

## 透過系統層級模擬來優化車輛懸吊系統的設計

By Brad Hieb and Vijayalayan R, MathWorks

車輛承載品質及處理性能的最佳化/優化涉及到平衡多項相互衝突的設計目標。舉例來說，為了降低某個頻率範圍內導致駕駛不適的振動，工程師需要減少懸吊系統剛性；另一方面，為了將懸吊系統的偏轉維持在可接受的範圍，工程師又必須增加懸吊系統剛性。如果懸吊系統是在原型化車輛上進行測試的話，這類取舍的評估可能非常花費時間及金錢。

其中一個降低與實體原型化相關的成本及延遲的方式是開發一個系統層級模型(System-Level Model)，並藉由執行模擬來將設計最佳化。這個方法可以讓底盤工程師在開發過程中早一點找到主要設計參數的初始值。這些初始值有助於早期計畫決策的評估，還可有效降低因實體原型化要求而重複的次數，對更高度逼真模型進行更詳細的模擬來說，是一個很好的起點。

本文將描述一個使用系統層級模擬來進行車輛懸吊系統設計優化的工作流程。這個工作流程是以一個使用 Simulink®及 Simscape™建立的四分之一車輛模型為基礎。

### 為什麼使用系統層級模擬？

在傳統的工作流程(圖 1)，一輛測試車是從規格開始，工程師在道路或實驗室測試這台車的性能、評估測試結果，並更改設計來改善性能。這些步驟如同一個循環的過程重複數次，直到這輛車可以達到設計目標。

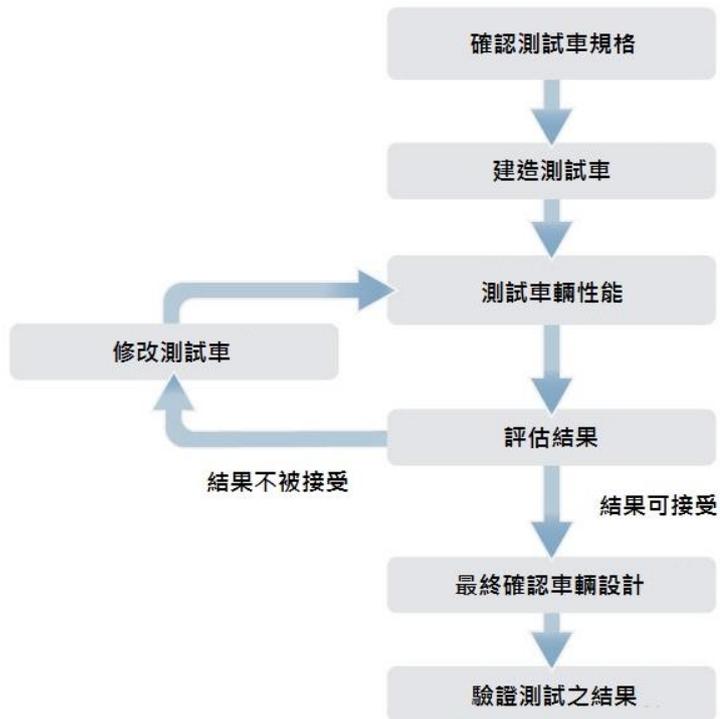


圖 1: 傳統車輛設計流程圖

這個傳統方式最大的缺點就是需要花費成本及時間來建立每一個重複步驟的原型，這種建立與測試 (build-and-test) 的循環，使得預測完成這整個設計流程需要花費的時間變得更困難，而且冗長的重複作業讓探索所有設計結構變得不切實際，因此大部分車輛的最終設計很可能並不是最理想的。

系統層級模擬的方法(圖 2)則不同，可讓工程師在建立實體測試車輛之前，利用模擬先改善規格。

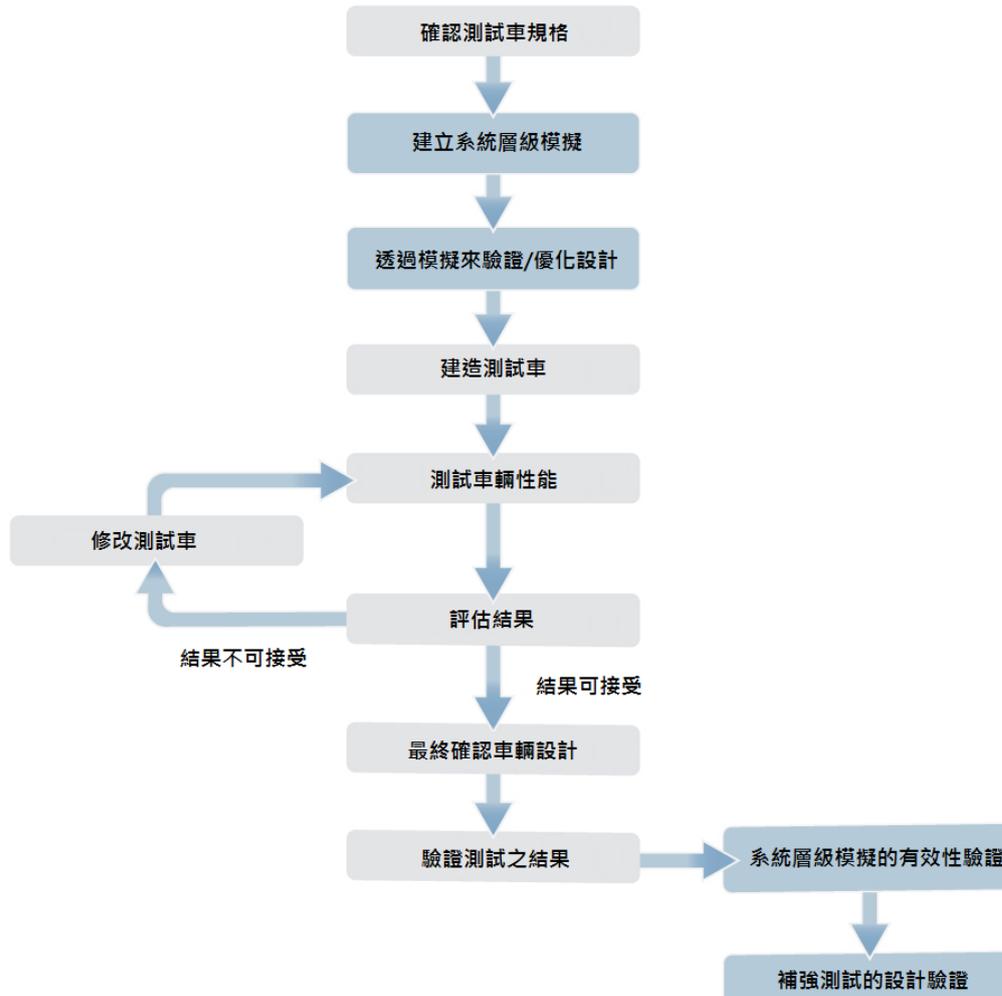


圖 2: 使用系統層級模擬的設計流程圖

這個模型可以是一個從之前經過完整驗證的車輛開發專案加以變更的版本。工程師利用這個系統層級模型執行模擬來將性能依照要求進行驗證，並將可調參數進行優化。當設計符合性能的要求時，工作流程跟著使用在傳統方法的重複步驟。這個設計因為已經在稍早透過模擬進行優化，需要較少的原型，節省了時間及金錢成本。

藉由車輛最終驗證結果認證的系統層級模型可以使用在未來的車輛開發專案。系統層級模型也可以用來支持車輛驗證測試，這些模型在無法對每一個可能的結構進行測試或測試進行上有困難或危險的情況下，對於具備多個結構的車輛特別有幫助。

### 建立一個質量彈簧阻尼(Simple Mass-Spring-Damper)系統的簡易實體模型

只有在模型能準確地代表實際系統行為時，可從系統層級模擬獲得可靠的結果。導出模型的方法可以有許多種，從第一原則建模(First principles modeling)到資料導向的建模(Data-driving modeling)(圖 3)。這種方法的使用將依據測試數據的可得性、以及對潛在實體的了解等因素來決定。

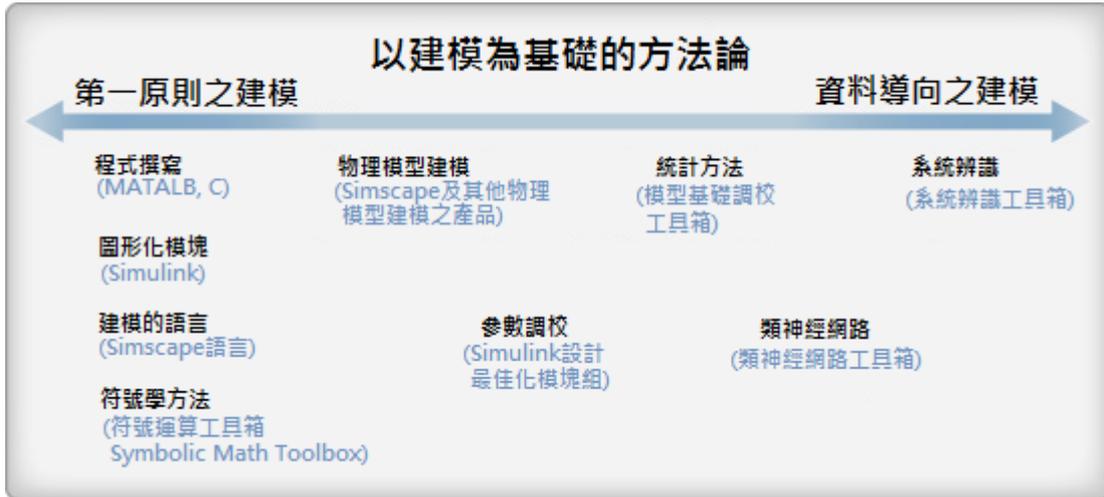


圖 3: 以建模為基礎的方法論

在我們的範例中，我們將使用以 **Simscape** 為基礎的物理建模方法。**Simscape** 可讓物理系統建模更容易，因為您只需要定義系統中的物理元件是相互關聯的即可，不需要去推導及執行整個系統行為的方程式。**Simscape** 會自動將物理系統的方程式公式化。這個方法便於迅速設計疊代及探索，有助於產生優化的設計且可更加了解影響系統行為的物理設計參數是什麼。

為了闡述這個物理建模的方法，我們由使用 **Simscape Foundation** 函式庫中所提供的質量、彈簧、阻尼等模塊，建立一個建議的質量-彈簧-阻尼系統模型開始(圖 4a 及 4b)。

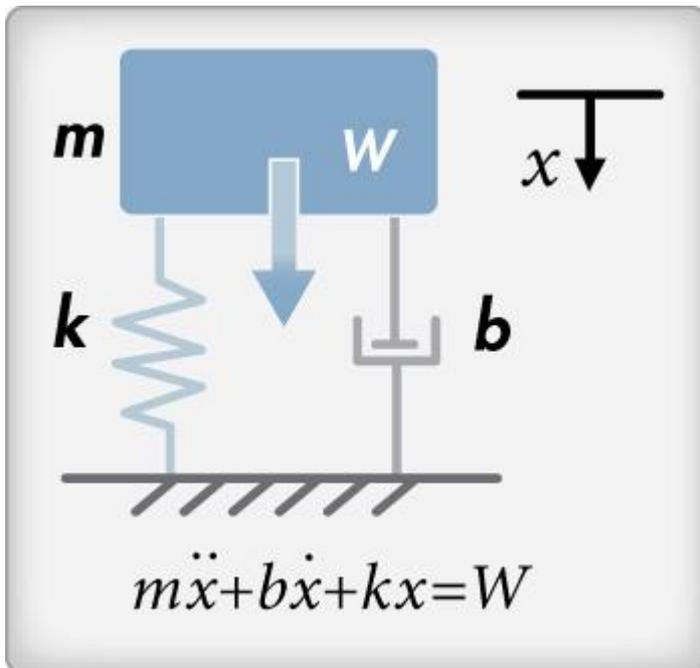


圖 4a: 一個簡易的質量-彈簧-阻尼系統

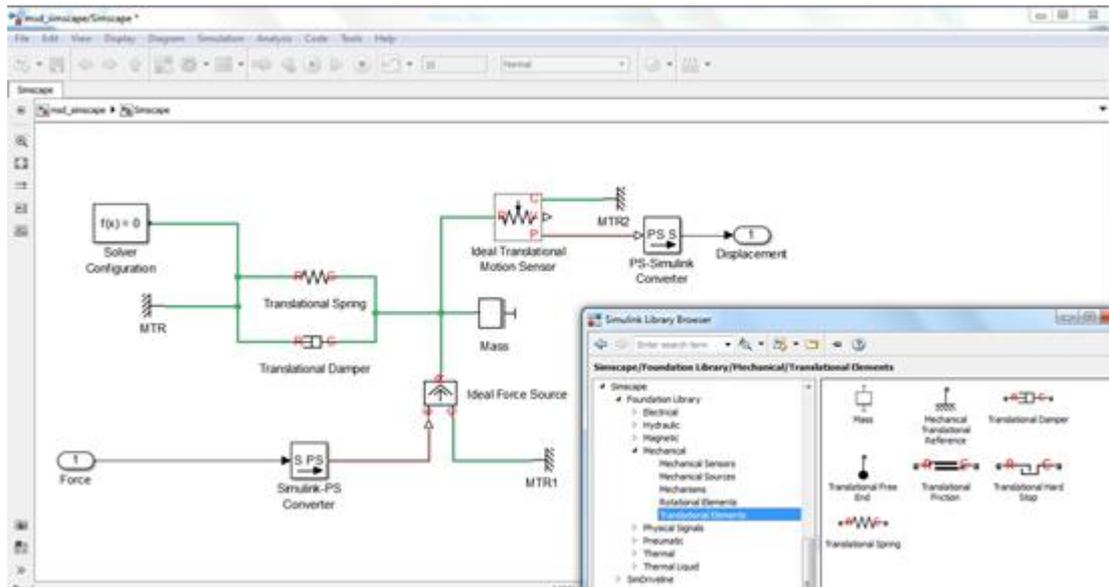


圖 4b: 系統內的 Simscape 模型

我們來執行模擬一個質量對步階輸入施力的反應，並將其視覺化 (圖 4c)。

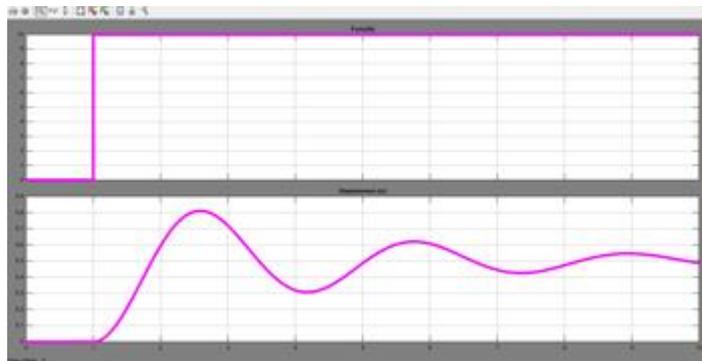


圖 4c: 模擬結果顯示質量-彈簧-阻尼系統對一個作為步階輸入的 10 牛頓力的回應。

對某些系統來說，建立具有非線性特性的模型組成是必要的，舉例來說，如果阻尼器上有阻尼與速率差異的相關係數時。我們可以使用 Simscape 語言來建立一個反映這種非線性特性的客製平移阻尼器 (Translational Damper) 模塊：

```
component LUT_damper < foundation.mechanical.translational.branch
```

```
% Translational Damper
```

```
% The block represents an ideal mechanical translational viscous damper.
```

```
%
```

```
% Connections R and C are mechanical translational conserving ports,
```

```
% with R representing the damper rod, while C is associated with the
% damper case. The block positive direction is from port R to port C.
```

```
% Copyright 2005-2008 The MathWorks, Inc.
```

```
inputs
    D = {100, 'N*s/m'};    % Damping coefficient:left
end

equations
    f == D*v;
end

end
```

### 建立系統層級的四分之一車輛模型

我們藉由增加表示輪胎動態及路面的組件來延伸這個基本的質量-彈簧-阻尼系統模型(圖 5)。

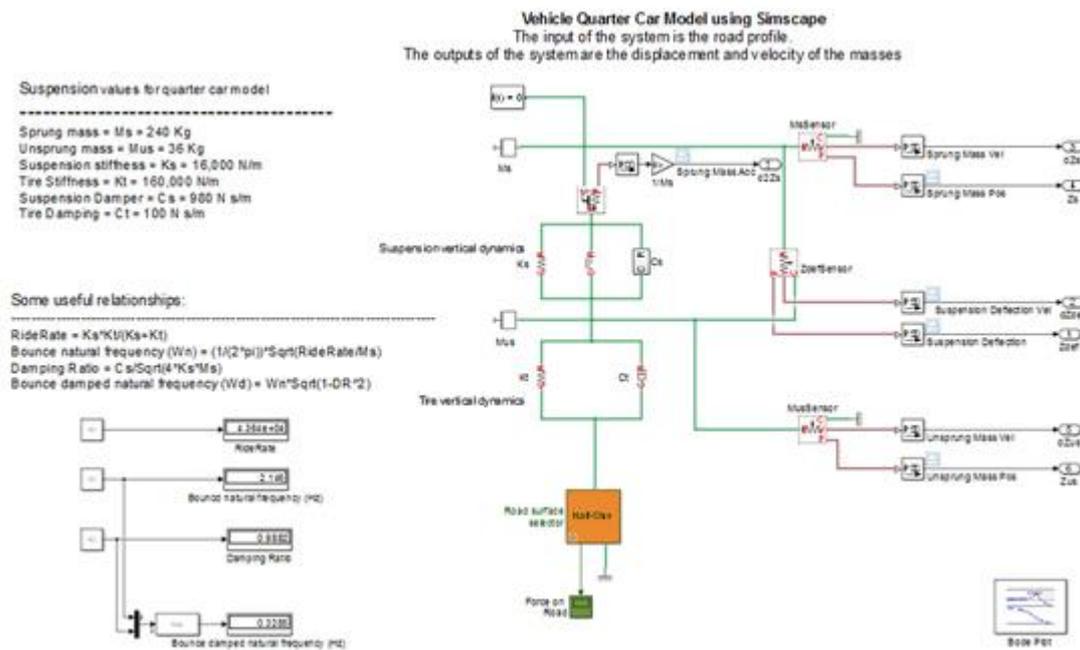


圖 5: 使用 Simscape 建立的四分之一車模型。

我們依據不同的路面狀況來建立模型，並使用多埠開關模塊(multiport switch block)來提供選擇期望路面的選項。選擇測試用的期望路面之後，我們模擬這個模型，並分析這個跳動質量(sprung mass)的加速度、速度、及位移。

## 系統層級模型優化

將四分之一車輛模型與道路模型結合，可以提供我們一個可以用來優化車輛懸吊設計的系統層級車輛模型。我們的目標是要抑制 4Hz-8Hz 這個頻帶之間的振動，並同時在設定的限制內維持懸吊的運作，為此，我們需要調整懸吊設計參數，像是阻尼相關係數及彈簧剛性，而手動調整這些參數是非常耗費時間的工作。

這個過程可以使用 Simulink 設計最佳化模塊組(Simulink Design Optimization™)來自動執行，這個模塊組提供了互動式工具及函式來自動地調整設計參數，直到模擬結果符合設計目標，像是改善系統性能及能源消耗最小化。在這個設計最佳化工具，我們可以從測量偏轉及圖解式說明訊號限制的模型選擇 Simulink 訊號來設定懸吊偏轉限制，並以這些限制作為最佳化問題的條件。條件定義完成後，我們可以選擇設計參數來從 Simscape 模型進行最佳化，並使用工具中的數值最佳化技巧來調整這些參數。

因為需要針對不同路面的偏轉及舒適度來進行優化，路面類型會被當作一個不確定參數(*uncertain parameter*)。這類型的參數會因最佳化演算法而有所不同，被用來在最佳化過程中模擬情境的數目及類型擴充，但不會被演算法調整。

因為主要的設計要求是要將裝上彈簧的質量加速訊號振幅最小化，使其落在我們在 MATLAB 建立的特製成本函式的頻帶 4Hz-8Hz 之間。

```
function out = SuspnComfort(data)

global BPSpec BPFilt

if isempty(BPFilt)

    %Create a bandpass filter to focus on the 'comfort' frequency range
    %
    A_stop1 = 60;      %      Attenuation in the first stopband = 60 dB
    F_stop1 = .1;     %      Edge of the stopband = .1 Hz
    F_pass1 = 2;      %      Edge of the passband = 2 Hz
    F_pass2 = 8;      %      Closing edge of the passband = 8 Hz
    F_stop2 = 100;    %      Edge of the second stopband = 100 Hz
```

```
A_stop2 = 60;      % Attenuation in the second stopband = 60 dB
A_pass = 1;       % Amount of ripple allowed in the passband = 1 dB

BPSpec = ...
    fdesign.bandpass('Fst1,Fp1,Fp2,Fst2,Ast1,Ap,Ast2', ...
    F_stop1, F_pass1, F_pass2, F_stop2, A_stop1, A_pass, ...
    A_stop2, 1000);

BPFilt = design(BPSpec);
end

%Filter the Suspension Acceleration
Sig = data.Uncertain.MsAcc;
%Sig = data.Nominal.MsAcc;
t = Sig.Time;
y = Sig.Data;
Ts = 1/BPSpec.Fs;
tn = min(t):Ts:max(t);
yn = interp1(t,y,tn);
yf = filter(BPFilt,yn);

%Compute energy in filtered signal
yf2 = yf.^2;
out = 0.5*diff(tn)*(yf2(2:end)+yf2(1:end-1))';

%figure(1), plot(tn,yn,tn,yf), title('MsAcc, MsAcc(filtered)')
end
```

這個函式使用了訊號處理工具箱(Signal Processing Toolbox™)的一個頻帶濾波器來篩選特定頻寬內的彈簧質量加速訊號，並屏除頻寬之外的訊號。這個成本函式計算經過過濾的訊號能量，並回送這個數值作為輸出值。

有了已定義的客製成本函數作為用來最小化的值，我們開始進行最佳化作業。

這個模型使用不同的彈簧剛性及阻尼的相關係數數值反覆進行模擬。

我們透過成本函式輸出及偏轉振幅的標繪圖來追蹤最佳化過程(圖 6)。

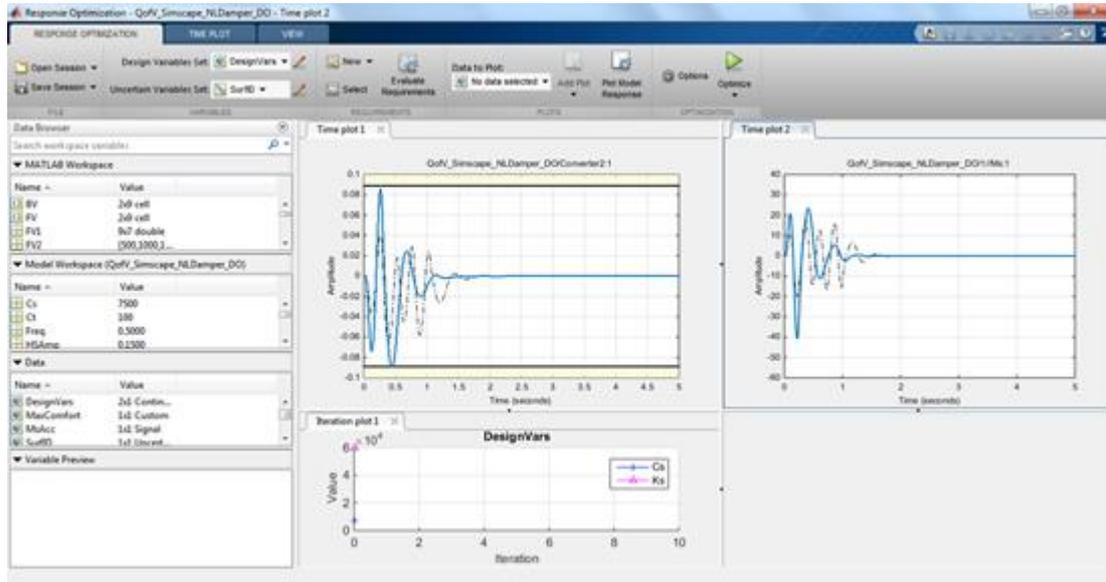


圖 6: 最佳化結果：偏轉振幅(上中)，以及每一個疊代的成本函式輸出值(上右)。

在過程的最後，Simulink 設計最佳化(Simulink Design Optimization)回報了可將振動最小化及乘客舒適度最大化的彈簧剛性與阻尼相關係數值

我們只用了兩個參數值來做調整，這個最佳化問題在單核心處理器花費了大約八分鐘時間來執行，若要執行其他附加可調參數以及更複雜的最佳化問題，則可以使用平行運算工具箱(Parallel Computing Toolbox™)在多個運算核心上平行地執行任務。