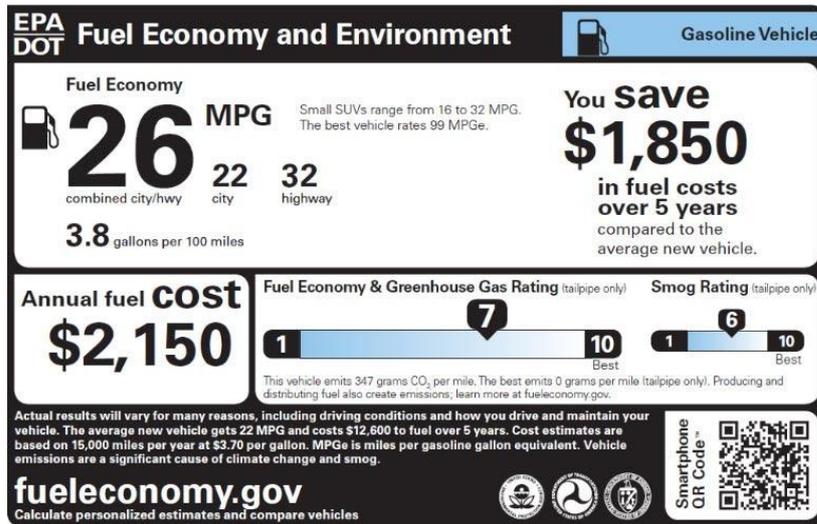


## 以靈敏度分析優化動力傳動系統設計促進燃油經濟性

By Aditya Baru, MathWorks

在美國，正在考慮購買新車的人，很可能在新車展示廳看過像這樣的貼紙：



汽車製造商被政府要求在所有的新車貼上這張被稱作 **Monroney 標籤**(Monroney sticker)的貼紙。貼紙上面有許多重要訊息，其中可讓買主們對於每加侖的汽油預計可讓該車輛跑多少哩有點概念。燃油經濟性不僅是汽車買主所考量的重要因素；它還是環境監管機構在訂定接下來幾年增加的燃油哩程數之標準規範時所嚴密關切的議題。

此外，還有幾家車廠最近更因為 **Monroney 標籤**上標示的燃油經濟性數值未準確符合實際駕駛的情況而被消費者提告。在過去幾年，實際的燃油經濟性數值與 **Monroney 貼紙**標示數值之間的差距呈現顯著增加。這是因為現在的控制系統在預駕車情境下估計 **Monroney 哩程數**表現非常良好；然而，在汽車實際駕駛時，像是在高速公路的快速駕駛等情況，燃油的消耗可能跟標籤上的數值不同。因此可以想見各家汽車製造商，都很有興趣了解什麼樣的工程決策，可以減少燃油經濟性標示值與真實情況的差異，讓其控制系統在面對駕駛條件變化時能夠更加穩健。

因此，工程師會需要知道哪些參數對控制系統的行為會對車輛的燃油效率造成最大的影響。本文將介紹一個互動式的工作流程，利用蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)與靈敏度分析來判定車輛動力傳動系統之中的哪些元件對燃油經濟性

的影響最大。透過找出這些元件，我們可以採取調整設計的措施來降低燃油消耗，或讓控制系統更加穩健地因應元件參數的變化，以達到燃油經濟值要求。

本工作流程以 Simulink 設計最佳化模塊組(Simulink Design Optimization™)內的靈敏度分析(Sensitivity Analysis)工具為基礎，以常見搭配汽油引擎的客車作為研究對象，並將在高速公路和城市駕駛的差異考量在內。雖然本文著重於界定出哪些參數會影響燃油經濟性，但所介紹的方法也可用於分析其他會受其設計參數變化影響的系統的靈敏度分析。

## 建立系統模型

為了執行蒙地卡羅模擬與接下來的靈敏度分析，我們首先需要建立一個模型來捕捉車輛動態，並對其各種元件提供對應描述。在我們的範例中，以可能影響車輛燃油消耗參數來定義模型，像是車輪半徑、車軸比 (axle ratio)、甚至是溫度等環境因素。我們可以接著簡要列出需要注意的參數並產生一組用來進行蒙地卡羅模擬的樣本。

在這個範例，我們用的是一個動力傳動模塊組 (Powertrain Blockset™) 內的 Simulink® 模型(圖 1)。這個模型是一個汽油車輛配有火星點燃引擎與 8 速雙離合器變速箱，模型內具備環境條件與車輛的零件。

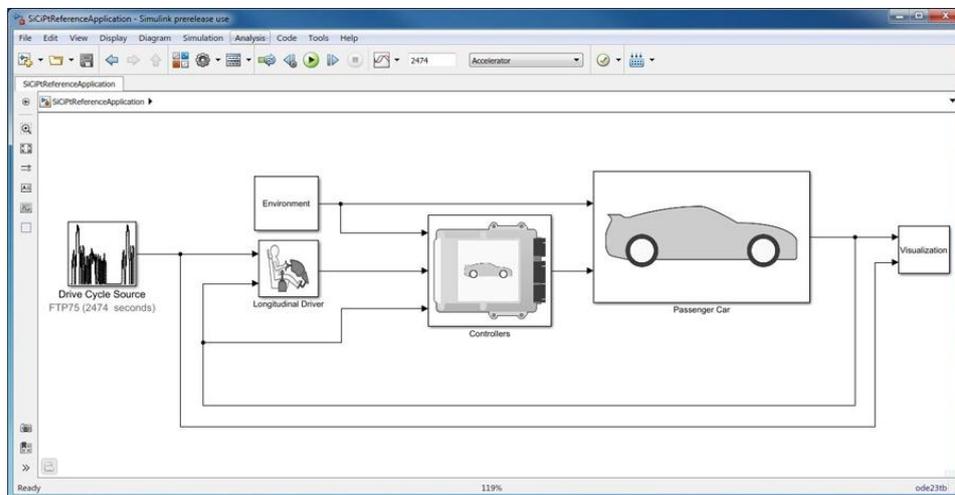


圖 1. 利用 Simulink 建立的車輛模型

我們首先利用美國環保署(U.S. EPA) 為在美國進行銷售的汽車製造商指定的 FTP75 驅動器週期資料執行一個基線模擬。模擬結果顯示，在市區駕駛大約 40 分鐘左右，我們的汽油哩程大約是 30 mpg (圖 2)。

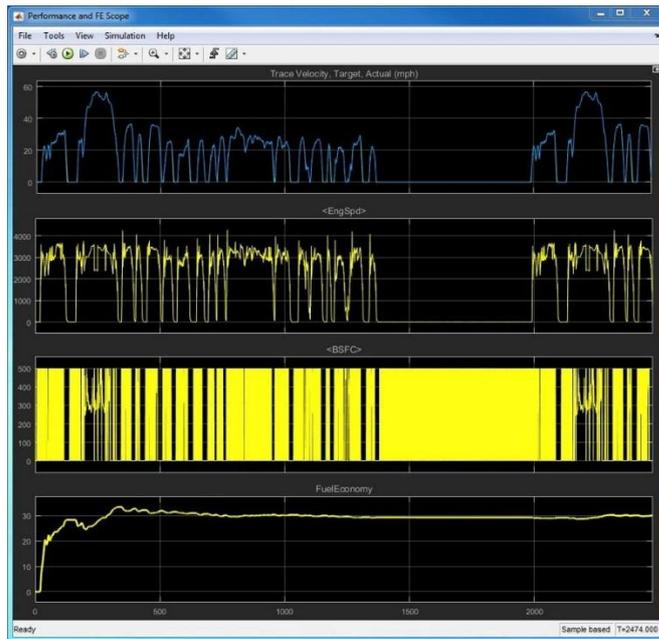


圖 2. 在市區駕駛大約 40 分鐘的模擬結果

## 蒙地卡羅模擬的設置

為了執行蒙地卡羅模擬，我們將判定以下五個參數對於汽油哩程數的影響：

- 車輛的質量
- 車輪半徑
- 外部大氣壓力
- 油門孔直徑
- 噴射器斜率

車輛的質量與車輪半徑不需再多做解釋。外部大氣壓力即為周圍環境的大氣層壓力。油門孔直徑影響進入引擎的氣流，而噴射器的斜率則影響燃油通過燃油噴射器時的流動，進而影響引擎的馬力。節流孔與噴射器斜率的變化可能由零件製造的改變與零件老化而引起，比如“油門的焦化”與燃油在噴油嘴的堆積等等。為求簡化，我們在這裡選擇一個較小的參數集，但參數集可以繼續延伸至包含其他像是汽缸數目、汽缸容量、以及其他在模型定義的參數。

我們只需要按下 Sensitivity Analysis 工具中“Select Parameters”按鈕，即可建立包含上述五個參數的新參數集。接下來，我們建立一個樣本集，其中涵蓋足夠的設計空間來顯示這五個參數分別對哩程數造成的影響。我們可利用固定、已知的數值來建立樣本集，但我們將利用準隨機序列(quasi-random sequence)-Sobol 序列-

以平均、有效率地涵蓋大範圍具有可能性的數值。其他還有隨機抽樣與多變量分佈抽樣等方法可以產生樣本。

我們可以指定概率分配來產生各個參數的樣本，並設定可能值的上限和下限。舉例來說，我們假設車輛質量均勻地分佈在 1200 公斤與 1400 公斤之間，分別對應於乘載一個人與四個人的重量。我們也為其他四個參數設置了相似的界限，並產生 100 個樣本，接著繪製成圖表(圖 3)。

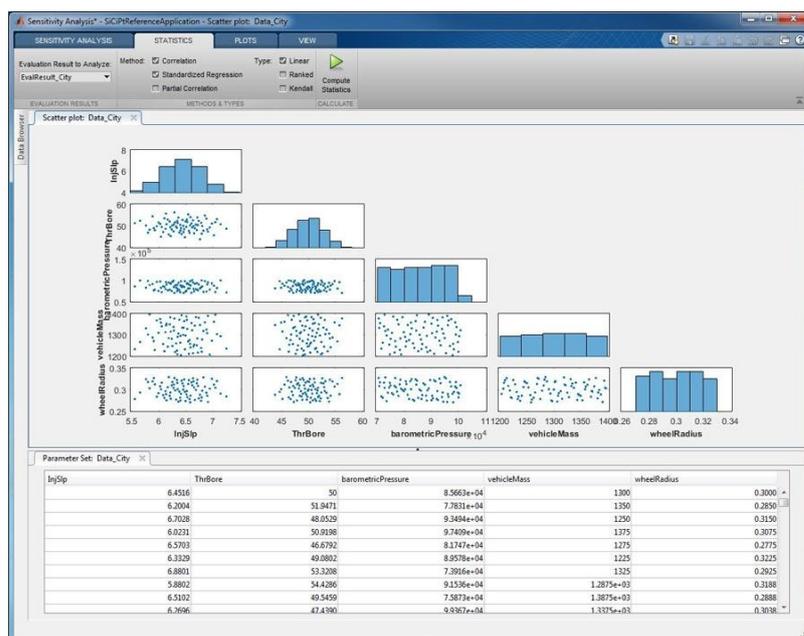


圖 3. 樣本集與其散佈圖

下一個步驟，我們從模型中選擇訊號來計算特定市區駕駛週期的哩程數。以這個案例來說，我們選擇可從“Visualization”子系統得到的 Simulink 訊號，提供了連續的燃油效率估計值。透過查看訊號的最終值，我們得到一個特定模擬的 mpg 估計值。我們接著點選 Sensitivity Analysis 工具的“Evaluate Model”按鈕來評估整個參數集。

Sensitivity Analysis 工具可以執行平行運算模擬，這在我們考慮靈敏度分析需要進行的大量駕駛週期時特別重要。給定的參數集是由我們連結到的電腦叢集工作人員平行、自動地評估，而結果會以散佈圖的形式視覺化(圖 4)。x 軸代表五種參數值中的變異數，而 y 軸代表以每個樣本計算出的哩程數值。如散佈圖所示，以這組參數集來說，即便是相同的駕駛週期，車輛的 mpg 有可能落在 24 到 32 之間的範圍。

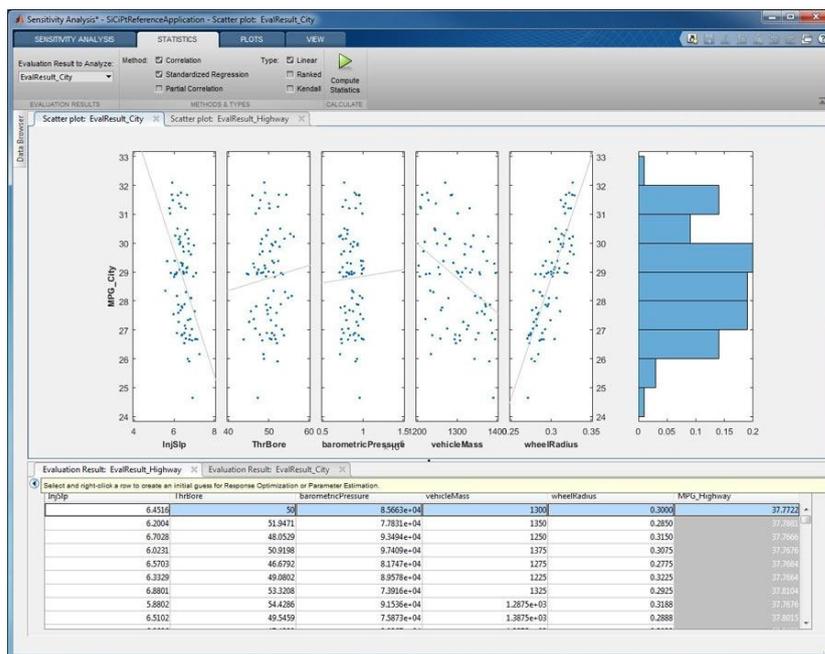


圖 4. 估計的結果與對應的散佈圖

## 分析 MPG 對參數變化的靈敏度

我們可以在散佈圖上覆蓋一個線性擬合來觀察模擬資料趨勢(圖 5)。從這次的擬合中，我們可以看到在市區駕駛時的 mpg 值會隨著車輪的半徑增加有所改善。同樣地，車子愈輕時，燃油效率愈佳。

或者，我們也可以利用更符合統計學的方法，以 Sensitivity Analysis 工具計算 mpg 對參數變化的靈敏度。我們可以利用這項工具來計算像是 mpg 值與參數變化之間的相關係數等統計值。在這個範例，我們將觀察相關數值，並以圖 5 的龍捲風圖來說明。

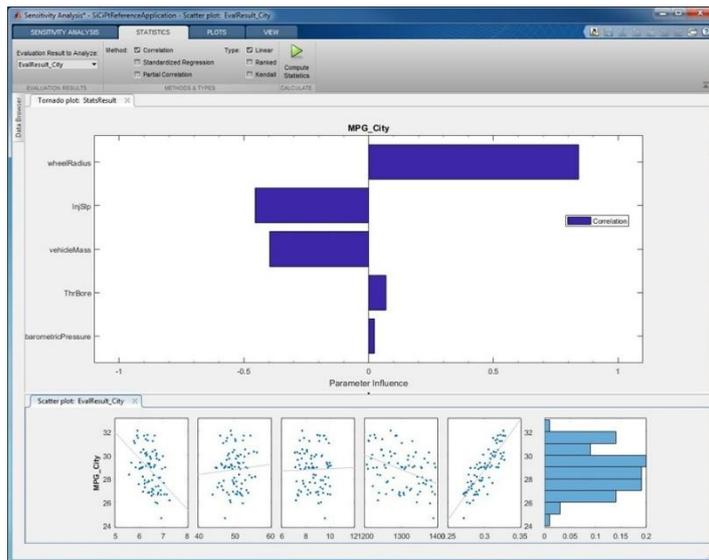


圖 5. 靈敏度分析結果的龍捲風圖

本圖顯示 mpg 值與車輪半徑呈現正相關，並與車子的質量呈負相關。這告訴我們 mpg 值隨著車輪半徑的增加與車輛質量的減少有所改善。根據取決於相關係數的長條圖，我們也可以看到車輪半徑對 mpg 的影響大於車輛質量。同樣地，mpg 值隨著噴射器斜率的降低有所改善，而油門孔直徑與外部壓力的相關係數較低，證明這兩個參數的改變對燃油消耗沒有太大的影響。

我們接著來看看駕駛在高速公路是否影響燃油的經濟性。圖 6 為模擬 13 分鐘高速公路駕駛的結果。這項模擬利用 EPA 指定的 HWFET 駕駛週期資料，我們可以看到哩程數大約為 35 mpg。我們以與之前相同的樣本集執行高速公路駕駛週期的蒙地卡羅模擬以及一個靈敏度分析，如同相關係數的龍捲風圖所示，大氣壓力具有最大的影響，當外部壓力下降時哩程數上升了。而其他像是噴射氣斜率或車輛質量等參數的變化等影響相對小許多(圖 7)。

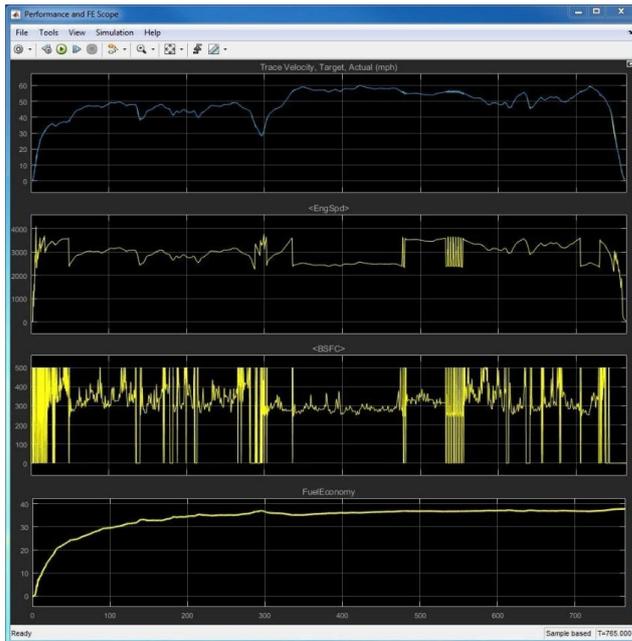


圖 6.13 分鐘高速公路駕駛的模擬結果

就我們可以看到的，在利用兩個不同的駕駛週期的情況下，各項參數的影響有相當大的差距。這種差異可能是因為在這兩個駕駛週期，引擎是在不同操作條件下運作。這可以從比較圖 2 與圖 6 的引擎速度(第二個軸)看出。在市區駕駛週期下的引擎速度較為“尖銳”，而高速公路駕駛週期下的引擎速度則較為一致。在較高海拔，氣壓較低的時候，油門需要更大的孔徑以維持既定的扭矩輸出，造成較少的能量損失，改善燃油經濟性。由此可見，大氣壓力在高速公路駕駛時的影響力比在市區駕駛時的影響力來的更大(圖 7)。

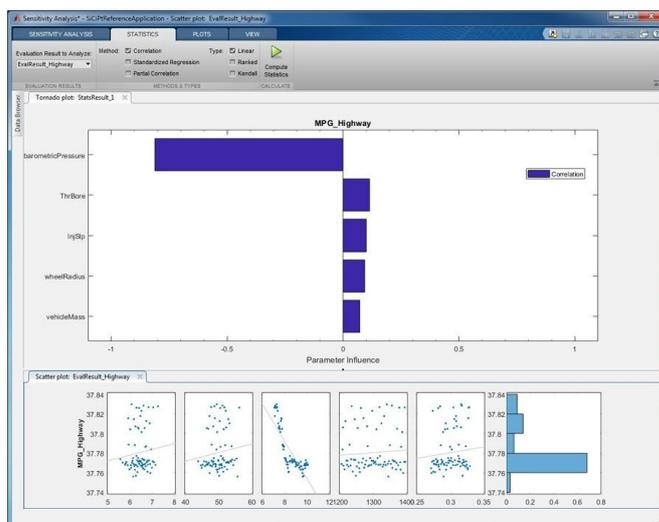


圖 7. 高速公路駕駛週期的靈敏度分析結果

需要注意的是，這些結果與選用的資料集樣本有相當大的關係。如果我們選用較小範圍的車輪半徑值或更大範圍的車輛質量值來執行蒙地卡羅模擬，應該會看到很不一樣的靈敏度分析結果。

## 利用平行運算改善蒙地卡羅模擬的表現

我們的 Simulink 模型有超過 6000 個模塊含有模型參考、變量和資料字典等，可以讓不同的團隊使用於多種應用。以這樣大小的模型來說，在桌上型電腦執行幾百次或幾千次的模擬相當耗時，為了要改善性能，我們以平行運算的方式進執行模擬，這有幾種方法。我們可以使用平行運算工具箱(Parallel Computing Toolbox™)在桌上型電腦進行平行運算，或者在執行 MATLAB®的高性能的電腦叢集網路上進行平行運算。在本案例，我們使用 MATLAB 分散式運算引擎(MATLAB Distributed Computing Server™)，在本地網路的 12 核心電腦叢集執行平行運算，可讓總模擬時間減少為 1/10。

做法是，我們只需要在 Sensitivity Analysis 工具的 Options 選單中選擇啟用我們的電腦叢集，工具接著會自動地尋找並加上必要的檔案與路徑相依性，這可確保每一個平行的電腦 worker 都可得到所有必要的資訊以成功完成模擬。

## 結論與下一步

我們的分析顯示車輪半徑在市區駕駛時的影響最大，而像是大氣壓力等環境條件則對高速公路駕駛有最大的影響。

從所得到的這些知識可看出靈敏度分析是一個相當有用的工具：它可讓工程師更清楚了解他們必須考慮哪些取捨，以及設計的改變將如何影響系統的行為。在本案例，工程師可透過增加特別的功能到控制器，使燃油經濟性在面對車輪半徑變化時更加穩健，以確保 mpg 貼紙的準確度。舉例來說，我們可以透過車速感測器來利用車輪半徑估計調整變速器的換檔計畫，以因應半徑的改變並讓引擎運作維持在其最有效率的範圍內。同樣地，我們可以透過增加油門的孔徑減少市區駕駛的燃油消耗。