



缸內直噴引擎(GDI)技術的發展與未來

國立成功大學航空太空工程研究所 博士後研究員 吳志勇

一、前言

迄今為止，內燃引擎對於人類交通工具的重要性仍有不可替代的重要性，所以世界上各大車輛製造商無不致力於進行高效率低污染引擎之開發，尤其在石油能源日益枯竭的新世代裡，如何有效而且減低對環境衝擊的使用動力引擎，是一項緊迫而且重要的課題，更是我們屬於能源依賴性高的台灣應該重視的發展方向。台灣的汽車產業面臨著日益激烈的國際競爭，政府期許台灣汽車產業可以在國內建立車輛自主技術，進而拓展國際外銷市場。在車輛產業中，引擎可以說是一台車子的心臟，也是一個集合高科技門檻的特殊技術，必須投入大量的資金，集結足夠的專業人才才能建立起初步的規模。在台灣汽機車產業面臨市場挑戰與建立整車製造技術的關鍵時刻下，吾人僅盡棉薄之力在此撰文介紹缸內直噴引擎(以下簡稱:GDI引擎)技術的發展與未來，希望讀者能夠透過本文而對GDI引擎技術有更深一層的認識。

二、為什麼GDI引擎會引起車廠的興趣？

早在二次大戰期間，德國與蘇聯就已經出現GDI引擎的概念，而且運用在螺旋槳戰鬥機上以取代傳統的化油器，因為傳統化油器在戰鬥翻滾時裡面的浮筒會受到重力影響而使供油出現問題。而1955年戴姆勒賓士300SL則是第一次搭載GDI引擎的車款，當時300SL是一部相當時髦的雙人座跑車，見圖1。



▲ 圖1 戴姆勒賓士的300SL車款

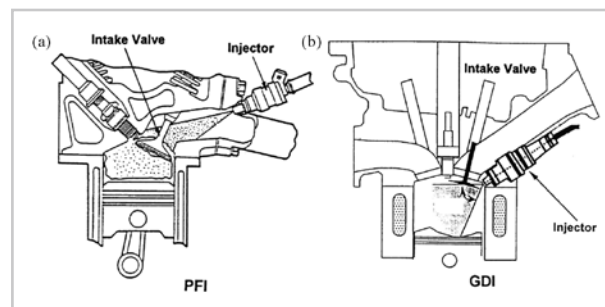
1970年代時福特汽車公司與Texaco公司合作開發Proco計畫，並且推出了一個V型8缸的分層燃油充填引擎(Stratified-charge Engine)，並且在亞特蘭大的生產線上組裝了100部搭載此引擎的維多利亞

皇冠(Crown Victoria)車型，這個生產計畫後來因為電控系統、昂貴的汽油泵浦與噴嘴系統，以及污染等多重因素下而宣告失敗。為什麼時至今日GDI引擎會重新引起車廠的興趣？其主要原因在於它的節能與高效率的特性。在油價節節高升的時代裡，一部車子的油耗不僅僅代表著引擎製造的技術，更是顧客採購意願的一項重要參考依據，車子的燃油消耗效率可以用一個參數來表示，那就是BSFC(Brake Specific Fuel Consumption)，它是燃料消耗重量與引擎輸出功率的比值，公制單位為公克/千瓦-小時。目前現有四行程內燃引擎主要可以分成奧圖循環(Otto-cycle)之汽油引擎與狄賽爾循環(Diesel cycle)之柴油引擎，而汽油內燃引擎目前均以多點噴射(Port Fuel Injection)引擎(以下簡稱：PFI引擎)為主。相較之下，因柴油引擎的壓縮比較高且不依靠節氣閥來調節負載，所以柴油引擎的油耗效率優於汽油引擎，但是柴油引擎的噪音高而且速度沒有辦法與汽油引擎競爭；在污染方面來說，柴油引擎則有較多的微粒污染與氮氧化物的排放。為了使較省油的柴油引擎可以在符合環保法規的情況下運轉，汽車製造商在柴油引擎系統的改良技術上下了很大的功夫，例如：燃油共軌高壓燃料噴注、微粒捕集器、觸媒後處理技術等，在增加各式各樣提升潔淨排氣功能的同時會增加車輛製造成本，所以相同的車款如果是配備柴油引擎的話則會有較高的車價。基於

以上的理由，車輛工程師希望能夠製作出特別的內燃引擎，此引擎必須擁有與柴油引擎相當的油耗效率(BSFC)，且必須具備類似傳統噴射引擎的輸出功率，也就是說必須兼備兩種引擎的優點於一身。這個特別的引擎就是本文的主角—汽油GDI引擎。

三、GDI引擎的原理與優勢

顧名思義，GDI引擎有別於傳統汽油PFI引擎，它是將汽油直接噴注進入汽缸內的一種引擎技術。由圖2就可以很清楚的表示這兩種供油技術的不同，圖2(a)為PFI引擎的示意圖；圖2(b)為GDI引擎示意圖。



▲ 圖 2PFI與GDI引擎之比較

PFI引擎的燃料是噴注在進氣門前的歧管內，如此一來就會衍伸出許多的缺點，例如：冷車啟動時，燃料噴注後沒有辦法完全汽化而在汽門背面產生油膜，這些油膜進入汽缸後並不易燃燒，所以在冷車的狀態下，控制晶片會特意讓燃料噴注量稍微多一點，甚至比當量燃燒所需要的燃料量還要來



得多。所以在引擎還沒有到達工作溫度前，燃油的供給量會比較難以控制，不僅僅浪費燃料，也會因觸媒轉換器在冷車狀態下無法處理這些過多未燒完的燃氣，而導致較多的未燃碳氫化合物(UBHC)排放。相反地，GDI引擎就可以很準確的控制燃油供給量，所以在冷車狀態下GDI引擎會比PFI引擎來得省油。有文獻報導[3]在冷車情況下，GDI引擎會比PFI引擎省油將近30%!其實省油本來就是GDI引擎訴求的項目之一，GDI引擎省油的理由另有下列幾點可以說明，例如：GDI引擎不需要使用節氣門(throttle)來控制負載，傳統的PFI引擎均利用節氣門來調節負載，如此一來就可以省去進氣時所需付出的負功，而且體積效率也會比較高；缸內直噴可以避免燃料與空氣提早自燃，引擎的壓縮比可以提高以提升熱效率，且可以使用辛烷值(octane rating)較低的汽油；使用分層燃燒模式時，火焰不會直接接觸汽缸壁與活塞，所以可以有效降低熱損失；除此之外，在減速時GDI引擎還可以切換成斷油模式。

GDI引擎最吸引人的地方在於省油，但是一顆優異的引擎不能夠只有單單省油這項功能而已，得兼顧到車輛行駛狀況與負載改變時所需之功率輸出，另外駕駛者的駕駛樂趣也是必須考慮的重點。所以一個GDI引擎的運作必須包含四種運作模式：其一為在低負載或者怠速情況下的分層貧油燃燒；其二為中等負載時的勻相(homogeneous)貧油燃燒，

此種狀態具備省油與低NO_x排放的優點；其三勻相當量(stoichiometric)全負載模式；其四為冷啟動模式。為了使GDI引擎可以達到應有的設計水準，工程師必須克服多項困難[4]，包括：分層(stratified)燃燒控制策略、引擎操作模式切換策略、高壓燃料系統之設計與系統耐用性之加強、引擎汽缸與活塞強度之加強、以及多種污染物(UBHC、氮氧化物、微粒)之控制與觸媒轉換器之運用。

四、缸內直噴引擎的關鍵技術概述

在此段文章中將介紹GDI引擎的主要關鍵技術，這些技術相當的複雜而且包含的層面很廣，所以在此僅對於燃料噴嘴、活塞頭表面幾何形狀與流場結構、燃燒控制等作一簡略的敘述。

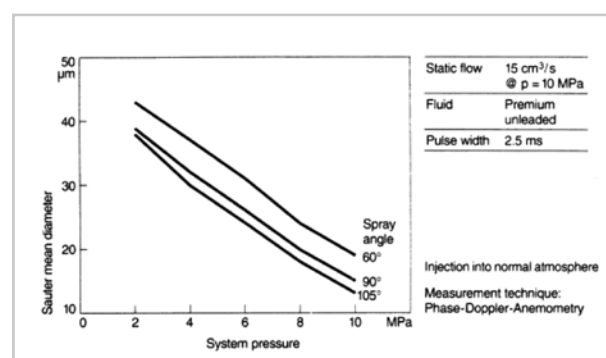
(一) 燃料系統與燃油噴嘴

既然是缸內直噴GDI引擎，燃油噴霧自然是整個引擎設計中相當重要的角色，油滴的品質好壞會直接影響到引擎的運作，也會影響到引擎輸出功率的高低與污染排放的程度；一般來說，一組燃料噴注系統必須能夠完全符合GDI引擎的所有負載操作區域[5]。GDI引擎的燃油系統有別於傳統PFI引擎，前者燃油系統的操作壓力通常比後者的還要來的高，所以設計者必須考慮到幾個重要的問題，這些包括：燃油泵浦的能力及其壽命、壓力的設計必須介於4-13MPa左右，以及燃油系統操作壓力的操

作可變性。較高的操作壓力會使燃油泵浦的噪音增加且降低使用壽命；除此之外，GDI引擎的燃油泵浦是靠黏度較低的汽油來潤滑，所以燃油泵浦的壽命也會受到潤滑不足而降低。

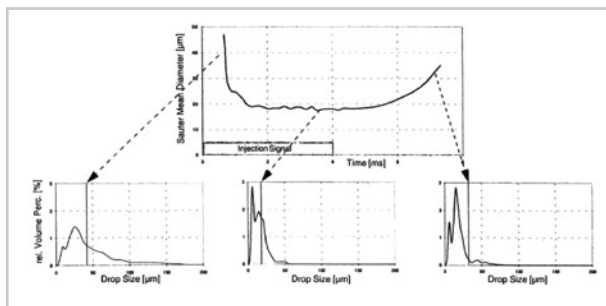
在整個燃油系統中的關鍵零件為燃油噴嘴，其任務係將汽油正確地噴注進入引擎燃燒室內，燃油噴注量與油霧的幾何形狀必須固定、液滴的SMD(Sauter Mean Diameter)粒徑必須小於 $25\text{ }\mu\text{m}$ ，而DV90(spray droplet size for which 90% of the fuel volume is in smaller droplets)粒徑必須小於 $45\text{ }\mu\text{m}$ [6]。在噴嘴設計上，根據噴嘴設計又可以區分為單一流體壓力漩渦噴嘴(single-fluid high pressure swirl injector)與氣助式噴嘴(air-assisted injector)。雖然氣助式噴嘴的噴霧效果與品質優於單一流體壓力漩渦噴嘴，但是較複雜的噴霧系統再加上輔助空氣的供應，使得氣助式噴嘴難以在GDI引擎車輛上使用，所以單一流體壓力漩渦噴嘴[7]是比較廣泛被使用的噴嘴形式。燃油從噴嘴噴出後可以分成兩個階段，第一階段的特徵主要由噴嘴的幾何形狀與操作壓力所決定，而第二階段則是噴霧的穿過程，這一階段中的油滴會與周圍的空氣交互作用而進一步成為更小的顆粒。為了達到前述的粒徑要求，噴嘴的操作壓力至少為 4MPa ，但是為了在分層燃燒時可以正確運作，其操作壓力應當建壓至 7MPa 。操作壓力越大時，油滴的尺寸就會越

小，如圖3所示[8]，至於噴霧錐角，其角度越大則粒徑會越小。



▲ 圖3 油滴的SMD與噴霧錐角及操作壓力的關係圖[8]

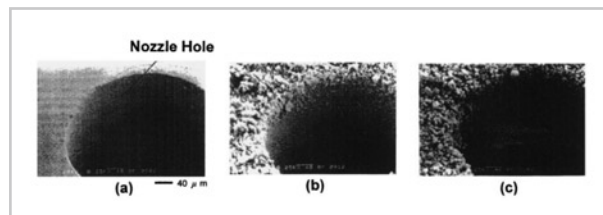
油滴尺寸的大小可以決定GDI引擎是否可以成功運轉，一顆直徑 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的油滴要完全蒸發需要幾毫秒(ms)，而直徑 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的油滴要完全蒸發則需要數十毫秒(ms)，對一個轉速1500 rpm的引擎來說數十毫秒換算成曲軸角會超過一百度。引擎中燃油的噴注是間歇脈衝(pulse)的，通常整個噴霧過程會在幾毫秒內完成，在噴霧的這段期間，噴油嘴產生的燃油噴注量與油滴的粒徑是不均勻的。如圖4所示為一個噴嘴的燃油噴霧粒徑隨著時間的變化圖[9]，噴霧剛啟動時噴嘴內(sac volume)的殘液會先被擠出，這些液體經過噴嘴漩渦器時速度不高，所以噴霧粒徑很粗而且粒徑分布很廣；當噴嘴操作進入穩定區時，燃油噴霧分布很集中而且粒徑符合該噴嘴的設計；最後當噴嘴關閉時，燃油噴霧的粒徑會些微增加。



▲ 圖4 噴霧過程油滴的SMD變化關係圖[9]

良好的燃油噴嘴與其配合的供油系統才能創造出品質良好的燃油噴霧，有品質良好的燃油噴霧才能使GDI引擎性能完整地發揮。目前大部分的引擎研究人員對於GDI引擎燃油噴注系統的開發，無不精益求精地改善燃油系統與噴油嘴的功能，力求更小的粒徑、更佳的噴霧錐幾何、更準確的噴霧時間、更短的開閉時間、更少的耗能與更低的噪音。

噴嘴在引擎中扮演著供應燃料的角色，在使用過程中會產生積垢的問題，噴嘴積垢後會使噴油量減少也會使噴霧效果變差，這些積垢主要是以碳粒以及汽油遇熱後在噴嘴表面產生蠟狀物質為主。噴嘴附近的積垢如圖5所示，經過4個小時與8個小時的連續運轉後在噴嘴的周邊就會產生顆粒狀的污垢。要避免污垢的生成必須準確地控制噴嘴的溫度，噴嘴突出的距離以及其附近流場的控制，在噴嘴的內部或表面上可以加上特殊鍍層來避免污垢的生成，此外在汽油中也可添加去膠劑或者分散劑等添加物來避免污垢的生成。

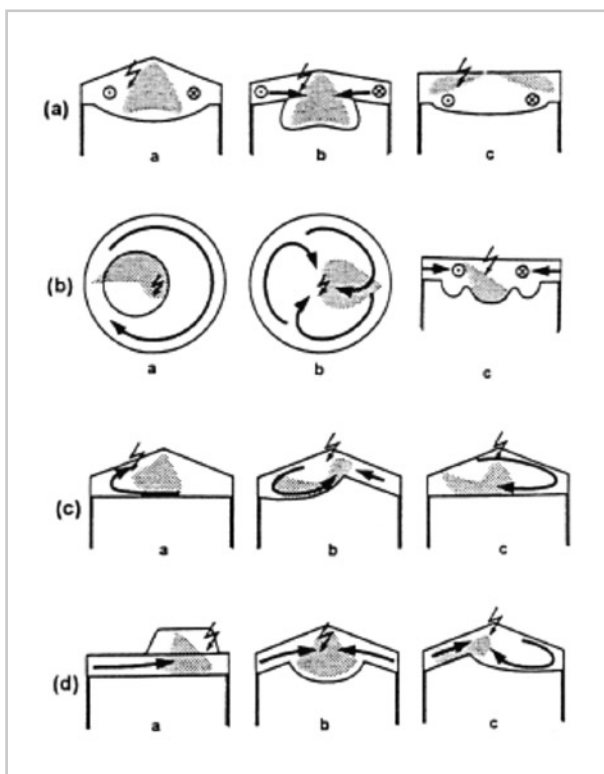


▲ 圖5 噴嘴積垢現象
(a)乾淨的噴嘴(b)測試4小時 (c)測試8小時[11]

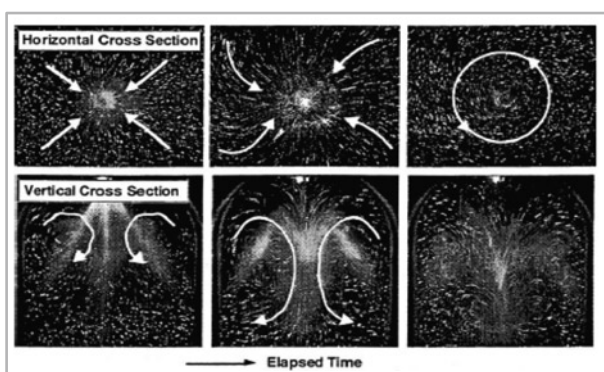
(二) 燃燒室中流場結構

無論是分層燃燒或者使勻相燃燒模式，都需要靠燃燒室中氣流的輔助來加以實現，燃燒室中氣體的流動與演變發生在進氣行程與壓縮行程中，而且與燃油噴射的狀況互相結合，期能使燃料與空氣混合且使燃燒過程保持穩定。氣缸中氣流的特徵可以分成三種：漩渦主導型、翻滾主導型與擠壓型流場，這些流場主要與進氣門幾何與位置設計、壓縮比與燃燒室之活塞頂部幾何形狀有關。GDI引擎三種流場主導以及不同噴嘴與火星塞位置組合於圖6[10]中所示，氣體從進氣閥門進入汽缸後與特殊的汽缸頂部幾何形狀互相搭配而產生特定流場，除此之外當燃料噴入汽缸中時，也會與周遭的空氣產生交互作用而捲動流體，如圖7所示，這些都是引擎設計者必須考量的問題。無論是哪一種流場型式或者是哪一種引擎操作模式下，流場系統皆必須使易燃的油氣接觸火星塞以便引燃。在分層燃燒的模式下，須使火星塞附近充滿易燃的油氣，而汽缸壁與火星塞金屬表面附近必須保持新鮮的空氣或者很淡

的燃氣，所以汽缸中氣流的流動也主導著分層燃燒的實現。



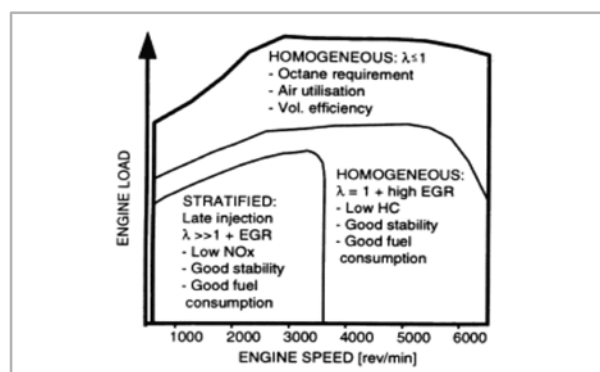
▲ 圖6 GDI引擎燃燒室流場：
(a)漩渦主導噴嘴置中型、(b)漩渦主導火星塞置中型、(c)翻滾主導型與(d)擠壓主導型



▲ 圖7 噴嘴噴霧所引發周圍空氣之流動：上排為水平剖面而下排為垂直剖面

(三) 引擎運作模式

一個GDI引擎的運作必須包含低負載或者怠速情況下的分層貧油燃燒、中等負載時的勻相貧油燃燒、勻相當量全負載模式，與冷啟動模式。圖8所示為典型GDI引擎在已經熱機狀態下的操作域圖，其橫坐標為引擎轉速而縱座標為引擎負載，圖中區隔成三個不同的操作區域。在負載與轉速較低的情形下，以分層貧油燃燒為主，燃料會在壓縮行程的後段噴注而形成分層燃燒，此時燃料的消耗比較經濟且有較低的氮氧化物排放。在轉速較高時使用勻相貧油燃燒，空氣混合較多的廢氣迴流並且在進氣行程時就噴入燃油，汽缸中的空氣與汽油會在點火之前充分混合，此時燃料的消耗比較經濟且有較低的未燃碳氫化合物排放。在高負載高轉速下，引擎操作在勻相當量模式下，汽油與空氣大約達到當量比，此時的操作必須有較高的燃料辛烷值需求。操作域圖的訂定主要是依據轉速與負載來訂定的，但在不同操作域中進行切換則是考驗著引擎設計工程師對於引擎控制策略的智慧。



▲ 圖8 典型GDI引擎操作域圖[12]



(四) 燃油效率與污染排放

GDI引擎的燃油消耗比傳統PFI引擎節省許多，但是要減低引擎污染的排放量仍有許多方面必須考慮，其中包括未燃碳氫(UBHCs)、氮氧化物(NOx)與微粒排放，茲針對三項污染物加以討論。

相較於PFI引擎，在未燃碳氫部分來說，GDI引擎在冷啟動時有很好的未燃碳氫排放，PFI引擎的汽油噴注系統會增加汽油噴注量來補償不足的可燃油氣，進汽門與進氣歧管上未蒸發的油膜也是導致噴油量無法正確訂定的主要原因，過多的油料就會導致汽油的無謂消耗與較多的未燃碳氫排放，而GDI引擎在這方面有很好的表現。當引擎的工作溫度到達後且在分層燃燒運作模式的情況下，GDI引擎未燃碳氫的排放就變成了一個重要且必須處理的問題[13]。主要原因乃歸咎於汽缸內分層燃燒用的油氣分佈完成時，最外圍的超淡燃氣相當不容易引火，所以火焰從火星塞點燃向外圍傳播時就會在最外圍發生冷熄(quench)的現象，當冷熄現象發生時最外圍的油氣就無法燃燒殆盡而造成未燃碳氫的排放。除此之外，活塞頭與汽缸壁也會在某些區域因噴霧的關係造成表面有油膜產生，這些也是造成未燃碳氫排放的原因。在分層燃燒模式下，排氣溫度較低，不僅僅影響到廢氣離開排氣門時繼續發生的氧化反應，也會直接影響到觸媒的效果。對GDI引擎來講，省去節氣門這項裝置時就可以達到降低進氣

的功損失，也是GDI引擎省油最大的方式之一，但是為了解決GDI引擎在分層燃燒模式下的未燃碳氫排放問題，就必須使用節氣門來微調汽缸中汽油與空氣的混合比例。以豐田汽車的GDI引擎系統為例[14]，該GDI引擎係採用一電子控制的節氣門來進行燃氣的微調。在低負載的情況下，建立適當的真空除了可以降低未燃碳氫的排放之外，也可以提供給傳統真空倍力煞車使用，會比使用真空泵浦來得經濟。雖然使用適當的節氣門來調節，可以有效降低因為冷熄所造成的未燃碳氫排放，但是對於因噴霧不良所導致的油膜問題時，採用節氣門微調法只會導致局部燃氣過濃的現象而增加未燃碳氫的排放。

當GDI引擎操作在勻相貧油燃燒模式下時，的確可以因燃燒溫度較低而達到降低氮氧化物排放的效果，但是在部分負載之分層燃燒模式下則不是如此，雖然整體的汽油與空氣比例呈現極貧油的情況，不過在局部空間上卻會產生多量的氮氧化物。廢氣迴流法是目前四行程汽油引擎常用減氮氧化物的方式，藉著氣門控制而達到某一種程度的廢氣迴流，廢氣迴流可以幫助GDI引擎在分層燃燒模式下獲得更穩定的燃燒，然而使用廢氣迴流會影響到未燃碳氫的排放與燃料的使用量。根據文獻報導[15]，一般的GDI引擎可以利用廢氣迴流來降低55%的氮氧化物，但卻會犧牲2%的燃油消耗率，如果搭配節氣門的微調則可以降低80%的氮氧化物，不



過必須得犧牲掉15%的燃油消耗率。除了利用廢氣迴流的方式來減少氮氧化物排放之外，也必須開發適用於GDI引擎的觸媒，因為傳統的三效觸媒難以在含氧較多的廢氣中還原氮氧化物，使引擎操作在貧油分層燃燒模式時的氮氧化物無法消除。

微粒汙染主要是指引擎排氣中排出的微細顆粒，例如：灰份、碳粒，以及液態微粒等物質。關於微粒排放，傳統上僅針對柴油引擎加以規範，而汽油引擎則沒有這方面的困擾。初步的研究顯示，大部份的GDI引擎多有微粒排放的問題[16]，尤其是在分層燃燒模式下因局部燃氣較濃而產生未燒完的碳粒。微粒排放量主要與噴油時機、點火時間以及負載有關，至今為止關於微粒產生機制與排放這方面的研究仍然相當地缺乏。

五、缸內直噴引擎的發展現況

GDI引擎問世於二十世紀初，其中雖然有賓士與福特公司曾經發展過搭配GDI引擎的車種，但因許多因素而使GDI引擎未獲重視，直到二十世紀末GDI引擎才重新被車廠所使用。1996年三菱汽車再度讓GDI引擎出現在汽車市場上，其中4G93引擎為一個1,800 cc直四GDI引擎，在日本它被搭載在Galant車型上，在歐洲則被搭載在Carisma車款上。GDI引擎也有六缸系統(6G74, 3.5L, V6)，到了1999年已經製造出八缸系統。法國PSA集團的寶

獅(Peugeot) 與雪鐵龍(Citroen)也在1999年與三菱合作共用引擎。法國雷諾(Renault)汽車在1999年發表GDI引擎，此引擎搭載在Megane與Laguna車款上。豐田(Toyota)汽車在2000年發表了D4引擎，在實用上，豐田的2GR-FSE V6引擎是一個結合缸內直噴與多點噴射的複合引擎。2002年愛快羅密歐(Alfa Romeo)發表了JTS引擎系列，此系列的引擎幾乎裝載在全車系上。同年，美國通用汽車(GM)開始了GDI引擎的研發計畫，2004年發表2.2升 Ecotec引擎並搭載在歐寶 (Opel) Vectra車款上，2005年發表搭配可變汽門正時(VVT)的2.0升GDI引擎並搭載在龐帝克(Pontiac)車系之 Solstice GXP車款與Vauxhall GT車款、歐寶Speedster與GT車款，以及鈗星(Saturn)車系 Sky Red Line車款，凱迪拉克(Cadillac)車系之CTS與STS車款在2007年開始搭載3.6升LLT GDI引擎。2003年德國巴伐利亞機械製造廠(BMW)開發一12缸代號N73的準GDI引擎，此引擎使用低壓燃油泵浦，但此引擎無法運作在貧油燃燒狀態，直到2006年BMW才發表技術成熟的N52引擎系列。另外法國雷諾與日本日產汽車也有GDI系統的研發。德國汽車製造廠福斯集團(Volkswagen)也發展出相當的規模，它在2001年開始將搭載FSI引擎的奧迪汽車(Audi)送往法國勒芒參加24小時耐力賽，並且連續七次獲得冠軍，目前福斯集團旗下的車款均有FSI系統的蹤跡。

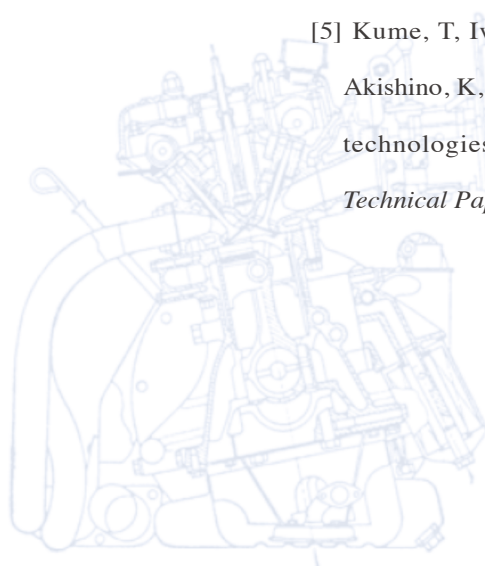
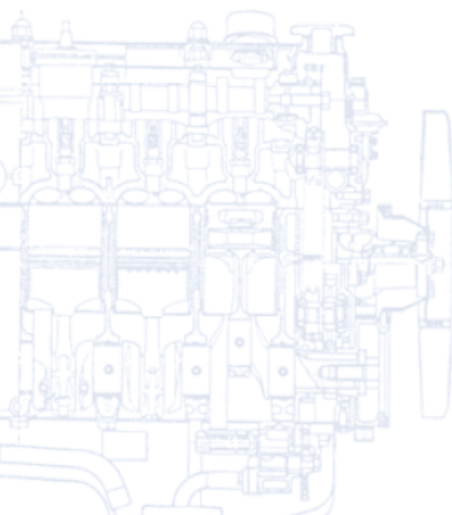


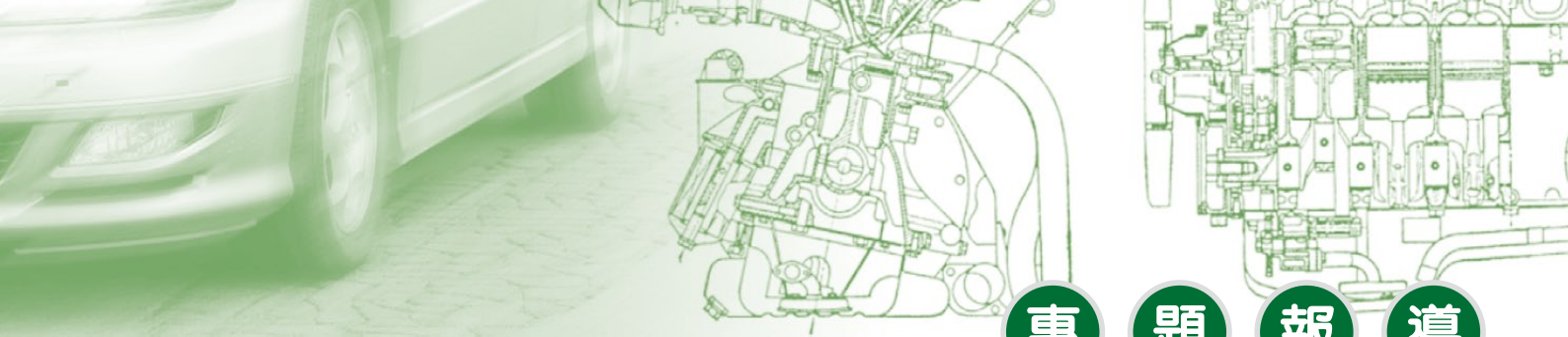
六、結 論

十二年前三菱汽車 (Mitsubishi)將GDI引擎重現於市場，時至今日已經有許多大型汽車製造廠均有GDI引擎的產品問世。GDI引擎最大的優勢莫過於它優異的燃油消耗率(BSFC)，爲了使GDI引擎能夠順利上路，GDI引擎系統必須能夠容忍多重且複雜的燃料品質，電子控制系統必須無礙且平順的切換不同運作模式，更重要的就是污染處理的機制必須使GDI引擎的排放污染量更潔淨，然而油耗的經濟性是否能夠勝過GDI引擎複雜系統的成本就成爲GDI引擎能否存在的最大關鍵，隨著石油價格的節節攀升，省油高效率且潔淨的系統自然是未來的趨勢。

參考文獻

- [1] Ohyama, Y., Nogi, T., Ohsuga, M., 1992 "Effects of fuel/air mixture preparation on fuel consumption and exhaust emission in a spark ignition engine," *IMEchE Paper*, No. 925023, C389/232, pp. 59-64.
- [2] Zhao, F., Lai, M. C., Harrington, D. L., 1997 "A review of mixture preparation and combustion control strategies for spark ignited direct-injection gasoline engines.," *SAE Technical Paper*, No. 970627.
- [3] Takagi Y., 1996 "The role of mixture formation in improving fuel economy and reducing emissions of automotive S.I. engines," *FISITA Technical Paper*, No. P0109.
- [4] Zhao, F., Lai, M. -C., Harrington, D. L., 1999 "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines," *Progress in Energy and Combustion*, Vol. 25, pp. 437-562.
- [5] Kume, T, Iwamoto Y., Iida, K, Murakami, M., Akishino, K, Ando, H., 1996 "Combustion control technologies for direct injection engine," *SAE Technical Paper*, No. 960600.





- [6] Dodge, L. G., 1996 "Fuel preparation requirements for direct-injected spark ignition engines," *SAE Technical Paper*, No. 962015.
- [7] Houston, R. A., Cathcart G. P., 1998 "Combustion and emissions characteristics of Orbital's combustion process applied to a multicylinder automotive direct injected 4 stroke engine, " *SAE Technical Paper*, No. 980153.
- [8] Preussner, C., Doring, C., Fehler, S., Kampmann, S., 1998 "GDI: interaction between mixture preparation, combustion system and injector performance," *SAE Technical Paper*, No. 980498.
- [9] Wirth, M., Piock, W. F., Fraidl, G.K., 1996 "Actual trends and future strategies for gasoline direct injection," *IMEchE Seminar of Lean Burn Combustion Engines*, S433.
- [10] Fraidl GK, Piock WF, Wirth M., 1996 "Gasoline direct injection: actual trends and future strategies for injection and combustion systems," *SAE Technical Paper*, No. 960465.
- [11] Kinoshita M et al., 1997 "Study of nozzle deposit formation mechanism for direct injection gasoline engines," *Proceedings of JSAE Fall Convention*, No. 976. pp. 21-24.
- [12] Lake, T. H., 1998 "Comparison of direct injection gasoline combustion systems.," *SAE Technical Paper*, No. 980154.
- [13] Giovanetti, A. J., Ekehian, J. A., Heywood, J. B., 1983 "Analysis of hydrocarbon emission mechanisms in a direct injection spark-ignition engine," *SAE Technical Paper*, No. 830587.
- [14] Harada, J., Tomita, T., Mizuno, H., Mashiki, Ito Y., 1997 "Development of a direct injection gasoline engine," *SAE Technical Paper*, No. 974054.
- [15] Lake, T. H., Sapsford, S. M., Stokes, J., Jackson, N. S., 1996 "Simulation and development experience of a stratified charge gasoline direct injection engine," *SAE Technical Paper*, No. 962014.
- [16] Iiyama, A. et al., 1998 "Realization of high power and low fuel consumption with low exhaust emissions in a direct-injection gasoline engine," *Proceedings of GPC'98, Advanced Engine Design & Performance*. pp. 76-88.