



電子控制懸吊系統介紹

財團法人車輛研究測試中心 黃銘湖

摘要

本文主要是介紹電子控制懸吊系統之發展現況，並說明車輛研究測試中心(ARTC)針對該系統之開發近況，傳統的懸吊系統主要為被動式懸吊或稱為機械式懸吊，乃由彈簧、連桿機構與避震器等相關零件配合而成，主要功能是用於支撐車身、車架、乘客與貨物等，於行駛時吸收因路面不平整，所導致車輪上下的不當振動能量，減小車身各機件受振動而造成的損傷並將傳給車身之振動能量減至最低程度，令乘客感到舒適，進而改善行駛安全性。由於傳統懸吊只有單一特性，無法針對不同路況與操作條件進行相對應的調整，為改善此一限制，ARTC針對先進懸吊系統進行國內外技術現況調查與市場需求評估，並針對“電子控制懸吊系統開發”持續與國內業者、國外專家進行交流研討，以規劃出適當的技術開發流程。

一、前言

隨著人類生活品質的提高，對於交通工具舒適性以及操控性的要求，也隨之不斷提升，近年來汽

車懸吊系統方面的研究日新月異，從可變剛性彈簧至空氣彈簧，從固定阻尼避震器至高、低頻可變阻尼避震器，一直到主動式懸吊系統的研究發展，都是為了滿足人類對於交通工具乘坐舒適性以及駕駛操控性的需求。

懸吊系統設計是影響車輛操控安全與乘坐舒適的主要共同因素，傳統彈簧與阻尼器只有單一特性，無法針對不同路況與操作條件進行相對應的調整，為改善此一限制，便發展出“可調整阻尼”之懸吊系統(如調整傳統式阻尼器)，或以液(氣)壓致動器提供阻尼調整，甚至控制車身高度維持轉向過程車身平穩等功能。目前已應用之系統包括：電子多段調整、半主動式控制、主動式控制等。

ARTC針對懸吊系統相關技術的發展，評估國內外技術現況與市場需求；並針對“電子式懸吊系統開發”的技術架構，持續與國內業者、國外專家進行交流研討，以規劃出適當的技術開發流程，協助國內業者建立相關的技術能力。以下將介紹電子控制懸吊系統文獻回顧與發展現況，並說明近期ARTC在電子控制懸吊系統之開發近況。

二、電子控制懸吊系統文獻回顧

電子控制懸吊系統吸引了許多研發單位積極投入人力發展，尤其是主動式懸吊系統，在國外已研究開發了20年以上，目前主要使用於高級車種。其中包括有以致動器完全取代傳統懸吊系統彈簧與阻尼器的方式，或在傳統懸吊系統上加裝主動致動器的方式。對於車輛在彎道行駛時，由於慣性力的作用，所導致車身發生向外翻轉的動態行為，如圖1所示[1]，可藉由主動式懸吊系統之致動器產生一相反力矩來抵抗因滾動現象產生之力矩，藉此改變車輛之滾動行為，使車體維持水平，減少車身晃動增加乘坐之舒適性，並提供更佳之操控穩定性。



圖1. 車輛因轉彎產生車體翻滾現象
(右車:傳統懸吊, 左車:主動式懸吊)[1]

一個設計優良的懸吊系統應能有效將路面的起伏與乘坐空間隔絕，為了能更準確模擬汽車的懸吊系統，其模型複雜性也由1/4車二維振動至1/2車四維振動及全車的7維振動，其中1/4車模型複雜性最小，且由於獨立式懸吊系統的普遍應用，使得1/4車模型不失其真實性，因此有較多的文獻採用。

在控制器設計方面，從許多主動式懸吊系統的研究報告中，其所使用的控制法則有最佳化控制 (Optimal Control)、適應控制 (Adaptive Control)、模糊控制 (Fuzzy Control)、PD Control，並結合滑動模式控制 (Sliding Mode Control)，類神經網路 (Neural Network) 及基因演算法 (Genetic Algorithm) 等。示意圖以1/4車模型為例，如圖2。其中 M_s 為乘載車身質量 (Sprung mass)， M_u 為非乘載車身質量 (Unsprung mass)， K 為懸吊系統彈簧常數，而 K_t 代表輪胎彈簧常數， C_t 代表輪胎阻尼常數，則代表路面狀況。

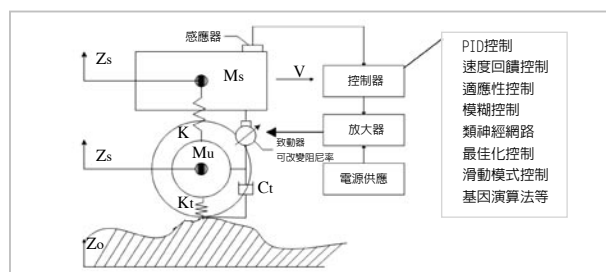


圖2. 主動式懸吊系統示意圖

三、電子控制懸吊系統發展現況

車輛懸吊系統可依主動的程度分為主動式懸吊系統與被動式懸吊系統-如圖3，其中主動式懸吊(也可稱為電子控制懸吊)又分為半主動式-如圖3(b)與(全)主動式-如圖3(c)。

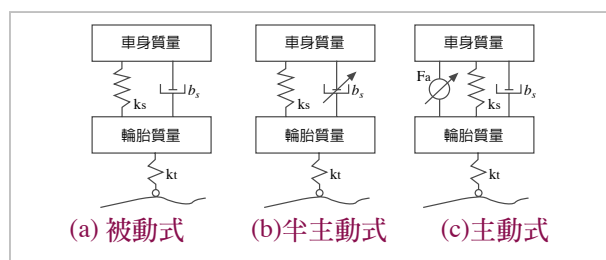


圖3. 懸吊系統示意圖



(一) 被動式懸吊系統(或稱機械式懸吊)：

是由彈簧與減振器構成，沒有外加的控制力來抑制外界干擾，主要是經由減振器來消散擾動的能量，使乘坐有比較好的舒適性，但在操控性能方面只能由原先的懸吊系統設計決定。

此系統可分為整體式懸吊系統與獨立式懸吊系統兩類 (如圖4)，因其為被動式，所以不需消耗額外之動力來源，且構造簡單、較為可靠、且成本低廉，因而易於商業化，今已廣泛的應用於現有車輛上。

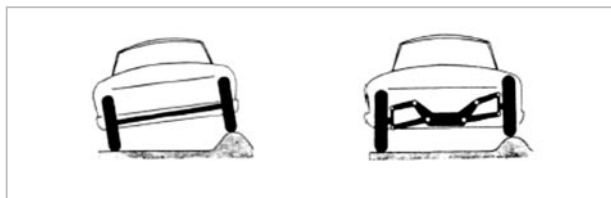


圖4. 整體式懸吊與獨立式懸吊

(二) 電子控制懸吊-半主動式懸吊系統：

和被動式懸吊系統一樣並沒有額外出力的系統來抑制外界干擾，但是可以藉由感測車體的振動行為隨時改變系統的阻尼常數，調整懸吊系統之暫態響應特性，適時消散車體的擾動行為，並進而改善乘坐的舒適性；在過彎或較高速行駛時，可依照駕駛者需求改變其阻尼常數，進而改善其暫態操控性，但並無法抑制在穩態轉向時所造成之車身傾斜。

(三) 電子控制懸吊-主動式懸吊系統：

藉由致動器提供之額外力量有效的減少系統之

振動力量，進而改善乘坐的舒適性；除了可改善暫態操控性外，並可有效抑制在穩態轉向時所造成之車身傾斜，進一步改善其穩態操控性；經由最佳化設計可同時滿足舒適性與操控性的要求。

因為人們對於車輛舒適性與操控性的要求提高，所以主動式懸吊系統在一些高級車上也已開始採用。如：

1987年嘉蘭改良舊車型利用衰減力與彈簧控制成為主動補正車身姿勢系統，圖5為嘉蘭主動式懸吊控制示意圖[12]。懸吊部份併用圈狀彈簧，以空氣彈簧與避震器成為一體，空壓迴路成為閉迴路。主動式控制為防止側滾、俯衝、後蹲與跳動控制。防俯衝控制是依減速度以煞車開關信號為觸發，從車速變化演算，前輪供氣後輪排氣。防止蹲下控制是依節氣門位置感測器的信號，前輪排氣後輪供氣。跳動控制是以車高感測器測知懸吊系統的行程和頻率，在壓縮方排氣伸長方供氣，以達成平穩的乘坐感。

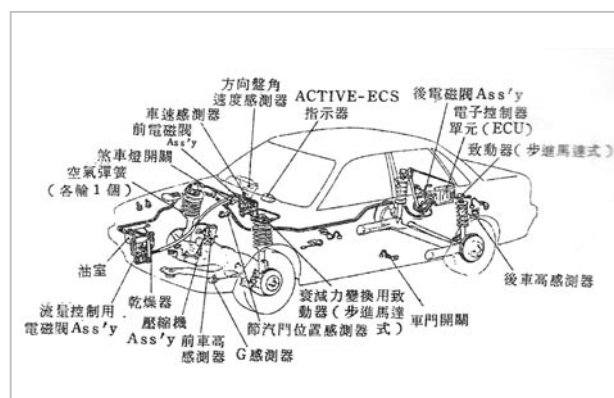


圖5. 嘉蘭主動式懸吊系統[12]

1989年Infinity使用主動式控制系統如圖6[12]，依加速度感測器的輸出值，控制各輪的液壓致動器，抑制車身姿勢的變化，減低來自路面的震動。油壓系統的油壓源由油箱、油泵、蓄壓器等構成，依路面入力變化控制液壓致動器對車身作側滾控制、顛簸控制、跳動控制與車高控制。

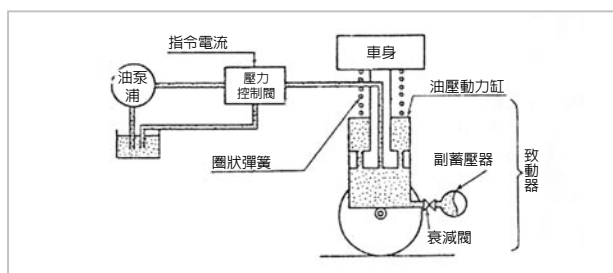


圖6. Infinity主動式懸吊系統[12]

其他採用電子控制懸吊系統的廠牌車種如表1。

表1. 電子控制懸吊市場調查

廠牌	系 統
M.Benz	ABC(Active Body Control) 主動車身控制系統 Air Matic氣動式懸吊系統
Jaguar	CATS(Computer Active Technology Suspension)氣壓式電子懸吊系統。
BMW	EDC-C(Electronic Damper Control-Continuous) 主動式連續可變阻尼電子避震器。 Active Stabilizer主動式防傾桿。
GM Volkswagen	CDC(Continuous Damping Control)主動式連續性電子微調懸吊系統
AUDI	DRC(Dynamic Ride Control) 主動式懸吊系統 四段高度調整氣壓式越野懸吊系統
Citroen	「Hydractive 3」第三代主動式液壓懸吊系統
Peugeot	AMVAR, (Electronically controlled variable damping)
Land Rover	Active Cornering Enhancement (ACE) system
LEXUS	AHC主動式車高控制系統 Active Height Control Suspension AVS可變避震器阻尼系統(Adaptive Variable Suspension)
Volvo	4C連續控制式主動懸吊系統 (Continuously Controlled Chassis Concept)
Toyota	TEMS(Toyota Electronic Modulated Suspension) 電子控制懸吊系統 –半主動式懸吊

歷年來電子控制懸吊系統的研究在國內申請的相關專利如表2。

表2. 國內電子控制相關專利列表

專利類型	專利名稱
發明	可調 整式氣體彈簧 懸吊 系統
發明	具有分立 可調 整阻尼回路的阻尼系統
新型	氣動式 懸吊 結構之改良
新型	可調 整 汽車高度 的裝置
發明	避震器 之阻尼 自動 調整裝置
新型	橡膠氣壓 避震器 之機械式控制單元
發明	主動式混成電磁鐵 避震器 及其避震方法
新型	機車半主動式之前 避震器
發明	懸吊 控制裝置
新型	具六段輸出之致動器裝置
新型	調整式 避震器
新型	電流變液 避震器 之改良結構
新型	可調式 避震器
新型	汽車 避震器 內上端 控制 式車身調整裝置
新型	連續無段式可調 避震器
新型	六段可調式 避震器
新型	可調整式避震器之彈簧體調整結構改良
新型	可調式避震器 改良結構
發明	可控制振動裝置、磁流變液體阻尼器、阻尼器以及單管阻尼器

四、ARTC電子控制懸吊系統開發計畫介紹

本計畫之執行方式，先蒐集相關文獻與控制理論，以進行評估與模擬分析，再於國內現有之技術基礎上，搭配學界合作，進行電子控制懸吊系統之開發研究與組裝試作。最後，利用中心試車場內之振動噪音測試道、綜合性能測試道，進行實車系統測試，驗證傳統懸吊系統與電子控制懸吊系統之特性差異。

(一) 電子控制懸吊系統發展Road map

ARTC電子控制懸吊系統開發計畫Road map 如圖7，本計畫初步規劃兩年時程，第一年先執行阻



尼可調懸吊與隨荷重自動調整車高懸吊的控制系統建立，並改裝架設於實際車輛，其核心技術在於控制法則之建立與實車測試驗證，其中關於控制器的設計與車輛運動狀態之模擬，是以學界合作的方式進行。第二年將整合阻尼可調與車高可調控制系統，建立兼具操控性與乘適性之電子控制懸吊系統。

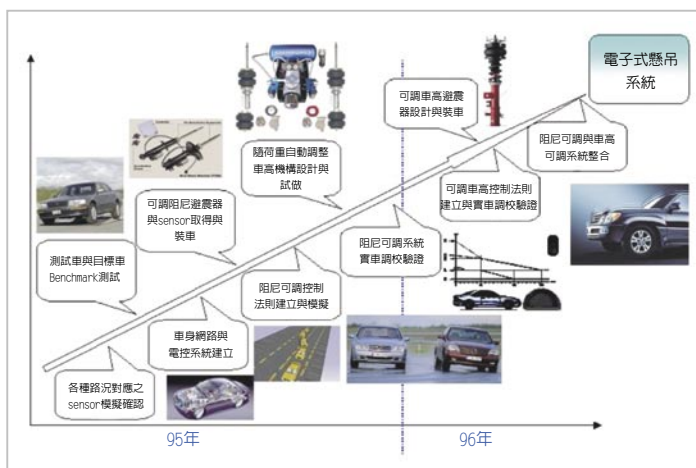


圖7. 電子控制懸吊系統發展Road map

(二) CarSim整車動態模擬

本計畫為減少控制器開發之時程，將利用CarSim進行車輛動態模擬，協助電子控制懸吊系統之開發。CarSim主要是用以提供使用者進行車輛動態，如轉向、煞車與懸吊系統之模擬及分析。同時使用者可依需求設定內外部之相關參數，例如車輛本身的幾何關係、重量、動力傳遞參數、煞車系統參數、懸吊系統參數及輪胎參數等，而外部行駛環境參數包含路面參數、空氣動力影響參數等。此

外，CarSim亦提供一個3-D動畫界面，以進行模擬結果於虛擬實境之呈現。而RT版本之CarSim更進一步的提供使用者進行硬體在迴路中(Hardware-in-the-loop, HIL)之使用環境，以利控制系統之發展、測試及驗證。圖8~圖9為CarSim介面與結合Matlab / Simulink之架構圖。

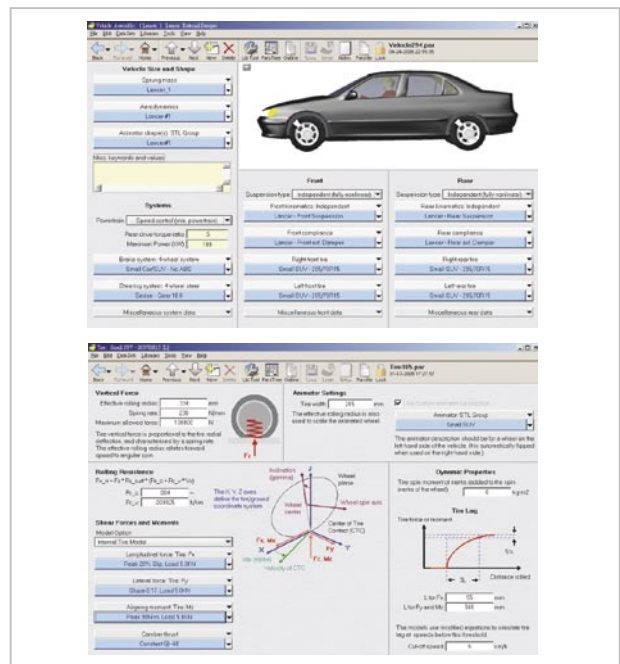


圖8. CarSim介面

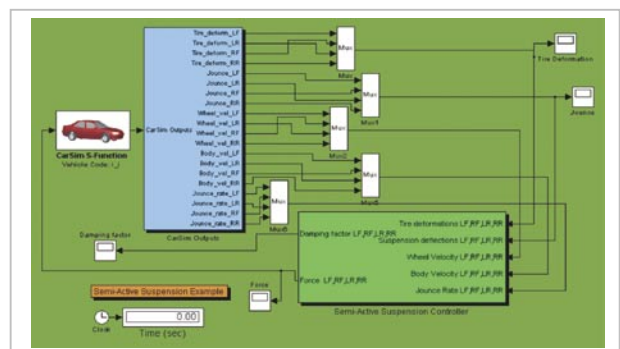


圖9. CarSim結合Matlab/Simulink

(三) 電子控制懸吊系統硬體架構

圖10為本系統所設置的控制器與所需的感測器示意圖，控制器共有五個，分別為四個阻尼控制器和一個整車控制器，在感測器方面包含車速感測器、轉角感測器(量測轉角位置與轉角速度)、煞車感測器和加速度感測器(量測垂直方向與X-Y平面加速度)，由以上的感測器可推估出汽車目前所處的狀態，再進一步進行車輛動態控制。

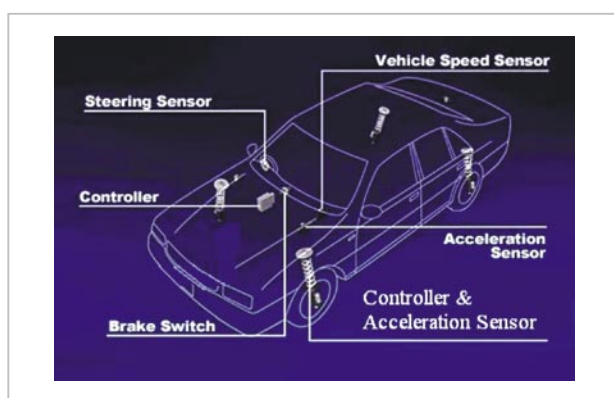


圖10. 電子控制懸吊系統硬體架構

(四) 電子控制懸吊系統網路架構

圖11是本系統所規劃的車身網路，在此所採用的網路協定是目前車輛界最常用的網路CAN-Bus，因為此系統夠穩定、傳輸速度夠快（最快是1Mbps/sec）；採用此系統能大幅縮減電線的使用量，相對的也減少許多線路上的接點，可以減少車子線路不良的發生機率；由於系統信號可共享，所以未來系統要擴充時會比較容易。

在系統中我們可以看到有七個節點，第一個節

點是處理轉角速度和轉角位置信號，其目的是將車子的車速和煞車信號透過CAN bus傳送到各個節點，其中Master Controller節點會接收車速及煞車的信號；第二節點是方向盤轉角位置和轉角速度的信號，此信號也是要傳送給Master Controller；第三節點是Master Controller，它會接收第一和第二點的信號，然後再加上自身XY平面的加速度感測器信號做處理，最後再將處理後信號透過CAN bus傳送至第四~第七此四個輪子控制器。

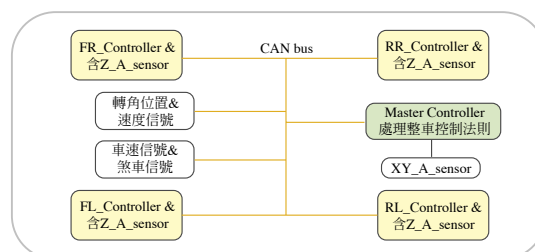


圖11. 電子控制懸吊系統網路架構

以上整個網路運作步驟如圖12和圖13。

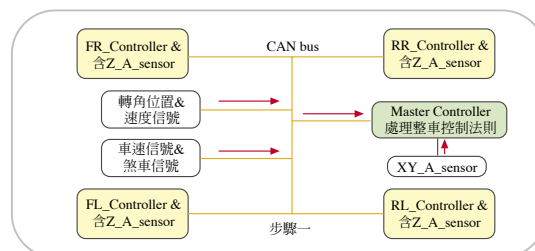


圖12. 網路運作步驟1

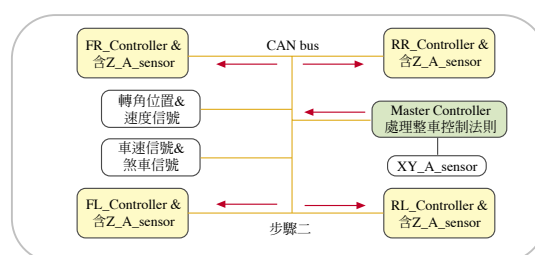


圖13. 網路運作步驟2



(五) 實車測試與驗證

在懸吊系統基本特性評估驗證部份，重點規劃在於有無配備電子懸吊系統之車輛動態特性比較評價。主要測試項目規劃分為三大部份：

1. 車輛加減速及直行穩定度之縱向動態特性

此部份主要是評估配備電子懸吊系統之車輛，在車輛急遽之縱向運動(急加減速)時，藉由電子懸吊系統功能作動，是否能降低車輛產生後蹲(squat、起步加速後輪下沉)及俯衝(dive、煞車時前輪下沉)狀況之程度，增進車輛乘坐感與操縱安定性；此外，同時進行車輛高速直線行駛條件下的穩定度測試，以確認電子懸吊系統功能作動下對車輛直行穩定性的改善程度。

2. 車輛操縱性及安定性之動態特性

本測試驗證項目主要是探討車輛於橫向運動，如轉彎、車道變換..等動態行為時，量測車輛之正向/橫向速度、方向盤轉角/操舵扭力、正向/橫向加速度、橫滾角與角速度(roll angle & rate)、偏駛角與角速度(yaw angle & rate) ..等參數。經由此等參數與時間的關係以及不同車輛之間參數的交叉比較後，可就具備電子懸吊系統車輛之操安客觀特性作一評價。

3. 車輛乘適性能

乘適性驗證主要的目的分為兩大部分來做探討，首先以不同的車速行經試車場特殊之模型路，量測車輛振動及動態行為，逐一確認本系統作動下車輛動態行為的改變。此外，量測人體與座椅間之振動，運用ISO 2631-1：1997國際標準中的評價方式，評估本系統對人體舒適度之改善程度。

相關驗證測試項目、內容、量測參數如表3：

表3. 懸吊系統相關驗證測試項目

驗證項目		方法說明	車速條件 (km/hr)	量測參數
縱向	急加速試驗	於一定車速及各種不同加速度將車輛加速至規定車速，確認車輛蹲下程度	0 → 60 0 → 100	車速 (km/hr)、縱向加速度 (m/s ²)、俯仰角度 (deg)、俯仰角速度 (deg/s)
	急煞車試驗	於一定車速及各種不同減速度將車輛煞車至停止，確認車輛俯衝程度	60 → 0 100 → 0	車速 (km/hr)、縱向加速度 (m/s ²)、俯仰角度 (deg)、俯仰角速度 (deg/s)
	直行穩定性試驗	以規定車速行駛於試車場之直線 (>1000m) 測試道，測試員隨時修正方向盤，盡力維持車輛沿道路之中心線行駛，確認車輛偏駛狀況	80 / 100 / 120	方向盤轉角、偏駛角速度 (yaw rate)、車速
操安性	急遽車道變換試驗	測試參考ISO3888 Severe lane-change maneuver 標準、進行測試	50 / 60 / 70 / 80	方向盤轉角、偏駛角速度 (yaw rate)、橫滾角 (roll angle)、側向加速度、車速
	曲行試驗	CNS D3131汽車彎道行駛性能試驗法、進行測試	50 / 60 / 70	方向盤轉角、偏駛角速度 (yaw rate)、橫滾角 (roll angle)、車速
	定圓迴轉試驗	參考ISO 4138-1982，量測車輛穩態迴轉行為	10kph起至車輛無法依半徑30m圓形路徑行駛為止	轉向係數、roll gain、側向加速度與方向盤轉角/扭力
乘適性	R10mm凸起路乘適性試驗	以一定車速通過R10mm凸起路，量測相關參數	30 / 60	車速 (km/hr)、前後席底板垂直加速度 (m/s ²)
	H80mm起伏路乘適性試驗	以一定車速通過H80mm起伏路，量測相關參數	40 / 70	車速 (km/hr)、前後席底板垂直加速度 (m/s ²) 及俯仰角速度 (deg/s)
	段差路乘適性試驗	以一定車速通過試車場段差路，量測相關參數	50 / 80	車速 (km/hr)、前後席底板垂直加速度 (m/s ²)
	行駛粗糙路試驗	以一定車速通過試車場粗糙路面，量測相關參數，並參考ISO 2631-1:1997規範，進行乘適性分析評估	60 / 80	車速 (km/hr)、前後席底板/坐墊/椅背垂直加速度 (m/s ²) 及整體乘適性FACTOR
	行駛平順性試驗	以一定車速通過試車場高速周回路，量測相關參數，並參考ISO 2631-1:1997規範，進行乘適性分析評估	60 / 80	車速 (km/hr)、前後席底板/坐墊/椅背垂直加速度 (m/s ²) 及整體乘適性FACTOR

4. 主觀評價驗證

在車輛開發階段所執行之試驗項目中，有一特別值得提出說明之試驗項目為主觀評價 (Subjective assessment)。顧名思義，主觀評價乃評價者依其主觀感受 (feeling)，就車輛動靜態性能作整體性之評價。本案在主觀評價驗證亦規劃針對研發完成系統之操作便利性、功能、車輛乘坐感、操縱性、安定性、乘適性及振動噪音..等性能進行主觀性評價驗證。期能

以最完整的測試規劃對本套新研發之電子控制懸吊系統進行實際的驗證。

主觀評價方式參考下圖14

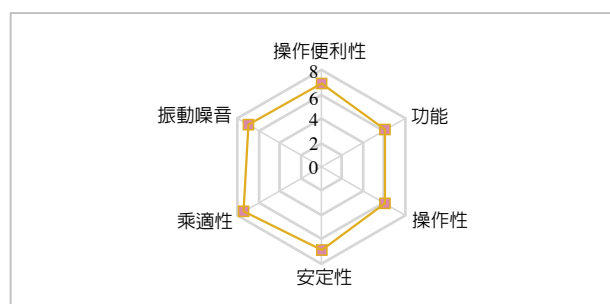


圖14. 主觀評價方式

(六) 目標車Benchmark測試結果

為了解具備電子控制懸吊系統的高級車種之懸吊特性與整車操控性與安全性，選定LEXUS LS430(配備電子控制氣體動力懸吊)進行Benchmark測試評估，圖15為目標車 LEXUS LS430外觀、圖16~圖20為部分操控性於程式性評估結果。



圖15. LEXUS LS430

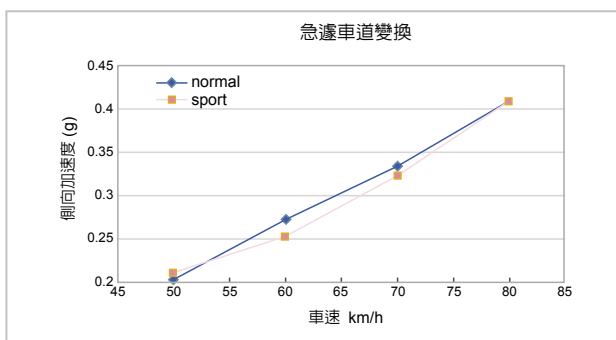


圖16. 急遽車道變換測試結果

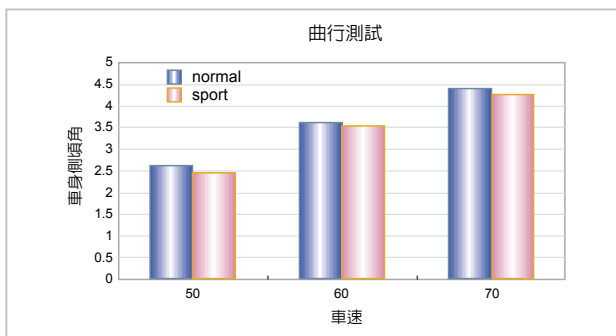


圖17. 曲行測試結果

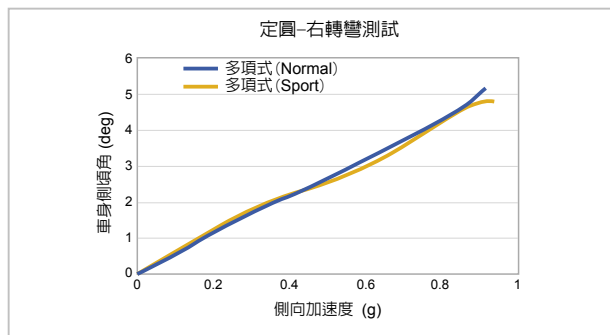


圖18. 定圓-右轉彎測試結果

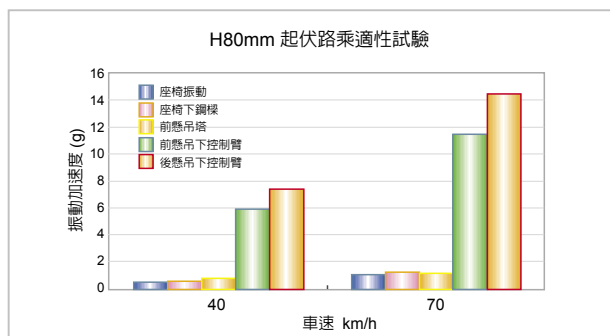


圖19. H80mm 起伏路乘適性試驗測試結果

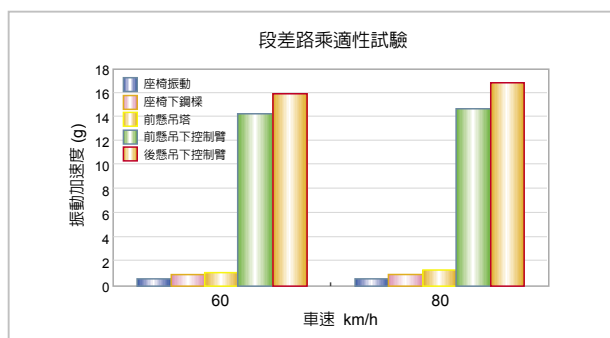


圖20. 段差路乘適性試驗

(七) 測試車建立

本計畫主要為開發最合適之電子懸吊控制法則，以現有市售車款為測試車輛如圖21，引進國外可調阻尼懸吊系統(圖22)與空氣彈簧懸吊系統(圖23)，經過改裝建置為電子控制懸吊雛型車，用以驗證調校所發展的控制法則。

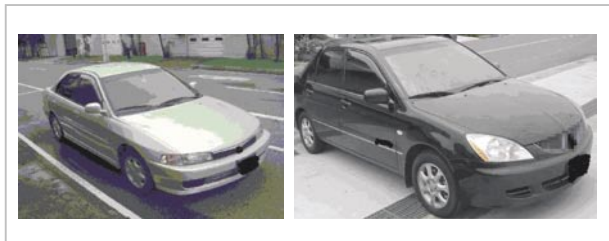


圖21. 電子控制懸吊測試車



圖22. 國外可調阻尼避震器



圖23. 國外空氣彈簧避震器

五、結論

電子控制懸吊系統裝置能適度抑制或改善車輛在過彎行駛時，因慣性力造成車身側傾之現象，增加操控性以及改善車輛行駛於惡劣路面之舒適性。有鑑於此，本中心結合多年振動噪音、車輛電子之

能量與實車驗證技術，發展電子懸吊相關核心技術，並預計結合車輛業界與學界進行產學研合作，期能提昇車輛乘坐舒適性，並提供更佳的操控性，期望未來成果能推廣到業界。

六、參考文獻

1. <http://www.autoweb.com.au/cms/newsarticle.html?&start=120&showall=&id=MER&doc=mer9905111>
2. Williams, R. A., "Automotive active suspensions Part1: basic principles," IMechE, (1997).
3. Hedrick, J. K., "Invariant properties of automotive suspensions," Proceedings of IMechE conference on Advanced Suspensions, paper C423/88, pp. 35-42, (1988).
4. Kwakernaak, H. and Sivan, R., "Linear Optimal Control Theory," Wiley Interscience, pp. 253-269, (1972).
5. Williams, R. A., "Active suspensions optimal or classical?," Proceedings of 9th IAVSD Symposium, pp.607-620, (1985).
6. M.V.C Rao and V. Prahlaad, "A Tunable Fuzzy Logic Controller for Vehicle Active suspension system," Fuzzy Sets and Systems, 85.pp. 11-21,1997.
7. C.S. Ting, T.H.S. Li and F.C. Kung, "Design of



- Fuzzy Controller for Active Suspension System,” *Mechatronics*, Vol.5, No.4, pp.365-383, 1995.
8. A. Alleyne and J.K. Hedrick, “Nonlinear Adaptive Control of Active Suspensions,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.3, No.1, pp.94-101, March 1995
9. M. Sunwoo, K.C. Cheok and N.J. Huang, “Model Reference Adaptive Control for Vehicle Active Suspension Systems,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.38, No.3, pp.217-222, June 1991.
10. D. C. Karnopp, “Active Suspensions Based on Fast Load Levelers,” *Vehicle System Dynamics*, Vol. 16, pp. 355-380, 1987.
11. D. C. Karnopp, and So, Sang-Gyun, “Energy Flow in Active Attitude Control Suspensions: A Bond Graph Analysis,” *Vehicle System Dynamics*, Vol. 29, pp. 69-81, 1998.
12. 賴耿陽, “汽車懸吊裝置總覽” .1991.
13. Thomas D. Gillespie(原著), 林筱增(譯), “車輛運動力學” ,2002.

