

# 基因演算法於車輛懸吊系統最佳化之研究- 以二分之一車模型為例

林筱增\*、曹永智\*\*、陳炳英\*\*\*

## 摘要

本論文主旨在運用一套針對車輛主動懸吊系統設計的控制方法，其中包含力量消除、天勾阻尼與路面跟隨彈簧、虛擬輪胎阻尼等概念，並以遺傳演算法整合上述概念應用於軍用悍馬車的二分之一車模型，以獲取較佳的乘坐舒適性及操控性。研究內容可分成二部分：首先搜尋懸吊系統最佳被動元件參數，接著根據第一部分所獲致的最佳被動元件參數來搜尋最佳主動控制參數；吾人並將電腦模擬分析之結果與傳統被動式懸吊系統做比較。結果顯示應用上述設計概念所發展出的主動控制方法，在搜尋參數過程中，於設定世代內均可有效率搜尋最佳被動元件參數及最佳主動控制參數，針對兩種路面之模擬結果，在俯仰運動、前輪操控性、以及垂直舒適性等三項平均改善分別達 54.58%、43.28%、以及 41.60%，僅在前懸吊工作行程一項中稍有犧牲，證明此方法可明顯改善車輛乘載之舒適性及操控性，此研究對於未來車輛懸吊系統之研改工作有相當之參考價值。

關鍵字：懸吊系統參數、基因演算法、二分之一車模型

---

\* 美和技術學院資訊管理系副教授兼研發處處長

\*\* 國防部軍備局中山科學研究院

\*\*\* 聯合後勤學校

## 壹、前言

由於具備機動性強、操控性佳、適合行駛於各種崎嶇難行的路面等特性，悍馬車為目前國軍使用最廣泛的輪型車輛之一，惟其缺點是舒適性較差，而舒適性不佳正是導致駕駛及乘員疲勞的重要關鍵因素之一，而駕駛員的疲勞對安全駕駛影響甚鉅，亦不利於任務之遂行。

另一方面，隨著人類文明、科技發展與生活素質的持續提昇，人們對於車輛駕駛的舒適性與操控性能之要求與日俱增，軍用車輛或因任務及用途與一般民用車輛有所差異，然其對於舒適性與操控性的性能要求則不分軒輊。

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之前提下，能增進悍馬車的舒適性，以作為未來本軍相關車輛研改之參考。

## 貳、文獻回顧與研究方法

傳統車輛懸吊系統為被動式懸吊系統，係藉由承載車身質量與非承載車身質量間之阻尼與彈簧來隔絕路面對車體所造成之振動干擾，此設計最大缺點之一就是其性能受到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，由於微機電系統之發展漸趨成熟，將懸吊系統元件加以整合並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。

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模式扮演了非常重要的角色，Tsao (1997) 提出一種力量消除之概念，此概念係將承載車身質量與非承載車身質量間之作用力隔絕，並運用虛擬阻尼和天勾阻尼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。運用力量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，而呈穩定狀態。

林豐澤 (2005) 曾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。基因演算法的基本理論是由 Holland (1975) 首先提出，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，以期望能產生較上一母代更優秀的子代，如此重複下去以產生適應性最強的最佳族群。

劉銘唐（2005）提出一種智慧型模糊基因算法，使用模糊控制的方式動態調整交配率和突變率以提升演化速度，該研究中並模擬馬達及主動式汽車懸吊系統，具有較快之演化過程、較少之模糊參數、及與較佳性能等優點。張惠珍（2006）則結合基因演算法，灰色理論、模糊理論與類神經網路，並將其應用於全車之主動式懸吊系統與倒單擺系統。

林筱增（2007）曾針對此最佳化問題以四分之一車模型進行懸吊系統研究，該研究中雖獲致不錯的結果，然而由於自由度先天之限制，對於車輛懸吊系統之實際狀況仍有改善空間，為了實現更佳的性能，二分之一車模型實為更接近實際之選擇。上述的控制模式必須事先選定阻尼比和彈簧係數，本研究中係採用 M998 悍馬車二分之一車懸吊系統模型結合基因演算法進行電腦模擬，先將主動式的設計與原有的被動式作性能相比較，以搜尋最佳主動控制參數，接下來再搜尋最佳被動元件參數，最後根據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

M1038 悍馬車的二分之一車主動式懸吊系統模型設計如圖一所示，其承載車身質量以  $m_s$  表示、非承載車身質量以  $m_u$  表示，並假設運動過程中輪胎係緊貼地面，並將輪胎模擬成一彈簧，其彈簧係數以  $k_t$  表示，假設所有的狀態變數均可藉由量測而得，而致動器可視為理想狀況，且每一個元件產生的非線性行為均可加以忽略，另車輛的承載車身質量可視為一個剛體，且須考量車輛之轉動慣量和俯仰運動的影響。

由圖一所示，此模型為一具備四個自由度的模型，因為此模型的動態方程式包含了車身承載質量垂直跳動和前後俯仰的運動，以及前、後輪胎的垂直運動。綜前所述，此模型的動態方程式可以表示為：

$$m_s \ddot{Z}_p = f_{pf} + f_{af} + f_{pr} + f_{ar} \quad (1)$$

$$I_p \ddot{\theta}_p = (f_{pf} + f_{af}) \cdot l_f - (f_{pr} + f_{ar}) \cdot l_r \quad (2)$$

$$m_{uf} \ddot{Z}_{uf} = -f_{pf} - f_{af} + k_{tf} \cdot (Z_{rf} - Z_{uf}) \quad (3)$$

$$m_{ur} \ddot{Z}_{ur} = -f_{pr} - f_{ar} + k_{tr} \cdot (Z_{rr} - Z_{ur}) \quad (4)$$

此處系統各項符號定義如后：

- $m_s$  : 承載車身質量
- $m_{uf}$ 、 $m_{ur}$  : 前、後非承載車身質量
- $f_{af}$ 、 $f_{ar}$  : 前、後致動器所產生之主動作用力
- $z_p$  : 承載車身質量中心的垂直位置
- $z_{uf}$ 、 $z_{ur}$  : 前、後非承載車身質量的垂直位置
- $I_p$  : 承載車身質量的俯仰轉動慣量
- $\theta_p$  : 承載車身質量的俯仰角度
- $z_{rf}$ 、 $z_{rr}$  : 前輪、後輪路面輸入
- $l_f$ 、 $l_r$  : 承載車身質量前、後端至質量中心的距離
- $k_{jf}$ 、 $k_{jr}$  : 前輪、後輪輪胎剛度

此外  $f_{pf}$ 、 $f_{pr}$  定義為前、後被動元件所產生的作用力，可分別表示為：

$$f_{pf} = -k_{sf} \cdot (Z_{sf} - Z_{uf}) - b_{sf} \cdot (\dot{Z}_{sf} - \dot{Z}_{uf}) \quad (5)$$

$$f_{pr} = -k_{sr} \cdot (Z_{sr} - Z_{ur}) - b_{sr} \cdot (\dot{Z}_{sr} - \dot{Z}_{ur}) \quad (6)$$

式中  $k_{sf}$ 、 $k_{sr}$  分別為懸吊系統前、後輪彈簧常數； $b_{sf}$ 、 $b_{sr}$  分別為懸吊系統前、後輪阻尼係數，另外若假設角度的變化量很小，則承載車身質量質心與前、後端相互間的關係式可以表示為：

$$Z_{sf} = Z_p + l_f \theta_p \quad (7)$$

$$Z_{sr} = Z_p - l_r \theta_p \quad (8)$$

其中  $Z_{sf}$ 、 $Z_{sr}$  分別為前、後非承載車身質量的垂直位置。

此控制系統分析與設計使用的參數係參考 Sleight 與 Agrawal(2004)之研究及悍馬車諸元表並自行模擬修訂而得，詳細數據資料如表 1：

表 1 懸吊模擬系統參數數值表

$m_s$ (Kg)	$m_{uf}$ (Kg)	$m_{ur}$ (Kg)	$I_p$ (kg·m <sup>2</sup> )	$l_f$ (m)	$l_r$ (m)
1,625.7	110	110	12,000	1.4173	1.8846
$k_{sf}$ (N/m)	$k_{sr}$ (N/m)	$k_{jf}$ (N/m)	$k_{jr}$ (N/m)	$b_{sf}$ (N·s/m)	$b_{sr}$ (N/m)
36,000	36,000	36,000	36,000	2,400	2,400

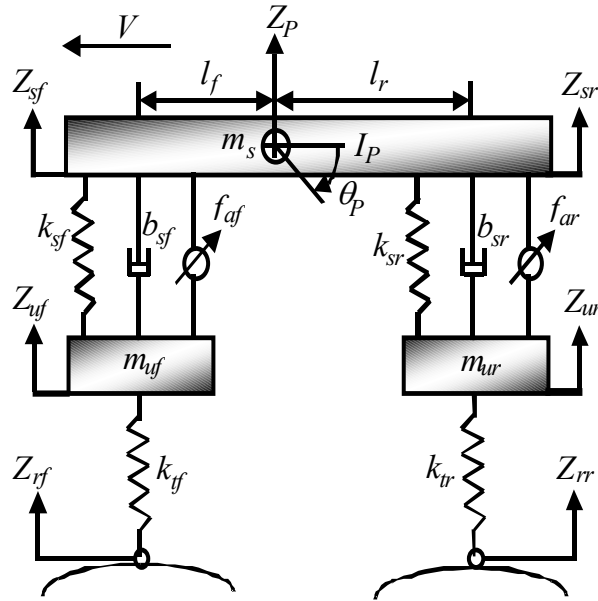


圖 1 M998 悍馬車 1/2 車主動式懸吊系統模型

## 二、控制模型

在本模型中，力量消除控制、天勾阻尼與路面跟隨彈簧、虛擬輪胎阻尼等概念將運用於主動懸吊系統之設計；其中力量消除控制模式的設計，係將承載車身質量與非承載車身質量相互間的干擾隔絕，而天勾阻尼和虛擬阻尼分別使承載車身質量與非承載車身質量呈穩定狀態，茲將這四個觀念分別說明如后。

由圖 1 之模型可以得知承載車身質量的動態方程式，並可得知施加在承載車身質量的被動作用力係由被動元件彈簧  $k_i$  和阻尼  $b_s$  所產生的，這些作用力將使得承載車身質量產生加速度，此加速度可能造成乘員不舒適的來源。吾人可以合理假設，若無任何的外力施加在承載車身質量，則其應為靜止的，故為改善乘員的舒適性，吾人希望能抵消由被動元件彈簧和阻尼所產生施加於承載車身質量的被動作用力。因此本研究的設計是：假設致動器可產生一個與被動作用力大小相等、方向相反同時施加在承載車身質量上的主動作用力，如此承載車身質量就能完全被隔絕而不受任何力的影響，亦可以認定承載車身質量的處於零加速度的理想狀況。

若採用上述的力量抵消概念，可能衍生幾個問題，分別敘述如後。首先是假設當作用力隔絕承載車身質量與非承載車身質量後，車輛本身可視為兩個分開的次系統，藉由觀察力量抵消後的動態方程式，承載車身質量的動態響應類似無阻尼的雙重積分器，這是易趨向於不穩定的系統，為了避免此狀況發生而使車體的運動趨近於穩定，須隨著慣性座標的變化適時回授承載車身質量的速度訊號，用來作為產生承載車身質量的阻尼效應，這就是天勾阻尼的概念。

其次，為求得較佳懸吊工作行程，在車體隨著路面的軌跡運動情況下，承載車身質量和路面二者之間可藉由回授其相對位移，使承載車身質量與路面間的距離維持在合理的行程內，也就是路面跟隨彈簧的概念。路面跟隨彈簧與天勾阻尼

相結合，可使承載車身質量動態響應趨於穩定，在此穩定狀況下，其軌跡運動將隨著路面低頻成分而變化。

最後的一個問題為，若假設承載車身質量與非承載車身質量間的作用力能完全地被抵消，則非承載車身質量將變成一個無阻尼的二階系統，從根軌跡圖的觀點來看，由於有一對複數極點在虛軸上，故仍為一不穩定的系統，為了穩定輪胎與路面的這個次系統，可利用回授輪胎與路面的相對速度來產生非承載車身質量的阻尼效應。非承載車身質量次系統的動態響應若能夠改善，則因路面不平度而引起的大幅度輪胎變形亦可以減少，換言之可以得到較佳的操控性。

藉由力量消除模式雖可抵消被動彈簧和阻尼的作用力，然因致動器產生之天勾阻尼、路面跟隨彈簧和虛擬輪胎阻尼的力會衍生額外的加速度作用在承載車身質量，故須同時調整天勾阻尼、路面跟隨彈簧和虛擬輪胎阻尼等參數，以達最佳化之目的。

二分之一車完整的控制架構如圖 2 所示。為了達到較佳之舒適性，意謂致動器所產生的主動作用力將用來平衡被動作用力，故在理想的情況下，將沒有任何外力作用在乘載車身質量上。因此前致動器將產生一作用力  $F_{bpf}$  以平衡前被動彈簧的作用力和前阻尼的作用力；同樣的後致動器亦將產生一作用力  $F_{bpr}$  用來平衡後被動元件所產生的作用力，此稱為二分之一車模型的力量抵消控制架構。

然而如前述之討論，單純的力量抵消觀念將導致乘載車身質量之不穩定，故仍須結合天勾阻尼觀念與路面跟隨彈簧觀念，使其趨向於穩定以得到較佳的舒適性。就二分之一車模型的主動懸吊設計而言，相對於乘載車身質量的前端， $F_1$  和  $F_2$  分別代表產生路面跟隨彈簧  $k_{mf}$  和天勾阻尼  $b_{mf}$  的作用力；而相對於乘載車身質量的後端， $F_3$  和  $F_4$  係代表產生路面跟隨彈簧  $k_{mr}$  和天勾阻尼  $b_{mr}$  的作用力。

此外為了降低乘載車身質量前端對後端的影響，將  $(z_{rf} - z_{sf})$  和  $(\dot{Z}_{sf})$  的訊號回授至後致動器，以補償乘載車身質量之俯仰響應。

此外在輪胎與路面的次系統中，當路面輸入的訊號接近次系統之自然頻率時，輪胎的變形量會因前述力量抵消觀念而變大，因此吾人利用虛擬輪胎阻尼觀念來防止輪胎的變形量變大，主動力  $F_5$  和  $F_6$  則用來提供足夠的前、後輪輪胎阻尼以改善操控性能。前述概念可以用下列公式來表示，由前、後致動器所產生的作用力可個別表示成八個部分，分別為：

$$F_{bpf} = k_{sf} \cdot (Z_{sf} - Z_{uf}) + b_{sf} \cdot (\dot{Z}_{sf} - \dot{Z}_{uf}) = -f_{pf} \quad (9)$$

$$F_{bpr} = k_{sr} \cdot (Z_{sr} - Z_{ur}) + b_{sr} \cdot (\dot{Z}_{sr} - \dot{Z}_{ur}) = -f_{pr} \quad (10)$$

$$F_1 = -k_{mf} \cdot (Z_{rf} - Z_{uf}) \quad (11)$$

$$F_2 = -b_{mf} \cdot \dot{Z}_{sf} \quad (12)$$

$$F_3 = k_{mr} (z_{rr} - z_{ur}) \quad (13)$$

$$F_4 = -b_{mr} \cdot \dot{Z}_{sr} \quad (14)$$

$$F_5 = -b_{yf} \cdot (\dot{Z}_{rf} - \dot{Z}_{uf}) \quad (15)$$

$$F_6 = -b_{tr} \cdot (\dot{Z}_{rr} - \dot{Z}_{ur}) \quad (16)$$

其中合力  $f_{af}$ 、 $f_{ar}$  分別為前、後致動器所產生主動作力之和，可表示為：

$$f_{af} = F_{bpf} + F_1 + F_2 + F_5 \quad (17)$$

$$f_{ar} = F_{bpr} + F_3 + F_4 + F_6 + k_{mrc} \cdot (Z_{rr} - Z_{sr}) + b_{mrc} \cdot \dot{Z}_{sr} \quad (18)$$

在解上述方程式時， $k_{mf}$ 、 $k_{mr}$ 、 $b_{mf}$ 、 $b_{mr}$ 、 $b_{yf}$ 、 $b_{tr}$ 、 $k_{mrc}$  和  $b_{mrc}$  等八個值須同時求解，因基因演算法具有此項功能且運用在全域最佳化的問題相當成功，故本研究將以基因演算法來搜尋控制參數。

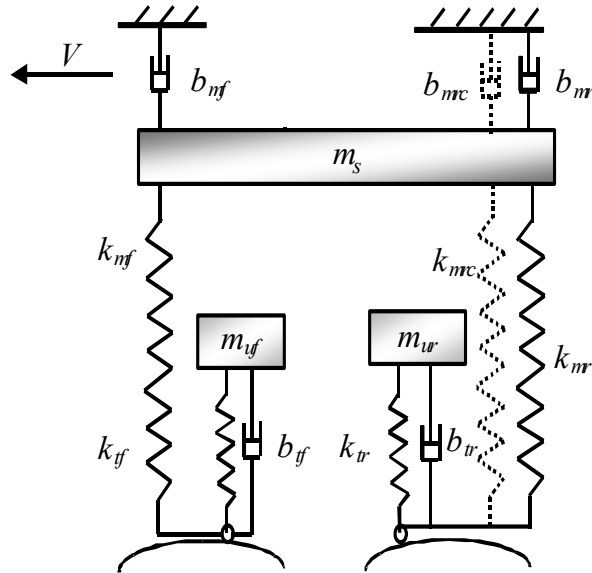


圖 2 完整的二分之一車控制架構

### 肆、基因演算法與控制參數之搜尋

基因演算法的三個主要的運算子分為複製、交配和突變，其功能分別說明如后：

- (1)複製：依據適應值的大小來決定在下一世代中應被淘汰或複製的個數多寡的一種運算過程，通常個別的適應值較高者，被選擇複製下一世代機率愈高。
- (2)交配：隨機地選取族群交配池中兩個個體的字串，彼此交換位元資訊，而形成新的世代族群個體。
- (3)突變：在族群中隨機選取任一個體的字串位元，並隨機選取突變點，改變字串位元資訊，以解決落入區域最佳值的情況。

基因演算法之運算步驟為：

- (1)將所要搜尋的參數，編碼成所謂的染色體的二元字串。
- (2)選定初始族群，且是由數個隨機產生的個體所組成。
- (3)計算每個個體的適應函數值。
- (4)透過複製、交配及突變等三項運算程序，搜尋新世代，直到滿足系統所設定之終止條件時。

本研究中之力量消除控制、天勾阻尼和路面跟隨彈簧、虛擬輪胎阻尼概念所產生之相關參數即為運用基因演算法所搜尋之最佳控制參數。而承載車身質量中心受重力所引起之垂直跳動和前後俯仰的運動和前、後非承載車身質量的垂直運動，在此須一併加以考量。

上述所有的設計觀念分別與前、後致動器結合作動後，其設計規則、評估方程式和目標函數等分別說明如後。本設計經理想化後，影響二分之一車模型舒適性、操控性及緊緻性的變數分別為：

$\ddot{z}_p$ ：承載車身質量的垂直加速度

$\ddot{\theta}_p$ ：承載車身質量俯仰運動的角加速度

$z_{uf} - z_{rf}$ ：前輪的輪胎變形量

$z_{ur} - z_{rr}$ ：後輪的輪胎變形量

$z_{sf} - z_{if}$ ：前輪的懸吊工作行程

$z_{sr} - z_{ur}$ ：後輪的懸吊工作行程

此處因較大的垂直跳動與前後俯仰運動的角加速度將降低舒適性，故  $\ddot{z}_p$  與



$\ddot{\theta}_p$  表示為影響舒適性能的重要因素；前、後輪的輪胎變形量的多寡將影響操控性，所以表示為影響操控性能的因素；而懸吊工作行程須考慮緊緻性，故 $(Z_{uf} - Z_{rf})$  和  $(Z_{ur} - Z_{rr})$  表示為影響懸吊工作行程的因素。

本研究中，選定每一個個體是由 96 個位元所組成，且平均分成八個等分，第一等分的 12 個位元，解碼後即為  $k_{mf}$  ( $F_1$  的係數值)、第二等分的 12 個位元，解碼後即為  $b_{mf}$  ( $F_2$  的係數值)、第五等分的 12 個位元，解碼後即為 ( $F_5$  的係數值)，其餘第三、四和六等分的值以此類推（解碼後即為  $k_{mr}$ 、 $b_{mr}$  和  $t_{rf}$ ），且前面六個編碼的範圍是介於 0-4095 間，另因補償乘載車身質量前端俯仰運動所形成的最後二個部分（解碼後即為  $k_{mrc}$  和  $b_{mrc}$ ）之編碼範圍係介於 -2048~2047 間，以滿足所有的可能性，因為最後二個部分係取決於乘載車身質量後端的動態響應，此外每個參數的真實值為解碼後的值乘以比例係數因子。

為了便於評估此模型性能，吾人參考 Foag and Grübel(1987)等人之研究，選定兩種路面作為輸入的條件，一為以每秒 40 公尺的速度前進之正弦曲線隆起路面，另一為以每秒 10 公尺之速度前進的陡峭斜坡路面，如圖 3 及圖 4 所示。

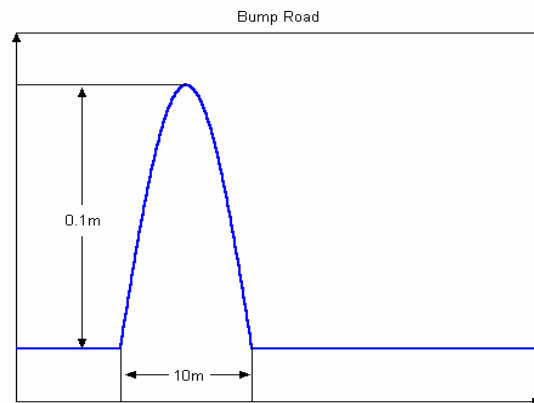


圖 3 正弦曲線隆起示意圖

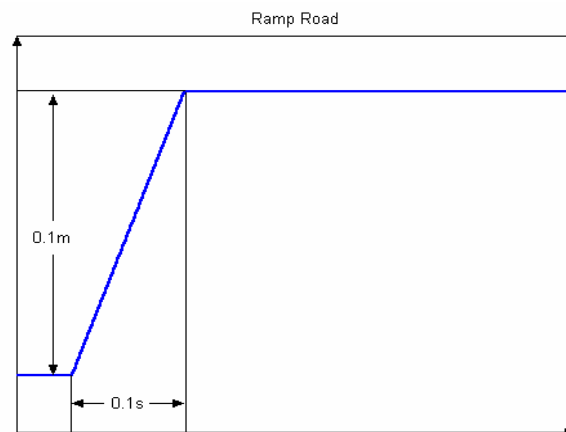


圖 4 陡峭斜坡路面示意圖

六個參數的設計條件經折衷取捨後，對影響舒適性及前、後端操控性和懸吊系統工作行程等參數的評估方程式可以表示為：

$$RQ = \sum_{n=1}^{N_f} \left[ \left( \ddot{Z}_p \right)_n \right]^2 \quad (19)$$

$$PA = \sum_{n=1}^{N_f} \left[ \left( \ddot{\theta}_p \right)_n \right]^2 \quad (20)$$

$$FH = \sum_{n=1}^{N_f} \left[ \left( z_{rf} - z_{uf} \right)_n \right]^2 \quad (21)$$

$$RH = \sum_{n=1}^{N_f} \left[ \left( z_{rr} - z_{ur} \right)_n \right]^2 \quad (22)$$

$$FS = \max \left\{ \left| \left( z_{sf} - z_{uf} \right)_1 \right| , \dots , \left| \left( z_{sf} - z_{uf} \right)_{N_f} \right| \right\} \quad (23)$$

$$RS = \max \left\{ \left| \left( z_{sr} - z_{ur} \right)_1 \right| , \dots , \left| \left( z_{sr} - z_{ur} \right)_{N_f} \right| \right\} \quad (24)$$

其中各項符號定義如下：

*RQ*：垂直舒適性指標

*PA*：俯仰運動指標

*FH*：前輪操控性指標

*FS*：前懸吊工作行程指標

*RH*：後輪操控性指標

*RS*：後懸吊工作行程指標

*N<sub>f</sub>*：資料取樣數據點的總和數

在路面輸入持續 2 秒與取樣數據點間隔時間為 5 ms 的情況下，目標函數一般可藉由個別的適應值計算而得，期方程式描述如下：

$$OBJ = u \cdot \text{ratio}RQ + v \cdot \text{ratio}PA + w \cdot \text{ratio}FH + x \cdot \text{ratio}FS + y \cdot \text{ratio}RH + z \cdot \text{ratio}RS \quad (25)$$

此處系統各項符號定義如下：

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

$\text{ratio}PA = PA / PPA$  (*PPA*：被動系統的 *PA*)

$\text{ratio}FH = FH / PFH$  (*PFH*：被動系統的 *FH*)

$\text{ratio}FS = FS / PFS$  (*PFS*：被動系統的 *FS*)

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

$\text{ratio}RS = RS / PRS$  (*PRS*：被動系統的 *ST*)

而係數值  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $x$ 、 $y$  和  $z$  為加權因子，表示六者之間的相對重要性。本研究中基因演算法的設計特點說明如后：

- (1) 每一個世代族群大小選定為 100 個個體。
- (2) 複製過程是依據適應程度高的個體、目標函數的值愈低，則在下一代中將被大量複製；反之則將被淘汰，其中適應程度的高、低係由適應函數來決定。
- (3) 交配過程是將複製完成的 100 個個體中，隨機地選擇 2 個個體實施交配，計區分為 50 對。
- (4) 突變過程是在母代 100 個個體中隨機地任選 20 突變點的位元資訊，以產生新的子代，突變率約為 0.2%。

完整的基因演算法設計程序流程圖，如圖 5 所示。

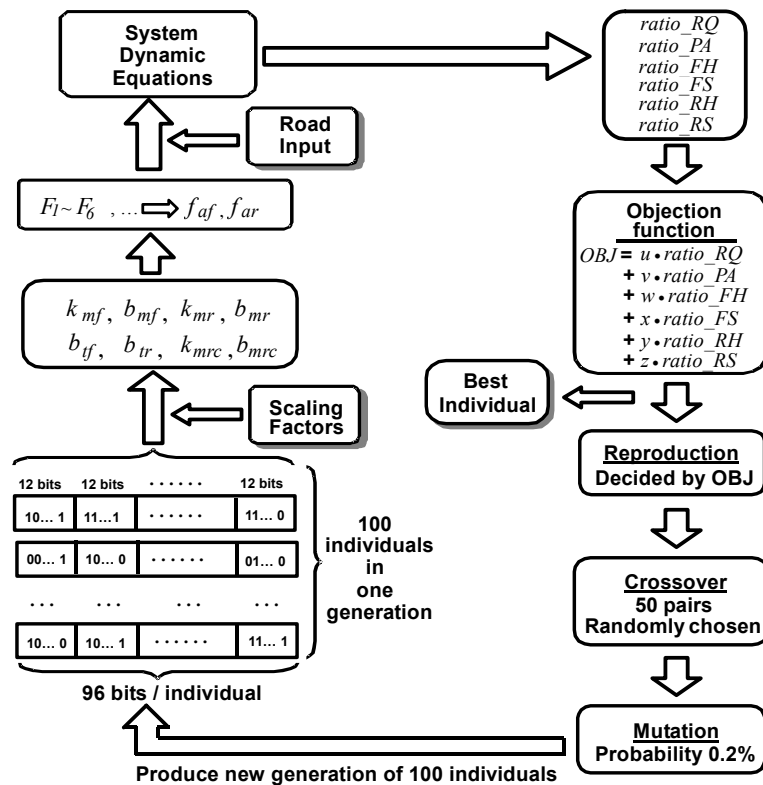


圖 5 基因演算法設計程序流程圖

## 伍. 模擬結果與討論

在運用基因演算法進行電腦模擬時，三個部分各類型終止運算條件均設定為 500 個世代，模擬分析之結果分別敘述如后：

## 一、搜尋最佳被動元件參數

假設在不實施主動懸吊設計的情況下，應可藉由搜尋最佳被動元件參數( $b_{sf}$ 、 $b_{sr}$ 、 $k_{sf}$ 、 $k_{sr}$ 、 $k_{ff}$ 和 $k_{fr}$ )改善其垂直舒適性、俯仰運動及前、後輪操控性和懸吊系統工作行程。故在本節中，僅以被動式原始元件參數值 $\pm 20\%$ 為限，希望在此範圍內搜尋更佳之被動元件參數，經適當選定加權因子後，以正弦曲線隆起路面、陡峭斜坡路面為輸入條件所獲致之模擬結果如表 2 所示。

比較表一得知，在正弦曲線隆起、陡峭斜坡等兩種路面各可取得一組較佳之被動元件參數，作為第二部份模擬之依據，惟此與現行懸吊系統真實性不符，因每部車輛不管它在行駛途中經過何種路面條件，它應僅有一組最佳被動元件參數，作為賦予車輛懸吊系統之原始參數，故為取得此組最佳被動元件參數，將兩種路面所搜尋的三種類型之加權因子、較佳被動元件參數互為基底，實施交叉比對，首先將正弦曲線隆起路面所屬三種類型較佳相關數據代入陡峭斜坡路面，在垂直舒適性及前、後輪懸吊工作行程的性能方面與原參數比較均有些微惡化，在俯仰運動及前、後輪操控性性能方面與原參數相當；其次，將陡峭斜坡路面所屬三種類型較佳相關數據代入正弦曲線隆起路面，在垂直舒適性及前、後輪懸吊工作行程的性能方面與原參數比較均獲得改善，在俯仰運動及前、後輪操控性與原參數比較均有些微惡化，如表 3 所示。比較本表各項性能參數及考量本研究係以改善車輛舒適性能為主，故選定最佳被動元件參數分別如表 4 所示，以作為陡峭斜坡路面類型 II 之數據，便於後續第二部分各項性能之模擬工作。

表 2 第一部份正弦曲線路面、陡峭斜坡路面模擬成果一覽表

case	正弦曲線路面			陡峭斜坡路面		
	類型 I	類型 II	類型 III	類型 I	類型 II	類型 III
u	1	3	7	1	11	23
v	1	3	7	1	9	21
w	1	3	7	1	7	17
x	1	7	17	1	21	99
y	1	3	7	1	5	15
z	1	5	13	1	17	81
ratio_RQ	0.685	0.682	0.684	0.727	0.714	0.732
ratio_PA	0.661	0.656	0.662	0.705	0.717	0.715
ratio_FH	0.660	0.661	0.660	0.585	0.586	0.585
ratio_FS	1.007	1.004	1.007	1.004	1.000	0.998
ratio_RH	0.686	0.683	0.686	0.665	0.668	0.684
ratio_RS	0.944	0.943	0.944	1.012	1.016	1.009
improvement	22.61%	17.55%	16.83%	21.68%	14.26%	9.14%

表 3 第一部份正弦曲線路面、陡峭斜坡路面交叉比對模擬成果一覽表

case	正弦曲線路面所屬數據代入陡峭斜坡路面						陡峭斜坡路面所屬數據代入正弦曲線路面					
	類型 I		類型 II		類型 III		類型 I		類型 II		類型 III	
ratio_RQ	0.685	0.838	0.682	0.824	0.684	0.839	0.727	0.664	0.714	0.652	0.732	0.684
ratio_PA	0.661	0.665	0.656	0.668	0.662	0.665	0.705	0.908	0.717	0.956	0.715	0.998
ratio_FH	0.660	0.611	0.661	0.609	0.660	0.610	0.585	0.700	0.586	0.712	0.585	0.718
ratio_FS	1.007	1.024	1.004	1.023	1.007	1.024	1.004	0.968	1.000	0.962	0.998	0.959
ratio_RH	0.686	0.644	0.683	0.644	0.686	0.644	0.665	0.672	0.668	0.670	0.684	0.678
ratio_RS	0.944	0.998	0.943	1.000	0.944	0.999	1.012	0.933	1.016	0.930	1.009	0.931
total ratio	0.774	0.797	0.825	0.850	0.832	0.857	0.783	0.807	0.857	0.859	0.909	0.896

表 4 懸吊模擬系統參數數值表

$k_{sf}$ (N/m)	$k_{sr}$ (N/m)	$k_{ff}$ (N/m)	$k_{tr}$ (N/m)	$b_{sf}$ (N·s/m)	$b_{sr}$ (N/m)
2.8824e+04	2.8813e+04	4.3175e+05	4.3119e+05	2.8065e+03	1.9374e+03

## 二、根據找到的最佳被動元件參數再搜尋最佳主動控制參數

前一步驟雖已找到被動式懸吊最佳的被動元件參數，但為了驗證本控制模型及搜尋方法是具體可行的，故將最佳的被動元件參數再結合主動式的懸吊設計，並運用基因演算法搜尋最佳主動控制參數，以期能更進一步改善垂直舒適性、俯仰運動及前、後輪操控性和懸吊系統工作行程。加權因子經適當考量後，以正弦曲線隆起路面、陡峭斜坡路面為輸入條件，個別之模擬結果如表 5 所示。由本表得知，在正弦曲線隆起路面性能方面，與最佳被動式懸吊系統比較，三種類型的垂直舒適性、俯仰運動和前、後輪操控性均獲得明顯改善；前懸吊工作行程各類型均稍有惡化、後懸吊工作行程僅類型 I 呈現稍微惡化外，其餘類型均獲改善。以垂直舒適性、俯仰運動和前、後輪操控性而言，三種類型均至少獲得 45% 的改善；在陡峭斜坡路面性能方面，與最佳被動式懸吊系統比較，三種類型除前懸吊工作行程呈現些微惡化外，其餘的垂直舒適性、俯仰運動及前、後輪操控性和後懸吊工作行程等均至少獲得 45% 的改善，另在兩種路面類型 III 模式，與被動式懸吊比較，前懸吊工作行程雖有約 10% 的些微惡化，但垂直舒適性、俯仰運動個別均至少獲得 50% 及 70% 的改善，由此可知，即使是於第一部分搜尋最佳被動元件參數時已改善其舒適性，惟結合主動式懸吊控制模式之設計理念，仍可大幅改善垂直舒適性、俯仰運動性能，由此可知，主動式懸吊控制模式結合基因演算法的運用，經模擬驗證，是合理可行，且確能改善舒適性。

表 5 第二部份正弦曲線路面、陡峭斜坡路面模擬成果一覽表

case	正弦曲線路面			陡峭斜坡路面		
	類型 I	類型 II	類型 III	類型 I	類型 II	類型 III
u	1	1	3	1	3	7
v	1	1	2	1	2	3
w	1	1	3	1	5	15
x	1	7	44	1	17	66
y	1	1	4	1	9	17
z	1	3	11	1	9	17
ratio_RQ	0.159(84.13%)	0.327(67.34%)	0.478(52.16%)	0.192(80.81%)	0.290(70.99%)	0.444(55.65%)
ratio_PA	0.223(77.67%)	0.222(77.83%)	0.280(72.02%)	0.075(92.49%)	0.153(84.66%)	0.167(83.35%)
ratio_FH	0.439(56.72%)	0.453(54.71%)	0.475(52.46%)	0.421(57.90%)	0.516(48.45%)	0.548(45.22%)
ratio_FS	1.198(-19.84%)	1.148(-14.78%)	1.108(-10.75%)	1.213(-21.31%)	1.143(-14.30%)	1.093(-9.27%)
ratio_RH	0.295(70.46%)	0.446(55.41%)	0.559(44.10%)	0.561(43.93%)	0.467(53.27%)	0.479(52.11%)
ratio_RS	1.090(-8.95%)	0.934(6.65%)	0.926(7.40%)	0.567(43.34%)	0.562(43.76%)	0.551(44.92%)
total ratio	43.36%	12.27%	3.62%	49.53%	27.88%	18.84%

在陡峭斜坡路面方面，主動式懸吊系統在類型 III 車身乘載質量中心的垂直起伏運動、俯仰角度及車身乘載質量前、後端位移和前、後輪懸吊工作行程與時間的動態響應關係，如圖 6~10 所示。

在正弦曲線隆起路面方面，主動式懸吊系統在類型 III 車身乘載質量中心的垂直起伏運動之動態響應軌跡較平滑，且在較短時間即可收斂，故可改善其垂直舒適性，如圖 11 所示。

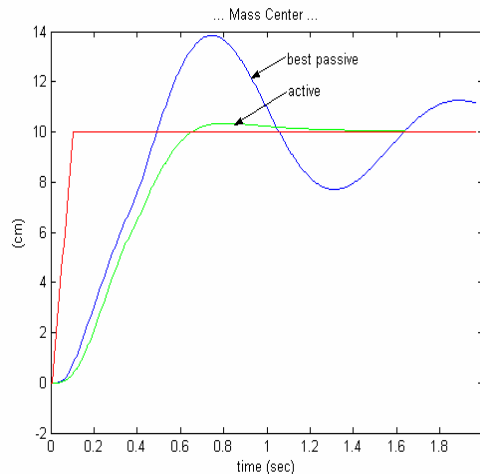


圖 6 第二部份斜坡路面類型 III 承載車身質量垂直運動與時間之關係圖

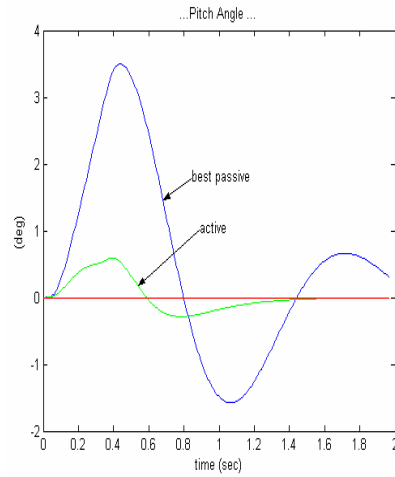


圖 7 第二部份斜坡路面類型Ⅲ 承載車身質量俯仰角度與時間之關係圖

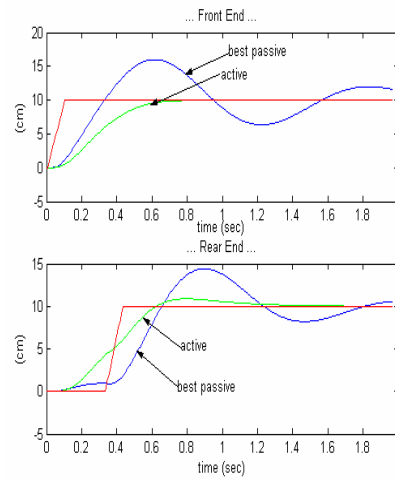


圖 8 第二部份斜坡路面類型Ⅲ 承載車身質量前、後端與時間之關係圖

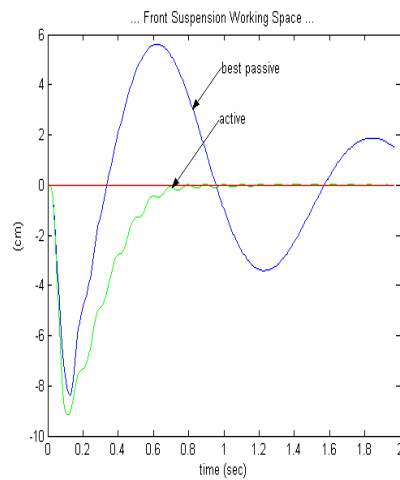


圖 9 第二部份斜坡路面類型Ⅲ 之前輪懸吊工作行程與時間之關係圖

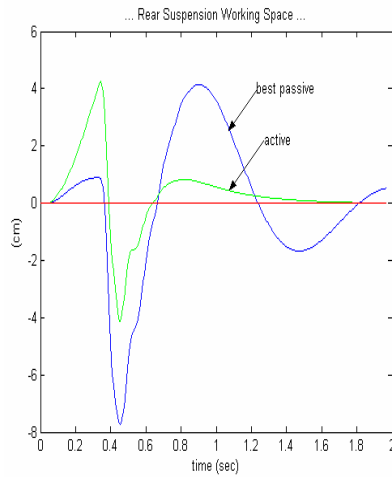


圖 10 第二部份斜坡路面類型Ⅲ後輪懸吊工作行程與時間之關係圖

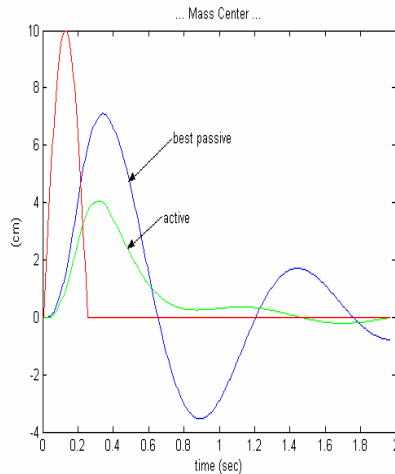


圖 11 第二部份正弦曲線路面類型Ⅲ承載車身質量垂直運動與時間之關係圖

### 陸、結論與建議

本研究係將主動式懸吊控制之設計理念，結合悍馬車二分之一車模型，以基因演算法進行電腦模擬。在車輛舒適性、操控性、及懸吊工作行程性能改善方面之結果說明如后：就二分之一車模型而言，主要係運用力量消除控制架構、天勾阻尼和路面跟隨彈簧、虛擬輪胎阻尼等概念；其中，力量消除控制架構可將承載車身質量與非承載車身質量的相互影響關係隔絕；且在力量消除控制架構下，天勾阻尼和虛擬輪胎阻尼係將承載車身質量與非承載車身質量個別的動態趨於穩定，而路面跟隨彈簧係是將承載車身質量的運動軌跡趨於穩定，在此穩定狀況下，其軌跡運動僅隨路面低頻成分而變化。

上述觀念結合主動式懸吊系統設計，經驗證係合理且可行的，可明顯改善其舒適



性、操控性（或僅稍微犧牲操控性）及懸吊工作行程，如表 6 所示。而運用基因演算法在搜尋參數過程中，於設定世代內均可有效率搜尋最佳被動元件參數及最佳主動控制參數，以改善承載系統相關性能。本研究係設定終此條件為 500 世代，而二個部分三種類型之收斂世代詳如表 7 所示。針對兩種路面之模擬結果，在俯仰運動、前輪操控性、以及垂直舒適性等三項平均改善達 54.58%、43.28%、以及 41.60%，僅在前懸吊工作行程一項中稍有犧牲。

表 6 二分之一車舒適性、操控性及懸吊工作行程性能改善一覽表

項次	正弦曲線路面		陡峭斜坡路面		平均值
	第一部份	第二部份	第一部份	第二部份	
垂直舒適性	+31.83%	+52.16%	+26.77%	+55.65%	41.60%
俯仰運動	+34.42%	+72.02%	+28.54%	+83.35%	54.58%
前輪操控性	+33.88%	+52.46%	+41.55%	+45.22%	43.28%
前懸吊工作行程	-0.37%	-10.75%	+0.20%	-9.27%	-5.05%
後輪操控性	+31.70%	+44.10%	+31.56%	+52.11%	39.87%
後懸吊工作行程	+5.66%	+7.40%	-0.93%	+44.92%	14.26%

表 7 正弦曲線路面、陡峭斜坡路面二個部份各類型收斂世代一覽表

項次	正弦曲線路面		陡峭斜坡路面	
	第一部份	第二部份	第一部份	第二部份
類型 I	414	449	451	392
類型 II	304	411	448	491
類型 III	482	482	499	399

### 參考文獻

- 林筱增、曹永智、陳炳英（2007），基因演算法於車輛懸吊系統最佳化之應用，*美和技術學院學報*，26（1），p. 173-188。
- 林筱增、陳炳英、曹永智（2004），基因演算法於M998悍馬車懸吊系統最佳化之研究，第九屆車輛工程研討會，桃園大溪，p.201-208。
- 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，p.1-28。
- 張惠珍（2006）。灰色理論與模糊類神經網路之研究及應用。國立中央大學電機工程研究所碩士論文，未出版，桃園。
- 劉銘唐（2005）。智慧型模糊基因演算法之研究-以馬達及汽車懸吊系統控制為例。南台科技大學電機工程研究所碩士論文，未出版，台南。
- Foag, W. and Grübel, G. (1987), Multi-Criteria Control Design for Preview Vehicle Suspension Systems, *Proc. IFAC 10th World Congress, Munich, Vol. 3*, pp.189-195.
- Holland, J. H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Sleight, R. T. and Agrawal, S. K. (2004), Dynamic Model of a Four-Wheel-Drive HMMWV, *28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference*.
- Tsao, Y. J. and Chen R. (1997), Parameters Searching for Force Control of Active Suspension Design by Using Genetic Algorithm. *Automatic Control Conference*, Taipei, Taiwan, pp.695-699.
- Tsao, Y. J. and Chen, R. (1998), Force Control for Active Suspension Design with Half Car Model by Using Genetic Algorithms, *AVEC'98*, Japan, pp.243-248.
- Tsao, Y. J. and Chen, R. (2001), Force Control for Active Suspension Design of a Half Car Model by Using Genetic Algorithms with Maximum Stroke Constraints, *P. of IMech., Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol. 215*, Issue: D3, pp.317-327.
- Yeh, E. C. and Tsao, Y. J. (1992), Fuzzy Control for Active Suspension Design, *Proceedings of '92 Symposium on the Intelligent Vehicle*, pp.92-97.
- Yeh, E. C. and Tsao, Y. J. (1994), A Fuzzy Preview Control Scheme of Active Suspension for Rough Road, *Int. J. of Vehicle Design, Vol. 15*, Nos. 1/2, pp. 166-180.

# Optimization of Vehicle Suspension System Using Genetic Algorithm- a Case Study of the Half Car Model

Hsiao-Tseng Lin\*, Y. J. Tsao\*\*, B. Y. Chen\*\*\*

## Abstract

In this study, control algorithms are developed for force control in an active vehicle suspension design using genetic algorithms with linear half car model of a M998 High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle. Force cancellation control scheme, skyhook damper and spring, road following spring, and virtual tire damper are employed in the design concepts, which are used to design the force controller to achieve better ride and handling quality. This research is divided into two parts. The first part is to find the best passive suspension parameters. And those passive parameters are used to find the best passive parameters of active system in the second part. It is demonstrated that the active control model converges within specific generations in the parameter searching processes. Computer simulations indicate that the improvements for pitching, front wheel handling and vertical ride quality are 54.58%, 43.28%, and 41.60%, respectively. And only front suspension stroke indicates minor degrading. This study will have potential contribution to future relevant research on vehicle suspension system.

Keywords: active suspension, genetic algorithm, half car model

---

\* Associate professor and Chair, Information Management Department, Meiho Institute Of Technology

\*\* Chung-shan Institute of Science and Technology. Armament Bureau. M.N.D.

\*\*\* Combined Logistics School

