

## 基於比例液壓煞車作動器之防鎖死煞車控制策略

林信全

財團法人車輛研究測試中心(副工程師)

Email: [hclin@artc.org.tw](mailto:hclin@artc.org.tw)

### 摘要

各國針對車輛安裝主動式安全系統之要求越來越高，ABS系統也成為市售車的標準配備。本文提出以比例液壓煞車作動器達到ABS效果之研究，參考法規與市售車性能來制定系統規格，並透過硬體在迴路(Hardware in the Loop, HIL)環境驗證控制策略在高、中、低摩擦係數之均勻路面與高到低及低到高之對接路面等五項情境之功能性。實驗結果顯示：ABS控制策略搭配比例液壓煞車作動器能即時對各煞車油路進行煞車力調節，避免車輪鎖死打滑導致車輛失控，同時還能使車輛在減速時保有一定的煞車力。

關鍵字：ADAS、縱向控制、防鎖死煞車系統控制

### 1. 前言

近年來，車輛是現代人往返兩地的交通首選，也因此先進國家車輛密集度逐年提高，而衍生出的便是越來越高的肇事案件數與車禍率，2018年美國高速公路安全局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)統計：因人為因素導致之車輛肇事案件數占了整體案件的94%[1]，若車輛皆配有駕駛輔助系統，則能降低人為因素所導致的交通事故數量。於是各大車廠開始注重先進駕駛輔助系統(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)的發展，希望透過分布於車輛周圍的感測器量測與精密的演算法運算，預測出可能發生車禍的情境並主動加以避免。ADAS主要分成側向及縱向控制與警示系統，此二類研究也有許多車廠與學者正在著手進行。

進一步分析NHTSA之車輛撞擊統計資料，發現後車追撞前車之案件佔所有比例之32.9%，因此縱向控制與警示系統顯得相對重要。Francis[2]等人整理和煞車有關的ADAS，並簡述其模組和作用原理，包含防鎖死煞車系統(Anti-lock Brake System, ABS)與循跡控制系統(Traction Control System, TCS)等。張翔棋[3]進行ABS控制策略設計，建立車輛HIL環境進行功能驗證，並將控制策略與電磁閥模組改裝至實車進行實車測試。陳建安[4]等人以前二後一之三輪機車配置建立煞車平台，並將電磁閥模組裝配在平台上，以HIL環境驗證ABS控制策略。陳哲斌[5]開發一套比例液壓煞車作動器並設計不同控制策略應用在機車ABS中，比較不同ABS控制方式之響應結果，在特定情境中進行模型在迴路(Model in the Loop, MIL)與

HIL實驗，驗證控制響應。

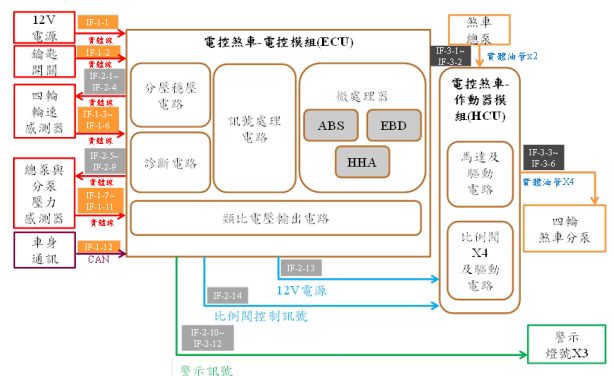
本研究對緊急狀態下介入縱向控制的ABS系統進行相關研究，採用[5]所開發之新形式比例液壓煞車作動器，並比例液壓煞車作動器設計一套控制策略，將其安裝在以實際車輛煞車系統組件所建立的煞車平台中，使實驗結果能更加貼近真實車輛響應，以HIL方式驗證控制響應。此作動器由比例閥組成，相較於on/off電磁閥僅能進行完全增壓或洩壓控制，比例閥能夠調節液壓到指定數值。

本文章節架構如下：第二章為系統架構，介紹本研究使用到的硬體組件與比例液壓煞車作動器的特性。第三章為軟體架構，介紹本研究中所使用的模擬軟體與為比例液壓煞車作動器設計之ABS控制策略演算法及演算法訊號處理。第四章為HIL環境建置，介紹整體實驗架構與實驗情境及控制目標。第五章為實驗結果，呈現出HIL實驗結果，並針對不同情境進行實驗數據整理，判斷是否達到控制目標。第六章為本文結論。

### 2. 系統架構

#### 2.1 硬體架構

本文之電控煞車系統基本硬體架構如圖一所示。主要由12V電源、輪速感測器、煞車踏板、煞車作動器(比例閥&馬達)、警示燈、電控模組所組成。



圖一 電控煞車架構與介面

12V電源：為電控煞車系統主要電力來源。  
鑰匙開關：為檢知車輛是否為紅火或發動的狀態。

輪速感測器：為檢知車輛行駛過程中的輪速訊號，依感應方式可分為電磁式與霍爾式，目前具有電

控煞車系統之車輛，大多數採用霍爾式輪速感測器。

煞車踏板：為電控煞車系統檢知煞車狀態的參考訊號依據。

油門踏板：為電控煞車系統檢知油門狀態的參考訊號依據。檔位：為電控煞車系統檢知車輛檔位狀態。

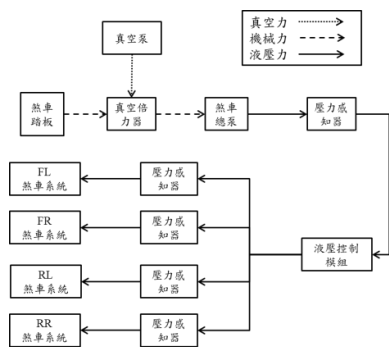
作動器模組(Hydraulic Control Unit, HCU)：為控制煞車卡鉗分泵液壓的單元模組(主要由4顆比例閥、蓄壓器、油泵與1顆馬達所組成)。

警示燈：為顯示電控煞車系統當下狀態。

電控模組(Electronic Control Unit, ECU)：為電控煞車系統關鍵靈魂核心，主要功能為接收上述所有輸入訊號進行 ABS、EBD(Electronic Brake-force Distribution, EBD)、HHA(Hill Hold Assist, HHA)等控制演算法運算，並送出控制命令以驅動作動器模組，使輪胎恢復轉動或抑制轉動。

## 2.2 煞車平台

為更接近實車情況，本研究以市售車之底盤煞車系統組件建立煞車平台。平台主要配件有煞車踏板、真空倍力器、煞車總泵、液壓控制模組、煞車碟盤、煞車卡鉗、液壓感知器與真空泵，配置如圖二所示，煞車平台實體如圖三所示。



圖三 煞車平台實體

電控煞車系統中的液壓控制模組是實踐ADAS中的縱向控制系統的重要關鍵，也是各大車廠極力發

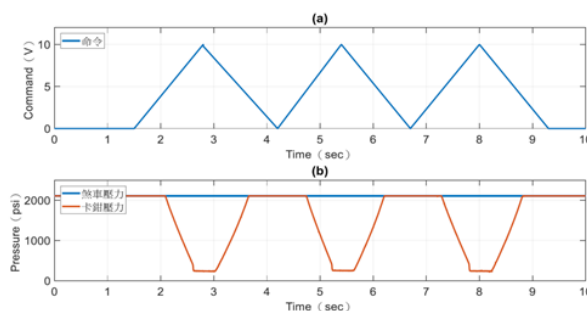
展的重要環節，目前配置於市售車的液壓控制模組多為電磁閥式，本研究則選用比例液壓煞車作動器，針對比例液壓煞車作動器設計ABS控制策略，於煞車平台中驗證其控制結果。

## 2.3 比例液壓煞車作動器控制模組

圖四與圖五分別為比例液壓煞車作動器總成實體與單一比例液壓煞車作動器之實驗結果，從圖五可以觀察出：當電壓值慢慢提高，煞車壓力(總泵)與卡鉗壓力(分泵)數值差距會越來越大，代表總泵與分泵的壓力差與比例液壓煞車作動器輸入電壓成正比，其比例液壓煞車作動器線圈通電電壓須在3.5V到9V之間，才會有調節壓力的響應。



圖四 比例液壓煞車作動器總成實體



圖五 比例液壓煞車作動器實驗結果 (電壓 vs 壓力)

## 3. 軟體架構

### 3.1 ABS控制策略演算法

市售車配備之ABS系統主要是監控各輪的滑差值與輪減速度值，對各輪煞車系統進行壓力調配，其中以滑差值更能夠表現出當下輪胎的狀態，若滑差值偏高，車輪便有鎖死失控的可能，此時ABS系統應該介入，進入洩壓模式；若滑差值偏低，表示此時車輪狀態較穩定，可嘗試提升其煞車壓力，進而獲得更大的煞車效率。從上述現象推斷：比例液壓煞車作動器的ABS控制策略演算法之系統滑差值與閥體電壓

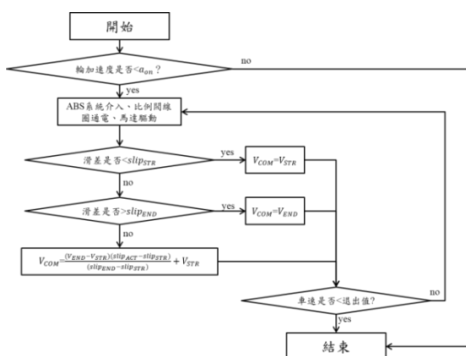
值有著相對應的正比關係，利用比例液壓煞車作動器之 ABS 控制策略便是以此為依據發展而成。傳統 ABS 演算法主要是根據電磁閥不同作動模式達到增壓、持壓與洩壓的效果，再將不同模式組合控制，因此傳統演算法的控制結果會使輪速有震盪的變化；而搭配比例液壓煞車作動器的控制方式，演算法只需計算一個電壓值，比例液壓煞車作動器便能給予相對應的煞車壓力，只需進行電壓微調便能達到調節煞車壓力的功用，使得調節壓力時造成的輪速震盪較小。

ABS 控制策略演算法制定步驟如下：設定一系統介入門檻值，本文以輪減速度  $a_{on}$  做為 ABS 介入控制之系統門檻值，當 ABS 系統介入控制後，系統便會依照當下量測而得的各輪滑差值  $slip_{ACT}$  計算應給予比例液壓煞車作動器中各輪線圈驅動電壓值  $V_{COM}$ 。

各輪線圈驅動電壓  $V_{COM}$  計算方式如下：首先設定各輪比例閥線圈閥體通電電壓最大值  $V_{STR}$  與最小值  $V_{END}$ ，通常數值為能使比例液壓煞車作動器介入調節煞車壓力之電壓範圍邊界值。接著設定各輪 ABS 系統介入之滑差門檻值  $slip_{STR}$  與超過某滑差極限值便使系統完全洩壓之滑差跳脫值  $slip_{END}$ 。

當演算法偵測到各輪輪減速度之最小值小於  $a_{on}$ ，系統便依照  $slip_{ACT}$  給予各輪相對應的電壓值  $V_{COM}$ 。當  $slip_{ACT} < slip_{STR}$  時，滑差數值不大，車輪呈現穩定狀態， $V_{COM}$  數值為  $V_{STR}$ ；當  $slip_{ACT}$  介於  $slip_{STR}$  與  $slip_{END}$  之間，車輪呈現不穩定狀態，但在可控範圍，此時  $V_{COM}$  之數值依照下列公式(1)進行計算；當  $slip_{ACT} > slip_{END}$  時，車輪呈現失控狀態，此時驅動比例閥線圈之  $V_{COM}$  應給予最大驅動電壓值  $V_{END}$ 。詳細流程如圖七所示。

$$V_{COM} = \frac{(V_{END} - V_{STR})(slip_{ACT} - slip_{STR})}{slip_{END} - slip_{STR}} + V_{STR} \quad (1)$$

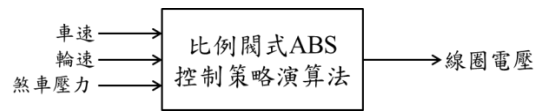


圖七 ABS 控制策略演算法流程

### 3.2 演算法輸入訊號處理

依照上一章節介紹之內容，得知比例液壓煞車作動器之ABS演算法所需之輸入訊號為各輪輪減速

度與滑差值，因此系統須由其他訊號計算取得此二數值，方能進行比例液壓煞車作動器ABS控制。圖八為ABS演算法所需之輸入與輸出訊號。



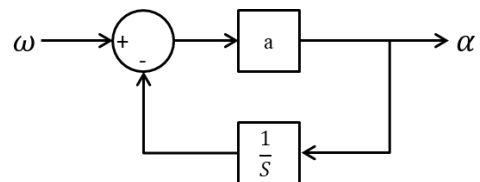
圖八 ABS演算法所需i/o訊號

滑差  $slip_{ACT}$  計算公式如(2)所示。

$$slip_{ACT} = \frac{V - \omega}{V} \quad (2)$$

其中  $V$  為車速  
 $\omega$  為輪速

輪減速度計算過程中，最簡單的計算方式是直接微分，但考量到實車輪速訊號帶有雜訊，因此設計微分器時也需考量濾波效果，因此採用將回授訊號積分的方式計算訊號的微分值，架構如圖九所示。

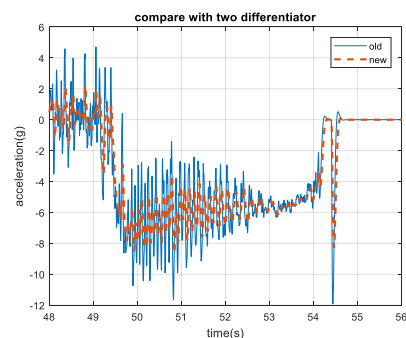


圖九 輪加速度計算架構

將圖九之架構以方程式表示並且簡化，能得到一個微分器與一個低通濾波器，其運算過程如式(3)所示。

$$\frac{\alpha}{\omega} = \frac{a}{1 + \frac{1}{s} \times a} = s \times \frac{a}{s + a} \quad (3)$$

圖十為傳統微分器與本文使用之微分器處理效果比較。由新舊形式濾波器比較，本文所使用的濾波方式有效降低雜訊，可避免雜訊造成的ABS系統誤作動。



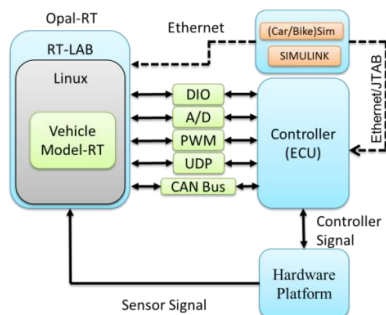
圖十 微分訊號比較

## 4. HIL環境建置

### 4.1 Opal-RT即時運算模擬平台

本研究之控制策略與車輛模型是基於Opal-RT即時運算模擬平台進行計算，Opal-RT作業系統是採用Linux，而Opal-RT相關設定是透過一台筆記型電腦安裝RT-LAB之後，以Ethernet與Opal-RT連線，在網域相通即可進行控制演算法設定。同一台筆電需安裝MSC軟體CarSim，以進行多自由度車輛動態模擬相關設定。

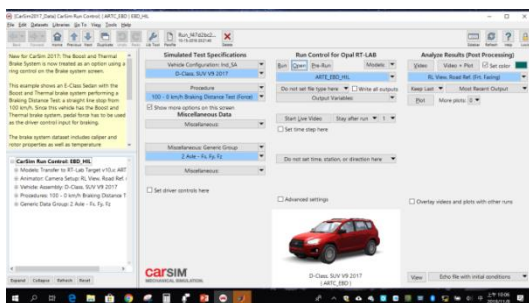
Opal-RT可依據需求傳送不同訊號類型給硬體測試平台運作，硬體測試平台上的感知器會將物理訊號轉換成類比或數位訊號等，最後回饋訊號於Opal-RT進行即時運算。HIL即時運算模擬測試架構能反覆測試演算法，快速驗證演算法效果，實驗架構如圖十一所示。



圖十一 OPAL-RT 硬體介面配置圖

### 4.2 車輛動態模型

本研究使用之車輛動態模型由 CarSim 小型車輛模擬分析軟體進行建立。CarSim 可以輸出系統設定之所需之訊號如車速、輪速等，透過 Matlab/Simulink 軟體接收 CarSim 輸出訊號，便可在 Matlab/Simulink 中進行控制策略演算法制定。另外，CarSim 可以設定虛擬模擬情境與駕駛員對車輛下達的命令並顯示當下車輛動態，也可從 Matlab/Simulink 環境中對 CarSim 下達控制命令，CarSim 操作介面如圖六所示。

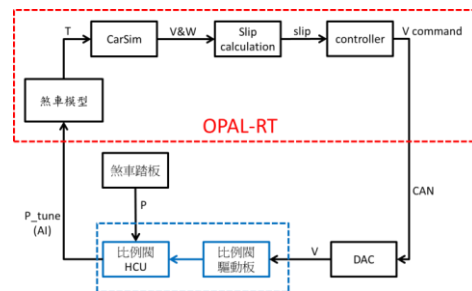


圖六 CarSim 操作介面

### 4.3 HIL軟硬體整合架構

ADAS 系統開發過程中須注重功能與安全議題，因此大部分車廠與研發單位之開發流程皆採用 V 模型[6]進行系統架構設計。在 ADAS 系統技術尚未成熟或功能性尚未驗證時，若直接進行實車測試容易造成測試員的危險與測試產品的毀損，進而提高開發成本，因此在系統進行實際測試前仍須經過重重驗證，其中包含了 MIL 與 HIL。

本文以 HIL 架構對比例液壓煞車作動器與 ABS 演算法進行功能性驗證，主要硬體有前面章節介紹的 Opal-RT 與裝配比例液壓煞車作動器的煞車平台。軟體部分則有包含車輛動態的 CarSim 與建立演算法與訊號處理的 Matlab/Simulink 軟體。控制迴路過程如下：實驗首先踩下煞車踏板，配備在四輪分泵的類比壓力感知器量測壓力訊號，並將訊號送至 Opal-RT 內，由 Matlab/Simulink 接收；透過所建立之煞車系統模型，將當下壓力數值換算為煞車扭力後送至 CarSim 內進行車輛動態運算；接收後 CarSim 能送出即時車輛響應至 Matlab/Simulink，擷取所需訊號進行後便能進行演算法訊號處理與 ABS 控制運算，計算控制響應後透過 Opal-RT 送出，控制訊號經由 DAC 轉換成類比電壓後送至比例液壓煞車作動器驅動板，進而驅動比例液壓煞車作動器，調節煞車壓力。圖十二為本文實驗之 HIL 架構。



圖十二 HIL 實驗架構

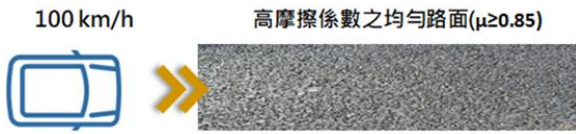
### 4.4 實驗情境

CarSim除了可以設定車輛參數，也能夠設定模擬環境如坡度、路面摩擦係數等。本研究主要探討以比例液壓煞車作動器進行ABS控制之煞車性能與控制響應，主要實驗情境為不同路面特性之平面道路進行不轉方向盤之縱向煞車。

主要有路面上常見的高摩擦係數路面，路面摩擦係數約0.85；潮濕造成抓地力下降的中摩擦係數路面，路面摩擦係數約0.5；積水造成容易打滑的低摩擦係數路面，路面摩擦係數約0.2。

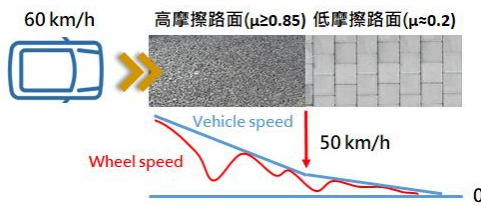
煞車性能可以從車輛減速過程中的平均減速度進行判斷。路面摩擦係數主要反應出路面能對車輛提供多少減速度，煞車時車輛減速度越接近路面摩擦係數，表示煞車性能越佳。考量法規要求[7]後，制訂之目標為80%之煞車利用率。舉例說明：於高摩擦路面進行煞車，車輛從開始煞車到車速為0km/hr，平均減

速度須達到0.68(g)以上。煞車與路面示意圖如圖十三所示。



圖十三 煞車與路面示意圖(以高摩擦係數為例)

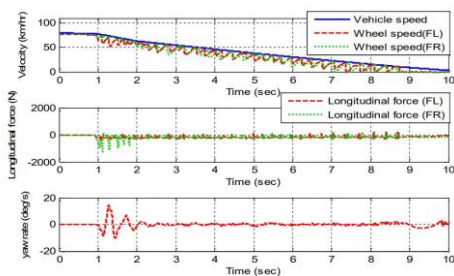
車輛減速過程中，若遇到路面特性突然發生劇烈變化的情境，系統須及時對煞車力進行調整，若路面特性發生變化後系統來不及調整，車輛有可能在路面特性變化時失控，因此於路面特性發生變化時，控制響應時間不能太長。本研究以對接路面模擬路面特性發生劇烈變化之情形，主要分為高→低路面與低→高路面，控制響應時間判斷方式也不同。設定性能目標為：於高→低路面進行實驗時，輪胎通過路面交界處後於0.2 s內恢復轉動；於低→高路面時，制動力通過路面交界處後於0.4 s內提升至70%。圖十四為對接路面示意。



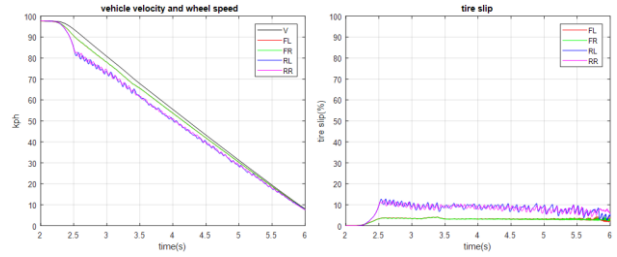
圖十四 對接路面示意圖(以高→低為例)

### 5. 實驗結果

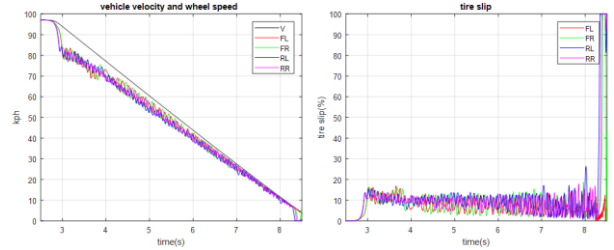
圖十五為電磁閥式ABS煞車系統於均勻路面煞車之實驗結果[4]，與本文均勻路面情境比較，輪速震盪較為明顯。圖十六、圖十七與圖十八分別為高、中與低摩擦係數路面重踩煞車使ABS系統介入調整煞車力之HIL實驗結果，左邊為車速與輪速響應，右邊為四輪滑差響應。從實驗結果可以觀察出前後輪速響應在高、中摩擦係數路面皆沒有太大的差別，在低摩擦係數路面差距較大，其原因為低摩擦係數路面能提供的煞車力較低，在煞車過程中出現負載轉移使前輪正向力大於後輪，因此前輪使用較大的煞車力，也有較高的滑差。



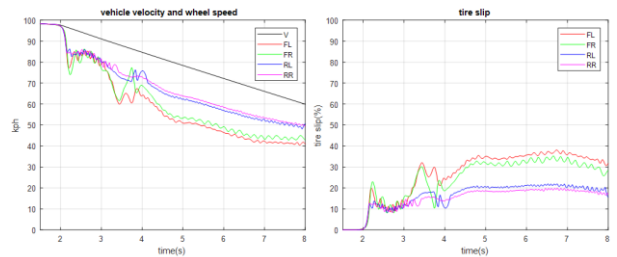
圖十五 電磁閥式ABS實驗結果



圖十六 高摩擦係數路面實驗結果



圖十七 中摩擦係數路面實驗結果



圖十八 低摩擦係數路面實驗結果

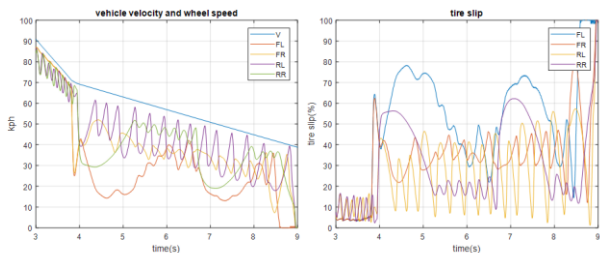
表一為各均勻摩擦係數路面測試數據整理結果，包括各輪平均滑差、整車平均減速度與整車煞車利用率，整車煞車利用率皆有達到80%以上。

表一 HIL實驗數據表(均勻路面)

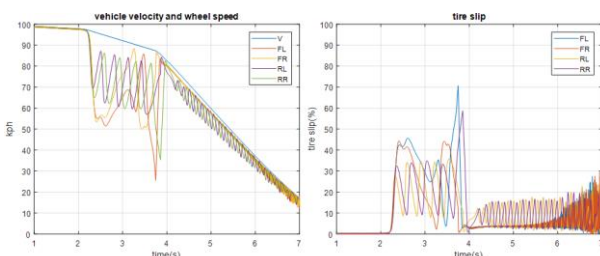
	高摩擦係數路面	中摩擦係數路面	低摩擦係數路面	
平均滑差(%)	FL	3.3231	7.5707	29.2201
	FR	3.2036	8.7270	26.5104
	RL	8.2550	13.9912	17.8295
	RR	8.0583	11.9798	16.4633
整車平均減速度(g)	0.683	0.4577	0.1777	
整車煞車利用率(%)	80.3	91.54	88.85	

圖十九與圖二十分別為高→低與低→高路面摩擦係數對接情境之HIL實驗結果，左邊為車速與輪速響應，右邊為四輪滑差響應。從實驗結果可以觀察出前後輪速響應在低摩擦係數路面時出現幅度不同的震盪，且相較於先前的低摩擦係數均勻路面，震盪較大。其原因為進行實驗時，施予煞車平台的煞車踏力不同，因此電壓調節的速度與響應也不同。另外從分隔路面低摩擦係數部分可以觀察出前輪震盪頻率較

低，其原因與均勻路面產生的前後輪速差距相同，由負載轉移所導致。



圖十九 高→低對接路面實驗結果



圖二十 低→高對接路面實驗結果

表二為各路面摩擦係數對接路面整理出之相關參數，於低→高對接路面的判斷依據為恢復70%減速度之時間；在高→低對接路面判斷依據為車輪恢復轉動的時間，也都符合所設定目標。

表二 HIL實驗數據表(對接路面)

		高→低	低→高
車輪恢復轉動時間(s)	FL	0.071	--
	FR	0.072	--
	RL	0.072	--
	RR	0.116	--
整車減速度恢復至70%時間(s)		--	0.186

## 6. 結論

從實驗結果可以觀察出：緊急煞車時ABS系統能即時介入控制，調整煞車力。於路面摩擦係數均勻無變化之路面設定的實驗結果，煞車利用率皆在80%以上；各輪平均滑差皆可控制在30%內。於高低摩擦係數切換之分隔路面，在ABS系統介入控制比例液壓煞車作動器，調節煞車壓力後，皆能及時適應當時的路面，使車輛不會因為車輪滑差過大導致鎖死失控，同時切換到路面摩擦係數高的情境時，也能即時供給整車足夠的煞車力。透過硬體迴路模擬環境，考量比例液壓煞車作動器實際作動性能，進而修正演算法輸出電壓，調節各輪煞車壓力，達到防鎖死煞車系統控制效果。

## 7. 誌謝

本論文為經濟部技術處計畫編號109-EC-17-A-25-1590之計畫，由於經濟部技術處的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 8. 參考文獻

- [1] Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey, 2018.
- [2] Francis P. Tylenda, and Yuji Nakayasu “Adaptive Hydraulic Braking Traction Control for the 2003 Chevrolet Kodiak and GMC TopKick”, SAE paper 2002-01-3116.
- [3] 張翔棋，“汽車ABS控制技術之硬體迴路模擬與實車路試”，大葉大學機械與自動化工程學系，碩士論文，2010。
- [4] 陳建安、魏嘉樂，“三輪機車煞車防鎖死系統設計”，中華民國第二十三屆車輛工程學術研討會，2018年11月30日-12月01日。
- [5] 陳哲斌，“車輛比例液壓煞車作動器開發與機車防鎖死煞車系統控制之研究”，國立台灣大學工程科學及海洋工程學研究所，博士論文，2018。
- [6] FORSBERG, Kevin; MOOZ, Harold. “The relationship of system engineering to the project cycle”, INCOSE International Symposium. 1991. p. 57-65.
- [7] <https://www.mvdis.gov.tw/webMvdisLaw/LawContent.aspx?LawID=B0049038>, 車輛安全檢測基準，43-2防鎖死煞車系統，2020/08/20。