

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

融合主客觀之工程評估法在汽車轉向系統評估之應用

The Technical Evaluation of Automotive Steering Systems by a Multi-attribute Evaluation Method

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-120

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：傅增棟 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：葉晁璋、李炯毅、李仁傑 國立台灣大學機械工程學系

中文摘要

機械系統之評估通常包含不同的考量，其可能為不同單位的物理參數，或是質性的評估條件。因而導致設計工程師在作全面性評估時的困難，尤其是在系統中含有與人之間的直接互動時，更為明顯。

本研究係以轎車四種不同類型的轉向系統為案例，嘗試建立一個運用分析層級程序法（analytical hierarchy process, AHP）來融合主、客觀條件之評估架構。其結果顯示這個方法可以將所有型態的評估條件轉換成共同的量化指標，而其評估的品質可用一致性檢驗來加以確認。從對評估結果之敏感度分析當中，也可以對評估系統有更進一步深入了解，並且顯示出操舵力為最主要的轉向評估性能。

關鍵詞：工程評估、轉向系統、分析層級程序法

Abstract

Evaluation of mechanical systems normally involves various criteria with different issues of concern. They may include physical parameters of different units and issues of qualitative nature. This has caused problems for design engineers in performing full evaluation for a system, especially for the system which has direct interactions with human beings.

Using four types of automotive steering system as the case study, it is allowed to establish a framework for the integration of subjective and objective evaluation criteria by the analytical hierarchy process. The results indicate that this

method is able to convert all types of criteria into a common quantitative index. The quality of evaluation is assured by the consistency check. Sensitivity analyses provide further insights and show that steering effort is the most important criteria among all that studied.

Keywords: Engineering evaluation, steering systems, analytical hierarchy process (AHP).

1. 計畫緣由與目的

轉向系統在底盤四大單元當中與駕駛者有最直接的接觸，在行駛期間，駕駛者的轉向行為，不屬於將方向盤轉角固定在某一角度的固定式控制，亦非完全處於自由狀態的自由式控制。因此，轉向系統反應了駕駛者對於行駛路面的感覺。

轉向系統之整體評估方式受實際車輛之限制，現有之研究均著重在全車系方面的綜合評估，以封閉迴路系統（closed-loop system）的型式，亦即車輛-駕駛者兩者之組合來進行測試與評價，一般可分為成二種型式：

- (1) 主觀偏好 (subjective rating)：由駕駛者之偏好來進行主觀評價。
- (2) 客觀量測 (objective metrics)：實際量測車輛各方面之性能數值。

在轉向系統的性能表現中，同時包含了主觀與客觀的因素；因此，如何從實用的觀點，結合不同性質的評估條件，以尋求一個有系統全面性的評估方式，一直是在評估領域中長期追求之目標。

分析層級程序法具有整合主、客觀條件與一致性檢驗的優點，在社會科學領域的應用已

有多年的歷史。本文嘗試將此方法應用在工程領域上，從消費者的觀點，依據不同的評估條件，由專家的經驗與既有的實測數據，尋求一個有系統的評估方式，來評價四種不同的轎車轉向系統，以提供轉向系統設計者之參考。其進行的方式主要是根據國、內外相關文獻的研究，檢討 AHP 方法的適用性，再與專家研討並蒐集相關的訊息，以建立轉向系統之評估要素及量化所需的資料，再由專家以填寫問卷方式來作群體決策。最後透過 AHP 方法整合客觀性能與主觀感受的不同本質之評價，將評估結果整理後，以研擬出轉向系統最終採用方案之決策。

2. 評估理論簡介

Pahl & Beitz [1]認為評估在設計程序中的特性，為前向規劃與反向修正交互的過程，前向規劃為沿著許多可能的路徑進一步求得問題的解，屬於發散性的思考，反向修正為對於每一個路徑探討其可行性，屬於收斂性思考。

根據 Fu [2]在設計方法上的研究，總結出評估過程主要包含三種元素：

(1) 候選方案 (alternative)：

評估表中的候選方案必需滿足基本需求，即滿足設計規格表 (specification) 中的規定。

(2) 評估要素 (criteria)：

評估要素為影響評估結果的關鍵因素，不同的觀點使評估條件產生權數 (weighting value) 上的差異，而導致不同的結論。評估要素在本質上反應了評估者的偏好，且無可避免個人的主觀；所以，評估要素之選取一般不具有普遍性，最佳的解決方式為儘可能包含所有的因素。基於此觀點，依據專家與工程師的經驗或系統分析來篩選評估要素的內容與數量，最能符合評估之要求。

(3) 評分 (scoring) 程序：

評分程序之目的在於求取每一候選方案評比之後的總分表現，並提供決策者作為評估時的依據，典型的評分內容依其意義可分成二種：

1. 權數值：評估者對每一評估要素加以評分，以反應評估要素彼此間相對的重要性。
2. 偏好值 (rating)：用來代表各個候選方案針對每一評估要素之性能表現的好壞或高低。

3. AHP 方法之介紹

AHP 方法為 1971 年 T.L. Saaty [3]為美國國防部進行規劃問題時所創立，現為美國匹茲堡大學教授。此法的程序是在給定的評估要素下，計算出一組可行方案的權數以供決策者參考，權數的大小即是方案的重要程度。其作法是先將欲研究或決策的複雜問題加以層級結構化，由不同的層面來作分解使之成為簡明的層級系統，透過量化的判斷與最終的整合，有系統地朝向簡化評比過程與提高評比品質之目標，以提供決策者選擇最佳方案時所需的資訊。

3.1 理論架構

任何複雜的系統均可透過分解其組成的元素而使問題簡化，藉由層級結構的方式，如圖 1 所示，將性質相近的元素置於同一群組之內，並歸類在不同的層級之下，由最高層級來觀察各個層級之間的相互影響，而非從每一層級中之要素來分析，同時每一層級僅影響相鄰的下一層級。

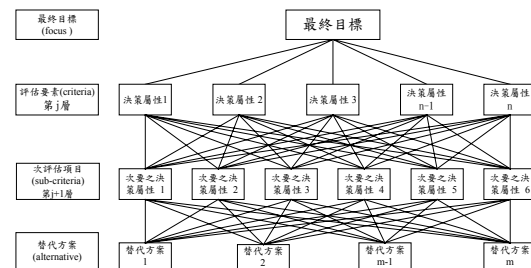


圖 1 AHP 層級結構圖

以某一層級中的任一要素為依據，進行要素間相互的成偶比對 (pairwise comparison)。成偶比對所用之數值為 1-9 的名目尺度 (nominal scale)，其中，以 1, 3, 5, 7, 9 分別表示同等重要、稍微重要、明顯重要、強烈重要與極重要，而以 2, 4, 6, 8 表示其相鄰尺度之中間值。若層級中具有 n 個要素，則會有 $n(n-1)/2$ 個比對結果，將此結果置於成偶比對矩陣 A 的上三角矩陣中，而下三角矩陣則為上三角矩陣相對元素的倒數，如圖 2 所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

圖 2 成偶比對矩陣

假設第一層級的要素為 C_1, C_2, \dots, C_n ，由上一層級的要素作為評估的依據下，以 a_{ij} 表示 C_i 與 C_j 之間相對的重要程度。若 A 為由 a_{ij} 組成之正倒數矩陣，則滿足 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ，而如果對成偶比對矩陣的所有元素 i, j, k 均滿足 $a_{ik} =$

$a_{ij} \times a_{jk}$ 之條件，則 A 即為一致矩陣。因此，

$$a_{ij} a_{jk} = \frac{w_i}{w_j} \cdot \frac{w_j}{w_k} = \frac{w_i}{w_k} = a_{ik} \quad (1)$$

若由成偶比對所得的權數為 w_1, w_2, \dots, w_n ，則因

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

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

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = n w_i \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$A w = n w \quad (4)$$

式中 w 即為 A 矩陣之特徵向量。若 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 為滿足 $Ax = \lambda x$ 的數列， λ_i 即稱為矩陣 A 的特徵值 (eigenvalue)，(4) 式則構成特徵向量問題，根據 [3] 之推導，取其最大特徵值 λ_{max} 所對應之特徵向量，即為最終重要性或好壞之排序，故又稱為優先向量 (priority vector)。

3.2 應用步驟

(1) 建立層級結構：

針對所欲評比之問題，經由資料蒐集、腦力激盪、德爾菲 (Delphi) [4] 與專家訪談等方法，將問題之評估要素整理列出。

(2) 各層級要素間權數的計算程序：

1. 建立成偶比對矩陣：

依據步驟 (1) 所列出的評估要素，以兩兩比較的方式建立成偶比對矩陣。

2. 計算特徵值與特徵向量：

在實際應用上，Saaty [5] 提出了三種近似的方法來求特徵向量，但是隨著電腦軟體科技之發展，成偶比對矩陣之特徵值問題，可用電腦軟體如 MATLAB 來解決，其結果既精確且節省時間。此外，亦有 Forman 與 Saaty 所研發之軟體 Expert Choice [6]，包含一致性分析及敏感度分析等完整功能。

3. 一致性指標與比率的檢定：

成偶比對之偏好關係若滿足數學的遞移性 (transitivity)，即若 $a_i > a_j, a_j > a_k$ ，則 $a_i > a_k$ ，則判斷的結果為具一致性。由於在決策者的主觀判斷下，成偶比對矩陣不一定能滿足一致性之要求，因此可將 λ_{max} 與 n 的差異值轉化為一致性指標 (consistency index, C.I.)，而作為一個評量標準，亦即

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

從名目尺度 1-9 隨機產生的正倒數矩陣中，在不同的矩陣大小 n 下所產生的 C.I. 值，稱為隨機指標 (random index, R.I.)，如表 1 所示。在相同階數的矩陣下，C.I. 值對 R.I. 值的比率稱為一致性比率 (consistency ratio, C.R.)，即

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (6)$$

若 $C.R. \leq 0.1$ 時，則認為矩陣的一致性程度可以接受 [3]。

表 1 n 階正倒數矩陣所對應之 R.I. 值 [3]

n	1	2	3	4	5	6	7	8
R.I.	0.0	0.0	0.90	0.58	1.12	1.24	1.32	1.41

(3) 整體層級權重的計算：

層級間的重要性往往並不一樣，因此需檢定整體層級的結構是否也具有一致性。整體層級之一致性比率 (consistency ratio of the hierarchy, C.R.H.) 的定義如下 [5]。

$$C.R.H. = \frac{C_H}{\bar{C}_H} \quad (7)$$

式中 C_H 為整體層級之一致性指標，其定義如下

$$C_H = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^{n_{j+1}} w_{ij} \mu_{i,j+1} \quad (8)$$

其中， n_j ($j=1, 2, \dots, h$) 為第 j 層級中所含評估要素的數目； w_{ij} 則為第 j 層級中第 i 個要素之權數， $\mu_{i,j+1}$ 為第 ($j+1$) 層級之所有元素對於第 j 層級中第 i 個要素之一致性指標；而 n_{j+1} 為第 j 層級之第 i 個評估要素對其下第 ($j+1$) 層級元素的數目。

\bar{C}_H 為相對於 C_H 的整體層級之隨機指標，若 $C.R.H. \leq 0.1$ 則矩陣在合乎一致性的要求範圍內。

在群體決策中需將成員的偏好與經驗之差異加以整合，這個群體在某些主題上才能達到一定的共識。Saaty [5] 認為共識意謂著群體決策判斷優先值 (priority values) 的信心，當對於判斷結果的信心不高或有異議時，可對每一成員的成偶比對矩陣結果取幾何平均。

4 轉向系統概述

轉向系統的目的，即是將方向盤的轉動角度轉換成適當的輪胎轉角，以符合轉向原理之要求，並將此時車輛的受力狀態回授到方向盤

上。本文中所定義之轉向系統主要包含：轉向機柱 (steering column)、方向機 (steering gear) 與橫拉桿 (tie rod)。其他元件則視系統的不同另外包括泵浦、馬達、油管、感測器或控制單元等。本文中之轉向系統均以齒條與小齒輪 (rack and pinion) 式的方向機為例，所評估的轉向系統有如下四種：

(1) 手動式 (MS)

MS (manual steering) 系統，如圖 3 所示，只有轉向機柱與方向機總成。在無動力輔助下，若要省力則需增加轉向齒輪比，但轉向齒輪比增大，則方向盤的轉角亦需增大，因而會降低轉向時的靈敏性，影響行車安全。

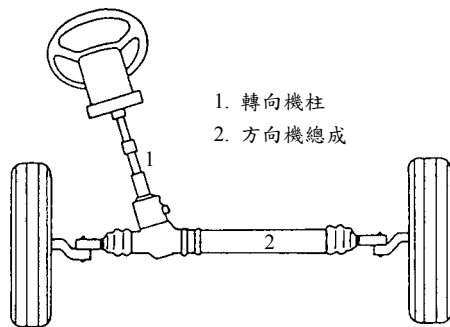


圖 3 手動式轉向系統示意圖

(2) 液壓式動力轉向系統 (HPS)

HPS (hydraulic power steering)，如圖 4 [7] 所示，為目前市面上最常使用的類型，除了基本的轉向元件外，特有的元件包括泵浦、高壓油管、油壺、回流油管與低壓油管等。HPS 的方向機是在齒條的套管內裝置液壓缸，以推動轉向齒條移動而提供轉向時所需之輔助力，此輔助力則由泵浦的壓力來提供。因為泵浦直接由引擎驅動，所以車輛在整個行駛過程中，無論有無轉向作用，泵浦均會消耗引擎一部分的能量。

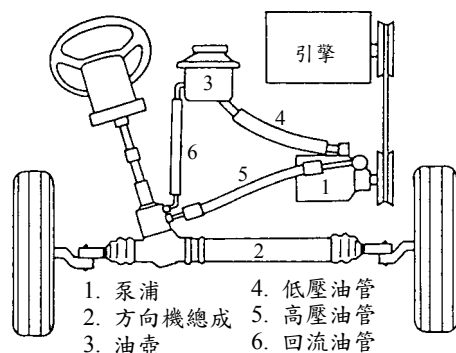


圖 4 HPS 系統示意圖[7]

(3) 電子-液壓式動力轉向系統 (EHPS)

EHPS (electro-hydraulic power steering) 為結合馬達與液壓泵浦，以馬達直接驅動泵浦

的方式提供輔助力。其特殊組件主要包含馬達、電子控制器、泵浦、壓力偵測元件、伺服閥、油壺與蓄壓器等，如圖 5 [8] 所示。伺服閥固定在小齒輪軸的周圍，馬達只有在方向盤轉向操作時才作動；無轉向作用時，馬達停止泵浦亦停止，因此可以降低能量消耗，在節省能源方面有很大的改善。EHPS 發展的目的主要有以下三點[9]：

1. 具備電子式控制，於不同的操作狀態下，確保最佳的轉向感覺。
2. 運用馬達，以減少引擎能量損失。
3. 獲得油壓系統在設計上最大自由度 (如管路配置等)，可以減少能量損失。

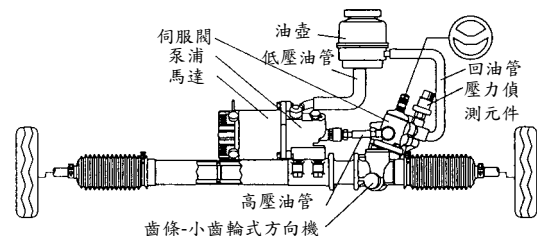


圖 5 EHPS 系統元件[8]

(4) 電子式動力轉向系統 (EPS)

EPS (electric power steering) 系統是直接以馬達來提供輔助力，其發展之目的是為了改善 HPS 在能源效率、駕駛舒適性與安全性方面的缺點，主要特殊元件包括馬達、電子控制單元 (electric control unit, ECU) 與扭力感測器，其他額外的元件則包括車速感測器、繼電器、指示燈、動力單元與電磁離合器等，如圖 6 [10] 所示。

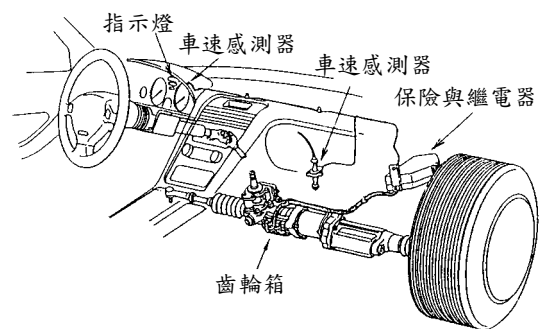


圖 6 EPS 系統元件圖[10]

5. 評估要素的定義與評估過程

本節係針對轎車四種不同的轉向系統，運用 AHP 之評估方法，進行主、客觀之綜合評估。

5.1 評估要素之物理意義與物理量

經由與車廠底盤設計工程師的經驗訪談及文獻中的資料，以消費者的觀點來進行討論，而獲得四個基本評估層面為：駕駛者舒適

性、操控性能、安全性與經濟性，再依據這四個層面推演出七個評估要素，據此，可以建構出 AHP 層級結構如圖 7 所示。

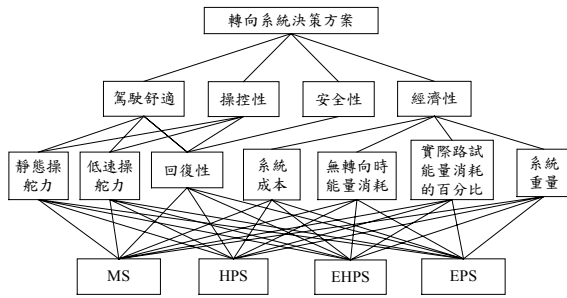


圖 7 轉向系統層級結構

其中的評估要素可分別定義如下：

- (1) 靜態操舵力：靜態操舵力為車輛靜止或停車時，駕駛者所需施予方向盤的力量；評比條件是定在操舵速度為每秒 1 轉的狀態下來作比較。
- (2) 低速操舵力：低速操舵力則是以車速在 20-50 km/hr 與操舵速度在 360-800 deg/sec 的範圍下所做的測試。
- (3) 回復性：回復性屬於駕駛舒適與安全性方面的問題，其定義是將方向盤轉動至某一特定的角度，再將方向盤鬆開後，回復原狀所需的時間。
- (4) 系統成本：系統成本主要是指從轉向機柱至橫拉桿之間的元件成本，其他方面則依系統之不同再加上如泵浦、馬達、油壺與油管等元件而有所差異。
- (5) 無轉向作用時能量消耗：為引擎在快速且方向盤無轉向作用時，轉向系統所消耗的能量。
- (6) 實際路試的能量消耗：實際路試的能量消耗是指根據實際路試所得的平均能量消耗比率，以傳統 HPS 系統所消耗的能量

為基準下所做的比較[11]，主要是針對三種不同類型的動力轉向系統，在混合的區域包括市區、郊區、高速公路、市區尖峰時間與靜態轉向等狀況下實測所得。MS 系統因為無額外之動力輔助，故其能量消耗為零。

- (7) 系統重量：如第 (4) 項所定義之轉向系統元件的總重量。

其相關之物理量依據各個文獻，可以整理成如表 2 所示，其詳細過程參見[12]。

表 2 評估要素之物理量[12]

評估要素	物理量	評估系統			
		MS	HPS	EHPS	EPS
靜態操舵力 ¹	kgf	14.74 [13]	2.8 [9] 3.5 [10]	2.5 [9]	3.2 [10] 2.09 [14]
低速操舵力	kgf	6.41	2.8	3.7	3.14
回復性	sec	0.4 [16]	2.5 [15]	近似HPS ²	5.5 [15] 0.6 [16]
系統成本	NT\$	32,928	41,800	43,650	41,750
無轉向時能量消耗	Watt	0	147.66	17	6
實際路試能量消耗的百分比	Watt	0	100 %	10-50 %	< 20 %
系統重量	kgw	8.59	15.2	16.93	14.5

5.2 AHP 評估問卷調查

問卷的填寫方式，分為量化前與量化後的問卷填寫；所謂量化前問卷即是不提供評估者每一評估要素的相關物理量，此問卷之填寫，主要是觀察評估者對於轉向系統的既有印象，屬於定性本質的評比方式；量化後問卷則提供每一系統在對應的評估要素下之性能表現，屬於定量的評比方式，總共 15 位的參與人員依其背景可分成三組來作分析比較：亦即底盤設計組（負責轉向與懸吊系統之設計工程師）計 5 人、底盤相關組（負責煞車、輪胎及性能測試之工程師）計 5 人與代表消費者的學生組（均有駕照）5 人，最後再比較量化前與量化後的差異。

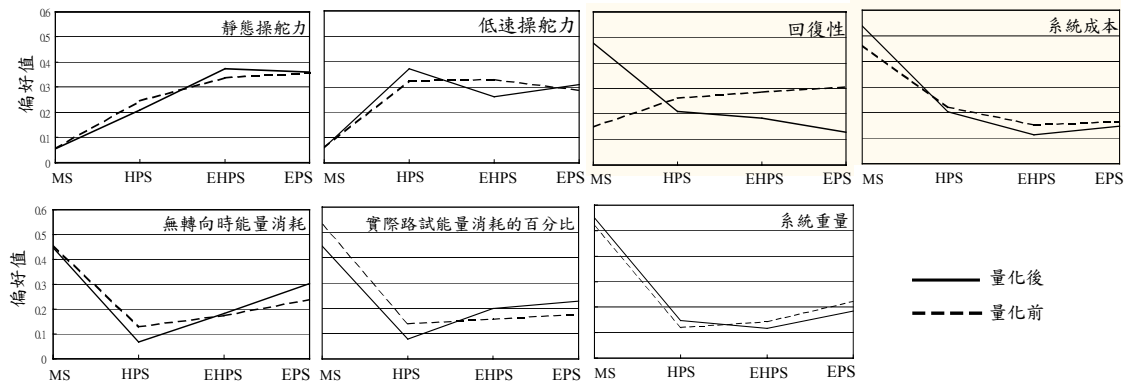


圖 8 底盤設計組量化前與量化後偏好值比較

¹ 依相同之文獻來源或前軸重資料，進行兩兩比較。在表中此項之數值雖未必在同一基準下，但仍可滿足 AHP 中成偶比對矩陣在建構時兩兩比較的需求，故仍可據此建立成偶比對矩陣。

² 文獻中無相關數據，由 HPS 的系統組成及其表現推測，EHPS 回復性應接近 HPS。

5.3 評估結果

將回收的 15 份問卷，先針對個人的評估結果檢驗是否具有的一致性，若不具一致性者則不予採用，將符合要求的參與成員採幾何平均以作整合；在本研究中個人的評估結果均符合一致性的要求。以底盤設計組為例，其成偶比對之權數矩陣如表 3 所示，而其各個條件對評估系統的偏好值所計算而得之特徵向量，依量化前與量化後之比較可得圖 8，綜合上述兩者，由偏好值與權數之乘積，可以計算得各個評估系統之加權總分及排序如表 4。

表 3 評估要素對總目標之成偶比對矩陣

	靜態操舵力	低速操舵力	回復性	系統成本	無轉向時能量消耗	實際路試能量消耗的百分比	系統重量	權數
靜態操舵力	1	1.838	1.933	1.409	2.322	3.063	1.718	0.241
低速操舵力	1/1.838	1	1.933	1.173	2.208	2.892	1.551	0.192
回復性	1/1.933	1/1.933	1	0.594	0.786	0.979	0.529	0.089
系統成本	1/1.409	1/1.173	1/0.594	1	1.037	0.969	0.698	0.127
無轉向時能量消耗	1/2.322	1/2.208	1/0.786	1/1.037	1	0.543	0.561	0.092
實際路試能量消耗的百分比	1/3.063	1/2.892	1/0.979	1/0.969	1/0.543	1	0.488	0.099
系統重量	1/1.718	1/1.551	1/0.529	1/0.698	1/0.561	1/0.488	1	0.158

表 4 底盤設計組評估結果

評估要素	權數	偏好值			
		MS	HPS	EHPS	EPS
靜態操舵力	0.241	0.056	0.209	0.374	0.359
低速操舵力	0.192	0.060	0.371	0.260	0.307
回復性	0.089	0.478	0.210	0.183	0.127
系統成本	0.127	0.538	0.203	0.112	0.145
無轉向時能量消耗	0.092	0.446	0.068	0.181	0.304
實際路試能量消耗的百分比	0.099	0.446	0.077	0.198	0.277
系統重量	0.158	0.550	0.148	0.117	0.184
加權總分		0.309	0.204	0.226	0.261
排序		1	4	3	2

6. 成果討論

以下則針對評結果進行檢核比較與敏感度分析。

(1) 一致性檢核：

各矩陣之一致性比率與整體層級之一致性比率計算後整理如表 5 所示，底盤設計組與底盤相關組之 C.R. 與 C.R.H. 值均小於 0.1，符合一致性的要求；而學生組之 C.R.H. 雖然滿足小於 0.1 的要求，但是在低速操舵力方面 C.R. 值大於 0.1，表示消費者在此要素下的評估結果並不符合一致性的要求。

(2) 權數比較：

從權數方面來觀察，如圖 9 所示，各組在權數上均是以靜態操舵力與低速操舵力為最高，顯示不論是系統設計者或是一般的消費者所側重的都是駕駛的舒適性。回復性在各組之

間的變化最大，依底盤設計工程師的觀點，認為此項要素對系統的影響不大，影響回復性的因素有車輛自重的重量回正、轉向軸在地面偏位量與後傾角，可由機構之設計來改變；在系統成本的差異方面，設計工程師認為系統成本是反應在全車的價格上，因此較學生組的評價高，但是以消費者而言，其所購買的是車輛本身而不是單一個轉向系統，因此比較不會在意其成本之多寡；在能量消耗方面，各組的表現大致相同；但在系統重量方面，設計工程師認為重量因素是影響燃料消耗方面的問題，而代表一般消費者的學生所關切的只是全車重量，因而出現不同的觀點。

表 5 評估結果之一致性比率

	底盤設計組	底盤相關組	學生組
評估要素權數之 C.R. 值	0.024	0.024	0.023
評估要素對評估系統偏好值之 C.R. 值			
靜態操舵力	0.024	0.002	0.003
低速操舵力	0.006	0.034	0.574
回復性	0.017	0.003	0.041
系統成本	0.012	0.007	0.001
無轉向時能量消耗	0.041	0.021	0.023
實際路試能量消耗的百分比	0.012	0.005	0.018
系統重量	0.006	0.001	0.006
整體層級之一致性比率 (C.R.H.)	0.021	0.018	0.061

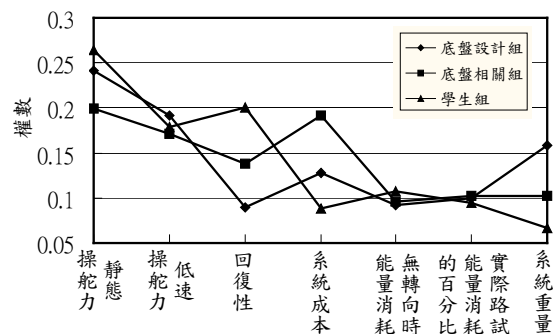


圖 9 各組權數比較

(3) 偏好值比較：

偏好值比較如圖 8 所示者為例，由評估結果的趨勢分析比較得知，三組之結果變動量最高的都是回復性，如圖 8 與圖 10 所示，而學生組與底盤設計組在未量化時均給予 EPS 很高的評價，因其認為新的技術主要是在改善現有設備的缺點，而對此系統有特殊的期望。底盤相關組的成員中有從事測試方面的工作者，因為熟悉系統的性能，所以，不論是在量化前或是量化後，對 MS 系統的評價均相同，且明白 MS 在回復性的表現上較其他幾種系統為佳。至於

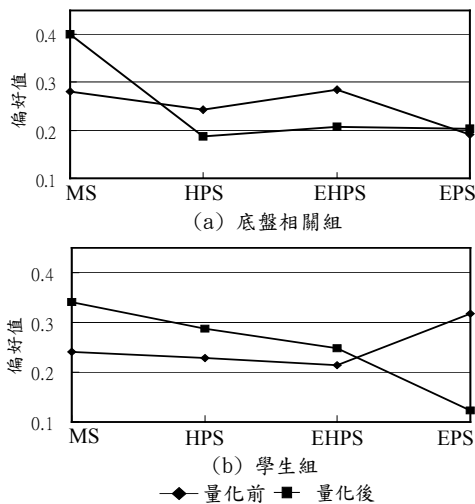


圖 10 量化前、後回復性偏好值比較
其他條件，則各組之結果均為大同小異。

由此結果觀察得知，評估者因工程背景的不同，若是不給予量化的物理量，則在評比的結果上容易出現歧見。

(4) 排序比較：

由之前偏好值的比較得知，若不給予相關的物理量(量化前問卷)則會出現不同的觀點，而在給予相關物理量後(量化後問卷)，三組的評估結果之排序則趨向一致，如圖 11 所示。

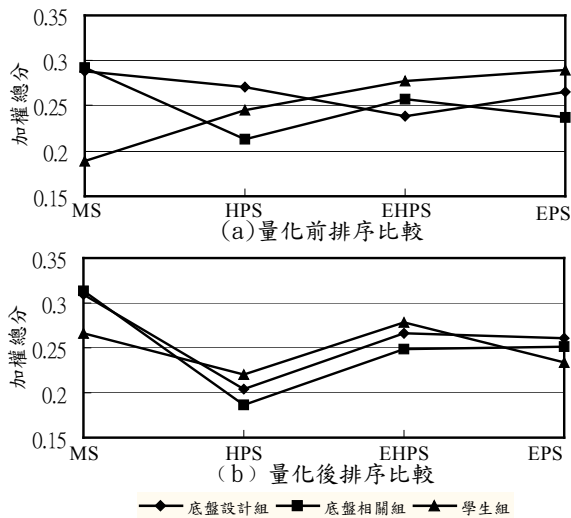


圖 11 量化前、後排序比較

因為消費者本身不是從事底盤方面的工作，量化前的評估要素對消費者而言，存在相當程度的模糊與不確定，例如在回復性的評分上，消費者對 EPS 的評價最高，使得 EPS 在整體性能表現最佳，而量化的結果顯示 EPS 的回復性較差，使得 EPS 的排序因而降低。所以透過量化的物理量為媒介，可以使得各組的評估結果達成共識。

(5) 權數之敏感度分析

敏感度分析主要是藉由改變權數值的方式來進行，觀察其在所有的評估要素中，對於評估排序影響的大小。以底盤設計組的評估結果為依據，由表 6 得知，在所有的評估要素中，以靜態操舵力對排序的變化最為敏感，若將權數增加 50%，會使排序產生變化，其原因是靜態操舵力的權數最高；最不敏感的則為無轉向作用時能量消耗與實際路試的能量消耗百分比，因此由敏感度分析的結果可知，靜態操舵力為影響系統排序的主因。

表 6 敏感度分析結果

評估要素	發生排序變化時的百分比
靜態操舵力	+50 % or -60 %
低速操舵力	+80 %
回復性	+600 %
系統成本	+350 %
無轉向作用時能量消耗	整體排序無影響
實際路試的能量消耗百分比	整體排序無影響
系統重量	+250 %

7. 計畫成果自評

AHP之評估法可以將轉向系統各種主、客觀的評估要素表現，以同一尺度之方法加以表示並量化之。由其評估結果的分析可以發現，不論是設計工程師或是消費者，靜態操舵力是為最重要與最敏感的因素，最不敏感的則為能量消耗。因此，消費者在選購車輛時的優先考量是駕駛時的舒適性。雖然手動式轉向系統較液壓動力輔助式轉向系統有許多的優勢，但顧客的滿意度才是造成最終液壓動力輔助式的市場佔有率較手動式為高的主因。

工程系統之性能問題，若無法量化，則評估之結果不易取得一致共識。在本研究中可見，量化前的評估方式主要是表現對系統性能的主觀印象，專家與消費者因為各有不同的觀點，決策的結果不易達成共識；但是在量化後各組的評估結果則趨向一致，決策品質的信度較高，再加以AHP的一致性檢核的篩選，其結果將可以更具有代表性。車廠工程師在參與評估的過程中，對此方法之簡便及容易使用，亦表示具有實際工業應用之潛力，此亦為本計劃設計的主要目的之一。

參考文獻

- [1] Pahl, G. and Beitz, W, *Engineering Design*, Springer - Verlag Publication 2nd edition, London, 1996.
- [2] Fu, T. -T., *An Investigation of Heavy Vehicle Suspension Design*, Ph.D. dissertation of

- Cambridge University, 1998.
- [3] Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, RWS publication 2nd edition, Pittsburgh, 1990.
 - [4] Rowe, G. and Wright, G., “The Delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis”, *International Journal of Forecasting* 15, pp. 353-375, 1999.
 - [5] Saaty, T.L. and Vargas L.G, *The Logic of Priorities*, RWS Publication, 2nd edition, Pittsburgh, 1991.
 - [6] Saaty, T.L., “On the relativity of relative measures”, *European Journal of Operation Research*, vol. 121, pp. 205-212, 2000.
 - [7] Fukumura, K., Haga, K., Suzuki, M., and Mori, K., , “Center-closed rotary servo valve for power steering”, *SAE Paper 960929*, 1996.
 - [8] Suzuki, K., Inaguma, Y., and Haga, K., 1995 “Integrated electro-hydraulic power steering system with low electric energy consumption”, *SAE Paper 950580*.
 - [9] Iga, S., Sakazaki, A., and Shibata, N., “Motor driven power steering - for the maximum steering sensation in every driving situation”, *SAE Paper 880705*, 1988.
 - [10] Shimizu, Y. and Kawai, T., “Development of electric power steering”, *SAE Paper 910014*, 1991.
 - [11] Dyer, G.P., “Analysis of energy consumption for various power assisted steering system”, *SAE Paper 970379*, 1997.
 - [12] 葉晁瑋，*轉向系統設計之評估*，國立台灣大學機械研究所碩士論文，2001。
 - [13] Nakanura, I. and Ikawa, K., “Analysis of steering force at low speed”, *SAE Paper 790739*, 1979.
 - [14] Candy, A., “Personal communication”, Delphi automotive company, 2000-2001.
 - [15] Peter, D. and Gerhard, R., “Electric power steering - the first step on the way to steer by wire”, *SAE Paper 1999-01-0401*, 1999.
 - [16] Okmoto, K., Chikuma, I., Saito, N., and Mlyazaki, H., “Improvement of driver’s feel of electric power steering”, *SAE Paper 890079*, 1989.