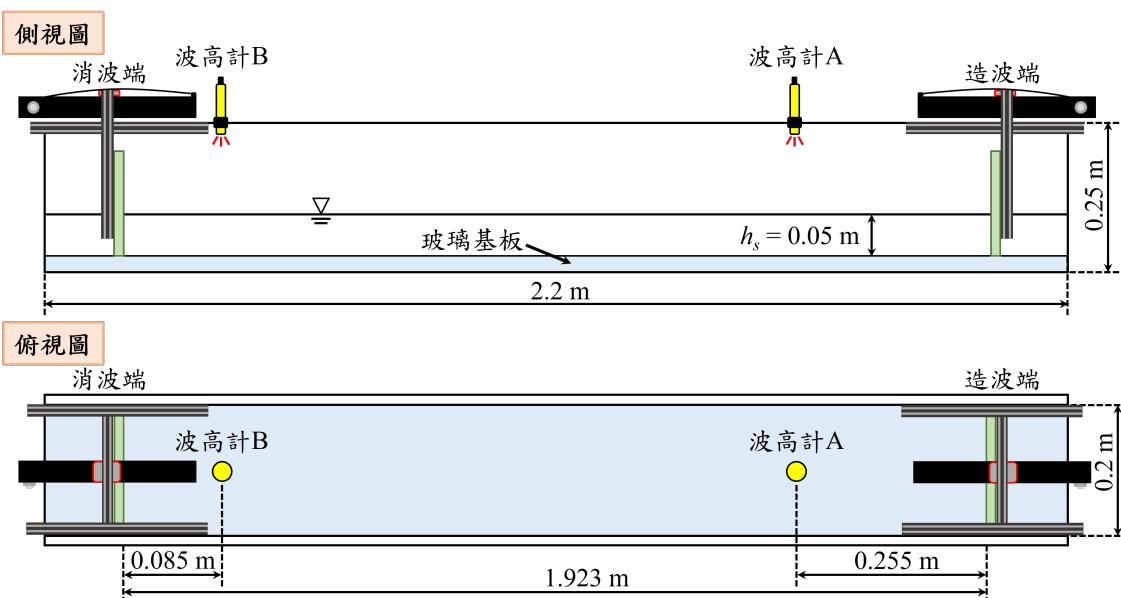


圖 3.1: 小型造波水槽示意圖（未依實際比例繪製）

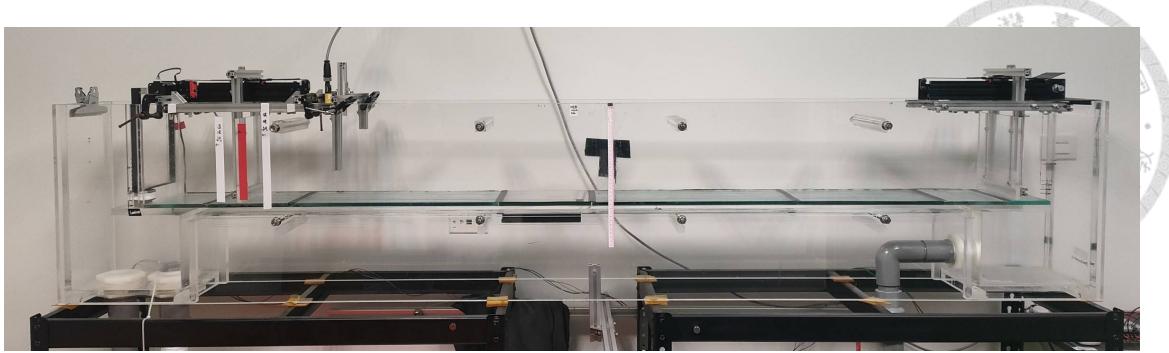
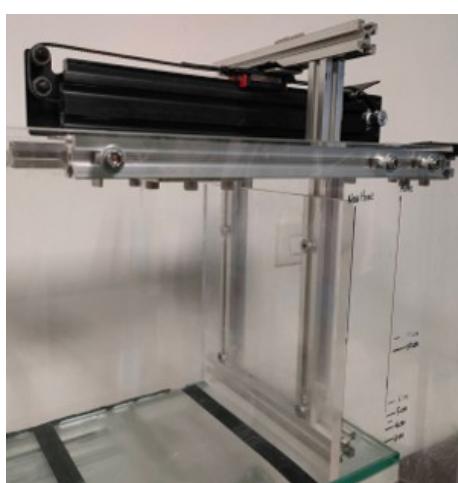


圖 3.2: 小型造波水槽實景

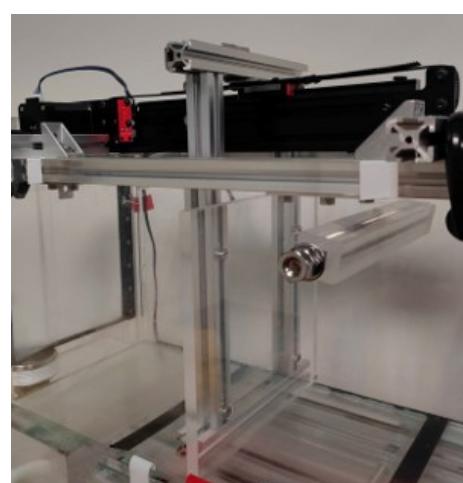
3.1.1 造波與消波機構

水槽右端之造波機由楊婉青 (2023) 所建置，因後續實驗需求，本研究在水槽左端複刻與右端相似之造波機構，本文以下將右端造波機構稱為造波端，左端造波機構稱為消波端。滑台之有效行程皆為 0.2 公尺，馬達以同步輪帶動間格為 2 毫米之皮帶，使厚度為 0.01 公尺的推板能夠任意移動。

由於水槽規模較小且整體機構重量不超過三公斤，本研究選用鋁擠型材料作為承載滑台結構之框架，該框架透過螺絲與 C 型夾固定於小水槽側壁，提供高剛性與穩定性，足以支撐機構於造波過程中之運動。除此之外，造波推板結合水平方向與兩支垂直方向之鋁擠結構進行固定，藉此確保推水過程中板面受力均勻，並維持其穩定垂直於水面。造、消波機構近照如圖3.3a、圖3.3b所示。



(a) 造波機構 (水槽右端)



(b) 消波機構 (水槽左端)

圖 3.3: 造波與消波機構

兩機構只有馬達型號略有差異，造波端使用 42HS60 步進馬達，其額定電流為 1.2 安培，如圖3.4a所示。消波端選用 42BYGH60 步進馬達，其額定電流為 1.5 安培，如圖3.4b所示。42BYGH60 步進馬達的性能皆高於原款 42HS60 步進馬達，如表3.1所示，且經實測馬達的略為差異並不影響所產生的孤立波形，詳請參見3.1.5節。



(a) 42HS60 步進馬達

(b) 42BYGH60 步進馬達

圖 3.4: 造波端與消波端之步進馬達（取自祥貿科技企業有限公司官網）

表 3.1: 步進馬達規格表

步進馬達型號	42HS60	42BYGH60
步距角 (step angle)		1.8°
額定電壓	12~24 (V)	
軸心	5 (mm)	
額定電流	1.2 (A)	1.5 (A)
最大靜力矩	0.5 (N·m)	0.7 (N·m)
保持轉矩 (Holding Torque)	0.6 (N·m)	0.8 (N·m)



3.1.2 運動控制設備

兩端步進馬達皆由電腦主控，透過 Arduino Mega2560 的編譯，發送高低電壓差至步進馬達控制器，帶動馬達移動，使推板產生物目標波形。Arduino Mega2560 為一款中階的開發板，採用 ATmega2560 微控制器，具備大量輸入及輸出腳位，包括 54 個數位腳位與 16 個類比輸入腳位，可用於整合多組感測器或其他小裝置。此外，本系統之 12 伏特直流電皆由 LRS-350-12，明緯電源供應器所提供之輸出對象包含步進馬達控制器及超音波感測器。然而經過試驗，發現單片 Arduino Mega2560 不足以同時處理兩組馬達之訊號，容易因相互干擾致使造波不穩定。因此，本研究採用兩片 Arduino Mega2560 獨立控制各自對應之馬達，並透過 I2C(Inter-Integrated Circuit) 通訊協定作為主、從裝置間的溝通媒介，以確保系統時間序列一致，使兩組控制器得以同步啟動，達成整體操作的一致性，小型造波水槽之運動控制設備如圖 3.5 所示。

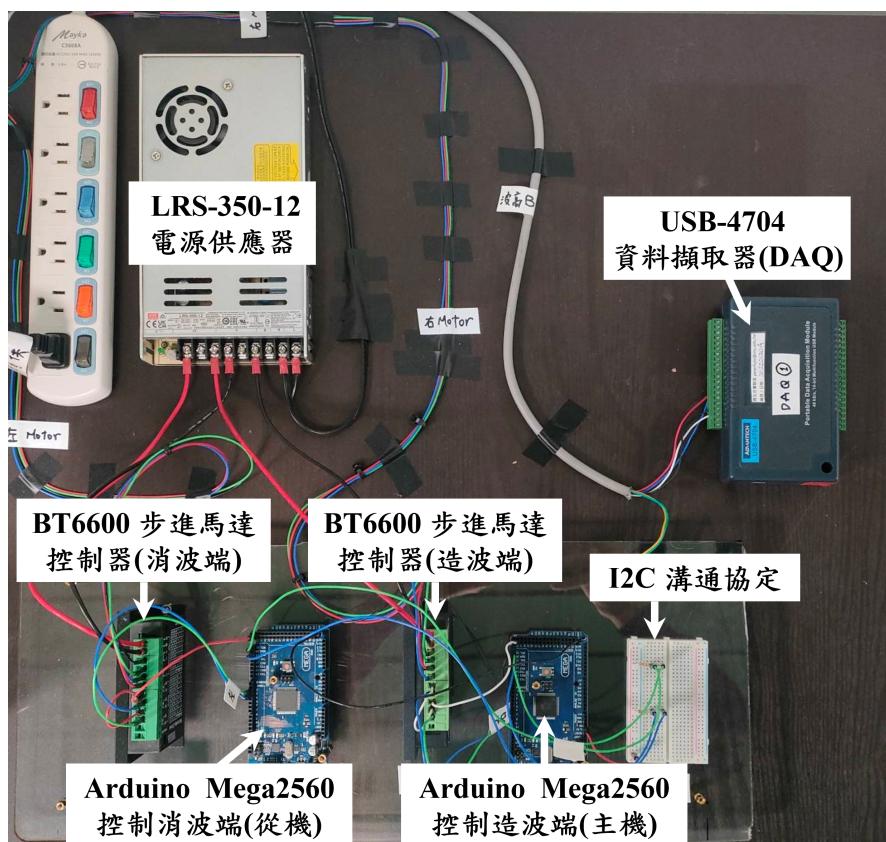


圖 3.5: 小型造波水槽運動控制設備

I2C 通訊協定由 Philips 公司於 1980 年代所提出的雙線式序列通訊協定，廣泛應用於短距離裝置間的資料傳輸。其通訊僅需兩條訊號線，分別為資料線 (SDA, Serial Data Line) 與時脈線 (SCL, Serial Clock Line)，其中時脈訊號由主裝置產生，用以同步資料的傳輸。另外，建議將 I2C 的資料線與時脈線分別接至 Arduino Mega2560 之 5V 腳位，並於兩條訊號線上串接上拉電阻，以確保在未傳輸資料時，線路維持於高電位狀態，有助於抵抗通訊干擾，如圖3.6所示。I2C 採用主從架構 (master-slave architecture)，由主裝置負責啟動與控制通訊流程，而每個從裝置皆具備唯一的位址，用以識別並響應主裝置的指令。此協定的最大優勢在於其線路簡潔，能於同一匯流排上整合多個裝置，降低硬體複雜度與佈線成本。

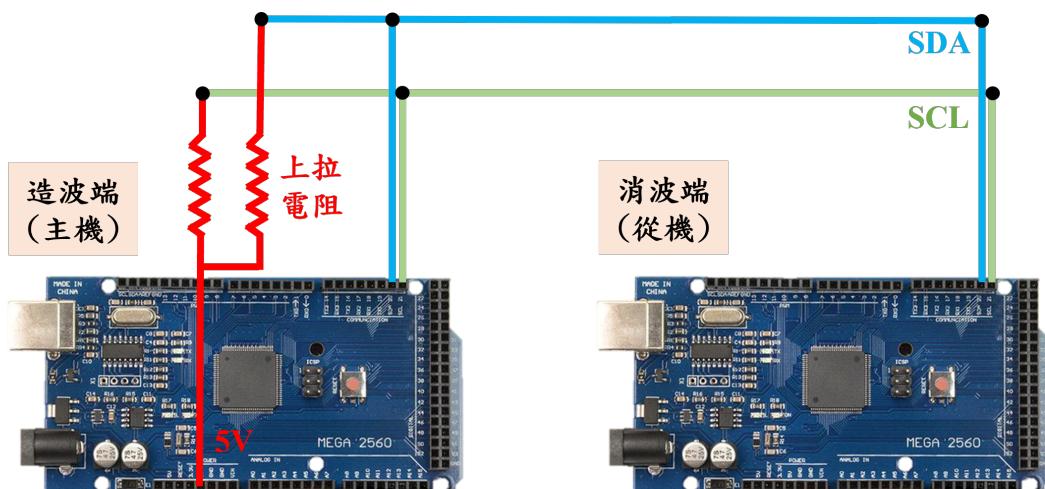


圖 3.6: I2C 連接配置圖

3.1.3 超音波感測器

本研究使用 Banner S18UUAQ 超音波感測器作為波高量測之設備，其能夠穩定偵測各種材質的物體，包括透明面或反光表面，感測器本體採用 M18 圓柱型螺紋外殼設計，便於安裝及拆卸，如圖3.7所示。此外，超音波感測一種非侵入式的量測方式，以減少對波場的干擾。S18UUAQ 感測距離範圍為 30 至 300 毫米，並提供 0 至 10 伏特的類比輸出，詳細規格如表3.2所示。在通電後，POWER

Indicator LED 於正常情況下會亮起綠燈，表示裝置已成功啟動及符合感測範圍；裝置之 Output Indicator LED 在額定量測範圍內，以黃燈表示正常運作狀態，詳細燈號狀態如圖3.8所示。另外，輸出電壓與測量距離之間呈線性轉換，轉換關係圖如3.9所示，在每次實驗前，必須校正輸出電壓對距離的轉換係數，確保該次實驗數據的準確性，超音波感測器詳細校正及量測資料處理方式由3.1.3.2節與3.1.3.3節介紹。

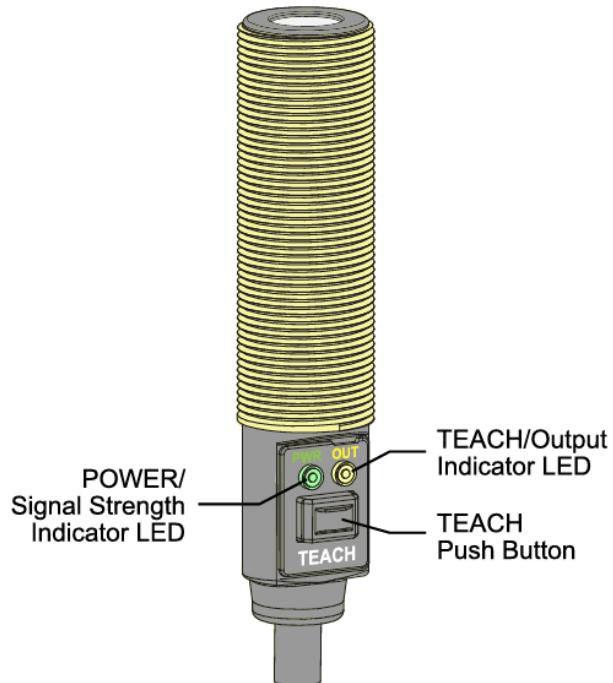


圖 3.7: Banner S18UUAQ 超音波感測器 (取自 S18UUAQ 使用手冊)

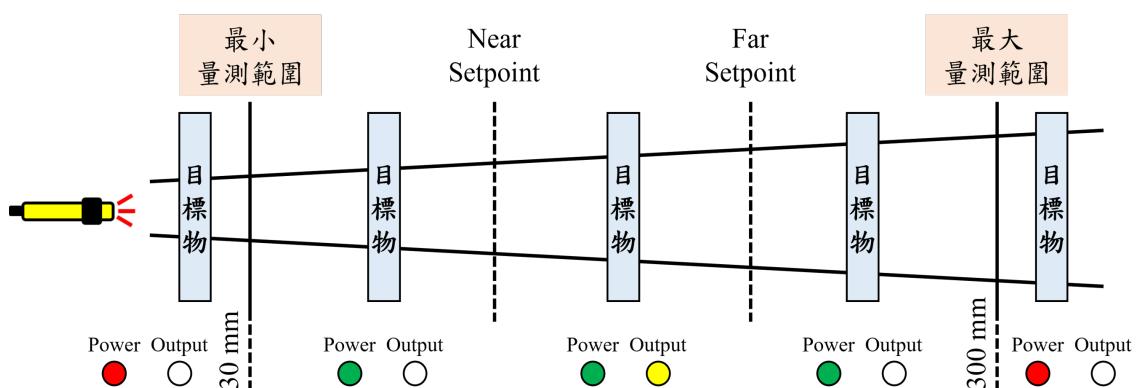


圖 3.8: 超音波感測器量測燈號



Analog Output Slope—Voltage-Sourcing Models

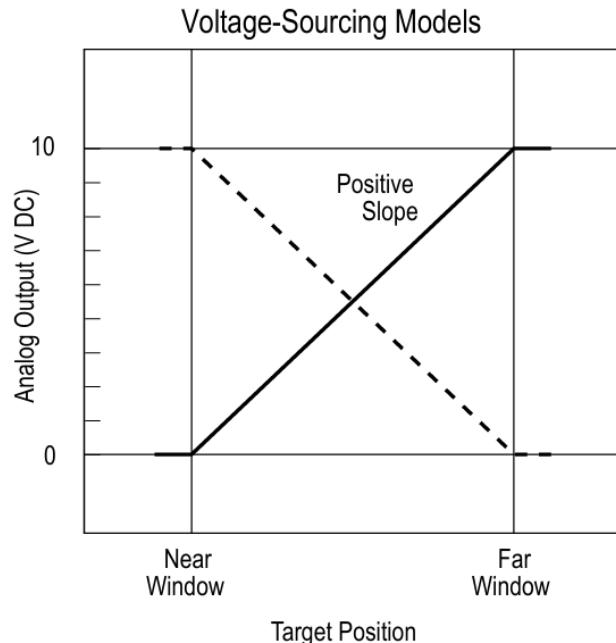


圖 3.9: 輸出電壓與量測距離之轉換關係（取自 S18UUAQ 使用手冊）

表 3.2: Banner S18UUAQ 超音波感測器規格表

感測器型號	Banner S18UUAQ
超音波頻率	300 (kHz)
運作溫度	-20~60 (°C)
量測範圍	30~300 (mm)
輸入電壓	10~30 (V DC)
輸出電壓	0~10 (V DC)
線性度	± 1 (mm)
解析度	0.5~1 (mm)

3.1.3.1 資料擷取

由於超音波感測器僅能將偵測到的距離資訊轉換為對應之類比電壓訊號，並不具備資料儲存與傳輸功能，因此本研究採用研華 (Advantech) 所開發之資料擷取裝置 USB-4704，如圖3.5所示，並搭配 LabVIEW 作為資料擷取之開發平台，進行



感測器電壓訊號的即時擷取。USB-4704 是具備 12 位元解析度的多功能 I/O 功能，它支援 8 路類比輸入、2 路類比輸出、8 路數位輸入/輸出與一組 32 位元計數器，且免外接電源並支援 DAQ Navi。最後，透過 USB 連接將收集到的數據傳輸至電腦進行儲存與後續分析。LabVIEW 是由美商國家儀器公司 (National Instruments, NI) 開發的圖形化程式設計語言，廣泛應用於資料擷取、儀器控制、工業自動化與量測系統開發。其最大特色是使用圖形化來設計程式邏輯，且強調併行處理，捨棄一慣的逐行編程，讓使用者能以直觀方式建立資料分析流程，特別適合應用於即時資料處理與軟硬體整合。

本文使用研華提供之 LabVIEW DAQ Assistant 蔊集電壓訊號，其中，DAQ Assistant 可以設定取樣頻率 (rate) 與取樣數 (samples)，它們分別代表每秒對類比訊號進行取樣的次數及每次擷取過程中所蒐集的資料點數。根據奈奎斯特定理 (Nyquist theorem)，類比訊號取樣頻率必須至少為訊號最高頻率的兩倍，以確保量測訊號不會因重疊 (aliasing) 而失真，綜合波浪特性與實驗需求，本文設定取樣頻率為 200Hz。

3.1.3.2 量測與校正

超音波感測器 S18UUAQ 將電壓值輸入給資料擷取裝置 USB-4704，分別有單端輸入及差分輸入兩種方法。差分輸入的最大優點是抗雜訊能力強，相較於單端輸入容易受到地電位差的雜訊干擾，其透過測量兩條訊號線之間的電位差，有效抑制來自外界的共模雜訊，適合長距離的訊號擷取，因此本文採取差分輸入，使感測器提供穩定、準確的量測結果。

由於超音波感測器以電壓值顯示量測距離訊號，故需建立一組電壓與距離之間的轉換係數，以利後續資料辨識與處理。然而，此轉換係數可能因感測器重新啟動 (通電) 或其他環境因素而產生微小變化。為確保每次實驗中量測資料的準確



性，故本研究於每次實驗前皆進行感測器校正，以維持數據品質。感測器校正程序可分為以下四個步驟進行：第一，將水槽注入至恆定水深 (h_s)；第二，將超音波感測器固定於水面上方，建議距離介於 10 至 20 公分之間，並利用水平儀確認感測器垂直朝向水面，以確保量測準確性；第三，待水面靜穩後，量測對應水深下的輸出電壓，持續紀錄至少一分鐘並取其平均值；第四，將水槽加水至二倍恆定水深 ($2h_s$)，並重複步驟三的操作流程。由於感測器輸出電壓與距離呈線性關係，如圖3.9所示，透過兩組已知水深與其對應平均電壓進行交叉相乘計算，即可求得電壓與距離之間的轉換係數，反算實際波高 H_{actual} 。

3.1.3.3 資料處理

於前一小節中取得電壓與距離之轉換係數後，雖可進一步反算出實際波高，然實際量測數據仍可能因外部干擾因素而產生跳動。此現象在水面極為平穩時尤為明顯，主因在於原始波動幅度極小，導致感測器所讀取的微小電壓變化易被放大解讀為雜訊。此外，於類比訊號轉換為數位訊號過程中亦可能產生微幅誤差，影響資料品質。為提升量測結果，需透過適當濾波處理技術，抑制高頻雜訊與非物理性的波動，使所獲得之波高資料更貼近實際波場變化。

在孤立波波形資料中，本文採用 MATLAB 之低通濾波器 (lowpass filter) 作為處理工具，以抑制波高量測過程中所產生之高頻雜訊。此濾波器能有效移除訊號中的高頻成分，保留低頻且具物理意義之波形變化。考量實驗中造波頻率的範圍，將濾波器的截止頻率設定為 5Hz，以確保訊號主體得以保留，如圖3.10所示。

在大部分的週期波波形資料中，由於可以準確知道波浪週期 (頻率)，本文採用 MATLAB 之帶通濾波器 (bandpass filter) 作為處理工具，只允許特定頻率範圍內的訊號通過，低於範圍的低頻和高於範圍的高頻都會被阻擋，而上、下截止頻率分別為目標頻率之 $\pm 30\%$ ，如圖3.11所示。



而靜水時濾波前後之波高時間序列資料如圖3.12 所示，可觀察到經濾波處理之水面靜止訊號，皆不超過波高感測器 ± 1 毫米的誤差範圍內，這更加接近實際波場行為。

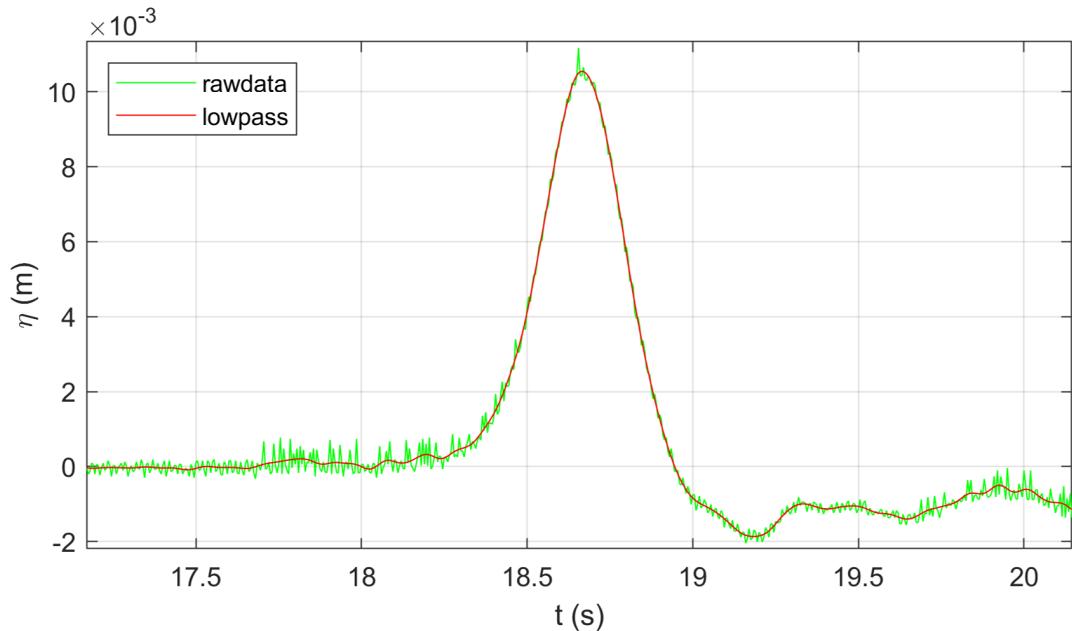


圖 3.10: 孤立波 lowpass 濾波前後之波高時間序列資料

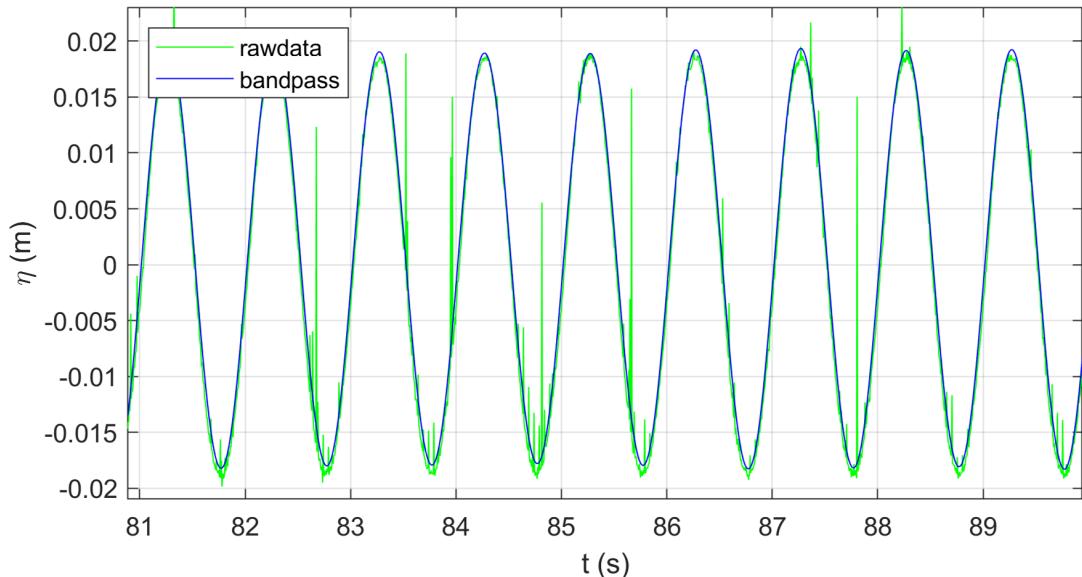


圖 3.11: 週期波 bandpass 濾波前後之波高時間序列資料

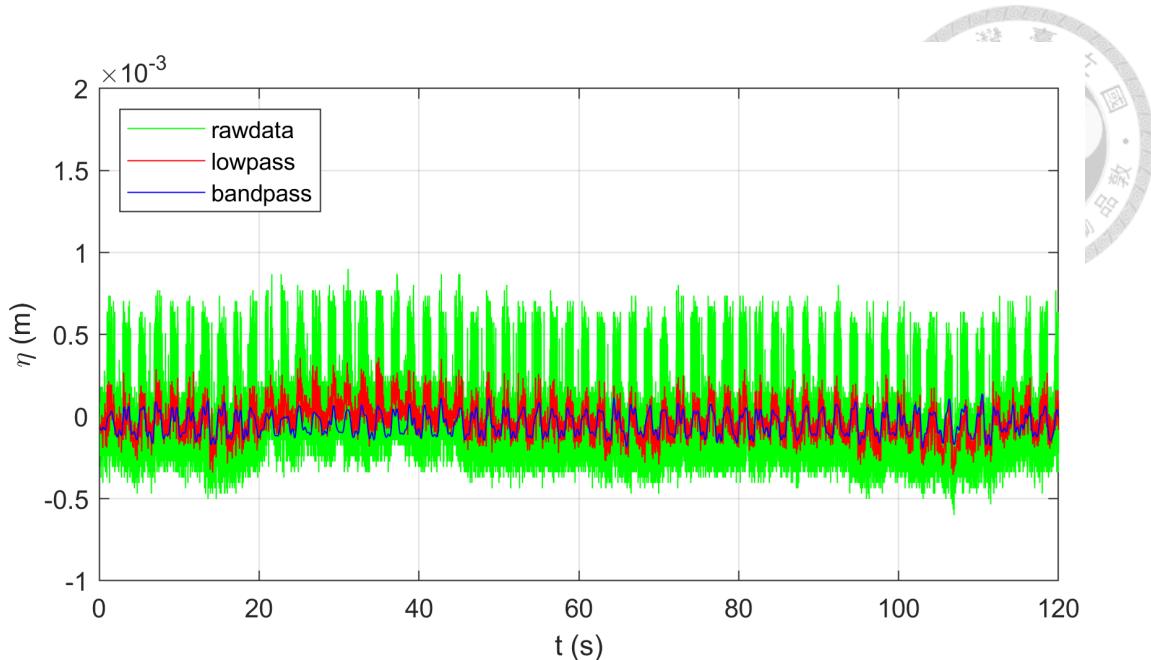


圖 3.12: 靜水濾波前後之波高時間序列資料

3.1.4 孤立波造波結果分析與歸納

本小節所呈現之實驗結果均取自實驗室小型造波水槽，實驗主要分析目標為探討 GM 與 MMTM 兩種造波方法，分別搭配 Boussinesq-type 與 Rayleigh-type 波數（即 k_B 與 k_R ），所產生之孤立波型態。為簡化後續敘述，本文將此四種組合分別命名為：GMB（GM 搭配 k_B ）、GMR（GM 搭配 k_R ）、MMTMB（MMTM 搭配 k_B ）、MMTMR（MMTM 搭配 k_R ）。

在小水槽的實驗配置中，恆定水深 h_s 為 0.05 公尺，波高計架設於水槽中央，分析非線性參數 ϵ 為 0.25、0.3、0.35 情況下孤立波的造波情況。首先，本文針對 ϵ 為 0.25 之孤立波造波軌跡 (ξ_{sol}) 作圖，如圖3.13所示。觀察結果顯示，當採用 k_R 作為波數時，造波時間顯著延長且推板移動距離增大，促使造波過程中推水動作更為完整。此外，MMTM 於整體衝程中，相較 GM 展現出更為急促之速度變化，對於製造高非線性之孤立波形將更為有利。

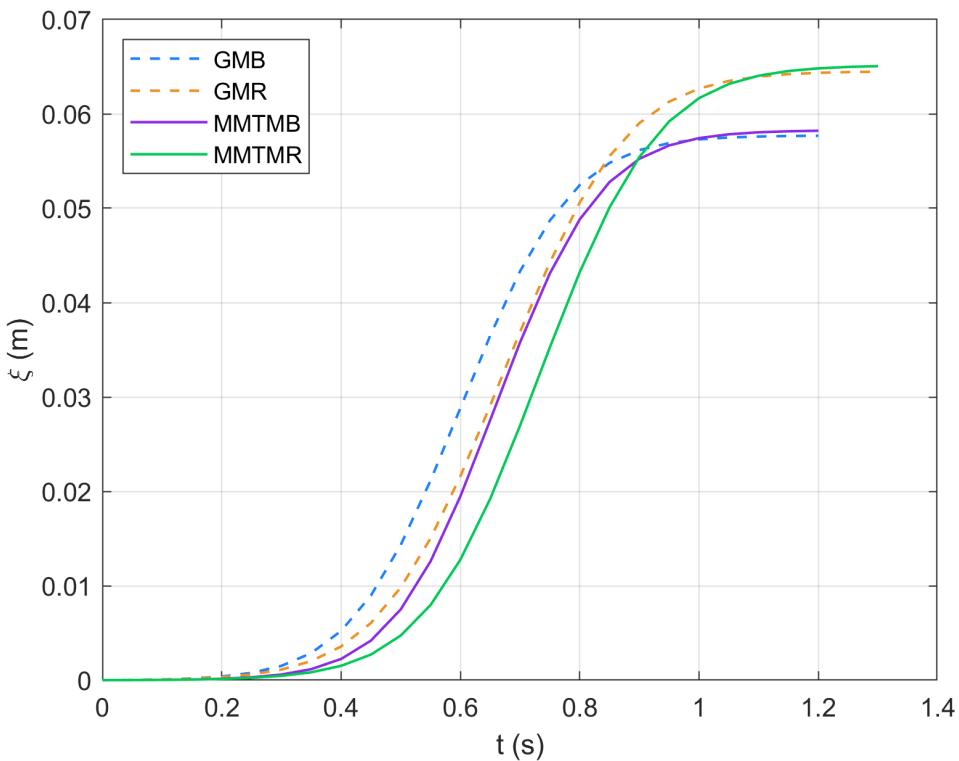
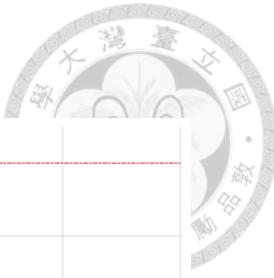


圖 3.13: 各造波方式之造波軌跡 ($\epsilon = 0.25$)

本文於小型造波水槽中進行 GMB、GMR、MMTMB 與 MMTMR 四組孤立波之生成實驗，並於距離造波端 0.98 公尺處安裝超音波感測器以量測波高變化。資料經由資料擷取系統 (DAQ) 收集後，進行無因次化處理，其比較結果如圖3.14 所示。由圖可見，MMTMR 所生成之波高最為接近理論解析解，相較之下，實驗室原先使用之 GMB 方法則表現略為遜色。

接著將聚焦於不同非線性參數下造波的表現差異，由圖3.14可知，MMTMR 所生成之孤立波波高最接近理論解析解，故後續比較均以 MMTMR 為基準，對比實驗室原方法 GMB。當非線性參數 ϵ 為 0.3 時，MMTMR、GMB 與理論解析解之無因次化波高比較結果如圖3.15所示，其中因孤立波波數 k_{sol} 的選擇不同，因此其各自之解析解也稍有差異，以 analytical Boussinesq 表示選取 k_B 之解析解，以 analytical Rayleigh 表示選擇 k_R 之解析解；另外，當 ϵ 為 0.35 時，對應結果如圖3.16所示。綜合觀察可發現，隨著 ϵ 值上升，MMTMR 在孤立波波高展現出更



佳的表現，顯示其於高非線性條件下具有優越之造波能力。

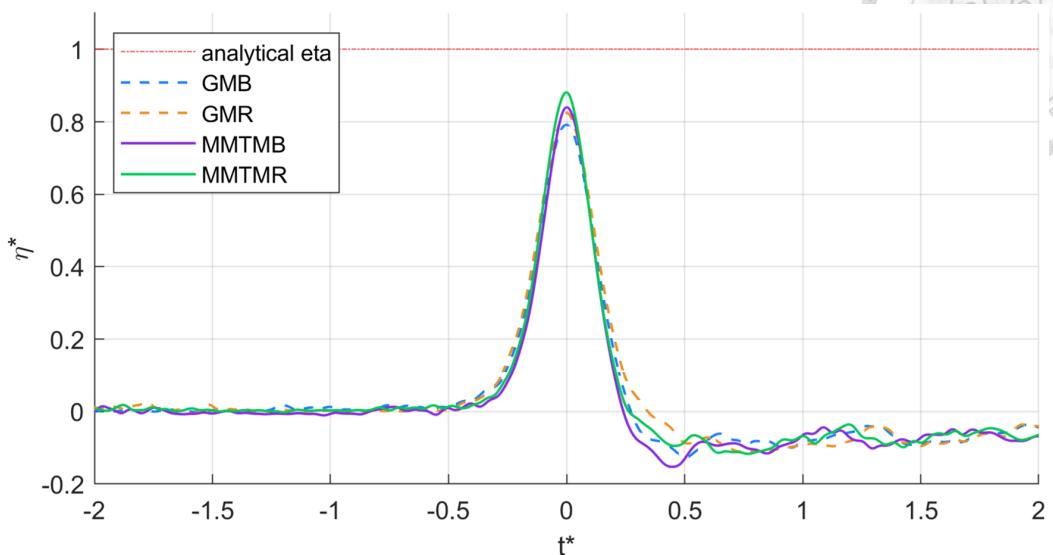


圖 3.14: 各造波方式之無因次化波高對比 ($\epsilon = 0.25$)

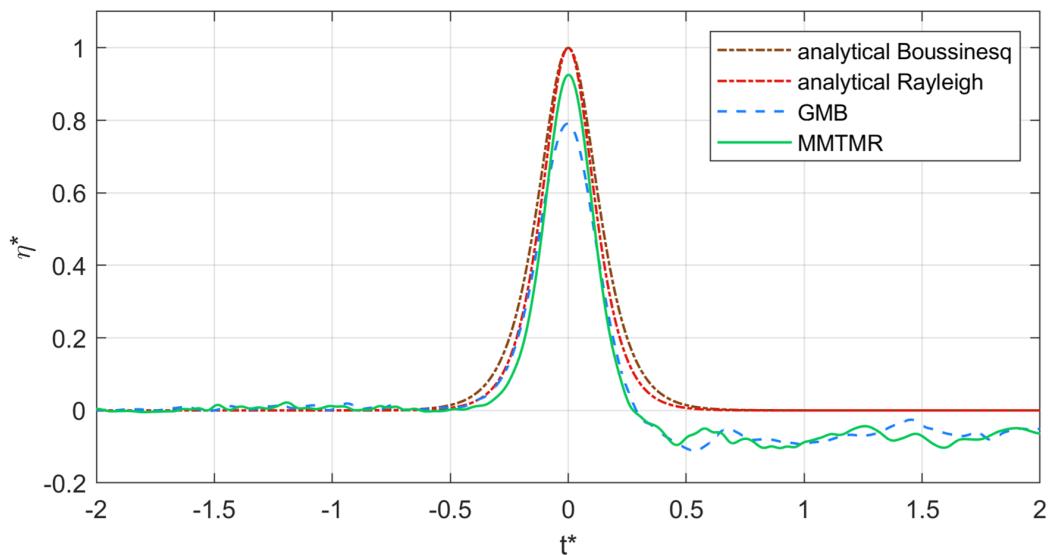


圖 3.15: GMB、MMTMR 與理想波高解析解之無因次化對比 ($\epsilon = 0.3$)

MMTM 所生成之波浪能夠在短時間內趨近孤立波之穩定形態 (Malek-Mohammadi and Testik, 2010)，且小水槽實驗所觀察之波形趨勢與 Malek-Mohammadi and Testik (2010) 及 Francis et al. (2020) 所進行之實驗結果高度一致。綜合上述實驗結果足以顯示，MMTM 可以取代 GM 作為實驗水槽中生成孤立波的方法。然而 Francis et al. (2020) 指出，儘管 MMTM 在實驗水槽中具有高實用性，其在數值模擬環境下的傳播效果有限，因此建議在模擬中以 GM 造波為優。

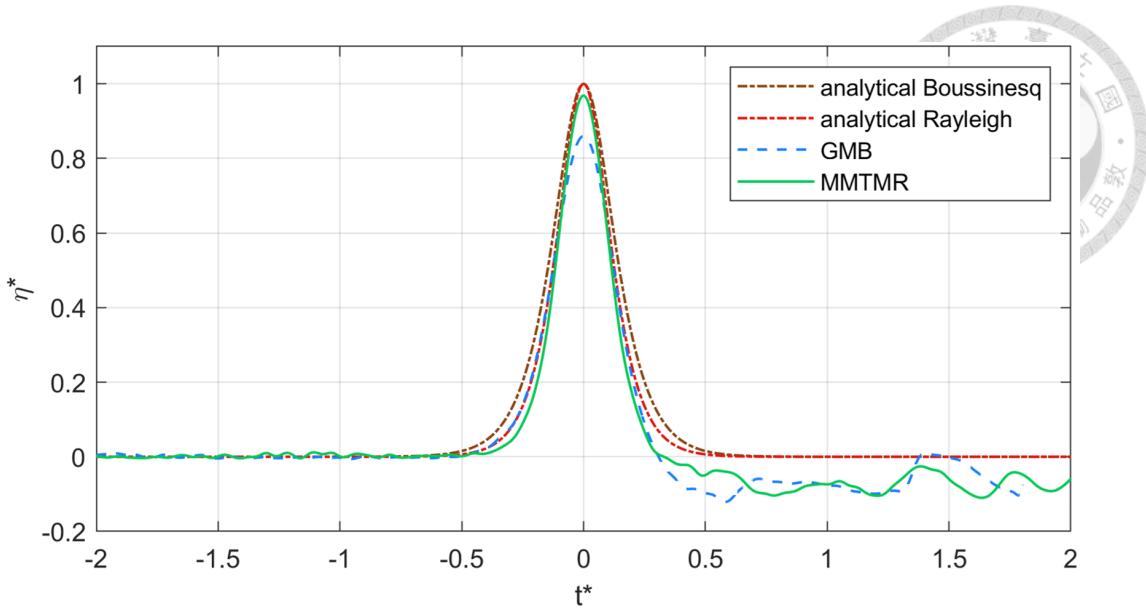


圖 3.16: GMB、MMTMR 與理想波高解析解之無因次化對比 ($\epsilon = 0.35$)

3.1.5 小水槽新設備驗證

此小節將針對消波端之新造波設備實行驗證，本文選用 MMTMR 孤立波搭配 $\epsilon = 0.25$ 、 $\epsilon = 0.3$ 、 $\epsilon = 0.35$ 三種非線性目標參數進行造波，並將波高計置於水槽正中央。待水槽水面靜止，使用波高計分別擷取造波端（右馬達）、消波端（左馬達）所製造出的實際孤立波表面高程，並與波數為 Rayleigh-type(k_R) 之實際波高解析解作圖，其無因次化後的驗證結果如圖3.17、圖3.18及圖3.19所示，目標與左馬達造波後實際測得的孤立波參數對照如表3.3所示。

表 3.3: 目標與左馬達造波後實際測得之孤立波參數對照表

h_s (m)	目標 ϵ	H_{sol} (m)	左馬達實際 ϵ	左馬達 H_{actual} (m)
0.05	0.25	0.0125	0.2185	0.0109
0.05	0.3	0.015	0.2756	0.0137
0.05	0.35	0.0175	0.3146	0.0157

由圖3.17、圖3.18及圖3.19觀察到，消波端於造波階段所產生之波形與造波端幾乎一致，甚至在波峰的表現上略勝一籌。此結果顯示，消波端在單獨作動時，能準確追隨上位控制所下達的運動命令，具備後續主動消波原理之驗證能力。

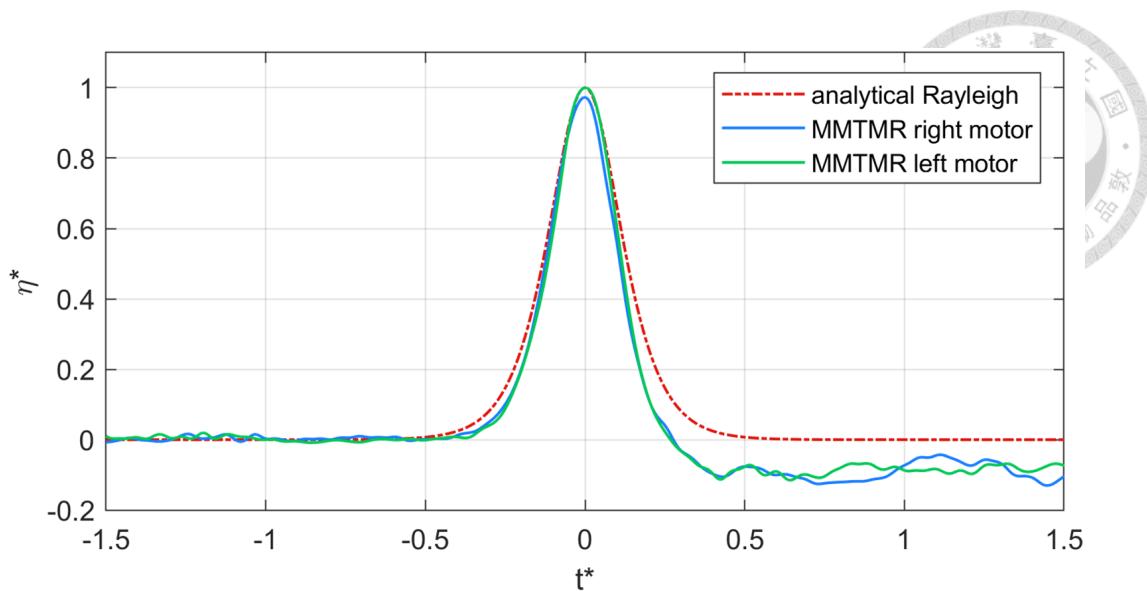


圖 3.17: 小水槽新設備驗證-左馬達實際 ϵ 為 0.2185 之 MMTMR 孤立波

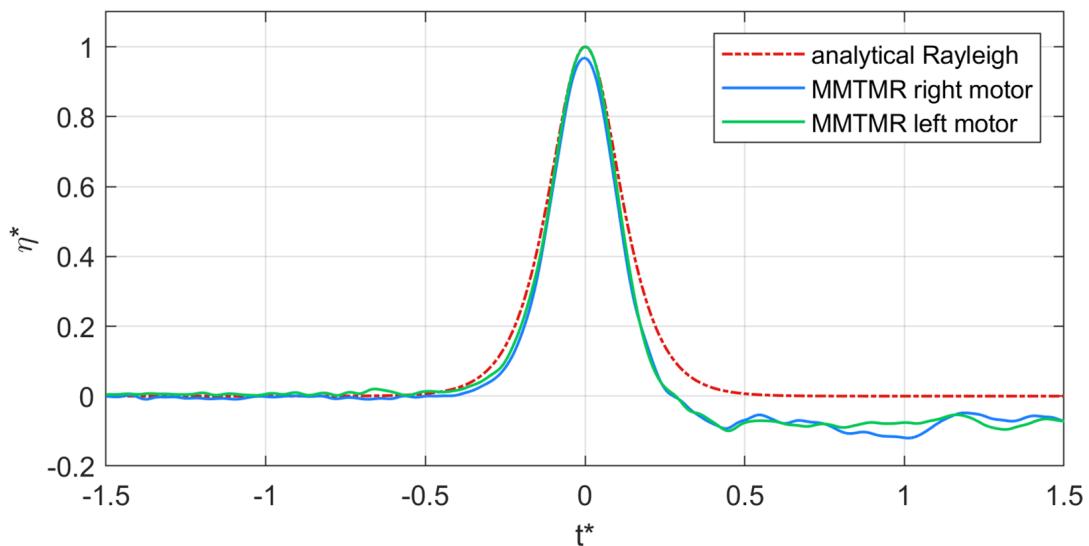


圖 3.18: 小水槽新設備驗證-左馬達實際 ϵ 為 0.2756 之 MMTMR 孤立波

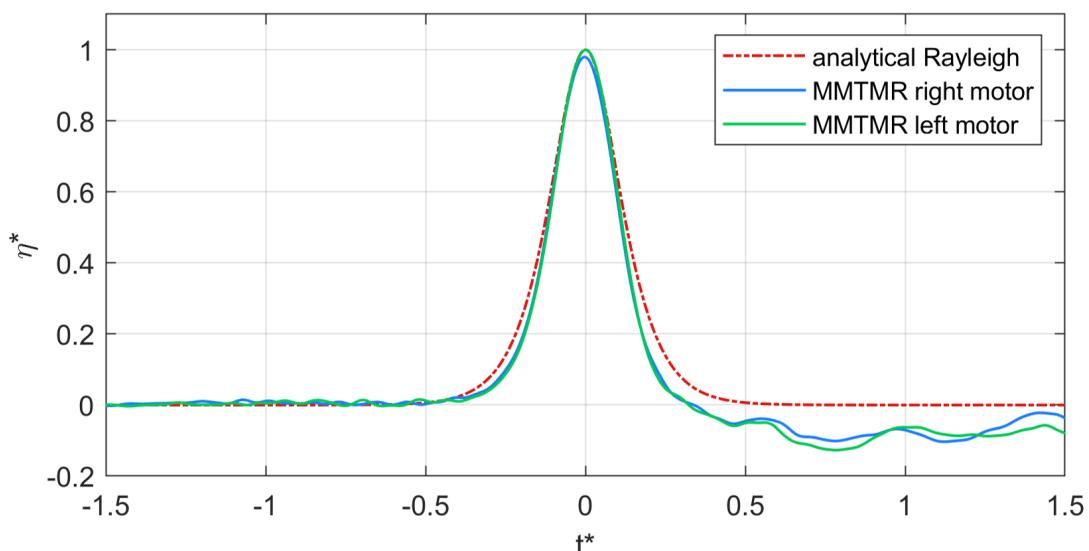


圖 3.19: 小水槽新設備驗證-左馬達實際 ϵ 為 0.3146 之 MMTMR 孤立波



3.1.6 主動消波原理測試

本節主要探討文獻Schäffer and Klopman (2000) 所提出之主動消波方法，包括時間反轉法與疊加消除法並於小型造波水槽進行測試。針對上述方法，除了分析理論外，也實際測試主動消波加設於小水槽的可行性。

3.1.6.1 測試流程

在操作實驗前，須依據第3.1.3.2節所述步驟對超音波感測器進行校正，以確保量測數據之準確性。鑑於小水槽目前尚未建置完全閉迴路系統（詳請參見第3.2.6.1節），因此後續測試將先由造波端單向產生波浪，並儘可能將波高計 B 安裝於靠近消波端的位置量測入射波，其距離消波端 0.085 公尺。接著，藉由波高計 B 蒐集之時間序列資料，推算波浪從造波端傳遞至消波端所需時間，並於下一次產生相同波形時，延遲啟動消波端推板以實行消波，即右造波左消波的形式。最後使用波高計 A 紀錄表面高程之變化，其距離造波端 0.255 公尺，並對消波效果進行分析。

3.1.6.2 時間反轉法

最簡易的消波策略是將原造波軌跡進行反轉，每當入射波接近，就使消波端如同時間反轉般逆向作動以抵銷入射波。然而，此方法在實際應用上可能產生些許誤差，即使不考慮因控制系統延遲所導致的相位差，波高亦可能因傳播過程中能量耗散而略為遞減，因此需要將波高計盡可能安裝於靠近消波端的位置，以量測最真實的實際波高 H_{actual} 。

首先，本文選擇以水深 h_s 為 0.05 公尺， ϵ 為 0.25、0.3、0.35 之孤立波作為原理初步測試對象，主因在於其波形穩定且波峰清晰，較易進行觀察。實驗中透過波高計 B 量測接近消波端位置之波形資訊，提取該位置實際孤立波波高 H_{actual} ，



並使用 MMTMR (詳請參見2.1.2.2節) 將其轉換為消波推板軌跡，消波之前後對比如圖3.20、圖3.21及圖3.22所示 (擷取自波高計 B)。

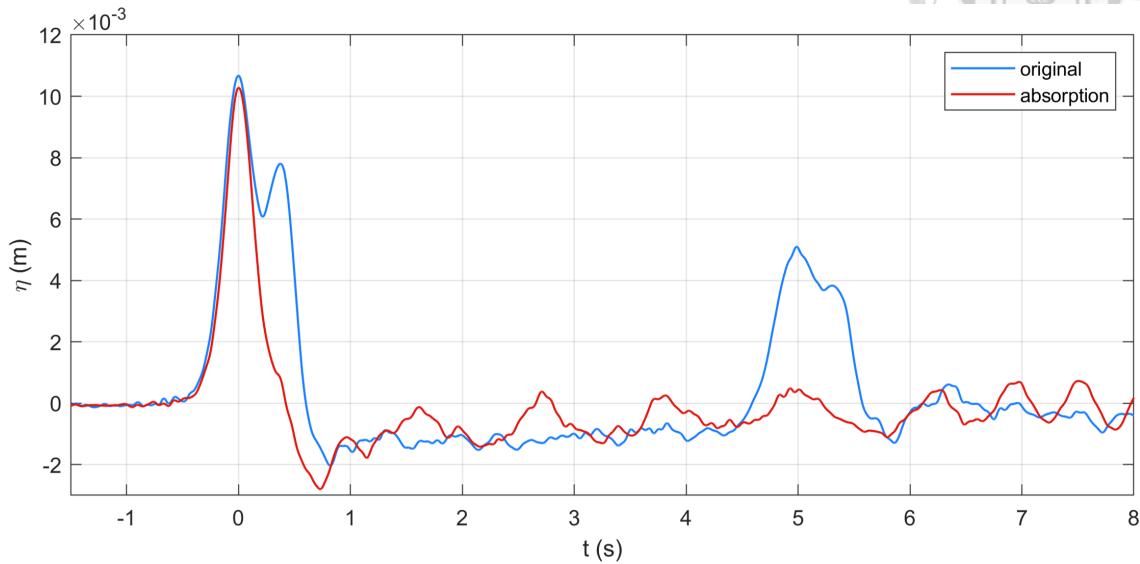


圖 3.20: 時間反轉法原理測試-孤立波 ($\epsilon = 0.25, H_{sol} = 0.0125$ 公尺)

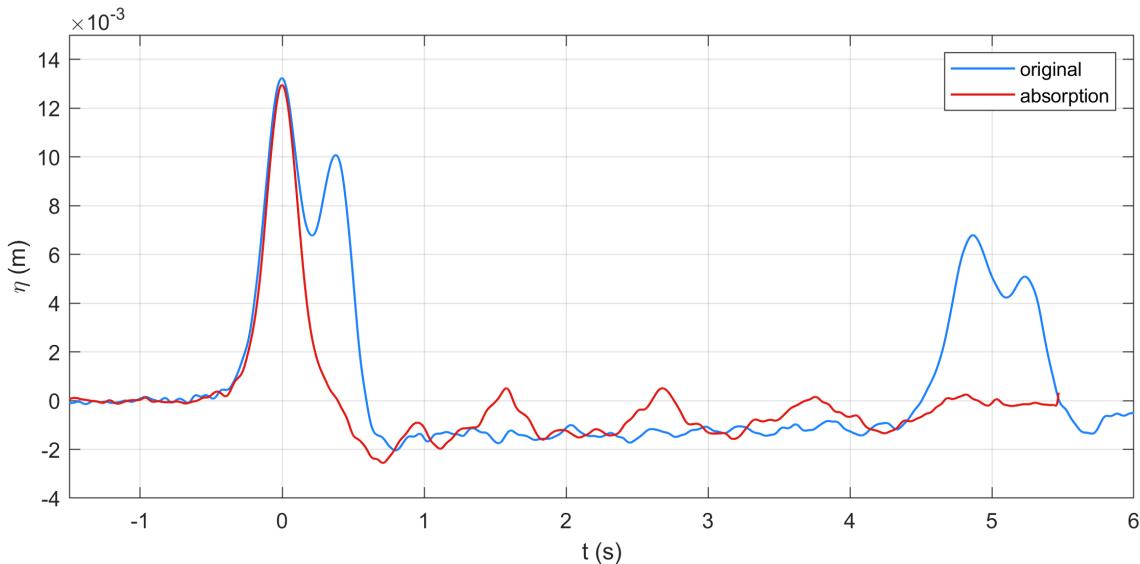


圖 3.21: 時間反轉法原理測試-孤立波 ($\epsilon = 0.3, H_{sol} = 0.015$ 公尺)

可以觀察到，時間反轉法在消除較單純的孤立波時，可以讓水面更快的恢復至靜止，在水面穩定前震盪幅度約為 2 毫米，不過因為實驗環境為小尺度，因此將其無因次化才能量化此幅度，以圖3.22的測試中，無因次震盪幅度（無因次反射表面高程） η_R^* 約為 0.11 左右。

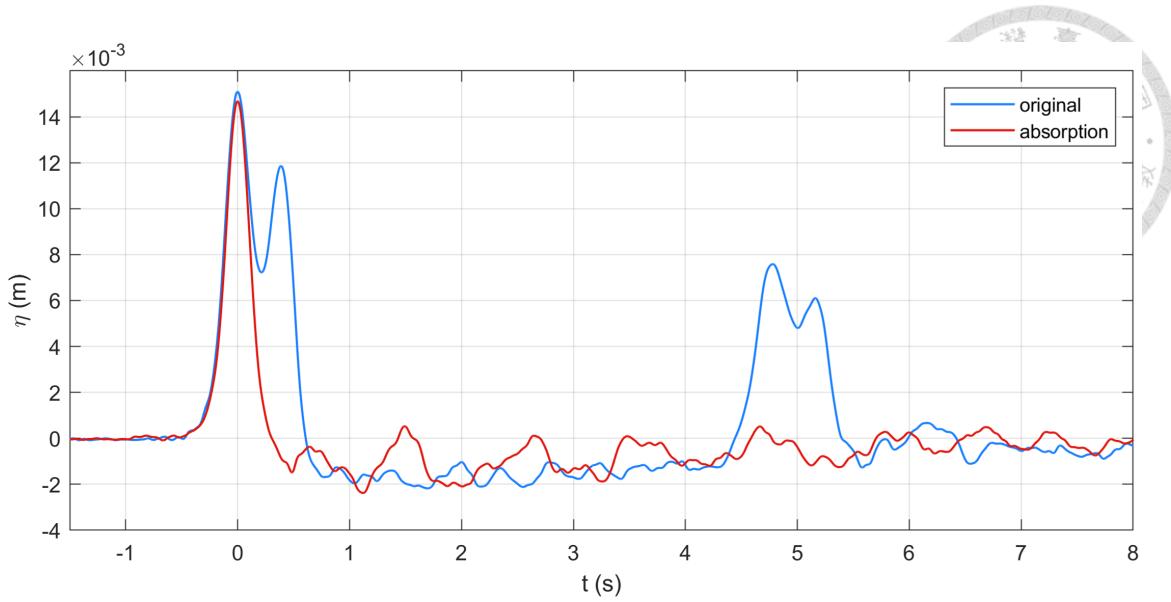


圖 3.22: 時間反轉法原理測試-孤立波 ($\epsilon = 0.35$, $H_{sol} = 0.0175$ 公尺)

時間反轉法看似稍有成效，因此接續對週期波進行消波試驗，本文使用平推式二階造波理論製造週期波（詳請參見2.2.4節），在小水槽恆定水深 $h_s = 0.05$ 公尺下，波況條件為週期 $T = 0.85$ 秒、目標波高 $H_{per} = 0.009$ 公尺，製造 50 個相同的週期波。實驗中也先透過波高計量測接近消波端位置之波形資訊與波浪抵達時間，提取該位置實際週期波波高 H_{actual} ，經二階造波理論反算出消波端軌跡，並在下次產生相同週期波形時，延遲啟動消波端推板以實行消波，其開啟消波端之前後對比如圖3.23所示（擷取自波高計 A）。

可以發現圖3.23中，在時間反轉法下開啟消波並沒有良好的效果，反而加劇小水槽內的駐波 (standing wave) 效應。原因可能為控制系統的延遲造成消波相位誤差，或是先行擷取之實際波高 H_{actual} 與消波當下真正的波高不一致，不過也極有可能是方法本身的缺陷。綜上所述，此方法僅能證實在單調的波場中是可行消波策略，然而，若波況逐漸複雜，消波效果將與預期有甚大的差距。因此，本文於下一小節將使用疊加消除法來測試週期波的消波效果。

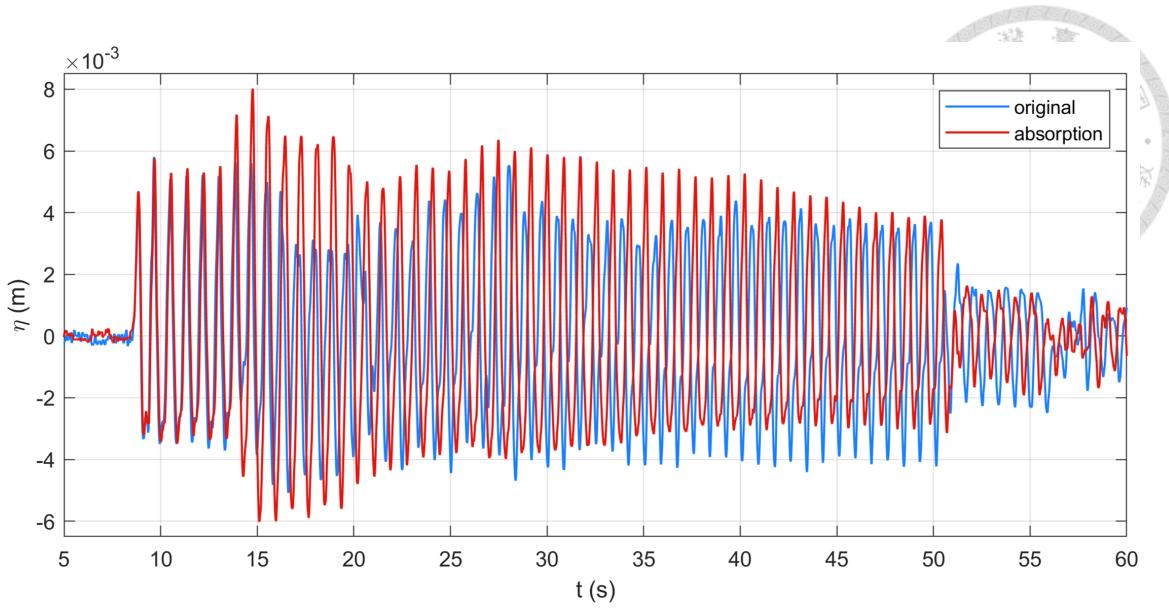


圖 3.23: 時間反轉法原理測試-週期波 ($T = 0.85$ 秒, $H_{per} = 0.009$ 公尺)

3.1.6.3 疊加消除法

疊加消除法具有一套轉換公式，其將量測的自由表面高程資訊轉化為消波板的運動軌跡，此種消波方法也更為緻密。本文使用 Schäffer and Klopman (2000) 所提出之波高轉換消波軌跡公式，來將入射波疊加消除，其消波速度公式如下：

$$\mu_{abs}(t) = -\sqrt{\frac{g}{h_0}} \eta_{abs}(t), \quad (3.1)$$

其中 μ_{abs} 為消波速度、 η_{abs} 為需要消除的表面高程，其可分解為如下：

$$\eta_{abs}(t) = \eta_{actual}(t) - \eta_{target}(t), \quad (3.2)$$

其中 η_{target} 造波的目標波形、 η_{actual} 為實際量測的表面高程。接續將式3.1積分即可得到消波軌跡 ξ_{abs} ，積分結果如下所示：

$$\xi_{abs}(t) = -\sqrt{\frac{g}{h_0}} \int_{-\infty}^t \eta_{abs}(t) dt. \quad (3.3)$$

方程式3.3可以直接應用於造波與消波整合端，因為 η_{abs} 是經過實際波形與目標波形相減而提取出的消波表面高程。不過目前小水槽是將造波端與消波端拆分為右、左兩端，因此公式中的 η_{abs} 只需要替換成，安裝於靠近消波端之波高計量取之入射表面高程即可，如此一來不僅可以簡化實驗流程，亦不用考慮波形相減之相位問題。

接下來的疊加消除法消波原理測試中，本文針對週期波進行測試，製造與時間反轉法相同的週期波況 ($h_s = 0.05$ 公尺、 $T = 0.85$ 秒、 $H_{per} = 0.009$ 公尺)，不過會減少製造週期波的數量，以方便觀察小水槽場域內之波形變化。在測試過程中，也是事先擷取一段波高資料，由式3.3計算出疊加消除法的消波軌跡，並於下一次才啟動消波端推板，其開啟消波端之前後對比如圖3.24、圖3.25所示（擷取自波高計 A）。

在圖3.24中，造波端製造三次週期波；而圖3.25中，造波端僅製造單次週期波。兩次測試皆於波浪傳達至消波端時才啟動消波機推板。從結果可觀察到，對於週期波之主要波形皆具一定程度的消波效果，然而後續所伴隨之雜波並未被有效抑制，甚至在部分時段出現水面震盪加劇的現象。

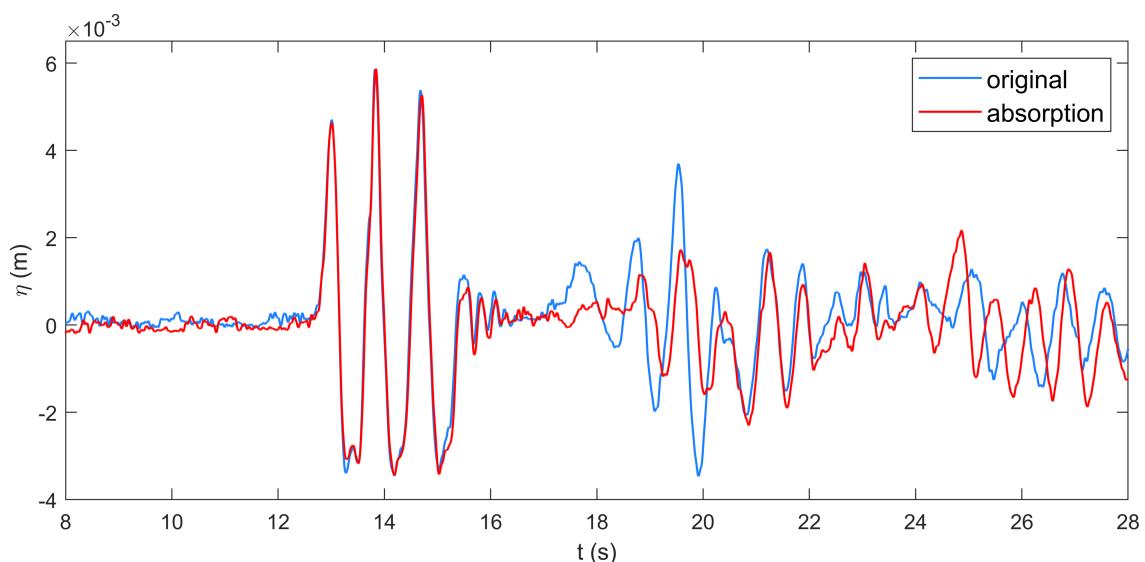


圖 3.24: 疊加消除法原理測試-製造三次週期波 ($T = 0.85$ 秒, $H_{per} = 0.009$ 公尺)

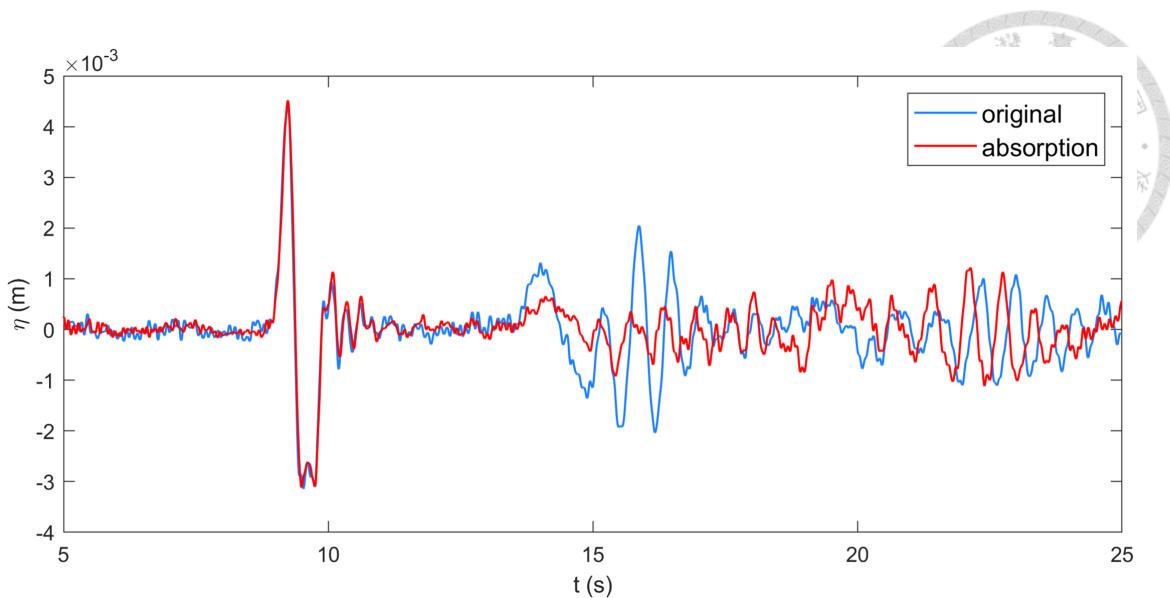


圖 3.25: 疊加消除法原理測試-製造單次週期波 ($T = 0.85$ 秒, $H_{per} = 0.009$ 公尺)

造成消波效果不佳的較小因素為，現階段小水槽之造推板皆透過皮帶傳動實現，然此傳動方式不太適合高精度的往復運動控制，因此在週期波的轉折點易產生微幅不連續的抖動，影響波形的穩定性。然而，最主要的限制仍在於本系統尚未建置完整的閉迴路控制架構，致使消波動作無法即時因應實際波況進行動態修正，事先擷取的波形越到後期將與實際狀況相差越大，導致消波的效果有限。

3.1.6.4 本節小結

在此小節本文使用孤立波與週期波來測試兩種消波原理，時間反轉法雖然於消除孤立波稍有成效，不過面對週期波時，因方法考慮不夠嚴謹，反而加劇小水槽內的駐波效應。而疊加消除法則是透過公式轉換形成消波軌跡，此方法較具有系統性，不過礙於小水槽未具備完善的回授控制系統，導致結果與預期有所落差。至此，主動消波的原理大致清晰，而要達成主動消波，建置閉迴路量測與控制系統勢在必行。經過通盤考量，小水槽的設備已不足以應對接下來所需的控制系統，因此，本研究將轉往大水槽開發閉迴路系統，其精度與原本的設備性能皆高於小水槽。



不過在大水槽並未開發過即時處理系統，只是初步認定其施作閉迴路系統可行性較高，因此，還是要先仔細確認原本的控制與造波設備足以負荷即時運算，大水槽原本的造波與控制設備將於3.2.1節、3.2.2節詳細敘述。綜上所述，若大水槽之閉迴路系統開發得當，預期可大幅提升現有的消波品質。

3.2 大型造波水槽

大水槽為二維斷面水槽，總長度為30公尺，寬0.34公尺，側壁高度為0.5公尺。水槽主要由玻璃及鋼樑結構組成，便於實驗觀察且擁有高剛性，其一端設置造波機構，另一端為藤棉緩坡板，造波機構於下一小節詳盡介紹。此外，大水槽配有三支與小水槽同款之超音波感測器，其擷取方式將在3.2.3節介紹。大水槽的實際樣貌如圖3.26所示，側面及俯視示意圖如圖3.27所示。



圖 3.26: 大型造波水槽實景

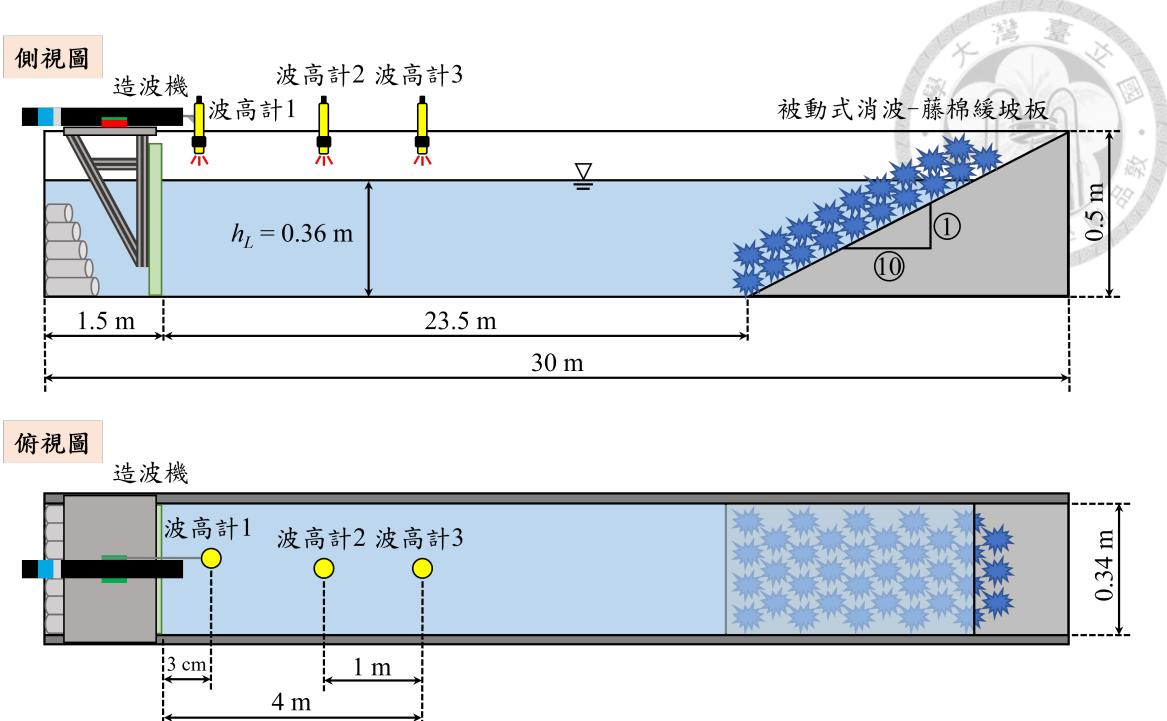


圖 3.27: 大型造波水槽示意圖（未依實際比例繪製）

3.2.1 造波機構

大水槽結構與造波機構設計多數由林立剛 (2021) 所建置，造波機由安川 (Yaskawa) 伺服馬達 SGM7A-08AFA61 (如圖3.28所示)、品宏減速機 DH090-L1-3-19K6-70-90-M6 (如圖3.29所示)、上銀 (HIWIN) 單軸致動器 KK13025P-1180A1-F2CS2 (如圖3.30所示)、IGUS 乾式鋁擠滑軌滑塊組、壓克力滑台、壓克力造波推板 (如圖3.31所示) 所組成。其中安川伺服馬達詳細規格見表3.4、品宏減速機的減速比為 3：1、上銀單軸致動器以導程 25 毫米之螺桿帶動，其總長度 1.18 公尺，不過為安全考量，單軸致動器側邊掛有光遮斷器 Omron EE-SX674 (如圖3.32所示)，分別為左極點 (EL-)、Home 點 (ORG) 及右極點 (EL+) 共三個，可有效定位與控制滑台運動的範圍，因此其有效行程約為 1 公尺、IGUS 乾式鋁擠滑軌滑塊組的最大優勢為不需要定期更換潤滑油，相較於油壓式系統共容易保養與維修。

造波機構在作動時由上位控制設備 (詳請參見3.2.2節) 提供目標位置訊號於安川伺服馬達，馬達則透過編碼器偵測目前位置，由於週期波比孤立波或單一波



需要更高的控制精度，因此邱信瀚（2024）增設減速機，以馬達轉速換取穩定扭矩及提升負載力，減速機接續帶動上銀單軸致動器，其以螺桿帶動 IGUS 乾式鋁擠滑軌滑塊組，最後致動壓克力滑台及造波推板，此系統持續作動直至編碼器偵測到已抵達指定位置。

表 3.4: 安川伺服馬達 SGM7A-08AFA61 規格表

伺服馬達型號	SGM7A-08AFA61
額定電壓	200~30 (V DC)
額定輸出	0.75 (kW)
編碼器類型	增量型 (Incremental)
額定扭矩	2.39 (N·m)
額定馬達轉速	3000 (1/min)



圖 3.28: 安川伺服馬達 SGM7A-08AFA61 (取自台灣安川電機股份有限公司官網)



圖 3.29: 品宏減速機 DH090-L1-3-19K6-70-90-M6 (取自品宏科技有限公司官網)



圖 3.30: 上銀單軸致動器 KK13025P-1180A1-F2CS2 (取自上銀科技官網)

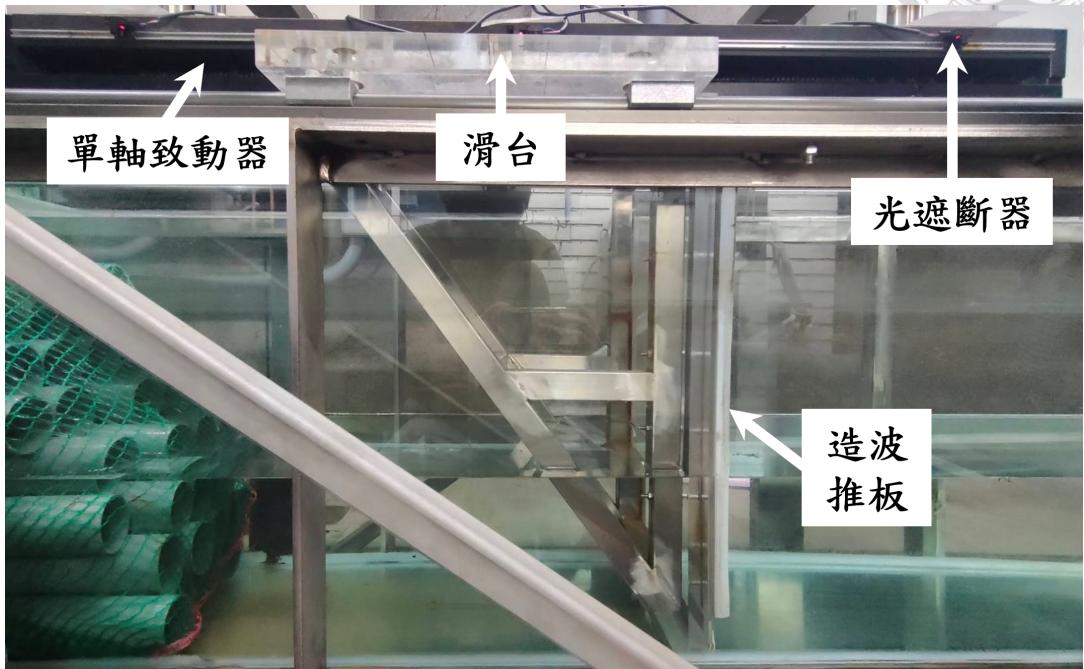


圖 3.31: 造波機構實景



圖 3.32: 光遮斷器 Omron EE-SX674 (取自京港電子官網)



3.2.2 運動控制設備

伺服馬達的運動控制主要由電腦給定參數，搭配研華的運動控制卡 PCIE-1203-10A（如圖3.33所示）執行運算及安川伺服驅動器 SGD7S-5R5AA0A（如圖3.34所示）所組成。常見的伺服驅動器，因為沒有自主計算的能力，只能執行 JOG 運動，即持續等速運行直到上位機下達停止。若需要執行複雜運動，就需要接收上位機指令，並透過給予馬達不同的電壓大小來調整馬達轉速。因此，需要使用研華的運動控制卡，讀取電腦單元中使用者事先給定的軌跡格點，藉由本身的緩存區計算最佳化路線，此種模式即為 PT 運動 (point/time motion mode)，對於運動控制卡而言使用 PT 運動模式可以擁有高精度。



圖 3.33: 研華運動控制卡 PCIE-1203-10A (取自研華股份有限公司官網)

研華運動控制卡擁有 Motion I/O D-sub 26 介面 (CN8) 及兩組 EtherCAT 埠，使用 PCIE 介面與電腦溝通，並利用 LabVIEW 介面作為讀取使用者事先給定的軌跡格點，其額外提供 Common Motion Driver 方便使用者執行復歸運動（回到 Home 點）與偵錯，當運動控制卡計算完最佳化路線後，即透過 EtherCAT 埠傳輸控制訊號於伺服馬達驅動器。



圖 3.34: 安川伺服驅動器 SGD7S-5R5AA0A (取自台灣安川電機股份有限公司官網)

由上一小節所介紹的造波機構結合本節的運動控制設備，即為本實驗室原來的所有造波設備，此系統之總控制流程圖如圖3.35所示，本文將於3.2.5節徹底分析此系統是否足以負荷即時運算，才能接續測試主動消波的實驗。

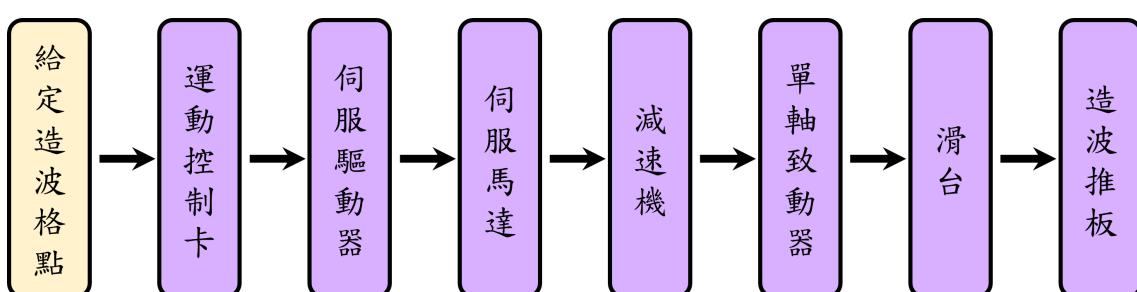


圖 3.35: 造波系統總控制流程圖

3.2.3 超音波感測與資料擷取器

本研究所使用的三支波高量測設備一樣為 Banner S18UUAQ 超音波感測器（詳請參見3.1.3節），其實際擺放位置並不固定，將依據不同測試而有所調整，因

此每項測試前會再有所敘述。而資料儲存與傳輸則採用 NI 所開發之 USB-6001 資料擷取裝置，如圖3.33所示。USB-6001 具備 14 位元解析度的 8 通道類比輸入、2 路類比輸出、13 路數位 I/O 以及 32 位元的計數器，並支援 USB 連接與 LabVIEW 開發平台，其取樣頻率及取樣數之設置皆與3.1.3.1節相同。

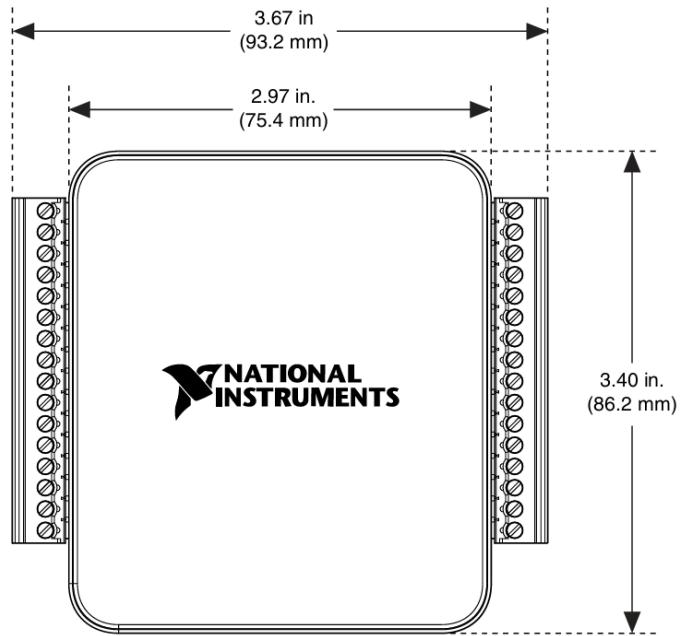


圖 3.36: NI USB-6001 資料擷取裝置（取自 USB-6001 使用手冊）

在大水槽中，雖然使用不同的資料擷取裝置提取波高，不過在超音波感測器的量測、校正及資料處理方式皆與小水槽大同小異，因此本文不再重複敘述，詳請參見3.1.3.2節及3.1.3.3節。

3.2.4 回授控制系統

本小節將全面整理實驗室大水槽原本所建構之軟硬體架構，並針對現階段大水槽所具備之軟、硬體進行回授控制流程分析，其流程圖如圖 3.37所示。此流程圖可劃分為四個主要模組：目標軌跡與解析解計算單元(黃色)、波浪表面高程擷取單元(藍色)、修正軌跡計算單元(綠色)，以及運動控制單元(紫色)。首先，使用者透過目標軌跡與解析解計算單元預先設定造波所需之目標軌跡(ξ_{target})與目標波高(η_{target})，待使用者透過電腦介面下達造波指令後，即可啟動整體造波流程。

在造波進行期間，使用者可選擇啟用主動消波功能。當主動消波被啟動時，超音波感測器即開始量測實際波浪表面高程 (η_{actual})，並即時與目標波高進行比較，相減分離出需要消除的波形 (η_{abs})。該訊號值將匯入修正軌跡計算單元，用以計算修正軌跡 (ξ_{abs})。最後，系統將消波軌跡與原始目標軌跡進行疊加，組成最終輸出軌跡，並傳送至運動控制卡，以驅動伺服系統進行造波板運動修正，完成整體主動消波控制流程。

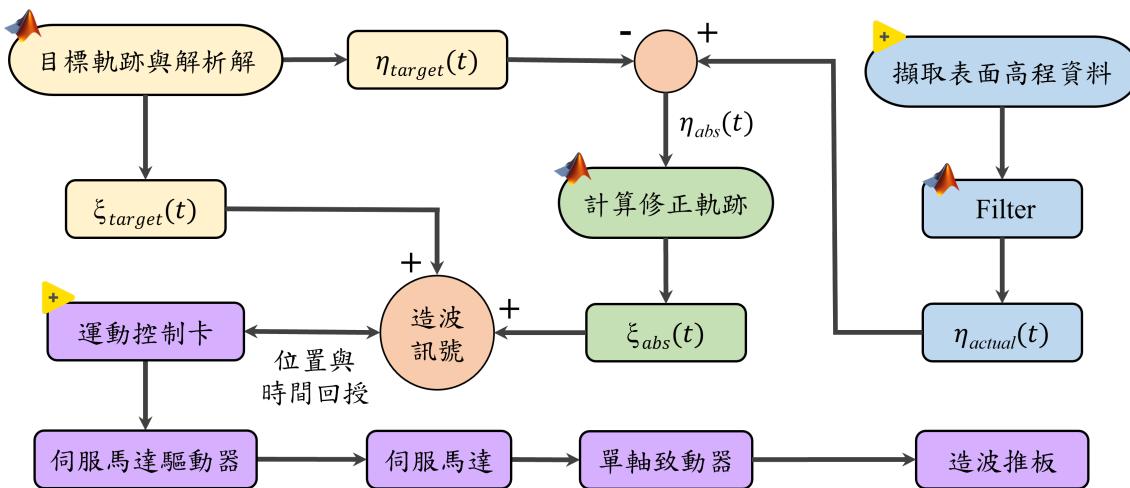


圖 3.37: 大水槽回授控制流程圖

另外，由圖3.37中可觀察到，於軟體層面即需要整合 LabVIEW、MATLAB 兩種語言架構；而在硬體層面，更要整合來自三家不同廠商之裝置，包括研華所提供之運動控制卡、NI 之資料擷取裝置，以及安川伺服驅動器與馬達系統。另外，最為重要的是消波軌跡訊號要如何即時回授給運動控制卡，這不僅牽涉到主動消波的完整性，更考驗現有設備的性能。因此，下一小節將針對控制訊號與運動控制卡的回授進行試驗，以確保主動消波的可行性。

3.2.5 原設備試驗

在主動消波中至關重要的是，造波訊號與運動控制卡之間的回授問題，本小節將針對大水槽原控制設備進行可行性試驗。測試時本文先簡化回授問題，將原



本預先給定的造波軌跡 (ξ_{target}) 充當成計算出來需要回授的訊號，預計將各個格點依序回授給運動控制卡，然而，原本的 PT 運動並不支援此種寫入模式。原因在於 PT 運動需要由電腦先行給定格點表，當匯入運動控制卡後，其會先透過緩存區計算最佳化路線，也就是運算出每個格點之間適當的加減速度，使格點依序的平滑連接。由於即時回授是無法預先給定格點表，因此本文改用研華運動控制卡中的週期同步位置運動，此模式支援控制卡在作動時額外插入位置格點，適用於即時回授。

測試時採用平推式二階造波理論來製造週期波（詳請參見2.2.4節），週期波的造波參數為週期 $T = 1$ 秒、振幅 $a = 0.04$ 公尺、大水槽恆定水深 $h_L = 0.36$ 公尺，並使用週期同步位置運動設定每隔 10 毫秒額外插入位置格點，其測試結果如圖3.38所示。

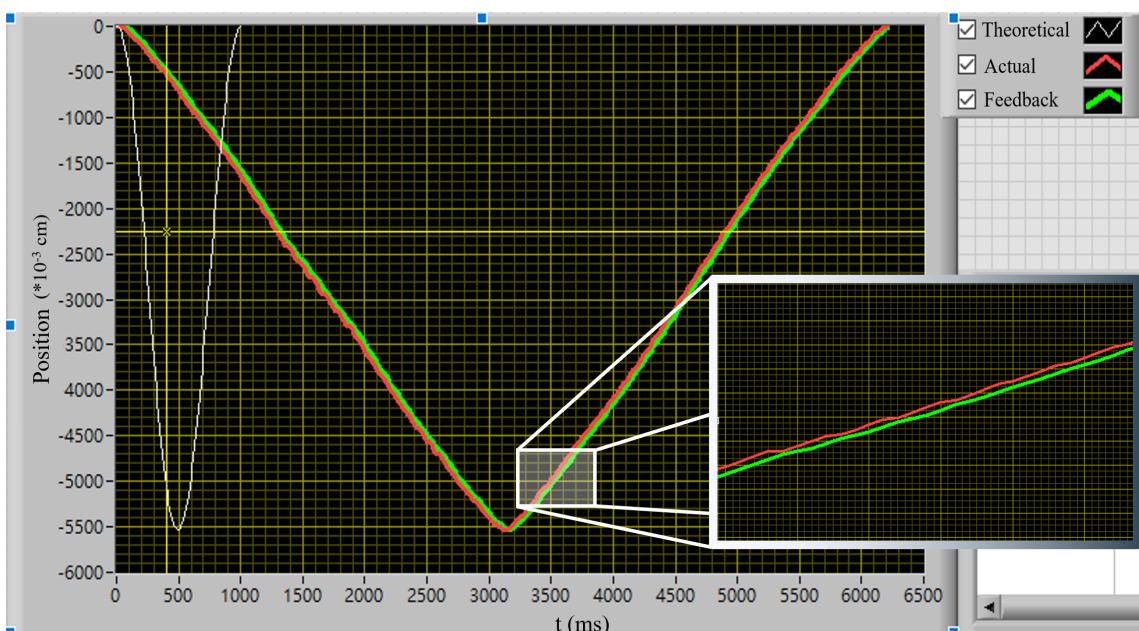


圖 3.38: 回授測試-週期同步位置運動

於圖3.38中，白線為二階造波理論所計算出的軌跡，紅線為運動控制卡實際上插入位置格點的情況，綠線為馬達作動的真實反饋。可以觀察到在測試中綠線緊貼紅線，因此可以推斷運動控制卡與伺服馬達驅動器之間的 EtherCAT 埠溝通順



暢。然而實際上插入位置格點的情況（紅線）卻與造波理論（白線）相差甚遠，導致週期差距 6 倍以上，仔細觀察紅線可以發現每段加速度間有一小段等待區間，原因是運動控制卡會等待馬達到點才會插入下一個格點，這大幅影響剛開始設定的每隔 10 毫秒插入位置格點，使軌跡的時序列完全沒對上造波理論。

而馬達無法在 10 毫秒內到達指定位置，最大因素為運動控制卡無法先行透過緩存區計算最佳化路線，因此會以固定的加減速度控制驅動器輸出，而且運動控制卡的週期同步位置運動，預設每次作動完都要將速度歸零，以防撞機，週期同步位置運動示意圖如圖3.39所示。雖然可以透過手動調整速度補償以平滑加減速區間，然而即時回授的位置並不線性，每段速度補償將不盡相同，對此使用速度補償在此情況下並不合適。

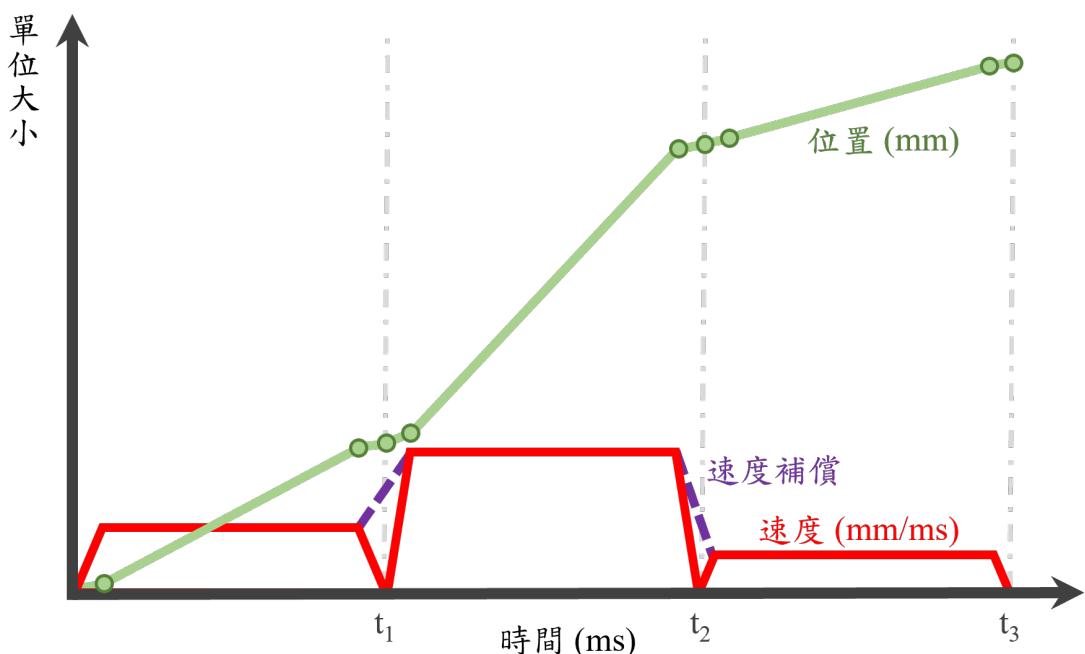


圖 3.39: 運動控制卡之週期同步位置運動剖析

另外，額外插入的位置格點是由電腦每間隔 10 毫秒所提供，此電腦為 Windows 作業系統，而 Windows 作業系統與 Linux 作業系統相比，其對於高頻率的重複執行較不穩定，容易受到背景程式運行的干擾，此因素也可能導致輸出延



遲或變動。綜上所述，運動控制卡經過兩種運動測試都不足以達成即時回授，再加上作業系統也有可能出現延遲的問題，可以判定大水槽原有的造波控制系統無法達成後續的主動消波，因此下一節將著手探討哪些設備才能達成即時回授，完成主動消波。

3.2.6 新設備分析

承接3.2.5節之試驗結果與對回授控制機制的重新檢討，本小節將統整實現主動消波所需之各項控制模式與條件，包含訊號擷取、誤差計算與補償策略等關鍵要素。此外，針對目前水槽控制系統之限制，將於本節末提出一套具前瞻性的設備升級構想，作為實行主動消波的基礎。

3.2.6.1 閉迴路控制

在運動控制系統中，控制策略的選擇對於系統的穩定性、精度與響應速度具有關鍵影響。依據回授機制的有無與程度，可將控制系統大致分為開迴路控制 (open-loop control)、半閉迴路控制 (semi-closed-loop control) 與閉迴路控制 (closed-loop control) 三種類型。

首先，開迴路控制是一種無回授機制的控制方式，控制器根據預先定義的輸入信號驅動致動器，而不考慮輸出端的實際狀態。其主要優點為系統架構簡單、成本較低、計算量小，適用於負載穩定、精度要求不高的應用場景，不過這顯然不會是主動消波會使用到的控制模式。

再者，半閉迴路控制未對工作負載進行實際回授，只對關鍵參數進行反饋控制，如過壓保護、緊急停止，其他部分則依靠預定的控制策略持續運行。這就有如實驗室原本的運動控制卡，不論是 PT 運動或是週期同步位置運動，只能透過先行給定的格點表或是運動參數執行作動，僅有在滑台觸碰到左極點 (EL-) 或右極點 (EL+) 時，才會緊急停止以防撞機。



最後，閉迴路控制則透過感測器持續量測系統輸出，並將其與目標值進行比較，經由誤差計算後調整輸入信號，以達成精確控制的目的。此機制能有效補償系統中的非線性行為與外部擾動，並提高控制精度與穩定性，廣泛應用於高精度製程、自動化設備與伺服控制領域。然而，其缺點包括系統設計與調整較為複雜，且感測器與訊號處理單元的成本較高，需謹慎考量控制參數的設計以避免震盪或不穩定性。

綜上所述，在主動消波中需要一種完全閉迴路的控制系統，才能即時修改運動路徑，並且輸入及輸出 (I/O) 等擷取裝置，最好能夠搭配此控制器，實現更快速的傳輸與計算，而不遷就於作業系統的穩定性。

3.2.6.2 比例積分微分控制器

如前一小節所述，為避免系統於閉迴路控制下產生不穩定現象，控制參數的設定需格外審慎。而回授系統中常採用的控制策略為比例積分微分控制器 (Proportional Integral Derivative, PID)，其表達式如下：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (3.4)$$

其中， K_p 為比例增益，通常只有開及關，可快速調整系統，但容易引起系統震盪、 K_i 為積分增益，考慮過去誤差，提前開關系統，消除穩態誤差、 K_d 為微分增益，考慮未來誤差，判斷斜率大小，減緩比例增益的震盪，比例積分微分控制器示意圖如3.40所示。另外， e 為誤差值，即實際值減去目標值、 t 為目前時間、 τ 為取樣時間。

Schäffer and Klopman (2000) 所提出的疊加消除法（詳請參見3.1.6.3節），雖然跟經典的 PID 控制器在形式上略有不同，然其控制策略仍屬於閉迴路的誤差回授

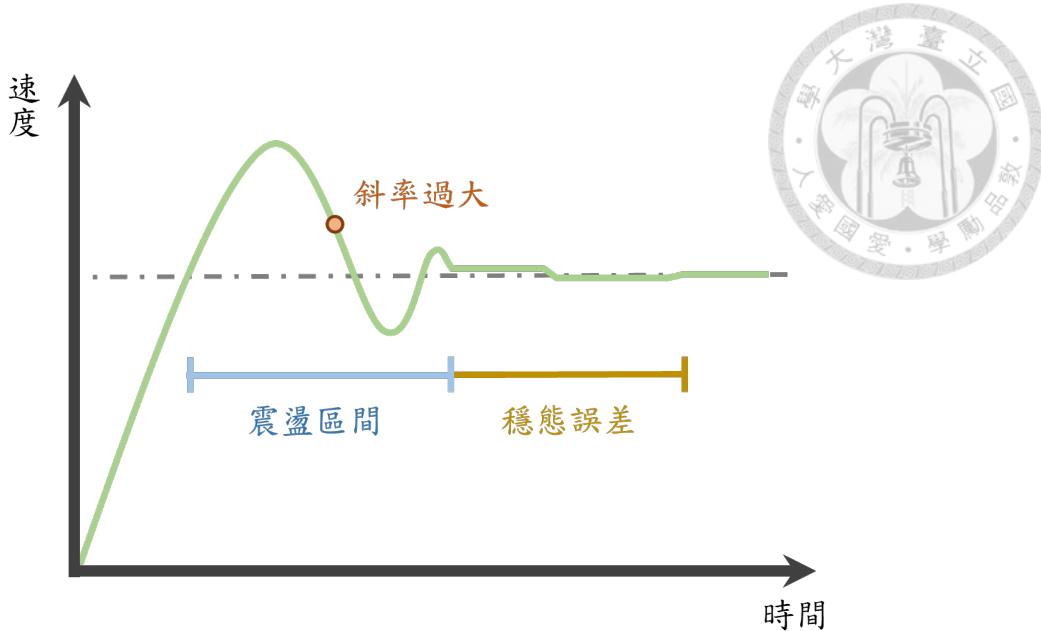


圖 3.40: 比例積分微分控制器示意圖

機制，如式3.3中以 η_{abs} 作為誤差參數，以時間積分考慮過去誤差，並使用具物理意涵之 $\sqrt{g/h_0}$ ，可視為對應積分增益 K_i ，有助於主動消波系統在控制上趨於穩定。

3.2.6.3 新設備選擇

綜合前幾節的實作與探討，可以推斷出目前台灣地區販售的運動控制卡，在 PT 運動時，無法在作動途中加入訊號，而選用週期同步位置運動時，又沒辦法在作動當下將速度平滑化，其只會負責預計算與傳送上位命令（電腦所輸出的軌跡格點），無法成為控制伺服驅動器的完全閉迴路系統。因此，在新設備的選擇上需要可以處理變速度運動、高精度、低延遲的運動控制器。本文期望運動控制器擁有邊緣運算、本地處理的功能，在附加條件上，希望本身具有 I/O 通訊模塊，以實行電器隔離，脫離電腦作業系統的束縛，減少數據傳遞的延遲，並提升穩定度，形如 PLC 的系統架構。

經過分析與諮詢，符合上述期望之運動控制器包含：安川 MP3300（如圖3.41所示）、Lenze C520（如圖3.42所示）、甚至更高階的 Lenze C550（如

圖3.43所示)。由於原造波控制設備的伺服馬達與驅動器皆為安川產品，因此本文最終選擇安川 MP3300 作為後續執行主動消波的運動控制器，以確保通訊架構一致，新設備的控制構想如圖3.44所示。



圖 3.41: 安川運動控制器 MP3300 (取自台灣安川電機股份有限公司官網)



圖 3.42: Lenze 運動控制器 C520 (取自 C520 使用手冊)



圖 3.43: Lenze 運動控制器 C550 (取自 C550 使用手冊)

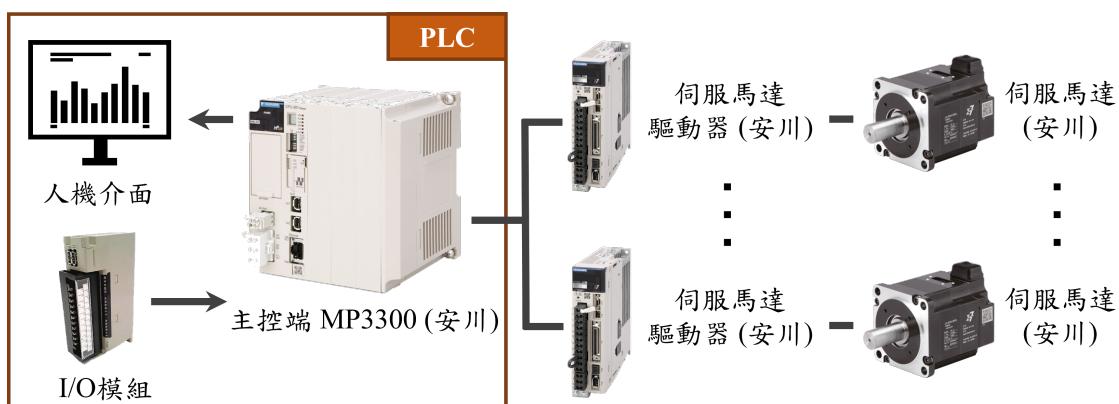


圖 3.44: 新控制設備構想圖



3.2.7 大水槽新設備驗證

本小節將針對大水槽之新運動控制設備實行驗證，本文分別選用 MMTMR 之孤立波（詳見第2.1.2.2節）與週期波（詳見第 2.2.2 節）作為造波目標波形。實驗中，孤立波參數為 $\epsilon = 0.2$ ，週期波參數為 $T = 1$ 秒、 $H_{per} = 0.04$ 公尺、 $h_L = 0.36$ 公尺。

將波高計置於離造波板 3 公尺處，待水槽水面靜止，使用波高計分別擷取原本的運動控制卡 (PCIE-1203-10A)、新的運動控制器 (MP3300) 所製造出的孤立波與 50 道週期波表面高程，並與波數為 Rayleigh-type(k_R) 及二階 Stokes wave 之解析解作圖。波形資料透過超音波波高計擷取，所得波浪高程再與對應之實際波高解析解進行作圖，其中孤立波參考波數為 Rayleigh-type(k_R) 之解析解，而週期波則對應二階 Stokes wave 之理論解。目標與實驗實際測得的孤立波參數對照如表3.5所示，而目標與實驗實際測得的週期波平均波況對照如表3.6所示，其值取自第 11 至 40 道波浪之平均值。運動控制卡與運動控制器之造波結果對比如圖3.45、圖3.46所示。

在圖3.45、圖3.46中，board (藍線) 表示原本的運動控制卡 (PCIE-1203-10A) 所製造的波形、controller (紅線) 為新的運動控制器 (MP3300) 所製造的波形，而解析解 (綠線) 皆為參考實際波高值進行繪製。可以觀察到其二者的表現大致相同，表示新的運動控制器能準確追隨使用者所下達之運動命令，展現出高度的穩定性。

表 3.5: 目標與實際測得之孤立波參數對照表

目標波況			控制卡實際量測		控制器實際量測	
h_L (m)	ϵ	H_{sol} (m)	ϵ	H_{actual} (m)	ϵ	H_{actual} (m)
0.36	0.2	0.072	0.199	0.0718	0.198	0.0713



表 3.6: 目標與實際測得之週期波平均波況對照表

目標波況			控制卡實際量測		控制器實際量測	
h_L (m)	T (s)	H_{per} (m)	平均週期 (s)	平均波高 (m)	平均週期 (s)	平均波高 (m)
0.36	1	0.04	0.9998	0.0357	0.9997	0.0364

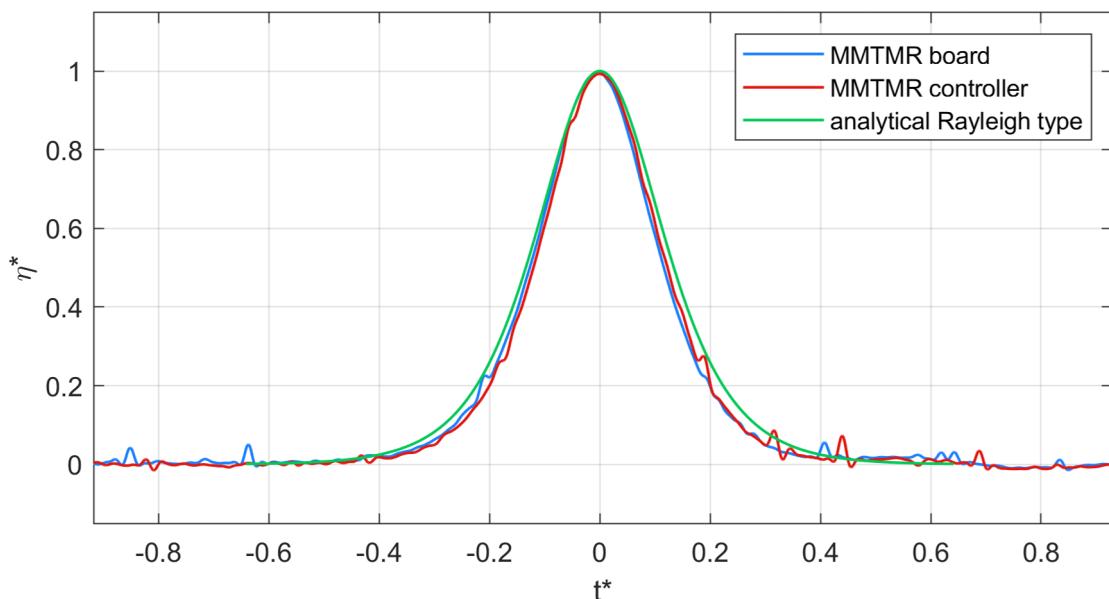


圖 3.45: 大水槽新設備驗證-控制器實際 ϵ 為 0.198 之 MMTMR 孤立波

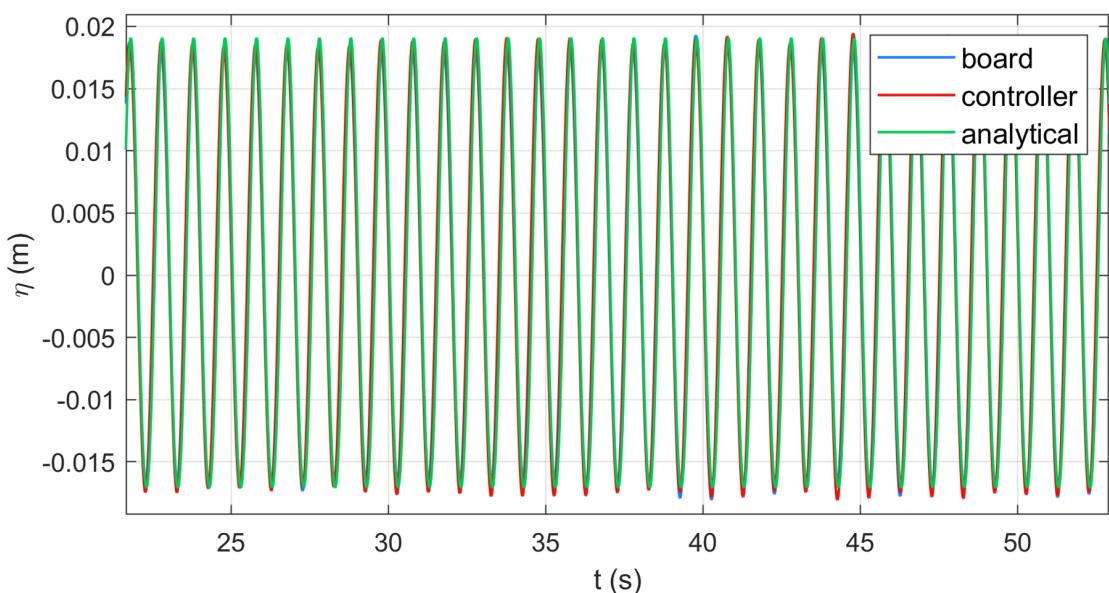


圖 3.46: 大水槽新設備驗證-控制器實際平均波高為 0.0364 公尺之週期波





第四章 實作成果與討論

本章將針對新型運動控制器 (MP3300) 提出主動消波的整體操作流程，並討論此系統消波結果。首先，為降低實驗初期複雜度，初期將造波與主動消波兩階段操作分離，採用類似分離式主動消波的實驗流程，並利用新型運動控制器所提供之虛擬軸功能，模擬造波板運動，其方便觀察控制邏輯與軌跡作動行為而不發生危險，待逐步建立系統穩定性與可控性後，再進行實體的系統操作以驗證消波效果。待熟悉分離式主動消波流程後，接續將測試整合式主動消波控制。

4.1 新運動控制器與主動消波流程

綜合第3.2.6.3節之分析結果，本文選用 Yaskawa MP3300 作為造波板運動軌跡之核心控制器。該控制器具備高精度運算能力，並整合邊緣計算與本地處理功能，可有效實現高速訊號回授與即時資料處理，大幅降低對電腦作業系統之依賴。此外，MP3300 可搭配 I/O 通訊模組，以實現電氣隔離，以系統干擾並減少資料之間互相傳輸所產生的延遲。

於控制流程上，使用者僅需輸入造波所需之目標波高 η_{target} 與目標軌跡 ξ_{target} ，如圖4.1黃色區域所示。其餘訊號擷取與運算，包括實際波高訊號 (η_{actual}) 的擷取、反射波高程計算與消波軌跡 (ξ_{abs}) 運算，皆可透過 MP3300 控制器內部邊緣運算功能完成，對應圖4.1中綠色、橘色與藍色區域。其中，MP3300 的外接 I/O 模組會不斷擷取波高計之電壓值，透過轉換係數得出實際波高訊號 (η_{actual}) 並與目標波高 (η_{target}) 相減得出 η_{abs} ，隨後將 η_{abs} 代入疊加消除法以求得消波軌跡，此架構即可實現即時閉迴路系統控制。最終，控制器將修正軌跡傳送至伺服馬達驅動器，驅動推板運動，如圖4.1之紫色區域。

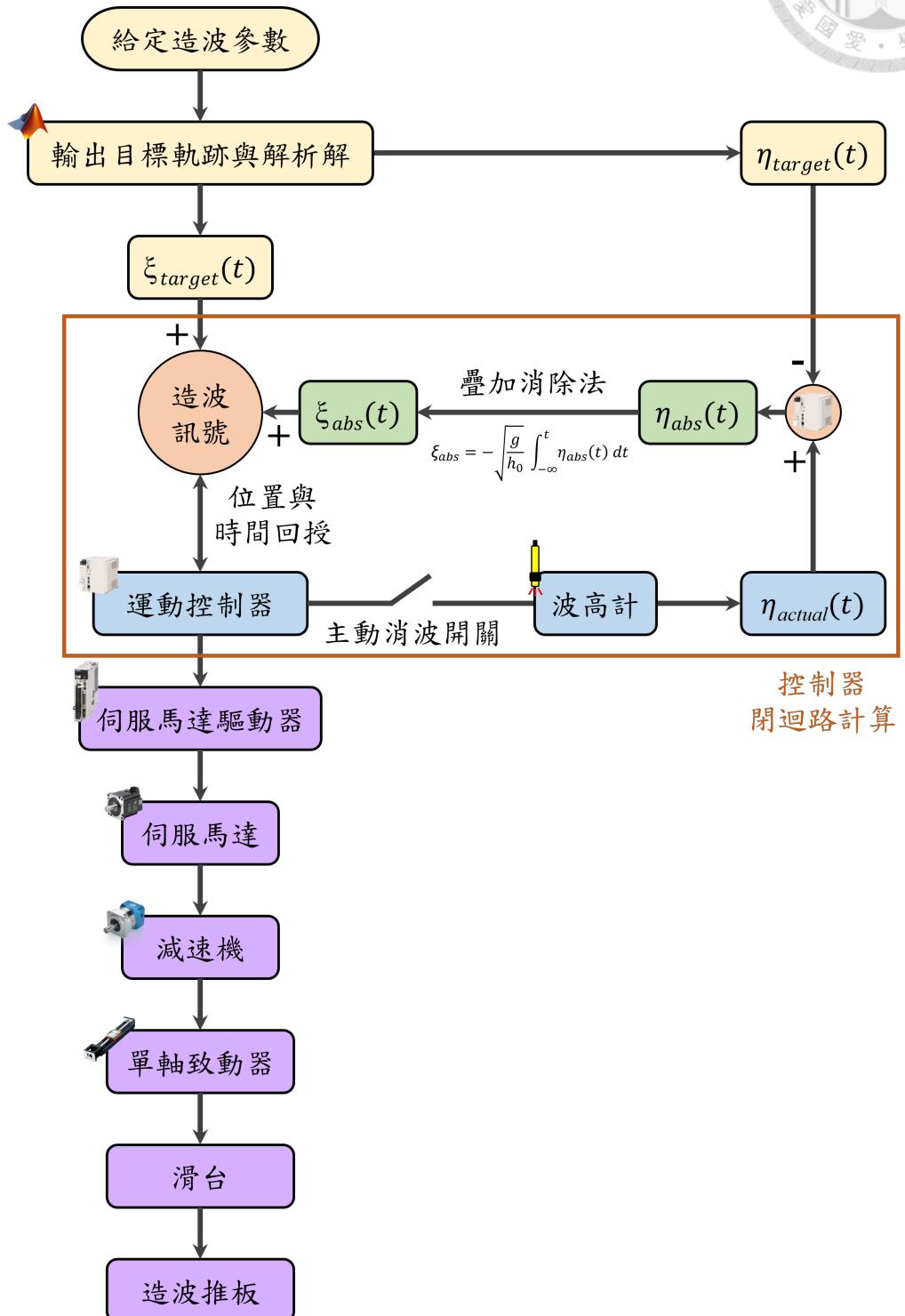


圖 4.1: 新運動控制器與主動消波流程圖



4.2 分離式主動消波

為了方便驗證運動控制器的效能與消波實作的可行性，本文先將造波與消波的運動控制分離，以便判斷與檢查。與先前小水槽測試有所不同，大水槽在消波控制中，會直接採用完全閉迴路的方式，即時偵測需要消除的表面高程，再立即透過公式轉換（詳請參見式3.3）計算出消波軌跡，實現閉迴路主動消波。特別的是在分離式主動消波中，此方程式的目標表面高程 η_{target} 將默認為 0（預設要將反射波完全消除），因此所量測到的實際表面高程就是消波表面高程 ($\eta_{actual} = \eta_{abs}$)。

雖然是分離式主動消波，不過目前大水槽僅有一組單軸致動器造波推板，因此造波與消波還是會在同一組設備上完成，只是分階段執行造波與消波運動，當造波機製造完波浪後，就待命直至反射波反饋，才啟動消波運動。為使反射波更明顯及更快產生，因此使用高一公尺之壓克力垂直板當作壁面，將其架設於距離造波板六公尺處並使用 F 型夾固定防止位移，如圖4.2所示。



圖 4.2: 壓克力垂直板

在分離式主動消波中總共使用三支超音波感測器 (Banner S18UUAQ)，波高計 1 為擷取反射波表面高程專用，其架設方式有兩種方案：方案一為固定於指定位

置，不過因受限於滑台結構設計，其最靠近造波板的安裝位置為距離造波板 55 公分 ($d_{WG} = 55$ 公分) 處，如圖4.3所示。方案二則為跟隨造波板移動之配置，波高計將安裝於滑台上，此方案在位置安裝上較具彈性，可視需求即時調整，如圖4.4所示。至於波高計 2 與波高計 3，則分別固定於距造波板 3 公尺與 4 公尺處，主要作用為建立完整的波場資料，提供主動消波系統可行性的佐證。

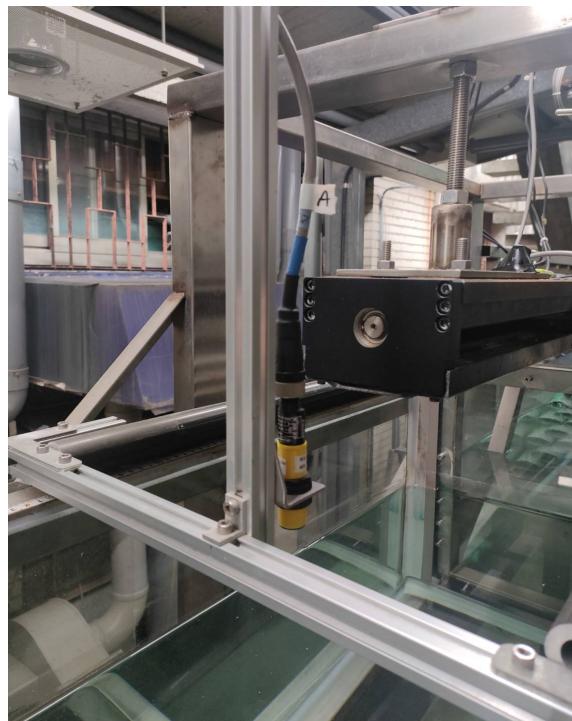


圖 4.3: 方案一：波高計固定於指定位置

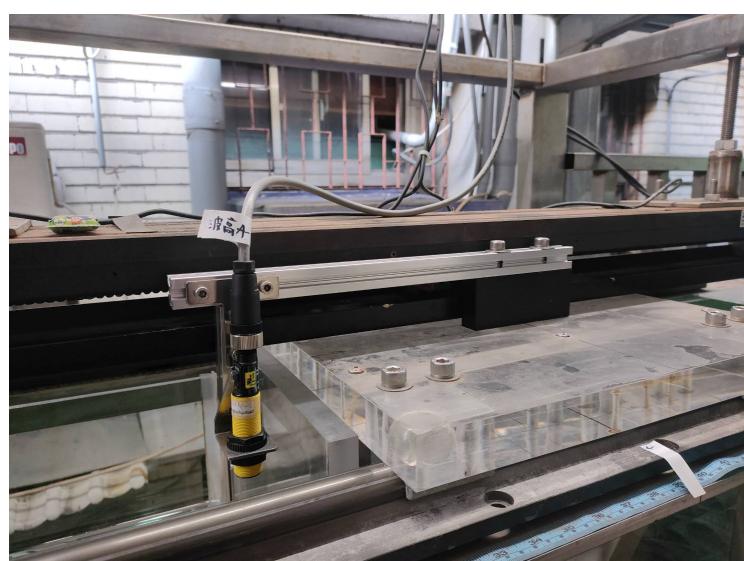


圖 4.4: 方案二：波高計跟隨造波板移動



4.2.1 虛擬軸

在進行實體試驗前，本文首先利用運動控制器內建之虛擬軸功能，以模擬造波板之實際運動狀態，有效預防初期測試中，可能發生之撞機或其他安全性問題，在確保系統設定合理且控制流程無誤後，才能進一步執行實體設備測試。

4.2.1.1 疊加消除法驗證

本文在大水槽恆定水深 0.36 公尺下，使用週期 1 秒、波高 0.04 公尺之週期波況，假設為控制器需要即時消除的反射波，控制器會針對波高計 1 所擷取到的表面高程數據使虛擬軸進行消波，模擬情形如圖4.5所示，其中紅線為波高計 1 量測到的表面高程數據、橘線為經過式3.3運算後虛擬軸所模擬馬達作動的軌跡運動。

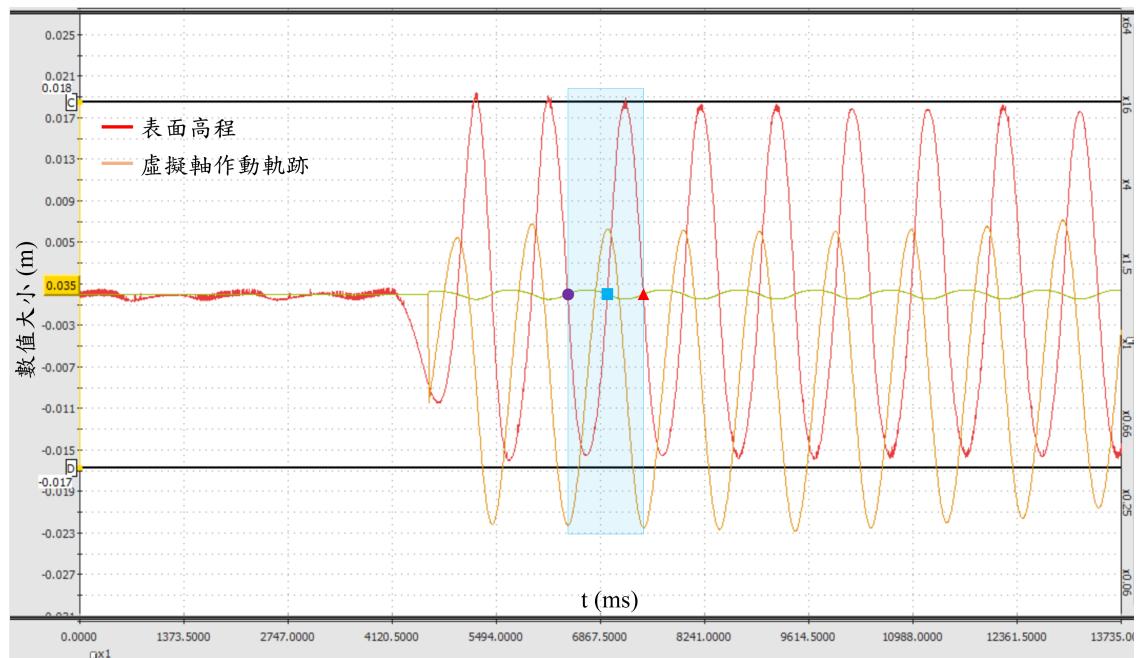


圖 4.5: 虛擬軸之週期波疊加消除法驗證

由圖4.5可以發現表面高程與軌跡值，保持一定相位的差距。針對一個周期內的波形進行分析，即藍色方框區域，就可以觀察到當表面高程（紅線）的值為負時（圓紫點到方藍點），軌跡值（橘線）會不斷累積並往正向作動，直到表面高程

(紅線) 開始為正時 (方藍點到三角紅點)，軌跡值 (橘線) 才開始往負向作動。此現象與式3.3計算結果相符，當表面高程越小時，造波板需要推更多的行程來補足水位，反之亦然。在這次的模擬中，成功驗證疊加消除法及運動控制器的閉迴路控制，符合即時反饋的效果。

4.2.1.2 可調式時間序列

實際運作中，運動控制器在計算消波軌跡時，可能會因與波浪實際傳遞速度不同步而產生相位差。當控制器之運算與反應速度快於波浪傳遞至槳板的時間，即有可能導致消波動作提前，造成消波效率降低或反向干擾波場。為解決此問題，本文採用「可調式時間序列」策略，控制器在完成消波軌跡計算後，使槳板進入短暫等待階段，唯當需要消除之波浪抵達槳板位置時，才啟動消波作動，其模擬結果如圖4.6、圖4.7所示。

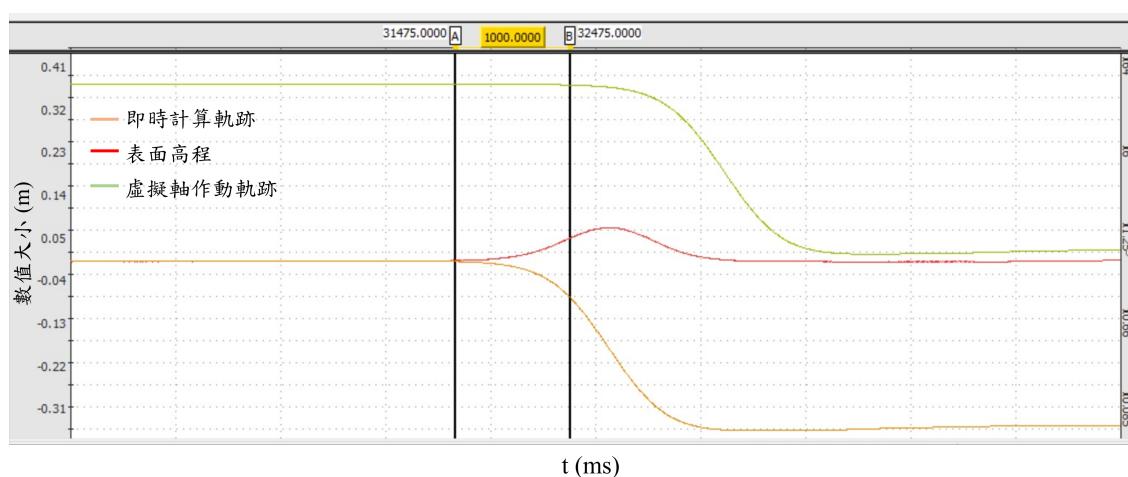


圖 4.6: 可調式時間序列-虛擬軸延遲 1 秒後作動

為了更清楚分辨可調式時間序列的效果，本文使用 $\epsilon = 0.2$ 之孤立波作為消波目標 (紅線)，並且設定 1 秒鐘的延遲。因此在圖4.6中，在控制器計算完成後 (橘線)，槳板會延遲 1 秒才開始追隨控制器所得出的軌跡作動 (綠線)。而4.6則是設定 5 秒鐘的延遲，數據結果顯示，使用者可以視實際情況手動調整延遲時間，而

運動控制器能夠準確依照使用者所設定之時間，延遲啟動槳板作動。

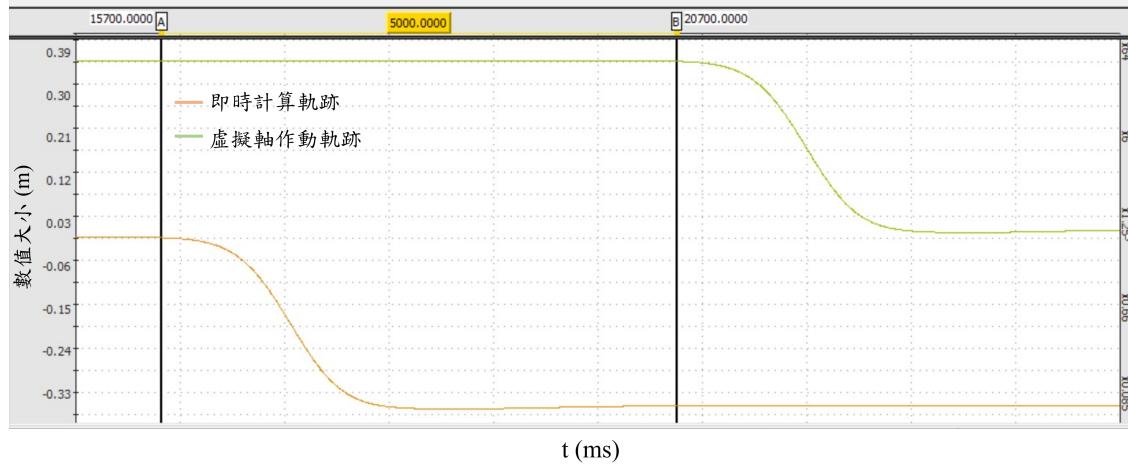


圖 4.7: 可調式時間序列-虛擬軸延遲 5 秒後作動

另外，若控制器之運算與反應速度慢於波浪傳遞至槳板的時間，就不符合使用可調式時間序列的控制模式，使用者則需調整波高計擷取資料之位置，讓數據能更早傳達至控制器裡進行運算。不過經由實驗數據得知，控制器從接收到資料、運算到發出軌跡指令給驅動器不會超過 15 毫秒 (ms)，因此上述情形發生機率不大。

4.2.2 實體軸

經過上一節虛擬軸的測試，已成功確保控制器所產生之消波軌跡能夠正常在滑台運動範圍內，並不會發生撞機。另一方面，控制程式中亦整合滑台保護機制，包含行程限制與異常停止判斷，以確保使用者在操作控制設備時的安全性。至此，本章節將進一步說明分離式主動消波於實際環境下之運作情況，包含消波效果評估與控制響應表現，並綜合比較波高計 1 於兩種擺放方案下之消波效果，於最後總結出最佳的擺放配置。



4.2.2.1 孤立波

實際測試時為了方便觀察及調整，本文也是先選擇非線性較低 ($\epsilon = 0.2$) 之孤立波，在大水槽恆定水深 0.36 公尺下進行實驗。波高計 1 的位置則先選用方案一，即固定於距離造波板 55 公分位置處 ($d_{WG} = 55$ 公分)，擷取反射波表面高程，測試結果如圖 4.8、圖 4.9 所示。

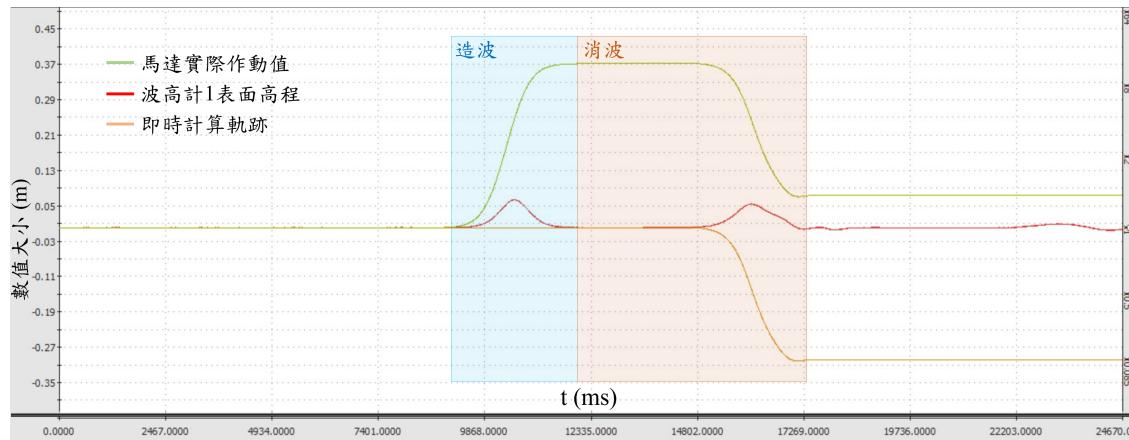


圖 4.8: 分離式主動消波-孤立波 ($\epsilon = 0.2$, $H_{sol} = 0.072$ 公尺, $d_{WG} = 0.55$ 公尺)

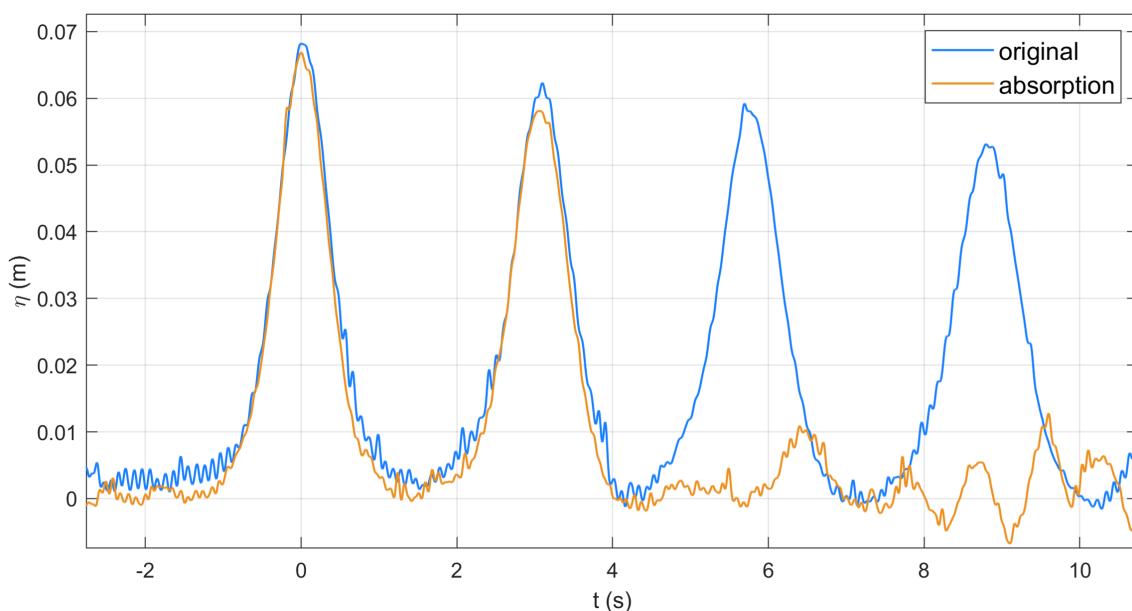


圖 4.9: 分離式主動消波-孤立波波高計 2 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.55$ 公尺)

圖 4.8 描述控制器先製造孤立波後，立即啟用主動消波，保險起見本次實驗消波時長只有 5 秒鐘，避免系統過度震盪。可以清楚看到馬達跟隨控制器即時計算

的消波軌跡作動，消除了水槽中後續的反射波。圖4.9則描述波高計 2 所記錄的表面高程歷時，可以明顯發現在開啟主動消波後，水槽內的反射波有大幅減少，雖然大致上有產生消波效果，但再反射波 (η_{RR}) 還是有大約兩公分的震盪，無因次再反射震盪幅度 η_{RR}^* 約為 0.28。最大的原因可能是波高計 1 因滑台限制而距離造波板太遠，導致造波板軌跡與反射波浪的相位不一，需要額外使用可調式時間序校正，而且反射波表面高程也很可能在這段傳播中下降，導致控制器預先計算的消波過量。

為解決上述問題，本文於方案二中採用鋁擠型結構，將波高計 1 固定於滑台上，使其可隨造波板同步移動。在波高計 1 與造波板之間距離方面，本文考量運動控制器於邊緣運算階段所需之延遲時間約為 15 毫秒，結合波浪在水槽中之傳播速率。經過估算，波高計 1 架設於距造波板 3 公分處 ($d_{WG} = 3$ 公分) 即可，可有效減少控制器計算時序與波形到達的時間差，使消波作動能更精準對應波形，提升主動消波效能。使用方案二之消波結果如圖4.10、圖4.11所示。

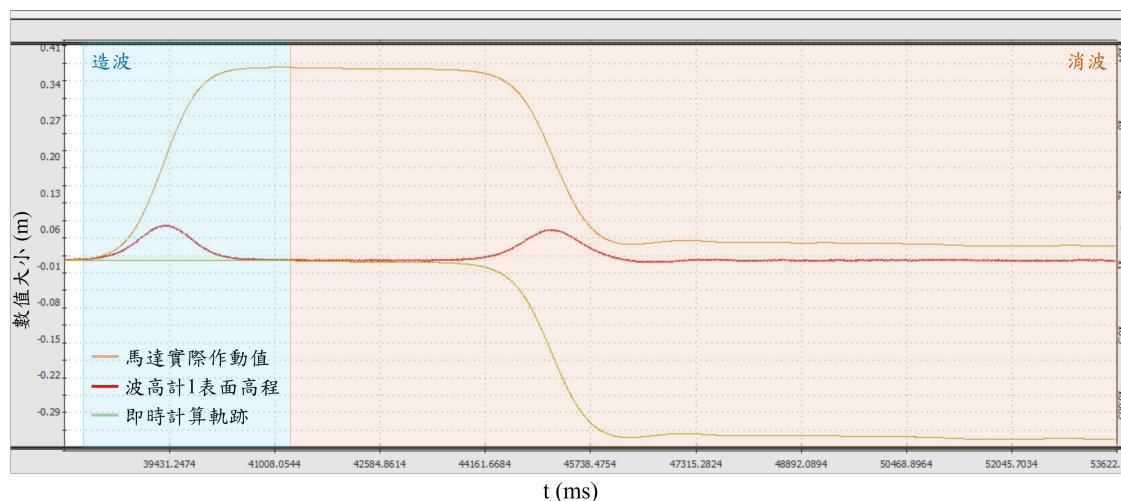


圖 4.10: 分離式主動消波-孤立波 ($\epsilon = 0.2$, $H_{sol} = 0.072$ 公尺, $d_{WG} = 0.03$ 公尺)

圖4.10中，控制器一樣先製造孤立波，之後再進行主動消波，經過控制系統的改良，本次實驗將無限時的消波，使控制器不斷擷取並計算消波軌跡。在波高計 1 中，其記錄到消波後波形有明顯減小，在圖4.11中，再反射波的表面高程趨



近於零，更可以證明方案二的配置與回授控制系統是成功且穩定。

另外，方案一 ($d_{WG} = 55$ 公分) 與方案二 ($d_{WG} = 3$ 公分) 的主動消波比較結果如圖4.12所示。可以觀察到，跟隨造波板一起移動的方案二有顯著提升消波結果，這種配置也符合Andersen et al. (2016) 所提到的波高計與造波板距離應限制在 10 公分以內。

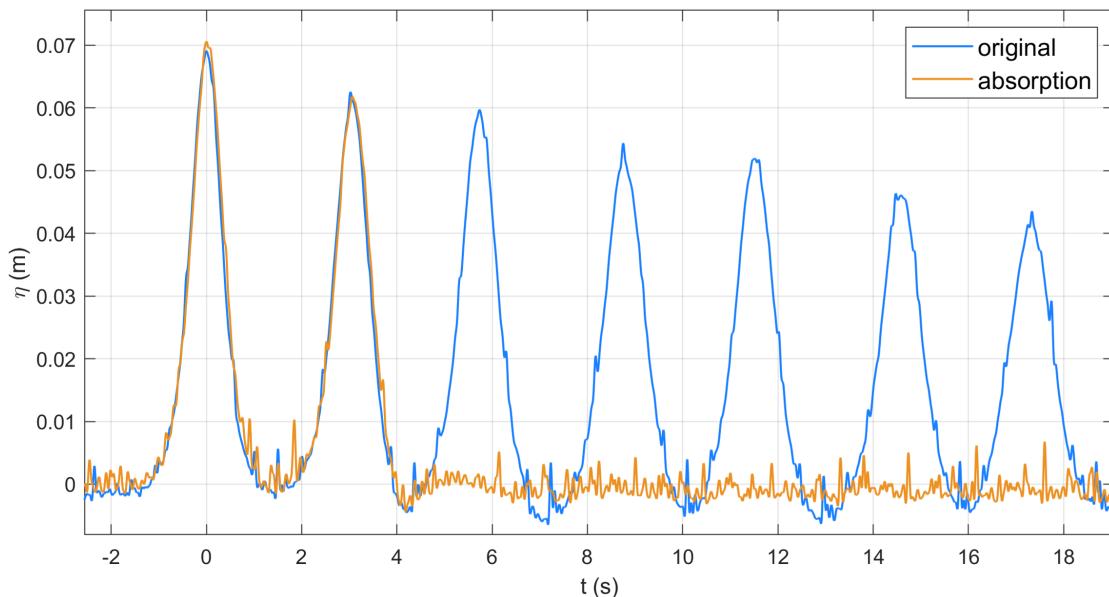


圖 4.11: 分離式主動消波-孤立波波高計 2 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)

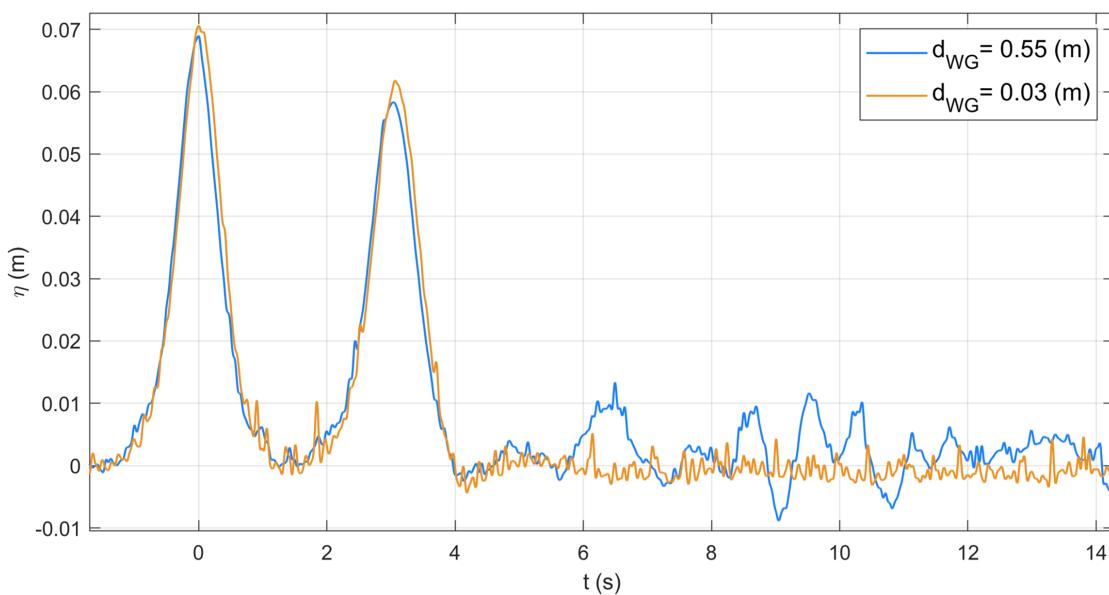


圖 4.12: 方案一 ($d_{WG} = 0.55$ 公尺) 與方案二 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺) 消波效果比較



4.2.2.2 週期波

本小節接續進行週期波之主動消波實驗，其波況為週期 $T = 1$ 秒、波高 $H_{per} = 0.04$ 公尺、大水槽恆定水深 0.36 公尺。由於前一小節已得出 $d_{WG} = 3$ 公分主動消波效果較佳之結論，因此接下來的實驗中波高計 1 與造波板的距離皆採方案二。週期波分離式主動消波實驗結果如圖 4.13、圖 4.14 所示。

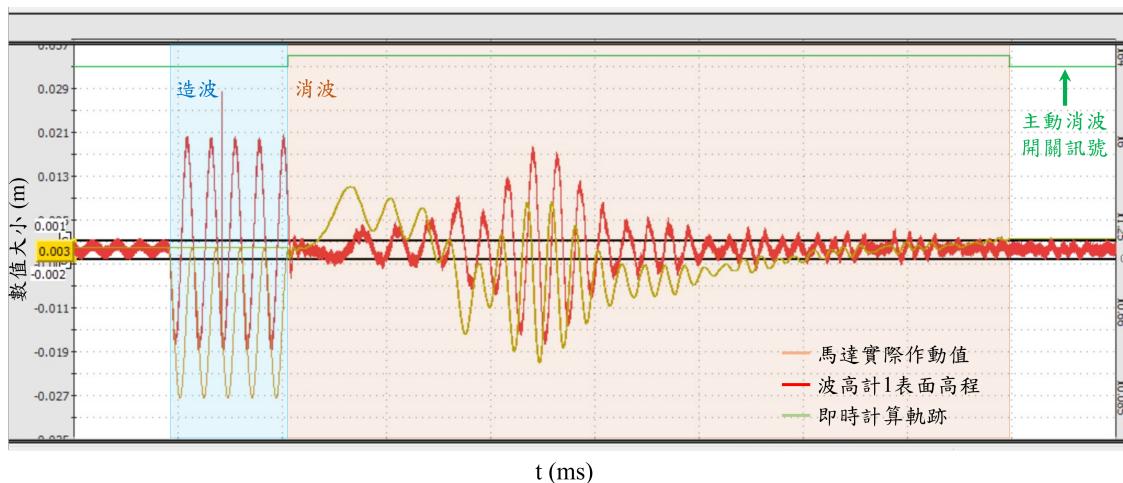


圖 4.13: 分離式主動消波-週期波 ($T = 1$ 秒、 $H_{per} = 0.04$ 公尺)

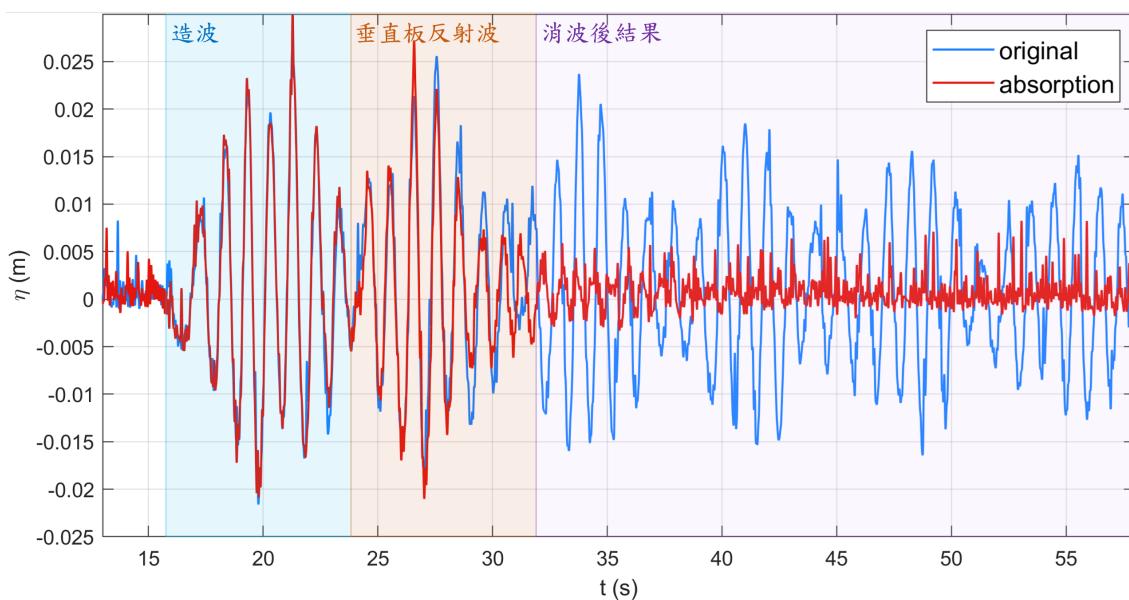


圖 4.14: 分離式主動消波-週期波波高計 2 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)

圖 4.13 中，控制器在製造完週期波後，開始執行主動消波（可參照綠線變



化)，整座水槽的反射波在消波停止前就近乎消除，剩餘之震盪不超過 3 毫米。另外，馬達之作動可以有效反應控制器即時計算之消波軌跡，這些成功的閉迴路控制，使主動消波效果大增，如圖 4.14，由 lowpass 濾波處理後之波高計 2 表面高程歷時圖中明顯看出消波成效。

4.3 整合式主動消波

本小節將接續以整合式主動消波針對週期波探討消波結果，週期波波況與上一小節相同，不過主動消波策略將改為在造波的當下，同時偵測反射波大小並透過疊加消波軌跡，以即時消除再反射波。設備架設部分，波高計 1 一樣採取方案二 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺) 之擺放方式，而壓克力垂直板則移至距離造波板二公尺處，使反射波更快速抵達，便於實驗觀察。

在實際測試中，先透過 MATLAB 計算出目標入射波的解析解，輸入於控制器以提供計算消波軌跡參照。推板將依序製造 10 個週期波，為避免因剛開始造波水槽波況還不穩定，本文設定控制器在製造第二個波時才會開始偵測反射波表面高程，並將消波軌跡疊加在造波軌跡上，如圖 4.15 紫色區域所示。

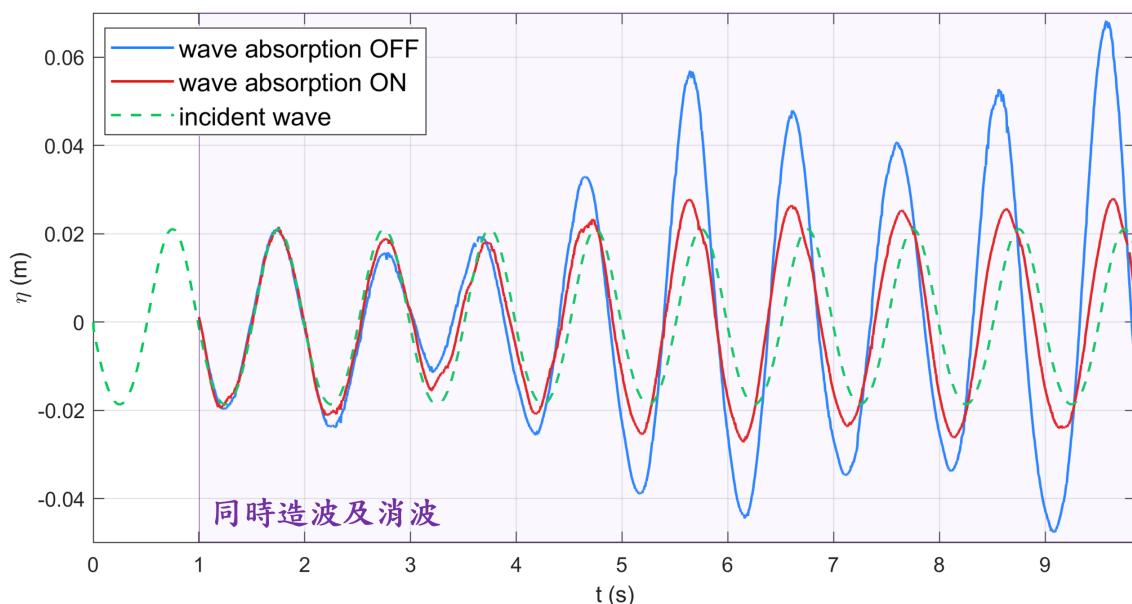


圖 4.15: 整合式週期波主動消波-波高計 1 表面高程歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)



由圖4.15可以看出，沒有開啟主動消波時（藍線），因多重反射波的影響下，水槽內表面高程時大時小相當不穩定；而開啟主動消波時（紅線），在第6個週期波通過後，場域波況就越趨穩定，確實有抑制推板端的再反射波浪生成。開啟主動消波時（紅線）之所以無法與目標入射波（綠色虛線）完全吻合，是因為目前架設方式是末端為壓克力垂直板，如圖4.16所示，垂直板之反射波（圖4.16中紫色箭頭、圖4.17中的紫線）會與目標入射波（圖4.16中綠色箭頭）疊加，因此實際量測之表面高程不會與綠色虛線一致，而再反射（4.16中紅色箭頭）則會被即時消除，才能使後續波況趨於穩定。

此外，圖4.17中的紫線為紅線提取出之反射波成分，由綠色虛線可以看到，第一個週期波由波谷開始製造。因此，本文由紫線第一個較明顯向下處，計算為第一個反射波波谷。若使用 Stokes wave 二階理論，由式2.22至式2.26且只取用到二階項並代入目標波況，再搭配下式：

$$c_{per} = \frac{\omega}{k_{per}}, \quad (4.1)$$

其中 c_{per} 為週期波波速，即可估算波浪傳遞速度約為 1.4 (公尺/秒)。另外，波高計 1 採用方案二架設 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)，且壓克力垂直板距離造波板 2 公尺，因此反射波（圖4.17中的紫線）傳遞距離為 3.97 公尺。最終，經上述計算得知反射波理論傳遞時間約為 2.7 秒，與實際量測之情況相近，因此更能確定量測到的表面高程，絕大部分為壓克力垂直板所產生的反射波。

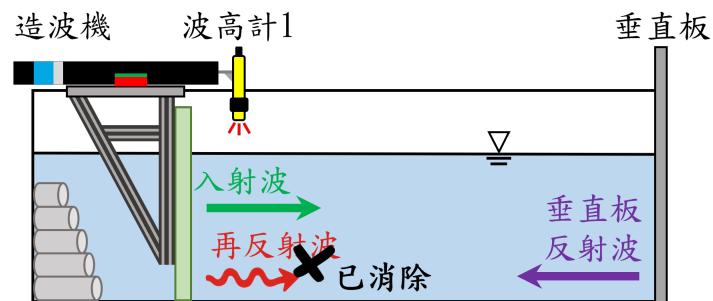


圖 4.16: 整合式主動式消波示意圖 (未依實際比例繪製)

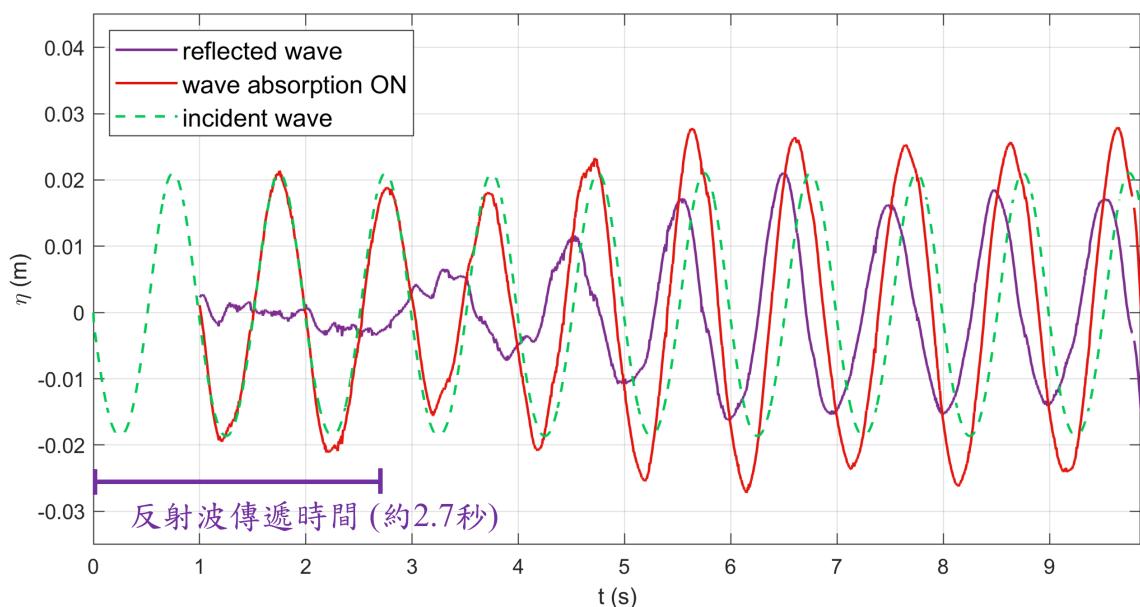


圖 4.17: 垂直板反射波提取-波高計 1 撷取之歷時圖 ($d_{WG} = 0.03$ 公尺)



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

實驗水槽在製造波浪之後，由於受到尺寸的侷限，反射波會在水槽內部不斷產生，直到能量完全耗散，導致場域內實際波浪與目標不符。因此，使用者可能會在水槽末端放置緩坡、藤棉或網狀結構物來吸收波浪，這些方式稱之為被動式消波。雖然被動式消波成本較低、材料容易取得，不過其有著三大劣勢：在固定外形下，僅能針對特定波況消波、佔據水槽體積較大、只能配置於水槽末端。為此，越來越多研究單位開始開發主動式消波。

主動式消波最大的特點是可以附加在造波機上，使消波端不只有存在水槽末端，其方法簡單分為三步驟，量測並擷取反射波大小、透過運算單元計算消波軌跡、再即時回授新的軌跡於造波機，達成一邊造波一邊消除待測物或水槽末端的反射波。因此，對於需要維持目標波況的水槽實驗，造波機勢必需要配備主動消波。現今已有多家造波機廠商可以搭配主動消波系統，不過其建置金額極其昂貴，因此，本文決定自行開發主動式消波技術。

本研究致力於二維平推式斷面水槽中加裝主動消波系統的可行性評估、設計與實作。實驗前期選用小型造波水槽進行消波方法的初步驗證，並在時間反轉法消除孤立波上取得初步成效，然而在遇到週期波或更複雜的波形時，小型造波水槽之硬體設備不再足以負擔即時閉迴路回授控制，因此無法有效驗證疊加消除法之可行性。至此，本研究將轉移至大型造波水槽的主動消波系統開發，其精度與原本的設備性能皆高於小水槽。

然而，大水槽之原有設備經過回授測試後，發現市售的運動軸卡，在 PT 運



動下無法即時額外加入更正的格點軌跡，使用週期同步位置運動又會遇到需要手動調整速度補償值以平滑加減速區間。因此，若要完成即時回授，則需要找到新型的運動控制器，並期望運動控制器擁有邊緣運算、本地處理的功能，在附加條件上，希望本身具有 I/O 通訊模塊，以實行電器隔離，脫離電腦作業系統的束縛，減少數據傳遞的延遲，並提升穩定度，形如 PLC 的系統架構。最終，本文選用 Yaskawa MP3300 作為造波板運動軌跡之核心控制器，其可以額外連接 I/O 模組，使所有數據皆處理於運動控制器內完成，減少資料傳輸的時間。

大水槽進行主動消波實驗時，本文先將造波與消波的運動控制分離，採用類似分離式主動消波的實驗流程，以便再次驗證疊加消除法之可行性。本研究於大水槽距造波板六公尺處，架設壓克力垂直板，於三公尺及四公尺處放置波高計紀錄波況，並於較靠近造波板處放置一支波高計以擷取需要消除的波浪表面高程。在同一台造波機中，運動控制器會先下達目標造波軌跡，待反射波撞擊壓克力垂直板後返回到造波板附近時，即時啟動主動消波，以消除反射波。經實測，擷取反射波的波高計架設在距離造波板 3 公分處 ($d_{WG} = 3$ 公分) 時，運動控制器可以近乎完全的消除孤立波之反射波，並能至少消除 75% 的週期反射波，證明此控制系統可以達成初步的主動消波。

其後，本文開始測試整合式主動消波，即在造波的同時計算消波軌跡以消除再反射波。於設備架設方式，波高計 1 一樣放置在距離造波板 3 公分處 ($d_{WG} = 3$ 公分)，而壓克力垂直板則移至距離造波板 2 公尺處，使反射波更快產生。在實驗中，開啟主動消波後確實可以消除場域中絕大部分造波端的再反射波，使水槽中僅剩下垂直板反射波與目標入射波。



5.2 未來展望

(1) 整合式主動消波遇到最大問題如圖5.1所示，本文目前無法即時清除波高計1所量測到的雜訊，其會影響消波軌跡的計算，導致控制器無法長時間的穩定運行主動消波，此為未來需要解決的首要目標。

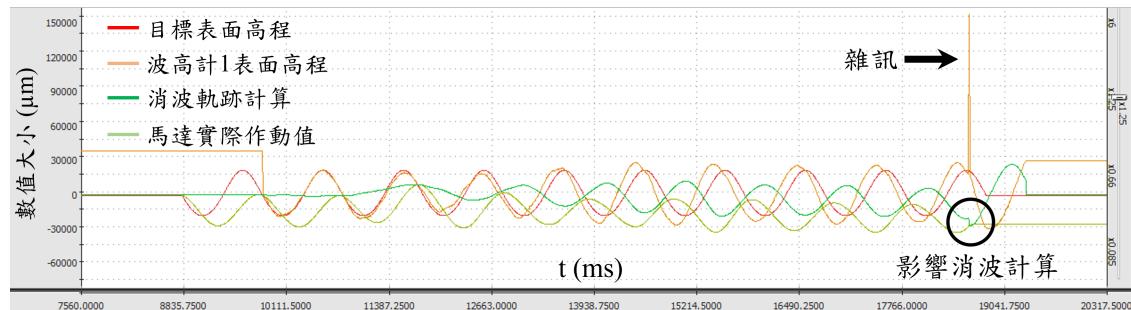


圖 5.1: 整合式週期波主動消波-波高計 1 表面高程歷時圖（雜訊干擾消波軌跡計算）

(2) 移除實驗室大型造波水槽末端現有之被動式藤棉緩坡板，改以與造波端同款之滑台機構，並一同使用 MP3300 進行控制，使水槽末端也具備主動消波之功能。

(3) 由於目前只有針對特定波況進行主動消波測試，未來可以嘗試更多不同種波況，對比與記錄其消波結果。

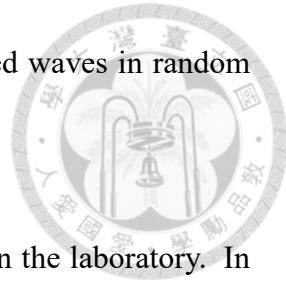
(4) 本文參考Schäffer and Klopman (2000) 之相關消波公式與反射波提取方法，未來可以改進或參考Andersen et al. (2016) 的方向，以不同方法提取反射波表面高程，或加入更多判別參數使主動消波更為精準。



參考文獻



- Andersen, T. L., Clavero, M., Frigaard, P., Losada, M., and Puyol, J. (2016). A new active absorption system and its performance to linear and non-linear waves. *Coastal Engineering*, 114, 47–60.
- Bullock, G. N. and Murton, G. J. (1989). Performance of a wedge-type absorbing wave maker. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(1), 1–17.
- Chatry, G., Clément, A., and Gouraud, T. (1998). Self-adaptive control of a piston wave absorber. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, pages ISOPE-I. ISOPE.
- Christensen, M. and Frigaard, P. (1994). Aalborg University, Sohngaardsholmsvej 57, DK-9000 Aalborg, Denmark. In *Proceedings of the International Symposium: Waves—Physical and Numerical Modelling: University of British Columbia, Vancouver, Canada, August 21-24, 1994*, volume 1, page 100. Department of Civil Engineering, University of British Columbia.
- De Mello, P., Carneiro, M., Tannuri, E. A., Kassab Jr, F., Marques, R. P., Adamowski, J. C., and Nishimoto, K. (2013). A control and automation system for wave basins. *Mechatronics*, 23(1), 94–107.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, volume 2. world scientific publishing company.
- Francis, V., Ramakrishnan, B., Rudman, M., and Valizadeh, A. (2020). Generating stable solitary waves with a piston-type wavemaker. *Coastal Engineering*, 157, 103633.



Godá, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. In *Coastal Engineering 1976*, pages 828–845.

Goring, D. and Raichlen, F. (1980). The generation of long waves in the laboratory. In *Coastal Engineering 1980*, pages 763–783.

Grimshaw, R. (1970). The solitary wave in water of variable depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 42(3), 639–656.

Higuera, P., Losada, I. J., and Lara, J. L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering*, 101, 35–47.

Hughes, S. A. (1991). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World Scientific, Singapore.

Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, volume 7. World Scientific.

Le Méhauté, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer Science & Business Media.

Lin, C.-Y. and Huang, C.-J. (2004). Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges. *Coastal Engineering*, 51(5-6), 395–406.

Liu, P. L.-F., Park, Y. S., and Cowen, E. A. (2007). Boundary layer flow and bed shear stress under a solitary wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 574, 449–463.

Madsen, O. S. (1971). On the generation of long waves. *Journal of Geophysical Research*, 76(36), 8672–8683.



Malek-Mohammadi, S. and Testik, F. Y. (2010). New methodology for laboratory generation of solitary waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(5), 286–294.

Mansard, E. P. and Funke, E. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In *Coastal Engineering 1980*, pages 154–172.

Milgram, J. H. (1970). Active water-wave absorbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 42(4), 845–859.

Salter, S. (1984). Physical modelling of directional seas. In *Proc. Symp. on Description and Modelling of Directional Seas, Copenhagen*, pages 81–89.

Salter, S. H. (1981). Absorbing wave-makers and wide tanks. In *Physical Modelling in Coastal Engineering*, pages 185–202. Routledge.

Schäffer, H. A. and Jakobsen, K. (2003). Non-linear wave generation and active absorption in wave flumes. In *Long Waves Symposium, Thessaloniki, Greece*.

Schäffer, H. A. and Klopman, G. (2000). Review of multidirectional active wave absorption methods. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 126(2), 88–97.

Spinneken, J. and Swan, C. (2009). Wave generation and absorption using force-controlled wave machines. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, pages ISOPE-I. ISOPE.

Stokes, G. G. (1847). On the theory of oscillatory waves. *Trans. Cam. Philos. Soc.*, 8, 441–455.



Svendsen, J. (1985). Physical modelling of water waves. In Dalrymple, R. A., editor, *Physical Modelling in Coastal Engineering*, pages 13–47. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. doi:10.1201/9780203743379.

Zhao, K. and Liu, P. L.-F. (2022). On Stokes wave solutions. *Proceedings of the Royal Society A*, 478(2258), 20210732.

Zhao, K., Wang, Y., and Liu, P. L.-F. (2024). A guide for selecting periodic water wave theories—Le Méhauté (1976)'s graph revisited. *Coastal Engineering*, 188, 104432.

林立剛 (2021). N 型波傳遞之數值模擬與實驗驗證. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系學位論文, pages 1–78.

楊婉青 (2023). 以實驗方法研究孤立波於黏性泥床上過垂直圓柱. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系學位論文, pages 1–99.

邱信瀚 (2024). 以水槽實驗探討潛沒式穿孔消波裝置之消波效率. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系學位論文, pages 1–128.