

以激勵信號改善液壓伺服控制系統 穩定性之研究

魏榮輝*

高英傑**

洪至謙**

*崑山科技大學機械工程系 助理教授

**崑山科技大學機械工程系 研究生

摘要

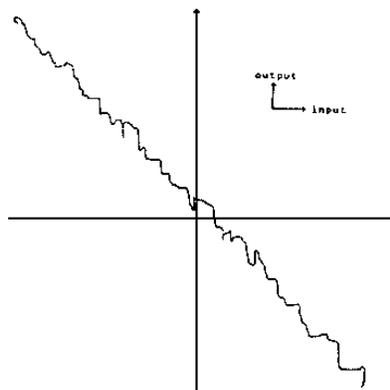
本文以信號穩定法消除液壓伺服控制系統之啟動量問題，並推導適當激勵信號(Dither)之波形、振幅與頻率。由分析結果得知，方形波激勵信號之對等增益為常數，故其最適合啟動量問題之消除，模擬結果亦證實合適之激勵信號亦可改善液壓伺服控制系統之頻寬。

關鍵詞：信號穩定法、啟動量、激勵信號、伺服閥

一、緒論

一般液壓伺服控制系統主要作用在於使輸入之電子信號轉變成輸出之機械動作，以便於控制機械裝置。在理想情況下，它的轉換函數為 1，但由於液壓伺服控制系統存在各種非線性特性如背隙(Backlash)、死區(Deadzone) 等之影響，實際未如此理想。為此而建立一套非線性模式以實際模擬整個液壓伺服控制系統的動作，對於機械裝置之模擬將變得相當複雜且耗費相當多之金錢與時間，故在此前題下，如何消除液壓伺服控制系統之非線性特性，乃非常重要之課題。

液壓伺服控制系統中由於內部各種非線性特性影響，將使整個系統之背隙值過大，此會造成機械裝置系統不穩定，而有極限圓(Limit Cycle)產生，造成裝置的失控。實際上，液壓伺服控制系統中由於內部各種非線性特性之影響，使得當輸入信號振幅減少時，輸出信號無法正確地比例於輸入信號。有時當輸入到達某一狀態時，即使給予輸入信號某些擾動量，輸出信號仍無動作。此種狀態稱為啟動量區域(Threshold Region) [1]。此種狀態是形成系統背隙的主要原因，經有些學者[2]研究後認為啟動量區域是具有時變特性之死區非線性元件(Time-Varying Nonlinearity of Dead Zone Type)。此現象之形成有兩種特性，一是靜態之死區，其出現主要係由於摩擦力造成。另一是動態之死區，是系統之背隙、磁滯或伺服閥之過疊量等非線性特性之綜合效應。圖一表示典型之液壓伺服控制系統的啟動量實驗測試結果[3]，其輸出/入特性表示啟動量問題可視為時變的非線性元件，由相同之測試可得知液壓伺服控制系統的最大啟動量值。



圖一 液壓伺服控制系統啟動量的實驗測試圖

信號穩定法是最常用來改善液壓伺服控制系統非線性問題的方法。此法係利用外加高頻信號加入非線性系統之適當位置以改善系統在低頻信號範圍之性能。此高頻信號亦通稱為 "Dither" 信號，此法係在西元 1957 年 Oldenburger[4] 首先發表，並為其它學者應用至許多領域。例如，控制與穩定法[15]、適應性控制系統[5]、脈波寬度調整系統[6]、與系統參數鑑定[7]。而分析此法之技巧又可分類為對等增益法[8]、雙輸入描述函數法[9]、統計法[10]、Warga 法[11]、泛函數分析法[12]與權重函數趨近法[13]。其中最為有效與實用之方法即對等增益法 (Equivalent Gain Method)，亦即為本文使用之方法。而消除起動量之方法亦已為許多學者[14]所探討，而本文利用信號穩定法消除液壓伺服控制系統啟動量則屬首創。

對不同之非線性元件選用適當之 Dither 波形是相當有趣之研究課題。對飽合元件 (Limiter) 使用正弦波與三角波之研究已為 Oldenburger 與 Nakada[15] 所探討。Oldenburger 與 Boyer[16] 則利用相似方法探討正弦波 Dither 對具各種不同非線性元件系統之影響。Oldenburger 與 Ochiai[17] 則利用三角波 Dither 消除含磁滯與飽合非線性元件系統的跳躍共振 (Jump Resonance) 現象。Wagner[5] 則應用方形波 Dither 於飛彈加力器的燃油率問題中。Simpson 與 Power[7] 討論使用三角波 Dither 於含磁滯與延遲 (Relay) 系統的穩定性問題。總之，週期性之 Dither 可是正弦波、三角波或方形波，其使用主要依據非線性元件之特性而定。因此，改變外加 Dither 之波形可適當的改變控制迴路之特性[18]。而 Dither 之振幅與頻率對非線性系統而言，則無如此之規則，但其頻率最少應為系統造成共振時之共振頻率的十倍[19]。

近年來，對於各類非線性伺服控制系統性能影響之研究亦是熱門話題[20]，而對於非線性元件之補償設計亦同[21,22]。本文對於使用適當 Dither 信號的波形、振幅與頻率於消除液壓伺服控制系統啟動量問題，將作深入之探討。

二、信號穩定法

在西元 1957 年，Oldenburger[4] 首先提出利用外加之正弦波至某些非線性系統之輸入處可降低或消除其自行振動 (Self-Ocillation)。由於此法對某些系統有穩定之效用，故稱為信號穩定法。而在信號穩定法中首先使用對等增益觀念的是 Oldenburger 與 Liu[8]，此法敘述如下：

首先考慮一函數型非線性元件 (簡稱 NL)，使得

$$y = NL(x) \quad (1)$$

此處 x 是輸入信號， y 是 NL 的輸出值。假如 x 是由 b 與 K_b 組成，即

$$x = b + K_b \quad (2)$$

此處 K_b 是輸入信號的低頻部份，而 b 為輸入信號的高頻部份（即 Dither 信號）。假設 A_v 代表 y 的平均值而 b 是一種高頻振幅的週期性波形，則 b 的平均值為零，故 K_b 為 x 的平均值。則 NL 的對等增益值 G_b [16] 可定義如下：

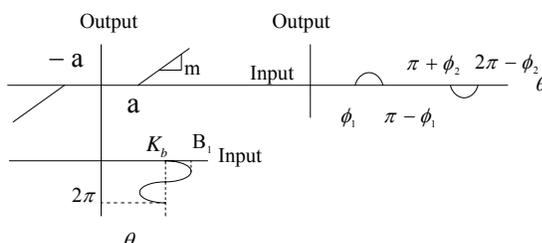
$$G_b = \frac{A_v}{K_b} \quad (3)$$

因此，對等增益 G_b 可用以代表 Dither 信號與原始非線性元件的組合。應用此種觀念於啟動量問題可敘述如下：

考慮啟動量區域的輸出 / 入特性，如圖二所示。假設 NL 的輸入信號式(2)可改變如下式：

$$x = K_b + B_1 \sin \theta = K_b + B_1 \sin(\omega t) \quad (4)$$

此處 Dither 為正弦波，亦可為三角波或方波。



圖二 啟動量區域的輸出 / 入特性圖

在式(4)中， B_1 與 ω 分別代表 Dither 的振幅與頻率。在圖二中 m 是 NL 的線性增益部份， a 是啟動量值，其中 a 為時間的函數。相對於一週期 NL 的輸出，則可表示如下：

$$\begin{aligned}
 NL(\theta) &= 0 & 0 \leq \theta \leq \phi_1 \\
 NL(\theta) &= m(K_b + B_1 \sin \theta - a) & \phi_1 \leq \theta \leq \pi - \phi_1 \\
 NL(\theta) &= 0 & \pi - \phi_1 \leq \theta \leq \pi + \phi_2 \\
 NL(\theta) &= m(K_b + B_1 \sin \theta + a) & \pi + \phi_2 \leq \theta \leq 2\pi - \phi_2 \\
 NL(\theta) &= 0 & 2\pi - \phi_2 \leq \theta \leq 2\pi
 \end{aligned} \quad (5)$$

此處

$$\phi_1 = \sin^{-1} \frac{a - K_b}{B_1}, \quad \phi_2 = \sin^{-1} \frac{a + K_b}{B_1}$$

輸出的 A_v 平均值可表示如下式：

$$A_v = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} NL(\theta) d\theta \quad (6)$$

將式(5)代入式(6)並且積分，則可產生下式：

$$A_v = \frac{m}{\pi} [K_b(\pi - \phi_1 - \phi_2) + a(\phi_1 - \phi_2) + B_1(\cos \phi_1 - \cos \phi_2)] \quad (7)$$

因此，正弦波 Dither 的對等增益值可表示如下：

$$G_b(\text{sin usoidal dither}) = \frac{m}{\pi} \left[\pi - \phi_1 - \phi_2 + \frac{a}{K_b}(\phi_1 - \phi_2) + \frac{B_1}{K_b}(\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \right] \quad (8)$$

以相似的推導方式可求得三角波 Dither 之對等增益如下：

$$G_b(\text{triangular dither}) = \frac{m}{\pi} \left[\pi - \phi_1 - \phi_2 + \frac{a}{K_b}(\phi_1 - \phi_2) + \frac{B_1}{K_b}(\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \right] \quad (9)$$

而使用方波 Dither 時，則可計算 A_v 如下：

$$A_v = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\pi (K_b + B_1 - a) d\theta + \int_0^{2\pi} (K_b - B_1 + a) d\theta \right] = K_b \quad (10)$$

因此，方波 Dither 的對等增益值可表示如下：

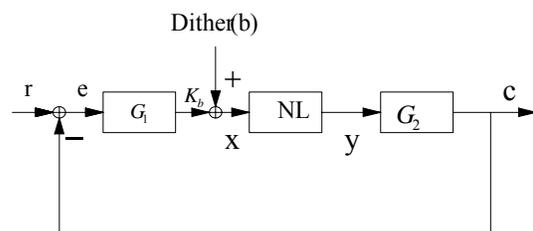
$$G_b(\text{square dither}) = m \quad (11)$$

由以上推導可知，方形波 Dither 是最適合於消除液壓伺服控制系統的啟動量，主要係由於其對等增益 G_b 為常數之故。

具有 Dither 信號的非線性迴授系統，可如圖三所示。圖三中之 G_1 與 G_2 為線性元件而 r 與 c 是此系統的輸出與輸入信號。假如方形波的 Dither 信號使用於圖三系統中，則啟動量的輸出 / 入特性可利用傅立葉函數分析求得如下式：

$$x = K_b + \frac{4B_1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)\omega t}{2n+1} \quad (12)$$

$$y = m \left[K_b + \frac{4(B_1 - a)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)\omega t}{2n+1} \right] \quad (13)$$



圖三 具 Dither 信號之一般非線性迴授系統

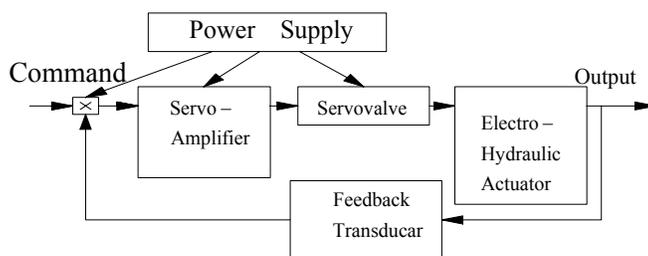
有關方程式(12)係非線性元件之輸入信號(方波 dither)之傅立葉展開式,而方程式(13)係非線性元件之輸出信號(方波 dither 通過啟動量後剩餘部份)之傅立葉展開式,假如式(13)中之 Dither 振幅 B_1 等於啟動量值 a ,則 Dither 輸出部份則可完全消除。實際上,液壓伺服控制系統的啟動量值是一種時變的死區非線性函數,即 a 是時間的函數。當振幅 B_1 不等於啟動量值 a 時,液壓伺服控制系統的低通濾波器特性 G_2 可被利用來過濾啟動量的輸出。因此, Dither 的振幅與頻率可由下式所決定,其中忽略了低頻部份,即式(12)中之 $K_b=0$ 。

$$|C| = \frac{4}{\pi} |B_1 - a| |G_2| \quad (14)$$

而方程式(14)係方波 dither 通過啟動量後剩餘部份,再經致動器(G_2)衰減後之量,即真正輸出值。此處 $|G_2|$ 是液壓致動器的增益值而 $|C|$ 是輸出信號值。因此, Dither 的振幅必須選擇接近啟動量值,而最理想值是啟動量最大值的一半。Dither 的頻率必需選擇使輸出值 $|C|$ 接近零時之最低頻率。

三、液壓致動器之數學模式

液壓伺服控制系統之主要功能方塊圖如圖四所示。伺服放大器是由線性放大器與補償器所組成。補償器主要用以補償誤信號與調整伺服閥之開度。本文之 Dither 信號是額外加在伺服放大器的輸出信號上,用以消除液壓伺服控制系統的啟動量問題。



圖四 液壓伺服控制系統的功能方塊圖

伺服閥之轉換函數詳細推導,已由 Merritt[14]所完成,可由二階之轉換函數代表其動態特性。

其型式如下：

$$G_v(s) = \frac{1}{1 + (2\zeta_v / \omega_v)s + s^2 / \omega_v^2} \quad (15)$$

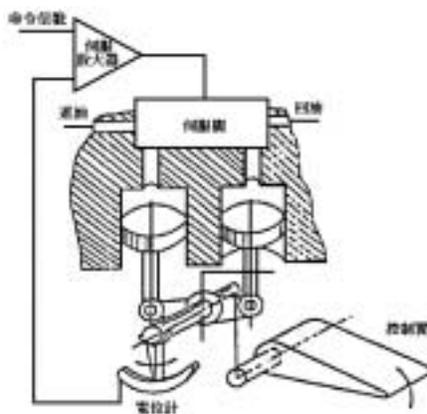
此處 ζ_v 是伺服閥的阻尼比而 ω_v 是伺服閥的自然頻率。

本文所使用之液壓致動器是屬於互推式結構，其示意圖如圖五所示，用以控制飛彈的尾翼的旋轉角度。在較小的操作區域中，致動器與尾翼之結構可視為剛體。因此，致動器的轉換函數可表示如下[23]：

$$G_a(s) = \frac{1}{s[1 + (2\zeta_a / \omega_a)s + s^2 / \omega_a^2]} \quad (16)$$

此處 ζ_a 是致動器的阻尼比而 ω_a 是致動器的液壓共振頻率。由以上之推導知，圖三之線性元件 G_2 可計算如下：

$$G_2(s) = G_v(s) \cdot G_a(s) \quad (17)$$



圖五 互推式液壓致動器的結構示意圖

四、 模擬結果與實驗驗證

圖五係飛彈用之互推式液壓伺服致動器，其各組件參數如下[23]：

最大啟動量區域值 $B_1 = 0.2 \text{ deg}$

伺服閥之阻尼比 $\zeta_v = 1.0$

伺服閥之自然頻率 $\omega_v = 1630 \text{ rad/sec}$

致動器之阻尼比 $\zeta_a = 0.05$

致動器之液壓共振頻率 $\omega_a = 628.3 \text{ rad/sec}$

因此，所需要 Dither 的最小頻率與致動器的輸出信號可由式(12)至式(17)求得，分析計算結果如表一所示。

表一 Dither 的最小頻率與致動器的輸出值

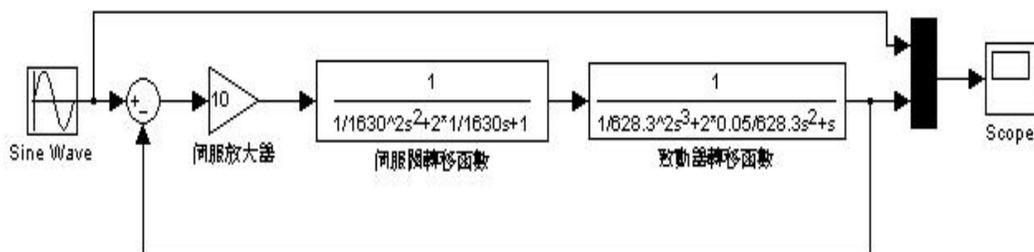
| 啟動量 | Dither | | | 致動器輸出值 | |
|------|--------|-------|--------|---------|---------|
| | 波形 | 振幅 | 頻率 | 振幅 | 相角 |
| 0.2° | 方波 | 0.1° | 285 HZ | 0.00032 | -44.58° |
| | 方波 | 0.05° | 350 HZ | 0.00042 | -59.48° |

由表一知，對消除此系統的啟動量，以 285 HZ 的頻率為佳。此結果顯示液壓伺服控制系統的啟動量問題，使用適當的 Dither 信號可有效的消除之。由分析結果得知，方形波 Dither 波形是最適合應用於消除啟動量問題，因其對等增益值為一常數。由分析結果得知，信號穩定法可適當預測所需之 Dither 信號。

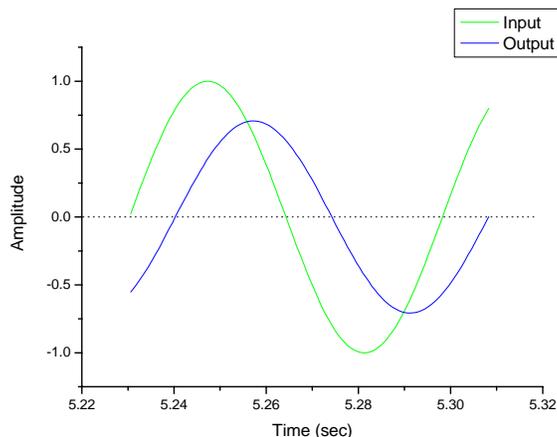
頻率響應設計方法是由奈奎士(Nyquist)及波德(Bode)兩人所發展，其主要的概念係在穩態時，當系統輸入一個正弦波時，系統會產生相同頻率的正弦波輸出，但是輸出響應信號的振幅會與輸入響應信號大不相同，這些不同值是頻率的函數。本文的最主要目的是在於說明，如何在使用 Matlab/Simulink 模擬軟體的環境下，利用此方法分析非線性系統的頻率響應，並產生相對應的增益值，使得無法使用頻率分析的非線性系統，在 Matlab/Simulink 軟體輔助下，得到所需要的頻率響應值。藉由此新方法可探討本系統在未加入與加入啟動量之後，此非線性系統頻率響應的差異性。

由於啟動量一非線性特性元件(Nonlinear Element)，故本文系統為一非線性系統，無法以傳統之拉式轉換法求得系統整體轉移函數。因此，本文使用 Matlab/Simulink 軟體建立圖三之液壓伺服控制系統模型，並進行模擬驗證在系統中加入 Dither 信號是否能夠改善啟動量的問題。

首先建立一個液壓伺服控制系統的線性模型，其不含啟動量與 Dither 的作用，如圖六所示。並以振幅為 1°的正弦波作為輸入信號，當輸出信號因為致動器低通濾波特性影響，輸出信號振幅衰減至 0.707 時，可算出此系統之頻寬為 14.7HZ，如圖七所示。

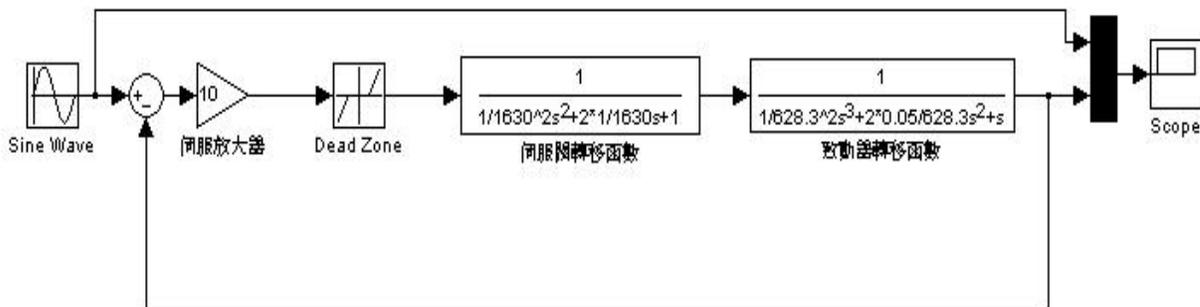


圖六 線性液壓伺服控制系統

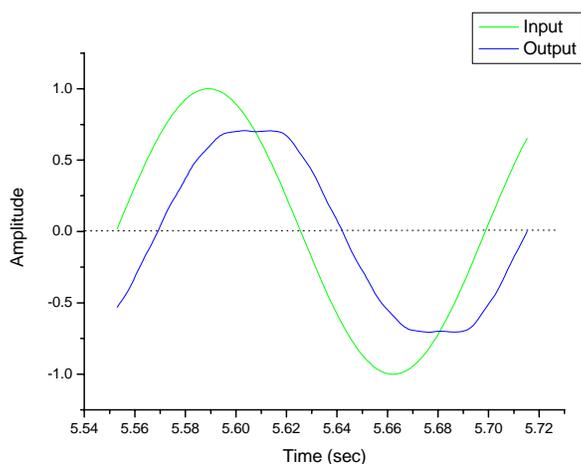


圖七 線性液壓伺服控制系統模擬結果

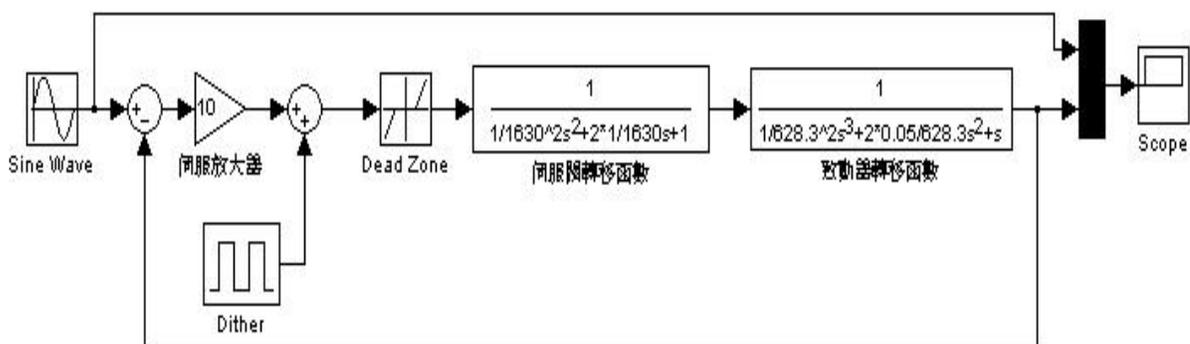
接著在線性液壓伺服控制系統模型中加入啟動量非線性元件，如圖八所示。而由模擬結果可以發現，其信號輸出的頻寬明顯下降，由計算得知頻寬下降至 6.8HZ，如圖九所示。最後在非線性液壓伺服控制系統模型中加入 Dither 信號，如圖十所示。由模擬結果可發現系統頻寬有回升的現象，計算結果得知頻寬回升至 11.5HZ，如圖十一所示，所以由模擬結果可證實在非線性液壓伺服控制系統模型中加入 Dither 信號，可有效改善伺服系統中非線性元件之影響。



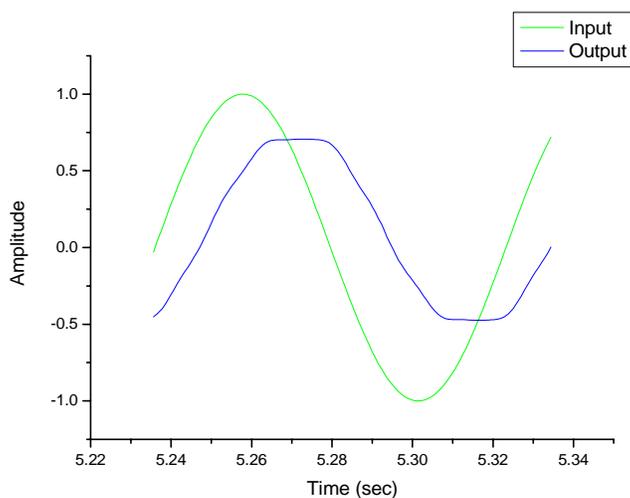
圖八 非線性液壓伺服控制系統



圖九 非線性液壓伺服控制系統模擬結果



圖十 液壓伺服控制系統加入 Dither 信號



圖十一 液壓伺服控制系統加入 Dither 信號之模擬結果

五、 結論

本文利用信號穩定法消除液壓伺服控制系統之啟動量問題，方法是利用在輸入控制信號處額外加入一種高頻低振幅之信號(Dither)以改善或改變液壓伺服控制系統的非線性元件特性，並完成整個控制系統的穩定性分析及性能分析，本文並推導出消除啟動量問題之合適的 Dither 波形、振幅與頻率。

由分析結果得知，方形波激勵信號之對等增益為常數，故其最適合啟動量問題之消除，模擬結果亦證實合適之激勵信號亦可改善液壓伺服控制系統之頻寬值。

本文採用飛彈控制翼為例之模擬，後續研究將考慮受控系統轉移函數及飛彈飛行時所受之空氣阻力，將使得本研究更為完整。

六、 參考文獻

- 1.Carrington J. E. and Martin H. R.(1965-66), Threshold Problem in Electro-Hydraulic Servomotors, Proc. Instn. Mech. Engrs, 180 : 881-894.
- 2.McCloy D. and MartinH. R. (1980), Control of Fluid Power : Analysis and Design, 2nd edition, Ellis Horwood.
- 3.魏榮輝，江志偉與高英傑(2004)，"以信號穩定法消除液壓伺服控制系統啟動量之研究" 中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會論文集，pp.1577-1582.
- 4.Oldenburger R.(1957), Signal Stabilization of a Control System, Trans. ASME, 79 : 1869-1872.
- 5.Wagner J. A(1972)., A Dither Technigue Applied to a Constant Fuel-Rate Problem, IEEE Trans. on Auto. Cont., Ac-17 : 162-164.
- 6.Oldenburger R. and Ikebe Y.(June 1967), Linearization of Time-Independent Nonlinearities by Use of an Extra Signal and Extra Nonlinearity, Trans. ASME, J. Basic Eng.,241- 250.
- 7.Simpson R. J.(1973), Use of High Frequency Signals in Identification of Certain Nonlinear Systems, Int. J. Syst. Sci. ,4 : 121- 127.
- 8.Oldenburger R. and Liu C. C.(1959), Signal Stabilization of a Control System, Trans. AIEE : Applications and Industry, 78 : 96-100.
- 9.Shinners S. M.(Feb.1971), Dual-Input Describing Function, Control Engineering,53-55.
10. Oldenburger R. and Sridhar R.(March 1962), Stability of a Nonlinear Feedback System in the Presence of Gaussian Noise, Trans. ASME, J. Basic Eng.,61-70.
11. Steinberg A. M. and Kadushin I.(March 1972), Stabilization of Nonlinear Systems with a Dither Control, Dep. Aero. Eng., Technion-Israel Inst. of Tech., Haifa, TAE Rep. 150.
12. Zames G. and Shneydor N. A.(1976), Dither in Nonlinear Systems, IEEE Trans. on Aut. Cont.,AC-21 : 660-667
13. Power H. M. and Simpson R. J.(1974.), Weighting Functions for Calculation of Equivalent Nonlinearities, IEEE Trans. on Aut. Cont., AC-19 : 284-286.

14. Merritt H. E.(1967), Hydraulic Control Systems, John-Wiley, New York.
15. Oldenburger R. and Nakada T.(1961), Signal Stabilization of Self-Oscillating Systems, IRE Trans. on Auto. Cont., Ac-6 : 319-325.
16. Oldenburger R. and Boyer R. C.(1962), Effects of Extra Sinusoidal Inputs to Nonlinear Systems, Trans. ASME, J. Basic Eng., 559-570.
17. Oldenburger R. and Ochiai S.(1967), The Second Describing Function and Removal of Jump Resonance by Signal Stabilization, Trans. ASME, J. Basic Eng., 357-364.
18. Gelb A. and Vander Velde W. E.(1968), Multiple - Input Describing Functions and Nonlinear System Design, McGraw-Hill, New York,6 : 345.
19. Garg D. P.(1978), Development in Nonlinear Controller Synthesis : An Overview, Trans. ASME, J. Dyna. Sys., Meas., and Cont., 100 : 59-69
20. 黃繼震(1999) :《飽合非線性對伺服系統性能包線之探討》”16th National Conference of the CSME,控制理論及應用(四) .
21. Chen C. Y. and Cheng C. C.(1996),”PID Control for a Transmission System with Friction Nonlinearity” 13th National Conference of the CSME, 202-209.
22. Chen C. F. and Chen Y. J.(2003),”Adaptive Road Friction Compensation,” 20th National Conference of the CSME,135-140.
23. 黃繼震(1990) :(液壓伺服致動器負載抖動問題之研究)《新新季刊》, 18 : 115-123.

Stabilization of the Hydraulic Servo System with a Dither Signal

Jong-Hwei Wei* Ying-Chieh Kao** Chih-Chien Hung**

*Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kun-Shan University

**Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Kun-Shan University

Abstract

This paper used a signal stabilization method to delete the threshold problem in an electrohydraulic actuator. In this study, the dither's waveform, amplitude and frequency are also determined. From the analytical results, the equivalent gain of the square wave dither was a constant, so it is mostly suited to delete the threshold problem. The simulation results also have proved that the electrohydraulic actuator's bandwidth can be improved by a suitable dither signal.

Keywords: Signal Stabilization Method, Threshold, Dither, Servovalve