

# 硬體在環測試驗證技術

陳益新

工研院機械所 智慧車輛技術組 電能系統部

前言：馬達驅動器為電動車的關鍵零組件，在傳統產品研發過程中，與動力馬達相比，驅動器開發期程較短，因此，在未取得馬達實體之前無法進行系統整合階段之各項安全功能失效驗證，後續將造成動力系統性能調教困難，最終則導致量產時程延宕以及成本增加。

## 一、硬體在環測試與驗證方法簡介

硬體在環(hardware in the loop, HiL)測試方法為現代車輛所採用的一種先進驗證方法，以電動車之動力系統為例，依據待測物(device under test, DUT)功率等級與所模擬之環境深度的不同基本上可以分為三個層級：

- Level 1-訊號級：僅控制器(control board)採用實體物件，封閉迴路中之其他組件採用模擬模型。
- Level 2-驅動級：針對控制器與變頻器(inverter)實體進行測試，其於物件仍然使用模型代替。
- Level 3-系統級：將真實動力系統(控制器、變頻器、動力馬達)與車輛模型放入虛擬迴路中進行功能驗證。

相較於實車測試，模擬方法存在難以達到準確的情況，如：實際行駛路況與駕駛行為影響能耗的計算、整車參數鑑別的困難導致性能估測與實際有落差...等；但相對的，硬體在環驗證方法具有以下特點與優勢：

1. 在系統發展過程中，相較於硬體設計變更，軟體版本的更新較為頻繁，由於整車測試與功能驗證週期之限制，無法對每個軟體版本皆進行實車驗證，因此利用硬體在環方法以虛擬測試環境取代實際行駛環境測試，可達到縮短開發週期之目的。
2. 在功能安全(functional safety)失效測試中，針對實車進行故障注入(fault injection)，對於測

試員而言可能面臨人身安全之風險，硬體在環方法可提供相對安全之測試環境進行驗證。

3. 在實車測試時須仰賴人工按照排程依序進行實驗，硬體在環方法可執行自動化測試與驗證，除了節省測試週期之外更可以大幅縮減人力成本。

## 二、硬體在環系統架構

以 ITRI 自行開發設計之驅動級虛擬動力系統驗證平台為例，內容包括：

1. 待測物：馬達驅動器
2. 測試與驗證設備：AVL-EV 動力與電能整合驗證設備
3. 虛擬即時(real-time)環境/迴路模型：動力馬達模型、駕駛模型(操控策略)、車輛模型、3D 道路模型

驗證平台除了提供待測物與虛擬環境之電氣介面與通訊接口、接受驅動器所發射之訊號傳遞給迴路模型進行各項模擬與測試之外；當進行失效測試時更可以將各種故障注入待測物以驗證其功能安全性；詳細規格如表 1 所示。

## 三、關鍵技術

在執行硬體在環測試與驗證時，主要關鍵技術如以下所述：

1. 實際待測物體與虛擬負載、環境之系統整合技術：由於作為負載之虛擬動力馬達模型具有高功率輸出特性，因此在與實體驅動器整

表 1 虛擬動力系統驗證平台架構與規格

操作介面	AVL	PUMA OPEN / E-storage
	額定功率(kW)	250
	額定扭力(kW)	500
	最高轉速(rpm)	15,000
	響應頻率(kHz)	1
	馬達模型	3 phases, PSM / ASM
	AC 相電流(ARMS)	600
	模擬相電阻(mΩ)	10~1000
	模擬相電感(μH)	80~300
	最大功率(kW)	250
	最大電壓(V)	800
	最大電流(A)	600

合時必須先完成 CAN Bus 的通訊協議設定；為了避免訊號接收時的電磁干擾，高壓連接線路的屏蔽作業也須確實執行。

2. 虛擬馬達建模技術：首要項目為動力馬達關鍵參數量測(如：轉子慣性、磁通量、電感與相電阻等)，接著進行參數鑑別以確認量測值的正確性，最後建立動力馬達模型。
3. 虛擬環境/迴路的搭建：在整車功能與性能測試中，車輛參數的量測方法，直接影響到模型輸出的精準度。參數不準確，就算是採用知名廠牌模擬器所提供的模型，也無法得到準確的輸出特性。此外，在不同的道路特性下(路面附著係數、水平特性、坡度特性、凹凸特性...等)；或是目標車輛處於不同的負載情況(滿載、輕載與不同胎壓...等)；甚至是駕駛者實施不同的操控行為(加/減速、雙移線，方向盤轉角階躍，方向盤轉角脈衝、蛇行與穩態迴轉...等)相關參數的設定皆會直接影響性能評價的精確度。
4. 功能安全失效測試：在不同失效測試案例中進行故障注入，利用硬體在環驗證方法可提高測試之安全性；並依此建立可靠的故障診斷檢測方法，目的為確保相對應的診斷故障碼(diagnostic trouble code, DTC)能被記錄。

#### 四、案例分享

本實際案例為針對馬達驅控器實體進行功能安全失效測試與驗證，利用已建構之驅動級虛擬動力系統驗證平台進行失效測試以驗證系統之各項功能；失效模式由安全目標的訂定與故障對應機制展開得到，注入內容包括：高壓短路、斷路、低壓供電損失、功率晶片過溫保護等 4 大類共 10 項驗證項目，補充測試共計有 5 項。測試結果亦將進行解析以提供下一代產品於需求展開階段之設計參考。

在本例中待測物為實體動力馬達驅控器，利用電池模擬器(battery emulator)做為高

壓輸入電源；驅控器三相輸出端則是連接到馬達模擬器(e-motor emulator)，最後再連結設備電源供應器形成一條完整迴路，如圖 1。對驅控器而言，此負載迴路即為虛擬之車輛行駛環境；再利用主控台人機操作介面中的虛擬開關(switch matrix)進行失效模式的注入與切換。

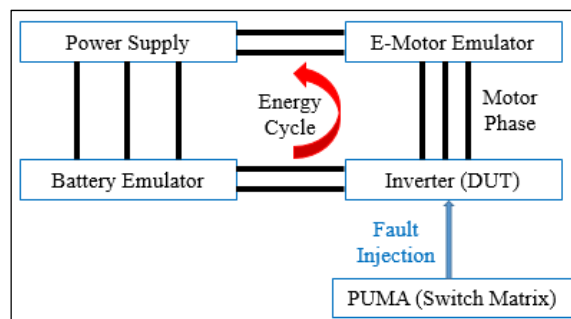


圖 1 虛擬動力系統測試方塊圖

#### 五、結論

硬體在環模擬方法為目前世界上電力電子產品開發的主流工具，本研究利用已發展完善之驅動級虛擬動力系統驗證平台進行驅控器各項功能測試以驗證設計是否滿足需求；與在實車上進行測試、調教的傳統方法相比，不僅較為安全且能有效縮短發展期程達到節省成本的目的。