

基因演算法於車輛懸吊系統最佳化之應用

林筱增*、曹永智**、陳炳英***

摘要

本研究係利用基因演算法 (GA) 進行車輛懸吊系統最佳化，具體而言是搜尋 M998 悍馬車懸吊系統最佳主動控制參數及被動元件參數。主要研究內容包括三部份：第一部份是搜尋最佳主動控制參數，第二部份是搜尋最佳被動元件參數，第三部份是依第二部份所找到的最佳被動元件參數來搜尋最佳主動控制參數。電腦模擬分析結果顯示，最佳主動懸吊系統之舒適性可改善 20%、操控性僅稍微惡化 0.7%；與被動式懸吊系統比較，顯示利用主動式懸吊系統可明顯改善車輛之舒適性、操控性及懸吊系統工作行程。

關鍵字：悍馬車、懸吊系統參數、基因演算法

*美和技術學院資訊管理系副教授兼系主任

**中山科學研究院第二研究所助理研究員

***聯合後勤學校實習工廠廠長

壹、前言

車輛是現代生活中不可或缺的交通工具，隨著科技發展與生活素質的提昇，人們對於駕駛的舒適性與操控性的性能要求也越來越高，軍用車輛更是如此。

M998 悍馬車為目前我國軍運用最廣泛的輪型車輛，其特性為機動性強、操控性佳、適合行駛於各種崎嶇難行的路面，缺點是舒適性不佳，而舒適性不佳是導致駕駛疲勞的重要因素之一，疲勞駕駛對安全性有莫大傷害，本文希藉由主動式懸吊系統之研究，驗證在不犧牲操控性能模式之前提下，增進車輛舒適性能，並提昇駕駛安全，並作為未來國內車輛研改與自行研發之參考與依據。

貳、文獻回顧與研究方法

傳統的車輛懸吊系統為被動式懸吊系統，係藉由承載車身質量（sprung mass）與非承載車身質量（unsprung mass）間之阻尼與彈簧來隔絕路面對車體所造成之振動干擾，這種設計最不利之處，就是其性能將受事先選定之阻尼比和彈簧係數之限制，懸吊系統僅能藉由彈簧和阻尼來儲存和消散能量，故在車輛動態反應上無法很有彈性的變化及適時調整。

近年來，由於微機電系統（微型感測器、微型致動器和電子處理元件）的發展日趨成熟，這些元件整合在一起再藉由特殊的控制方式，實現主動式懸吊系統的可能性大幅提高，因而主動式懸吊系統的發展在車輛設計上已扮演越來越重要之角色，吾人期待未來能運用於 M998 悍馬車懸吊系統，在不降低操控性能及車體與輪軸工作行程狀況下，能有效提昇其舒適性。

張一屏（1998）曾以實驗設計法，統計分析車輛懸吊系統雙自由度車輛模式之乘適性能，建立四個不同輸入因素個別參數之交互影響關係，再配合最佳化分析，以求取乘適性能最佳化所對應之輸入設計參數，以有效解決車輛乘適性能系統性能參數交互影響關係評估之困擾。

為了達成提昇舒適性和操控性的目的，主動式懸吊系統之控制的模式扮演了非常重要的角色，1997 年 Tsao（1997）提出了力量消除之概念，其意係將承載車身質量與非承載車身質量間之作用力隔絕，並運用虛擬阻尼（virtual damper）和天勾阻尼（skyhook damper）觀念來降低輪胎的變形和承載車身質量的加速度，藉以提昇舒適性和操控性。運用力消除控制模式的設計，可以將承載車身質量與非承載車身質量相互之間的干擾隔絕，而成穩定狀態，此種控制模式的觀念是將承載車身質量的運動視為剛體運動，並視承載車身質量是由天勾阻尼和天勾彈簧所支撐，而虛擬阻尼亦可對非承載車身質量的干擾隔絕，亦成穩定狀態。

林豐澤（2005）指出演化式計算係一個通用名詞，泛指以達爾文進化論為

基礎，來模擬自然界演化過程所建立的計算模式，這些計算模式又被稱為演化式演算法。經過將多年來的努力，演化式計算已經廣泛被應用在許多不同的研究領域，然而最早出現也是最主要的演化式演算法為演化式規劃、演化策略、與基因演算法等三種，而其中基因演算法為最著名、應用最多的一種穩健有效率的最佳化演算法。基因演算法(genetic algorithm : GA)的基本理論是由 Holland (1975) 首先提出的，這是基於自然選擇過程的一種最佳化搜尋方法。其基本精神在於仿效生物界中物競天擇、優勝劣敗的自然進化法則。它能夠選擇族群中具有較佳特性上一母代，並且隨機性的相互交換彼此的基因資訊，以期能產生較上一母代更優秀的子代 (Offspring)，如此重複下去以產生適應性最強的最佳族群。

為了實現更佳的性能，上述的控制模式必須事先選定阻尼比和彈簧係數，本研究中採用M998 悍馬車四分之一車懸吊系統模型結合基因演算法實施電腦模擬，將主動式的設計與原有的被動式作性能比較，以搜尋最佳主動控制參數；其次再搜尋最佳被動元件參數；最後依上述所找到的最佳被動元件參數再搜尋最佳主動控制參數，經運用基因演算法特性搜尋參數和擇優 (trade-off) 後得到較佳的舒適性、操控性及懸吊系統工作行程。

參、系統描述與控制模型

一、系統描述

M998 悍馬車四分之一車懸吊系統模型設計如圖 1 所示，其承載車身質量以 m_s 符號表示、非承載車身質量以 m_u 符號表示，且假設運動過程中輪胎是緊貼著地面，並將輪胎模擬成一彈簧，且其彈簧係數以 K_t 符號表示，另 Z_s 、 $Z_s - Z_u$ 和 $Z_u - Z_r$ 可藉由量測而得，致動器被視為理想狀況，且每一個元件產生的非線性行為模式假設都可以被忽略，另車輛的承載車身質量可視為一剛體 (rigid body)，則圖 1 的模型可以得到以下的線性微分方程組：

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s (z_s - z_u) - b_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + f_a \quad (1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = k_s (z_s - z_u) + b_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) - f_a + k_t (z_r - z_u) \quad (2)$$

系統各項符號定義如下：

f_a ：致動器之作用力

Z_s ：車體位置

Z_u ：輪軸位置

Z_r ：路面位置

k_s ：彈簧係數

b_s ：阻尼係數

系統各項參數值詳列如表 1 所示。

表 1 車輛懸吊模擬系統參數數值表

m_s (Kg)	m_u (Kg)	b_s (Ns/m)	k_s (N/m)	K_t (N/m)
700	126	12000	240000	1000000

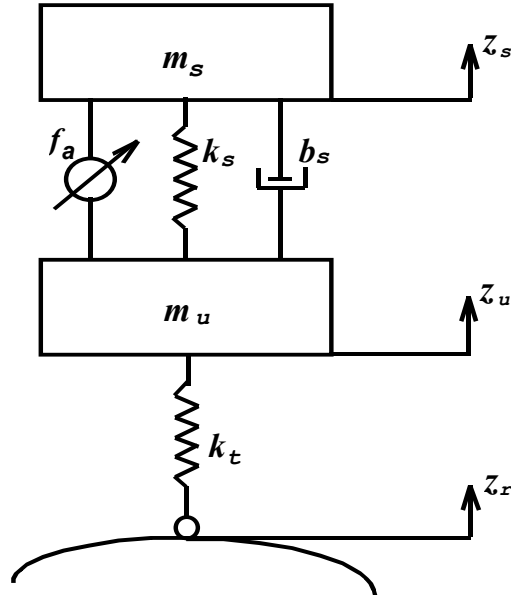


圖 1 M998 悍馬車 1/4 車主動式懸吊系統模型

肆、控制模型

前述所提力量消除、天勾阻尼和彈簧、及虛擬阻尼觀念，已經被運用在設計主動式懸吊系統。由圖 1 M998 悍馬車四分之一車懸吊系統模型，再結合運用上述觀念，致動器所產生的作用力可以區分成五個部份：

$$F_1 = k_s \times (z_s - z_u) \quad (3)$$

$$F_2 = (b_s/h) \times (\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (4)$$

$$F_3 = k_m \times (-z_s) \quad (5)$$

$$F_4 = (b_m/h) \times \dot{z}_s \quad (6)$$

$$F_5 = (-b_t/h) \times (\dot{z}_r - \dot{z}_u) \quad (7)$$

其中 k_m 、 b_m 和 b_t 分別為天勾彈簧係數、天勾阻尼係數、和虛擬阻尼係數， h 為模型的運動時間，在本控制模型中， F_1 和 F_2 分別表示為可抵銷被動彈簧和阻尼力量的作用力、 F_3 和 F_4 分別表示為天勾彈簧和阻尼的作用力、及 F_5 表示為虛擬阻尼作用力，總作用力 f_a 可視為五個部份線性組合的合力，故可描述為：

$$f_a = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (8)$$

解此方程式時， k_m 、 b_m 和 b_t 等係數值須先求得，因此完整的控制模型如圖 2 所示。

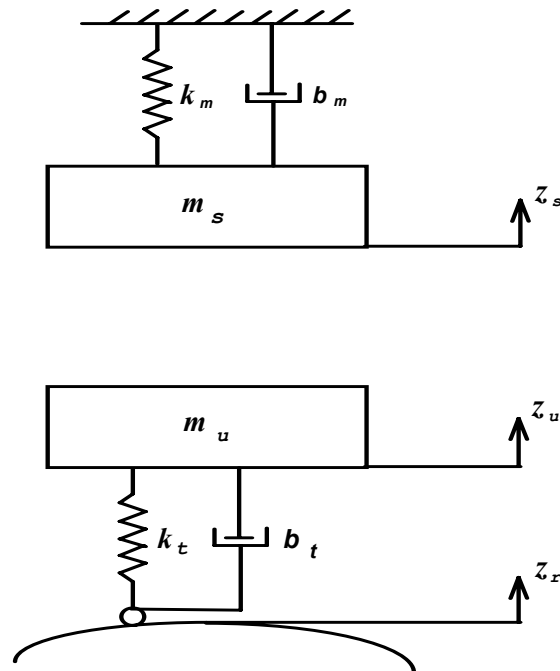


圖 2 主動式懸吊系統完整的控制模型

基因演算法其有效的搜尋能力可輕易求得上述三個參數的係數，周鵬程（2001）指出它與一般傳統搜尋方法最大的不同點如下：

- (1)將所要搜尋的參數編碼轉換成所謂染色體（chromosome）的二元字串（binary string）。
- (2)選定初始族群（initial population）係是由數個隨機（random）產生的個體所組成。
- (3)計算每個基因的適應函數（fitness function）。

(4)透過複製 (reproduction)、交配 (crossover)、及突變 (mutation) 等三個運算程序來搜尋新世代 (Offspring)。

本研究中吾人選定每一個個體是由 36 個位元所組成，且平均分成三個等分，第一等分的 12 個位元表示為 α (即為 k_m 的係數值)、第二等分的 12 個位元表示為 β (即為 b_m 係數值)、第三等份的 12 個位元表示為 γ (即為 b_r 的係數值)， α 、 β 、與 γ 的範圍經評估後，分別選定為 0~400、0~400、以及 0~4 間，且選定編碼的值與其分別存在著比例關係。

為計算此模型性能，先選定輸入為單位步階響應 (step response)，再參考 Tsao (1997) 設計影響舒適性、操控性和懸吊系統工作行程等三項參數的方程式：

$$RQ = \sum_{n=1}^{N_f} \left[\left(\ddot{z}_s \right)_n \right]^2 \quad (9)$$

$$RH = \sum_{n=1}^{N_f} \left[(z_r - z_u)_n \right]^2 \quad (10)$$

$$ST = \sum_{n=1}^{N_f} \left[(z_s - z_u)_n \right]^2 \quad (11)$$

其中系統各項符號定義如下：

RQ ：舒適性指標

RH ：操控性指標

ST ：懸吊系統工作行程指標

N_f ：資料採樣數據點的總和數

在單位步階值輸入持續 2 秒和採樣數據點與點時間間隔為 5ms 的狀況下，目標函數通常可藉由個別的適應值計算而得且描述如下：

$$OBJ = a \times \text{ratio } RQ + b \times \text{ratio } RH + c \times \text{ratio } ST \quad (12)$$

系統各項符號定義如下：

$$\text{ratio } RQ = RQ / PRQ \quad (PRQ: \text{被動系統的 } RQ) \quad (13)$$

$$\text{ratio } RH = RH / PRH \quad (PRH : \text{被動系統的} RH) \quad (14)$$

$$\text{ratio } ST = ST / PST \quad (PST : \text{被動系統的} ST) \quad (15)$$

而衡量整體性能改善可根據下列定義計算：

$$\text{Improvement} = 1 - (a \times \text{ratio } RQ + b \times \text{ratio } RH + c \times \text{ratio } ST) / (a + b + c) \quad (16)$$

其中係數值 a 、 b 、和 c 為權重因子 (weighted factors)，表示三者之間的相對重要性，本研究中權重因子 a 、 b 、和 c 在第一部份搜尋最佳主動控制參數中，選定三種類型來作一比較，分別為 $a=1$ 、 $b=1$ 、 $c=1$ ； $a=1$ 、 $b=2$ 、 $c=1$ ；and $a=1$ 、 $b=6$ 、 $c=3$ ；其次在第二部份搜尋最佳被動元件參數中，另選定三種類型來作一比較；最後在第三部份依第二部份所找到的最佳被動元件參數再搜尋最佳主動控制參數，是選定三種類型來作一比較。

本研究中基因演算法的設計特點敘述如下：

- (1) 以隨機方式產生一個世代族群，且每一個世代族群大小個體選定為 40。
- (2) 複製過程是根據每一個體的適應程度高低來決定其在下一代中應被淘汰或複製的數目多寡，適應程度愈高的個體 OBJ 的值愈低，在下一代中相對將被大量複製；適應程度愈低的個體 OBJ 的值愈高，在下一代中將被淘汰，其中適應程度的高低則是由適應函數來決定。
- (3) 交配過程是將複製完成的下一代 40 個個體中，隨機地任意選擇 2 個個體實施交配，計區分為 20 對，交配父母代的決定方式採用接輪盤選擇法，另每個個體為 36 個位元且區分為三等分，任 2 個個體實施交配時可隨機針對彼此各等分中的字串實施位元資訊交換，進而組成另外兩個新的個體，藉由累積前代的優秀位元資訊以期望能產生更優秀的子代。
- (4) 突變過程是將交配完成的 40 個個體，隨機選取任一個體字串突變點，以改變個體字串中的位元資訊，如此可避免陷入區域最佳值 (local optimum) 的機會。本研究之突變機率約為 0.1%，符合一般基因演算法之原則。若突變的機率過高，則經過篩選的世代可能因突變過多，而無法保有良好的遺傳基因。

完整基因演算法設計程序流程圖如圖 3 所示。

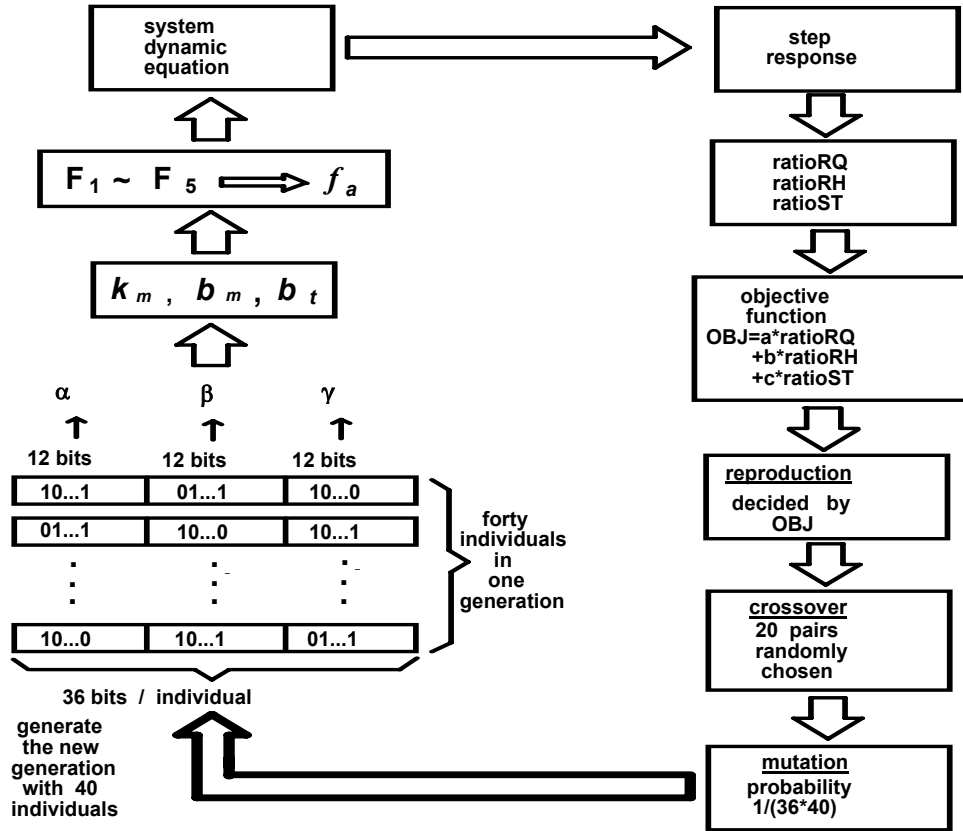


圖 3 完整之基因演算法設計程序流程圖

伍. 模擬結果與討論

在運用基因演算法實施電腦模擬時，三個部份的各項類型終止運算條件為 300 個世代，經模擬分析，將三個部份所得結果分別敘述如後：

一、搜尋最佳主動控制參數

類型 I：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=1$ 、 $c=1$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+26.81%、-0.56%、+10.51%、+12.26%，符號+、-分別表示為與被動式懸吊系統比較，獲得改善或惡化的程度。

類型 II：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=2$ 、 $c=1$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+27.58%、+1.62%、+6.64%、+9.27%。

類型 III：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=6$ 、 $c=3$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+9.9%、-0.28%、+21.51%、+7.27%。

將三個類型的結果彙整成表 2，由此表可知，三種類型之舒適性、懸吊系統工作行程、和整體性均獲得改善；操控性除類型 II 獲得改善外，其餘類型均

稍有惡化，而且惡化的程度與選定的權重因子 a 、 b 、 c 的係數值有密切關係。因此依據研究車種任務特性需求的不同，強調舒適性、操控性及懸吊系統工作行程各項特性時，事先選定的權重因子 a 、 b 、 c 係數值須審慎規劃。

表 2 RQ、RH、及 ST 之改進狀況

Case	類型 I	類型 II	類型 III
a, b, c 之值	$a=1, b=1, c=1$	$a=1, b=2, c=1$	$a=1, b=6, c=3$
Ratio RQ	0.7319 (+26.81%)	0.7242 (+27.58%)	0.9010 (+9.9%)
Ratio RH	1.0056 (-0.56%)	0.9838 (+1.62%)	1.0028 (-0.28%)
Ratio ST	0.8949 (+10.51%)	0.9336 (+6.64%)	0.7849 (+21.51%)
Improvement	+12.26%	+9.27%	+7.27%

圖 4 為輸入單位步階響應時被動式懸吊系統 Z_s 、 Z_u 相對時間及位置的反應關係；與被動式懸吊系統比較，圖 5 為主動式懸吊系統類型 II 輸入單位步階響應時 Z_s 、 Z_u 對時間及位置的反應關係，圖 6 為主動式懸吊系統類型 II 輸入單位步階響應時 Z_s 與 Z_u 之差對時間及位置的反應關係。

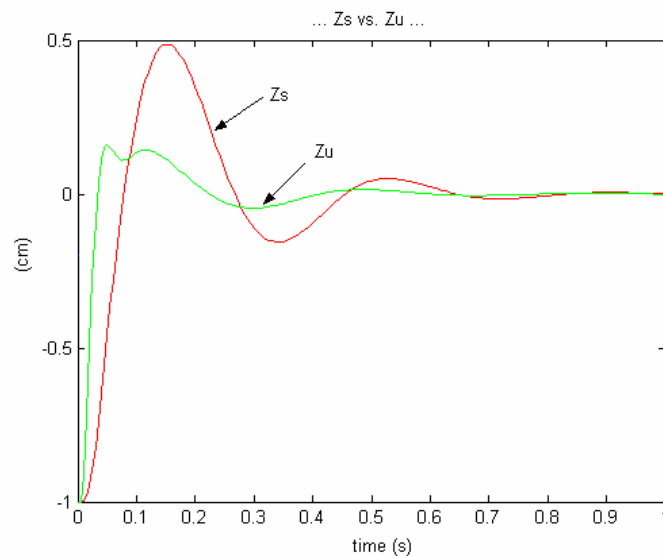


圖 4 被動式系懸吊統之步階響應圖 (Step response)

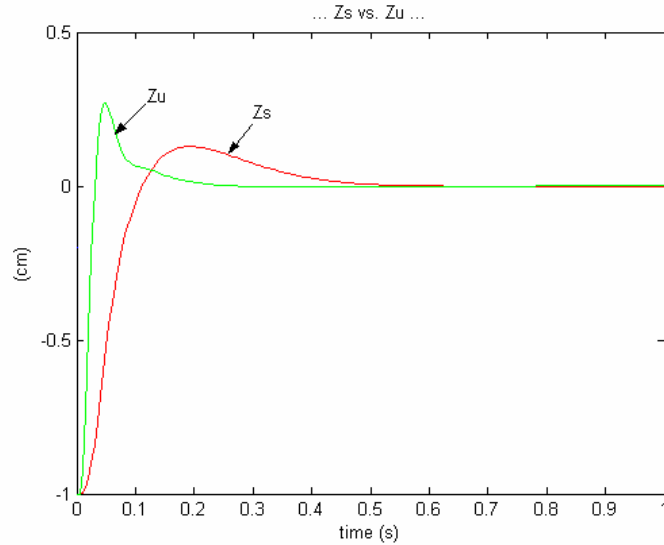


圖 5 主動式系懸吊統之響應圖 ($a=1, b=2, c=1$)

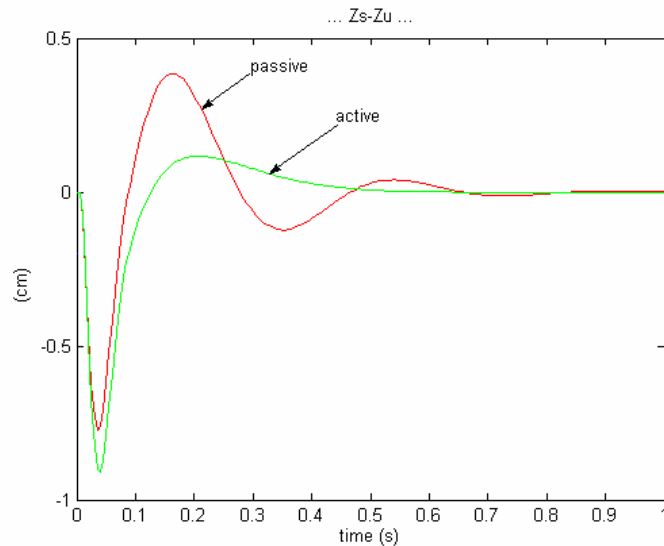


圖 6 主動式系懸吊統之響應圖 ($a=1, b=2, c=1$)

二、搜尋最佳被動元件參數

懸吊系統由上述得知第一部份運用主動式設計後，發現在舒適性、操控性及懸吊系統工作行程確有改善空間。因此在本部份，先假設以被動式原參數值加減 20%為限，選定三種類型來搜尋最佳被動元件參數，分別敘述如下：

類型 I：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=1$ 、 $c=1$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+18.19%、-13.59%、+11.26%、+5.29%。

類型 II：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=2$ 、 $c=1$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+1.50%、+5.51%、+1.37%、+3.48%。

類型 III：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=6$ 、 $c=3$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為-21.54%、+6.27%、+

16.98%、+6.70%。

將三個類型模擬之結果彙整成表 3，由表 3 可以得知，除類型 II 的舒適性、操控性、懸吊系統工作行程、和整體性都有獲得改善外，其餘類型都有些微惡化。故以類型 II： $a=1$ 、 $b=2$ 、 $c=1$ 作為搜尋最佳被動元件參數的權重因子，經電腦模擬分別獲得 $b_s=1.2167e+004$ Ns/m、 $k_s=190848$ N/m、 $k_r=1092500$ N/m；圖 7 為被動式懸吊系統原先與搜尋後最佳元件參數，在輸入單位步階響應時 Z_s 、 Z_u 對時間及位置的反應比較關係。

表 3 RQ 、 RH 、及 ST 之改進狀況

Case	類型 I	類型 II	類型 III
a, b, c 之值	$a=1, b=1, c=1$	$a=1, b=2, c=1$	$a=1, b=6, c=3$
Ratio RQ	0.8181 (+18.19%)	0.9850 (+1.50%)	1.2154 (-21.54%)
Ratio RH	1.1359 (-13.59%)	0.9449 (+5.51%)	0.9373 (+6.27%)
Ratio ST	0.8874 (+11.26%)	0.9863 (+1.37%)	0.8302 (+6.98%)
Improvement	+5.29%	+3.48%	+6.70%

三、根據上一部份找到的最佳被動元件參數再次搜尋最佳主動控制參數

類型 I：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=1$ 、 $c=1$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+20.81%、-2.97%、+8.15%、+8.66%，其中符號+、-分別表示與最佳被動式懸吊系統相比較，改善或惡化的程度。

類型 II：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=2$ 、 $c=1$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+20.13%、-0.78%、+5.72%、+6.07%。

類型 III：選定權重因子為 $a=1$ 、 $b=3$ 、 $c=2$ ，則舒適性、操控性及懸吊系統工作行程、和整體性獲得改善的百分比分別為+4.09%、-2.49%、+20.03%、+6.11%。

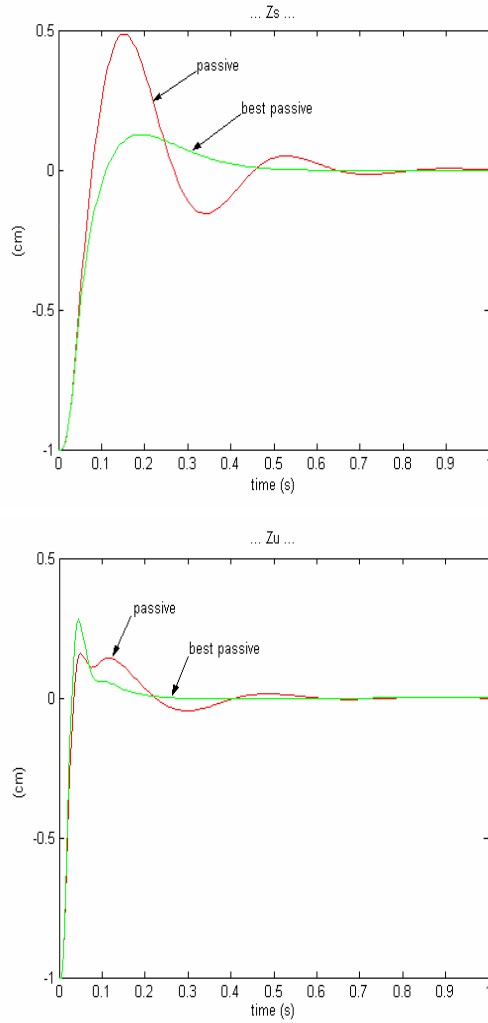


圖 7 被動式懸吊系統原始與最佳元件參數 Z_s 、 Z_u 值之比較

吾人將三類型之結果彙整成表 4，由此表可知，藉由上述第二部份決定的最佳被動元件參數，再結合主動式懸吊系統的設計，仍可使三種類型的舒適性、懸吊系統工作行程、和整體性均獲得改善，而操控性僅稍微惡化。

表 4 RQ 、 RH 、及 ST 之改進狀況

Case	類型 I	類型 II	類型 III
a, b, c 之值	$a=1, b=1, c=1$	$a=1, b=2, c=1$	$a=1, b=3, c=2$
Ratio RQ	0.7919 (+20.81%)	0.7987 (+20.13%)	0.9591 (+4.09%)
Ratio RH	1.0297 (-2.97%)	1.0078 (-0.78%)	1.0249 (-2.49%)
Ratio ST	0.9185 (+8.15%)	0.9428 (+5.72%)	0.7997 (+20.03%)
Improvement	+8.66%	+6.07%	+6.11%

圖 8 為最佳被動式懸吊系統輸入單位步階響應時 Z_s 、 Z_u 對時間及位置的反應關係與最佳被動式懸吊系統比較；圖 9 為主動式懸吊系統輸入單位步階響應時 Z_s 、 Z_u 對時間及位置的反應關係；圖 10 為主動式懸吊系統類型 II 輸入單位步階響應時 $Z_s - Z_u$ 對時間及位置的反應關係。

陸、結論與建議

本研究係運用基因演算法來搜尋 M998 悍馬車主動式懸吊控制器之最佳化設計，再結合力量消除、虛擬阻尼、及天勾阻尼和彈簧等概念以提昇其舒適性及操控性，經模擬驗證是合理可行的；其次再運用基因演算法的最佳化搜尋方法來搜尋最佳被動元件參數(k_s , b_s , k_t)及最佳主動控制參數(k_m , b_m , b_t)等六個特別參數係數，最後經由電腦模擬分析，顯示可改善其舒適性、操控性（或僅稍微犧牲操控性），其中，第一部份在三個模擬的類型中，其舒適性約改善 27%、操控性約改善 2%；第二部份在三個模擬的類型中，其舒適性約改善 1.50%、操控性約改善 5.51%；第三部份在三個模擬的類型中，其舒適性約改善 20%、操控性僅稍微惡化 0.7%。

由於本研究係分成三個階段來進行主動式懸吊控制器之最佳化設計，未來應考慮加以整合以簡化流程並提升運算效率；另外受限於主客觀因素，本研究僅進行電腦模擬，若能配合實際車輛懸吊系統之實驗應證則將更具說服力。

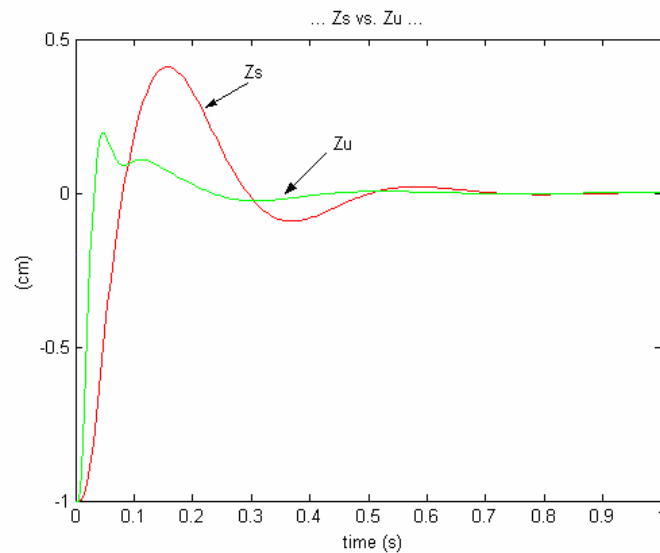


圖 8 最佳主動懸吊系統之步階響應

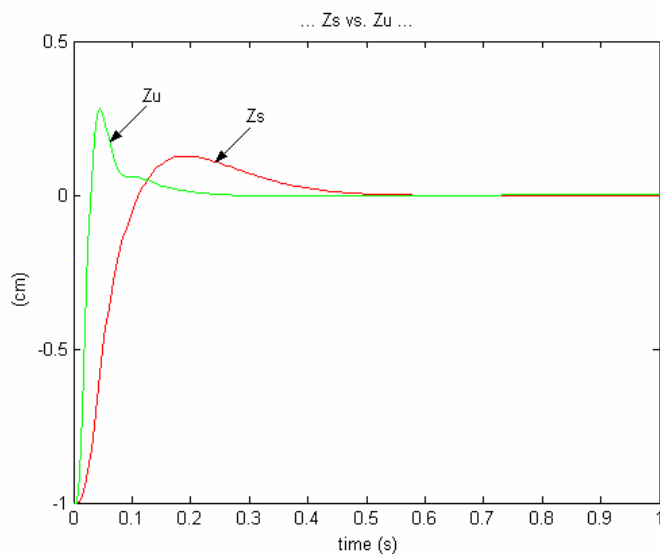


圖 9 主動懸吊系統之步階響應 ($a=1, b=2, c=1$)

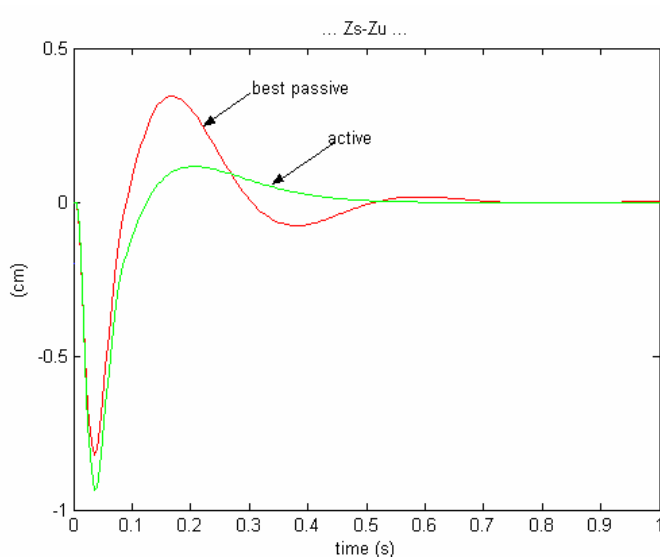


圖 10 最佳被動與主動系統步階響應之比較 ($a=1, b=2, c=1$)

柒、參考文獻

1. 林豐澤 (2005)。演化式計算上篇：演化式演算法的三種理論模式。智慧科技與應用統計學報，第三卷一期，1-28。
2. 林豐澤 (2005)。演化式計算下篇：基因演算法以及三種應用實例。智慧科技與應用統計學報，第三卷一期，29-56。
3. 周鵬程 (2001)。遺傳演算法原理與運用－活用Matlab。台北：全華科技圖

書股份有限公司。

4. 張一屏 (1998) 。車輛懸吊系統設計參數最佳化分析之研究。中華民國振動與噪音工程學會論文集，9-15。
5. Elbeheiry, E. M., Karnopp, C., Elaraby, M. E. and Abdelraaouf, A. M. (1995) . Advanced Ground Vehicle Suspension Systems-A Classified Bibliography, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 24, 231-258.
6. Goodal, R. M. and Kortum, W. (1983). Active Controls in Ground Transportation-A Review of the State-of-Art and Future Potential, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 12, 225-257.
7. Holland, J. H. (1975) . *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
8. Srinivas, M. and Lalit (1994) . *Genetic Algorithms: A Survey*, IEEE, pp. 17-26.
9. Tsao, Y. J. and Chen, Rongshun (1997) . Parameters Searching for Force Control of Active Suspension Design by Genetic Algorithm, *Automatic Control Conference*, 695-699.

Application of Genetic Algorithm on Optimization of Vehicle Suspension System

Hsiao-Tseng Lin^{*}, Y. J. Tsao^{**}, P. Y. Chen^{***}

Abstract

In this research, genetic algorithms (GA) are applied to find the better parameters of M998 HMMWV suspension system for both active and passive elements. The study consists of three parts. The first part is to search the optimal parameters of active suspension elements. The second part is to find the best passive suspension parameters. In the last part, results of the second part are used to find the better parameters of active system. Computer simulations demonstrated that the best improvement is 20% for ride quality, while handling quality only deteriorates by 0.5%. The most important conclusion can be drawn from this research is that the proposed method can be used to improve both ride quality and suspension working space without seriously degrading handling quality.

Keywords: HMMWV, suspension system parameters, genetic algorithm

^{*} Associate professor and Chair, Information Management Department, Meiho Institute Of Technology
^{**} Assistant researcher, Chung-shan Institute of Science and Technology. Armament Bureau. M.N.D.
^{***} Director of Practical Training Factory, Combined Logistics School