

灰色多目標計畫組合模式於運輸計畫 規劃之研究

PROJECT PORTFOLIO SELECTION FOR TRANSPORTATION PROGRAMMING USING GREY MULTIOBJECTIVE PROGRAMMING

溫裕弘 Yuh-Horng Wen¹

牛紀芸 Ji-Yun Niou²

(101 年 1 月 2 日收稿，101 年 7 月 6 日第一次修改，
101 年 11 月 14 日第二次修改，102 年 3 月 30 日定稿)

摘 要

運輸計畫規劃 (transportation programming) 是運輸部門進行運輸計畫選擇之過程，包括計畫評估、選擇、排程與預算組合，以決策核定之運輸計畫集合。過去相關運輸計畫規劃問題較無計畫組合與綜效之考量，因此，導入計畫組合管理概念，考慮計畫組合之利益、成本與風險，建構計畫組合規劃模式，進行最適計畫組合方案之選擇，即成為重要之研究議題。本研究計畫組合規劃模式以計畫組合為決策對象，有別於過去計畫規劃問題以個別計畫為規劃對象，並考慮計畫組合之利益、風險及預算之不確定性，建構灰色多目標 0-1 整數規劃問題，並應用灰色理想解相似度順序偏好法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 求解多目標計畫組合規劃模式之妥協解。本研究以行政院公共工程委員會之大型

-
1. 淡江大學運輸管理學系助理教授 (聯絡地址：251 新北市淡水區英專路 151 號淡江大學運輸管理學系；電話：02-26215656 ext. 3387；E-mail: yhwen@mail.tku.edu.tw)。
 2. 淡江大學運輸管理系運輸科學碩士班碩士。

運輸建設計畫，作為實務數值範例應用問題之假設基礎，透過數值範例應用分析，驗證本研究模式之可行性。藉由不同目標式權重組合下，計畫組合規劃妥協解決策空間可顯示兩目標之間的權衡取捨率。而計畫組合規劃模式係以計畫組合為決策對象，可作為以計畫組合管理進行運輸計畫規劃模式之基礎；整合灰數於規劃模式中，即允許利益、風險及預算輸入值為大概範圍之區間值，有助於規劃者面對並處理不明確規劃條件下，維持規劃結果之變動決策彈性。

關鍵詞：運輸計畫規劃；計畫組合模式；灰色多目標規劃；灰數

ABSTRACT

Transportation programming is the process of selecting and determining a final set of transportation projects, including project evaluation, selection, scheduling and budget portfolio management. Since conventional transportation programming models lacked the consideration for project portfolios and synthetic effects, such important research topics arise as the introduction of a project portfolio management concept, the consideration for benefits, costs and risks of the project portfolios, the establishment of a project portfolio programming model, and the selection of optimum project portfolio solutions. This study developed a project portfolio programming model with project portfolios as the target for decision making rather than individual projects in the previous programming models. Since the programming tasks are filled with uncertainties in terms of benefits, risks and budgets of project portfolios, grey multiobjective 0-1 integer programming problems were designed. Additionally, a grey Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) approach was developed to solve the proposed model. With the large-scale transportation development projects of the Public Construction Commission, Executive Yuan, as the assumption basis of numerical examples and applications, the analysis confirmed the feasibility of the proposed model. The trade-off ratios between two goals were shown using different goal weight combinations for negotiations and decision making in regard to project portfolio programming. The proposed model uses project portfolios as the target for decision making, and can therefore set up a foundation for transportation programming models using a project portfolio management approach. The incorporation of grey numbers in the programming model allows possible ranges for the input values of benefits, risks and budgets, which helps to maintain the flexibility in decision making when planners are faced with and dealing with indefinite conditions for programming.

Key Words: *Transportation programming; Project portfolio selection; Grey multi- objective programming; Grey numbers*

一、前言

運輸計畫規劃 (transportation programming) 是運輸部門進行運輸計畫選擇之過程，包括計畫評估、選擇、排程與預算組合，以決策核定之運輸計畫集合^[1]。運輸計畫規劃常面臨須結合多個不同的目標和計畫之間關係複雜，以及預算相互競爭而增加了問題難度^[1,2]。近年來政府財政相當困窘，在資源有限的情況下，如何妥善分配預算以達成目標，成為一重要之規劃課題。運輸計畫多為國家級、區域性之中、長期 (10~30 年) 運輸發展與基礎建設開發投資計畫，其涵蓋多階段規劃期程，並由許多子項計畫所組成，規劃時間長、具有投資成本大、影響範圍廣以及高度不確定性之特性^[3,4]；由於運輸計畫規劃與執行時程長，使得許多不確定性風險增加，可能會造成工程成本增加、建設時間延長等，使得整體計畫成本不易掌控。計畫利益通常也難以具體估計，不同類型計畫也會有不同特性與利益，使得各項方案相互間難以取決。運輸計畫規劃問題屬於中長期決策，運輸部門在預算限制下，只能優先滿足目標之計畫，但計畫間通常在資源與財務上相互衝突^[5]。

計畫組合選擇 (project portfolio selection) 問題源自於 Markowitz^[6-8]，最初主要探討財務金融投資組合問題，並以均值－變異模式 (mean-variance model) 為方法論基礎，將機率性 (probability) 整合於最佳化模式中，以模式化不確定性環境中之投資理財行為。計畫組合選擇問題在理財投資組合、研發 (R&D) 計畫組合選擇之應用已有相當豐富之文獻，包括：以均值－變異為基礎之投資組合選擇問題^[9-13]、以模糊不確定性之計畫組合問題^[14-18]、產品及研發組合選擇問題^[19-22]；惟計畫組合選擇應用於運輸計畫規劃問題，尚較闕如^[23]。Markowitz^[6-8] 計畫組合選擇問題建構為二次規劃 (quadratic programming) 模式，屬於 NP-hard 問題，求解非常困難^[9-13]。Young^[10] 運用 minimax 概念，將投資標的之報酬水準服從常態分配下，建構線性規劃來近似 Markowitz^[6-8] 二次規劃解。而 Cooper 等人^[19] 與 Beaujon 等人^[20] 則建構背包問題 (knapsack problem) 基礎之計畫組合整數規劃模式，並考慮計畫之均值－變異準則 (mean-variance criterion) 作為組合選擇之目標式。然而，前述研究主要以機率性方法 (probabilistic approaches) 描述市場環境之不確定性，對於非機率性因素 (non-probabilistic factors) 之不確定性問題則有不足。晚近許多研究^[14-18] 發展模糊組合選擇問題，即以模糊可能性 (possibility) 來探討包含隨機、非隨機因素之不確定性環境下的組合選擇問題。再加上組合選擇問題，本質上即是多目標問題 (追求報酬最大、風險最低)，故這類研究多採模糊多準則決策方法，如：Arenas 等人^[14] 運用模糊目標規劃法 (fuzzy goal programming) 求解考慮報酬、風險、流動性 (liquidity) 之投資組合選擇問題；Ida^[15] 則將目標函數係數以區間值與模糊數來描述不確定性，並建構多目標組合選擇規劃問題；而 Abiyev 與 Menekay^[16] 運用模糊邏輯 (fuzzy logic) 來估計期望報酬與風險，並透過基因演算法求解模糊組合選擇問題；Sadi-Nezhad 等人^[24] 建構模糊 0-1 背包問題來求解投資計畫組合問題，但該模式仍以個別投資計畫為決策對象，而未考慮組合後之風險

變異與綜效。而 Ong 等人^[18]則改良均值－變異模式並提出一演算法，在最大利益與最小風險下建立股票投資組合架構，利用灰色預測模式，預測未來投資方案風險值與報酬率考量個別計畫風險值（不確定性），成本與效益估計採用確定性數值。Carlsson 等人^[21]則將未來現金流以模糊可能性來估計，建構一研發計畫選擇評價模式，進行研發計畫組合選擇。Inuiguchi 與 Ramik^[25]則比較分析模糊規劃（fuzzy programming）與隨機規劃（stochastic programming）之差異、應用於計畫組合選擇問題之優缺點與問題特性。歸納之，計畫組合選擇問題的關鍵即在於計畫在組合決策時，針對計畫與計畫間的變異不確定性及報酬（效益）與成本不確定性之處理，而發展以機率性與模糊可能性兩類處理方式。

在運輸計畫規劃上，多重計畫組合的規劃管理遠較個別計畫選擇問題複雜，運輸建設計畫之間常有相關性，所涉及之經濟與社會利益、成本與風險，應以計畫組合管理（project portfolio management, PPM）的概念作全盤考量，才較能以宏觀角度做完善的規劃。然在運輸計畫規劃階段，計畫間尚未定義優先順序，只能初步篩選出必要執行之計畫，計畫與計畫之間關係亦不明確，如何選擇最適之運輸計畫投資組合，便成為重要之研究課題。過去相關運輸計畫規劃問題^[1, 26, 27]多僅針對個別計畫方案進行評估、選擇與規劃，並無計畫組合與綜效（synergy）之考量。且相關研究^[23, 26-29]模式考慮成本、利益與部門預算限制，應用背包問題找出利益最高的最佳化方案。晚近研究，Stankeviciene 與 Jachimaviciene^[23]與 Zhong 與 Young^[27]於模式中開始加入計畫組合之概念，但其模式仍是以個別計畫作為決策對象，且假設主計畫與子計畫間關係已知（即組合已知）、計畫之成本與利益均為確定性數值；而於計畫風險處理上，則在計畫選擇初期由決策者依照建設類別設定個別計畫的風險程度，並由決策者設定可接受的總風險值限制式。綜上，運輸計畫選擇文獻仍以確定性模式、考慮個別計畫為主；僅 Teng 與 Tzeng^[3,4]一系列研究考慮運輸投資計畫間相依性，並考慮計畫目標達成度與資源利用率之不確定性的模糊數，建立模糊多目標 0-1 整數規劃，來求解相依計畫之運輸投資計畫選擇。綜整而言，導入計畫組合管理概念，建構運輸計畫組合選擇規劃模式，可同時考慮多重運輸計畫組合下所衍生之綜效及衡量運輸計畫組合之利益與風險，以進行最適運輸計畫組合方案選擇，以滿足計畫組合決策目標，即成為運輸計畫規劃值得研究的議題。再者，運輸計畫規劃須考慮成本、利益及風險之不確定性，且運輸計畫評估須面臨過去相關或可取得的數值資料稀少性。運輸計畫在規劃階段，對於預算、成本、利益等評估值，及執行期限之控制，往往僅能掌握於一幅值範圍，無法取得精確的數值；計畫間相互關係與交互作用亦不明確，衍生之綜效利益、共同成本更甚難評估。而且，此階段的規劃結果，通常會預留彈性，以因應未來難以掌握之發展情境與風險，如：樂觀、悲觀之發展情境，供給需求預測之上限、下限範圍。因此，如何在不確定性、資訊不明確之決策環境下，處理運輸計畫組合決策規劃問題，具有很大大之研究空間。

如前文獻回顧所述，處理計畫組合選擇之不確定性問題常用隨機規劃或模糊規劃方法，但此兩類規劃方法仍須分別針對目標式、限制式之係數資訊、參數發生或目標達成、限制範圍，確認其機率分配（probability distribution）或可能性分配（possibility distribution）。然而，在實務規劃上，定義出參數之機率分配或可能性分配常有困難，且易受質疑。

因此，在資訊不明確之決策環境下，難以隨機性或可能性進行分析處理時，可應用灰色區間數之觀念，建構灰色規劃 (grey programming) 模式^[30-32]。綜整文獻^[25, 33, 34]，針對隨機規劃、模糊規劃與灰色規劃於計畫組合選擇問題之適用條件及優缺點比較，列於表 1。隨機規劃適用於問題中之隨機變數服從多變量常態分配 (multivariate normal distribution)；倘隨機變數服從其他一般分配 (general distribution) 時，隨機規劃便難以求解。而模糊規劃則較隨機規劃容易求解，模糊規劃可處理模糊係數與軟限制式 (soft constraints)，且變數之可能性分配可設為任何單峰分配 (unimodal distribution)^[25]。然而，模糊規劃仍須假設不確定變數之間相互獨立，惟模糊可能性規劃問題可等同於具未知相關係數之隨機規劃問題^[25]。有別於隨機規劃以隨機變數與機率分配，模糊規劃以模糊數與可能性分配來處理不確定性問題，灰色規劃則以灰數 (grey numbers) 來處理資訊不完全下之數值不確定性與變數關係不明確之問題。灰數代表僅能掌握一區間範圍之資訊或參數不確定性，不須定義特定之機率分配或可能性分配^[33-35]、亦不須假設不確定變數之間獨立性或相關係數，正符合實務上運輸計畫規劃之決策不確定性環境。因此，本研究嘗試建構一以灰色多目標規劃為基礎之運輸計畫組合選擇模式，作為決策者在選擇運輸計畫組合方案之決策參考。

本研究以計畫組合管理概念為模式之框架，建立運輸計畫組合選擇問題，有別於過去運輸計畫規劃問題^[1, 23, 26-29]以個別計畫為規劃對象，本研究計畫組合規劃模式係以計畫組合為決策對象，再針對運輸計畫在成本、利益與預算評估、及計畫完成期限之變異的不確定性，運用灰數與多目標 0-1 整數規劃模式進行運輸計畫最適組合之最佳化決策規劃。本研究模式同時考慮計畫組合與組合選擇問題，並加入利益、成本、預算及執行年限之區間灰數不確定性，並發展可行之求解程序，具有模式問題發展之創新性。模式中輸入參數與目標式，而輸出結果為灰數，滿足運輸計畫規劃決策時面臨之資訊不明確與規劃彈性之問題特性，透過計畫組合規劃求解，期給予決策者具有彈性的計畫組合決策參考。本文結構如下：第二節說明計畫組合於運輸計畫規劃模式之構建，第三節說明求解方法，第四節進行應用數值範例分析，最後於第五節彙整結論與建議。

二、模式建構

本研究建構灰色多目標 0-1 整數規劃為基礎之計畫組合選擇模式，進行運輸計畫規劃。本節說明運輸計畫組合選擇變數、利益、成本與風險函數建立，及組合選擇 0-1 整數規劃模式之建構。

2.1 成本與利益函數

令計畫規劃對象之運輸計畫個別計畫為 $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ ，令這些運輸計畫方案 A_i 均為通過初步可行性評估（如：市場、技術、經濟、財務、政治、環境、管理可行性）之篩選所挑選出具可行性之計畫方案，令運輸計畫方案集合為 A ，如下：

表 1 隨機規劃、模糊規劃與灰色規劃於組合選擇問題之比較

比較項目 \ 規劃模式		隨機規劃	模糊規劃	灰色規劃
問題特性	不確定性	大樣本不確定性	認知不確定性： 數 值 模 糊 不 明 確 (vagueness) 限 制、目 標 不 明 確 (ambiguity)	不完全資訊下之 小樣本不確定性： 數值因素不明確、 關係不完全清楚
	不確定變數	隨機變數 (random variables)	模糊數 (fuzzy numbers)	灰數 (grey numbers)
	分配要求	機率性分配 (多變量常態分配 或典型機率分配)	可能性分配 (任何單峰分配)	允許任意分配
	規劃模式型態	- 一 機 率 分 配 問 題 (distribution problem) - 一 二階段、多階段隨機 規劃具修正依賴函 數 問 題 (recourse problem) - 一 機 率 限 制 式 問 題 (chance constraints)	- 一 模 糊 目 標 係 數 問 題、模糊目標規劃 - 一 模 糊 限 制 式 問 題 - 一 混 合 模 糊 目 標 係 數 與限制式問題 - 一 模 糊 關 係 方 程	- 一 灰色區間目標係數 問題 - 一 灰色限制式問題 - 一 混 合 灰 色 區 間 目 標 係數與灰色限制式 問題 - 一 混 合 灰 色 規 劃 與 模 糊規劃問題
優點 (適用性)		- 一 適用於大樣本數 據，能確認具統計機 率分配 - 一 變數服從常態分配 時，易求解	- 一 可處理非隨機性因 素與模糊決策 - 一 適用彈性規劃與軟 限制式問題 - 一 可能性分配可設為 任何單峰分配 - 一 較 隨 機 規 劃 易 求 解、且求解結果可有 效處理風險集中策 略	- 一 適用資訊不完全，數 據不足僅能掌握參 數區間範圍而無法 確認範圍內之分配 - 一 不須設定機率分配 或可能性分配 - 一 不須假設變數間獨 立或相關係數
缺點		- 一 未考慮其他非機率 性不確定因素 - 一 問題複雜度高，求解 困難 - 一 變 數 若 為 一 般 分 配，更難以求解 - 一 實務規劃上針對財 務、風險、計畫值定 義機率分配函數常 有困難	- 一 假設不確定變數間 相互獨立 - 一 實務規劃上針對財 務、風險、計畫值定 義可能性分配函數 常有困難	- 一 針對較細部計畫規 劃問題將使問題複 雜度增加，求解困難 - 一 若數據樣本足夠、能 確認不確定變數之 機率性或可能性，則 可應用隨機規劃或 模糊規劃，或混合模 式

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

令運輸計畫組合方案為 $P_k, k = 1, 2, \dots, m$ ，即每個計畫組合方案為單一計畫或兩個以上計畫之組合，如下式：

$$P_k = \{A_i \mid x_i^k = 1\} \quad (2)$$

其中， $x_i^k = \{0, 1\}$ 為單一計畫 A_i 選入計畫組合方案 P_k 之 0-1 決策變數， $x_i^k = 1$ 表 A_i 被選入 P_k 中，屬於計畫組合方案 P_k 內。

本研究之計畫組合規劃，有別於過去相關運輸計畫規劃問題 [1, 23, 26-29] 以個別計畫方案為決策對象，而是以計畫組合方案 P_k 為決策對象，決策變數為 $x_k = \{0, 1\}$ ，規劃時，當 $x_k = 1$ ，代表計畫組合方案 P_k 被選入最適組合中。由於本研究問題須同時求解計畫組合與組合選擇，亦即，在規劃模式中計畫之選擇決策將變為 $x_i^k x_k$ ，惟由於 x_i^k 與 x_k 均為 0-1 決策變數，若同時求解 $x_i^k x_k$ ，最多將有 2^{n+m} 次運算，且組合數 m 的大小又受計畫數 n 之影響 (m 最多為 $2^n - 1$)；若問題規模大時，將使問題成為組合最佳化之複雜問題，造成求解困難。因此，本研究規劃模式之 0-1 決策變數分為兩階段求解，第一階段在規劃模式中須決定個別計畫 A_i 歸屬於計畫組合 P_k ，即決策變數 x_i^k ；決定出所有計畫組合方案 P_k 後，再代回數學規劃模式，求解最佳之計畫組合，即決策變數 x_k 。

針對個別計畫，須進行成本與利益之評估，令個別計畫 A_i 之總成本與總利益分別為 $TC(A_i)$ 與 $TU(A_i)$ 。在評估運輸計畫之成本時，首先要設定評估期間，評估期間的長度通常是按照交通基礎建設的預期生命週期 (life cycle) 來設定。在規劃設計階段，成本項目包含規劃成本；在施工階段，則包含建設成本及土地取得與建物拆遷成本；在營運階段，包含營運操作成本、維護成本及重置成本；而結束階段，則包含場地重建成本及清運成本。各階段成本再透過折現率與現值因子函數，推算計畫成本現值 (present worth)。計畫之經濟利益係指運輸計畫對整體社會所創造出來的福利 (welfare)，這些福利可換算為貨幣化單位，利益的貨幣化評估通常是透過消費者效用水準 (utility) 或消費者剩餘 (consumer surplus) 的變化來衡量；在評估計畫之使用者利益時，主要估算之項目為：旅行時間節省與旅行成本節省。同樣，針對個別計畫發生在不同時點之利益，亦透過折現率與現值因子函數，推算計畫成本現值。

為簡化分析，本研究假設未考慮計畫組合中個別計畫之共同成本及其成本折減之效果，僅考慮計畫組合所帶來之利益加成效果。因此，針對計畫組合方案 P_k ，其總成本可表示為：

$$TC(P_k) = \sum_i TC(A_i) x_i^k \quad (3)$$

針對計畫組合方案 P_k ，其總利益函數可表示為：

$$TU(P_k) = (1 + \gamma_k) \sum_i TU(A_i) x_i^k \quad (4)$$

其中， γ_k 代表計畫組合 P_k 中之計畫 A_i 間的利益加成效果， $0 \leq \gamma_k \leq 1$ ，假設 γ_k 係由決策者針對每個計畫組合方案 P_k 評估設定。實務上，針對計畫組合方案 P_k 可重新進行整體利益評估，考慮運輸計畫組合將可能形成完整路網及系統，其將帶來較大的使用者旅行時間／成本之節省，及所衍生之消費者剩餘增加的利益、抑或整體系統建設將可能節省部分共同成本而具有資本成本節省之利益。評估這些組合後的計畫組合方案總利益增加效益，可依評估組合方案之益本比反推組合利益加成效果 γ_k 。

2.2 灰色數與風險函數

在進行運輸計畫評估時，常面臨過去相關或可取得的數值資料不明確，且運輸計畫在規劃階段，針對計畫之成本、利益、預算及執行年限資料，因應未來不明確之發展情境與風險，往往僅能掌握於一幅值範圍，如樂觀、悲觀情境或上限、下限預測值，無法取得精確的數值。再者，在計畫組合管理上，計畫間相互關係與交互作用亦不明確，衍生之綜效利益、共同成本更甚難評估。由於評估數值的不確定性，Sharpe 等人 [36] 建議應採用區間數值進行評估。因此本研究針對計畫之成本、利益、預算及執行年限變異數皆利用灰數作為評估。灰數代表一個資訊不完全、不確定的數，可用一區間範圍來表示 [33-35, 37, 38]，定義為：

$$\otimes x = [\underline{\otimes} x, \overline{\otimes} x] = \{x' \in x \mid \underline{\otimes} x \leq x' \leq \overline{\otimes} x\} \quad (5)$$

其中， $\underline{\otimes} x$ 與 $\overline{\otimes} x$ 分別代表灰數的下界 (lower bound) 與上界 (upper bound)。而灰數之區間中存在有一白化值 (whitening value) $\tilde{\otimes} x$ ，白化值代表一明確數值，灰數轉換 (grey transformation) 即為於灰數中取得一個確定值 [33-35]，定義為：

$$\tilde{\otimes} x = x', \quad x' \in [\underline{\otimes} x, \overline{\otimes} x], \quad \forall \tilde{\otimes} x \in \otimes x \quad (6)$$

白化權函數 (whitening function) 則為不同白化值於該灰數之權重函數，白化權值介於 [0, 1]，常用之白化權函數通常以線性函數定義。

在個別計畫之成本與利益估計上，常隨著計畫特性、規劃時點、甚至調查、分析方法不同而有所差異，成本與利益估計值並非確定值，即宜採用灰數來處理。在計畫評估時，單一折現率無法完全符合實際狀態，實務上，折現率會因不同時期的經濟狀況不同而有所不同。而在考慮計畫成本項目為分年編列情況之下，計畫總成本現值受折現率影響；且考慮成本預估之不確定性，個別計畫總成本預估值宜以灰數呈現較為合理。個別計畫總成本函數之區間灰數，設為 $\otimes TC(A_i)$ 。再者，亦考慮計畫利益估計之不確定性，將個別計畫之總利益亦轉換為一區間灰數，設為 $\otimes TU(A_i)$ 。

運輸計畫不若一般投資計畫僅考慮投資風險最小下追求報酬最大，而須廣泛考慮計畫之經濟利益與成本。而運輸計畫在風險控管上，最重要即是計畫全生命週期管理 (life-cycle assessment)，計畫期程之風險控管可減少計畫延期及經費增加發生之機率。本研究引申 Markowitz^[6-8] 投資計畫組合問題之概念，並定義運輸計畫風險來自於計畫執行年限之變異 (如計畫延後)，並考量計畫組合內之個別計畫間之相互影響，使得計畫組合執行年限將可能產生共變異之變化。個別計畫在規劃初期均會設定計畫之執行年期，但實際執行之年期常常會隨時空情境與執行條件之不同而改變，使得計畫執行年期可能提早或延遲，進而影響計畫之成本與利益，形成計畫執行之不確定風險。再者，決策者對於計畫執行年期往往僅能掌握於一幅值範圍，故以區間灰數估計計畫執行年期變異。而計畫組合方案之執行年期，由於牽涉到多個計畫之執行，其不確定程度更難以估計，故以計畫組合角度須重新估計計畫組合之執行年期，並設定計畫組合執行年期之區間灰數，由計畫組合執行年期之變異作為計畫組合方案之風險函數。

令 y_k 為計畫組合方案 P_k 之估計執行年期，而 $\otimes y_k$ 為計畫組合方案 P_k 執行年期之灰色區間， $\otimes y_k = [\otimes y_k, \bar{\otimes} y_k]$ ，其中， $\otimes y_k$ 與 $\bar{\otimes} y_k$ 分別代表計畫組合方案執行年期之下界與上界。參考 Ong 等人^[18] 對計畫組合之不確定風險函數建立，本研究計畫組合方案 P_k 執行年期之風險函數 $R(P_k)$ 可列式為：

$$R(P_k) = \frac{\bar{\otimes} y_k - \otimes y_k}{y_k} \quad (7)$$

2.3 規劃模式

本研究運輸計畫組合模式之目標式設定為：最大化總淨現值目標、最小化總風險值目標，分別列式如下：

$$\text{Max } Z_1 = \sum_k [TU(P_k) - TC(P_k)] x_k \quad (8)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_k R(P_k) x_k \quad (9)$$

在預算限制考量下，計畫組合之總成本必須小於決策單位之總預算限制，參考行政院公共工程委員會^[39] 之年度預算執行率，各單位之預算執行率期望大於 90%，以避免無效的決策結果，因此本研究參考此限制，限制式表示如下：

$$\sum_k TC(P_k) x_k \leq TB \quad (10)$$

$$\sum_k TC(P_k) x_k \geq 0.9TB \quad (11)$$

其中， TB 為總預算值。

再者，本研究考慮在最終計畫組合結果時，每個個別單一計畫方案僅會屬於一計畫組合 (即一個別計畫不會同時納入不同組合中)，因此，須加上一限制式。亦即，當一特定計畫組合 P_k 被選入最佳計畫組合時，即 $x_k = 1$ ，其所包含的個別計畫 $\{A_i, x_i^k = 1\}$ ，即不能再被選入其他最終計畫組合中。此限制式如下：

$$\sum_k x_i^k = 1, \forall i \quad (12)$$

而最終規劃結果亦須限制至少有一計畫組合被選取，即：

$$\sum_k x_k \geq 1 \quad (13)$$

多目標計畫組合規劃之數學規劃模式，表示如下：

$$\text{Max } Z_1 = \sum_k [TU(P_k) - TC(P_k)] x_k \quad (14a)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_k R(P_k) x_k \quad (14b)$$

s.t.

$$\sum_k TC(P_k) x_k \leq TB \quad (14c)$$

$$\sum_k TC(P_k) x_k \geq 0.9TB \quad (14d)$$

$$P_k = \{A_i \mid x_i^k = 1\} \quad (14e)$$

$$\sum_k x_i^k = 1, \forall i \quad (14f)$$

$$\sum_k x_k \geq 1 \quad (14g)$$

$$x_i^k = \{0, 1\}, x_k = \{0, 1\}, \forall i, k \quad (14h)$$

其中，式(14a)、(14b)為兩目標式，式(14c)–(14h)為限制式。式(14c)與(14d)為預算限制，式(14e)為計畫組合定義式，式(14f)表示最適規劃下個別計畫僅能歸屬於一計畫組合中，不能重複選入不同組合，式(14g)則限制至少有一計畫組合被選取，式(14h)表決策變數 x_i^k 與 x_k 為 $\{0, 1\}$ 整數。

由於計畫成本與利益及計畫執行年期之不確定性而設為灰數，在運輸計畫規劃階段，決策者對於總預算數之估計，亦往往僅能掌握於一幅值範圍，故預算值亦宜設為灰數作為限制式。因此，本研究數學規劃式中，目標式係數及預算式均以灰化處理，導致決策變數將會在輸入值之上、下界與原始預估值變動下而變動，模式輸出決策變數之變動，則將提供規劃決策者更具彈性之決策資訊。

將基本列式 (式(14a)–(14h)) 與灰數相整合後，建構本研究之灰色多目標計畫組合規劃模式，如 [P1] 所示：

[P1]

$$\text{Max } \otimes Z_1 = \sum_k [\otimes TU(P_k) - \otimes TC(P_k)] x_k \quad (15a)$$

$$\text{Min } \otimes Z_2 = \sum_k \otimes R(P_k) x_k \quad (15b)$$

s.t.

$$\sum_k \otimes TC(P_k) x_k \leq \otimes TB \quad (15c)$$

$$\sum_k \otimes TC(P_k) x_k \geq 0.9 \otimes TB \quad (15d)$$

$$P_k = \{ A_i \mid x_i^k = 1 \} \quad (15e)$$

$$\sum_k x_i^k = 1, \quad \forall i \quad (15f)$$

$$\sum_k x_k \geq 1 \quad (15g)$$

$$x_i^k = \{0, 1\}, \quad x_k = \{0, 1\}, \quad \forall i, k \quad (15h)$$

三、求解方法

進一步，本研究提出運輸計畫組合規劃問題之求解方法，發展一兩階段求解程序，在決策變數之處理上，第一階段先處理計畫組合決策變數，先決定組合方案；第二階段再以計畫組合方案為規劃對象，進行灰色多目標 0-1 整數規劃之求解。而在灰色多目標規劃模式之求解，本研究參引林楨家與李家儂^[30]、林楨家與沈育生^[31]、Lin 與 Li^[32] 系列研究所提出之灰色 TOPSIS 求解法進行求解。此兩階段求解方法，分別以下列兩小節說明如下。

3.1 決策變數處理與組合方案

本研究規劃問題必須同時求解決策變數 x_i^k 與 x_k ，在規劃模式中計畫之選擇決策變數將變為 $x_i^k x_k$ ，將使問題成為組合最佳化之複雜問題，增加複雜度而求解困難。因此，本研究在求解上，針對於決策變數先做兩階段處理，第一階段先決定組合方案，第二階段再以組合方案為規劃對象進行組合方案之最適選擇。

在第一階段處理上，透過先分群再窮舉的方式，找出所有可能的計畫組合方案。假設決策者能先初步決定幾個計畫組合分群，再針對每個計畫組合分群，進行所有可能組合方案之窮舉，即先求解 x_i^k ，將決策對象轉為計畫組合方案；再針對所有計畫組合方案，代回規劃模式，決策變數簡化為 x_k ，以進行模式求解。惟當計畫個數為 n ，若未先分群，則所有可能之組合個數即為 $2^n - 1$ ；若 n 很大時，將使組合數過多而大幅增加問題求解複雜度。故先分群之目的，僅在於降低組合之求解複雜度；將 n 個計畫先分成若干個分群，每個分群內之計畫個數為 m ($m \ll n$)，則對每個分群再窮舉所有組合時，該分群之組合個數則可降為 $2^m - 1$ 。舉例而言，若原本個別計畫方案共 20 個，直接將這 20 個計畫進行所有可能的組合，則組合方案最多將有 $2^{20} - 1 = 1,048,575$ 個組合方案；若決策者初始可將 20 個計畫依據列管、執行單位、依據整體系統目標、計畫屬性，先將之分群，假設分為 4 個分群每個分群含 5 個計畫，則每個分群再窮舉所有組合方案，則所有可能組合方案將為 $4 \times (2^5 - 1) = 124$ 個組合方案，即可大幅降低問題求解複雜度。

實務上，在運輸計畫規劃階段，以整體系統規劃觀點與計畫組合管理之概念而言，決策者應可先依整體系統目標、計畫屬性，而將所有計畫先分成若干個分群。令初步計畫組合分群為 P_ℓ ，每個分群中包含不同個數之計畫，如 $P_\ell = \{A_1^\ell, A_2^\ell, \dots, A_{n'}^\ell\}$ ， $n' \leq n$ 。針對任一計畫組合分群 P_ℓ ，再依窮舉組合的方法，將 P_ℓ 再拆解為子集合： $P_{\ell-1}, P_{\ell-2}, \dots, P_{\ell-m'}$ ， m' 個計畫組合方案 ($m' = 2^{n'} - 1$)，這些計畫組合方案即包括單一個別計畫及兩個以上計畫組合方案；亦即，針對 P_ℓ 內之元素 $\{A_1^\ell, A_2^\ell, \dots, A_{n'}^\ell\}$ 依所有可能組合，可窮舉出 $C_1^{n'} + C_2^{n'} + \dots + C_{n'}^{n'} = m'$ 個計畫組合方案。

舉例說明，假設原始計畫方案集合為 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ ，決策者經評估與計畫組合管理概念，初步將計畫分為 2 個分群： $P_1 = \{A_1, A_3, A_4, A_5\}$ 以及 $P_2 = \{A_2\}$ 。再將計畫組合分群 P_1 ，依可能組合拆解為下列計畫組合方案：

$$C_1^4 = \{A_1\}, \{A_3\}, \{A_4\}, \{A_5\}$$

$$C_2^4 = \{A_1, A_3\}, \{A_1, A_4\}, \{A_1, A_5\}, \{A_3, A_4\}, \{A_3, A_5\}, \{A_4, A_5\}$$

$$C_3^4 = \{A_1, A_3, A_4\}, \{A_1, A_3, A_5\}, \{A_1, A_4, A_5\}, \{A_3, A_4, A_5\}$$

$$C_4^4 = \{A_1, A_3, A_4, A_5\}$$

$$P_{1-1} = \{A_1\}, P_{1-2} = \{A_3\}, P_{1-3} = \{A_4\}, P_{1-4} = \{A_5\}, P_{1-5} = \{A_1, A_3\}, P_{1-6} = \{A_1, A_4\},$$

$$P_{1-7} = \{A_1, A_5\}, P_{1-8} = \{A_3, A_4\}, P_{1-9} = \{A_3, A_5\}, P_{1-10} = \{A_4, A_5\}, P_{1-11} = \{A_1, A_3, A_4\},$$

$$P_{1-12} = \{A_1, A_3, A_5\}, P_{1-13} = \{A_1, A_4, A_5\}, P_{1-14} = \{A_3, A_4, A_5\}, P_{1-15} = \{A_1, A_3, A_4, A_5\}$$

以及 $P_2 = \{A_2\}$ 共計 16 個計畫組合方案，再針對此 16 個計畫組合方案進行計畫組合選擇之規劃求解。

針對原所有計畫進行初步分群，可運用一些分群理論方法，如： k -平均值分群法 (k-means clustering)、模糊分群法 (fuzzy clustering)、灰色聚類法 (grey clustering) 等，透過對個別計畫之屬性設定 (如計畫性質、目的、範圍、列管執行單位等)，協助決策者進行客觀分群。而分群數 (即分成幾群) 之設定，亦可依循所採用分群法對分群數之檢定而決定。

3.2 應用灰色 TOPSIS 法

理想解相似度順序偏好法 (TOPSIS) 為 Hwang 與 Yoon^[40] 所發展之多準則決策方法，其概念在於尋找距離正理想解 (positive ideal solution) 最近而離負理想解 (negative ideal solution) 最遠的解。Lai 等人^[41] 將 TOPSIS 應用於求解無偏好多目標規劃問題上，將多個目標式正規化建立距離正理想解與負理想解之距離函數，而求解距正理想解最近、離負理想解最遠之妥協解 (compromise solution)。而林楨家與李家儂^[30]、林楨家與沈育生^[31]、Lin 與 Li^[32] 系列研究則整合 TOPSIS 程序加入於灰色規劃求解方法，提出灰色 TOPSIS 法，以求解灰色多目標規劃之妥協解。本研究即應用灰色 TOPSIS 法來求解所提出之灰色多目標 0-1 整數規劃問題。

針對灰色規劃問題，依循 Huang 與 Moore^[37] 解法必須先分解成兩個子模式，其可分開求解，亦可以將兩個子模式合併一起求解，但必須加入上界決策變數大於下界決策變數之限制。以下則以分解成兩個子模式之方法，導入灰色整數規劃之求解。令原灰色多目標規劃模式 [P1] (式(15a)–(15h)) 以一般式表示如 [P2]，其中，原目標式 Z_2 為最小化，將 Z_2 乘上(-1) 轉換為最大化目標式。而 $f(X)$ 表可行解空間， $\otimes B$ 為預算限制。

$$\begin{aligned}
 & \text{[P2]} \\
 & \text{Max } \otimes Z_1, (-\otimes Z_2) \\
 & \text{s.t.} \\
 & f(X) \leq \otimes B \\
 & X \in \{0,1\}
 \end{aligned} \tag{16}$$

灰色整數規劃可依灰數之上、下界，拆解成為兩個子模式 [P2-1] 與 [P2-2]，其分別代表灰數上界模式與灰數下界模式。亦即，灰數上界子模式為所有灰係數與灰預算均以上界值代入；而灰數下界子模式，則係以灰下界值代入。

[P2-1]

$$\text{Max } \bar{\otimes} Z_1, (-\bar{\otimes} Z_2)$$

s.t.

$$\begin{aligned} f(X) &\leq \bar{\otimes} B \\ X &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (17)$$

[P2-2]

$$\text{Max } \underline{\otimes} Z_1, (-\underline{\otimes} Z_2)$$

s.t.

$$\begin{aligned} f(X) &\leq \underline{\otimes} B \\ X &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (18)$$

藉由[P2-1]，可求得最適解，目標式 Z_1 、 Z_2 之上界值記為 $\bar{\otimes} Z_1^*$ 、 $\bar{\otimes} Z_2^*$ ，及對應之決策變數 $\{\bar{\otimes} x_1^*, \bar{\otimes} x_2^*, \dots, \bar{\otimes} x_m^*\}$ 。由 [P2-2]，可求得最適解，目標式 Z_1 、 Z_2 之下界值記為 $\underline{\otimes} Z_1^*$ 、 $\underline{\otimes} Z_2^*$ ，及對應之決策變數 $\{\underline{\otimes} x_1^*, \underline{\otimes} x_2^*, \dots, \underline{\otimes} x_m^*\}$ 。

而在 TOPSIS 之正理想解與負理想解之求解上，先分別針對個別單一目標（即 $\max \otimes Z_1$ 與 $\min \otimes Z_2$ ）下，進行求解，並將個別單一目標下之最適解再代入另一個目標式中，即可建立一償付表 (payoff table)，表示如下：

$$\{(Z_1^{**}, Z_2^-), (Z_1^-, Z_2^{**}), (Z_1^{**}, Z_2^{**}), (Z_1^-, Z_2^-)\} \quad (19)$$

其中， Z_1^{**} 與 Z_2^{**} 分別為兩目標式在個別最佳化之目標式值，亦即， Z_1^{**} 為個別單一目標 $\max Z_1$ 下之目標式值， Z_2^{**} 為個別單一目標 $\min Z_2$ 下之目標式值。在償付表中， (Z_1^{**}, Z_2^{**}) 為正理想解，而 (Z_1^-, Z_2^-) 為負理想解。

應用灰色 TOPSIS 法，求解灰色多目標 0-1 整數規劃問題，求解步驟分述如下：

Step1：轉換多目標問題為單一目標問題

運用上述之灰色整數規劃求解方法，分別求解各目標對限制式之最佳解，以建立償付表，再從償付表中找出各目標的正理想解與負理想解，並藉由全域準則法，將多目標規劃問題轉換為單一目標規劃問題，同時輸入目標間的權重。內容分項說明如下：

1. 建立償付表

將前步驟所得各目標之最佳解灰色區間，代入其它項目標式，找出在達成該目標式最佳化的情況下，其他目標達成狀況。藉以求得達成各目標之正理想解灰色區間與負理想解灰色區間。

2. 利用全域準則法轉換為單目標灰色規劃問題

全域準則法 (global criterion method) 是利用權重與距正理想解之距離值作為基準，轉換多目標為單目標規劃問題，找出最適妥協解的多目標規劃求解方法。全域準則法是藉由償付表找出各目標的正、負理想解，進而利用其進行正規化。使多目標規劃問題轉變為，以目標與正理想解間差異最小化為目標之單目標規劃問題。

由償付表找出各目標式 (Z) 之正理想解 ($Z_1^{**}(\otimes x), Z_2^{**}(\otimes x)$) 與負理想解 ($Z_1^{-}(\otimes x), Z_2^{-}(\otimes x)$)。藉由兩目標式之權重 (w_1, w_2)，將兩目標式與其正理想解及負理想解之相對差距進行加權，成為單目標灰色規劃。轉換後之單目標模式如下所示：

$$\text{Min } \otimes Z = w_1 \left(\frac{Z_1^{**}(\otimes x) - Z_1(\otimes x)}{Z_1(\otimes x) - Z_1^{-}(\otimes x)} \right) - w_2 \left(\frac{Z_2^{**}(\otimes x) - Z_2(\otimes x)}{Z_2(\otimes x) - Z_2^{-}(\otimes x)} \right) \quad (20)$$

其中，目標式 Z_1 之權重為 w_1 、目標式 Z_2 之權重為 w_2 。

Step2：求解灰色單目標規劃問題

使用灰色整數規劃求解方法，加入 [P2-1] 及 [P2-2] 之限制條件後，求解新決策目標之灰色決策變數。

Step3：運輸計畫組合規劃解

綜合前述步驟之結果，求得模式決策變數為 $\otimes x = [\otimes x_1, \otimes x_2, \dots, \otimes x_m]$ ，其中 $\otimes x_k$ 代回原式重新計算目標值，此一結果即為運輸計畫組合規劃結果。

四、應用範例

為確認本研究模式之可行性，本研究針對一應用數值範例進行分析，並就部分參數進行敏感度分析。

4.1 範例說明

本研究以行政院公共工程委員會在民國 99 年所列管之重大公共建設計畫^[39]為例，僅考慮交通部鐵公路類別之計畫，選取其中總成本大於 100 億以上之大型運輸建設計畫，作為本實務數值範例之基礎，並針對部分難以取得實際資料之參數給予合理之假設，透過模式求解與分析以確認本模式於實務運輸建設計畫規劃問題應用之可行性。

由於在原始資料中並未定義計畫間之相關性及計畫整合之綜效，故本研究依各個別計畫之性質及相關性，先初步進行第一階段之計畫分群。而各計畫於提案前均已經過計畫可行性評估，但計畫未執行前難以評估計畫之利益，原始資料中僅部分計畫在可行性評估中

提及計畫之益本比，而多數計畫未提供益本比數值，則本範例參考過去已完成且計畫類型相似、規模尺度相近之計畫的益本比給予合理之假設數值。而個別運輸計畫案之基本資料如下表 2 所示。初步依據計畫性質，將範例計畫方案先分為 6 個計畫分群，每個計畫分群再窮舉所有可能之計畫組合方案，分述如下：

1. 計畫組合分群 $P_1: \{A_1, A_5\}$

為北部國道改善計畫，其中包含國道 2 號拓寬計畫(A_1)及國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程 (A_5)，其中又可分為進一步拆解為 C_1^2 兩個個別計畫組合方案，即 $P_{1-1}: \{A_1\}$ ， $P_{1-2}: \{A_5\}$ 。

2. 計畫組合分群 $P_2: \{A_2, A_3, A_4\}$

為中部都會區國道整合改善計畫，其中包含國道 6 號南投段建設計畫 (A_2)、國道 4 號豐原大坑段及臺中生活圈 4 號道路建設計畫 (A_3)、臺中生活圈 2 號線東段、4 號線北段 (A_4) 等 3 個計畫，又可將計畫組合為拆解為 $C_2^3 + C_1^3$ 共 6 個計畫組合方案，即 $P_{2-1}: \{A_2, A_3\}$ ， $P_{2-2}: \{A_2, A_4\}$ ， $P_{2-3}: \{A_3, A_4\}$ ， $P_{2-4}: \{A_2\}$ ， $P_{2-5}: \{A_3\}$ ， $P_{2-6}: \{A_4\}$ 。

3. 計畫組合分群 $P_3: \{A_6, A_{21}, A_{22}\}$

為桃園機場聯外系統改善計畫，其中包含臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫 (A_6)、臺灣桃園國際機場道面整建及助導航設施提升工程計畫 (A_{21})、桃園國際機場第一航廈改善工程專案計畫 (A_{22}) 等 3 個計畫，其中又可將計畫組合為拆解為 $C_2^3 + C_1^3$ 共 6 個計畫組合方案，即 $P_{3-1}: \{A_6, A_{21}\}$ ， $P_{3-2}: \{A_6, A_{22}\}$ ， $P_{3-3}: \{A_{21}, A_{22}\}$ ， $P_{3-4}: \{A_6\}$ ， $P_{3-5}: \{A_{21}\}$ ， $P_{3-6}: \{A_{22}\}$ 。

4. 計畫組合分群 $P_4: \{A_8, A_{10}, A_{11}, A_{15}\}$

為鐵路都會區系統改善計畫，其中包含臺鐵都會區捷運化暨區域鐵路後續建設計畫 (基隆—苗栗) (A_8)、臺中都會區鐵路高架捷運化計畫 (A_{10})、高雄屏東潮州捷運化建設計畫 (A_{11})、臺鐵都會區捷運化桃園段高架化建設計畫 (A_{15}) 等 4 個計畫，其中又可將計畫組合為拆解為 $C_3^4 + C_2^4 + C_1^4$ 共 14 個計畫組合方案，即：

$P_{4-1}: \{A_8, A_{10}, A_{11}\}$ ， $P_{4-2}: \{A_8, A_{10}, A_{15}\}$ ， $P_{4-3}: \{A_8, A_{11}, A_{15}\}$ ， $P_{4-4}: \{A_{10}, A_{11}, A_{15}\}$ ， $P_{4-5}: \{A_8, A_{10}\}$ ， $P_{4-6}: \{A_8, A_{11}\}$ ， $P_{4-7}: \{A_8, A_{15}\}$ ， $P_{4-8}: \{A_{10}, A_{11}\}$ ， $P_{4-9}: \{A_{10}, A_{15}\}$ ， $P_{4-10}: \{A_{11}, A_{15}\}$ ， $P_{4-11}: \{A_8\}$ ， $P_{4-12}: \{A_{10}\}$ ， $P_{4-13}: \{A_{11}\}$ ， $P_{4-14}: \{A_{15}\}$ 。

5. 計畫組合分群 $P_5: \{A_9, A_{12}, A_{14}, A_{16}\}$

為鐵路系統整合改善計畫，其中包含臺北市區鐵路地下化東延南港工程 (A_9)、臺鐵立體化高雄市區鐵路地下化計畫 (A_{12})、高雄市區鐵路地下化延伸左營計畫 (A_{14})、臺南市區鐵路地下化計畫 (A_{16}) 等 4 個計畫，其中又可將計畫組合為拆解為 $C_3^4 + C_2^4 + C_1^4$ 共 14 個計畫組合方案，即：

$P_{5-1}: \{A_9, A_{12}, A_{14}\}$ ， $P_{5-2}: \{A_9, A_{12}, A_{16}\}$ ， $P_{5-3}: \{A_9, A_{14}, A_{16}\}$ ， $P_{5-4}: \{A_{12}, A_{14}, A_{16}\}$ ， $P_{5-5}: \{A_9, A_{12}\}$ ， $P_{5-6}: \{A_9, A_{14}\}$ ， $P_{5-7}: \{A_9, A_{16}\}$ ， $P_{5-8}: \{A_{12}, A_{14}\}$ ， $P_{5-9}: \{A_{12}, A_{16}\}$ ， $P_{5-10}: \{A_{14}, A_{16}\}$ ， $P_{5-11}: \{A_9\}$ ， $P_{5-12}: \{A_{12}\}$ ， $P_{5-13}: \{A_{14}\}$ ， $P_{5-14}: \{A_{16}\}$ 。

表 2 應用範例之個別計畫基本資料

計畫 編號	計畫名稱	計畫成本 (億元) ⁽¹⁾	計畫 利益 (億元) ⁽²⁾	B/C ⁽³⁾	預期 執行 年期 ⁽⁴⁾
A ₁	國道 2 號拓寬計畫	128.71	164.75	1.28	3.25
A ₂	國道 6 號南段建設計畫	375.58	495.77	1.32	16.18
A ₃	國道 4 號豐原大坑段及臺中生活圈 4 號道路建設計畫	317.76	409.92	1.29*	10.09
A ₄	臺中生活圈 2 號線東段、4 號線北段	206.96	262.84	1.27	10.09
A ₅	國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程	882.57	1,103.21	1.25*	4.08
A ₆	臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫	1,138.50	1,525.59	1.34	6.92
A ₇	高速鐵路站區聯外道路系統改善計畫	486.42	860.96	1.77	15.51
A ₈	臺鐵都會區捷運化暨區域鐵路後續建設計畫 (基隆－苗栗)	84.84	114.53	1.35	9.00
A ₉	臺北市區鐵路地下化東延南港工程	830.69	938.68	1.13	12.84
A ₁₀	臺中都會區鐵路高架捷運化計畫	288.31	322.91	1.12*	8.26
A ₁₁	高雄屏東潮州捷運化建設計畫	152.37	201.13	1.32	6.00
A ₁₂	臺鐵立體化高雄市區鐵路地下化計畫	715.82	909.1	1.27	10.51
A ₁₃	東部鐵路快捷化計畫-花東線鐵路瓶頸路段雙軌暨全線電氣化計畫	150	201	1.34	5.01
A ₁₄	高雄市區鐵路地下化延伸左營計畫	106.62	146.07	1.37*	8.76
A ₁₅	臺鐵都會區捷運化桃園段高架化建設計畫	308.44	363.96	1.18	8.92
A ₁₆	臺南市區鐵路地下化計畫	293.6	393.42	1.34	8.23
A ₁₇	臺 11 線東部濱海公路改善計畫	110.38	151.22	1.37	19.01
A ₁₈	東西向快速道路北門至玉井線中山高至臺 1 線路段建設計畫 (臺南)	115.31	148.74	1.29	4.92
A ₁₉	臺 9 線花東公路第 3 期道路改善計畫	35.62	45.59	1.28	4.00
A ₂₀	生活圈道路交通系統建設計畫 (公路系統)	360	655.2	1.82	17.01
A ₂₁	臺灣桃園國際機場道面整建及助導航設施提升工程計畫	107.42	149.31	1.39	3.50
A ₂₂	國家重要交通門戶－桃園國際機場第一航廈改善工程專案計畫	19.91	25.49	1.28	3.00
A ₂₃	高雄港東側聯外公路 (國道 7 號)	659.92	864.5	1.31	12.51

資料來源：行政院公共工程委員會^[39]

註：(1) 計畫成本資料來源：公共工程委員會。

(2) 計畫利益資料係由計畫成本乘上益本比 (B/C ratio) 推估而得。

(3) 部分計畫 (標示*者) 之益本比係查詢各計畫權責機關相關計畫報告資料所提出期望益本比，惟多數計畫 (其他無標示*者) 之益本比為本研究作合理假設。

(4) 計畫預期執行年期係查詢各計畫權責機關相關計畫報告說明資料所推算。

6. 計畫組合分群 $P_6: \{A_{13}, A_{17}, A_{19}\}$

為東部運輸系統改善計畫，其中包含東部鐵路快捷化計畫－花東線鐵路瓶頸路段雙軌暨全線電氣化計畫、臺 11 線東部濱海公路改善計畫、臺 9 線花東公路第 3 期道路改善計畫等 3 個計畫，又可將計畫組合為拆解為 $C_2^3 + C_1^3$ 共 6 個計畫組合方案，即：

$$P_{6-1}: \{A_{13}, A_{17}\}, P_{6-2}: \{A_{13}, A_{19}\}, P_{6-3}: \{A_{17}, A_{19}\}, P_{6-4}: \{A_{13}\}, P_{6-5}: \{A_{17}\}, P_{6-6}: \{A_{19}\}。$$

而未包含在計畫分群內之個別計畫，則視為獨立之計畫組合方案，為高速鐵路站區聯外道路系統改善計畫 ($P_7=A_7$)、東西向快速道路北門至玉井線中山高至臺 1 線路段建設計畫 (臺南) ($P_8=A_{18}$)、生活圈道路交通系統建設計畫 (公路系統) ($P_9=A_{20}$)及高雄港東側聯外公路 (國道 7 號) ($P_{10}=A_{23}$)。因此，計畫數量由原先 23 個可行之個別運輸計畫，增為 58 個計畫組合方案。

分別應用式(3), (4), (7)，估算計畫組合方案之成本、利益與執行年限變異風險值，計畫組合方案參數列於表 3。在組合方案之總利益估計，實務上，應針對計畫組合方案重新進行整體利益評估；惟限於範例資料不足，故本數值範例在組合方案利益之參數設定，僅依據組合方案之整體規模，參考過去已完成且計畫規模尺度相近之整體計畫的益本比給予合理之假設值。原則上，計畫組合之規模增加，所影響之使用者利益將更增加，故依評估組合方案之益本比反推組合利益加成效果 γ_k 。而在組合方案之執行年限變異風險值估計，由個別計畫之執行年期及其灰數上、下限值，可估計每個計畫可能之起訖期程範圍，而計畫組合則依其中所包含的計畫最早 (期程灰數下限) 與最晚 (期程灰數上限) 的期程加以聯集，來估計組合方案的期程與範圍上、下限，應用式(7)估算風險值。

4.2 規劃分析

針對前述假設之應用數值範例，考慮在實務規劃時，部分參數數值為不確定狀態，往往非明確之預估值，而僅能掌握一幅值範圍。因此，範例中計畫之成本、利益、風險變異及預算限制設為區間灰數，而區間灰數值之決定，是將原預估值以灰色程度 10%轉換。整合數值灰化後之上、下界參數，即可建構本研究之灰色多目標計畫組合規劃模式。本研究在求解灰色多目標計畫組合規劃模式時，將兩目標給予不同權重 (w_1, w_2)，再透過灰色 TOPSIS 法求解妥協解；其中，目標式 Z_1 (總淨現值目標) 之權重為 w_1 、目標式 Z_2 (總風險值目標) 之權重為 w_2 。範例中，本研究設定： $\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$ ， $\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$ ， $\{w_1 = 0, w_2 = 1\}$ ， $\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$ ， $\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$ 共 5 組權重組合，進行灰色 TOPSIS 法求解。在求解上，本研究應用 Lingo (11.0 版) 中 IOP 模組求解；不同權重組合下之規劃結果如表 4 所示。

結果顯示，單純以利益、成本為決策考量，亦即，單一最大化計畫總淨現值目標 (即權重 $\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$) 與較傾向最大化總淨現值目標 (即權重 $\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$) 之規劃結果相同，其規劃結果之 Z_1 目標值 (總淨現值) 最大、 Z_2 目標值 (總風險值) 亦最大，規劃解較傾向選擇組合計畫較大之計畫組合，總淨現值較大，但執行年期變異風險值相對較高。

表 3 計畫組合方案資料

計畫組合方案編號	計畫組合	計畫組合成本	計畫組合利益	B/C	預期年期
P_1	A_1, A_5	1,011.28	1,645.81	1.63	4.25
P_{1-1}	A_1	128.71	164.75	1.28	3.25
P_{1-2}	A_5	882.57	1,103.21	1.25	4.08
P_2	A_2, A_3, A_4	900.30	1,731.75	1.92	18.10
P_{2-1}	A_2, A_3	693.34	1,241.87	1.79	18.10
P_{2-2}	A_2, A_4	582.54	995.20	1.71	18.10
P_{2-3}	A_3, A_4	524.72	861.75	1.64	10.09
P_{2-4}	A_2	375.58	495.77	1.32	16.18
P_{2-5}	A_3	317.76	409.92	1.29	10.09
P_{2-6}	A_4	206.96	262.84	1.27	10.09
P_3	A_6, A_{21}, A_{22}	1,265.83	2,528.81	2.00	8.84
P_{3-1}	A_6, A_{21}	1,245.91	1,676.46	1.35	1.58
P_{3-2}	A_6, A_{22}	1,158.41	2,242.63	1.94	5.01
P_{3-3}	A_{21}, A_{22}	127.33	183.36	1.44	6.92
P_{3-4}	A_6	1,138.50	1,525.59	1.34	6.92
P_{3-5}	A_{21}	107.42	149.31	1.39	3.50
P_{3-6}	A_{22}	19.91	25.49	1.28	3.00
P_4	$A_8, A_{10}, A_{11}, A_{15}$	833.96	1,186.00	1.42	12.92
P_{4-1}	A_8, A_{10}, A_{11}	525.52	712.21	1.36	9.42
P_{4-2}	A_8, A_{10}, A_{15}	681.59	921.27	1.35	12.92
P_{4-3}	A_8, A_{11}, A_{15}	545.65	761.00	1.39	12.92
P_{4-4}	A_{10}, A_{11}, A_{15}	749.12	1,033.97	1.38	12.43
P_{4-5}	A_8, A_{10}	373.15	473.26	1.27	9.84
P_{4-6}	A_8, A_{11}	237.21	332.09	1.40	9.00
P_{4-7}	A_8, A_{15}	393.28	519.79	1.32	12.92
P_{4-8}	A_{10}, A_{11}	440.68	574.71	1.30	8.92
P_{4-9}	A_{10}, A_{15}	596.75	776.82	1.30	11.76
P_{4-10}	A_{11}, A_{15}	460.81	622.23	1.35	12.43
P_{4-11}	A_8	84.84	114.53	1.35	9.00
P_{4-12}	A_{10}	288.31	322.91	1.12	8.26

表 3 計畫組合方案資料 (續)

計畫組合方案編號	計畫組合	計畫組合成本	計畫組合利益	B/C	預期年期
P_{4-13}	A_{11}	152.37	201.13	1.32	6.00
P_{4-14}	A_{15}	308.44	363.96	1.18	8.92
P_5	$A_9, A_{12}, A_{14}, A_{16}$	1,946.73	3,153.58	1.62	19.10
P_{5-1}	A_9, A_{12}, A_{14}	1,653.13	2,537.34	1.53	19.10
P_{5-2}	A_9, A_{12}, A_{16}	1,840.12	2,921.23	1.59	19.10
P_{5-3}	A_9, A_{14}, A_{16}	1,230.91	1,778.19	1.44	12.43
P_{5-4}	A_{12}, A_{14}, A_{16}	1,116.04	1,715.16	1.54	17.18
P_{5-5}	A_9, A_{12}	1,546.52	2,318.98	1.50	17.18
P_{5-6}	A_9, A_{14}	937.31	1,252.40	1.34	19.10
P_{5-7}	A_9, A_{16}	1,124.29	1,579.06	1.40	19.10
P_{5-8}	A_{12}, A_{14}	822.44	1,198.26	1.46	12.43
P_{5-9}	A_{12}, A_{16}	1,009.42	1,519.32	1.51	12.43
P_{5-10}	A_{14}, A_{16}	400.22	575.09	1.44	8.76
P_{5-11}	A_9	830.69	938.68	1.13	12.84
P_{5-12}	A_{12}	715.82	909.10	1.27	10.51
P_{5-13}	A_{14}	106.62	146.07	1.37	8.76
P_{5-14}	A_{16}	293.60	393.42	1.34	8.23
P_6	A_{13}, A_{17}, A_{19}	296.00	607.78	2.05	20.01
P_{6-1}	A_{13}, A_{17}	260.38	515.75	1.98	20.01
P_{6-2}	A_{13}, A_{19}	185.62	328.21	1.77	5.01
P_{6-3}	A_{17}, A_{19}	146.00	248.05	1.70	20.01
P_{6-4}	A_{13}	150.00	201.00	1.34	5.01
P_{6-5}	A_{17}	110.38	151.22	1.37	19.01
P_{6-6}	A_{19}	35.62	45.59	1.28	4.00
P_7	A_7	486.42	860.96	1.77	15.51
P_8	A_{18}	115.31	148.74	1.29	4.92
P_9	A_{20}	360.00	655.20	1.82	17.01
P_{10}	A_{23}	659.92	864.50	1.31	12.51

而兩目標具相同權重 $\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$ 與較傾向考量風險值目標（即權重 $\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$ ）之規劃結果相同，所規劃選得之計畫組合數較前述規劃結果少，執行年期變異風險值與總淨現值均較小，為較折衷之決策導向。而完全以風險趨避為決策導向（即單一最小化總風險值目標 $\{w_1 = 0, w_2 = 1\}$ ）時，其規劃結果之 Z_2 目標值（總風險值）最小、 Z_1 目標值（總淨現值）亦最小，規劃解較傾向選擇組合計畫較小之計畫組合，執行年期變異之總風險值較小，惟總淨現值亦較小。

灰色規劃結果為灰色決策解，代回模式中則求得灰色目標值；其中，權重 $\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$ 與 $\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$ 之規劃決策解相同，而權重 $\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$ 與 $\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$ 之規劃決策解相同，係因決策變數為 0-1 變數的關係所致。各個目標式權重組合下其不同灰參數對應之規劃結果相同，顯示規劃解為強固 (robust)。探究可能的原因，雖規劃目標式之係數、限制式之係數與右手邊值 (right-hand-side, RHS) 為區間灰數，但規劃決策解為 0 或 1 跳動，而使得決策解對灰參數變動之影響不大。另外，模式規劃結果在預估值下之規劃結果可視為灰數規劃解之特例，模式在處理不確定性的灰參數過程中，即可發揮灰模式之價值。不同目標式權重組合下之計畫組合規劃妥協解之總淨現值 (Z_1) 與總風險值 (Z_2) 目標值之決策空間，對應預估值、灰下界及灰上界模式，分別如圖 1(a)–(c)。由圖 1(a)–(c)，可顯示不同目標式權重組合所代表之兩目標間的權衡取舍率 (trade-off rate)，並隱含決策者可採用不同權重組合對應之目標式值，可提供較大之決策彈性。

4.3 敏感度分析

1. 總預算額度之敏感度分析

運輸計畫組合規劃最關鍵之核心問題即是總預算分配，為檢驗總預算額度變化對計畫組合規劃結果之影響，本研究進行預算限制之敏感度分析。本研究將預算額度由原先預估之 6,300.6 億元，增加及減少 10%，分別為 5,513.025 億元及 7,088.175 億元，而各計畫之成本與利益值以及計畫執行年期變異風險值不變，同時假設兩目標式之權重相等 ($\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$)，以了解計畫組合規劃結果是否會因預算之增減而有所不同，預算變動下之規劃結果列於表 5。

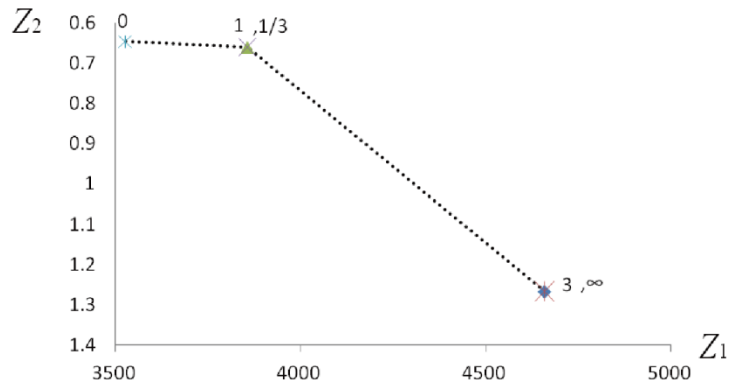
由表 5 可知，隨預算額度增加，計畫組合總淨現值會隨預算額度增加而增加，且由於選入的計畫組合也增加，而使得計畫組合執行年期變異之總風險值亦隨之增加。由表 5 可知，當預算緊縮時（總預算減少 10%），選入最終計畫組合方案之計畫組合成本較低；當預算較寬裕（總預算增加 10%）時，則會改為選入組合方案內計畫數較多之組合方案。從表 5 亦可顯示哪些組合方案對於預算改變較為敏感，亦受到該計畫組合方案之成本所影響。

2. 灰色程度之敏感度分析

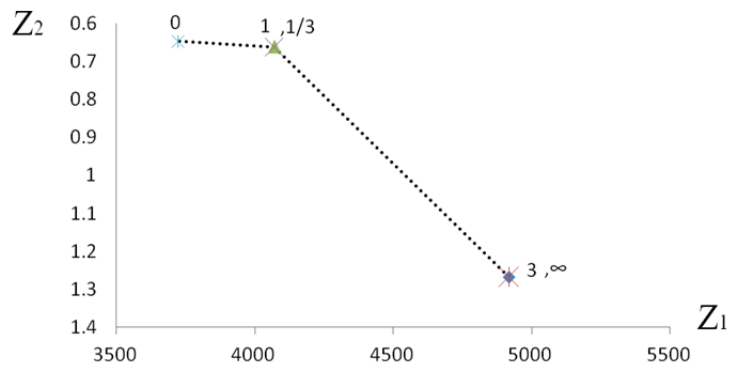
進一步，本研究進行參數灰色程度之敏感度分析，以探討當規劃條件之明確程度發生改變時，對規劃結果會有什麼影響。本研究將參數之灰色程度以 10% 為基準，分別降低至

表 4 不同目標式權重之計畫組合規劃最適妥協解結果

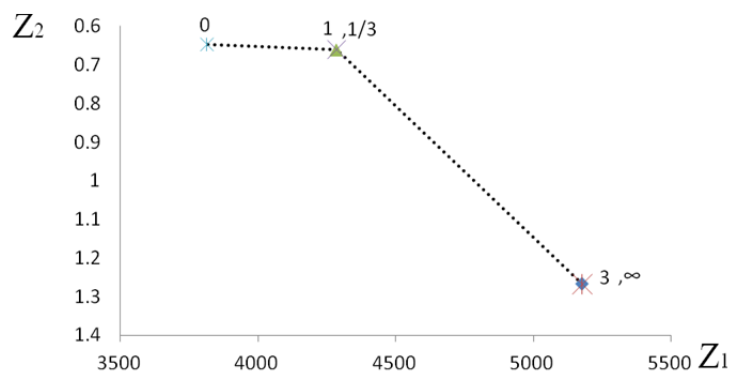
目標權重	$\{w_1 = 1, w_2 = 0\}$			$\{w_1 = 0.75, w_2 = 0.25\}$			$\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$			$\{w_1 = 0.25, w_2 = 0.75\}$			$\{w_1 = 0, w_2 = 1\}$		
灰色參數	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界
規劃解之 最適計畫組合	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_{2-2}	P_{2-2}	P_{2-2}
	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3
	P_5	P_5	P_5	P_5	P_5	P_5	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}
	P_6	P_6	P_6	P_6	P_6	P_6	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}
	P_7	P_7	P_7	P_7	P_7	P_7	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{10}	P_{10}	P_{10}
	P_9	P_9	P_9	P_9	P_9	P_9									
	10595.26	11183.89	11772.52	10595.26	11183.89	11772.52	9399.883	9922.099	10444.31	9399.883	9922.099	10444.31	8976.632	9475.334	9869.278
	5936.742	6266.561	6596.379	5936.742	6266.561	6596.379	5543.516	5851.49	6159.463	5543.516	5851.49	6159.463	5450.178	5752.966	6055.753
Z_1 : 計畫組合 總淨現值(億元)	4658.523	4917.329	5176.136	4658.523	4917.329	5176.136	3856.367	4070.61	4284.852	3856.367	4070.61	4284.852	3526.454	3722.368	3813.525
Z_2 : 計畫組合 總風險值	1.26802	1.26802	1.26802	1.26802	1.26802	1.26802	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.646992	0.646992	0.646992



(a) 灰下限之目標式決策空間



(b) 預估值之目標式決策空間



(c) 灰上限之目標式決策空間

圖 1 對應不同灰參數下與不同權重之目標式值決策空間

表 5 預算額度敏感度分析之計畫組合規劃最適妥協解結果

預算額度改變	預算額度減少 10%			原始預算額度			預算額度增加 10%		
灰參數	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界	下界	原始數值	上界
規劃解之 最適計畫組合	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2
	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3
	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}
	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}
				P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_5	P_5	P_5
							P_7	P_7	P_7
							P_9	P_9	P_9
總利益值 (億元)	8855.421	9347.389	9839.357	9399.883	9922.099	10444.31	11056.37	11670.62	12284.86
總成本值 (億元)	5126.03	5410.81	5695.589	5543.516	5851.49	6159.463	6446.394	6804.52	7162.66
Z_1 : 計畫組合 總淨現值 (億元)	3729.391	3936.579	4143.768	3856.367	4070.61	4284.852	4609.98	4866.097	5122.2
Z_2 : 計畫組合 總風險	0.61458	0.61458	0.61458	0.661275	0.661275	0.661275	1.111306	1.111306	1.111306

5% (規劃範圍更明確) 以及升高至 20%、30% (規劃範圍更不明確)，而假設兩目標式之權重相等 ($\{w_1 = 0.5, w_2 = 0.5\}$)，以觀察規劃模式對目標式值結果之變化，灰色程度之敏感度分析結果如表 6。

由表 6 可發現，參數之灰色程度改變對計畫組合決策變數之規劃結果並無影響，即計畫組合選擇結果不變，隱含本研究規劃結果堪稱強固。而計畫組合執行年期變異之風險值亦不變，僅總成本與總利益值隨灰色程度不同而改變。並發現當參數灰色程度升高時，妥協解之灰數範圍隨著參數之灰色程度增加而擴大，且目標值之灰數範圍變化幅度與參數灰度變化幅度相近。故可判定灰參數之灰色程度會影響目標值之灰區間變化，若規劃條件越明確時，則可降低參數之灰色程度，相反地，若規劃條件越不明確時，則可提高參數之灰色程度，如此可維持規劃之彈性，以因應計畫組合方案規劃之不確定性。

五、結論與建議

本研究建構一灰色多目標規劃為基礎之計畫組合選擇模式，應用於運輸計畫規劃問題。本研究以計畫組合管理理論為模式之框架，再針對運輸計畫在成本、利益與預算估計

表 6 灰色程度敏感度分析之計畫組合規劃最適妥協解結果

灰色上下界	下界				原始 預估值	上界			
	30% 灰色程度	20% 灰色程度	10% 灰色程度	5% 灰色程度		5% 灰色程度	10% 灰色程度	20% 灰色程度	30% 灰色程度
灰色程度 改變	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2
	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3	P_3
	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}	P_{4-7}
	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}	P_{4-8}
	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}	P_{5-2}
總利益值 (億元)	4818.871	5201.325	9399.883	9667.687	9922.099	10176.51	10444.31	6501.654	6884.108
總成本值 (億元)	8171.14	8819.64	5543.516	5701.452	5851.49	6001.528	6159.463	11024.55	11673.06
Z_1 ：計畫組合 總淨現值 (億元)	3352.265	3618.320	4184.573	4303.792	4417.049	4530.307	4649.526	4522.899	4788.954
Z_2 ：計畫組合 總風險	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275	0.661275

上之不確定性，運用灰數及多目標 0-1 整數規劃模式，進行運輸計畫最適組合之最佳化決策規劃，期給予決策者具有彈性的計畫組合決策參考。本研究所建構之灰色多目標計畫組合規劃模式，係以計畫組合方案為規劃決策對象，有別於過去計畫規劃問題以個別計畫為規劃對象，並考慮成本、利益、執行年期變異風險及預算之不確定性，建構灰色多目標 0-1 整數規劃問題，並應用灰色 TOPSIS 法求解灰色多目標計畫組合規劃模式之妥協解。

本研究以公共工程委員會之大型運輸建設計畫，作為實務數值範例假設之基礎，透過數值範例分析檢驗本研究模式之可行性。由範例分析結果可知，不同目標式權重組合之計畫組合規劃妥協解決策空間，可顯示不同權重組合所代表之兩目標之間的權衡取捨率，即可提供較大之決策彈性。規劃結果顯示，以偏向考慮利益、成本之淨現值最大化為決策導向下，規劃解較傾向選擇組合計畫較大之計畫組合，總淨現值較大，但執行年期變異風險值相對較高。而偏向以風險趨避為決策導向下，所規劃選得之計畫組合數較少，執行年期變異之總風險值較小，惟總淨現值亦較小。

透過預算額度與灰色程度之敏感度分析，發現總預算改變對計畫組合規劃結果影響較為明顯，而灰色程度改變之規劃結果則堪稱強固。預算改變即會改變計畫組合結果，隨預算提高，較傾向組合計畫之規劃解。本研究計畫組合規劃模式，可作為以計畫組合管理進行運輸計畫規劃之規劃模式基礎；整合灰數於規劃模式中，即允許成本、利益、執行年期變異風險及預算輸入值為大概幅值範圍之區間值，有助於規劃者面對並處理不明確規劃條件下，維持規劃結果之決策彈性。

囿於資料取得之困難，因此本研究僅藉由數值應用範例分析驗證本研究之可行性。未來後續研究可針對更詳細之計畫成本與利益資料，應用運輸計畫經濟利益評估模式進行深入分析，並導入計畫組合管理概念，對組合計畫進行全面整體性之利益與成本分析，再以本研究所建構之規劃模式為基礎，進行運輸計畫組合選擇規劃。惟問題規模增加、計畫方案數量增加時，其組合將更複雜，亦會使得計算困難度與運算時間複雜度大幅增加，後續研究可考慮應用啟發式演算法，以提升運算效率與應付問題複雜度。本研究模式未考慮計畫排程問題，後續研究可考慮將工程年期及計畫執行狀態納入規劃模式中，以增加模式之決策應用性。

參考文獻

1. Niemeier, D. A., Zabinsky, Z. B., Zeng, Z., and Rutherford, G. S., "Optimization Models for Transportation Project Programming Process", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 121, No.1, 1995, pp.14-26.
2. Humphrey, T., *Summary of Findings, Issues in Statewide Transportation Planning*, Transportation Research Board, Washington DC, 1974.
3. Teng, J. Y. and Tzeng, G. H., "A Multiobjective Programming Approach for Selecting Non-independent Transportation Investment Alternatives", *Transportation Research -Part B*,

- Vol. 30, No. 4, 1996, pp. 291-307.
4. Teng, J. Y. and Tzeng, G. H., "Transportation Investment Project Selection Using Fuzzy Multiobjective Programming", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 96, 1998, pp. 259-280.
 5. Young, R., "Multimodal Investment Choice Analysis: Application of Goal Programming for Selection of Transportation Projects", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, USA, 2002.
 6. Markowitz, H., "Portfolio Selection", *Journal of Finance*, Vol. 7, 1952, pp. 77-91.
 7. Markowitz, H., *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investment*, Wiley, New York, 1959.
 8. Markowitz, H., *Analysis in Portfolio Choice and Capital Market*, Basil Blackwell, Oxford, 1987.
 9. Voros, J., "Portfolio Analysis—An Analytical Derivation of the Efficient Portfolio Frontier", *European Journal of Operational Research*, Vol. 23, No. 3, 1986, pp. 294-300.
 10. Young, M. R., "A Minimax Portfolio Selection Rule with Linear Programming Solution", *Management Science*, Vol. 44, No. 5, 1998, pp. 673-683.
 11. Best, M. J. and Hlouskova, J., "The Efficient Frontier for Bounded Assets", *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 52, 2000, pp. 195-212.
 12. Stein, M., Branke, J., and Schmeck, H., "Efficient Implementation of an Active Set Algorithm for Large-scale Portfolio Selection", *Computers & Operations Research*, Vol. 35, 2008, pp. 3945-3961.
 13. Yan, W., Miao, R., and Li, S. R., "Multi-period Semi-variance Portfolio Selection: Model and Numerical Solution", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 194, 2007, pp. 128-134.
 14. Arenas, M., Bilbao, A., and Rodriguez, M. V., "A Fuzzy Goal Programming Approach to Portfolio Selection", *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, No. 2, 2001, pp. 287-297.
 15. Ida, M., "Solutions for the Portfolio Selection Problem with Interval and Fuzzy Coefficients", *Reliable Computing*, Vol. 10, No. 5, 2004, pp. 389-400.
 16. Abiyev, R. H. and Menekay, M., "Fuzzy Portfolio Selection Using Genetic Algorithm", *Soft Computing*, Vol. 11, No.12, 2007, pp. 1157-1163.
 17. Bilbao, A., Perez, B., Arenas, M., and Rodriguez, M. V., "Fuzzy Compromise Programming for Portfolio Selection", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 173, 2006, pp. 251-264.
 18. Ong, C. S., Huang, J. J., and Tzeng, G. H., "A Novel Hybrid Model for Portfolio Selection", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 69, No. 2, 2005, pp. 1195-1210.
 19. Cooper, R. G., Edgett, S. J., and Kleinschmidt, E. J., *Portfolio Management for New Products*, Perseus Books, Berkeley, 1998.
 20. Beaujon, G. J., Marin, S. P., and McDonald, G. C., "Balancing and Optimizing a Portfolio of R&D Projects", *Naval Research Logistics*, Vol. 48, No. 1, 2001, pp. 18-40.
 21. Carlsson, C., Fuller, R., Hekkila, M., and Majlender, P., "A Fuzzy Approach to R&D Project Portfolio Selection", *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 44, 2007, pp. 93-105.

22. Wang, J. and Hwang, W. L., "A Fuzzy Set Approach for R&D Portfolio Selection Using a Real Options Valuation Model", *Omega—The International Journal of Management Science*, Vol. 35, 2007, pp. 247-257.
23. Stankeviciene, J. and Jachimaviciene, I., "A Multi-Objective Project Portfolio Formation Model: Case Study of Lithuanian Transport Sector", The 6th International Scientific Conference, Business and Management, 2010, pp. 230-238.
24. Sadi-Nezhad, S., Khalili Damghani, K., and Pilevari, N., "Application of 0-1 Fuzzy Programming in Optimum Project Selection", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 64, 2010, pp. 335-339.
25. Inuiguchi, M. and Ramik, J., "Possibilistic Linear Programming: A Brief Review of Fuzzy Mathematical Programming and a Comparison with Stochastic Programming in Portfolio Selection Problem", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 111, 2000, pp. 3-28.
26. Sinha, K. C. and Labi, S., *Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
27. Zhong, T. and Young, R., "Multiple Choice Knapsack Problem: Example of Planning Choice in Transportation", *Evaluation and Program Planning*, Vol. 33, 2010, pp. 128-137.
28. Sinha, K. C. and Jukins, D. P., *Transportation Project Evaluation and Priority Programming: Techniques and Criteria*, Transportation Research Board, Washington DC, 1980.
29. Sinha, K. C. and Muthusubramanyam, M., "Optimization Approach in Highway Programming and System Analysis", *Transportation Research Record*, No. 867, 1982, pp.12-19.
30. 林楨家、李家儂，「用於都市地區活動分布之灰色 TOD 規劃模式」，*運輸計劃季刊*，第 34 卷，第 1 期，民國 94 年，頁 63 - 92。
31. 林楨家、沈育生，「地區性道路間距設計之灰色規劃模式」，*運輸計劃季刊*，第 34 卷，第 2 期，民國 94 年，頁 293 - 324。
32. Lin, J. J. and Li, C. N., "A Grey Programming Model for Regional Transit-oriented Development Planning", *Papers in Regional Science*, Vol. 87, No. 1, 2008, pp. 119-139.
33. Deng, J. L., "The Control Problems of Grey System", *System and Control Letters*, No. 5, 1982, pp. 288-294.
34. Deng, J. L., et al., *Essential Topics on Grey System: Theory and Application*, China Ocean Press, Beijing, 1988.
35. Deng, J. L., "Introduction to Grey System Theory", *Journal of Grey System*, Vol. 1, 1989, pp. 1-24.
36. Sharpe, P. and Keelin, T., "How SmithKline Beecham Makes Better Resource-Allocation Decisions", *Harvard Business Review*, March–April, 1998, pp. 45–57.
37. Huang, G. H. and Moore, R. D., "Grey Linear Programming, Its Solving Approach and Its Application", *International Journal of Systems Science*, Vol. 24, No. 1, 1993, pp. 159-172.
38. Huang, G. H., Baetz, B.W., and Patry, G. G., "Grey Integer Programming: An Application to Waste Management Planning under Uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 83, No. 3, 1995, pp. 594-620.

39. 行政院公共工程委員會，「公共工程委員會列管計畫查詢」，<http://cmdweb.pcc.gov.tw/pccms/owa/pln90.bro1>，民國 101 年。
40. Hwang, C. L. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making: Method and Application*, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
41. Lai, Y. L., Liu, T. Y., and Hwang, C. L., "TOPSIS for MACM", *European Journal of Operational Research*, Vol. 76, No. 3, 1994, pp. 486-500.

