

系統工程程序導入功能型水下遙控載具研製

Development of Function-Based Submersible Remote-Controlled Vehicles through Systems Engineering Processes

著者／劉俊佑、林聖義、蔡渙良、陳建宏

Liu, Jun-You、Lin, Sheng-Yi、Tsai, Huan-Liang、Chen, Jian-Hong

劉俊佑 大葉大學電機系、林聖義 大葉大學電機系、蔡渙良 大葉大學資工系、陳建宏 玉豐海洋科儀

摘要：

本研究利用系統工程程序，配合功能型水下遙控無人載具的專案開發，規劃出一套專屬於此專案的開發流程，開發過程制訂一個完整的工作期程表，配合系統工程的核心精神列出工程管理範疇、計畫總期程以及各階段的時間和所需要完成的工作等。

本研究成功利用系統工程的程序導入開發案，使用修改後的 V 型開發流程取得了不錯的結果，這種程序有助於提高專案效率與品質並且提高開發案的可控性。

壹、前言

1.1 背景

1.1.1 系統工程背景^[1]

系統工程是一個跨學科的工程領域，結合了工程學、管理學和系統思維等多個學科領域的知識和技術。起源於 20 世紀 40 年代的軍事和航空工業，隨後逐漸擴展到

其他領域，如航太工程、交通運輸、能源以及醫療保健等。隨著科技的不斷發展和新興科技領域的崛起，系統工程的重要性越來越受到重視，在設計和管理複雜系統、提高系統效能和可靠性、降低風險和成本等方面皆發揮了重要作用。系統工程的概念和方法也在專案開發、軟體開發、大數據分析、人工智能和自動化等領域得到廣泛應用。

1.1.2 水下遙控載具發展背景^[2]

水下遙控載具 (Remotely Operated underwater Vehicles, ROVs), 有些人將第一個 ROV 歸功於 Dimitri Rebikoff, 他在 1953 年開發了名為“POODLE”的 ROV。然而, 該載具主要用於考古研究, 對 ROV 歷史的影響很小, 但它算是個開始。在 1975 年左右載具的數量開始快速增長, 到 1982 年底已增至 500 輛。在 1990 年代末, 估計有 100 多家載具製造商和 100 多家運營商使用了約 3000 輛不同尺寸和功能的載具。時至今日, 由於電子工業技術蓬勃進展支持以及 ROV 需求擴增, 載具的類型與數量目前已增加到已無從統計的狀況。

ROV 由 1974 年發展到至今, 已有近 50 年的歷史, 發展過程中, 開發流程並未進行統一, 因此本研究嘗試將系統工程程序導入開發過程, 制訂出一套適用於 ROV 的研製流程。

1.2 動機與目的

因目前業界或學術界針對 ROV 的開發流程並未統一, 開發的過程中欠缺完整且標準的流程可以供參考。假設有一個 ROV 專案要開發時, 因為沒有辦法依據標準的開發流程進行工程規劃, 只能自行定義出

一套專屬於本次專案的開發流程, 當下次又有新專案需要啟動時, 又需要花時間去訂製新的流程, 不但浪費時間與成本, 也無法達到作業程序統一及累積知識經驗之好處。為了避免上述情況的發生, 定義出一套專屬於 ROV 的開發流程是非常重要的。

在 ROV 開發過程中需整合多個專業技術領域, 工程內容涵蓋的範圍廣, 並且需考量到不同層面的問題, 因此參考系統工程程序來制訂 ROV 的開發流程, 以提高 ROV 專案開發的成功率, 看起來是一個值得嘗試的方向。當開發流程制訂完成後, 藉由專案執行過程來驗證其可行性, 並視執行成果進行調整與精進。

本研究之目的是將系統工程程序導入 ROV 的開發案, 參考系統工程程序規劃出新的開發流程, 讓專案能夠順利進行, 並且達成專案預期的目標與成果。

貳、理論基礎

2.1 系統工程介紹

2.1.1 系統工程定義^[3]

系統工程是一門跨學科的工程技術, 旨在設計、開發、部署和管理複雜系統。它涉及



對系統整體進行全面思考、設計和管理，包括硬體、軟體、人員、流程和資源等方面。

系統工程的定義從以下幾點說明：

- (1) 系統思維：從整體的角度來看待系統，而不僅僅關注其中的單個部分，可以幫助專案團隊理解系統的複雜性和相互關聯性，更好進行設計和管理專案。
- (2) 需求分析與管理：為確保對系統需求的準確理解和詳細記錄。導入需求工程的概念可以確保對項目需求的明確定義，並建立有效的需求管理機制。
- (3) 系統設計：強調系統的整體設計和組件之間的交互作用。導入系統設計原則可以幫助專案團隊設計出更協調一致的系統架構，並確保各個組件的有效總成。
- (4) 測試和驗證：系統工程強調測試和驗證的重要性，確保系統符合預期的需求和功能。測試和驗證方法可以提高專案交付的質量和可靠性。
- (5) 風險管理：系統工程重視風險管理，識別和評估可能的風險並制訂相應的對策。導入風險管理的觀念可以幫助專案團隊識別潛在的風險，並採取措施來降低風險對專案的影響。
- (6) 優化和改進：系統工程強調對系統性

能和效能的持續優化和改進。導入系統工程的精神可以促使專案團隊在開發過程中持續反思和改進，以提高專案的效率和成果。

2.1.2 系統工程程序^[4]

系統工程中，程序規劃是一個關鍵性的階段，它在專案開發流程中佔據著重要的位置。程序規劃是一個旨在確立專案的方向、目標和步驟的過程，藉此確保整個專案能夠有組織、有目標地前進，並最終實現預期的成果。

系統工程的程序從以下幾點說明：

- (1) 項目啟動：確定項目的目標、範圍和可行性。進行初步的需求分析、風險評估和預算估算，形成項目啟動文件。
- (2) 需求收集和分析：詳細收集並分析項目的需求。與利益相關者合作，確定項目的功能、性能、限制條件和非功能性需求。
- (3) 設計：基於需求，進行系統或產品的整體設計。這包括系統結構和模組的設計，以及資源的分配和時間計畫的制訂。
- (4) 實施和開發：根據設計文檔，開始進行實際的開發工作。這可能涉及軟體編碼、硬體製造、產品組裝等。

(5) 測試和驗證：完成開發後，進行系統的測試和驗證，測試的目的是確保系統符合需求、功能正常運作並達到預期的性能水平。

(6) 部屬和交付：通過測試和驗證後，將系統或產品部署到實際的環境中。這可能包括安裝和配置軟體、硬體設備或交付產品給客戶。

2.1.3 V 型開發流程^[5]

V 型開發流程是系統工程技術中最經典也具代表性之工程程序，如下圖 2.1 所示，置於生命週期框架的背景之下，已被應用到 ISO15288^[6]、ISO/IEC TR 19760 和 EIA 632^[7] 等工程流程標準。這個模型廣泛用於當前主流的系統工程教材中，廣泛接受的原因在於，該模型闡明了一些關於開發

早期階段與項目最終成果之間關係的關鍵系統原則。下表 2.1 為介紹 V 型開發圖的各階段名稱與目標。

表2.1：V型開發流程主要階段名稱與目標

階段名稱	任務目標
PHASE [-1] 區域性架構	1.與規劃和區域架構的口
PHASE [0] 概念探索	1.需求評估 2.概念探索與利益分析
PHASE [1] 專案規劃與運營概念	1.專案規劃 2.系統工程管理規劃 3.運營概念
PHASE [2] 系統定義與設計	1.需求開發 2.高層次設計 3.概念層次細部設計
PHASE [3] 系統開發與實施	1.硬體/軟體開發和單元測試 2.整合 3.驗證 4.初始系統部署
PHASE [4] 運營和維護/改版與升級	1.系統驗證 2.運營與維護 3.改版與升級
PHASE [5] 退役/替換	系統退役/替換

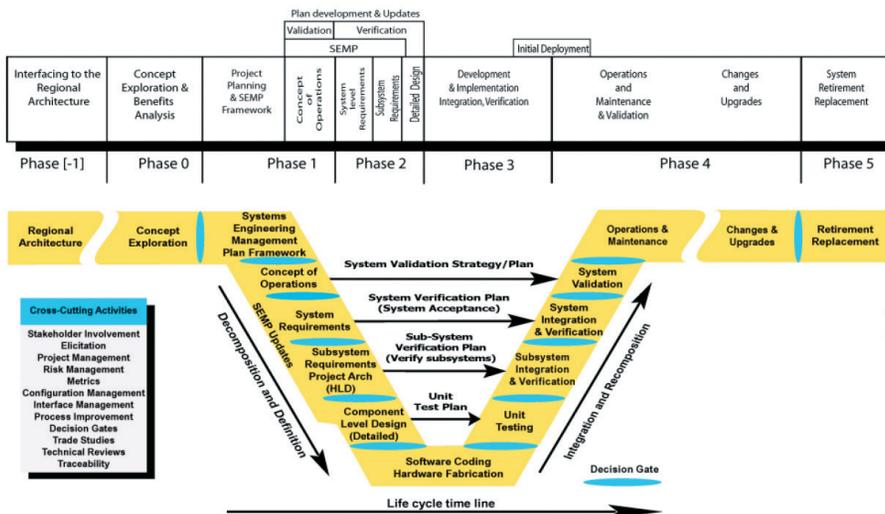


圖2.1：V型開發流程圖^[5]

2.2 ROV 簡介^[6]

ROV 經由電纜的方式連接著母船，再由母船上的操作員進行遠端遙控，並且搭載感測器、燈光模組、攝影機模組、機械手臂等，因此 ROV 可以實現人員不進入水中，還可以進行海底作業，利用這種方式可以保護人類不受到海底未知的危險，還可以深入研究海底，應用到的領域非常多

元，如下表 2.1 所示。

水下無人遙控載具 (ROV) 分為不同的種類，市面上常見的種類為：觀測級、工作型以及任務型；區分的標準為重量和搭載的感測器決定，觀測級與工作型比較如下表 2.2 所示^[6]；任務型載具的功能與其他載具的類型不一樣，任務型載具會根據任務目標，設計出一台新的水下載具，因為

表2.1：ROV應用領域^[6]

應用領域	描述
科學	政府、大學和工業研究機構通常需要收集感測器數據並進行取樣，了解特定環境的情況。
漁業	世界人口越來越多，全球海洋過度開發，養殖漁業在供應全球消費者食品方面變得更加重要。因此，ROV設備在養殖漁場的生產支援以及在開放水域漁場地點的監管合規方面得到廣泛應用。
軍事	在軍事應用中，ROV的主要需求為水雷對策，載具是一種專用的爆炸物投遞平台，該載具會投遞一枚爆炸物，然後離開該區域以進行引爆，或者“自殺”方式) 載具在水雷的近距離附近攜帶爆炸物，然後同時引爆載具和水雷。
國土安全	國土安全的需求包括對各種易受攻擊的地點進行定期檢查，以確保結構完整性和安全威脅的存在性，在這個應用中，ROV通常用於定期檢查和清查船體和碼頭的安全性。
公共安全	通常是警察和消防部門的範疇。每年划船的人經常因溺水而喪生，需要急救人員進行搜救，因此最常見的是搜索和尋找，以滿足社會大眾的需求。
鑽井作業	隨著對碳氫化合物的搜索進入世界各大洲海岸的深海區域，支援鑽井作業已成為必要的要求。在超過1000英尺（300公尺）的水深下，井口和防噴堵塞器已從海面移至海床，因此需要使用機器人進行所有工作。鑽井作業時需使用ROV支援是業界的標準。
檢查維修與維護	檢查、修理和維護（IRM）市場廣泛包括對各種行業的海床固定或浮動結構進行IRM。這些行業包括離岸風電場、養殖場、土木工程、船舶維護以及各種離岸油氣工業支持結構的IRM。對海床結構進行檢查的典型任務涉及對各種人造物品進行視覺和非破壞性測試/評估，以確保設施和主要/支援系統的安全性、完整性和功能性。

表2.2：ROV種類比較^[6]

種類	分類	重量	描述	輸入電壓	操作深度
觀測級	小型觀測級	≥4.5KG	基礎功能水下遙控載具，搭載攝影機、燈光以及一個感測器	110/220 VAC 1Φ	300m
	中型觀測級	4.5KG-32KG			
	大型觀測級	32KG~90KG			
工作級	標準工作型	≥91KG	功能性更複雜的水下遙控載具，可以攜帶多組感測器以及機械手臂	440/480 VAC 3Φ	>3000m
	重型工作型	≥91KG			
特殊使用	任務型	視需求而定	依照任務需求而製作出來的載具，有不同的類型，例如：履帶式、拖曳式以及結構式。	視需求而定	視需求而定

載具的用途以及功能的特殊性，才會獨立成任務型水下載具。

2.3 本研究開發之 ROV

本研究目標是開發一部具備清潔離岸風機海底基樁以及船艦船殼海矽子功能之 ROV，除可減少進行清潔作業所需的人力和資源，更重要的是可延長風機基樁及船體結構之使用壽期，大幅降低維保成本。本 ROV 開發過程將實際導入系統工程程序，制訂專屬之開發流程，並在技術、需求、資源、期程、成本以及風險等方面都得到妥善的管理，大幅提高專案的成功機會。

參、開發程序規劃

本章節開始將系統工程程序導入本研究 ROV 之開發流程中，根據實際需求進行調整，規劃出專屬的 V 型開發流程以及相對應的專案工作期程表，並詳細制訂各工作階段之執行重點與目標，將依序說明。

3.1 本專案 V 型開發流程

V 型開發流程，如下圖 3.1 所示，分為幾個階段，左斜線 (開發流程)：需求階段、功能階段、規格階段和生產製造圖採購規劃階段，加工生產零件採購階段，右斜線

(驗證測試)：生產組裝階段、模組測試、次系統測試和全系統測試。

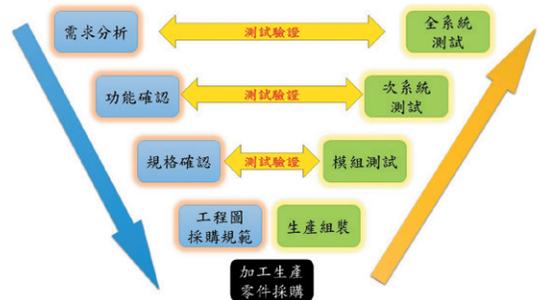


圖3.1：本案使用之V型開發流程

- (1) 需求分析：開發具清潔離岸風機海底基樁以及船艦船殼海矽子能力之 ROV。
- (2) 功能確認：依序列出「功能需求」、「系統需求」以及「系統功能」的詳細項目，並擬出一份「需求分析確認報告」。
- (3) 規格確認：確認「需求分析確認報告」後，將會決定出各系統該使用何種元件和裝備，以此滿足「功能需求」。
- (4) 工程圖與採購規劃：將設計完成的圖面，標上尺寸、材質以及加工的方式等，以此發展為「工程圖」；了解公司是否有針對採購提供著相關的規範。
- (5) 加工生產零件採購：硬體設計產出的各部件零件工程圖，發包給廠商加工生產；零件採購的部分，皆為市購件，交由相關單位採購，已備便後續的生



產組裝。

- (6) 生產組裝：待加工生產的零件與採購零件皆已備便後，將可進行生產組裝的部分。組裝前應先利用繪圖軟體，進行「模擬組裝順序」與「干涉分析」等研究。
- (7) 模組測試：此階段將會針對元件類進行單元測試，主要目的是測試元件可以正常使用無損壞，並且驗證規格階段決定出來的元件與裝備皆符合。
- (8) 次系統測試：全機組裝完成後，將會根據次系統功能做測試，這時會擬出兩份文件，分別為「組裝確認清單」和「功能測試清單」；「組裝確認清單」的測試項目為，列出所有的元件與裝備，針對文件內部所提出幾個檢查點，例如螺絲、矽油還有外觀等，對每個部分都進行詳細的檢查，檢查結束後沒有問題，才能給予通過的選項；「功能測試清單」的測試項目為，電力系統和人機介面整合的功能檢測，測試是否能夠如預期的動作以及檢測動作時的電力是否正常。
- (9) 全系統測試：在此階段會對應到一開始的需求階段，以「需求分析確認報告」中的需求為目的，該階段的測試將會

先擬出一些與需求相對應的測試文件「廠內測試清單(Factory Acceptance Test, FAT)」、「港邊測試清單(Harbor Acceptance Test, HAT)」以及「海上測試清單(Sea Acceptance Test, SAT)」。

待全機組裝結束，並完成次系統測試後，將會正式進入此階段，並完成預計需要做的測試，做完此階段的全部測試後，為V型開發流程圖的最後階段。

3.2 工作期程規劃

本次專案計畫為「功能型水下無人載具開發案」，目的為設計出一具能夠在水中清潔海纜子的水下遙控載具，專案開發過程依照上述的V型開發流程，訂製出一版工作規劃的期程，專案執行時間為16個月，將工作期程四個階段，區分為準備階段、設計階段、製造與測試階段與總結報告階段，如下圖3.2所示；專案執行時，各階段的文件與工作事項將會再進行詳細的介紹。

3.2.1 準備階段

準備階段：前一章節中提到的「V型開發流程圖」中的需求分析，將對應到工作期程規劃圖中的準備階段。

在此階段需產製幾份技術文件，技術文件詳細內容如表3.1所示。

3.2.2 設計階段

設計階段：設計階段中會分成三個部分，分別為「概念設計」、「初步設計」以及「細部設計」，分別對應著前一章節中提到的「V型開發流程圖」中的功能確

認、規格確認以及工程圖與採購規範。

將三個階段整合成工作期程中的設計階段，設計的圖面由簡單到複雜，以下將會一一提到各個設計階段的文件與工作內容。

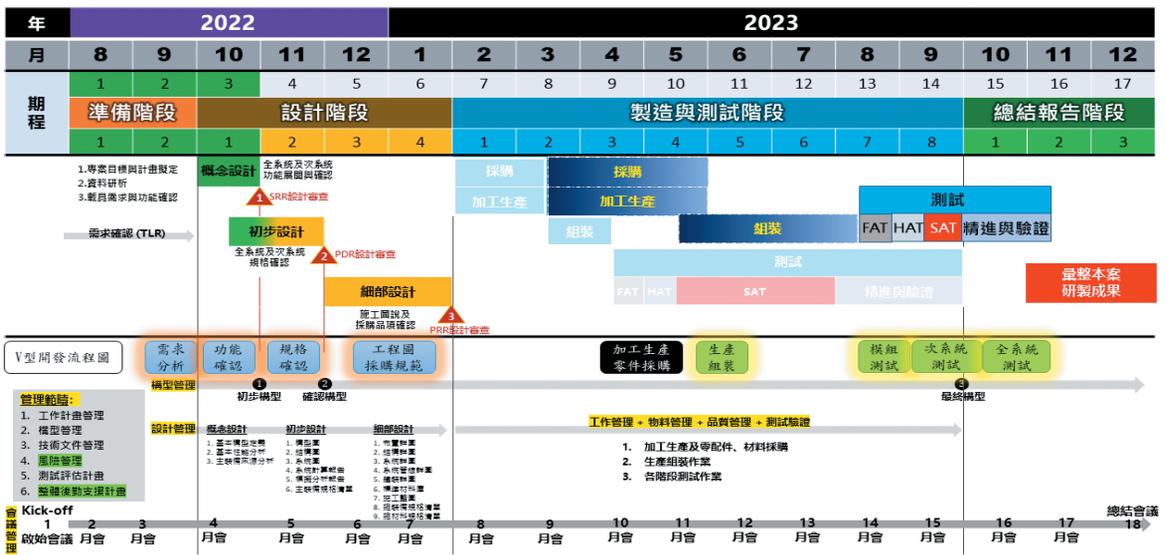


圖3.2：工作期程規劃圖

表3.1：準備階段技術文件說明

技術文件名稱	說明
需求分析確認報告	系統工程中最重要技術文件，從專案目標與計畫擬定，到載具需求和系統功能，經過多次的討論與細節的確認後，擬出一份「需求分析確認報告」，日後若是需要變更內容時，也需要召開會議，決定是否增加或是減少內容。
功能需求方塊圖	利用「需求分析確認報告」內容中的系統需求，擬出一張「功能需求方塊圖」，其內容會列出各系統所需要裝備與元件，目的是可以更清楚辨識出各系統與裝備和元件的關聯性。完成功能需求方塊圖前，會進行多次的會議確認，每進行一次更改，版本會向上更迭一個板次，版本將定義為『構型1.X版』，例如：構型版本1.1、構型版本1.2等……，後續的設計將會依照此圖為基礎，進行開發設計。
全系統層分圖	本專案為了讓系統之間的管理與控制能夠更方便，也為了讓管理後續的技術文件，需要先將系統進行合理規畫分配，因此本專案參考了INCOSE（國際系統工程學會）所推廣的一種分解結構（Enterprise Systems Engineering Work Breakdown Structure, ESWBS），這種結構有助於將複雜系統項目分解為可管理的小部分，從而更容易進行規劃、管理和控制。將全機區分成各個小系統，先進行最初步的分類，並且奠定圖層編碼的基礎，像是結構系統為100，電力系統為200。
工作管理計畫書	說明專案執行工作如何管制，管制內容包括：計畫目標、計畫時程、工作項目、管制時程以及專案編組，本計畫書皆會進行詳細說明。

3.2.2.1 概念設計

「概念設計」需產製幾份技術文件，技術文件詳細內容如下表 3.2 所示。

3.2.2.2 初步設計

「初步測試」需產製幾份技術文件，技術文件詳細內容如下表 3.3 所示。

3.2.2.3 細部設計

「細部設計」需產製幾份技術文件，文件詳細內容如下表 3.4 所示。

3.2.3 製造與測試階段

在此階段將會對應到，前一章節中提到的「V 型開發流程圖」中的採購、加工生產、組裝以及右斜線 (驗證測試) 的全部階段，在工作期程規劃中稱為製造與測試階段。

3.2.3.1 製造階段

「製造階段」需產製幾份技術文件，文件詳細內容如表 3.5 所示。

3.2.3.2 組裝階段

「組裝階段」需產製幾份技術文件，技術文件詳細內容如下表 3.6 所示。

依照規劃出來的 SOP 進行組裝，如果遇到與 SOP 不相同的地方，將會需要進行修正，所有變更改動的地方，將其記錄下來，以便日後的精進以及改動 SOP 的便利性，在全部組裝完成之後，將會產出『構型版本 5.X 版』。

3.2.3.3 測試階段

「測試階段」為組裝階段全部完成之後，將會根據「V 型開發流程圖」的驗證測試的精神，進行各階段的測試，分別為

表3.2：概念設計技術文件說明

技術文件名稱	說明
基本性能分析	為依照決定的規格，與廠內工程師討論可行性，並分析載具的基本性能，包括:載具在任務時的前進速度、進行任務時的載具如何移動等。
主裝備來源分析	需要與廠商討論過後，決定裝備的來源管道是由廠商提供、自行購買或是其他方式可以取得，確認之後，可以列出一個清單便於日後準備材料時能夠更加順利。
基本構型定義	依照上個階段的構型版本最終版為設計基礎，『構型版本1.X版』將在此階段會更改為『構型版本2.0版』。設計出來的圖面，會在圖面上標示出裝備的數量，以及元件的大致位置，完成圖面前，會進行多次的會議討論，每進行一次更改，版本會向上更迭一個板次，版本將定義為『構型版本2.X版』，例如：構型版本2.1、構型版本2.2等……。
技術文件管理計畫書	說明專案執行的技術文件如何管制，管制內容包括：講述目的、擬定編碼規則、階段圖說清單，在本計畫書皆會進行詳細說明。 考量後續設計階段圖面以及技術文件的數量，將需要進行管理，因此整合成一個有系統性的分類，供專案整體進行技術文件的整合與妥善留存。
技術文件編碼規則	文件整合需先定義出一套專屬此專案文件的編碼規則，編碼的原則是利於專案管理人員執行整體後勤文件管制作業，掌握在各期間各項文件的現況與版本等。
構型管理計畫書	說明專案執行的構型如何管制，管制內容包括：目標、構型管理方式以及構型版本的變更，在本計畫書皆會進行詳細說明。

表3.3：初步設計技術文件說明

技術文件名稱	說明
結構圖	利用Solidworks整理出全部的圖面，做成表單清點圖面的數量以及圖面與次系統之間的關係。
次系統層分圖	全機區分為次系統後，再把次系統往下細分為所有零件，並且將所有的層分圖，將所有圖層進行編碼，整理圖面總數。
空重水重計算報告	初步設計完成後，將會對載具進行計算，計算內容為載具在陸地和在水中的重量，利用理論的方式進行試算後，需討論是否有無變更的需求。
模擬分析報告	主裝備規格決定後，將會針對電力系統進行模擬分析，模擬載具在任務時，所有的裝備都用最大功率運作時，分析各裝備使用電壓電流的用量，並做成清單，討論是否需要更改規格。
主裝備規格清單	主裝備規格決定後，將主裝備的基本資訊，包括體積、工作電壓、重量、資料的傳輸格式以及感測器的精度等，做成清單，做成一份「主裝備規格清單」。
構型圖	依照上個階段的構型版本最終版為設計基礎，『構型版本2.X版』將在此階段會更改為『構型版本3.0版』。 設計出整體載具的大製外觀以及決定出元件與裝備的位置，進行更細部的設計，在設計的過程中，會進行多次的會議討論，每進行一次更改，版本會向上更迭一個板次，版本將定義為『構型版本3.X版』，例如：構型版本3.1、構型版本3.2等……。
測試評估計畫書	為專案進展至測試階段需要進行的模組測試、次系統測試以及全系統測試，需先擬定測試計畫，包括：測試時間、地點、參與測試人員、測試見證人以及測試項目，在本計畫書皆會進行詳細說明。

表3.4：細部設計技術文件說明

技術文件名稱	說明
結構詳圖 (細部設計構型圖)	依照上個階段的構型版本最終版為設計基礎，『構型版本3.X版』將在此階段會更改為『構型版本4.0版』。將已經決定好的圖面，進行細節上的設計處理，設計的過程中，會進行多次的會議討論，每進行一次更改，版本會向上更迭一個板次，版本將定義為『構型版本4.X版』，例如：構型版本4.1、構型版本4.2等……。
系統詳圖	以細部設計完成的圖面，依據上述的系統層分圖，將細部設計額外增加的零件，加入「系統層分圖」內，並且編碼，將所有的零件都完成編碼，此層分圖將不會進行改動，若是內容有變更，版本也需要變更，並且標示變更的原因。
工程圖	工程圖為設計階段中最後的步驟，將所有需要送加工的圖面，先進行標圖，把所需要的尺寸、材質以及要加工的資訊留在圖面上，再將「工程圖」送去廠商加工。
總材料規格清單	為細部設計完成後，利用全機的3D圖確認需要的材料數量與材料的名稱做成一份清單，此份清單內包含機械與電力兩個部分，機械部分的材料皆為五金件，皿頭內六角螺絲、pin等，電力部分的材料為電線、防水接頭、電路板等。
總裝備規格清單	為細部設計完成後，將可以整理出所有的裝備，包括上述的主裝備、結構版、加工件、市購件以及浮材等，將全部裝備的規格資訊做成清單，稱為「總裝備規格清單」，此清單上會標示裝備材質和尺寸，以便後續工程的進行。

表3.5：製造階段技術文件說明

技術文件名稱	說明
派工單	需要把設計階段的工程圖送去給加工廠商，需與廠商確認交期，追蹤發貨以及到貨的情況
零配件與材料採購清單	先確認零件與材料的規格和數量以及了解廠商的採購規範後，進行零件與材料的購買

表3.6：標準工作程序書文件說明

標準工作程序書名稱	說明
生產組裝SOP	備好材料和零件後，即可開始組裝，組裝順序將會在組裝前先利用軟體進行模擬，定出最理想的組裝順序，邊組裝邊拍照記錄，以便後續文件產出。
電力系統組裝SOP	電力系統需組裝部分為E-POD和TJB，組裝前先利用軟體繪製出電路圖或是配線圖，確認沒有問題後，等待材料一切備便後，即可開始組裝，組裝時拍照記錄，以便後續文件展出。
人機介面開發SOP	將會從需求分析到程式編碼，到最後展示出成品的開發全過程，皆會在此本SOP講述。

「模組測試」、「次系統測試」和「全系統測試」的驗證測試。

「模組測試」會針對規格部分進行測試，對應到的測試為「各部件測試」和「組合測試」；「次系統測試」會針對次系統的功能進行檢測，對應到的測試為「組裝確認清單」、「功能測試」；「全系統測試」會針對需求部分進行測試，對應到的測試為「FAT」、「HAT」以及「SAT」，

技術文件詳細內容如下表 3.7 所示。

3.2.4 總結報告階段

專案發展開始至結束，將所有的文件妥善留存，包含設計的演進、技術文件的撰寫以及構型版本的變更，並且討論專案全過程中發生的問題，如何精進、改良或是避免再次發生類似的問題，將資料彙整完成後，撰寫總結報告。

表3.7：測試階段技術文件說明

V形開發階段名稱	技術文件名稱	說明
模組測試	各部件測試	確認全部的元件可以正常運作，並且可以利用人機介面控制功能。
	組合測試	人機介面加入電力系統後，一起做測試，檢查兩者結合是否會出現問題，並且可正常使用。
次系統測試	組裝確認清單	載具全機組裝完成後，列出檢測清單，測試驗證清單上所列出的項目皆實際情況相符。
	功能測試	人機介面開發與電力系統，全數測試通過後，與載具結合進行檢測，檢測內容將會模擬在任務時進行測試，檢測功能是否能夠使用。
全系統測試	FAT	測試內容為主裝備檢測、壓力報告書、基礎功能測試以及人機介面檢測，測試環境主要是在陸地完成，有些功能需要在水中才能進行檢測。
	HAT	測試內容為施放與回收檢測、控制系統檢測、光學系統檢測、感測器檢測以及任務檢測，測試環境全部都將在水中完成，先在水中進行基本的操作，觀察運動的靈活性和其他功能是否可行。
	SAT	測試內容為對應需求階段所需要做的測試，像是電力、載具的控制以及清潔效果等。

肆、開發專案執行成果

研究團隊依據前一章節之開發程序規劃，實際進行本研究 ROV 開發工作，接續詳述每階段之執行成果。

4.1 準備階段

準備階段需產製的技術文件為「需求分

析確認報告」、「功能需求方塊圖」、「全系統層分圖」以及「工作管理計畫書」。

在本階段為明確本次專案的核心目標，因此需產製「需求分析確認報告」如下表 4.1 所示。再依照「需求分析確認報告」的內容，區分各系統之間的關係，所產製的「功能需求方塊圖」為構型 1.0 版，如

下圖 4.1 所示。根據「功能需求方塊圖」，再進行展開，並且定義各圖層的編碼，以便後續技術文件的整合，所產製的「全系統層分圖」如下圖 4.2 所示。

4.2 設計階段

分成三個設計階段，分別為「概念設計」、「初步設計」和「細部設計」。

4.2.1 概念設計階段

「概念設計」需產製的技術文件為「基本構型定義」、「基本性能分析」、「主裝備來源分析」「技術文件管理計畫書」、「技術文件編碼規則」以及「構型管理計畫書」。

技術文件編碼規則目的為方便文件的整

表4.1：載具需求分析清單

目標：開發具清潔離岸風機海底基樁海轎子能力之ROV	
需求分析	可在海水中作業，具水平運動能力
	藉纜線連接載具本體，人力遙控操作
	體積小，重量輕，易攜行，易施放回收
	操作人力為2人
	最大操作深度50米，具深度感測能力
	靠近基樁可用反向水流吸附結構體
	吸附後可啟動刷子進行清潔
	可將清潔前後之影像回傳
採定深橫向繞基樁左右半圓方式清潔，清潔速度為每小時20米。完成後回到原吸附點，下降適當距離重複前述動作，沿基樁由上而下依序進行清潔工作。	

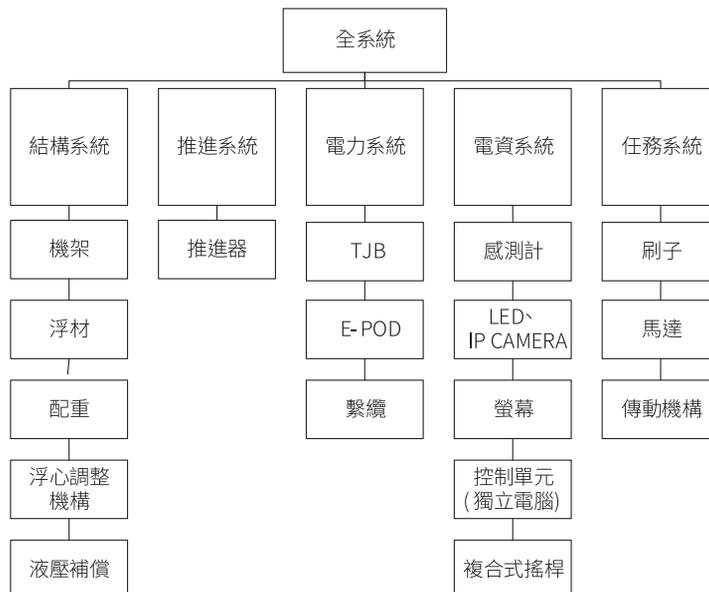


圖4.1：功能需求方塊圖（構型1.0版）

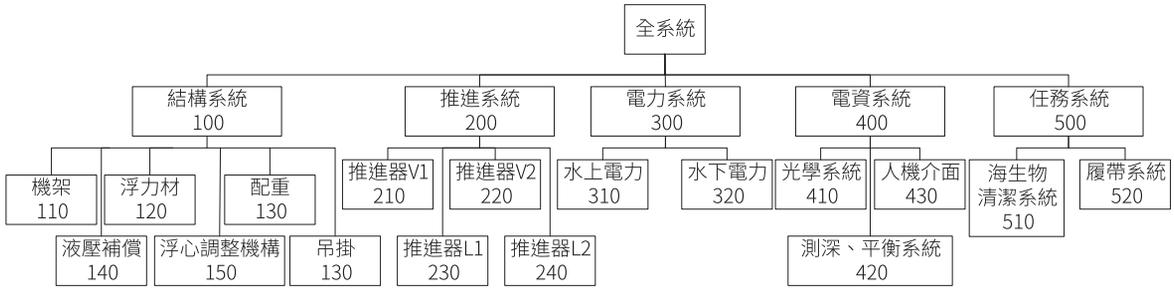


圖4.2：全系統層分圖

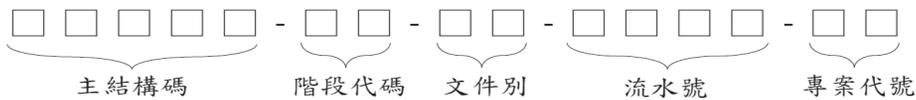
理，總共會有 16 個數字碼，其中會區分成 5 個部分，第一部分，依照「全系統層分圖」的圖層進行編碼，如圖 4.2 所示，最多到 5 碼，第二部分使用 2 碼，用於表示此份技術文件為專案執行時，某個特定階段的產製成果，第三部分使用 2 碼，用於區分文件類型，第四部份使用 4 碼，為流水號，第五部分使用 2 碼，用來區分專案，詳細的編碼規則如下表 4.2 所示。

在本階段確定了載具基本構型及主次要裝備，主次要裝備清單如表 4.3，所產製的為構型版本為 2.2 版如下圖 4.2 所示。

表4.3：主次要裝備清單

次系統	主次要裝備
推進系統	Thruster *7
電力系統	TJB、E-POD
光學系統	IP CAMERA、LED
感測系統	PCG-1000
載具結構系統	主結構、浮材
履帶系統	履帶
任務系統	刷子模組

表4.2：技術文件編碼規則



主結構碼	1. 參考本計畫系統層分編碼，不足五碼部分以「0」補足 2. 整體性無法歸屬單一系統裝備之文件，依專案結構碼可分屬類別，例如：000為技術文件類、100為結構系統類。
階段代碼	1. 第一碼為專案階段標記，例如：1-準備階段、2-設計階段...。 2. 第二碼為專案階段的次要工作項目，例如：21-概念設計、22-初步設計
文件別	1. 各類型的文件會有清單編號可以參考。 例如：01-計劃書、02進度管理。
流水號	1. 前三碼用於直接編號 2. 最後一碼為版次(A-Z)
專案代號	1. 各類型的專案，會有不同的清單編號可以參考。 例如：01-功能型水下無人載具開發案。

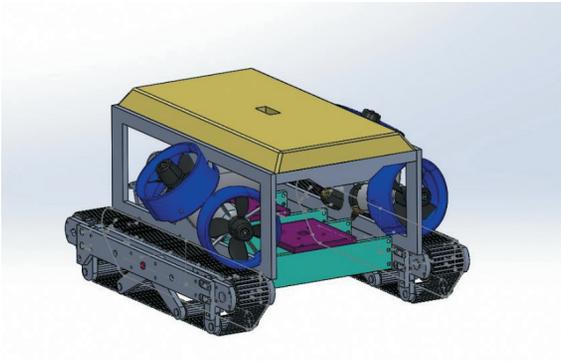


圖4.2：構型2.2版

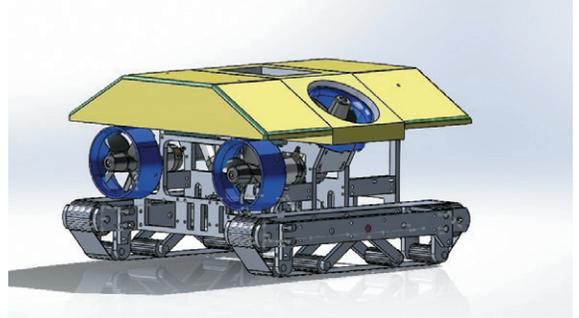


圖4.4：構型3.2版

4.2.2 初步設計階段

「初步設計」需產製的技術文件為「構型圖」、「結構圖」、「次系統層分圖」、「系統計算報告」、「模擬分析報告」、「主裝備規格清單」以及「測試評估計畫書」。

次系統層分圖是針對全系統層分圖的展開，細部圖展開的數量過多，無法展示，因此僅以電力次系統為例，如圖4.3所示，所產製的構型版本為3.2版如圖4.4所示。

4.2.3 細部設計階段

「細部設計」需產製的技術文件為「結構詳圖」、「系統詳圖」、「施工藍圖」、「總材料規格清單」以及「總裝備規格清單」。

本階段所產製的構型版本為4.3版如圖4.5所示。

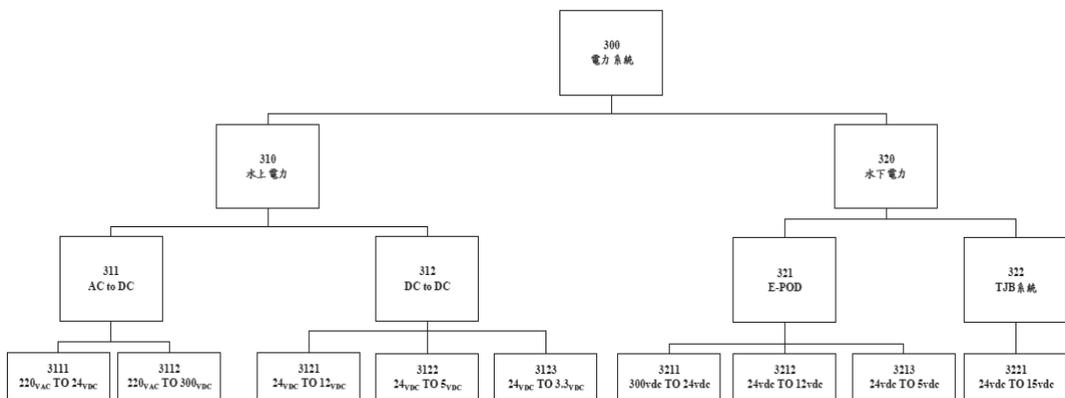


圖4.3：電力系統(300)層分圖

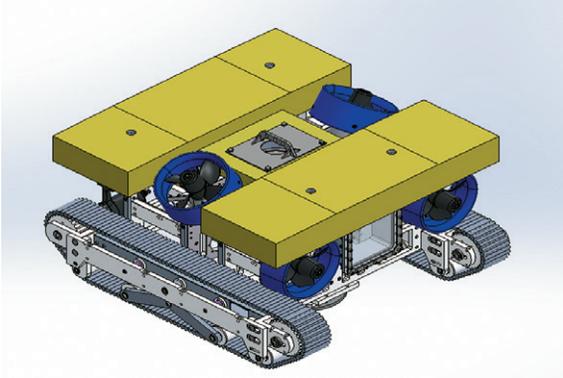


圖4.5：構型4.3版

4.3 生產製造組裝與測試階段

4.3.1 製作階段

製造階段需產製的技術文件為「派工單」以及「零配件與材料採購清單」。

4.3.2 組裝階段

組裝階段需產製的技術文件為「生產組裝 SOP」、「電力系統組裝 SOP」以及「人機介面開發 SOP」。

4.3.3 測試階段

測試階段需產製的技術文件為「模組測試」：「各部件測試」、「組合測試」；「次

系統測試」：「組裝確認清單」、「功能測試」；「全系統測試」：「FAT」、「HAT」以及「SAT」。

本階段為規劃測試清單並進行一系列測試工作，所產製的FAT清單如表4.4所示、HAT清單如表4.5所示，SAT清單如表4.6所示。

目前專案執行中，各階段的測試清單也都形成定版，後續將依照實際工程進展執行相關的測試。

4.4 總結報告階段

水下遙控載具開發案，成功使用系統工程的理論基礎導入，並且順利按照規劃的流程進行，也完成各階段完成的工作，後續將彙整所有關於本案的技術文件，撰寫總結報告書，以此讓專案可以結束。

本文件撰寫時，專案執行已經進展到生產製造組裝階段，並且即將完成，依照流程進行，可以順利進行測試，並且產製後續的文件。

表4.4：FAT清單

FAT Criteria	Check List		Test Results		檢驗方法
	Accept	Reject	Accept	Reject	
主裝備檢測	1	主骨架			1.檢驗是否正確安裝。
	2	浮力材			1.共三組，位於載具正上方。 2.檢驗是否正確安裝。
	3	履帶模組			1.共兩組，位於載具的左右兩側。 2.檢驗是否正確安裝。

FAT Criteria Check List Accept Reject			Test Results		檢驗方法
			Accept	Reject	
主裝備檢測	4	推進器			1.共七組。 2.檢驗是否正確安裝。
	5	刷子模組			1.共兩組，位於載具中心。 2.檢驗是否正確安裝。
	6	TJB			1.共一組，位於載具的後方。 2.檢驗是否正確安裝。
	7	E-POD			1.共一組，位於載具的前方。 2.檢驗是否正確安裝。
	8	PCG-1000			1.共一組，位於載具的中間位置。 2.檢驗是否正確安裝。
	9	IP CAMERA			1.共兩組，位於載具的前方以及下方。 2.檢驗是否正確安裝。
	10	23W LED			1.共兩組，位於載具的前方以及下方。 2.檢驗是否正確安裝。
壓力測試報告書	11	吊掛			1.共兩組，位於載具的上方。 2.檢驗是否正確安裝。
	1	Thruster			檢驗是否提供相關測試報告書。
	2	LED			檢驗是否提供相關測試報告書。
	3	IP CAMERA			檢驗是否提供相關測試報告書。
各部件基礎功能檢測	4	PCG			檢驗是否提供相關測試報告書。
	1	推進器(飛行模式)			共四組，能否順利正反轉。
	2	推進器(履帶模式)			共兩組，能否順利正反轉，並且可帶動履帶移動。
	3	推進器(清潔模式)			共一組，能否順利轉動，並且可帶動刷子轉動。
	4	23W LED			共兩組，接上電源後，可調整亮度。
	5	IP CAMERA			共兩組，接上電源與電腦後，可看到影像畫面。
人機介面檢測(控制配件-筆電)	6	PCG-1000			共一組，接上電源與電腦後，可看到資料。
	1	推進器開關			可以開啟/關閉"垂直"、"水平"、"履帶"、"刷子"的推進器。
	2	各軸向推進器的轉速			可以使用滑桿調節推進器的轉速。
	3	推進器(飛行模式)			1.以人機介面鼠標操控載具前進後退、上升下降、左轉、右轉、左翻轉右翻轉之移動方式。 2.控制轉速。 3.鬆開按鍵時，推進器即時停止運動。
	4	推進器(履帶模式)			1.以人機介面鼠標操控前進後退以及左右轉之移動。 2.控制轉速。 3.鬆開按鍵時，推進器即時停止運動。
	5	推進器(清潔模式)			1.以人機介面鼠標操控刷子轉動。 2.控制轉速。
	6	IP CAMERA			按下"啟動"，可以看到畫面，並且具備錄影功能。
	7	23W LED			可以使用滑桿調節燈光的亮度。
	8	介面數值顯示			顯示水下無人載具航向、深度、姿態的相關數值。
	9	載具姿態展示			1.人機介面的螢幕顯示之深度、艏向(heading)、俯仰(pitch)以及左右搖擺(roll)數值。 2.利用3D圖展示即時性的姿態。
	10	Auto Heading 定向			水池測試：啟動auto heading功能後，操作ROV轉向，ROV會自動轉回原本設定的方向。
	11	Auto Depth 定深			水池測試：啟動auto depth功能後，外部推動ROV，會自動移動回原本設定的深度(公差：± 0.2 meter)。
12	Auto roll 自動翻轉			水池測試：啟動auto roll功能後，設定翻轉的角度(+/-180°，ROV會自動轉到設定的角度(公差：± 5°)。	



表4.5：HAT清單

HAT Criteria Check List ACCEPT REJECT			測試結果		檢測方法
			Accept	Reject	
施放與回收 檢測	1	人工施放			施放載具時，是否能與吊掛掛勾連結，並順利下水
	2	人工回收			回收載具時，從水中收回到港邊的過程是否順利
控制系統檢測 (人機介面)	1	人機介面-推進器按鈕 (前、後、左轉、右轉、 上升、下降)			載具放入水中時，按下按鈕後，載具能否做出對應的運動
	2	人機介面-履帶按鈕 (前、後、左轉、右轉)			載具放入水中時，吸附牆壁後使用履帶進行移動，按下控制 按鈕時，載具能否做出對應的運動
	3	人機介面-翻轉按鈕 (左翻、右翻)			載具放入水中時，按下按鈕後，載具能否做出對應的運動
光學系統檢測 (人機介面)	1	IP Camera			檢測在水中，是否能夠正常運作，並清楚拍下影像
	2	23W LED			檢測在水中，是否能夠正常運作。
感測器檢測 (人機介面)	1	PCG資料回傳			檢測在水中操作時，PCG回傳的資料是否正確
	2	姿態感測			檢測在水中時，載具的姿態與人機介面上的姿態是否一致
任務檢測	1	任務系統			載具放入水中時，啟動刷子推進器，刷子可以轉動

表4.6：SAT清單

SAT Criteria Check List ACCEPT REJECT			測試結果		檢測方法
			Accept	Reject	
檢測清單	1	艦電			載具能否與艦電連接
	2	可在海水中作業， 載具具有水平運動能力			目測並且對應PCG回傳數值以及姿態顯現能夠穩定前進、後 進移動
	3	可在海水中作業， 載具具有垂直運動能力			目測並且對應PCG回傳數值以及姿態顯現能夠穩定上升、下 降移動
	4	可在海水中作業， 載具具有左轉運動能力			目測並且對應PCG回傳數值以及姿態顯現能夠穩定左轉
	5	可在海水中作業， 載具具有右轉運動能力			目測並且對應PCG回傳數值以及姿態顯現能夠穩定右轉
	6	可在海水中作業， 載具具有左翻運動能力			目測並且對應PCG回傳數值以及姿態顯現能夠穩定左翻
	7	可在海水中作業， 載具具有右翻運動能力			目測並且對應PCG回傳數值以及姿態顯現能夠穩定右翻
	8	可在海水中作業， 履帶具有水平運動能力			攝影機中能夠看到載具穩定前進跟後退移動
	9	可在海水中作業， 履帶具有左轉運動能力			攝影機中能夠看到載具穩定左轉
	10	可在海水中作業， 履帶具有右轉運動能力			攝影機中能夠看到載具穩定右轉
	11	藉纜線連接載具本體， 人力遙控操作			確認人機介面的所有按鍵與功能皆無問題
	12	最大操作深度50米， 具深度感測能力			確認PCG的回傳數值是否正常
	13	靠近基樁可用反向水流 吸附結構體			靠近基樁時，開啟垂直向推進器，使載具吸附結構體
	14	啟動刷子進行清潔			清潔一個範圍，觀察是否能夠清潔乾淨
	15	清潔前後之影像回傳			可利用攝影機的影像，對清潔前後進行對比
	16	採定深橫向繞基樁左右半圓 方式進行清潔， 清潔速度為每小時20米。			啟用攝影機與自動定深，讓操作員可以操作清潔區域

伍、結論

本專案成功把系統工程的程序導入專案的開發，並且成功開發出一部具備清潔離岸風機海底基樁以及船艦船殼海孺子功能之 ROV。

V 型開發流程為淺顯易懂的開發流程，清晰的邏輯並且明確的階段目標，使得專案執行時變得順利，在專案執行時所產製出的相關文件，對整體專案是非常有幫助的。

明確的開發流程，能夠對技術、需求、資源、期程、成本以及風險等方面都得到妥善的管理，根據明確的期程規劃，彙整出所有需要完成的技術文件，將不會遺漏工程上面所需要考量的細節，以此降低風險。

以系統工程導入的標準開發流程，有助於專案的執行，可供日後專案開發的參考依據，並且在每次專案執行結束時，討論針對發生問題的部分，進行內容的精進與修改，因此一套好的開發流程，對後續的研製是很有幫助的。

參考文獻

- [1] 系統工程(維基百科)：https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%B3%BB%E7%BB%9F%E5%B7%A5%E7%A8%8B，檢索日期：2023/05/22
- [2] Robert D. Christ and Robert L. Wernli, Sr. "The ROV Manual" A User Guide for Remotely Operated Vehicles Book ,Second Edition, 2014, PP.8- 20
- [3] Lightsey, B, Systems Engineering Fundamentals.2001-01-01, PP.31-73.
- [4] Systems engineering handbook a guide for system life cycle processes and activities ; INCOSE-TP-2003-002-04, 2015, PP.25-39
- [5] Federal Highway Administration California Division. Systems Engineering Guidebook for Intelligent Transportation Systems, 3rd ed.; US Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2009, PP.20-30
- [6] Robert D. Christ and Robert L. Wernli, Sr. "The ROV Manual" A User Guide for Remotely Operated Vehicles Book ,Second Edition, 2014, PP.68-88
- [7] "ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering -- System life cycle processes," in ISO/IEC/IEEE 15288 First edition 2015-05-15 , vol., no., pp.1-118,.
- [8] J. N. Martin, "Overview of the EIA 632 standard: processes for engineering a system," 17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36267), Bellevue, WA, USA, 1998, pp. B32-1.