

應用 HyPneu 於汽車底盤系統 之動態響應分析及設計

維美系統 莊耀隆

前言

汽車駕駛環境及操控性一直是汽車設計及製造的課題之一。然而影響這方面的因素幾乎完全取決底盤系統。但是不同人對於駕駛環境及操控性所要求的"品質"不同，例如年輕人與老人，男人與女人，可能都有他們相當主觀的"品質"要求。因此要設計一個固定型車子以適合不同"品質"要求是幾乎不可能的！更何況因為汽車底盤系統是由許多次系統所組成，而這些次系統除了完全為動態非線性系統外，其間都有非常密切的交互作用。這些交互作用及動態特性使得底盤系統設計工作變得相當複雜。

流體動力為汽車底盤系統的主要應用原理。例如汽車底盤系統中的懸吊系統、煞車系統、動力方向盤系統及避震系統都是利用流體動力學的原理設計的。而這些系統中的所有元件正是反應出汽車駕駛環境及操控性，甚至於安全性的主要因素。例如避震系統中阻尼閥的大小直接影響駕駛環境的品質；動力方向盤系統的設計壓力則直接關係到操控；煞車系統的壓力分配更直接影響汽車安全。然

而這些繁多且複雜的變數間除了彼此具有交互作用外，還幾乎都是非線性關係。如此複雜的系統要進行設計工作，並考慮到多方面的變數影響著實不易。

本文利用電腦輔助設計分析軟體 HyPneu[®]，針對實際汽車底盤之多項次系統進行動態模擬分析。所謂次系統包含：避震器、避震系統頻率分析、氣壓懸吊系統、動力方向盤系統、煞車系統等。文中並說明如何將底盤各次系統模式化，及如何完成動態模擬分析及設計關鍵。在模式化過程中，值得提出的是，流體動力系統與機械元件間交互作用的模擬為本文之關鍵技術。本文所使用的電腦輔助設計軟體為 HyPneu for Windows Version 5.9。HyPneu 為美國液氣壓重鎮：前流體動力研究中心 (Fluid Power Research Center, FPRC) 資深研究員所發展設計，目前由 BarDyne Inc. 負責產品的發展及推廣。此軟體由 C++ 語言寫成，為一完全圖形介面程式。HyPneu 內建 450 多種元件模式，包含液壓、氣壓、機械及電控等四大類。這些元件模式均以圖示代表，完全做到所謂視覺化模式的功能 (Visual Modeling)。使用者可直接以圖示的方式取用 HyPneu 所有元件的模式，建構自己的系統迴路，然後指定元件規格及特性，即可進行系統動態分析。

汽車底盤系統設計案例

一、避震器之設計模擬

汽車行進時本身就是一個動態系統。考慮震動時，其產生震動的原因非常多，例如路面平坦度、引擎震動、風向及風速等等。長久以來，汽車工程師一直努力避免讓這些震動干擾乘客，或者說盡量減輕乘客的震動。其中一個最直接有效的方法就是加裝液壓避震器，藉由控制液壓避震器之阻尼力，達到避震效果。結構上來看，如圖一所示，一個液壓避震系統基本上由一些液壓閥、壓力控制及能量分散元件所組成。然而如何調整這個液壓避震系統，使其產生

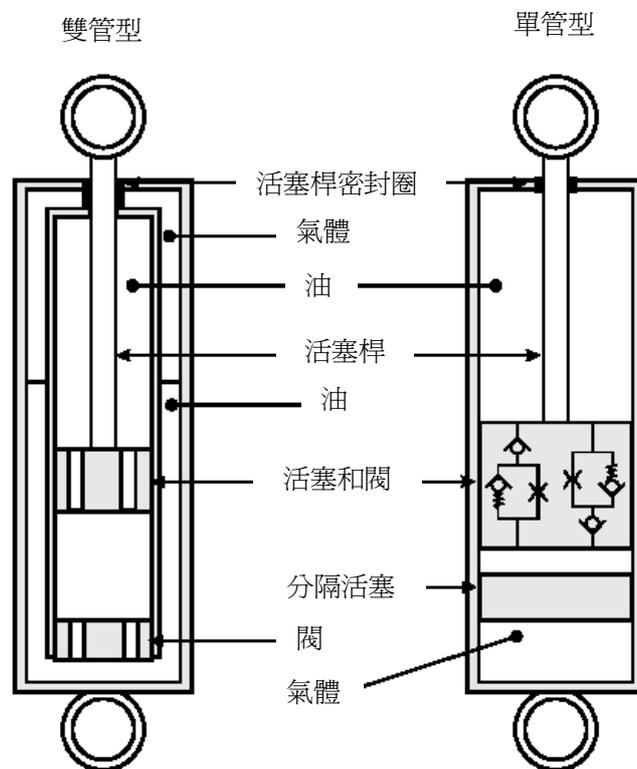


圖 1、汽車避震器 - 雙管型(左)、單管型(右)

應有的避震效果，卻是一門學問，甚至於是個"藝術"。因為如果阻尼比 (damping ratio) 太小，則系統無法提供足夠的流量阻力，所以無法有效分散衝擊所造成的能量；但如果阻尼比太大，可能會使輪胎與地面無法有良好的接觸，這會影響操控的安全性。如何設計好汽車避震器就成為兩難的問題。

常用的汽車避震器有雙管(twin tube) 及單管(monotube) 兩種型式，如圖1 所示。雖然它們各有優缺點，但無論是單管或雙管之避震器，所採用之原理其實是類似的。此處我們就單管之避震系統詳細探討，並用 HyPneu 進行動態模擬分析。結構上來看，單管避震器主要是有一氣室及活塞閥，其中活塞閥含有排洩口、排洩閥及止回閥等元件。就設計上來說，當汽車顛簸時，活塞大小、孔口大小、

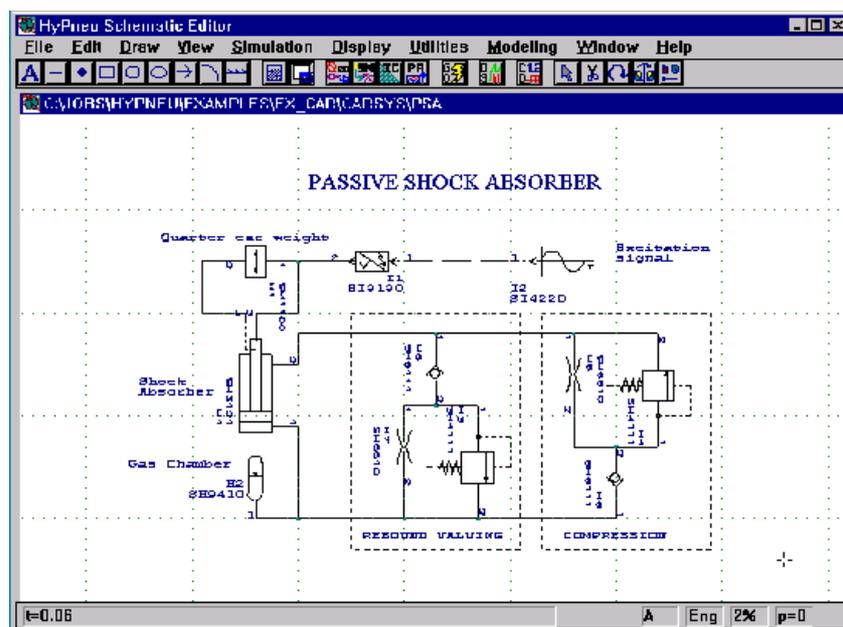


圖 2、使用 HyPneu 繪製單管汽車避震器迴路圖

排洩閥的選用及搭配等，對避震效果之影響甚鉅。如何決定上述之設計參數，才能設計出避震效果良好之避震器呢？此處我們將以 HyPneu 設計此避震器，並分析不同路面顛簸下造成不同之結果。

將單管汽車避震器用 HyPneu 繪成迴路圖，如圖2所示。吾人用一正弦波模擬路面的顛簸度，作用在汽車本身(mass)，活塞則由一液壓缸模擬，液壓缸兩端所接之元件為活塞內之排洩口、排洩閥及止回閥。至於氣室則由一蓄壓器模擬。利用繪成的迴路圖，賦予適當的元件規格及特性值，即可進行動態響應分析。所得之結果如圖3和圖4所示。其中圖3顯示避震器所受之力量受速度之影響；圖4顯示避震器所受之力量與位移(Displacement)之關係。根據此二圖之資料，調整設計變數，則可設計出一適當之避震器。

設計汽車避震系統必須注意的是路面之震動頻率直接關係到避震系統之設計參數，國外設計之汽車(進口車)是否適用於國內之路面，在買車時如果很在意避震效果則應注意一下；當然國產車是否有根據國內之路面重新設計或調整汽車避震系統參數，或只是依樣葫蘆根據原廠之設計在國內製造，則又是另一問題。以汽車避震系統而言，以國內之技術自行製造已沒問題，只要在設計上再花一點功夫，運用電腦輔助設計，國產車會更好。

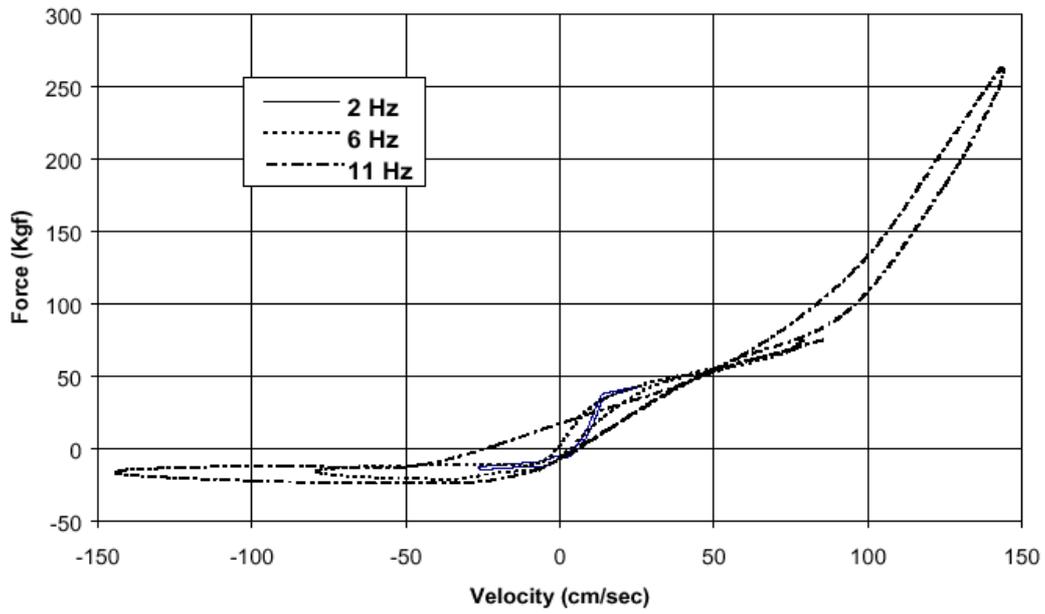


圖 3、避震器所受之力量受速度影響情形

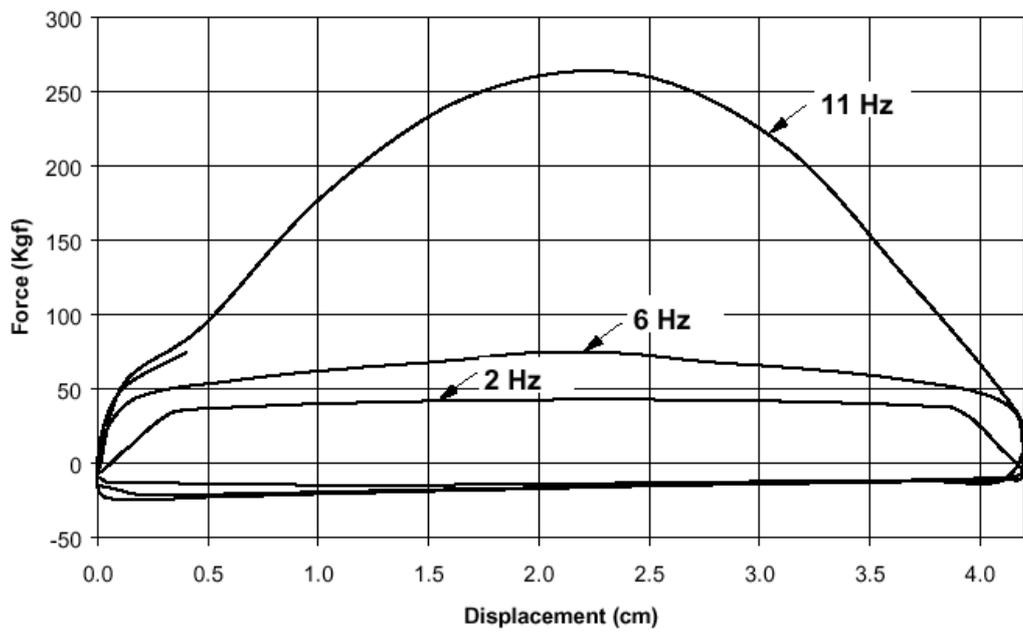


圖4、避震器所受之力量與位移之關係

二、汽車避震系統之頻率分析

在很多液壓系統中，頻率響應是設計時非常重要的考量。汽車避震系統便是常被用來說明頻率分析之重要例子之一。汽車四個輪子均各有一個懸吊系統，但其都由同一控制系統控制，因此分析汽車避震系統時，僅需就其中一個輪子(1/4 車)之系統分析即可。如圖5所示。以方波來代表路面之顛簸，車子與輪胎具慣量特性用質量表示，兩者之間為阻尼及彈簧效應元件，另外輪胎本身亦具彈簧效應。系統中各部分元件規格及參數如表2所示。

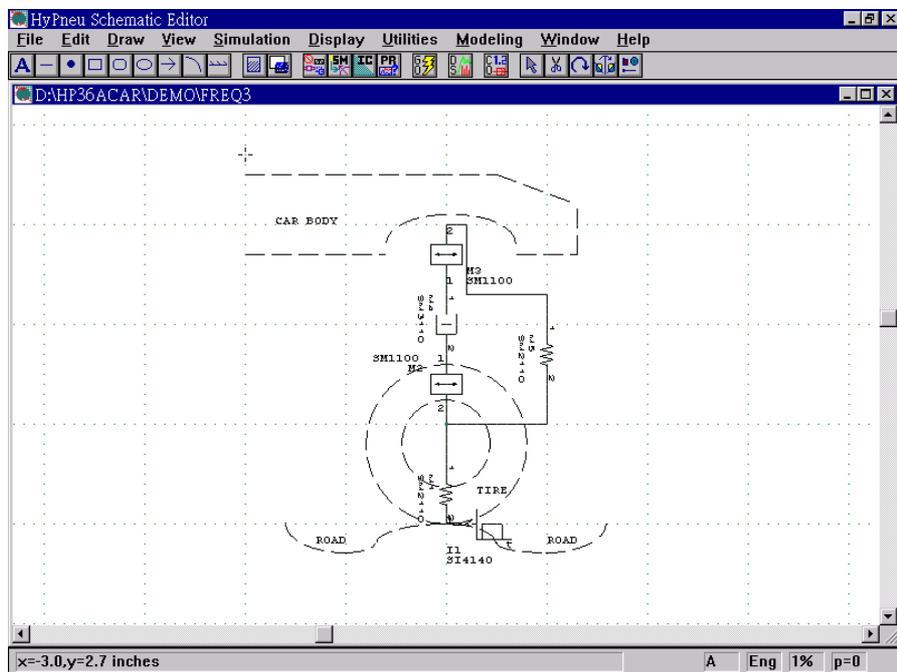


圖 5、汽車避震系統 HyPneu 迴路

表2、汽車避震系統元件規格及參數

元 件	規 格
1/4 車重	1220 lbf
輪胎重	90 lbf
Viscous Coefficient (車身與輪胎間)	12 lbf*sec/in
機械彈簧係數	130 lbf/in
Tire Stiffness	100 lbf/in

依表2之系統迴路及規格，用HyPneu進行動態響應模擬，結果如圖6所示。圖6下方方塊線為路面之起伏，圓圈線為輪胎因路面起伏而造成之震盪，三角線為汽車本体震盪情形。由圖中可看出，雖然輪胎與汽車本体之震幅差不多，但因頻率不同使人體感受則大不相同。在短時間內的震盪會對人體產生相當大的不適感，從圖6即可看出本避震系統將路面突然之落差吸收成較緩和之震盪情形。

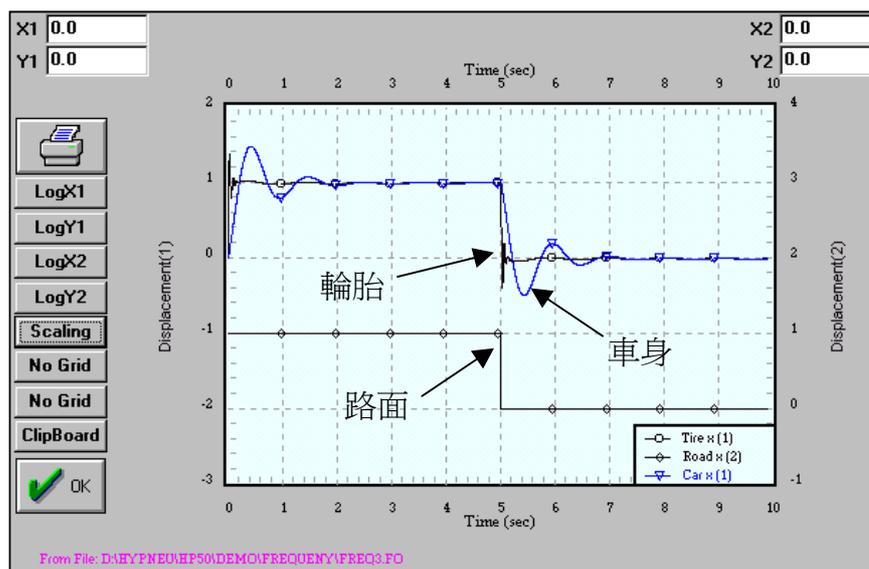


圖6、汽車避震系統動態反應分析圖

雖然汽車因路面顛簸造成震動可由避震系統減輕，然而乘坐之舒適度與避震器的自然頻率有直接的關係，而這又與避震器及其阻尼大小有關。利用 HyPneu 進行動態分析後，可緊接著進行頻率分析。圖7 為汽車避震系統由 HyPneu 分析並繪出之頻率分析圖。由圖7 可知，該車的避震系統約為 8 rad/sec 或約 1.2 Hz，在很多系統裏，頻率反應是一項非常重要的設計指標，經由 HyPneu 分析之結果，給工程師作為設計及選擇元件之參考。

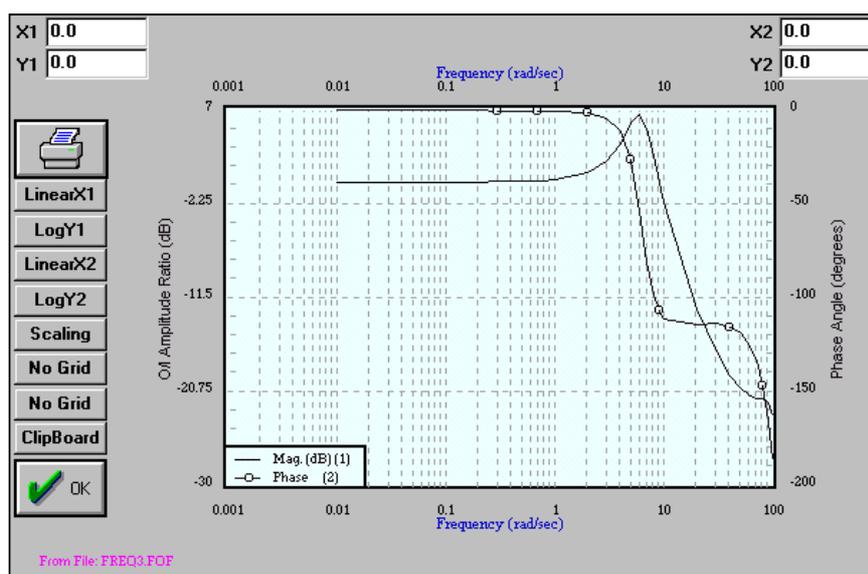


圖 7、汽車避震系統頻率分析圖

三、汽車氣壓懸吊系統分析

汽車氣壓懸吊系統通常運用在汽車(尤其是卡車)負重物時可調節置物櫃(台)之適當高度，其系統迴路如圖 8 所示。其中常被稱為氣壓彈簧(Air Spring)之氣壓缸，以非剛性的結構連接在每一輪子上，運用回授控制系統，控制空壓機供應氣體，以使汽車維持一定高度(不管負載重物或突然移除重物)。

本文利用訊號產生器元件及訊號轉換成力元件組合，模擬於時間第 1 秒時，汽車突然負載 250 lbf 重物，於第 10 秒時移除。系統由一邏輯控制器檢知回授之氣壓缸位移，然後控制方向閥打開排氣(重物負載時)或控制空壓機啟動(重物移除時)。部分元件之規格及特性值如表 3 所示。

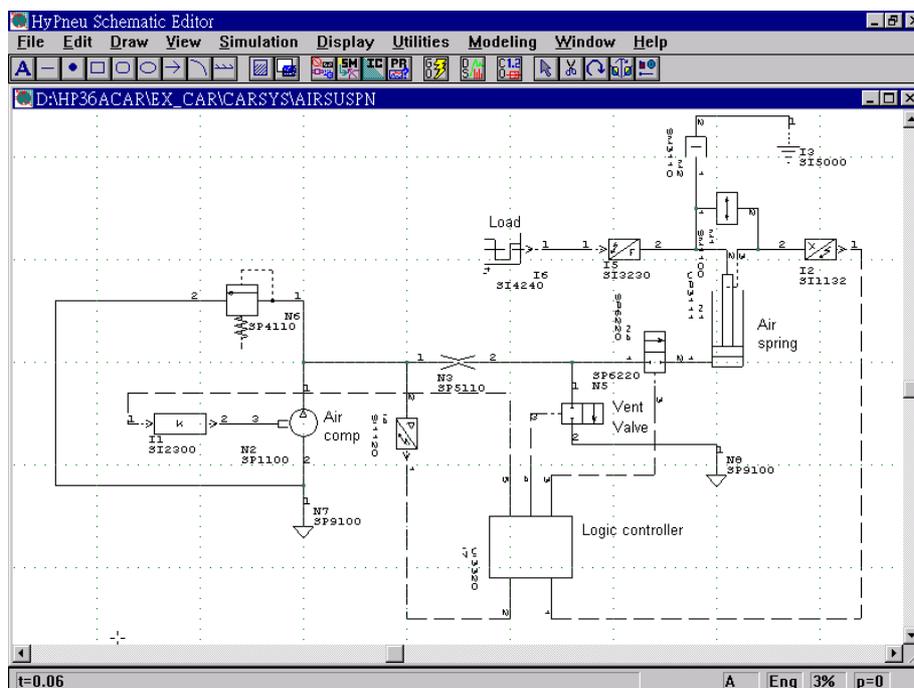


圖 8、汽車氣壓懸吊系統迴路

表3、汽車懸吊系統之部分元件規格及參數

元 件	規 格
汽車重量	1000 lbf
訊號產生器(產生控制負載或移除訊號)	第1秒時承載重物 第10秒時移除重物
負載物重量	250 lbf
流量調節閥	閥係數=0.2
邏輯控制單元	特殊控制策略(自建)

根據表3中元件特性值，使用HyPneu分析結果如圖9 及圖10 所示。圖9 表示氣壓缸之位移(即汽車置物架之高度) 隨時間之變化情形。氣壓缸負載原來正常車重1000 lbf時，此時汽車置物架高度為10呎處(設定點)。當 1 秒時，車子突然增加負重 250 lbf，置物架位置突然降為 9.1 呎，此時控制系統驅動空壓機慢慢地打入氣體增壓，使置物架恢復原有之位置。由圖9顯示，置物架無法完全恢復至10呎之位置的原因是控制策略中 Dead Band 被設定為 10 ± 0.1 呎。當第10秒時，重物突然移除，置物架則突然上昇至 11.25 呎，此時控制系統收到回授之訊號，再度調整置物架之位置回到 10 呎處。圖10 則表示整個過程中氣壓缸內之壓力及流量之動態變化圖。其中流量部份，在HyPneu 的表示方法：流出元件(指氣壓缸)為正流量；流入元件則為負流量。因此圖中有負流量出現。當車子突然負重 250 lbf，氣壓缸之瞬態最高流量為 +12 SCFM(正號表示流出)。當車子突然

移除重物時，氣壓缸之突然最高流量為-16 SCFM(負號表示流入)。

當設計氣液壓系統時，為確保其可行且有效率，事前之分析是非常重要的。在以往大部份只進行穩態分析，計算繁複的動態分析常被省略，但系統出問題經常多是動態的關係，這也是動態分析逐漸被重視的原因。運用 HyPneu 您可輕易的完成動態分析，確認系統之可行性及安全性。

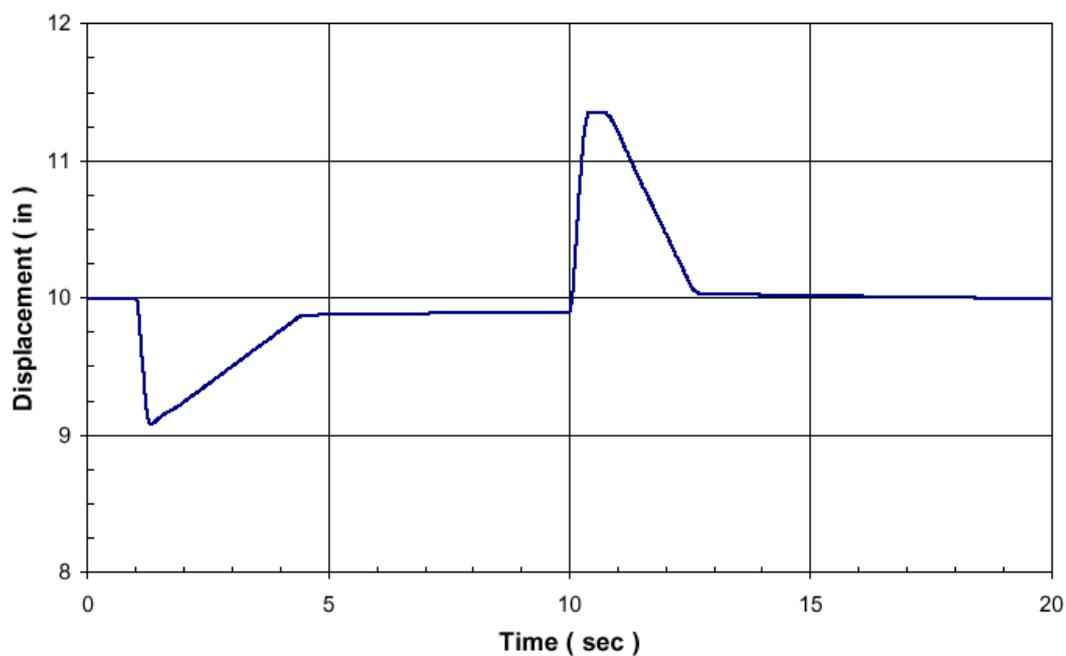


圖 9、汽車氣壓懸吊系統作動分析圖

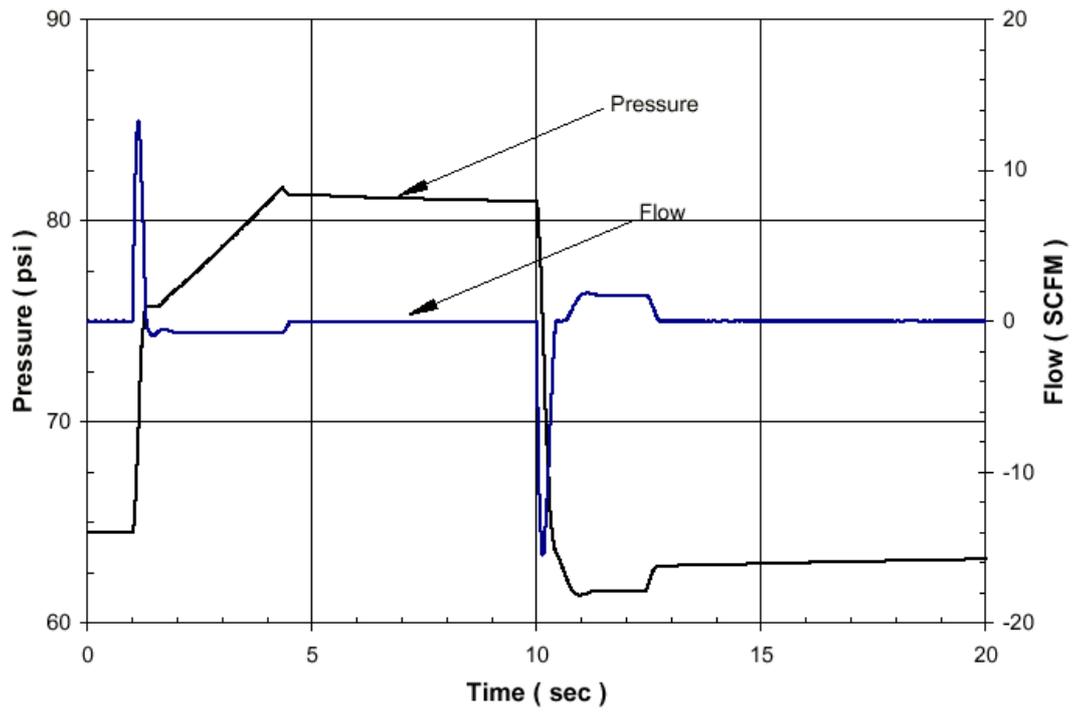


圖 10、系統中壓力及流量之動態分析圖

四、汽車動力方向系統分析

現代汽車大量使用輻射胎以增加輪胎摩擦力，再加上使用前輪驅動系統，使汽車大部份重量均落於前輪，因此動力方向系統之需求愈來愈殷切，甚至有被列為標準配備之趨勢。本文亦將運用HyPneu模擬汽車動力方向系統之設計及分析。舉一較代表性之設計為例，如圖11所示。結構上來看汽車動力方向系統主要由以下重要元件組成：方向盤(Steering Wheel)、旋轉方向閥(Rotary Steering Valve)、動力輔助系統(Pump)、方向主缸(Steering Cylinder)、機械式回授器(Mechanical Feedback)、聯桿及輪子。整個系統作動說明如下：方向盤由一連桿連接到旋轉方向閥，旋轉方向閥同時也接受方向主

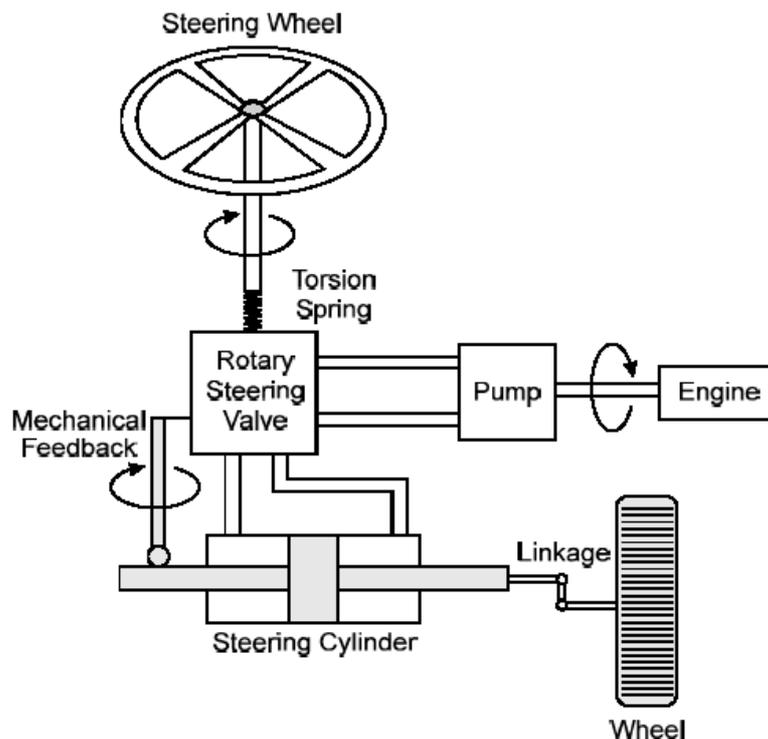


圖 11、汽車動力方向系統示意圖

缸由機械式Rack回授回來之訊號。而動力輔助系統之作動取決於旋轉方向閥之壓力增加。旋轉方向閥驅動方向主缸再經由聯桿推動輪子以控制方向。

設計此系統時工程師想知道的是：1. 系統是否能有效控制車子方向？ 2. 當方向盤轉動時，動力輔助系統如何適當的輔助方向盤產生扭力？ 3. 方向盤以快速來回旋轉或不正常操作時車子是否會產生不正常之現象(例如:震動或失控)？

利用 HyPneu 解決設計問題。將汽車動力方向系統用 HyPneu 繪成迴路圖，如圖12所示。分析此系統時，由於元件較多，故僅列舉

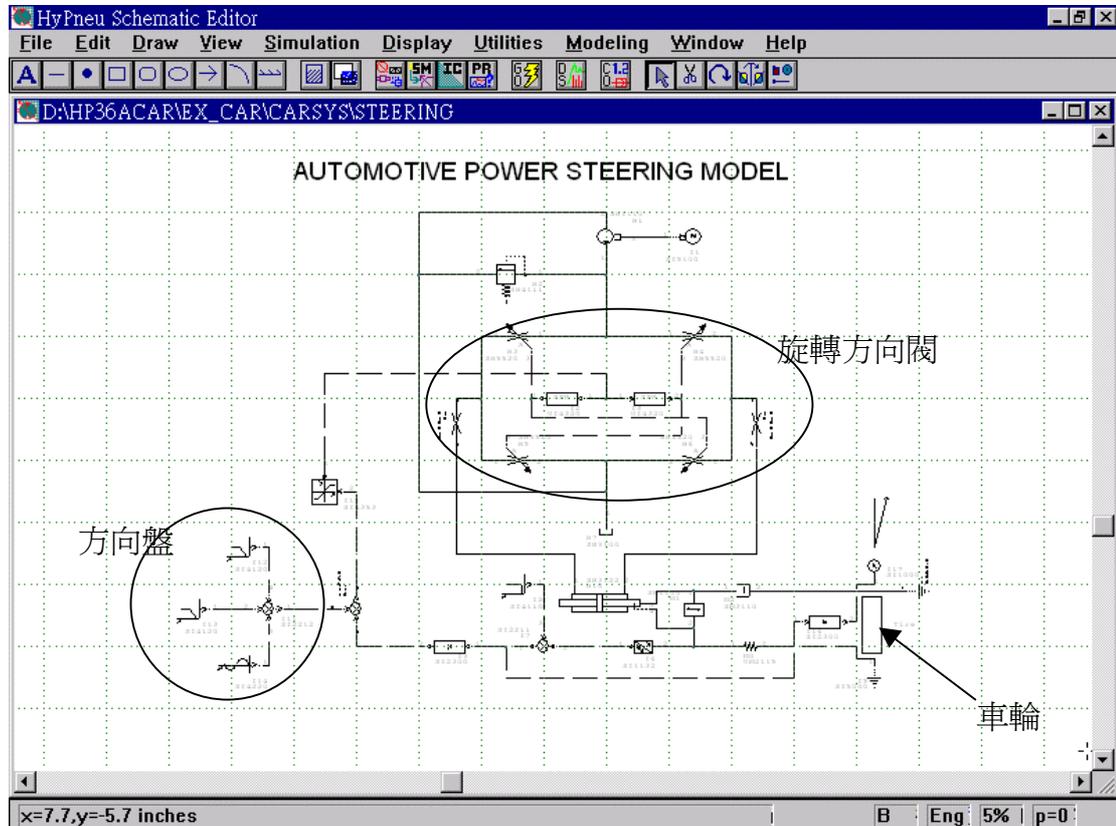


圖 12、汽車動力方向盤系統迴路圖

重要之元件資料，如表4 所示。

表4、汽車動力方向系統之主要元件資料規格

元 件	規 格 (資 料)
Pump	9.5 liter/min at 1000 rpm
方向主缸	diameter 4.0 cm rod diameter 1.25 cm, stroke 40 cm
旋轉方向閥	the combined flow area is assumed to be linear to valve displacement (X_v) as $0.065 + 0.01 * (X_v)$ for opening $0.065 - 0.01 * (X_v)$ for closing.

利用HyPneu進行動態響應分析，結果如圖13、圖14所示。其中圖13說明壓力變化分析，如果將旋轉方向閥至方向主缸之接口堵死，當方向盤旋轉角度漸增時(由0°到6°)，其造成旋轉方向閥之開度變化及壓力增加情形如圖13所示。圖14則表示整個系統操作效能分析。如果將方向盤在1秒內向右旋轉180°，再以左右各100°之幅度、頻率為 2 Hz 速度來回轉動方向盤，其造成方向主缸之位移變化情形如圖14所示。依圖中所示車子之方向控制良好，但如果增加來回轉動方向盤之頻率，則可能會造成系統之不穩定。

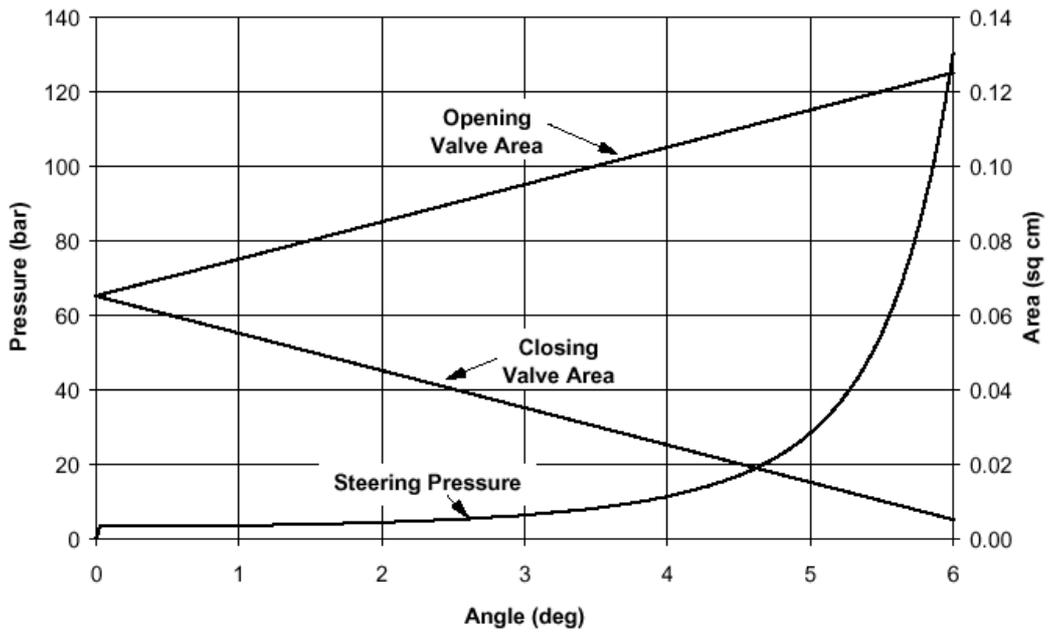


圖 13、旋轉方向閥之開度變化及壓力增加

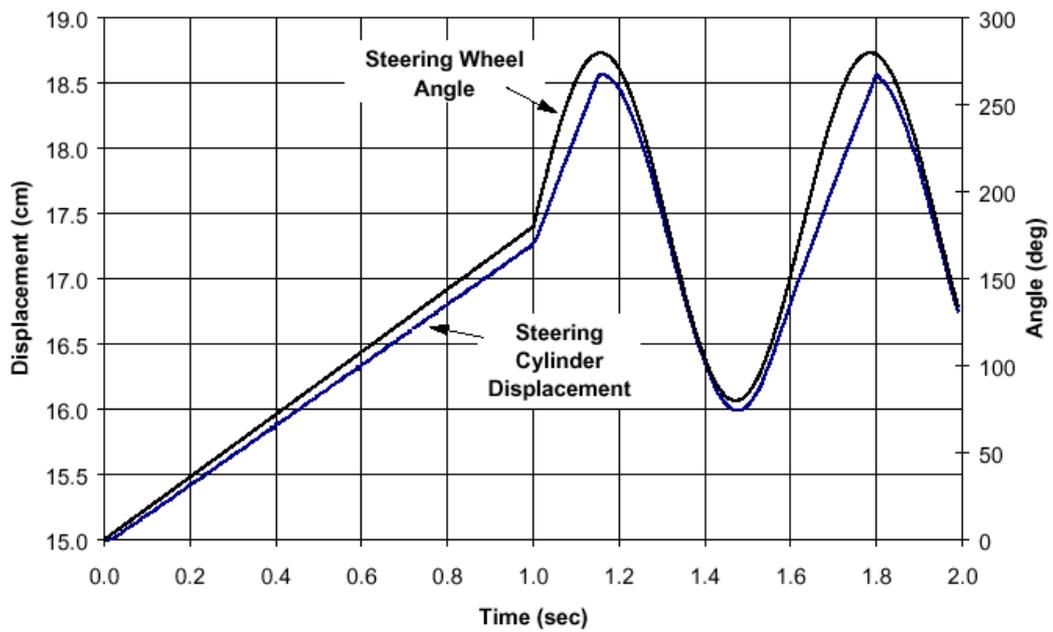


圖 14、方向盤角度及車輪轉變角度關係圖

五、汽車煞車系統分析

煞車系統是汽車的重要系統之一，因其直接影響到行車安全。如何使用 HyPneu 進行煞車系統之設計與分析？首先，針對煞車系統說明。一般汽車的煞車系統其實是一油壓系統。駕駛者踩煞車板後，經由煞車主缸將壓力傳送至控制四個輪子之煞車分缸，再由煞車分缸作動煞車片達到煞車目的，如圖15所示。當駕駛者踩煞車板時，用多少力踩煞車板，煞車分缸能產生多少壓力與作動距離，是系統分析的主要目的。另外設計煞車系統時，前輪與後輪之煞車壓力應不同。還有所有元件之規格，對煞車系統之影響程度？如何選擇及製訂其規格？這些多是煞車系統設計時必須考量的問題。

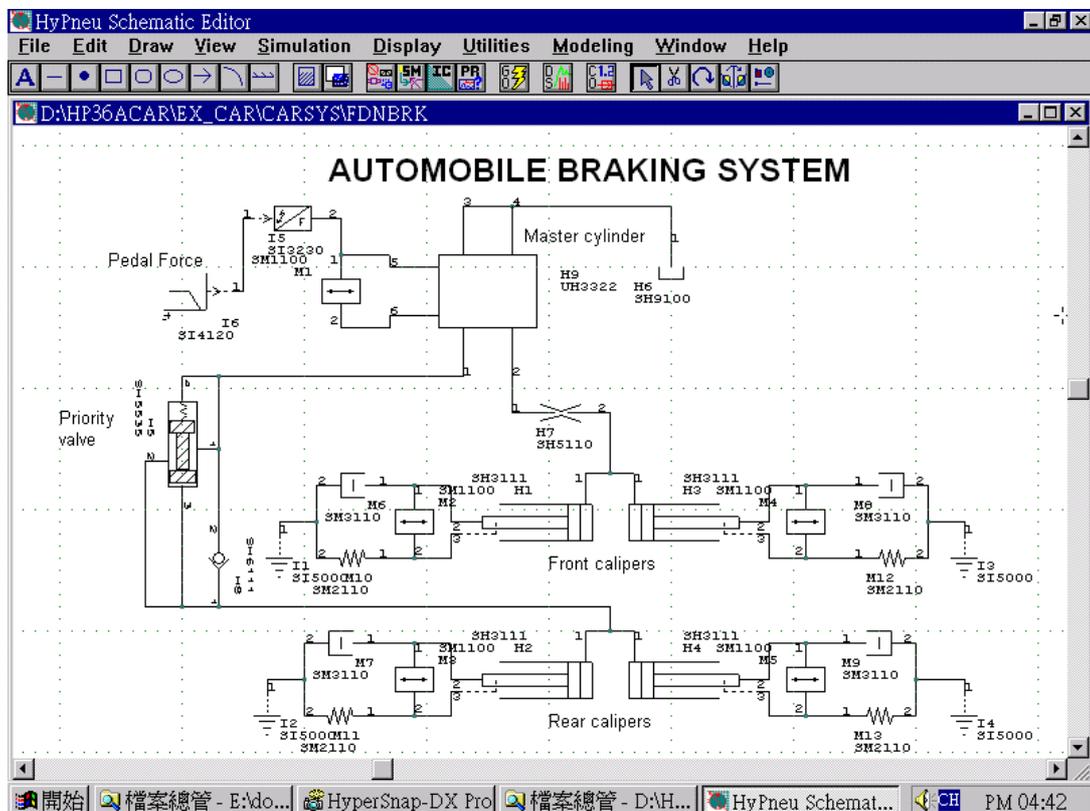


圖 15、汽車煞車系統迴路圖

將汽車煞車系統用 HyPneu 繪成迴路圖，如圖15所示。用訊號產生器元件及訊號轉成力量元件組合，可模擬駕駛者踩煞車踏板之力，踩力作用在煞車主缸上，煞車主缸將壓力分配至前輪及後輪煞車分缸。煞車分缸作動煞車機構，與煞車片間產生之負載，由質量、彈簧、阻尼三元件組成之負載模擬之。構成整個煞車系統。將選用之元件規格資料填入HyPneu資料庫，其中部分元件規格及特性值表列於表5。HyPneu模擬分析結果如圖16及圖17所示。當駕駛者於2秒內，線性地從 0 至 600 lbf 對剎車板施力，如圖16及圖17中 -*- 所示。-*- 採用上方(x2)及右方(y2)之座標(剎車板施力之值為負值表示其方向性，絕對值才是其大小)。圖17表示隨著對剎車板施力的增加，前輪剎車分缸及後輪剎車分缸的作動距離增加情形。圖17顯示隨著對剎車板施力的增加，前輪剎車分缸及後輪剎車分缸的壓力變化情形。

表5、汽車煞車系統之部分元件資料及規格

元 件	主 要 規 格	說 明
剎車踩板	0->2 秒內線性增加踩力 0->600 lbf	用訊號產生器模擬踩剎車動作
剎車主缸	Piston Area = 0.785 in ² Primary Spring Const.=2799 lb/in Secondary Spring Const.=1838 lb/in	主控油壓系統，分配前後剎車油
前輪之剎車缸	Piston/bore diameter: 2.6 in Rod diameter: 1 in Rod length: 3 in	終端致動器，推動剎車片
後輪之剎車缸	Piston/bore diameter: 1.9 in Rod diameter: 0.75 in Rod length: 3 in	終端致動器，推動剎車片
前輪負載	Damping=1814 lb-sec/in, Spring const: 141600 lbf/in	剎車片作動時產生摩擦力之負載情形
後輪負載	Damping=1319 lb-sec/in, Spring const: 191500 lbf/in	剎車片作動時產生摩擦力之負載情形
Priority Valve	Flow discharge Coeff.: 0.61 Spool diameter: 0.5 in	用來確保前剎車故障時不影響後剎車

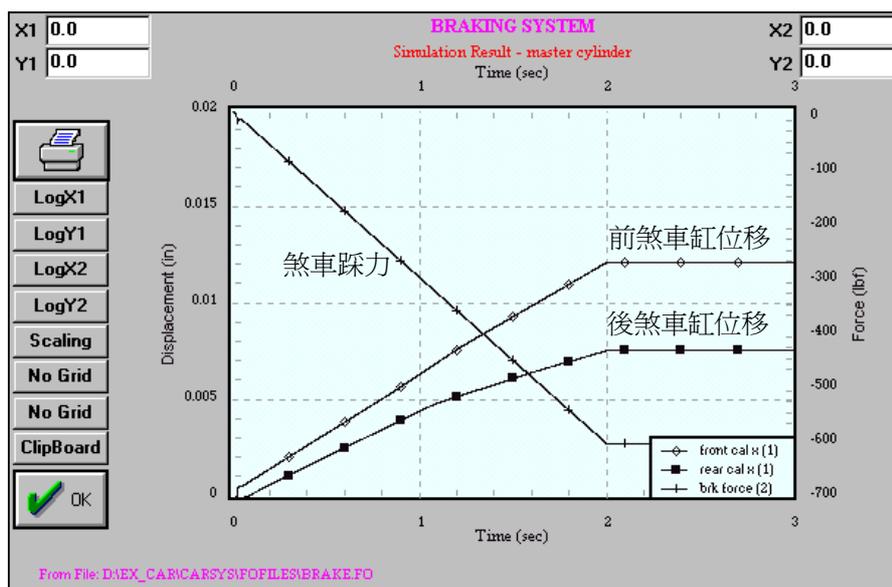


圖 16、汽車煞車系統動態作動分析圖(1)

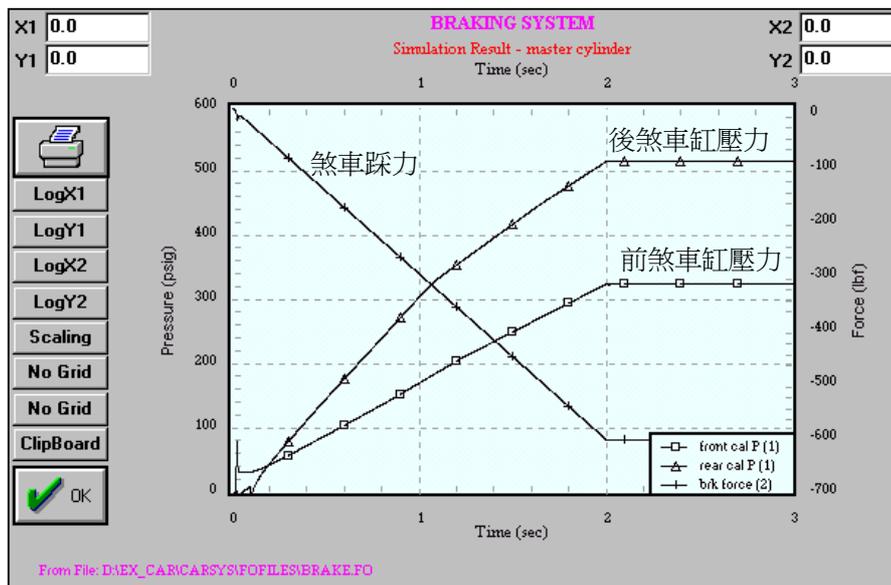


圖 17、汽車煞車系統動態作動分析圖(2)

結語

流體動力學為汽車底盤系統的主角，其設計的好壞直接影響到駕駛環境及操控安全性，本文利用液氣壓動態模擬軟體 HyPneu for Windows，以實際的案例說明如何建立底盤之各次系統模式，並計算出動態響應曲線。其中案例一之避震器以阻尼參數設計為重點；案例二之避震系統分析以頻率響應分析為重點；案例三則以氣壓之流體動力說明汽車之懸吊系統之響應；案例四描述動力方向盤系統之設計及運作原理，其重點在旋轉方向閥之設計及如何建立液壓系統及機械回援系統間之交互作用之模式；案例五則說明煞車系統之設計及運作。

上述這些系統，如果沒有利用電腦輔助設計工具，工程師實在很難進行動態分析。藉由 HyPneu 的運用，工程師不需擔心繁複的分析計算，只要運用 Visual Modeling 的觀念，專心於設計理念的實現。以底盤系統而言，筆者期望汽車工程師能早日設計出可彈性調整功能的底盤系統，使用者可根據自己本身的需求及外在環境因素，自行調整底盤功能，如此便能滿足各式各樣不同人的駕駛習慣及"品質"要求。