

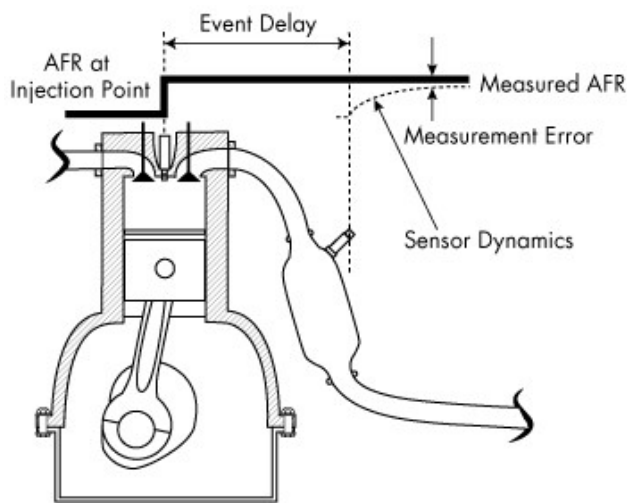
用交換感知器開發以週期為基礎的空燃比控制器

使用三向觸媒轉化器可以顯著地減少有害汽車排放廢氣，而空燃比的控制，是提高汽車引擎性能的關鍵所在。為了同時達到良好的燃料使用效率以及低耗損的排放，引擎下游的三向觸媒轉化器能將有害廢氣轉換為無害廢氣。當排氣空燃比接近化學計量空燃比時，也就是空氣與燃料燃燒最完全的時候，三向觸媒轉化器的運作效率將能達到最高點。

作者/ Peter Maloney

關鍵字/ 空燃比、含氧感知器、控制器、觸媒窗、化學計量

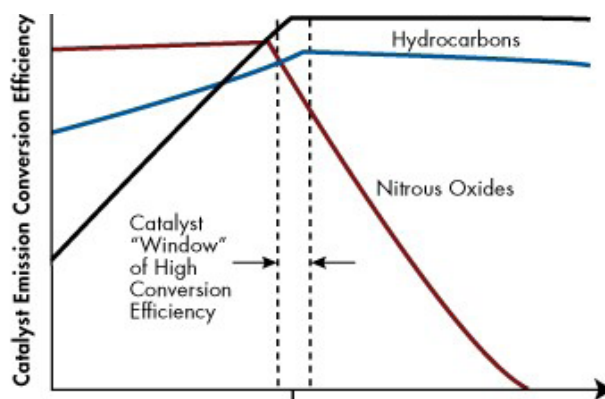
使用三向觸媒轉化器 (three-way catalytic converter) 可以顯著地減少有害汽車排放廢氣，而空燃比 (Air-fuel ratio) 的控制，是提高汽車引擎性能的關鍵所在。為了控制空燃比，燃料注入進氣口後，可直接測量或汽缸中未燃燒完全的空氣；或者可透過含氧感知器 (oxygen sensor) 來測量廢氣，並校正需輸入的燃料之後，再注入到引擎汽缸中 (圖1)。



▲ 圖1：汽缸及下游排氣氣流，說明了進氣點與含氧感知器間的傳遞延遲

為了同時達到良好的燃料使用效率以及低耗損的排放，引擎下游的三向觸媒轉化器能將有害廢氣轉換為無害廢氣。

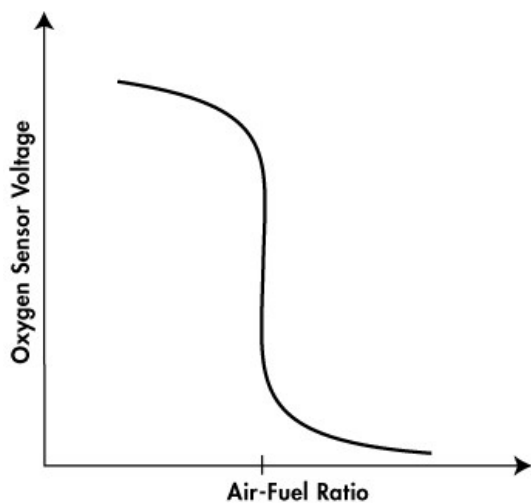
當排氣空燃比接近化學計量 (stoichiometric) 空燃比時，也就是空氣與燃料燃燒最完全的時候，三向觸媒轉化器的運作效率將能達到最高點。這樣的理想狀態也代表，空燃比是在觸媒窗 (catalyst window) 內，而這樣的理想狀態，也代表了一氧化碳、碳氫化合物和氮氧化物，將以最高效率轉化為無害的排氣產物的過程。實證研究亦表明，當一個最佳化的空燃比頻率、幅度和偏差，波動在化學計量時，將能加寬觸媒窗，並且能在不可避免的干擾中，增加觸媒轉換效率。



▲ 圖2：在觸媒窗內，觸媒轉換為無害氣體最具效率

為了使生產的硬體成本下降，汽車製造商會在便宜的含氧感知器周圍，設計空燃比控制系統，並且放置在引擎排氣觸媒的上下游。而產業最常用的含氧感知器，卻只有非常小的使

用範圍，基本上只在稀空燃比（空氣超過化學計量比）與濃空燃比（空氣低於化學計量比）之間切換（圖3）。



▲ 圖3：交換含氧感知器之電壓特性vs.空燃比

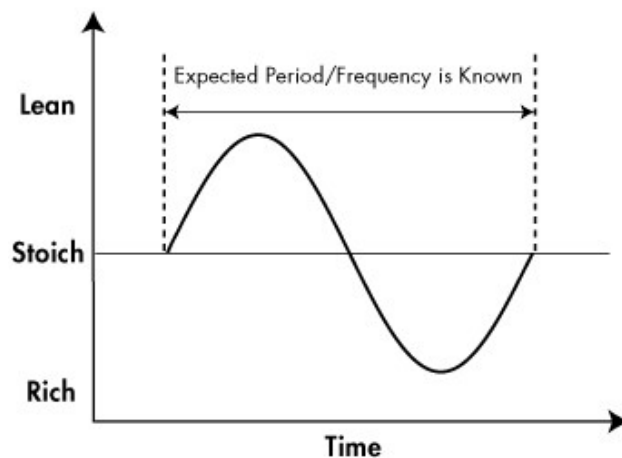
傳統用來設計這些感知器的比例-積分（PI）控制系統可說非常難以校準。具體來說，要找出頻率、幅度和偏差，進而最大化三向觸媒轉化器的效率，就是一項挑戰；因為修改控制器增益只能間接影響排氣空燃比的頻率和振幅。此外，修改增益的效果也會因為傳遞延遲而難以評估，好比說，改變空燃比混合物，進而改變排氣時空燃比，也會隨引擎的操作條件不同而有所差異。

但有一個方法能使控制增益與三向觸媒轉化器、空燃比的頻率及震幅的關係更為直接，就是使用寬域型含氧感知器。這種感知器藉由回答「多稀？」及「多濃？」不斷地提供反饋，因此能減少傳統PI控制器因傳遞延遲所造成的波動。寬域型感知器較常用在從事汽車研發，但卻因為太貴而很少用來從事日後的大量生產。

有鑑於此，我們設計了一個更兩全其美的方法：使用傳統低成本交換含氧感知器、並直接調整空燃比排放的震幅、頻率及偏差，來達成觸媒轉換效率校準。透過模型化基礎設計概念，並使用Simulink與事件導向系統模擬軟體（Simulink Stateflow），來加速控制器的設計，開發和驗證。透過使用物理模型模擬模塊組（Simscape）和Model-based調校工具箱（Model-Based Calibration Toolbox）的組合，來建立引擎受控體模型，並進行迴圈模擬，之後便能用 Simulink嵌入式程式碼轉碼器（Embedded Coder）產生代碼，作為PI Innovo OpenECU M220的引擎控制器。

設計週期性基礎空燃比控制器的方法

為了開發結合低成本的交換感知器，以及校正空燃比頻率、振幅及偏差的寬域感知器，這裡先提出一個簡單的假設：如果於進氣點以正弦波集中在化學計量混合物來控制空燃比，那麼排放的空燃比也會是正弦波。在理想的狀況下，排氣的空燃比正弦波也會集中在三向觸媒轉化器的最佳空燃比（圖4）。在穩態操作中，引擎校準器直接調整注入正弦波的空燃比振幅，頻率和偏壓，以便優化三向觸媒轉化器的轉換效率。典型的頻率、振幅和偏差分別是0.25Hz至1Hz，0.25至1空燃比，和0至0.2空燃比。

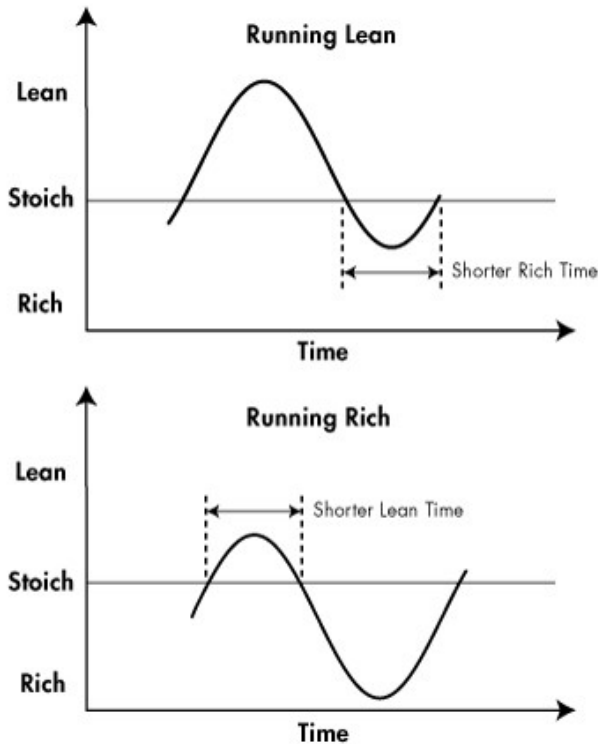


▲ 圖4：稀空燃比與濃空燃比之間的調整，說明正弦波會集中於化學計量混合物

為了之後可能會在稀空燃比時運行引擎，因此將正弦波升高，也為了在濃空燃比狀態下運行，正弦波向下移動（圖5）。

在稀空燃比的情況下，當波幅上升，含氧感知器為每個正弦波區間指出了較長的稀空燃比區間以及較短的濃空燃比區間。反之，在濃空燃比的情況下，感知器指出了較短的稀空燃比區間及較長的濃空燃比區間。稀與濃的差別則直接與該引擎在哪一類濃度狀況下運作有關。方程式1a及1b則定義了測量空燃比偏差，以及濃稀週期測量之間的關係，已用來計算空燃比控制器錯誤。

在引擎的上游注入一個已知的空燃比波動，而後在引擎排氣測，跨時測量空燃比是濃是稀，這也可免除針對未知以及引擎間的傳遞延遲變數，需補償控制反饋增益。



▲ 圖5：(上)當混合物變稀的空燃比正弦波 (下)當混合物變濃的空燃比正弦波

當

$$C_{lean} = \frac{\pi - \sin^{-1}\left(\frac{AFR_{stoich} - AFR_{cmd}}{A_{cmd}}\right)}{2\pi f_{cmd} \Delta t} \quad (1a)$$

$$C_{rich} = \frac{1}{2f_{cmd} \Delta t} - C_{lean} \quad (1b)$$

C_{lean} 是化學計量電壓通過時，稀空燃比感知器所測得的電壓期望值。

C_{lean} 是化學計量電壓通過時，濃空燃比感知器所測得的電壓期望值。

空燃比_{stoich} 是燃料在引擎使用時的化學計量空燃比

空燃比_{cmd} 是當平均脈衝寬度指令至燃料進氣硬體時，排氣時期望的平均空燃比

A_{cmd} 是當脈衝寬度指令的振幅下達至燃料進氣硬體時，排氣時期望的空燃比振幅

f_{cmd} 是當脈衝寬度指令的頻率下達至燃料進氣硬體時，排氣時期望的空燃比頻率

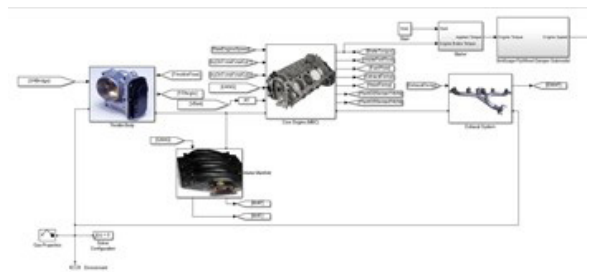
Δt 是含氧感知器測量電壓之固定時間的範例區間

以現代的浮點ECU來說，arcsine功能不是嚴格的計算。透過ECU方程式1a-b，就可以藉由交換感知器來量化並縮小空燃比至一個有限的範圍，就如同使用寬幅感知器系統一樣。

透過模型化基礎設計開發空燃比控制器

為了實現這個新空燃比控制器的概念，因此用Simulink和Stateflow來模擬一個控制器，在一個給定的空燃比正弦波輸入後，用來計算期望的相應稀薄時間，之後，再由期望的稀薄的時間與含氧感知器實際測得的時間差異，來產製錯誤訊號。

接下來，透過Simscape和Model-Based 調校工具箱，進而建立了一個引擎平均值模型，用來當作整體設計的閉迴圈受控體模型(圖6)。這個受控體模型，還包括具備含氧感知器特性的查找表子模型(如圖3所示)，以方便在硬體實現之前，能不斷地快速優化設計。



▲ 圖6：使用Simulink及Model-Based調校工具箱產製之引擎受控體模型

在經過了含氧感知器啟用及閉迴圈控制的系統層級模擬，並驗證了控制器的功能性之後，再使用嵌入式程式碼轉碼器(Embedded Coder)以產生用在Pi Innovo M220 ECU中的嵌入式處理器代碼。

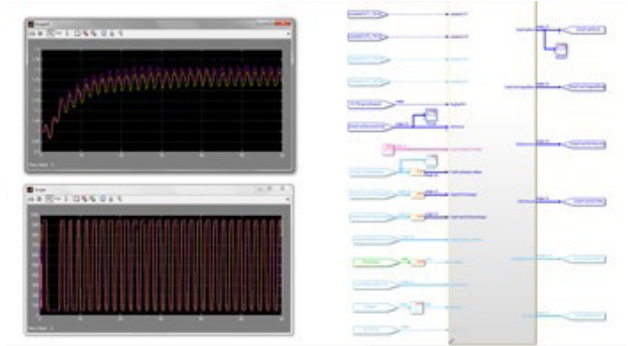
接下來的硬體迴圈測試，則是檢查ECU的即時性能，在車載

驗證後，便在穩態和動態條件下，驗證空燃比控制系統在引擎測力計之測試單元。

我們使用測力計排放板來驗證，Pi Innovo M220 ECU可透過進氣空燃比的控制，來追蹤所期望的平均空燃比；因而我們可以隨心所欲的改變空燃比排氣的頻率、振幅和偏差。經由此功能，就可以直接地透過掃描測試，來產製用來設定最佳化三向觸媒轉化器的空燃比頻率、振幅及偏差的速度/負載表格，而觸媒效率也可更直接的最佳化。

這個以週期為基礎的空燃比控制方式，較過去須反覆調校積分比例增益，以間接產生期望的頻率與震幅相比，將能更快、更直接的達成觸媒效率校準。■

(本文作者Peter Maloney任職於MathWorks公司)



▲ 圖7：閉迴圈之空燃比控制模擬

技術特輯邀稿

《智動化 SmartAuto》雜誌以專業角度深入探討自動化產業的技術進展與應用趨勢，並加入觀點剖析與業界動態，讓讀者快速掌握自動化與智慧化產業的全貌，並以網路與平面雙重平台提供詳實的產業訊息，為兼具深度與廣度的自動化專業媒體。

投稿格式：

請以Microsoft Office Word編排的電子檔為主，(請附上原始圖片及表格)稿件可用e-mail至遠播資訊編輯部，賜稿請註明姓名與聯絡電話。

來稿請寄：E-mail：fuhsia@ctimes.com.tw

遠播資訊 / TEL：02-2585-5526 ext.333 陳小姐

*註：若您希望配合某月主題刊登，請於投稿時註明，並請於當期主題前二個月投稿以便進行編排作業。

2015技術特輯專題

月份	題目
1月	智慧建築
2月	-
3月	冷凍空調技
4月	馬達控制技術
5月	變頻技術趨勢
6月	太陽能技術
7月	變壓器剖析
8月	UPS
9月	自動化技術
10月	自動化量測技術
11月	工業安全設計
12月	電力監控技術

*註：2015年技術特輯專題內容若有更動，將在本雜誌進行更正說明。