

針對馬達控制系統的設計及驗證建立高逼真的模型

文/ Brad Hieb, MathWorks 譯/ 鈦思科技

精確的受控體模型 (plant model) 是使用模型化基礎設計開發控制系統的關鍵。經由建構良好的受控體模型，開發人員能有效驗證控制系統的功能、進行模型閉鎖迴圈測試(MIL test, closed-loop model-in-the-loop tests)、透過模擬調校增益、最佳化設計，並進行假設分析(what-if)；而這些測試及模擬，都是在現實受控體上執行有困難、或是具有較高風險的驗證測試。

儘管有這些優點，開發人員有時仍然不大樂意花費時間及資源去建立和驗證受控體模型。他們的顧慮包含了：不知道得花多少時間去進行模擬、過程中需要多深入的相關知識、以及需要哪一種設備來擷取硬體測試數據去建立及驗證模型。

因此，本文將透過案例，去說明開發人員能如何使用 MATLAB®、Simulink® 以及幾種常見的實驗室器材，來建立一個永磁同步馬達 (PMSM) 受控體模型的工作流程。工作流程將包含以下步驟：

1. 執行測試
2. 從測試數據界定模型參數
3. 透過模擬來驗證參數

我們使用受控體模型來建立並調校 PMSM 封閉迴路的控制系統模型。在模擬過程中，我們使用控制器模型來執行步階反應(step response)及滑行測試(coast-down)；並透過 xPC Target™ turnkey 即時套裝測試系統將其模擬結果執行在硬體上。由結果發現，模擬結果與硬體測試結果是非常近似的，主要訊號諸如轉子速度(rotor velocity)與馬達之相電流其正規化均方根誤差(NRMSD)皆小於 2% (圖 1)。

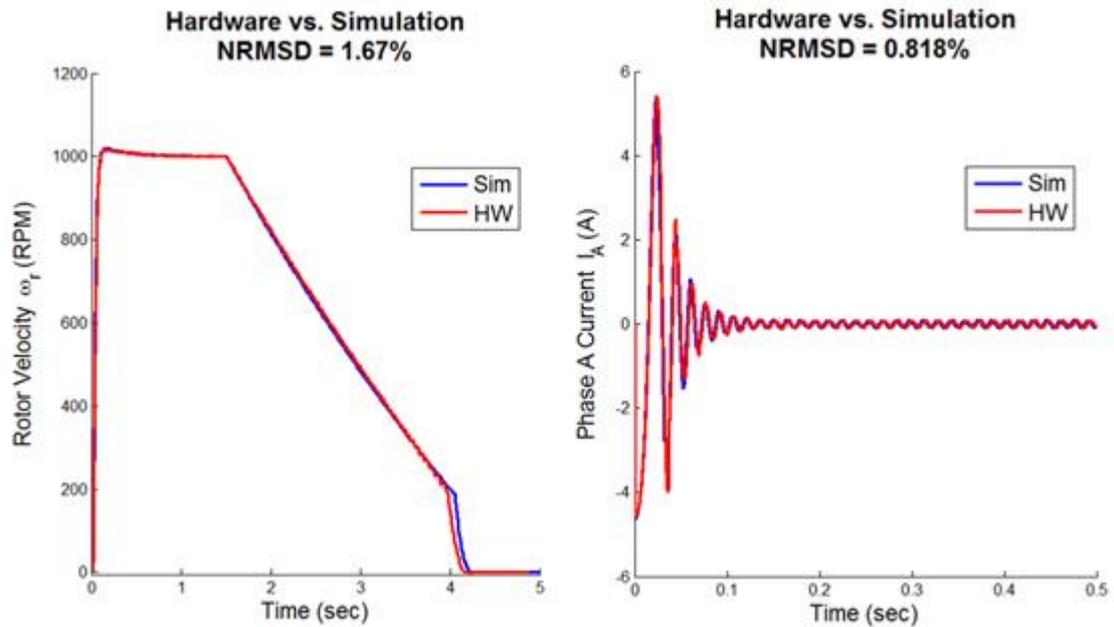


圖 1. 轉子速度(左)之硬體測試(紅) 與模擬(藍) 的比較，以及相電流(右) 之硬體測試(紅) 與模擬(藍) 的比較

受控體模型及其參數

透過 Simulink SimPowerSystems™ 建立的 PMSM 受控體模型包含了馬達及一個負載，在本例為一壓克力碟盤。本模型以九個參數去定義其動作，其中一個參數(碟盤慣量)與負載有關，而其餘八個參數則與馬達相關。(圖 2)

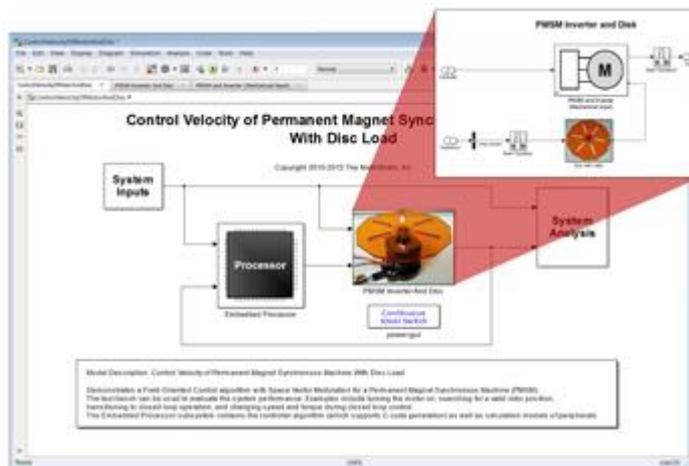


圖 2. 永磁同步馬達(PMSM)之 Simulink 模型

我們進行了五組測試去檢定這些參數，包含雙線擺測試(bifilar pendulum test)、反動電勢測試(back EMF test)、摩擦測試、滑行測試以及直流電壓步階測試(DC voltage step test) (表 1)。在這篇文章中，我們將聚焦於滑行測試以及直流電壓步階測試。這些測試將於參數識別上，逐步地展示更精細的方法，並且說明如何分別透過曲線擬合(curve fitting)以及參數估計以擷取參數值。

測試	參數識別	識別方法
雙線擺測試	碟盤慣量(H)	計算
反動電勢測試	馬達極數(P) 磁鏈常數 (A_m) 轉矩常數(Kt)	計算
磨擦測試	黏性阻尼係數(b) 庫侖磨擦(J_0)	曲線擬合
滑行測試	轉子慣量 (H)	曲線擬合
直流電壓步階測試	電阻(R) 電感(L)	參數估計

表 1. 模型參數及測得方法

針對每一項測試，我們將說明測試設定並解釋我們如何進行測試、取得數據、擷取參數值並且驗證它。

經由滑行測試計算轉子慣量

為了計算轉子慣量 (H)，我們旋轉轉子達到初始速度 (ω_0)，於轉子滑行至停止的這段期間，測量其旋轉速度 (ω)，並藉由測量之數據，轉子慣量便可透過曲線擬合方程式得出。

此微分方程式 (1) 說明了馬達的機械運動。因滑行測試已被設定，故負載轉矩 (T_{load}) 始終為 0。一旦馬達到達初始的穩定轉速，馬達隨即關閉電源，因而電磁驅動轉矩 (T_{em}) 也為 0。在此條件下，微分方程式 (1) 可由方程式 ω , (2) 導出，且

ω 為轉子軸的旋轉速度

ω_0 為子軸的初始旋轉速度

J_0 及 b 為庫侖摩擦力和黏性阻尼係數，其數值從各自的磨擦測試求得。

T_{em} 為電磁驅動扭矩(在此測試中為 0)

T_{load} 為負載轉矩(在此測試中為 0)

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{H} (T_{em} - b\omega_r - J_0 - T_{load}) \quad (1)$$

If

$$T_{load} = 0$$

$$T_{em} = 0$$

Then

$$\omega_r = \left(\omega_{r0} + \frac{J_0}{b} \right) e^{-\frac{b}{H}t} - \frac{J_0}{b} \quad (2)$$

進行測試及取得數據

在實驗室，我們建了一個開放迴路的 Simulink 測試模型。當馬達到初始速度每秒 150 徑度，便關閉電源使其開始滑行直至靜止。於測試期間，此模型從轉速感測器中擷取數據，之後使則用 Simulink Coder™ 以及 xPC Target，我們將此模型轉檔至 xPC Target 即時套裝測試系統，再使用 xPC Target 執行此模型，並匯入轉子轉速資料到 MATLAB 中進行分析。

擷取並驗證參數值

進行測試之後，我們在 MATLAB 環境下使用曲線擬合工具箱 (Curve Fitting Toolbox™) 繪製測得的速度資料，以帶入方程式 (2) 取得轉子角速度(ω_r)，並用於轉子開始滑行時，觀測速度資料。透過曲線擬合得出的 H 值，我們得以從馬達開始滑行之始，去估算方程式(2)，並透過原始測試數據去繪製結果(圖 3)。如圖 3 所示，帶入以曲線擬合得出之 H 值的方程式(2)。在滑行測試中，能很近似地預測出馬達速度。

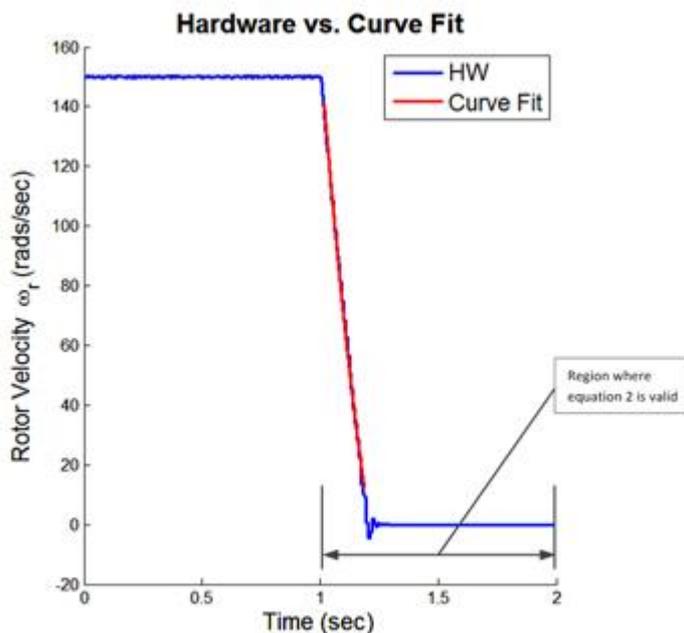


圖 3. 滑行測試期間的轉子慣量測試。藍色為硬體測試結果，紅色為曲線擬合結果。

我們使用模型去驗證出我們的參數識別結果。經由從滑行測試中獲得的轉子慣量值（在本次的 PMSM 模型中為 $3.2177e-06 \text{ Kg m}^2$ ），我們再以 Simulink 進行了滑行測試模擬，然後比照模擬結果以及實際測量結果（圖 4）。由圖可知，結果非常的相似，其正規化均方根誤差 (NRMSD) 只有約 2%。

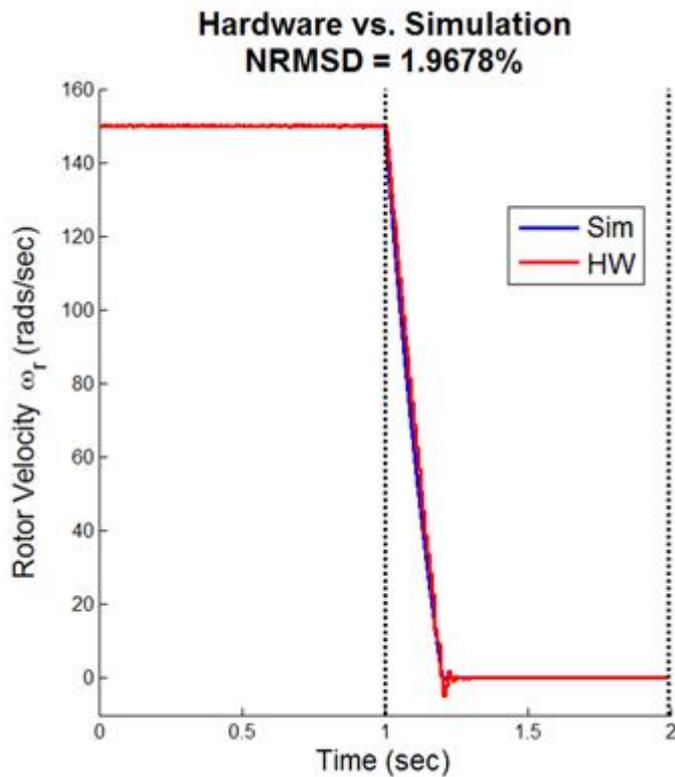


圖 4.比較轉子慣量之測量結果(紅) 以及模擬之轉子慣量(藍)

透過直流電壓步階測試測定電阻及電感

在直流電壓步階測試中，直流電壓將應用於 A 相及 B 相的連結，以利電流的測量。在這情況下，三相永磁同步馬達的行為將似於兩個串聯電阻和兩個串聯電感器的迴路(圖 5)。

Equivalent Circuit for DC Step Test

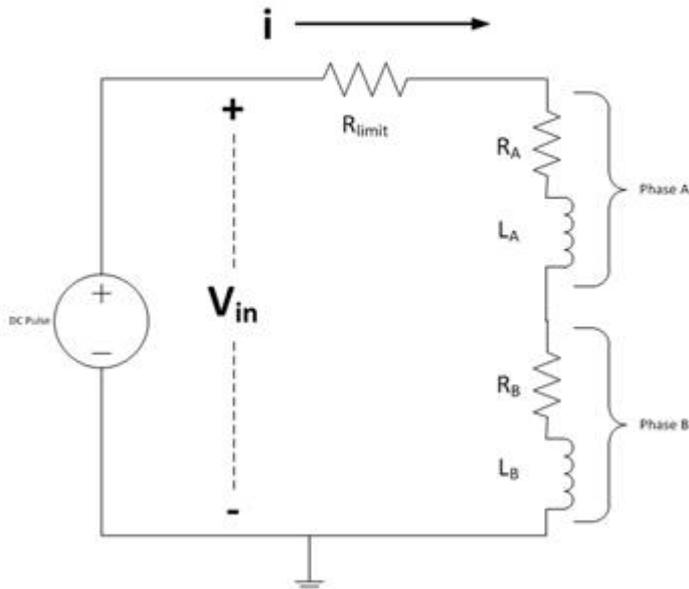


圖 5. 做為直流電壓步階測試用之等效電路

由此量測出的電流將用以找出電阻及電感之參數值。在測試過程中，轉子將保持不動，以避免讓反動電勢分析變得複雜，進而導致電流被阻擋。為了避免馬達在轉子不動的狀況下燒毀，我們將加入一個限阻電流 (R_{limit})，並採用步進脈衝，而非穩定的直流電壓。

進行測試並取得數據

我們再次使用 xPC Target 以及 xPC Target 即時套裝測試系統去進行測試。在 Simulink 中，我們創建了一系列可以持續約 2.5 毫秒的 24 伏特脈衝之模型。我們使用 Simulink Coder 將此模型轉檔至在我們的 xPC Target 系統中，並將脈衝電壓應用於整個永磁同步電機的 A 相和 B 相。藉由示波器，去測得所施加的電壓以及通過馬達的電流；再透過儀器設備控制工具箱 (Instrument Control Toolbox™)，去讀取所測得之數據，並在 MATLAB 環境下繪製結果 (圖 6)。

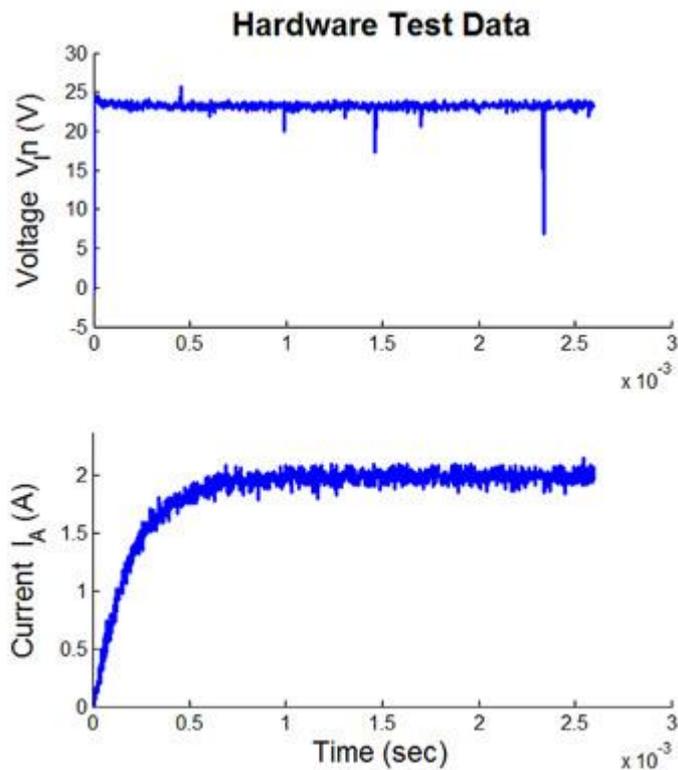


圖 6. 在直流電壓步階測試中之電壓(上)及電流(下)

擷取並驗證參數值

藉由使用電流及電壓的穩態值，並以歐姆定律 $R = V/I$ (Ohm's law)，相電阻便可以計算出來。以此永磁同步馬達為例，我們計算出其電阻為 $23.26 \text{ volts} / 2.01 \text{ amps} = 11.60 \text{ ohms}$ 。當我們減去 10 ohms (此為限流電阻的值) 並且將結果除以 2 ，以作為兩相電阻，我們計算得出其馬達相電阻為 0.8 ohms 。

測定電感則需要更精細的方法。乍看之下，我們似乎可以使用曲線擬合，就如同我們在測定轉子慣量一樣。然而，由於直流電源提供時的內部電阻，導致直流電壓的數據將會由一開始 - 也就是當電流流入電路之值為 0 時 - 所測得的 24 伏特，在電流通過迴路後，衰減為 23.26 伏特並呈現穩定。這是因為這些輸入電壓並非純粹的步階信號，因而從曲線擬合解決方案到串聯的 RL 電路方程式的結果是不準確的。

為了克服此困境，我們採用了更強大的方法：透過參數估計及使用 **Simulink** 設計最佳化模塊組 (**Simulink Design Optimization™**)。此方法的好處是，它既不需要純淨的步階信號輸入，亦不需要進行曲線擬合便可進行精確模擬。

我們使用 **Simulink** 及 **Simscape™** 模擬了馬達的等效串聯電阻-電感電路 (equivalent series RL circuit) (圖 7)。Simulink 設計最佳化模塊組將測得之電壓作為此模型之輸入值，並透過已知的限流電阻 (R_{lim}) 及馬達相電阻 (R_{hat})，去估計出電感值 (L_{hat})，以使模型的預估値與實際測量的數據得以盡可能地接近。

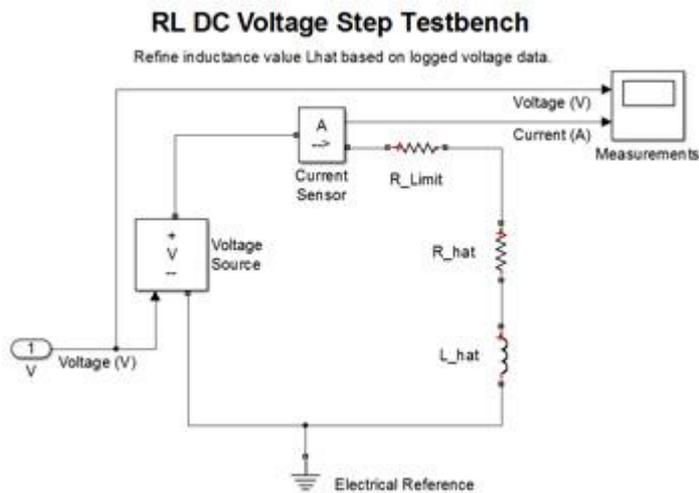


圖 7 馬達等效電路之 Simscape 模型

為了驗證我們已取得的數據，即相電阻為 0.8 ohms 以及電感為 1.15 millihenries，我們將其置入我們的 PMSM 模型；此外，我們並同時使用之前驅策實體馬達時，所使用的數據去模擬。之後，我們比較兩造模擬結果，亦可發現結果非常近似，其正規化均方根誤差(NRMSD)僅僅約 3%。

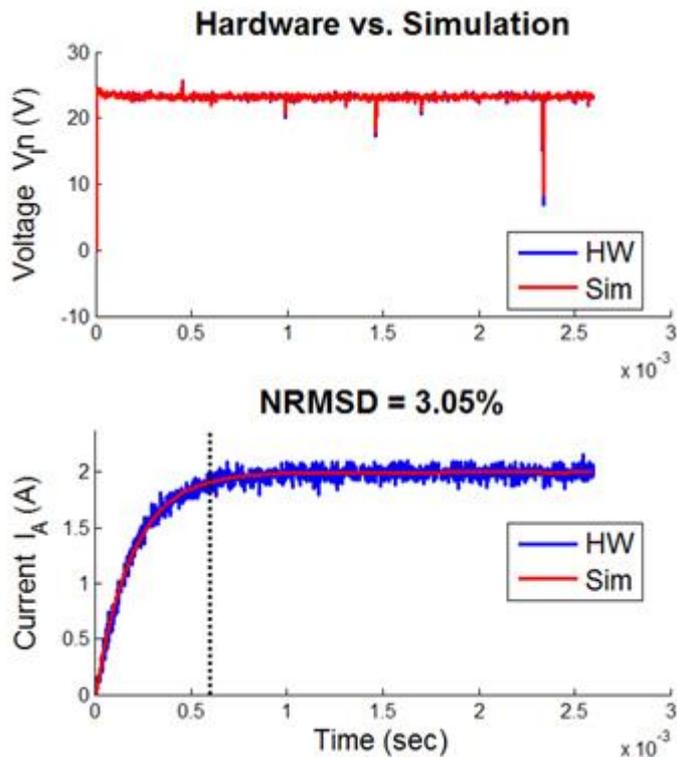


圖 8. 電壓 (上) 與電流 (下) 之測量結果 (藍) 與模擬結果 (紅) 之比較

使用受控體模型設計控制器

在識別及驗證所有關鍵參數之後，我們的 PMSM 受控體模型就可以應用在馬達控制器的開發了。使用了 Simulink 設計最佳化模塊組去調校控制器的外迴路的比例、整體增益及速度調節器，並執行了封閉迴路模擬以驗證控制器模型的功能，接著我們透過 Simulink Coder 產生模型的程式碼，然後再轉檔至 xPC Target 即時套裝測試系統。

在控制器驗證的最後階段，我們在 Simulink 環境下進行步階響應及滑行測試模擬然後使用 Simulink xPC Target™ 即時套裝測試系統上的程式碼去進行硬體測試。我們比較了轉子速度及相電流在模擬及硬體測試結果後，又再次地發現，其模擬及硬體測試結果非常近似，兩項之正規化均方根誤差(NRMSD)皆低於 2%。

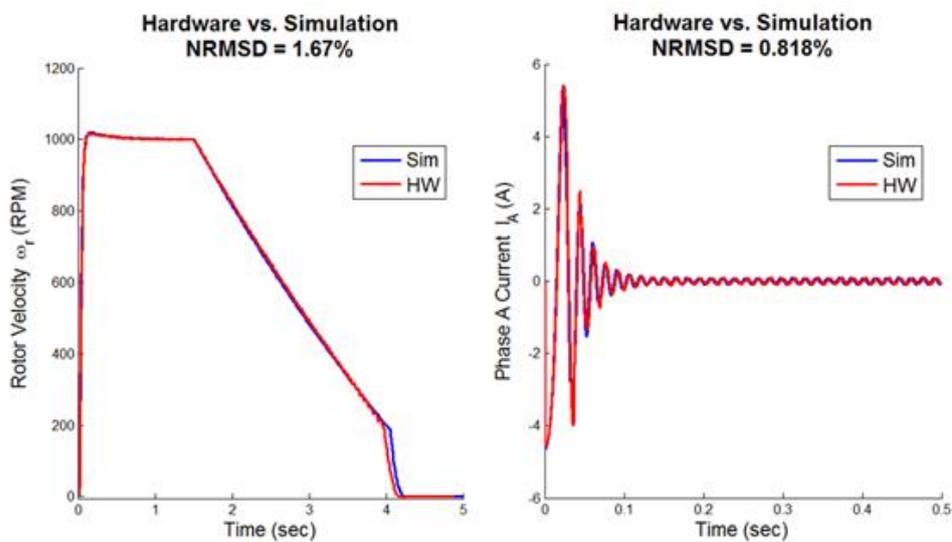


圖 9. 轉子慣量(左) 及相電流 (右) 在模擬結果 (藍) 語硬體測試結果 (紅) 的比較

總結

永磁同步馬達 (PMSM) 受控體模型的開發強調了兩項參數識別測試。其一為經由滑行測試中感測器所取得之資料，其二為在直流電壓步階測試時，透過示波器及儀器設備控制工具箱取得資料。藉由在滑行測試中透過曲線擬合，以及在直流電壓步階測試以參數估計方式，我們得以擷取出所需數據。而後，經由模擬結果以及測量結果的比對，我們驗證了全部的參數值，這可以讓我們在開發及調校控制器時，去建立一個可信賴的受控體模型。

在尚未將嵌入式程式碼轉至控制系統前，上述工作都可以早期開發階段就完成。如此，開發人員們也能在硬體測試開始前，經由需求及設計，去發現並盡可能減低問題的發生率。這些好處遠遠超過建立受控體模型時所需的成本，特別是當這個模型還可以被重複使用在其他專案上。

僅致謝密西根大學 Heath Hofmann 教授，以其建議之 PMSM 測試程序，並同意 MathWorks 於專案初始階段使用其實驗空間及設備，感謝其對本研究之貢獻。