

電動巴士氣壓煞車之失效診斷策略研究

郭先予¹、李秉諺²、陳俊傑³
^{1,2,3}財團法人車輛研究測試中心

¹E-mail: sykuo@artc.org.tw

經濟部技術處科技專案計畫: 104-EC-17-A-25- 0843

摘要

本研究提出一套失效診斷策略，應用於電動巴士之氣壓煞車系統。首先對於傳統氣壓煞車系統進行失效模式分析，並以此為基礎建置失效偵測系統、診斷策略、以及軟體模組。最後透過模擬方式驗證其可行性。根據模擬結果，本失效診斷策略可有效偵測出傳統警示機制所無法察覺的故障情境並警示駕駛，避免煞車系統失效所造成的危險。

關鍵詞：電動巴士、氣壓煞車、失效診斷。

1. 前言

公共汽車(以下稱為：巴士, Bus)為大眾運輸交通工具之一，以國內而言，主要是燃油引擎型式，在密集的都城區容易產生空氣汙染，對人體造成傷害，且考量石油耗竭...等因素，節能與乾淨能源的議題近幾年熱烈討論著，如純電動車(BEV)、油電混合車(xEV)，當然也包含：混合動力巴士與電動巴士。

大型車輛在道路上行駛，最重要的就是安全性，如：爆胎、煞車失靈...等，當發生其中一項事故時，皆會造成嚴重的事故，雖然該類型的煞車系統已經發展很長一段時間，對於類似的事件還是層出不窮的發生，顯然存在一些不可預期的失效情況發生。然而大型巴士與重型商用車輛都會配置有三套煞車系統：常用煞車、輔助煞車以及駐煞車，在常用煞車部分為了要取得較大的煞車制動力，屬於氣壓煞車系統，當需要煞車時，車輛透過壓縮空氣給煞車系統，產生足夠的煞車力道使車輛執行煞車功能，若未能及時提供足夠的壓縮空氣，可能導致煞車失靈。以傳統燃油大型巴士中，壓縮空氣的來源主要由引擎動力帶動壓縮機產生；然而在電動巴士，因少了引擎這關鍵模組，所以必須透過其它方式取代引擎(目前絕大多數採用馬達驅動方式)，提供動力給壓縮機來產生足夠的空氣壓力。

不管壓縮空氣的動力源是由引擎或是馬達，都必須考量煞車系統設計的安全性，若無法有效透過系統自我偵測，並且進一步的進行防治，倘若這些大型車輛煞車系統於設計未有完善的考量，所造成的意外有可能相當嚴重。目前在這方面的議題越來越受到重視，且相關研究也越來越多，其中美國在1988年由全國運輸安全協會(National Transportation Safety Board)[1]將煞車列為

大型車輛的重要議題；然而在煞車診斷部分，也有相關的研究被提出，根據[2]透過建模搭配量測氣壓方式做為監控煞車系統是否為故障之依據。本研究將透過模擬方式，藉由模擬氣壓變化以及搭配煞車踏板作動做為煞車故障監控之依據，實現煞車系統失效診斷功能。

2. 電動巴士煞車系統架構

目前的中大型巴士多使用全氣壓煞車系統、搭配彈簧駐煞車(Spring Parking Brake)，氣壓不足時駐煞車可自動作用，使車輛無法繼續行駛。所需的壓縮空氣由受引擎帶動的壓縮機供應，電動或油電混合動力巴士則改用獨立的電動馬達驅動壓縮機。

完整的氣壓迴路，包含前軸與後軸兩常用煞車迴路、以及一駐煞車迴路。其架構如圖1與表1所示：壓縮機所製造出之壓縮空氣通過乾燥器(Air Dryer)後，經由多迴路保護閥(Multi-circuit Protection Valve)分送至前軸與後軸常用煞車迴路之儲氣筒、以及氣壓懸吊、車門、雨刷等其他附屬設備之儲氣筒。

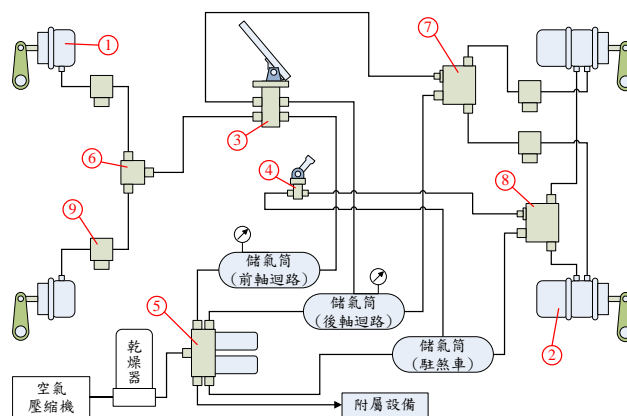


圖1 全氣壓煞車系統架構圖

表1 全氣壓煞車系統零組件

編號	零組件名稱	編號	零組件名稱
1	前軸制動室(單腔室)	6	快放閥
2	後軸制動室(雙腔室)	7	繼動閥(常用煞車)
3	制動閥	8	繼動閥(駐煞車)
4	駐煞車控制閥	9	ABS 電磁閥
5	多迴路保護閥	10	氣壓表(置於儀表板)

3. 氣壓煞車失效診斷策略

3.1 失效模式分析

傳統的全氣壓煞車系統，通常在車輛儀表板上設有兩氣壓表，可顯示前後軸迴路儲氣筒內的氣壓值，部分車輛在壓力過低時更能以燈號或蜂鳴器警告駕駛。當煞車系統的管路或元件發生損壞、抑或駕駛不當操作煞車，導致消耗過多壓縮空氣時，就會連帶引起儲氣筒氣壓下降，進而由傳統的警示方式令駕駛察覺。然而若損壞的模式並非氣體洩漏，而僅是因為無法補充氣體，導致氣壓隨煞車使用逐漸減少，傳統警示機制即無法在故障發生時立即將其檢出並通知駕駛。

此外，當損壞發生在煞車系統的管路及閥件時，即無法被傳統的偵測機制檢出，直到煞車效果下降、或駐煞車在行進間作用導致後輪煞車片發熱冒煙時始被駕駛察覺。由此可知，傳統的故障警示機制雖具有一定的安全功效，但對於部分失效情境仍舊無法完整且立即的檢出，並在影響煞車性能前警告駕駛。下列將針對煞車系統主要元件可能的失效模式、造成的影響、以及利用傳統失效警示機制將其檢出的可能性，整理如表 2 所示。

表 2 氣壓煞車元件失效模式列表

元件	失效模式	影響	檢出性
壓縮機	無法運轉	氣壓無法獲得補充	△
	氣壓調整器故障	氣壓過低時無法補充	△
	輸出管路洩漏	氣壓無法獲得補充	△
儲氣筒	筒身洩漏	氣壓漏失	○
		氣壓過低時駐煞車作用	×
	輸出管路洩漏	氣壓漏失	○
		氣壓過低時駐煞車作用	×
前軸分泵	膜片破損	煞車性能下降	×
後軸分泵	常用煞車膜片破損	煞車性能下降	×
	駐煞車膜片破損	駐煞車作用	×
檢出性：			
○：失效一發生即可被檢出。			
△：無法立即檢知，氣壓隨煞車使用而漸減少後始被檢出。			
×：完全無法檢出，煞車性能下降或駐煞車作用時才被駕駛察覺。			

3.2 失效偵測系統架構

為了改善傳統失效警示機制之不足，本研究所提出之失效診斷策略，首先需要一套失效偵測系統，令失效發生時能夠有效且即時的被檢出。本失效偵測系統包含五只氣壓感測器、一只煞車踏板行程感測器、及一只駐煞車訊號達成。如圖 2 所示，五只氣壓感測器分別安裝於前、後、左、右四輪之煞車制動室管路、以及儲氣筒上，可量測左右前輪制動室、左右後輪常用煞車制動室、以及儲氣筒之氣壓變化。煞車踏板之行程感測器則可藉由踏板擺動之角度、或下方制動閥內部軸心移動之距離，讀取煞車踏板踩下之程度。駐煞車訊號則來自駕駛手動控制之駐煞車閥，僅有作用、與解除兩種輸出訊號。

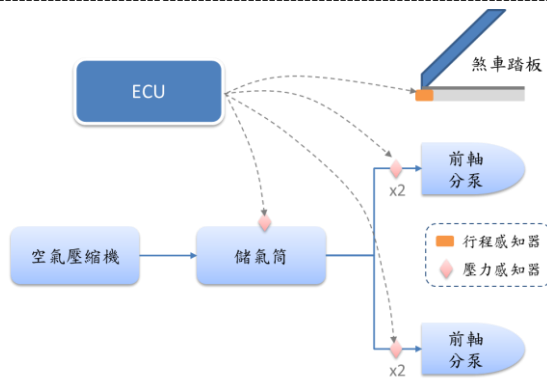


圖 2 失效偵測系統架構圖

3.3 失效診斷策略建置

應用前述失效偵測系統，便可進行失效診斷策略的建置。本論文所提出之失效診斷策略，包含了五種不同的失效偵測方式，其原理詳述如下：

- (1) 高低壓異常判斷：讀取儲氣筒之氣壓。若儲氣筒或與其相連之管路發生洩漏，則筒內氣壓將因氣體逸散而下降，影響煞車力；若壓縮機的壓力調整器(Governor)故障，則無法在儲氣筒內壓力足夠時自動停止運轉，導致能量浪費。本方式亦能偵測到駕駛不當操作煞車，使系統氣壓快速下降之情境。
- (2) 建壓速率偵測：在壓縮機運轉中，且煞車踏板未踩下時，讀取儲氣筒氣壓隨時間之變化。若壓縮機內部損壞或其驅動馬達、控制系統故障，導致氣壓回充效率不彰時，將造成儲氣筒壓力上升速率過於緩慢。
- (3) 儲氣筒洩漏偵測：在壓縮機不運作，且煞車踏板未踩下時，讀取儲氣筒氣壓隨時間之變化。可偵測到儲氣筒突然破損、或與其相連的管路、閥件損壞，導致系統氣壓快速下降之情況。
- (4) 煞車制動力偵測：當煞車踏板踩下時，比較制動室氣壓，與踏板行程間的關係。可確保踏板踩下、制動閥開啟後，來自儲氣筒之壓縮空氣皆能確實送到制動室，使常用煞車作用。
- (5) 制動室膜片破損偵測：當駐煞車控制閥被扳到作用位置時，讀取後軸常用煞車制動室內之負壓值。此時駐煞車彈簧推動推桿伸出，令駐煞車作用，同時會讓常用煞車腔室之容積擴張，使其產生一負壓，並逐漸隨時間消退(空氣由繼動閥之排氣口被吸回常用煞車腔室內)。若此負壓之持續時間過短、或完全未出現負壓，則可判斷常用煞車用之膜片存在破損。

上述五種失效偵測方式所對應之失效情境、與可能故障模式整理如表 3 所示，已包含了大部分無法被傳統警示機制檢出的故障模式。因此應用本失效診斷策略，即可在氣壓元件或管路發生失效時，即時且有效的將其檢出，進而提升電動巴士之行車安全性。

表 3 失效偵測方式所對應之情境與可能故障模式

偵測方式	失效情境	可能故障模式
(1)	儲氣筒氣壓過高	壓縮機氣壓調整器故障
	儲氣筒氣壓過低	a.駕駛不當操作煞車 b.儲氣筒洩漏 c.管路洩漏 d.壓縮機故障
(2)	壓縮機建壓速率過低	a.壓縮機故障 b.管路洩漏
	壓縮機未建壓	a.壓縮機故障
(3)	儲氣筒氣壓下降速率過高	a.儲氣筒破損 b.管路洩漏
(4)	制動室氣壓過低	a.往制動室之管路洩漏
(5)	制動室負壓未出現	a.後軸分泵制動室膜片破損 b.管路洩漏
	制動室負壓持續時間過短	a.後軸分泵制動室膜片破損 b.管路輕微洩漏

3.4 失效診斷軟體模組設計

完成失效診斷策略之發展後，即可進行失效診斷軟體模組的設計。本失效診斷軟體由二大功能模組所構成，分別為儲氣筒壓力失效偵測模組、以及制動室壓力失效偵測模組。以下將針對各功能模組所需之演算法設計進行說明。

3.4.1 儲氣筒壓力失效偵測模組

透過儲氣瓶內壓力、以及壓力隨時間之變化率，判斷煞車系統之狀態，實現前述之高低壓異常判斷、建壓速率偵測、以及儲氣筒洩漏偵測等三項失效偵測方式。偵測流程如圖 3 所示，目的為確保壓縮空氣之供應與儲存無虞，其概念為：

- I. 高、低壓偵測：壓力範圍設定為高壓第一門檻值、高壓第二門檻值、低壓第一門檻值、低壓第二門檻值。其中，門檻值依車輛實際狀況進行設計(高壓第一門檻值>高壓第二門檻值>低壓第二門檻值>低壓第一門檻值)。
- II. 壓力變動速率偵測：當儲氣筒氣壓處於正常範圍、且煞車踏板並無動作之狀態下，若壓力上升速率太慢、或儲氣瓶壓力在短時間內下降，則可判斷為空壓機異常、或儲氣筒與管路發生破損，此時系統將送出煞車異常警示。

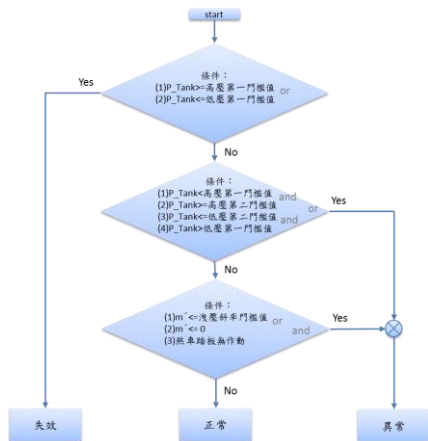


圖 3 儲氣筒壓力失效偵測流程圖

3.4.2 制動室壓力失效偵測模組

當儲氣筒之氣壓處於正常操作範圍時(介於高壓第二門檻值與低壓第二門檻值之間)，監測前後輪制動室之氣壓以及煞車踏板訊號，以判斷踏板踩踏深度所對應的壓力變化是否正常，實現前述之煞車制動力偵測。偵測流程如圖 4 所示，目的為確保煞車踏板踩下後，儲氣筒之氣壓皆能確實送到前後輪之制動室，使常用煞車作用。其判斷條件如下：

- I. 煞車踏板踩踏後，監測前後輪制動室壓力變化，若制動室無壓力變化則送出失效警示。
- II. 煞車踏板踩踏後，監測踏板之踩踏深度、以及前後輪制動室之壓力變化。若制動室之壓力並未隨著煞車踏板深度以預設的比例變化，則送出異常警示。
- III. 在放開煞車踏板後，監測制動室壓力變化。若制動室內之壓力並未小於低壓第二門檻值，則可判斷常用煞車並未隨著煞車踏板放開而完全解除，同時送出失效警示。
- IV. 在未踩下煞車踏板時，監測制動室壓力變化是否異常。

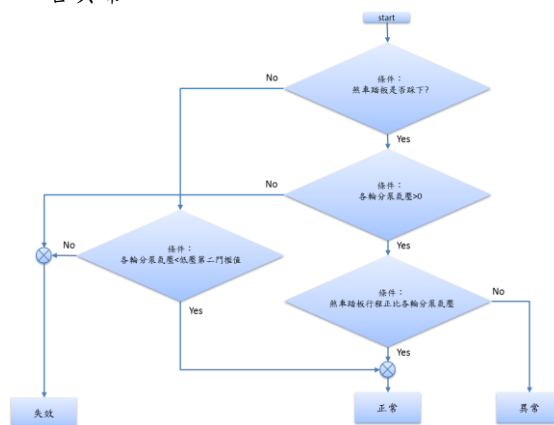


圖 4 制動室壓力失效偵測流程圖

4. 功能模擬與驗證

研究中我們使用 Matlab Simulink 對上述所開發氣壓煞車失效偵測之各別子功能 Stateflow 方塊程式進行模擬與驗證。本模擬採用設計一連串之使用情境，來驗證功能之正確性，驗證結果如下：

4.1 儲氣筒壓力失效偵測功能

模擬驗證時序如圖 5 所示，測試情境說明如下：

- I. 煞車系統啟動，儲氣筒壓力由 0 開始往上增加，在低於低壓第一門檻值送出系統失效警示，高於低壓第二門檻值為正常工作範圍。
- II. 踩下煞車踏板，儲氣筒壓力亦隨著踩踏煞車踏板深度下降，且於正常工作氣壓範圍，系統判斷為正常。
- III. 放開煞車踏板後，儲氣筒壓力逐漸到達正常工作最大上限值，氣壓建壓速率下降，系統判斷為正常。當儲氣筒壓力超過最大上限值送出系統異常警示。
- IV. 將煞車踏板踩更深，並維持相同深度一段時間後，儲氣筒壓力從正常工作範圍降低至系統異

常範圍，並送出系統異常警示。當持續維持踏板深度時，儲氣筒壓力到達失效界線，此時送出系統失效警示。

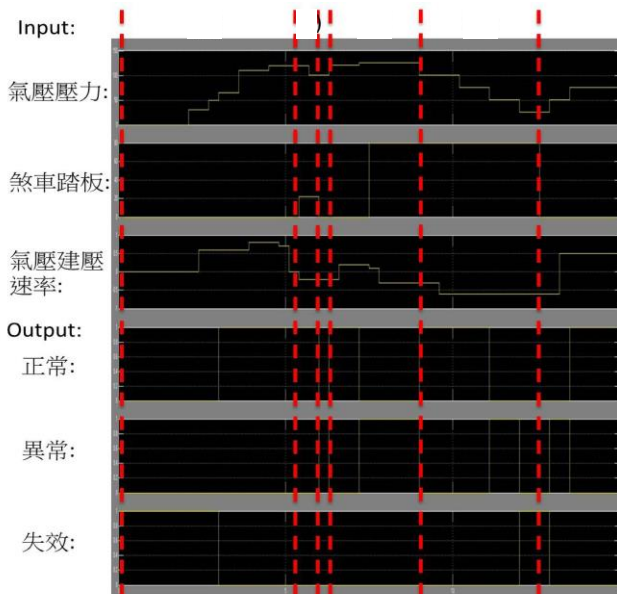


圖 5 儲氣筒壓力失效偵測測試結果

4.2 制動室壓力失效偵測功能

模擬驗證時序如圖 6 所示，測試情境說明如下：

- I. 在無踩下煞車踏板時，各分泵氣壓為 0。當踩下煞車踏板時，壓力隨著煞車踏板深度以一定的比例變化。在釋放煞車踏板後，各分泵氣壓回歸為 0，此時判斷系統為正常狀態。
- II. 當踩下煞車踏板時，此時偵測出其中一個分泵無壓力變化，此時系統送出失效警示。
- III. 在踩著煞車踏板途中，偵測出其中一分泵壓力並未隨著煞車踏板深度以一定的比例變化，此時系統送出異常警示。
- IV. 釋放煞車踏板後，此時其中一個分泵無壓力變化，此時系統送出失效警示。

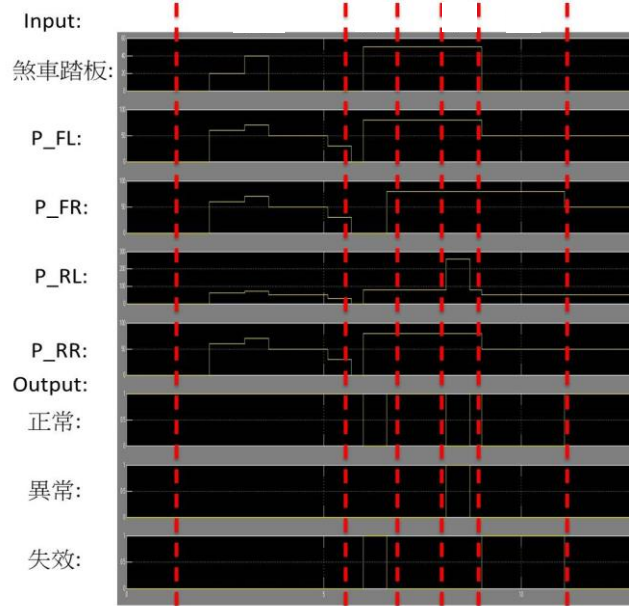


圖 6 分泵壓力失效偵測測試結果

根據模擬測試結果，本研究所提出之失效診斷策略，搭配失效偵測系統以及失效診斷軟體模組，確實可在氣壓元件或管路失效發生時有效且即時的將其檢出，並且送出異常或失效警示告知駕駛。

5. 結論

本研究提出一套應用於電動巴士氣壓煞車系統之失效診斷策略。以原始系統之失效模式分析結果為基礎，利用壓力感測器搭配煞車踏板行程訊號、與駐煞車控制訊號，建置失效偵測系統架構、以及失效診斷策略。接著建立診斷控制演算法、與診斷軟體模組。最後以模擬方式驗證其正確性。根據結果，本失效診斷策略在不同的失效情境下，皆能有效且即時的檢知故障並發出警示，以避免煞車系統失效所導致的危險。

6. 致謝

承蒙經濟部技術處科技專案計畫(104-EC-17-A-25-0843)經費協助，使得本研究得以順利進行，謹此致謝。

7. 參考文獻

期刊論文：

- [1] "Braking deficiencies on heavy truck in 32 selected accidents," Nat. Transportation Safety Board, Washington, DC, Tech. Rep. NTSB/SS-88/06, Nov. 1988.
- [2] S. C. Subramanian, S. Darbha, K. R. Rajagopal, "A Diagnostic System for Air Brakes in Commercial Vehicles", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, NO.3, September 2006.