

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

致動器特性對電聯車主動式懸吊系統影響分析

The Effects of the Actuator on the Active Suspension System of Mass Transit Vehicle

計畫編號：NSC 90-2212-E-034-001

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：吳俊仲

中國文化大學機械系

計畫參與人員：林仁生、廖俊榮

高雄捷運局

史訓誠

中國文化大學機械系

一、中文摘要

本研究以主動式懸吊系統取代被動式懸吊系統。為控制懸吊系統的動態特性，系統加入了控制器，該控制器包括比例、微分及積分增益，用來實現控制力量所使用的致動器也包含在整個研究的模式中，本研究建立主動式懸吊系統加入致動器動態特性後的數學模式作為研究探討的基礎，並探討致動器動態特性對系統動態特性的影響。

關鍵詞：捷運系統、軌道車輛、動態分析、振動

Abstract

The active suspension system is analyzed in this study. A PID controller is added to this active suspension system. The effect of the actuator on the rail vehicle is analyzed.

Keywords: Mass Rapid Transportation, Vehicle, Suspension, Vibration

二、前言

捷運系統雖然是便捷的大眾運輸工具，但列車行駛時所產生的振動常使車內的乘客感到不適，經由軌道系統的傳遞也會干擾軌道附近地區人們的生活。

捷運車輛行駛可能產生的振動來源可分為 1. 列車本身設備產生的振動 2. 車輛與軌道之間相互作用所產生的運動。而其中以第二項所造成的振動對人們及軌道的影響較為嚴重。

有許多方式可以防制捷運系統振動，例如(1)壓制車輛和鐵軌的振動(2)改進軌道系統(3)提供減振設備等。為了瞭解車輛

的動態特性及振動的傳遞，在[7, 8, 9]已建立了車輛的垂向與側向的動態數學模式，提供了列車減振研究的數學模式基礎。因為科技的進步，致動器與微處理器的價格大幅降低，使得應用在捷運系統上相當普遍，但應用在懸吊系統上則相當有限。

捷運車輛懸吊系統可以以主動式懸吊系統取代原有的被動式懸吊系統，而這主動式懸吊系統即是致動器，而致動器可由微處理來控制其運動。在[10, 11]已利用[7]所建立的數學模式進行探討，並將列車懸吊系統以主動式懸吊系統取代，並且能將行駛時所產生的振動降低，但所使用的致動器是完美的致動器，並未將致動器的動態特性予以考量，本研究將探討致動器的動態特性對系統特性的影響。

本研究將整合軌道車輛系統各子系統，包括車體、轉向架和車輪及各懸吊系統，建立合理的數學模式，懸吊系統係為主動式懸吊系統並將考量致動器的動態特性對系統動態的影響並探討其減振效果，研究列車於不同速度行駛時，因軌面的不平整、鐵軌本身的不平直所造成的振動，經由包含致動器特性的主動式懸吊系統，對車輛系統所產生的動態反應。

數學模式建立完成，可進行車輛轉向架之懸吊系統設計，進行振動防制之研究，即可加入阻尼器，或應用線性理論研究以致動器取代被動式懸吊系統之後，系統的反應及所產生的效果。

本研究完成後不但可瞭解主動式懸吊系統包含致動器動態情況下列車的動態特性，加入主動式懸吊系統時列車振動對車廂內乘客的影響，列車懸吊系統加入致動

器動態特性後的改變對列車振動的改變，也可分別從改變車輛懸吊系統進行防制振動的設計。而引入這些主動式懸吊系統的列車將是下一代新的列車。

三、數學模式的建立

車輛系統模擬成由車體、轉向架與車軸等部份組成。車體與轉向架主要以二次懸吊系統連接，轉向架與車軸主要以主懸吊系統連接。軌道對系統提供擾動或激振而這是互相作用亦即是車輛對軌道的作用力。

為瞭解車輛與鐵軌的相互作用的動態反應，整個系統的模式以一般捷運車輛為對象，其包含車體，前後端二個轉向架，每個轉向架包含二組車軸，四個車輪。

本研究所建立的數學模式中將作若干假設，舉例如下：

- (1) 車體、轉向架和車輪均為剛體，質量集中於質量中心(如圖一所示，分別是 CG_c 、 CG_b 和 CG_w)，其質量分別是 m_c 、 m_b 、 m_w 。
- (2) 車體、車輪和轉向架允許上下、左右運動(如圖一所示)。
- (3) 主懸吊系統與次懸吊系統假設為可簡化成是由彈簧和阻尼器組成，分別置於質量中心左方和右方。主懸吊系統與主動式次懸吊系統均為線性，並具有垂直方向的特性。
- (4) 主動式懸吊系統將取代被動式懸吊系統。
- (5) 每個自由度相關的運動很小，而在運動方程式中僅包含線性項。
- (6) 主動式懸吊系統的致動器動態特性為二次式動態方程式。

其他關於軌道與車輪亦有若干假設。

我們可以將車體、轉向架和車輪建立一個系統。整個系統初步假設為三個自由度受到來自軌面變化的動態系統。本系統可利用力學運動方程式分析方法導得運動方程式，其運動方程的一般式為

$$\ddot{w} + M^{-1}C\dot{w} + M^{-1}Kw = M^{-1}K_w\bar{X} \quad (1)$$

其中 M 、 C 、 K 、 K_w 為 3×3 矩陣，分別為質量、阻尼係數、彈性係數和轉動

慣量所組成， w 為各個剛體的位移， \bar{X} 為系統的輸入，輸入可分水平與垂直二方向的輸入，但此處為簡化，僅考慮垂直方向方程式(1)可經由轉換，即令 $X_1 = w$ ， $X_2 = \dot{w}$ 寫成狀態方程式

$$\dot{X} = AX + B\bar{X} \quad (2)$$

而

$$X = \begin{bmatrix} w \\ \dot{w} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K - M^{-1}C & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}K_w \end{bmatrix}$$

0 為 3×3 零矩陣， I 為 3×3 單位矩陣， \bar{X} 為 6×6 矩陣，系統運動方程式(2)作為懸吊系統為被動式的動態分析的基礎。

四、主動式懸吊系統

主動式懸吊系統將取代原有被動式懸吊系統，請參考圖(一)，而車輛其他部份均無改變。所謂主動式懸吊系統表以致動器取代原有的彈簧與阻尼。整個電聯車之次懸吊系統若以主動式懸吊系統取代，而車輛其他部份與原有的系統相同。整個系統的數學模式可以以下式表示

$$\overline{M}\ddot{\Phi} + \overline{C}\dot{\Phi} + \overline{K}\Phi = K_w\bar{X} + F \quad (3)$$

其中 \overline{M} 、 \overline{C} 、 \overline{K} 、 K_w 為 3×3 矩陣，分別為質量、阻尼係數、彈性係數和赫茲接觸彈簧剛度所組成， F 為主動式懸吊系統致動器的輸出，也就是對車體和轉向架的輸入，而 F 的輸出是由控制器來控制輸出的特性，而這些特性是由致動器來實現。

為了建立 F ，這裡將參考[5]的控制策略，假設車體相對於其座標的垂直位置是可以量測得到的。使用一個比例微分積分(PID)控制器，如下

$$F_1(s) = -(K_p + K_d s + \frac{K_i}{s})w(s) \quad (4)$$

其中 K_p 是比例增益， K_d 是微分增益， K_i 是積分增益， s 是 Laplace 變數。 K_p 與 K_d 相當於被動式懸吊系統的彈簧與阻尼係數， K_i 則是一積分器，即量測車體垂直位置 x_c 和車體要求的垂直位置 x_{cd} 比較(車體的座標定在車體質心， $x_{cd}=0$)，而其

差量經控制器輸入車體改變車體的動態。其中 $F_1(s)$ 是控制器的輸出而這需由致動器來實現，在本研究致動器的動態特性以二次式表示

$$F(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} F_1(s) \quad (5)$$

整個系統方塊圖包含控制器和致動器的動態特性如圖(二)所示。

五、軌道不平整

國內捷運系統對於軌道粗糙度與定線的不平整並無標準或統計資料，本研究將採美國鐵道標準資料作為輸入，這些包含軌道不平整激振將包括定線的不平整及軌面粗糙的不平整，將為二個方向的輸入。

其中軌道粗糙度與定線的不平整可以一函數來表示[6]，而這函數可以是位置的函數，也可以是頻率的函數，本研究將以頻率的函數來表示，其一般式如下式所示：

$$S_a(w) = \frac{A_a w_{2a}^2 (w^2 + w_{1a}^2)}{w^4 (w^2 + w_{2a}^2)} \quad (6)$$

式中 $w = f / v_0$ ， f 為頻率， A_a ， w_{1a} ， w_{2a} 為參數，方程式(6)將做為捷運車輛不同速度行駛於主線上之分析的輸入，引用隨機理論並結合上述傳輸函數可求得軌道車輛因受到軌道表面不平整與定線不平整因素，在不同的懸吊系統型式下所產生的系統動態反應。

方程式(6)可利用信號分析理論[3]，經由 inverse FFT 得到時域的函數，而這時域函數可作為系統的輸入，分析系統在時域上的動態反應。軌道不平整在時域上的輸入如圖(三)所示。

六、結果與討論

本研究建立的模式，除了可以探討控制器內比例、微分和積分增益的變化對系統動態反應的影響，即不同 PID 增益對控制器特性的影響。亦可將 K_p ， K_d ， K_i 設為定值，分別為 $0.12e^6$ N/m、 39000 Ns/m、 $1e^5$ N/sm，改變致動器動態特性，探討 w_n 變化時，對系統動態所產生的影響，模擬結果如圖(四)、(五)所示。當 w_n 大於

$100rad/s$ 時，致動器特性趨於完美，車體因受軌道不平整所造成的振動得到有效的改善，當 w_n 小於 $10rad/s$ 時，則系統漸趨於不穩定，致動器將無法實現控制器的輸出。

七、結論

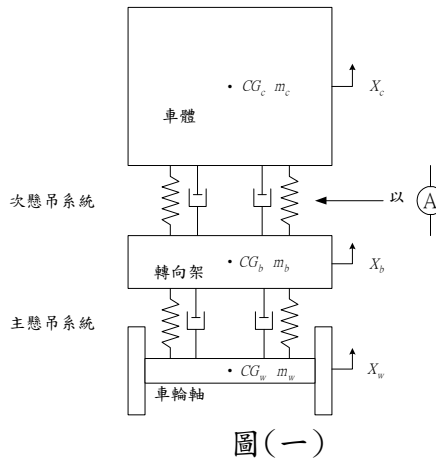
本研究結果使懸吊系統的設計進入新的領域，對未來捷運車輛懸吊系統的設計有深遠的影響。以主動式懸吊系統取代現有的被動式懸吊系統，降低振動是未來懸吊系統設計的一趨勢，系統加入了控制器，該控制器包括比例、微分及積分增益，用來實現控制力量，所使用的致動器也包含在研究的模式中。本研究所建立主動式懸吊系統加入致動器動態特性後的數學模式可作為研究探討未來捷運車輛懸吊系統設計的基礎，將使電聯車更舒適，安全性更高。

八、參考文獻

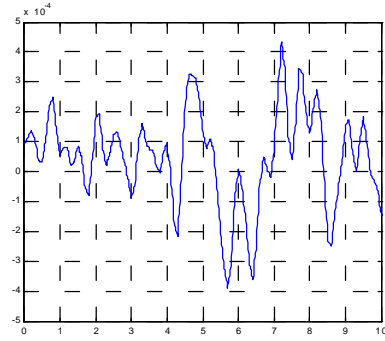
- [1] Eickhoff, B.M., Evans, J.R. and Minnis, A.J., "A Review of Modelling Methods for Railway Vehicle Suspension Components", Vehicle System Dynamics, Vol.24, 1995, pp.469-496.
- [2] Elkins, J.A. and Carter, A., "Testing and Analysis Techniques for Safety Assessment of Railway Vehicles, The State-of-the-Art", Vehicle System Dynamics Vol.22, 1993, pp.185-208.
- [3] Newland D. E, "An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis," 2nd edition, 1984, (longman Group, London)
- [4] "Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration," International Organization for Standardization, First Edition-1974-07-01, ISO 2631-1974.
- [5] RC Lin, D Cebon, DJ Cole, "An investigation of active roll control of heavy road vehicle", Proc. 13th IAVSD Symposium, Chengdu, China, 1993
- [6] Zhiyum Shen, "The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks", Supplement to Vehicle

System Dynamics, Vol. 23,1993, p.312.

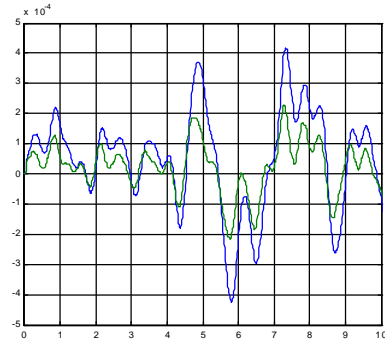
- [7] 林仁生、陳勇全，「捷運系統列車性能模擬」，機械工業雜誌，第184期，第197-203頁(1998)。
- [8] 林仁生、陳勇全、吳俊仲，「電聯車懸吊系統垂直方向特性分析」，機械工業雜誌，第185期，第250-257頁(1998)。
- [9] 林仁生、陳勇全、吳俊仲，「電聯車垂向與滾轉動態分析」，機械技術雜誌，第163期，第180-187頁(1998)。
- [10] 吳俊仲，「電聯車主動式懸吊系統研究」，國科會專題研究計畫報告，計畫編號：NSC 89-2212-E-034-0042000。
- [11] 林仁生、廖俊榮、陳勇全、吳俊仲，「電聯車主動式懸吊系統動態反應之頻率域分析」，機電整合雜誌，第26期，第93-98頁(2000)。



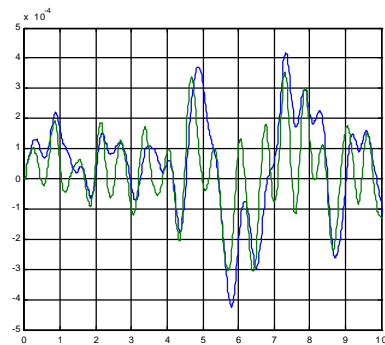
圖(一)



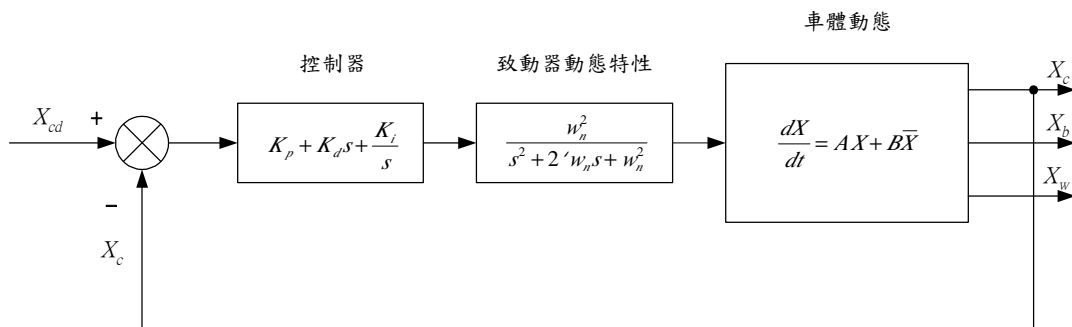
圖(三) 軌道不平整輸入，車速 60km/hr



圖(四) 實線：主動式懸吊系統，致動器及致動器動態特性取代 $w_n = 100 \text{ rad/s}$ ；虛線：被動式懸吊系統



圖(五) 實線：主動式懸吊系統，致動器 $w_n = 10 \text{ rad/s}$ ；虛線：被動式懸吊系統



圖(二)

