

# 航道系統方案之評估模式<sup>1</sup> A Model for Evaluating Draft Solutions of Routing System

林 彬 Bin Lin<sup>2</sup>

曾承志 Cheng Jr Tzeng<sup>3</sup>

## 摘要

過去三十年來，世界上許多海上交通繁忙的水域相繼規畫航道系統，以增進航行安全。由於規畫航道系統必須考慮許多因素，各項因素之間又有其關連性，必須先從不同的安全角度思考，設計出多種候選方案，再從中評選出最後的方案，通常係由少數規畫者以其經驗作最後之取捨。本文航道系統方案評估模式係以多準則決策理論為基礎，利用問卷調查的方式決定評估準則，並應用層級分析法建立航道系統方案評估模式之層級架構與準則權重，再以 TOPSIS 法進行方案排序。經過多數使用者及專家的參與，依此模式所評選的最後方案應是最適當的方案。本文並以高雄港航道系統方案之評選為例，印證本文所建立之評估模式。

**關鍵詞：**航道系統；層級分析法；海上交通

## ABSTRACT

During the past thirty years a number of routing systems have been established within congested traffic waters around the world for the increase of navigational safety. Some factors which are related have to concern when a routing system is being designed. Therefore several preferred draft solutions of the system are first introduced from different safety concepts, and then a final solution usually judged by a few designers with their experience is selected. This study uses eclectic methodologies to establish a model for evaluating the draft solutions. Through theories of Multiple Criteria Decision-Making, the study identifies criteria for evaluation by means of a questionnaire, and establishes hierarchy structure of the system to obtain the weight of the criteria by means of Analytic Hierarchy Process (AHP) method. Finally the sequence of the draft solutions is scored by Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Because experts' opinions are elicited, the final solution evaluated by the model should

<sup>1</sup> 本文係國家科學委員會專題計畫(編號 NSC 91-2211-E-019-022)之部份研究成果，作者感謝國科會之經費補助。

<sup>2</sup> 國立台灣海洋大學商船學系副教授 (E-mail: blin@mail.ntou.edu.tw)

<sup>3</sup> 國立台灣海洋大學導航與通訊系碩士

significantly be the optimum. The study also shows the evaluation of solutions for routing system in Kaohsiung approaches as an example.

**Key Words :** Routing system, Analytic Hierarchy Process (AHP), Marine Traffic

## 壹、緒論

英、法之間的多佛海峽是世界上最繁忙的水域之一，各種航線的船舶匯集於此，致使船舶會遇之型態非常複雜，海難發生頻率也就高於其他水域。為求改善海上交通秩序，全球第一個分道通航制於 1967 年在多佛海峽開始實施，由於實施後證明確實能減少海難事故，世界上其他的危險海域及繁忙港口也都隨之規畫實施。但是各國所規畫的航道有各種不同的形式，有些航道過度強調航行安全而損及海運之利益，也有因規畫不當反倒增加船舶航行的困擾。國際海事組織（International Maritime Organization，簡稱 IMO）乃於 1977 年第十屆大會中正式通過 A.378（X）決議案「船舶航道之一般規定（General Provision on Ship's Routing）」，為航道系統（Routing System）在目標與設計上作了原則性的規範。

依據「船舶航道之一般規定」（以下簡稱「一般規定」）所下之定義<sup>[1]</sup>，凡為減少海難危險所設定之航道，均為船舶航道系統，包括：分道通航制、雙向航路、建議航線、避航區、近岸航行區、環航道、警戒區及深水航路等。其中，雙向航路為傳統之航道設計，因為無法有效隔離反向船舶，目前僅用於空間非常狹窄之水域，例如：河道及港口。世界各繁忙水域大多採用分道通航制的設計，將航行海域劃分成兩條對向之航行巷道，巷道之間則以分隔區或分隔線加以區隔。為增加水域的使用效率，航道系統除分道通航制外，還會搭配其他類型的航道作設計。

我國基隆、高雄及台中三港目前均已在港外建立航道系統，航運界認為這些航道系統確實能改善海上交通安全，並期望政府未來能在富貴角附近海域及澎湖水道規畫航道系統<sup>[2]</sup>。

## 貳、文獻回顧

至今，國內外關於航道系統的文獻雖不少見，但是多數著重在航道系統的規畫設計、航道系統實施的情形與影響、船舶在航道系統中的航行安全等，對於航道系統方案的優劣評估模式則很少論及。「航行自由」是海上交通的傳統觀念，可是航道系統之設置對船舶航行一定有所限制，自然影響在該水域航行的所有船舶之權益，包括該沿海國所屬船舶及其他國籍船舶；如果規畫範圍太大，超出沿海

國內水，擴及領海甚至公海，還將涉及水域之管轄權，因此航道系統之設計及規畫必須受國際公約之約束。此外，由於資料的完整性，本文同時針對荷蘭 Hook of Holland Roads 航道修改計畫<sup>[3]</sup>及日本大阪灣規畫航道系統<sup>[4]</sup>之規劃與評估方式進行實例分析，並提出程序性的航道系統規劃流程。

## 2.1 國際公約對航道系統之相關規定

「1972 年國際海上避碰規則」把分道通航制及近岸航行區之航行規定納入第十條條文中，規範船舶在航道系統內之航行秩序。其中規定船舶必須遵循航行巷道的方向航行，橫越航道的船舶必須以接近垂直的角度橫越，分隔區僅供船舶作緊急危險避讓或漁船捕魚，過路船舶不得使用近岸航行區等。

「1974 年海上人命安全國際公約」附錄第五章第八條明確指出航道系統設置之目的在於增進航行安全與效率，並規定 IMO 是全世界唯一可以制定航道系統設計及規畫的指南與標準，經由 IMO 通過及採納的航道系統，可強制要求所有船舶遵守，乃賦予航道系統的合法地位。

「1982 年聯合國海洋法公約」第二十二條、三十六條及四十一條更賦予沿海國在領海內、國際航行的海峽及專屬經濟區內規畫航道的權利和義務，並規定沿海國必須考慮 IMO 對航道規畫之建議。此項規定使得 IMO 已公佈的「一般規定」成為各國規畫航道的準則。航道系統設置的目的可歸納為：

1. 分隔相反航向之交通流，以減少迎艏正遇之情形。
2. 減少橫越船舶與航行巷道內船舶間之碰撞危險。
3. 簡化船舶在匯集水域內的交通流型態。
4. 在近岸探勘或開發水域內分隔出安全的交通流。
5. 在對船舶航行有安全顧慮的水域或其附近分隔出安全的交通流。
6. 在水深不甚確定或有危險的水域內提供特別指導，以減低擱淺之危險。
7. 引導航行船舶避開漁場或通過漁場。

為達到上述目的及作用，「一般規定」中要求各沿海國規畫航道系統應考慮海洋資源開發、海域管轄權、交通流現況、助航設施、地理環境及海氣象資料等因素。IMO 並提出設計原則，其重點如下：

1. 航道系統應盡可能遵循現行船舶交通流之形式。
2. 航道系統在特殊水域，為了航行安全，可不受正常航道範圍之限制。
3. 航道應盡可能減少航向的改變，尤其接近船舶匯集區及航道連接處，更應避免

航道改變航向。

4. 盡可能減少航道會合及連接，且儘量分散。
5. 航道設計時，應能將助航設施作最佳之使用。
6. 航道系統之界限，以及系統內之水深與危險區域等資料應在海圖上詳細顯示。

「一般規定」建議各國於修改或建立航道系統時應在規畫初期與水域的使用者或相關部門、單位進行諮商或訪談，其中包括：使用該區域的航海人員、負責助導航設施及海道測量與發行航海刊物的單位、港口管理機關、漁業與開發以及環境保護的相關組織等。上述設計原則中，並未對規畫流程及方式作規定，因此各國設計航道系統多以使用者及專家意見再加上經驗法則為主。

## 2.2 航道系統規畫之實例分析

隨著海運的快速成長、船舶的大型化，荷蘭鹿特丹港外之萊茵河口 Hook of Holland Roads 航道系統已不能配合海運發展<sup>[3]</sup>，部份設計顯現出航行上之缺失。荷蘭政府乃於 1973 年開始進行航道系統之修改計畫，參考 IMO 之「一般規定」進行規畫，直至 1983 年該系統才獲 IMO 之採納，並於同年 5 月 11 日正式生效實施。

日本經濟發展，除帶動漁業及海運之繁榮，也使海上娛樂休閒活動增加，危及大阪灣內船舶之航行<sup>[4]</sup>。為配合新一代船舶交通管理系統的設置，日本政府乃於 1983 年至 1988 年成立特別委員會，針對大阪灣的海上交通環境及型態進行調查，規畫新的航道系統，使船舶航行更安全且更有效率。

此兩件規畫案均是在交通繁忙之水域，前者是大型油輪及貨櫃船進出鹿特丹港必經之處，原有航道的多處淺水區已危及這類船舶之航行安全，水深成爲重要的考慮因素之一，因此，此計畫以引導大型船舶安全航行，減少與其他類型船舶之交叉會遇爲主要目標。後者則是大阪、神戶兩港的對外通路，船舶航線交錯，漁船及休閒船舶還在其中穿梭，此計畫以安全、迅速、快適、經濟、確實、便利爲目標，不但要減少船舶會遇與碰撞之機率，而且還須提供漁業及海上休閒之足夠水域空間。

兩者在規畫之初均先作海上交通資料調查，經由分析確認問題。但是前者另外藉由航海人員之問卷調查，找出 13 個危險區域，再由專家討論，針對各項危機提出約 150 項解決方法，並設定評估準則，從所有解決方法中進行評估篩選，找出 13 個較優的解決方法，整合成四個候選方案，經由對照比較後選出最佳方案，再利用模擬測試，驗證對航行安全之改善狀況。評估時所用之準則項目包括：操

船次數、最少操船時間、速度改變次數、航向改變次數、航道數目、平均航道長度、標準差、平均船舶在航道系統中的航行時間等八項。

後者比較注重交通流型態之分析，規畫流程首先設定規畫目的與規畫區域，並藉由運輸調查，預測規畫水域的海上交通需求，且對大阪灣現況進行雷達觀測與分析，瞭解大阪灣海上交通問題所在後，研究小組提出解決問題的方案，進一步設計航道的接合處、航行巷道與船舶停留等待的區域，最後進行方案評估。方案評估模式的架構，以「安全性」、「經濟性」、「快適性」、「確實性」作為標的層級，並以危險性指標、系統管理與建設經費、航行時間、航向變化次數、延遲時間的分散等作為評估準則。

鹿特丹水域因顧慮大型船舶航行，使得可航水域範圍受限，在有限空間內又要兼顧船舶的安全迴轉，深水航道只能規畫出 600 公尺的寬度，因此嚴格限制航道內的船舶轉向。修正後的航道系統減少船舶間之交叉會遇，刪除許多航行瓶頸部份，各式航道由原先 30 條簡化為 23 條，減少碰撞機率。經由測試，與原系統相比，船舶在航道內變換速度及航向的次數分別由 63 及 195 次，減為 34 及 104 次，航行時間也能稍微減少，顯示航行效率增加。

從兩者規畫過程中，顯示水域具有嚴重的航行安全問題才須規畫航道系統，通常水域發生嚴重的航行危機所顯現的已不只是單一問題，而是許多問題之間的錯綜複雜關係，相互之間環環相扣，需要經過整體的規畫才可能進而改善與解決。設計不良的航道系統，將導致船舶會遇時無法依照規則航行，會使航海人員產生無所適從的錯誤行為。設計重點包括：

1. 航道系統的水深必須達到所有航行船舶之需求。
2. 航行巷道的分隔區以一湮為標準，但在特別的情況下可以考慮改變。
3. 環航道中的船舶以反時針方向航行。
4. 在環航道中的出口需對應交通流的方向。
5. 船舶交通流的穿越以接近垂直角度為設定基準。
6. 船舶交通流的合流處盡量以小角度作為設計。
7. 船舶交通流的分流處盡量以大角度作為設計。
8. 規畫的範圍越小越好。

## 2.3 航道系統規畫流程

經由文獻分析，航道系統的規畫在以最有效的設計方式解決海上交通問題。當水域確認後，本文認為規畫流程可分成以下三個步驟（如圖一所示）：

### 1. 問題的釐清與預測

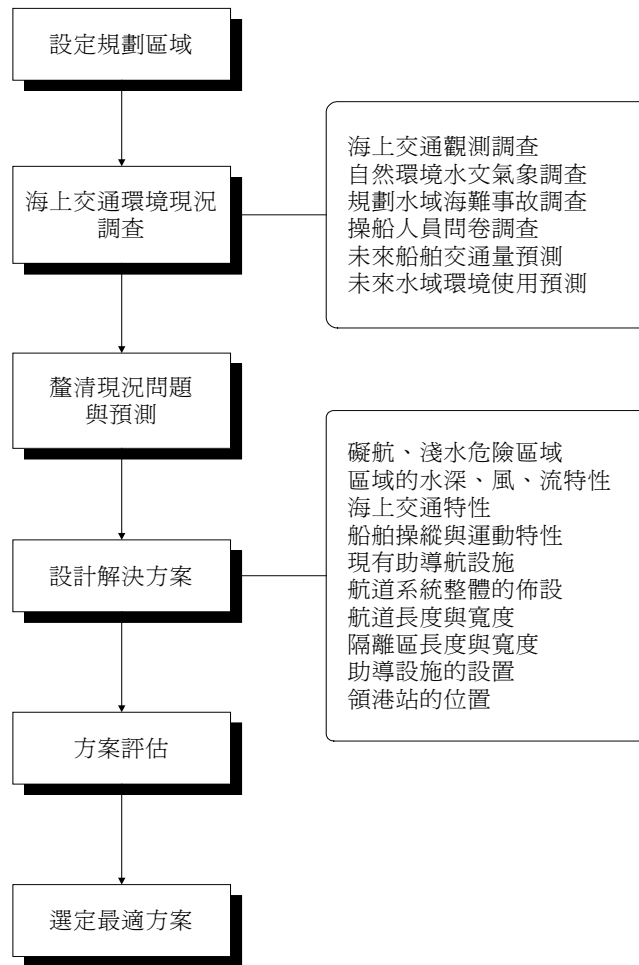
藉由資料蒐集、雷達觀測、問卷訪談等方式，分析規畫水域地理環境、氣候及水文、海上交通、航海人員操船等特性，以及造成該區域海難發生的原因，這些資訊將可以幫忙釐清該水域每一項交通問題，同時可針對該水域海上交通未來的發展進行預測，使規畫時得以考量未來的需求。

### 2. 設計方案的提出

問題確認後，依照「一般規定」的設計準則，透過研究討論、腦力激盪，與不同群體的協商，針對每一項問題提出解決方法。考量規畫目標所涉及的因素，將各項解決方法加以整合成數個候選方案。所考量的因素包括了先前調查與預測的資訊，至於航道系統的佈設、航道的長度、寬度、助導航設施的設置與領港站的位置將是航道系統設計時可以變動的設計要素。

### 3. 最適方案的評估與選擇

航道系統候選方案的評估方法，可以利用海上交通流模擬程式進行測試，求得到相關的數據如：船舶會遇率、轉向次數、轉向角度與航行時間等，藉以評估候選方案的優劣；或者藉由討論與專家評估方式得知方案的優劣。由於模擬測試耗費的時間、經費及人力相當多，大部份航道系統的規畫多採用後者。



圖一 航道系統規畫流程

在第二個步驟中，規畫者經由調查分析後，通常會從各項因素來思考航行安全，所設計出的候選方案各有其優缺點，如果僅由少數幾位規畫者憑經驗作選擇，常會過於主觀。此時，如果有一個適當的評估模式，是參考許多位使用者及專家的意見所建立，能以客觀的立場以及量化的數據提供決策者進行方案的優劣排序，就可從中選出一個最適當及最安全的的航道系統。

本文係針對第三步驟藉由系統化之航道系統特性分析，建立一個航道系統評選模式，應用本文所建立評估模式，從各候選方案中選取一個最適當的方案為最終的建議，或是透過評估模式對替選方案進行優劣排序，給予最終決策者參考與建議。

## 參、研究方法

藉由規畫與特性分析可知，航道系統之規畫具有多個目標，想要設計一個航道系統能防止所有海難，並使所有使用者滿意，是一件相當困難之事。理想的方案必須藉由不同的角度與多重的因素考量，才能客觀的評估。因此，航道系統方案評估具有以下三點特性：

1. 由數個候選方案作評估，從中選擇最佳方案。
2. 具有多個目標與準則，各準則間可能有相互衝突性，且重要性不一。
3. 若以群體決策的方式決定，更可以週延考量系統參與者的需求，避免決策的偏頗。

本文採用多準則決策理論為基礎，進行航道系統評估模式的建構。應用多準則決策理論進行方案評估模式的建立，需有基本的三個要素，包括：評估準則集合、準則權重以及方案績效值整合方法。本文選定適當的方法建立此三要素，以完成航道系統方案評估模式。

### 3.1 層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)

準則集合與權重的部分，考量設計方案時需要考量多個因素，進行航道系統方案評估時，更需要由不同使用者的角度加以結合與考量，因此，需要一個能夠從多層面的觀點考量且能將問題系統化的處理方法。多準則評估問題在本質上是屬於選擇型的問題，此種類型必須利用二個以上的準則對數個方案進行評估。在多準則決策理論中，層級分析法的理論應用廣泛，以層級架構的概念解決問題，容易瞭解、具有彈性、具有邏輯性與方便得知因素權重值等優點，亦可將複雜的問題系統化，並將問題各個考慮的因素、層面予以層級化，讓問題更容易解決<sup>[5,6]</sup>。因此，本文透過文獻回顧分析、問卷調查與層級架構的概念，建構航道系統方案評估模式的準則集合與架構。雖然可用來決定準則權重的方法很多<sup>[7]</sup>，然而，層級分析法利用一致性檢定來檢驗問卷調查填答問題的一致性，較其他方法為優。

層級分析法為 Saaty 於 1971 年所發展之一套決策方法<sup>[8]</sup>。層級分析法的演算方法，先針對所要解決的問題進行分析，找出影響準則，建立層級關係架構，而後進行準則間相互比較問卷調查，將調查結果以準則的相對重要性建立成對的比較矩陣，計算出矩陣的特徵值與特徵向量，並進行一致性檢定，若通過檢定，即可確認各個準則的權重。

若成對的比較矩陣  $A$  乘上  $n$  個準則項的權重所構成向量  $\bar{w}$ ，其中  $\bar{w}$  不為零向



量的情況下，且  $A$  為成對比較矩陣時：

$$(A - n \cdot I)\bar{w} = 0$$

因為  $a_{ij}$  受訪者進行成對評比時所給予的判斷值，與理想的  $w_i / w_j$  值近似，但多少有些差異，所以  $(A - n \cdot I)\bar{w} = 0$  不一定可以成立。通常設定  $A$  為比較矩陣，因此 Saaty 建議以矩陣  $A$  中的最大特徵值  $\lambda_{\max}$  來取代  $n$ ：

$$(A - \lambda_{\max} \cdot I)\bar{w} = 0$$

關於特徵向量之求取，Saaty 提出四種近似法的計算方式，並建議以行向量平均值的標準化方式為較佳的方式。

$$w_i = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

層級分析法的基礎假設即偏好關係須滿足遞移性且前後具有一致性，但問卷是由受訪者主觀判斷填寫，要滿足偏好關係具有遞移性與一致性並不容易，因此調查結果所構成的相互比較矩陣須能通過一致性檢定，才能顯示填問卷者判斷前後一致，代表此份問卷可以被採用。Saaty 建議使用一致性指標 (Consistence Index, C.I.) 與一致性比例 (Consistence Ratio, C.R.) 來檢定成對比較矩陣是否為一致性矩陣[8]。一致性指標 (C.I.) 是由特徵向量法中求得之最大特徵值與矩陣維數兩者差異程度作為判斷。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

當  $C.I. = 0$  時，代表受訪者前後判斷完全具有一致性，但是一般而言不太可能實現，因此 Saaty 建議當  $C.I. < 0.1$  時即可以被接受，也代表受訪者的評比判斷一致性令人滿意。

一致性比例 (C.R.) 為一致性指標 (C.I.) 與隨機指標 (Random Index, R.I.) 的比值。

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

### 3.2 TOPSIS 法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

關於候選方案績效值整合方法，本文採用運算方式與原理簡單易懂，且符合方案排序時所需相對性的 TOPSIS 法。TOPSIS 法是由 Hwang 與 Yoon 於 1981 年所發展出來的多準則決策的方法<sup>[9]</sup>，亦稱之為「理想解相似度偏好順序評估技巧」，是一種進行方案優劣排序時可以使用的方法。TOPSIS 法係利用理想解 (Ideal Solution) 與反理想解 (Anti-Ideal Solution) 的概念，求取每一個方案與理想解之相對接近值 (Value of Relative Closeness)，根據所得的相對近似值，即可以求得方案的優先順序。TOPSIS 法的演算步驟如下，首先建構標準化矩陣與決定具有權重的評估矩陣，並決定理想解與反理想解。計算各候選方案與理想解和反理想解的距離與相對接近值。以各候選方案的相對接近值進行排序，其中相對接近值愈大的候選方案代表此一方案愈佳。

各方案與理想解和反理想解的距離之計算式如下，其中  $S_i^+$  為方案  $i$  與理想解的距離， $S_i^-$  為方案  $i$  與反理想解的距離。

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m$$

各方案與理想解的相對接近值  $C_i$  之計算式如下，且  $0 \leq C_i \leq 1$ 。

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1, 2, \dots, m,$$

若方案  $i$  為理想解，則  $C_i = 1$ ，如果方案  $i$  為反理想解，則  $C_i = 0$ ，當  $C_i$  值愈接近 1 時，代表方案愈接近理想解也就是愈佳的方案。

## 肆、建立航道系統評估模式

### 4.1、航道系統的評估準則

航道系統方案的評估，主要在檢驗該方案的設計可否達到規畫的目標，減少海上交通危機與事故，並增加船舶航行的安全與效率。評估結果大致上必須達到下列成效：

1. 船舶於航道系統可以有效減少碰撞危機。

2. 船舶於航道系統更具航行效率。
3. 航道系統能有效導引船舶避開危險區域。
4. 航道系統能提供完備的助導航設施。
5. 航道系統使用最小建設經費與範圍。

航道系統的成效與海難事故成反比，成效越高事故越少。海難事故常常涉及許多因素，包括：交通特性、船舶特性、水深、暗礁、可航範圍、能見度、風與流水、助航設施等。各項因素之間又有其關連性，例如：交通密度增加會壓縮每艘船舶的使用空間，使船舶缺少避讓空間；大型船舶的運轉慣性必須使用較大的航行範圍，受限水域易使船舶駛入淺水區；狹窄水域或風與流強盛的水域因缺少精準的助航設施，易使船位偏離航線等。為能檢驗出航道系統的成效，必須針對海難成因設定評估準則。

評估準則須具有完備性、可操作性、可分解性與無重複性等特性<sup>[10]</sup>，依據海難成因及航行安全與效率的需求，本文初步列舉下列 11 項航道系統方案評估時可能考量之準則項目：

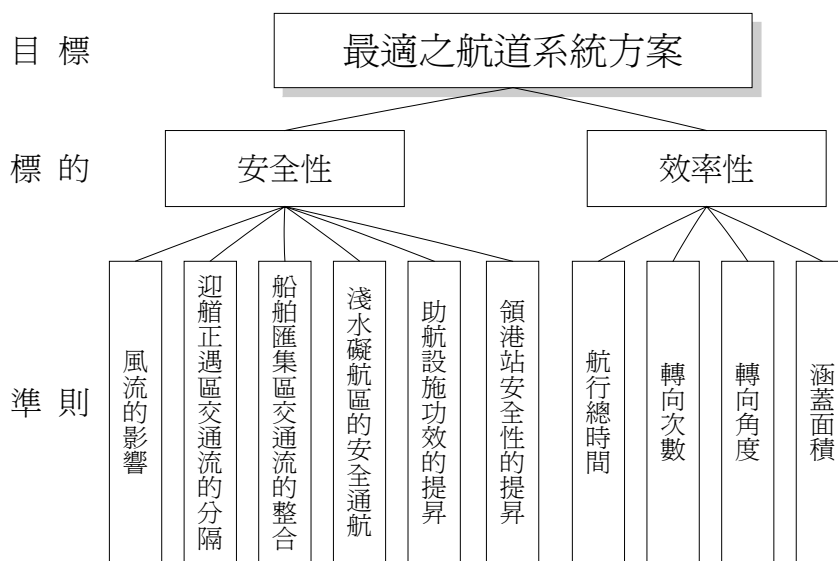
1. 風流對於船舶在航道系統中的影響
2. 防止迎艙正遇的分道通航制規畫
3. 船舶匯集的警戒區、環航道等措施規畫
4. 淺水區、漁船作業等礙航區規畫
5. 助導航定位設施的設置
6. 助導航定位設施的建設經費
7. 船舶在該航道系統中的航行時間
8. 船舶在該航道系統中的轉向次數
9. 船舶在該航道系統中轉向角度的大小
10. 航道系統方案所涵蓋的範圍
11. 領港站的位置

評估航道系統方案時，應與相關部門進行諮詢，並且應考量整體使用者的角度，由不同立場去評估，選出的方案才具公平性與週延性。為確認航道系統使用者是否認同本文所提出之評估準則項目，以及徵詢主管機關官員及專家們由不同觀點所考量的因素，必須進行評估準則問卷調查。受訪者分成「航海人員」、「港務管理人員」與「引水人」與等三大組群。航道系統的使用者主要為船舶之當值船員，因為考量海上經驗的多寡將影響其專業的判斷，所以設定受訪者需為大副

及船長；主管機關官員所指的是「船舶交通服務系統 (Vessel Traffic Service, VTS)」中的交通管理人員，其為航道系統的管理與提供服務的單位；專家則為引水人，主要考量引水人豐富的操船經驗，對港區環境熟悉度，並瞭解船舶進出港所需的協助。問卷的設計係以上述十一個準則項目為題目，並針對每個項目各延伸一題相關因素。共計發出 120 份問卷，包括：航海人員 45 份，港務管理單位 30 份，引水人 45 份，回收問卷 110 份，問卷回收率為 91%。

受訪者對於本文提出的準則項目中，除第六項「助導航定位設施的建設是否需要考量經費」外，其餘贊成者之比例皆超過 90%，皆能得到認同，並且沒有另外提出新的準則項目。第六項贊成比例為 54.27%，但在航海人員及引水人兩個群組之贊成比例均不到 50%；該項目所延伸的相關因素「經費是否愈少愈好」，贊成者僅 42.14%，因此，本文將此項準則刪除。

經過第一次問卷調查後，即可確定航道系統評估模式之準則項目，並依照層級架構的概念，建立一個以「最適之航道系統方案」為目標，「安全性」、「效率性」為標的層面之航道系統方案評估模式。根據「一般規定」中追求安全性所解釋具體的目標項目與參考日本大阪灣計劃中的分類，本文建立的評估模式，在設定「安全性」層面下有「風流的影響」、「迎艙正遇區交通流的分隔」、「船舶匯集區交通流的整合」、「淺水礙航區的安全通航」、「助航設施功效的提昇」與「領港站安全性的提昇」等六項準則，「效率性」層面下則有「航行總時間」、「轉向次數」、「轉向角度」與「涵蓋面積」等四項（如圖二所示）。



圖二 評估模式層級架構

#### 4.2 準則之權重

本文採用層級分析法對專家進行問卷調查，並利用層級分析法運算與驗證以求得各準則的權重。此次專家問卷採用郵寄與親自送達的方法進行，且先以電話向受訪者詳細說明本問卷之目的以及填答方式。受訪對象包括：港務管理人員、引水人、航海人員與學者，共發出 35 份問卷，回收 31 份，回收率 88.57%。

問卷回收後，依照層級分析法進行運算與檢驗，首先建立成對比較矩陣。因為標的層面只有兩項，所以無須進行 C.I. 值與 C.R. 值檢定，其中 C.R.H. 值檢定也無須進行，只要「安全性」與「效率性」的準則層面通過 C.I. 值與 C.R. 值即可確定此問卷是否通過一致性檢定。經過計算，通過一致性檢定的問卷共有 11 份，包括港務管理人員 2 份、引水人 3 份、航海人員 3 份以及學者 3 份。通過檢定的問卷，使用幾何平均數法整合各專家的問卷結果，經過標準化即可得到各準則的權重，再與標的層級的權重整合後，則得到各準則項目的綜合權重（如表一所示）。

就「安全性」而言，以「淺水礙航區的安全通航」為最重要的準則因素，依序為「船舶匯集區交通流的整合」、「迎艏正遇區交通流的分隔」、「助航設施功效的提昇」、「領港站安全性的提昇」、「風流的影響」；「效率性」的部分，以「轉向角度」、「轉向次數」、「涵蓋面積」、「航行總時間」為排列順序。安全性的權重高達 0.8164，而效率性的權重僅有 0.1836。其中安全性的各項準則項目之重要性皆

大於效率性各項準則，由此可知藉由專家評斷，航道系統的評估選擇以安全性指標為優先考量的依據。

表一 準則項目權重

標的	標的權重	準則	準則權重	綜合權重
安全性	0.8164	風流的影響	0.1115	0.0911
		迎艙正遇區交通流的分隔	0.1736	0.1417
		船舶匯集區交通流的整合	0.2161	0.1764
		淺水礙航區的安全通航	0.2217	0.1810
		助航設施功效的提昇	0.1456	0.1189
		領港站安全性的提昇	0.1315	0.1073
效率性	0.1836	航行總時間	0.1373	0.0252
		轉向次數	0.2585	0.0475
		轉向角度	0.4316	0.0792
		涵蓋面積	0.1726	0.0317

### 4.3 航道系統評估模式

準則項目及各項目之權重被確定後，設計方案評估之問卷，作為數個方案優劣排序之用。問卷內容係以各準則項目為主題，由受訪者對各個方案的各準則作評估，評估值係以李克特五點尺度為標準（如表二所示），評語「優良」代表評估值 5 點，評語「良」代表評估值 4 點，以此遞減。

由於「安全性」層面的權重超過八成，層面下的六項準則均有其重要性，如果其中某項準則之評估值太低時，該準則所代表的因素可能將成為海難發生的原因，顯示該候選方案有缺失。因為評估值在 3 以下為負效果的表現，因此，本文對「安全性」層面下的六項準則設定最低門檻標準為 3，應就各候選方案前六項準則的評估值作初步評估，如果某項準則的平均評估值沒有超過 3，也就是評估語意中的「普通」，則應將該候選方案剔除。「效率性」層面之權重很輕，其下的四項準則除增加航行時間及不便外，不致造成重大問題，因此，「效率性」層面的準則不須有門檻限制。

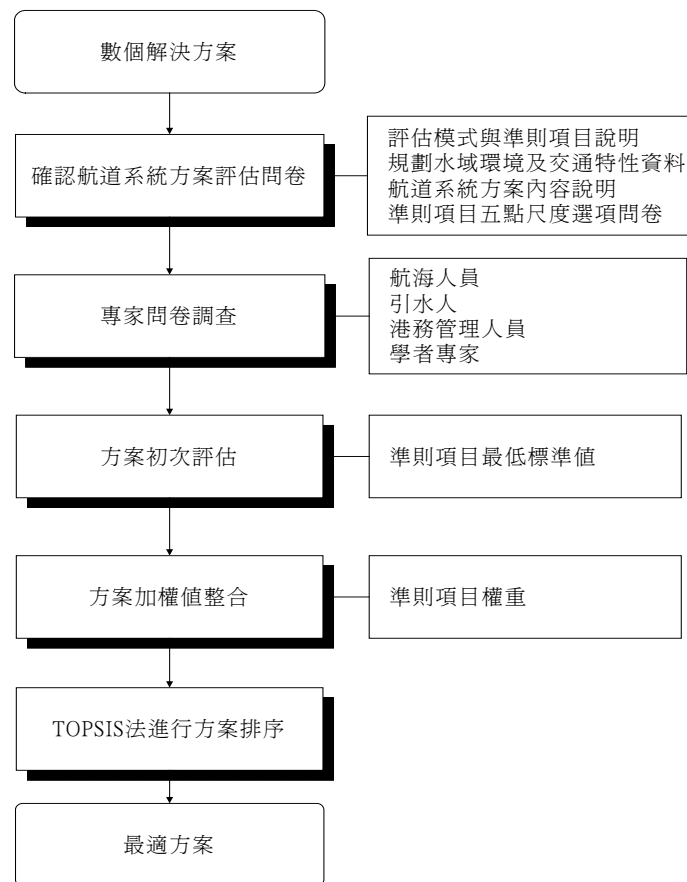
表二 準則項目五點尺度之問卷

	優良	良	普通	差	很差
1. 風流的影響	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. 迎艙正遇區交通流的分隔	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. 船舶匯集區交通流的整合	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. 淺水礙航區的安全通航	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. 助航設施功效的提昇	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. 領港站安全性的提昇	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. 航行總時間	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. 轉向次數	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. 轉向角度	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. 涵蓋面積	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

通過初步評估的候選方案，其問卷結果加入權重，以 TOPSIS 法的運算方式進行方案綜合評估值計算，即可得到方案優劣的排序。由於航道系統評估準則屬效益準則，績效值越大，排序越優先。

因此，航道系統在規畫初期，經由海上交通、自然環境、海難事故等特性的調查，並徵詢海域使用者之意見後，提出設計數個航道系統的候選方案，此時即可利用本文之評估模式，求取最適方案。評估模式之應用步驟如下（如圖三所示）：

1. 確認各候選方案之航道系統方式及特性、使用海域範圍、航行時間、轉向次數、轉向角度、助航設施等資料。
2. 將上述資料附在本文表二之問卷內，針對航海人員、引水人、港務管理人員與學者進行評比調查。
3. 問卷回收後，將各候選方案在各項準則的評估值加以平均，初步評估「安全性」層面各準則之平均值是否達到最低門檻。
4. 通過初步評估的候選方案加入本文表一之權重，利用加權法，予以整合。
5. 候選方案代入 TOPSIS 法的運算式中，建立評比值矩陣，進行方案的排序運算，即可以得知方案優劣排序以及最適方案。



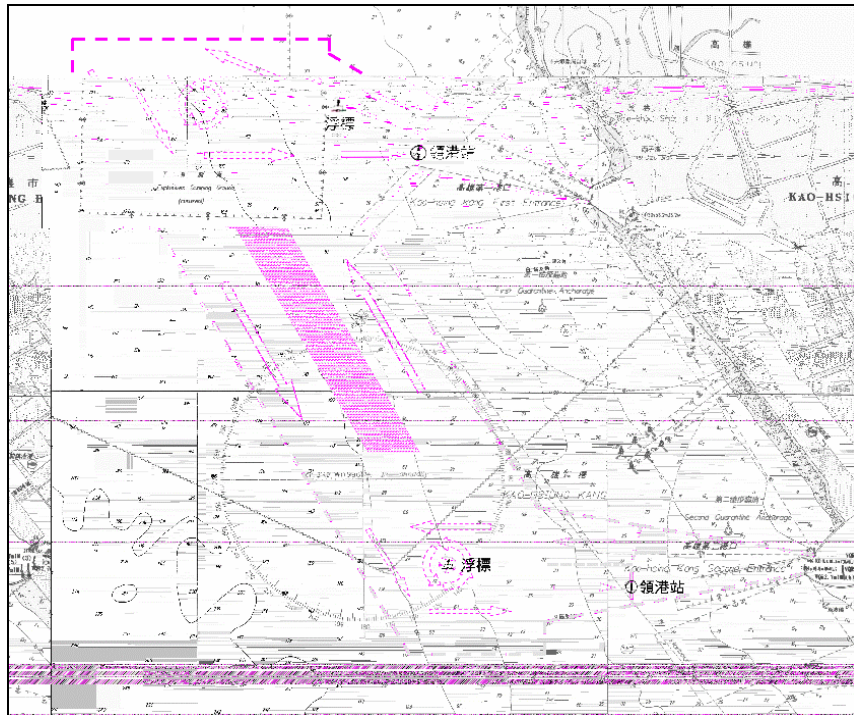
圖三 航道系統方案評估模式之步驟

### 伍、航道系統評估模式之應用

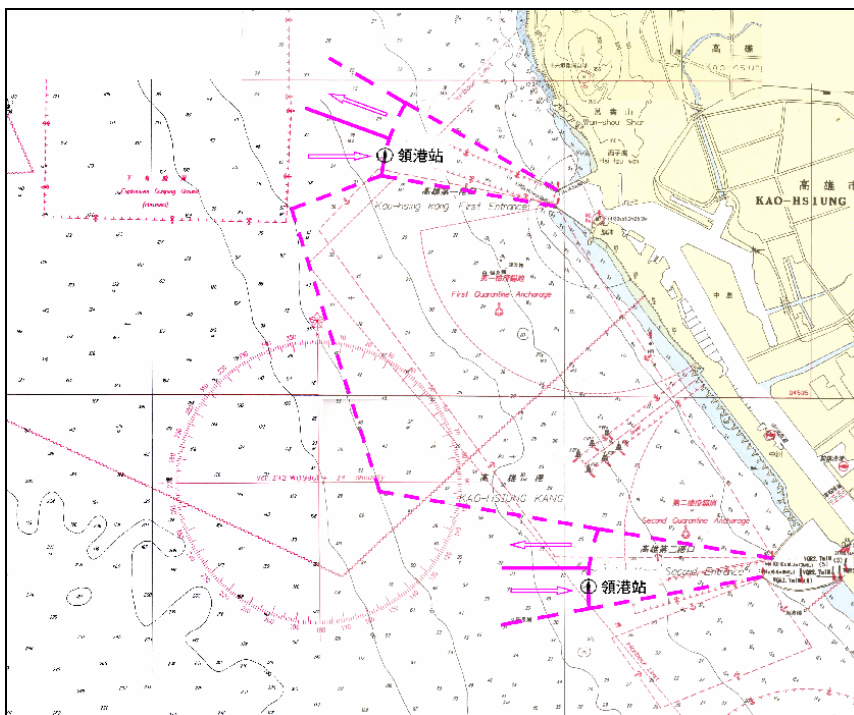
高雄港為增進港口外海的航行安全以及配合船舶交通服務系統的設置，於民國 89 至 90 年間針對高雄港外海進行航道系統規劃研究<sup>[11]</sup>。該研究小組先後研擬出四種可行方案（如圖四至圖七所示），接著舉辦座談會廣徵意見，各相關單位人員取得共識後，第四方案為高雄港務局公告及目前正使用之航道系統。當時在規畫過程中，本文之評估模式尚未建立，因此本文之方案評估模式可用來檢定第四方案是否為最適方案。



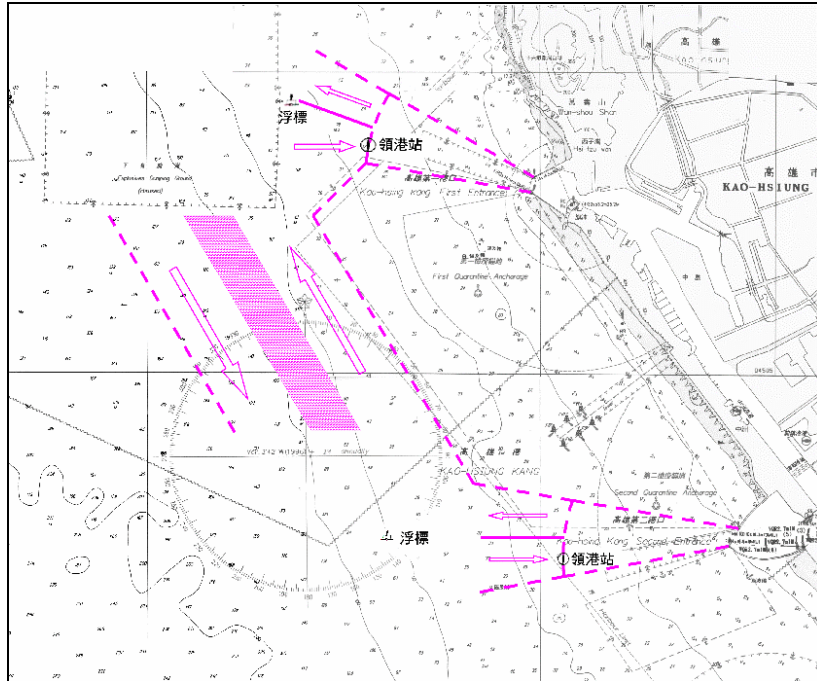
航道系統方案之評估模式



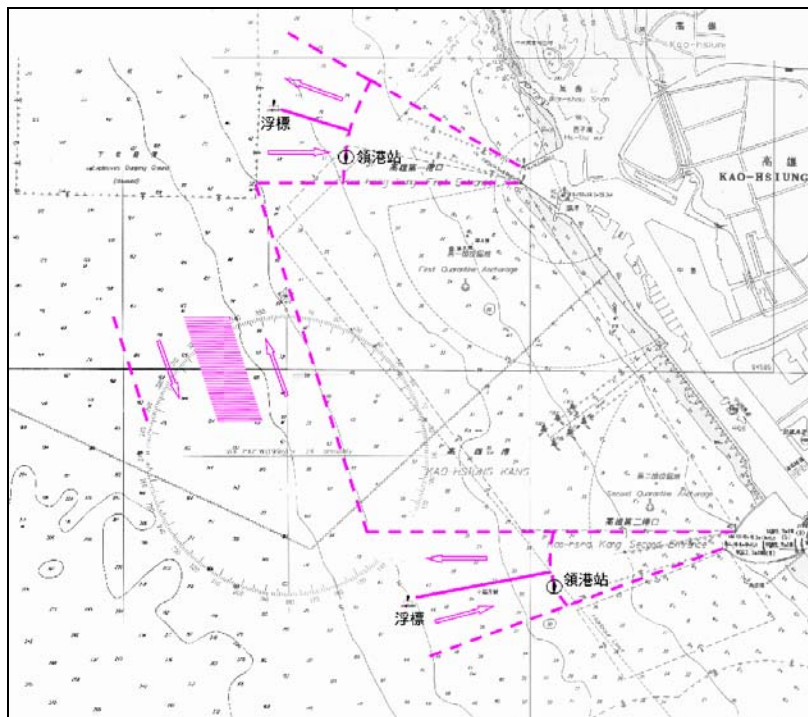
圖四 方案一航道系統設計



圖五 方案二航道系統設計



圖六 方案三航道系統設計



圖七 方案四航道系統設計

依據第一步驟，首先確認各候選方案之航道系統方式及特性等資料。高雄港位於台灣西南海岸，形勢天成，海岸平直，港外水域寬廣，既無淺灘，又無島嶼阻礙航行。海岸為東南走向，地勢低而平坦，海岸地形規則，等深線約與海岸平行。風力超過五級之天數，全年不及 10%。高雄港附近海域的海流流向以西北-東南向為主，流速分布小於 50 公分/秒 (0.97 節) 佔 90%，其中 0~25 公分/秒 (0~0.49 節) 之流速所佔比例高達 50%以上。

其港區狹長，有一港口及二港口之分，相距約 5 浬。一港口防波堤頂端南北兩側的水深較淺，但在主航道內之海圖標示水深均超過 11 公尺，航道外側已達 20 公尺等深線。二港口防波堤外水深已超過 10 公尺等深線，主航道內之海圖標示水深均在 15 公尺以上，航道頂端水深更超過 20 公尺。一港口及二港口均可分成北、西、南三股交通流，任何一股交通流不可避免的都會與其他交通流發生交叉會遇的情形。一港口外船舶匯集的區域在防波堤外 1~2 浬處，二港口則在防波堤外 3~4 浬處。一港口及二港口之間的檢疫錨地外側，離岸約 3~4 浬的範圍內，由於一港口船舶由南而來或往南離去與二港口船舶由北而來或往北離去均會經過此水域，致使流量及密度相對較高，船舶在此水域常會有交錯會遇及迎首正遇的情況發生。

基本上，四個方案在一港口及二港口均採用雙向航道結合分道通航制的設計方式，主要差異在規畫範圍、指向角度、西側分道通航及浮標設置。第一方案範圍最大，船舶行進指向最清楚；第二方案沒有西側分道通航，範圍最小，航行限制也最少；第三方案係將第一方案之環航道刪除；第四方案縮減西側分道通航範圍，增加二港口分道通航之長度，加大錨區範圍。各方案之基本資料如表三所示。

表三 各方案基本資料

	方案一	方案二	方案三	方案四
一港口雙向航道長度	2.5 哩	2.5 哩	2.5 哩	2.5 哩
一港口分道通航制長度	1 哩	1 哩	1 哩	1 哩
二港口雙向航道長度	3 哩	3 哩	3 哩	3 哩
二港口分道通航制長度	1 哩	1 哩	1 哩	2 哩
西側分道通航制長度	3 哩	無	3 哩	1.3 哩
西側分道通航制航行巷道寬度	0.8 哩	無	0.8 哩	0.8 哩
西側分道通航制分隔區寬度	0.5 哩	無	0.5 哩	0.5 哩
船舶航行總時間（船速 8 節）	59 分鐘	22 分鐘	25 分鐘	39 分鐘
船舶平均轉向次數	0.92 次	0	0.67 次	0.67 次
船舶平均轉向角度	62 度	0	41 度	40 度
系統涵蓋面積（平方哩）	31.3	18.5	22.3	28.6
浮標數量	2 個	無	2 個	2 個

第二步驟確認問卷的內容，包括：評估模式的說明、高雄港航行條件資訊、各方案的設計圖、設計說明與本文表二之問卷。航行條件包括：「風力與風向」、「海流與潮流」、「淺水與礙航區域」等資料，交通流的資料係以圖片的方式表示，船舶會遇相關位置圖則配合圖片的大小製作成投影片，讓受訪者可以套疊至各方案的圖片上，以進行相對位置的比對，用來判斷航道系統設計是否可達到分流與整流的效果。

此次的受訪對象皆為曾經參與權重問卷調查的專家，對於本文所建立的評估模式已有一定程度的了解。為避免受訪專家受高雄港務局航道系統計劃的影響，受訪對象皆未參與該計劃之執行。此次問卷的目的在求得專家對方案的評點，一般專家的問卷在 5~15 人之間較為適當<sup>[10]</sup>，因此，問卷受訪的對象為航海人員、引水人、港務管理人員與學者各 3 人，共 12 人，進行問卷調查，此次的問卷回收率為 100%。

第三步驟進行初步評估以確認各方案是否通過門檻標準。根據本文採用的李克特五點尺度進行評估語句的數值轉換後，統計各問卷準則之平均值（如表四所示）。方案二中，「船舶匯集區交通流的整合」與「助航設施功效的提昇」兩項準則之平均值未達「3」之標準。高雄港曾在防波堤外發生多起船舶碰撞事故，即起因於進港船舶匯集時，航向多變之故；助航設施之精準度是船舶確認船位在航道內之重要依據，IMO 之「一般規定」也對此有所要求。專家認為該方案無法

有效整合交通流，也無法發揮助航設施的功效，顯示該方案對增進航行安全之成效有限，因此予以刪除，其餘三個方案則通過初步評估。

表四 各方案準則之平均評估值

	方案一	方案二	方案三	方案四
風流的影響	3.5833	3.5000	3.5000	3.7500
迎船正遇區交通流的分隔	3.7500	3.5833	3.5000	4.0000
船舶匯集區交通流的整合	3.5000	2.6667	3.3333	3.8333
淺水礙航區的安全通航	4.1667	3.6667	3.8333	4.1667
助航設施功效的提昇	3.6667	2.6667	3.7500	3.6667
領港站安全性的提昇	3.8333	3.3333	4.0833	3.9167
航行總時間	2.8333	4.0833	3.5833	3.5000
轉向次數	2.3333	4.2500	3.8333	3.8333
轉向角度	2.6667	4.0833	3.5833	3.7500
涵蓋面積	3.5000	3.9167	3.5833	3.8333

第四步驟依據本文表一之權重對通過初步評估各方案之準則予以加權。計算結果，第一方案之加權估計值為 3.5810，第三方案為 3.6504，第四方案為 3.7624。

第五步驟以 TOPSIS 法進行方案的排序。首先建立評估值矩陣，將質化準則的評分與量化準則的預估值代入。隨後進行數值標準化，並建立標準化矩陣，加入準則權重的運算即可知道評估矩陣與理想解和反理想解的數值，如表五所示。

表五 各方案標準化與加權後的評估值

	方案一	方案三	方案四	理想解	反理想解
風流的影響	0.0510	0.0522	0.0546	0.0546	0.0510
迎船正遇區交通流的分隔	0.0762	0.0817	0.0871	0.0871	0.0762
船舶匯集區交通流的整合	0.0953	0.1001	0.1096	0.1096	0.0953
淺水礙航區的安全通航	0.0987	0.1073	0.1073	0.1073	0.0987
助航設施功效的提昇	0.0697	0.0681	0.0681	0.0697	0.0681
領港站安全性的提昇	0.0641	0.0602	0.0615	0.0641	0.0602
航行總時間	0.0084	0.0198	0.0131	0.0084	0.0198
轉向次數	0.0241	0.0331	0.0241	0.0241	0.0331
轉向角度	0.0385	0.0582	0.0375	0.0375	0.0582
涵蓋面積	0.0148	0.0207	0.0189	0.0148	0.0207

得知評估矩陣與正負理想解後，即可計算方案的分離度與相對接近度，如表六所示，相對接近度越大者為越佳的方案。高雄港航道系統方案以第四方案最佳，其次為第三方案。此結果反映出高雄港目前實施的航道系統是當初規畫所提出方案中，最適當的方案。

表六 各方案相對接近度

	方案一	方案三	方案四
理想解距離值 $S^+$	0.020270033	0.028584305	0.00698111
反理想解距離 $S^-$	0.025550383	0.011293475	0.03109647
相對接近度 $C$	0.557620051	0.283202203	0.816660878

### 陸、結論與建議

規畫航道系統已成爲各港口及繁忙海域爲增加海上交通安全必須執行的手段。由於此系統之實施會對船舶航行自由造成限制，爲避免引起國際糾紛，IMO 通過「船舶航道之一般規定」決議案，規定規畫海域擴及公海時，所規畫的航道系統必須將相關資料送交 IMO 審核，經其認可後才能公告實施；如果範圍僅在領海或內水，則在實施之前也應將資料送交 IMO 存查。受此約束，各海域在規畫時均會針對交通現況、地理環境與水文氣象進行調查與分析，找出航行危機之問題所在，據此規畫適當的航道系統方案，以提昇航行安全。

本文提出航道系統方案之評估模式係規畫步驟之一環，以層級架構的觀念，建立一個以「最適航道系統方案」爲目標，「安全性」、「效率性」爲標的。「安全性」層面之權重高達 0.8164，其下有六項準則。「效率性」層面之下有四項準則，權重僅爲 0.1836。當規畫出數個方案時，透過對航道系統參與者的問卷調查與對航道系統的特性分析，以 TOPSIS 法將群體之意見以量化之方式對方案作優先排序，以避免受少數決策者之主觀意識所影響。

本文以高雄港的航道系統爲例，證明目前實施方案是規畫時各方案中之最適者。我國基隆、高雄及台中三港目前所實施的航道系統，未來隨著航運發展，會像荷蘭鹿特丹外海需要重新修改，或者在台灣周圍交通繁忙的海域需要新建航道系統。屆時本文所研擬之評估模式將有助於評選出最能有效提昇航行安全與效率之航道系統。

本研究在質化指標的量化轉變上，採用李克特五點尺度爲評估方式進行轉換，然而目前已有相關研究採用模糊理論進行語意值轉換，因此，將本文的評估模式與模糊理論結合將是未來研究的方向。另外，也可應用交通流模擬方式得到

較客觀的衡量依據，建立一套海上交通流模擬模式也將是一個重要的研究主題。

### 參考文獻

1. International Maritime Organization, Ship's Routing, 7<sup>th</sup> ed., 1999.
2. 周和平、李台生、林彬等，促進海上航行安全對我轄海域分道航行必要性之研究，交通部委託計畫，民國七十八年二月，頁 87-89。
3. Van Riet, J. A., Tresfon, R. R., Pollen, A. W., and Valstar, A. P., "Designing a North Sea Shipping Route", *Journal of Navigation*, Vol. 36, 1983, pp.181-194.
4. 神戶海難防止研究会，長期展望にたった大阪湾における海上交通システム（O T S 2 1）—調査研究最終報告書，1988。
5. 鄧振源、曾國雄，"分析層級法（AHP）的內涵特性與應用（上）"，*中國統計學報*，第二十七卷六期，民國七十八年六月，頁 5-22。
6. 鄧振源、曾國雄，"分析層級法（AHP）的內涵特性與應用（下）"，*中國統計學報*，第二十七卷第七期，民國七十八年七月，頁 1-20。
7. 曾國雄、王榮祖，"公車系統績效評估之研究-AHP 法與 FMADM 之應用"，*中山管理評論*，第二卷第二期，民國八十三年六月，頁 1-17。
8. Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
9. Hawng, C.L., Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making Methods and Application*, Springer-Verlag, New York, 1981.
10. 鄧振源，*計劃評估—方法與應用*，海洋大學運籌規畫與管理中心，基隆，民國九十一年。
11. 林彬、陳希敬、郭壁奎等，*高雄港分道航行制之研究*，高雄港務局，民國九十年。