

四缸汽油發動機建模分析與控制策略設計

Modeling, Analysis and Control of Four Cylinder Gasoline Engine

蔡欣倫

Hsin-Luen Tsai

(高苑科技大學電子工程系暨先進潔淨節能引擎開發與測試服務中心)

(Department of Electronic Engineering and Advanced Engine Research Center, Kao Yuan University, Taiwan)

摘要: 本研究採用發動機性能分析軟體進行四缸汽油引擎性能分析，並與實驗測試進行驗證，進行電腦控制策略擬定分析，找出點火正時及噴油正時，並進行引擎測試實驗設計，透過發動機性能 DOE 設計分析、實驗驗證及實驗測試策略擬定，有助於實體發動機進行實驗控制策略開發，以供後續研究所用與節省成本。

關鍵詞: 汽油引擎、性能分析、控制策略、點火正時、噴油正時

Abstract: The one-dimensional commercial engine simulation code was carried out to investigate the engine performance of a commercial four-cylinder gasoline engine under various air-fuel ratio and ignition timing. The numerical results were applied to design the engine testing experiments and the engine control strategy. The DOE procedure by the code could assist to elucidate the best engine operating points and facilitate experimental engine control design, thus the iterative procedure would effectively improve accelerate the engine research and development and save the cost.

Keywords: Gasoline engine, Performance Analysis, Engine Control, Ignition timing, Injection Timing

1 簡介

目前產業界廣泛採用電腦數值模擬進行發動機研發與設計，透過可靠及準確的引擎性能模擬分析程式可輔助設計發動機控制參數，可節省開發時間及成本。本研究承繼先前研究[1-4]使用商用引擎性能分析軟體 GT-SUITE [5]，針對一具商用發動機建立 GT 分析模型，進行噴射正時及點火正時最適化分析，將建立電腦控制策略以供控制與測試該具發動機，並透過實驗結果驗證分析模型，以確立 GT 模型可用性之相關資訊。該具商用發動機為 4 缸 DOHC 雙凸輪軸 16 汽門設計，其主要參數如表 1 所示，本研究暫不考慮進氣增壓分析與實驗。

表 1 實驗引擎相關規格與參數

Bore	86 mm
Stroke	94.6 mm
Compressor Ratio	10.0
Displacement Volume	2198 c.c.

2 發動機建模、性能分析與驗證

本研究採用商用 2.2L 四缸發動機做為研究平台，為了加速引擎控制單元(ECU)的開發，建立多缸發動機的控制系統開發，採用 GT-SUITE 商用軟體進行發動機性能分析，建立完成 GT 分析模型與驗證後，將可針對該具引擎在不同操作點下的動力輸出資訊[4]，並且進行最適化發動機操作點之模擬分析，建立相關控制策略擬定之重要資料，並且設計控制程式導入發動機實驗測試。

圖 1 為使用 GT-SUITE 所建立的直列四缸發動機計算模型，該具發動機之點火及噴油順序為 1-3-2-4，各缸採用四閥門配置，測試用油採用市售汽油。

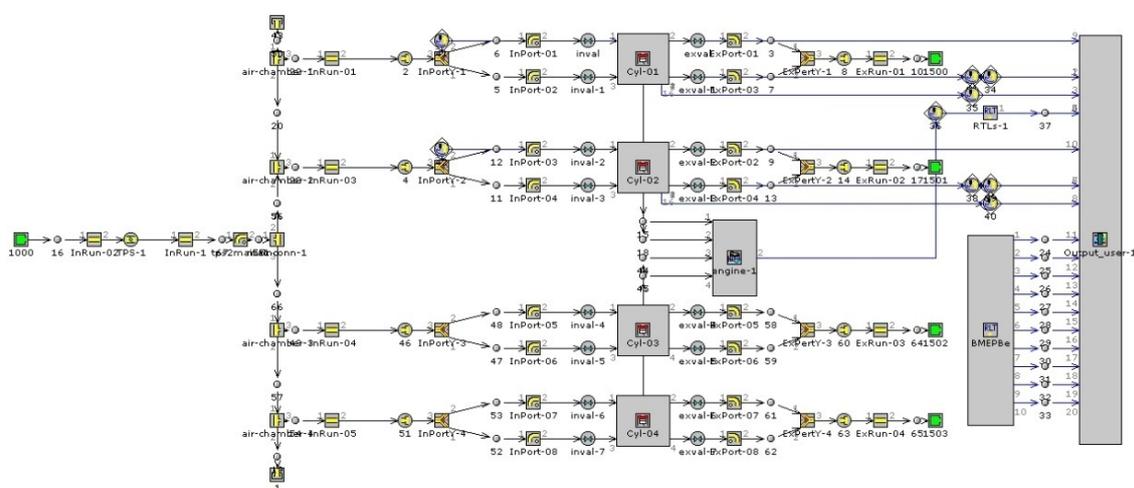


圖 1 商用四缸汽油發動機之 GT-SUITE 模型

本研究更新缸內混合燃氣火焰傳播速度公式，採用自訂的火焰傳播速度方程式[6]，其考慮缸內火焰傳播速度為火焰傳入未燃氣的速率及燃燒時燃氣膨脹傳播速度，與缸內壓力、溫度具絕對關係，所使用的火焰速度方程式如下：

$$S_L = (B_m + B_\phi(\phi - \phi_m)^2) \left(\frac{T_u}{T_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.06(Dilution)^{DEM - 0.77}) \quad (1)$$

其中 Φ 為缸內當量比、 Φ_m 為最大速度之當量比、 T_u 為未燃氣溫度、 $Dilution$ 為未燃區內殘餘燃氣之質量分率而 DEM 則為其指數參數，相關參數為 $B_m=0.350$ (m/s)， $B_\phi=0.549$ (m/s)， $\Phi_m=1.1$ ， $\alpha=2.4-0.271\Phi^{3.51}$ ， $\beta=-0.357+0.14\Phi^{2.77}$ 。

燃油蒸發是燃燒反應前很重要的過程，蒸發的過程速度也會影響到缸內壓力及溫度的變化。本文中採用 GT-SUITE 進行引擎性能分析軟體中內置的蒸發率計算式，如下所示：

$$R_{evp} = \frac{4.16 \times RPM_{ref}}{CA50} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{TMPEXP} \left(\frac{RPM}{RPM_{ref}} \right)^{RPMEXP} \quad (2)$$

其中 CA50 為燃料蒸發 50%所需的時間(曲軸角度)，參考轉速(RPMref)、溫度(Tref)分別為 4000rpm 及 600K，RPMEXP 及 TMPEXP 為其指數參數。先前研究[7]高轉缸內直噴速發動機油滴尺寸最佳化時，除建立最大允許油滴大小與轉速關係外，亦發現在不同轉速下油滴蒸發隨曲軸角變化曲線沒有太大變化，因此在 GT-SUITE 考慮油滴蒸發模式時則不考慮轉速影響，故分析中的 RPMEXP 設定為 0。

發動機試驗先以節氣門開度(TPS)在 15 度時，測量引擎轉速於 1000~2000rpm 的操作點之特性，以便能進行發動機性能分析模型之驗證。首先比較容積效率，如圖 2 所是為三種不同轉速下實驗與分析之進氣效率比較，比較顯示在固定節氣門開度下會使容積效率會隨著引擎轉速提升而下降，因節氣門開度較小，隨引擎轉速上升而進氣效率下降會更明顯。比較實驗與模擬的結果顯示模擬的結果與實驗之誤差甚小，表示模擬的發動機進氣量與實驗量測幾近相同。

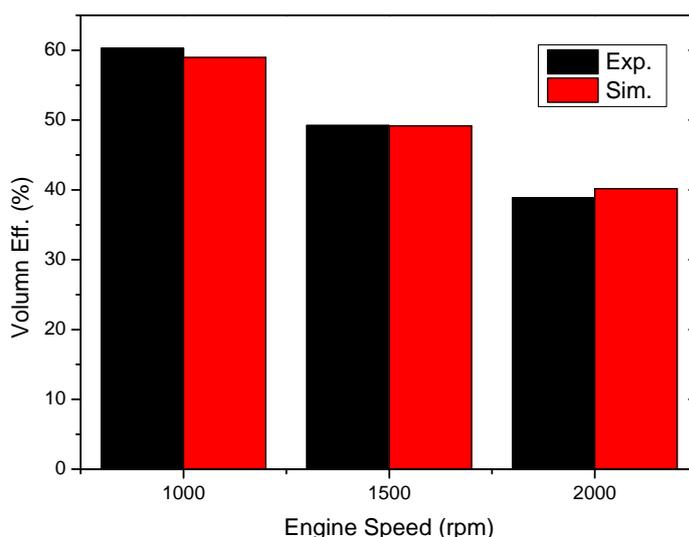


圖 2 實驗與模擬之容積效率比較圖

再者比較該具發動機制動平均有效壓力(BMEP)，在圖 3 可看出引擎在三個轉速操作之輸出功比較幾乎相同，因此將採用本分析模型繼續分析該具發動機性能，並且進行發動機之控制操作參數之最佳化計算。

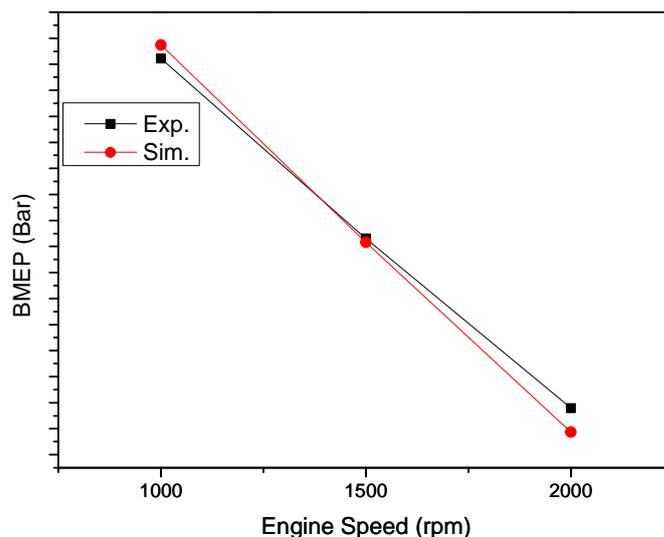
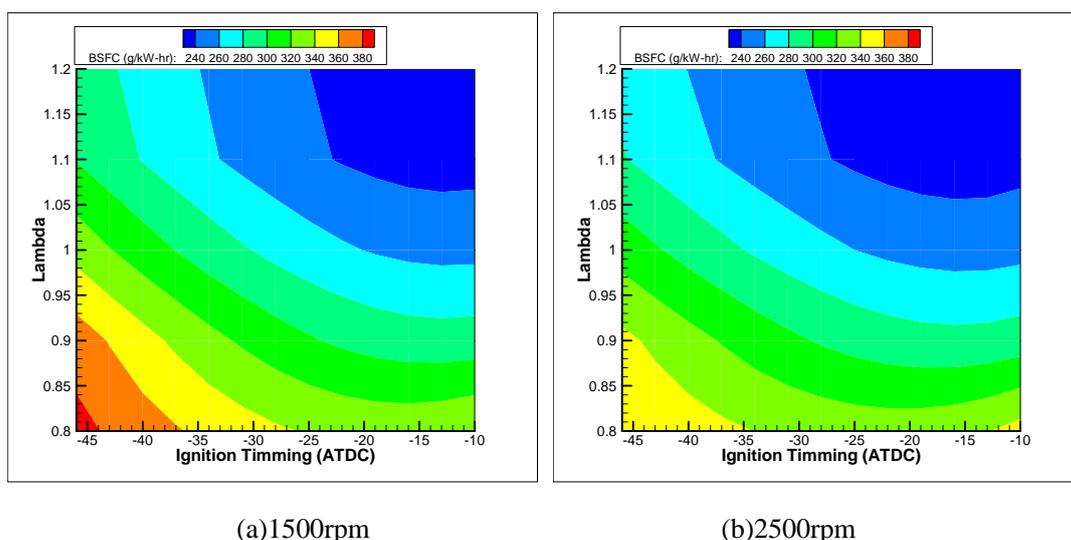


圖 3 發動機實驗與性能分析之制動平均有效壓力比較圖

3 發動機性能評估及控制策略探討

承繼先前透過發動機性能分析模型進行預測實際引擎性能結果[1-4]，分析發動機最佳點火正時並且引入引擎控制策略中，可加速開發研究與節省成本。在不同的引擎轉速及空燃比操作下，引擎的操作參數包含轉速(Engine Speed)、節氣門開度(TPS)及空燃比(Lambda)等，首先探討發動機在節氣門全開度下(WOT)，進行不同的點火正時對發動機性能的影響分析，並藉此來預測實際發動機之最適合之操作點。

圖 4 為探討在不同空燃比及點火正時對比燃油消耗率(BSFC)的影響，發現在較高的空燃比可獲得較低的 BSFC，但是 BSFC 會隨著點火正時提前而提升，改變轉速則影響不大。



(a)1500rpm

(b)2500rpm

圖 4 轉速 1500 及 2500rpm 之在不同空燃比及點火正時下之比燃油效率(BSFC)分佈圖

再比較制動平均有效壓力(如圖 5 所示)分析結果, 在空燃比為 1 附近可獲得最佳發動機功率, 且轉速提高會需要點火正時稍微提前。

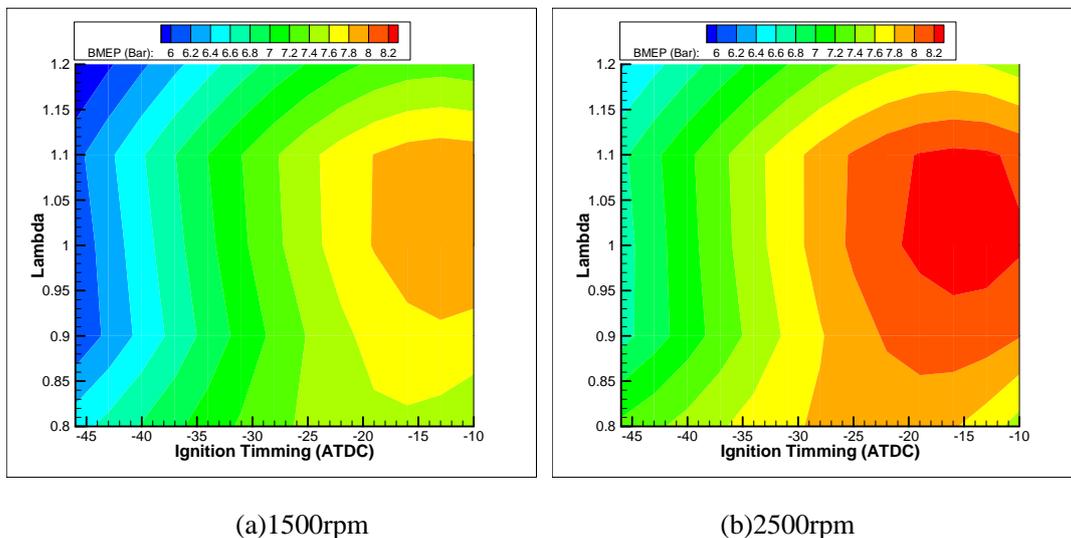


圖 5 轉速 1500 及 2500rpm 之在不同空燃比及點火正時下之制動平均有效壓力(BMEP)分佈圖

透過發動機性能分析軟體(GT-SUITE), 針對該具商用四缸發動機按照兩個模式(最佳油耗及最大扭矩)來分析, 分別以此兩種操作模式預估與取得最佳點火正時資料, 以利建立實測發動機之最優化控制策略。圖 6 為兩種模式之在不同空燃比及轉速下之點火正時圖, 可看出兩種模式不同之處, 當採取較大扭力時則比最佳油耗模式時提早點火, 以利提升發動機扭力。

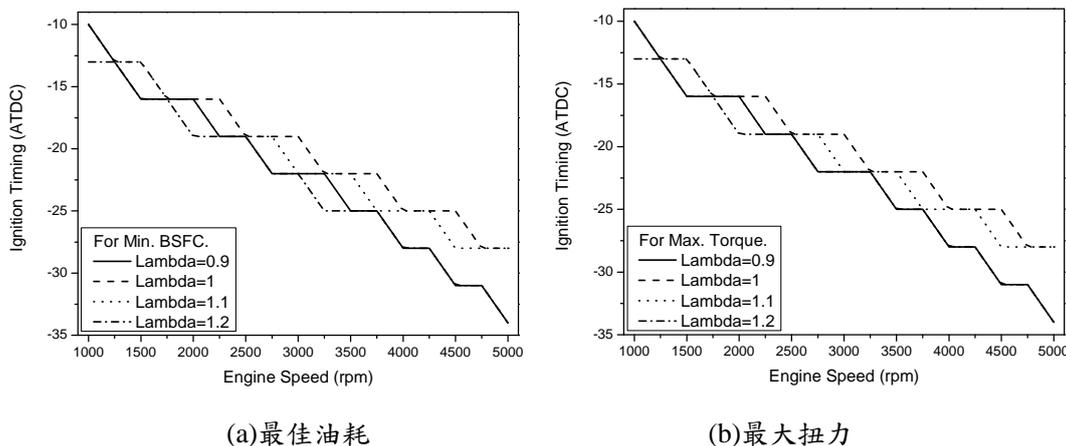


圖 6 在不同空燃比及轉速下最佳油耗及最大扭矩之點火正時圖

4 結論

本研究採用發動機整體分析工具 GT-SUITE 進行商用四缸發動機在改變操控參數之性能分析與比較, 將採用性能分析數據進行實驗測試控制策略擬定, 透過實驗輸出功率/排放污染等資料比較與驗

證，與性能分析結果進行比較與討論，調整引擎性能分析模型，並且持續反覆測試與調整控制策略，並累積相關模擬分析與實測經驗，建立對商用四缸汽油發動機模擬技術及輔助引擎控制策略擬訂之技術。因此透過專業發動機性能分析工具 GT-SUITE 快速建立分析模型，輔助實驗設計、規劃與實測，將有效加速發動機開發時程與節省設計成本。

致謝

感謝經濟部一般型學界科專計畫編號：102-EC-17-A-16-S1-169 之補助以及本中心工程師許天秋協助引擎性能分析計算及討論。

5 參考文獻

- [1] 張學斌、蔡欣倫，“單缸缸內直噴汽油引擎點火正時之研究”，第十六屆車輛工程學術研討會，台北，2011. 11. 11.
- [2] 蔡欣倫，汽油缸內直噴 V 型雙缸增程引擎之研發，燃燒季刊(Combustion Quarterly), Vol. 21, No. 2, pp. 2-13, May 2012。
- [3] 蔡欣倫，“單缸缸內直噴汽油-乙醇引擎點火正時之研究，”燃燒季刊(Combustion Quarterly), Vol. 22, No. 3, pp. 74-85, Aug. 2013.
- [4] 蔡欣倫，“先進潔淨節能汽車引擎動力系統技術開發四年計畫”，模擬分析組技術報告，2013. 08. 15.
- [5] GT-SUITE, USER MANUAL.
- [6] Sara McAllister, J.Y. Chen and A. Carlos Fernandez-Pello, Fundamentals of Combustion Processes, Springer, New York, 2011.
- [7] H.L. Tsai and J.-Y. Chen, “Estimate of Maximum Allowable Droplet Size for Motorcycle Gasoline Direct Injection Engines,” 7th Asia-Pacific Conference on Combustion, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 24-27 May 2009.