

# 電動輔助轉向系統之負載模擬試驗平台設計

葉智榮、林明志、何世榮、孫富賢、許駱謙、胡聰賢  
財團法人車輛研究測試中心

## 摘要

本研究針對電動輔助轉向系統之試驗平台進行研製，此試驗平台可安裝各型式的電動輔助轉向系統，並整合方向盤角度感測器、車速訊號和力回饋裝置，模擬轉向時車輪對於齒條產生阻力之動態行為，提供電動輔助轉向系統進行控制策略調校。力回饋裝置根據車速和方向盤角度即時計算齒條承受的阻力並輸出控制命令，並由位於齒條兩端的拉/壓力荷重計回饋實際輸出力量。搭配擷取電動輔助轉向系統的扭力感測器、輔助馬達電流等訊號，可對電動輔助轉向系統進行轉向輔助、回正控制等性能測試。因此，本試驗平台可以提供電動輔助轉向系統研發過程中更快速且安全地調校與驗證控制邏輯。

**關鍵詞：**電動輔助轉向(electric power steering, EPS)、試驗平台(test bench)、力回饋裝置(force feedback device)

## 1. 前言

車輛轉向系統主要是由三個機構所組成，方向盤和轉向軸(steering shaft)將駕駛者的轉向動作傳遞到轉向齒輪(steering gear)，即乘用車常見的齒條小齒輪(rack and pinion)機構，將方向盤的旋轉運動轉變成橫向直線運動；第三個機構則為轉向連桿組(steering linkage)，實際帶動前輪作左右轉向的動作。除了方向盤和車輪外，其他機構可能都不易直接可視，動力輔助機構就是位於這些機構上，可協助推動齒條，或是協助轉向軸旋轉。

目前大部分車輛使用的動力輔助來源為液壓，駕駛者施力轉向時會帶動液壓閥，使高壓的液壓油從左端或右端進入液壓缸，向右或向左推動齒條作直線運動，進而帶動前輪，也就是所謂的液壓輔助轉向(Hydraulic Power Steering, HPS)系統。另一種動力來源則是電動馬達，經由減速機傳遞動力到轉向機構上，此類系統即稱為電動輔助轉向(Electric Power Steering, EPS)系統，駕駛者的轉向動作透過裝置在轉向軸上的扭力感測器，傳送電子訊號於控制器，控制器再下命令驅動馬達，來協助轉動轉向軸或是推動齒條。EPS 系統解決傳統 HPS 系統不少缺點，例如不必擔心漏油，也不必定期檢查更換動力方向機油，也沒有廢油回收等環保問題。EPS 系統沒有複雜的管路和元件，省掉了液壓幫浦、儲油罐、油壓管路，更為擁擠的引擎室節省不少空間。除此之外，EPS 系統最重要的優點是節能，HPS 系統的液壓幫浦需要產生的壓力非常大，高達 130~150 個大氣壓力，都需要耗費引擎動力來驅動，所以當引擎起動後，液壓幫浦就跟著開始運作，其實在駕駛過程中需要轉向動力輔助的時間比例很小，畢竟大部分的情況都是直線開車，但是不管需不需要動力輔助，液壓幫浦始終都在消

耗引擎動力，也就是消耗掉燃油。EPS 系統則是在有轉向需要時電動馬達才開始工作，採用 EPS 系統，引擎不再需要時時刻刻供給液壓幫浦動力，估計可節省 3%~5% 的燃油消耗，雖然比例不高，但對於節能減碳與環境保護，還是有相當的貢獻。

EPS 系統在輔助動力的控制是電子式，因此比機械式的 HPS 系統彈性得多，方向盤所需動力輔助的大小依駕駛狀況不同而有差異，例如在停車時需要很大的轉向輔助動力，高速時方向盤如果過輕，駕駛者反而會覺得車輛不容易控制而發生危險，電子控制讓調整輔助轉向的性能更為容易，帶給駕駛者更舒適的轉向感覺，並可進一步搭配其他感測器與演算法，完成自動停車或車道維持等先進轉向控制系統。

近年來由於電子技術的迅速發展，使得電控系統的穩定度和成本被大家所接受，也帶動 EPS 系統的成長，近幾年許多車廠的新車型，都已經採用 EPS 系統，根據國外車輛產業研究單位的預測[1]，2012 年全球的需求量將達 2800 萬套，亦即每 10 輛乘用車中就有 4 輛裝置有 EPS 系統，產值將達 80 億美金，未來 EPS 系統全面取代 HPS 系統將是必然趨勢。

在 EPS 系統開發過程中，如能在實驗室環境下，快速地將其控制程式搭配硬體進行性能測試，將可有效縮短實車試驗調校的時間，並安全地檢視系統失效狀況。因此常會建構試驗平台以進行相關測試，目前常見之試驗平台大多利用彈簧來模擬車輪作用在轉向系統的阻力[2][3][4]，缺點是彈簧出力為固定比例，無法隨車速變化即時來調整，與實際車輛行駛的情況有較大的差異，所以較不易進行控制策略的調整測試，也限制了在試驗平台可以進行測試的項目。因此，本研究設計力回饋裝置模擬轉向時施加於齒條端的阻力，提供即時可調整之轉向阻力負載模擬來實際車況，使得在調校 EPS 系統控制邏輯之時，更準確地符合真實情況。並且由於力回饋裝置可主動地施加作用力於齒條，還可模擬駕駛未轉向時受到路面衝擊等情況。

## 2. 力回饋裝置與控制方法

本試驗平台包括 EPS 系統總成和力回饋裝置，試驗平台之架構如圖 1 所示，其中 EPS 系統總成的型式為轉向軸式(column type)，也就是電動馬達透過蝸桿蝸輪機構與轉向軸連接。力回饋裝置則由馬達、驅動器、減速機、齒條小齒輪機構、拉/壓力荷重計、控制器、車速模擬訊號和方向盤角度感測器所組成；力回饋馬達經過減速機後與齒條小齒輪機構連接，馬達扭力轉成力量施加於 EPS 系統總成的橫拉桿或齒條，在兩者之中安裝拉/壓力荷重計；車速訊號由可變電阻或數位訊號

模擬；方向盤角度感測器則安裝在 EPS 系統的小齒輪上，若 EPS 系統原來就已具備方向盤角度感測器，也可直接使用其訊號。

力回饋裝置的控制方塊圖如圖 2 所示，主要的控制目標是使拉/壓力荷重計量測到的力量，能夠盡量跟上路面阻力參考值。這個參考值可藉由建立車輛之數學模型即時運算獲得或是經由實車量測，在本研究中是使用小型車安裝車速計與方向盤角度扭力計，於乾燥摩擦路面實車量測所得的方向盤角度與扭力( $T_H$ )數據，依式 1 換算出在不同車速和方向盤角度下，駕駛者施加在齒條的力量( $F_R$ )，如圖 3 所示。再將此資料轉換成路面施加於齒條的反作用力，以表格的形式輸入控制器，控制器根據模擬車速和方向盤角度訊號，利用查表之方式計算出此狀態下所需之阻力，轉換為相應電流來控制力回饋馬達出力，由拉/壓力荷重計回授齒條位置之力量，達成閉迴路的控制。透過調整此圖表，即可使本試驗平台模擬不同車型的路面阻力狀態。

雖然在馬達減速機和齒條小齒輪機構之間，會存在摩擦力，但此控制方式是回授最後施加在 EPS 系統齒條的力量，因此可以減少摩擦力造成的影響。

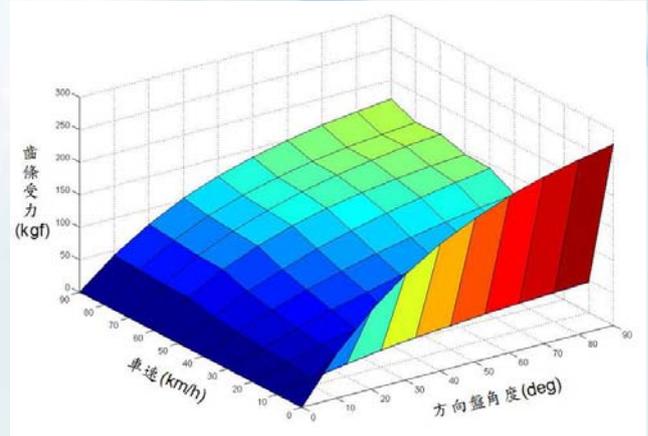


圖 3 實車量測齒條出力與方向盤角度和車速之關係

$$F_R = \frac{2 \times \pi \times T_H \times \eta_R}{S_R \times 10^{-3}} \quad (1)$$

式中  $S_R$ ,  $\eta_R$  為齒條與小齒輪行程比(mm/rev)和機構效率

### 3. 硬體架設與實驗結果

#### 3.1 實驗設備架設

本研究中力回饋裝置的馬達是使用無刷馬達，最大輸出扭力為 2.36 Nm；減速機的減速比為 25；齒條小齒輪機構的行程比為 100 mm/rev；拉/壓力荷重計與 EPS 系統的橫拉桿連接，量測範圍為 ±10 kN；各硬體的實際組裝情形如圖 4 所示。

齒條所受阻力的參考值，則利用二維查表來決定，其中輸入為車速及方向盤角度，圖 5 所示分別為車速 0, 20, 50, 80 km/h 時，齒條所受阻力隨方向盤角度變化的情況，向右出力為正值。力回饋裝置所需之方向盤角度是由安裝於 EPS 系統小齒輪位置的角度感測器所量測，如圖 6 所示；車速訊號則利用數位訊號模擬，可即時調整，並透過 CAN Bus 車用網路將資訊傳遞至力回饋控制器，參見圖 7。

力回饋控制器則是使用八位元微處理器來撰寫控制方法，輸入訊號為方向盤角度和車速訊號，依照輸入訊號經過二維查表後，決定力量的控制目標，透過 PI 控制器將目標值轉換為控制命令，輸出命令於馬達驅動器，並比較拉/壓力荷重計量測值，進行馬達輸出力量的閉迴路控制。

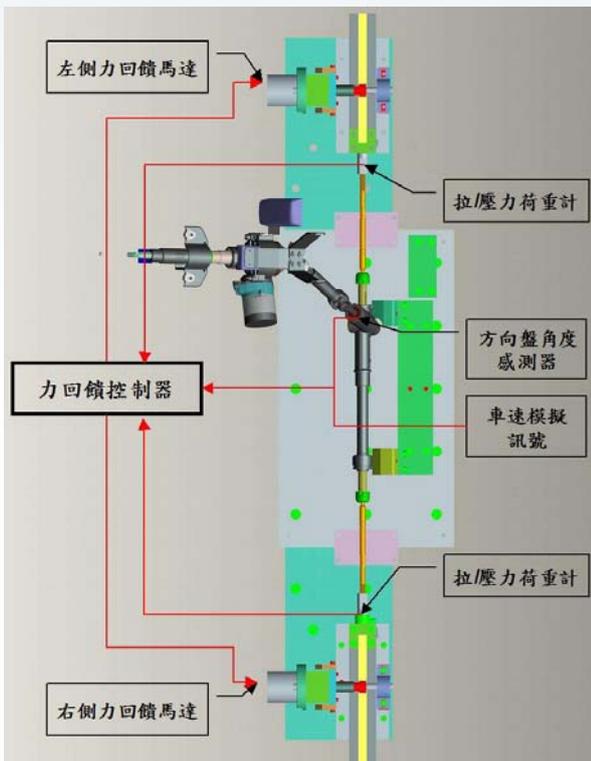


圖 1 試驗平台組成架構

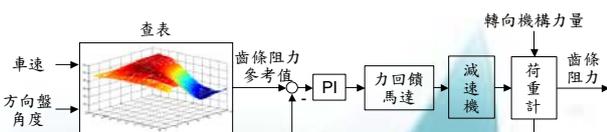


圖 2 力回饋裝置控制方塊圖

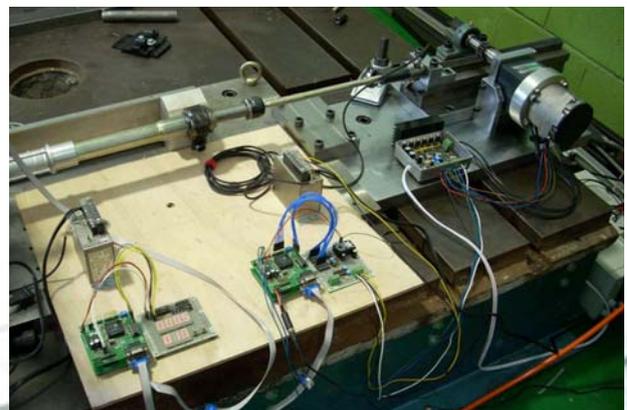


圖 4 力回饋裝置之各硬體組裝

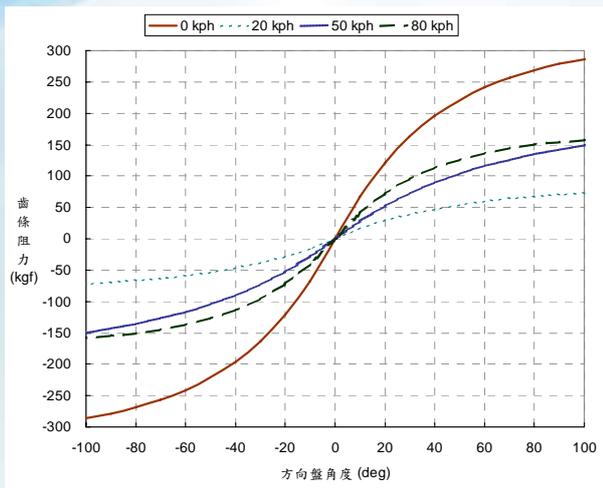


圖 5 齒條所受阻力隨方向盤角度變化圖



圖 6 力回饋裝置之方向盤角度感測器安裝位置

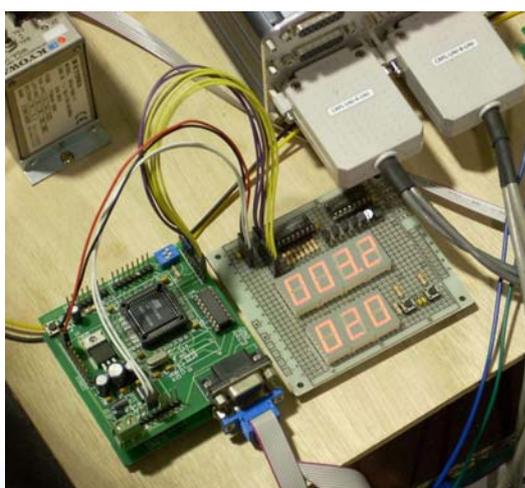


圖 7 力回饋裝置之方向盤角度和車速模擬顯示

### 3.2 力回饋控制結果

力回饋裝置的步階響應結果如圖 8 所示，齒條目標阻力為 50 kgf，由圖可知，在 PI 控制器的控制下，荷

重計量測所得值符合設定命令要求。不同車速下，荷重計量測值與目標值隨方向盤角度變化的關係圖，如圖 9 所示，在各方向盤角度下，需求之齒條模擬阻力皆可即時地藉由本研究之力回饋裝置獲得。

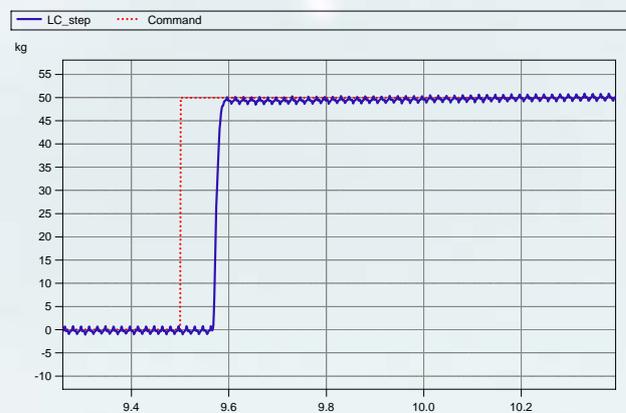


圖 8 力回饋裝置的步階響應結果

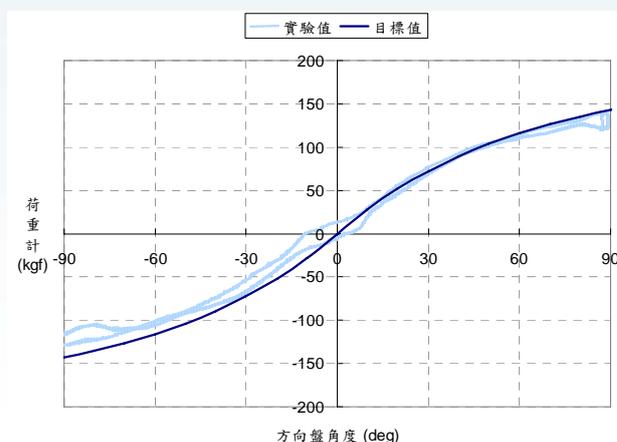


圖 9 力回饋控制與目標值隨方向盤角度變化(50 kph)

### 3.3 轉向感覺試驗結果

連續的弦波輸入最常被用來評價轉向系統的性能 [5]，藉由方向盤角度和方向盤扭力交叉作圖，來了解受測系統的轉向感覺。為了進行此項試驗，將 EPS 系統安裝方向盤角度扭力計，以分別量測這兩個參數，如圖 10 所示，於本試驗平台的實驗結果如圖 11 所示，測試車速分別為 20, 50, 80 km/h，轉向輸入為振幅為 30 度 0.2 Hz 的連續正弦波，從試驗結果可得到轉向系統的遲滯現象，EPS 控制策略會影響這個特性，在實車測試前先行調整，因此本試驗平台可以協助 EPS 系統控制器開發人員進行控制參數調校，也可以進行數學模型的驗證。

### 3.4 EPS 性能測試

藉由前述之力回饋裝置，再搭配資料擷取器記錄 EPS 系統的輸出訊號，如方向盤扭力感測器訊號、EPS 馬達電流訊號，本試驗平台即可進行 EPS 系統性能測試，比較 EPS 系統在啟動與關閉的狀態下的性能表現，例如 EPS 的基本輔助功能，確認馬達輔助力矩輸出的

大小；進行回正功能測試，確認此控制邏輯作動時機，也可以設定不同回正情境，測試 EPS 控制器對於這些情境的反應，並且調校方向盤回正速度和位置的控制。

此外，由於力回饋裝置可主動地施加作用力於齒條，因此可模擬駕駛者未期待的方向盤轉向動作，例如在直線行駛時，駕駛者卻需在方向盤施加扭力，或是在直行時放開方向盤，方向盤會偏離中心而使車行方向快速地脫離直線，這些都是駕駛者不期望出現的狀況，一般稱為「拉扯」現象，可能是前輪定位異常，或是兩輪胎壓失衡等原因，可藉由 EPS 系統判斷並記錄此異常狀況，還可利用警示燈提醒駕駛者須進廠檢查，也可搭配橫擺角速度(yaw rate)、齒條力量等感測器，經由 EPS 系統協助小角度的修正。

此情境可利用試驗平台其中一側力回饋裝置解離方向盤角度訊號，載入「拉扯」參考命令來重現，可模擬在方向盤未轉動或駕駛者放開方向盤的情況下，EPS 系統對於路面傳遞上來力量是否可以進行自動補償，搭配另一側力回饋裝置也可模擬在方向盤轉動，且同時有路面衝擊時，EPS 系統的反應。

由於本試驗平台是將整個轉向系統安裝於其上，因此除了轉向軸式 EPS，也適用其他型式的 EPS，如小齒輪式或齒條式 EPS，並且可依照實車的固定點位置安裝，如圖 12 所示，在平台測試時考慮中間軸傳遞所造成的影響。也可配合方向盤扭力和拉/壓力荷重計，確認轉向機構的摩擦力、順逆向傳遞效率等物理特性。



圖 10 方向盤角度扭力計

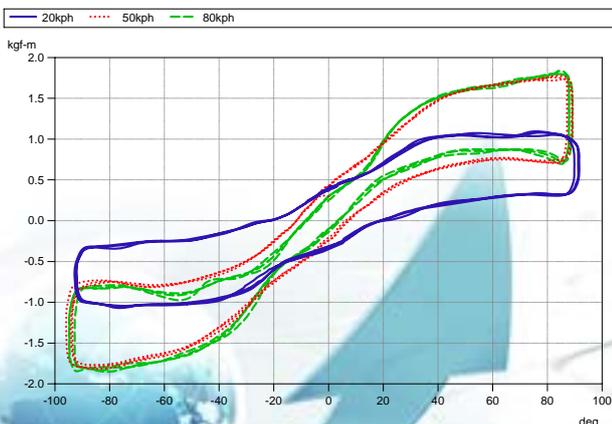


圖 11 方向盤角度和方向盤扭力隨車速之關係圖

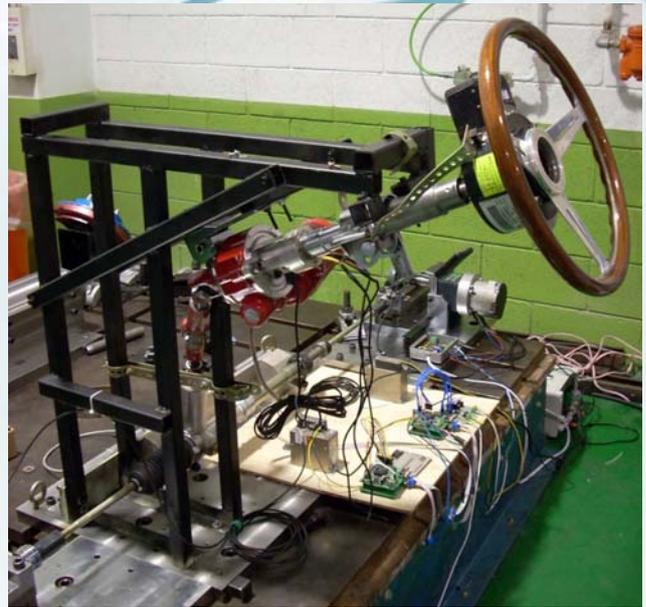


圖 12 EPS 系統總成依實車固定點安裝

#### 4. 結論

本研究建立具備力回饋裝置之試驗平台，可以被動和主動地模擬轉向時路面對於轉向系統產生的阻力，並且可符合不同型式的 EPS 系統。在試驗時，測試工程師可以感受實際路面所傳遞的反作用力，在實驗室中重現實際車況，以針對轉向特性進行 EPS 控制邏輯調校。此試驗平台提供更完整的控制器調校測試驗證，和更安全的測試環境，減少實車測試時間和成本。未來可以配合實車模型進行路面阻力的計算，以提高試驗的準確度。除了用於 EPS 系統開發過程中調校控制器外，搭配模擬其他車輛訊號，也可用於驗證 EPS 系統之性能。

#### 5. 參考文獻

- [1] LaGuerra, R., et al., *Market Strategies for Electronic Power Steering, Brake-by-Wire, and Electronic Parking Brake Systems*, ABIREsearch, New York, pp. 4-3~4-4, 2005.
- [2] Hu, Y.S., Ji, X.W., Chen K.Y. and Ma, X.P., "Elementary Study on BLDC Controller for Electric Power Steering System," *SAE 2004 World Congress*, No. 2004-01-1096, Detroit, MI, 2004.
- [3] Kurishige, M., Wada, S., Kifuku, T., Inoue, N., Nishiyama R. and Otagaki, S., "A New EPS Control Strategy to Improve Steering Wheel Returnability," *SAE 2000 World Congress*, No. 2000-01-0815, Detroit, MI, 2000.
- [4] Zaremba, A.T., Liubakka, M.K. and Stuntz, R.M., "Control and Steering Feel Issues in the Design of an Electric Power Steering System," *Proceedings of the 1998 American Control Conference*, Philadelphia, PA, 1998.
- [5] Heathershaw A., "Developments in On-Centre Steering Evaluation and Testing," *SAE 2006 World Congress*, No. 2006-01-0796, Detroit, MI, 2006.