

進排氣閥定時對引擎容積效率與缸內擾動分佈之影響

計畫類別：☐ 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92 - 2212 - E - 216 - 009 -

執行期間： 92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

計畫主持人：楊一龍副教授

共同主持人：

計畫參與人員：張梓奕、李家崧、徐勝祥、徐才元等研究生

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中華大學機械與航太工程研究所

中 華 民 國 九 十 三 年 十 月 三 十 一 日

國科會補助計畫	計畫名稱：進排氣閥定時對引擎容積效率與缸內擾動分佈之影響 計畫主持人：楊一龍副教授 計畫編號：NSC 92-2212-E-216-009 學門領域：機械熱流
技術/創作名稱	三維缸內流場分析
發明人/創作人	楊一龍
技術說明	中文： 針對進排氣道、閥系統與汽缸本體之流動，建立多重區塊三維分析網格，並以自行撰寫之分析程式進行缸內流場分析，所得之結果可用於修正進排氣道、進排氣閥、引擎上蓋與活塞等造形，協助內然引擎之設計。
	英文： A multi-block of three-dimensional grids for intake/exhaust manifolds, valve system, cylinder and piston is developed. A three-dimensional flow solver is developed to solve the corresponding flow field. The results can be used to modify the design of intake/exhaust manifolds, valve system, cylinder and piston.
可利用之產業及可開發之產品	汽機車業界之進排氣道、進排氣閥、引擎上蓋與活塞等造型流場設計
技術特點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 三度空間網格自行組立可配合任意空間之需要與安排。 2. 流動不可逆分析可修正造型達到較佳之容積效率。 3. 缸內紊流強度分析可修正造型達到較佳之燃燒速率與穩定性。 4. 三維圖檔可直接轉成 igs 檔案進行實體製作。
推廣及運用的價值	提昇內然引擎之性能協助污染之控制。

1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。

進排氣閥定時對引擎容積效率與缸內擾動分佈之影響

計畫編號：NSC 92-2212-E-216-009

執行期限：民國九十二年八月一日至九十三年七月三十一日

計畫主持人：楊一龍副教授 中華大學機械與航太工程研究所

電子信箱：yylung@chu.edu.tw

中文摘要

【關鍵詞：週期流場量測、缸內週期流場網格建立、缸內週期流場分析】

本研究採用華擎之 1.2L V-8 之引擎以壓克力透明汽缸進行低轉速下週期流場之流線觀測，並透過缸壓與進排氣口風速熱線瞬時定量之量測，可提供引擎週期流場數值分析之比對。在引擎週期流場數值分析之開發上，完成三維動態網格之描述與建立，其進排氣閥閥背面上採用三角柱之網格移動與翻轉技術，可將閥開啟與閉合之運動與引擎上蓋之網格接合。三維缸內週期流場之分析上，建立移動邊界之密度壓縮膨脹、壁面之剪切效應與邊界功之增減等效應於程式中，但由於流場之馬赫數過小，以目前之可壓縮分析程式其時間步階過小其流場收斂所需之時間將過長，未來將參考人工壓縮因子之方式修正解答方式，可有效縮短收斂所需之時間。

英文摘要

【Keywords: Unsteady measurement of in-cylinder flow field, dynamic mesh generation for a 4-stroke engine, cyclic calculation of in-cylinder flow field】

The Hua-Chin 1.2 L V-8 engine is used to study the unsteady flow field within the cylinder and the intake/exhaust port. The independent cylinder liner is replaced by a whole plastic liner, so the flow visualization can be observed easily during low speed operation. Several plots of the instantaneous smoke lines have been recorded. Besides, the cyclic cylinder pressure and the instantaneous velocity measurement of the inlet manifold and outlet manifold are obtained. All these data is used for the numerical validation of the cyclic calculation. In the numerical development for the cyclic operating engine, the dynamic grids are generated by the multiple block technique. The valve motion coupled with the cylinder head is accomplished by moving the valve surface grids outward and flipping around the rim. So there is only a very small portion of the surfaces needs to be changed for a different crank angle. Then the three-dimensional grid within the manifold and cylinder can be generated by the elliptic method. This can save a lot of the calculation time for the grids during the cyclic operation. The unsteady flow solver is developed for each block, the moving boundary effects are implemented in the program. Namely, the density, shear stress, and internal energy are modified adjacent to the moving walls. However,

the flow Mach number is very small overall, the calculation time step becomes too small for the current compressible code. The calculation time is too long in order to arrive at a converged solution. By adding the artificial compressibility factor to the current code is necessary to increase the calculation time step.

一、前言

數值模擬在 1980 年就已經應用於許多流場之分析與設計，但由於引擎造型較複雜而且搭配週期之運動，所以早期皆以穩態抽氣方式進行量測與模擬，最近則開始進行非穩態與穩態之比較探討，以期能以穩態之開發，應用於週期操作下之環境，本研究亦嘗試以三維穩態開發與驗證之建立後擴充至週期流場之分析，並同時以視流場之方法觀察週期流動下之流線，以配合分析程式之驗證。

在文獻回顧上，國外 Coz 等人 (1) 以雷射測速儀量測引擎於不同進氣設計所導致的缸內流場差異，並以 KIVA 多維模擬程式來計算進氣與壓縮衝程流場，互相比對，其模擬結果高估流場紊流強度，但可正確預測平均速度場。雖然三維模擬程式在精確度還需加強，但在了解整個流場結構有很大助益。1991 年，Amato 等 (2) 對一個單缸具碗狀活塞的燃燒室進行數值模擬，採用新的紊流模式及噴油模式與原始 KIVA 的紊流模式 (SGS model)，將模擬結果與實驗數據作比較。結果顯示在沿直徑方向預測缸內切線方向的速度時，所有模擬程式的結果都相近，在離碗狀部分外面的速度計算有高估的現象。而在沿直徑方向計算切線紊流強度方面，原始的紊流模式會有高估的情況，改進的紊流模式則有可接受的結果。1993 年，Rutland (3) 以 KIVA-3 模擬四閥穩態進氣測試引擎與非穩態馬達帶動的 Diesel 引擎，並將模擬與實驗結果比較。此一多重區塊網格產生進氣道、閥門、汽缸等複雜幾何形狀的網格，在穩態進氣測試引擎模擬，當缸內的淨質量流率為零時，視缸內流場為 quasi-steady，在非穩態馬達帶動引擎的模擬則由進氣閥開到噴油前。研究結果顯示，穩態進氣測試上在進氣閥上游的流場較規則且平穩，在進氣閥下游的流場從小尺寸的複雜流場發展到大而明顯的旋轉流場，其次是穩態進氣引擎與非穩態馬達帶動引擎模擬的結果在進氣過程相符合，雖然缸內流場複雜，但 KIVA-3 對進氣流場的模擬可獲得細部的流場資料。1998 年，J.F.O Connor 等 (4) 利用自動六面體網格並結合 C.F.D 探討穩態的缸內流場，且對不同形狀設計的進氣道作分析，結果顯示自動六面體網格的建立比一般方法可節省 15% 處理時間。Jorg Brinkel (5) 則以 KIVA-3V 之移動網格技術模擬柴油引擎

噴霧燃燒之狀況，在點火延遲與溫度變化上，模擬之結果與量測值相當一致。

國內羅治平〔6〕以 KIVA 三維模擬之套裝軟體程式對四行程透明單缸引擎進行流場分析，另以光纖式雷射都卜勒測速儀對汽缸內之紊流流場進行量測，並進行比對。其結果相當一致，唯汽缸頭處模擬值與實驗結果差異較大。民國 86 年，羅金國〔7〕以光學量測及三維數值模擬研究單缸透明引擎在穩態操作下之缸內流場研究。光學量測方面，實驗引擎之汽缸頭及汽缸套以壓克力設計製作而成，在不具活塞之穩態進氣條件下，進行缸內流場量測。數值模擬方面，以 KIVA-3 之套裝軟體輸入略作修改，與實驗比對結果顯示實驗與模擬兩者數量及趨勢大致是相符合，但細部結構上仍有差異。民國 86 年，邱進昆〔8〕利用結構性網格建立四行程機車引擎缸內流場網格，針對計算模擬空間區分成五大區塊 (Block)，其中四塊採用 O 型網格，另外一塊則採用 H 型網格，建立出進氣閘道及汽缸的網格，以暫態移動活塞模型來分析三維可壓縮流體在壓縮行程時缸內流場變化，結果發現在進氣及壓縮行程暫態移動活塞流場中，翻滾運動是因為流體撞擊到活塞頂面之回流所產生。民國 87 年，唐賢達〔9〕以光學都卜勒雷射測速儀測量方法量測山葉迅光 125c.c 機車引擎缸內流場及用 KIVA-3V 三維數值模擬相同狀況下之汽缸內流場，並進行相互比對，其結果整體而言可得到一致的趨勢。之後，孫哲南〔10〕利用視流實驗拍攝此一透明汽缸內流場，另外使用 KIVA-3V R2 三維數值模擬原始程式，依照論文的需求加以局部修改並在個人電腦上進行。模擬比較的基本狀態為實驗引擎進氣閘開度為 3mm、5mm 及 7mm 時之缸內流場，並與實驗結果作一比對，比對結果視流法所拍攝的流場與數值模擬相互契合，也應證了以 KIVA-3V 數值流體模擬汽缸流場的準確性。胡國華〔11〕採用多重區塊法則處理華擎 1200C.C.四行程引擎之缸內動態網格，基本上網格生成的原則是以前六面體為架構，唯於閘門開啟移動部份，為使動態網格可以平順移動，以符合實際缸內動態流場，所以在汽門閘內部之網格點，是以由少漸增方式生成，在閘背的部份就必須以三角柱的網格來連接，以讓所建立出三維動態網格，可以更真實描述實際汽缸內動態流場。

二、研究目的與方法

由實驗量測可得到可靠的數據，但只能做局部量測，數值模擬則可預測整個流場的結構，所以近年來有多篇研究即先以雷射作量測，再以相同的條件作數值模擬，將量測結果與數值作比對，若能有相同的結果或趨勢，則日後即可以數值模擬取代實驗，節省時間及費用。進行數值模擬前，必須先建構出計算網格點，再對缸內流場作模擬，KIVA 是目前最常用的商業軟體，最原始 KIVA 是在 1985 年發表，並先後在 1989、1993 及 1997 年發表 KIVA-、KIVA-3 和 KIVA-3V，此軟體經過多次改良分成格點產生程式、主程式、圖形資料產生程式，可建構任何複雜的幾何圖形，並可支援屋頂型汽缸，主程式可選擇混合控制紊流燃燒模式及 - 紊流模式，但在複雜上蓋之分

析上，需在原始程式上作些修改，程式銜接上需要花費一些功夫。本研究先前即以三維流場分析程式之開發應用於渦輪機與風扇流場上，對複雜曲面之建構、週期流場之分析有所接觸，在內燃引擎複雜之缸內流場分析上，也期望能延續先前開發之經驗，協助此一問題之了解。

本研究延續穩態流場分析之結果，以自行建構計算網格點，並開發多區塊三維 Navier-Stokes 非穩態流場分析程式，採用 Jameson〔12〕的人工黏滯及 - 紊流模式〔14〕進行缸內紊流流場數值模擬，穩態分析之成果，請參考張耀峰之碩士論文〔15〕。在非穩態流場上，實驗結果以視流場方式處理，在分析上，也採用多重區塊法則處理華擎 1200 C.C.四行程引擎之缸內動態網格，其區塊的定義為(1)進氣道彎管部份(2)進氣閘門貫穿進氣道彎管的部份(3)進氣閘門開啟移動部份(4)排氣道彎管部份(5)排氣閘門貫穿排氣道彎管的部份(6)排氣閘門開啟移動部份(7)汽缸燃燒室本體部份共分為七大區塊來接合各流場動態網格。當引擎週期性運轉時，曲軸在不同角度下三維動態網格的建立，只需改變進氣及排氣閘門開啟移動之內部部份，亦活塞面於汽缸位置移動部份，也就是區塊三、六、七之銜接處網格，基本上網格生成的原則，是以六面體為架構，唯於閘門開啟移動部份以及閘面之造型，採用三角柱網格進行銜接，利用節點之位置平順移動，處理缸內動態流場之描述。

三、週期流場之實驗量測結果

圖一為本研究所採用之華擎引擎缸內週期流動之流線定性觀測，其中解角器之讀取以數位顯示方式與流場拍攝同步讀取，可提供數值分析有效之類比。圖二為引擎在 100rpm 時進氣口與排氣口之瞬時流場觀測，由圖中可明顯看出吸入或逆流噴出之流線分佈。此外，透過缸壓之定量讀取其瞬時壓力分佈繪於圖三，其中顯示有八個循環之重疊於曲軸角度上，其結果皆相當吻合，顯示相當一致之週期變化。圖四則為進氣口中央之瞬時流速量測，在圖中顯示二十四個循環之結果，其中僅有二個循環量測有飄移現象，其餘之二十二個循環皆相當吻合，可做為其代表結果。同樣在排氣口中央處之熱線瞬時流速之紀錄繪於圖五，在此圖中二十四個循環之結果皆相當吻合，唯在閘門關閉時流速之跳動可達 1m/s，相較進氣口之結果要高一些。

四、動態網格之建立

本研究之動態網格產生以各區塊之銜接面之描述與建立為主，之後各區塊之內部網格之格點以橢圓形方程式產生。唯一比較特殊之處在於閘背面上採用漸縮之網格，因此貼覆於閘面最後一個網格為一三角柱造型。詳細之建構步驟與過程請參考胡國華之碩士論文〔11〕。圖六(a)為華擎引擎曲軸角度 0 度時之網格，此時進排氣閘僅以一個三角柱銜接汽缸內之網格，圖六(b)為進氣閘全開時汽缸與進氣道以三個三角柱銜接，圖六(c)為排氣閘全開時汽缸與排氣道同樣以三個三角柱銜接，其銜接之網格數以閘之昇程做一切割以符合流道之大小與格點數之配合。此外，所完

成之網格，利用各個面之投影面積總合為零，以檢驗網格之產生以配合有限體積法之解法。

五、動態流場之數值分析

本研究建立移動邊界條件於非穩態分析程式中，在動量守恆上之壁面剪力計算以流體相對壁面之相對速度計算其剪力，以產生閥面或活塞面之拖曳效應，在質量守恆上則需將壁面之壓縮或膨脹效應修正於下一步階之密度上其算式為

$$\rho^{n+1} = \rho^n - flux \times \Delta t / V - \rho^n (\vec{A} \cdot \vec{V}_w) \Delta t / [V + (\vec{A} \cdot \vec{V}_w) \Delta t]$$

其中 $\vec{A} \cdot \vec{V}_w$ 為壁面法線面積向量與壁面移動速度之

內積，同理在能量守恆上其邊界功之效應亦需修正下一步階之總內能其算式為

$$u^{n+1} = u^n - flux \times \Delta t / V - \rho^n h^n (\vec{A} \cdot \vec{V}_w) \Delta t / [V + (\vec{A} \cdot \vec{V}_w) \Delta t]$$

其中 u 為總內能而 h 為焓。

流場解法採用有限體積法撰寫，時間積分上以四階之 Runge-Kutta 方式處理 (13)，各區塊之銜接處皆多加上兩層之重疊區，如此即可一區一區個別撰寫程式，而在每一次時間積分前將重疊區流場變數更新即可，如此物理量之傳遞、微分與人工黏滯之計算將會連續並互相影響。

以目前分析之網格以及四階 Rung-Kutta 積分時間項其每次疊代所能積分之時間步階以曲軸角度而言為 0.001 度且每次積分之局部流場收斂需二十次 Rung-Kutta 以達到空間之精度需求，達到一個週期需要七十二萬個步階，目前分析之結果假設流場靜止由曲軸角度零度開始積分，繪製之結果在曲軸角度 0.025 度之瞬時流場，圖七為缸內壓力分佈，由進氣閥擠壓所產生之閥面壓力分佈以及排氣閥提起所造成之真空其壓力在缸內之變化可明顯觀察其效應，圖八則顯示進排氣閥之閥背面之壓力分佈，其效應與缸內相反，在進氣閥處造成真空，在排氣閥處則形成擠壓之效應，圖九則為瞬時速度場，由此圖所示由於初始之假設為靜止故僅在進排氣閥附近有流動，其中以排氣閥之流動較為明顯，進氣閥附近是有一些流動，若將圖九中之進氣閥附近之速度場放大於圖十，在進氣閥附近之速度場，其流動是朝汽缸內，並朝向閥中央之趨勢，圖十一則為曲軸角度 0.025 度時之商分佈，其缸內與進排氣道仍在等商狀態，主要之 entropy 產生來至於進排氣閥之閥背面處因流動摩擦所造之不可逆，且集中在閥緣處。由於程式目前仍在持續疊代，將來隨分析之結果可進一步了解進排氣道與缸內之流動現象，並探討紊流分佈之情形。

六、結論

本研究以閥背面三角柱網格翻轉之技術處理閥與汽缸之間動態網格之產生，以華擎引擎之週期流場分析中採用七個區塊，並進行投影面積之檢查以確保每一網格之守恆要求。並利用現有之實體進行非穩態流動之觀測與定量量測，在缸內流線與進排氣口之流動觀察上可提供數值分析之定性參考依據，缸壓與熱

線風速儀之量測結果週期特性相當一致，可供數值分析之定量比較。移動邊界條件在質量、動量與能量守恆之效應已加入非穩態分析程式中，但由於流場之馬赫數過低，以目前可壓縮分析程式處理進排氣道之流動其時間步階過小，因此收斂至引擎週期運動之流場需相當長之時間，未來仍需加入人工壓縮因子於程式中，以改善時間步階之限制。

致謝

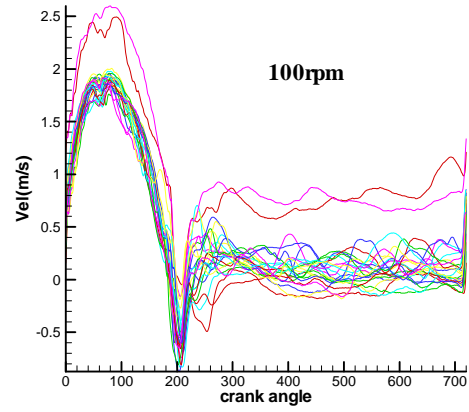
本研究為行政院國家科學委員會補助之專題計劃，計劃編號 NSC 92-2212-E-216-007 特此致謝。

參考文獻

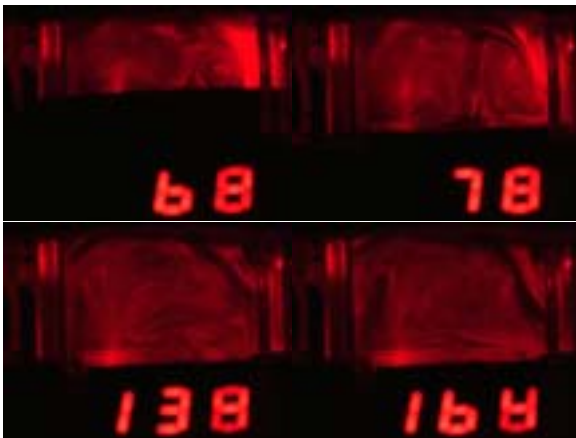
- (1) J. L. Coz, S. Henriot, and P. Pinchon, 1990 "An Experimental and Computational Analysis of Flow Field in a Four-Valved Spark-Ignition Engine-Focus on Cycle-Resolved Turbulence," SAE 900056
- (2) U. Amato, P. Belardini, C. Bertolli, and N. Giacomo, 1991 "The Joint Use of Multi-Dimensional Modeling and Field Experiments in order to Design Diesel Combustion System," C430/045, ImechE.
- (3) Rulant C. J., Pieper C. M., and Hessel R., 1993 "Intake and Cylinder Flow Modeling with a Daul-Valve Port," SAE 930069.
- (4) J.F.O' Connor and N. R. Mckinley, 1998 "CFD Simulations of intake Port Flow Using Automation Mesh Generation: Comparison With Laser Sheet, Swirl and LDA Measurements for Steady Plow Conditions," SAE paper No. 980129
- (5) Jorg Brinkel 2000, "Simulation of Combustion in a DI-Diesel Engine with Application of a Moving Grid," SAE paper No. 2000-01-1888.
- (6) 羅治平, "單缸透明引擎數值模擬與紊流量測," 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 民國86年6月。
- (7) 羅金國, "透明引擎在靜態操作下之缸內流場光學量測與數值模擬," 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 民國86年6月。
- (8) 邱進昆, "四行程引擎及滑輪分子幫浦三維流場分析," 國立成功大學機械工程學系碩士論文, 民國86年7月。
- (9) 唐賢達, "機車引擎進氣缸內流場量測與KIVA3V模擬," 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 民國87年6月9日。
- (10) 孫哲南, "引擎缸內流場三維視流測試模擬," 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 民國91年6月28日。
- (11) 胡國華, "內燃機缸內多重區塊三維動態網格之描述與建立," 中華大學機械與航太工程研究所碩士論文, 民國91年7月。
- (12) Jameson, A., Schmidt, W., and Turkel, E., 1981 "Numerical Solutions of the Euler

Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time-Stepping Schemes," AIAA Paper No. 81-1259, 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference, June 23-25.

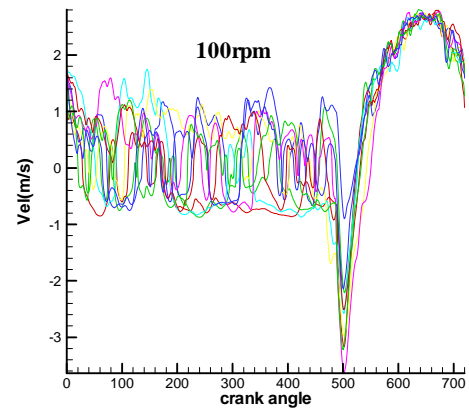
- (13) 王永慶, " 通量向量分離法之三維渦輪機葉流場分析, " 中華大學機械與航太工程研究所碩士論文, 民國89年7月。
- (14) Chien, K.-Y., " Predictions of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds Number Turbulence Model," AIAA Journal, Vol. 20, No.1, January 1982, pp. 33-38.
- (15) 張耀峰, " 機車引擎缸內三維流場分析與實驗結果驗證, " 中華大學機械與航太工程研究所碩士論文, 民國92年2月。



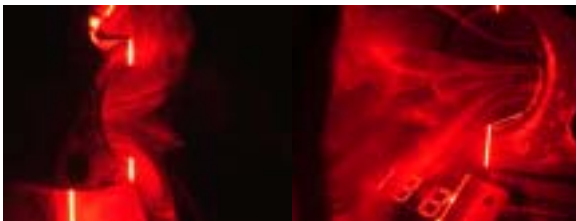
圖四、二十四個循環進氣口中央瞬時流速變化



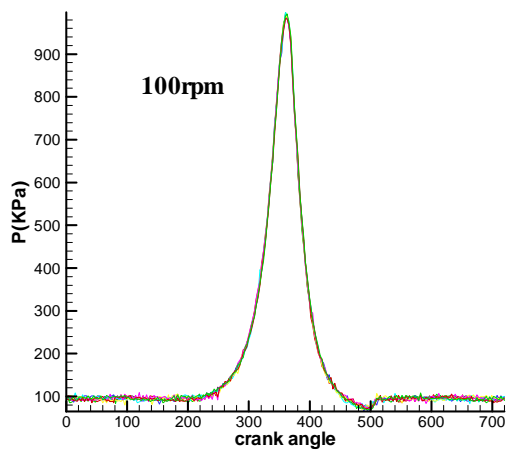
圖一、缸內瞬時流線觀測



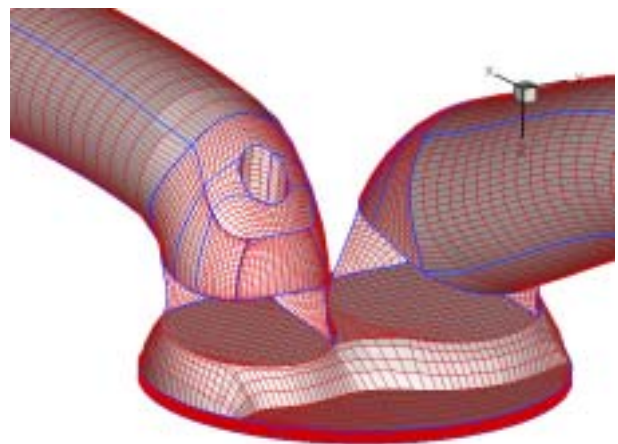
圖五、二十四個循環排氣口中央瞬時流速變化



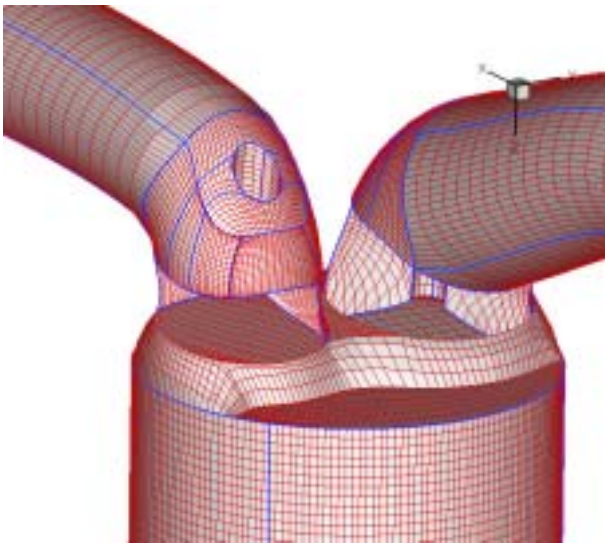
圖二、進排氣口瞬時流線觀測



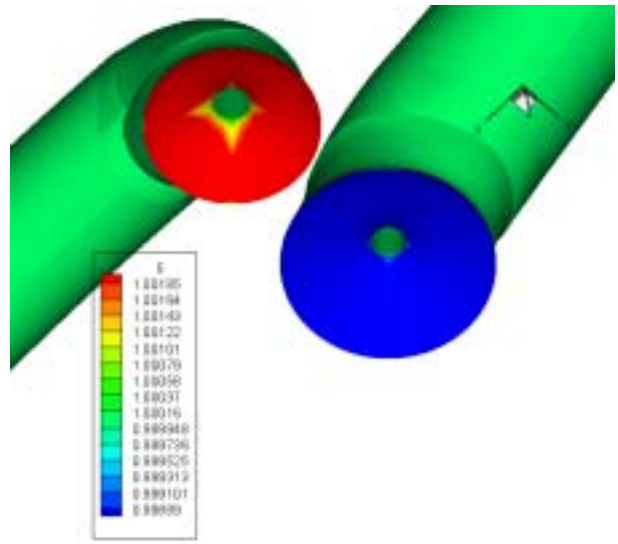
圖三、八個循環之缸壓瞬時變化



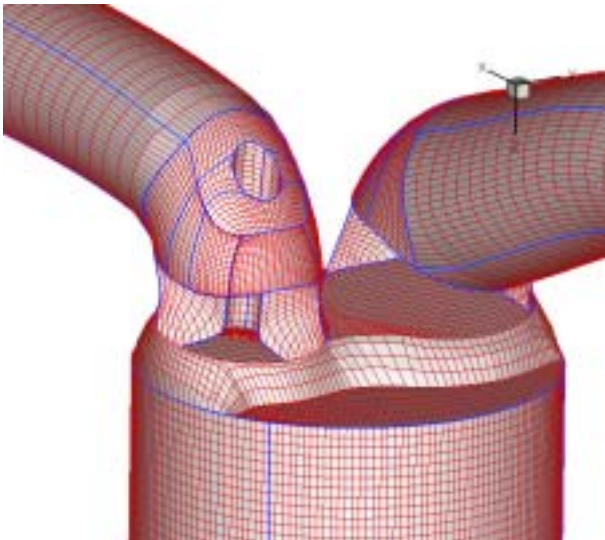
圖六(a)、曲軸角度 0 度時之三維網格剖視圖



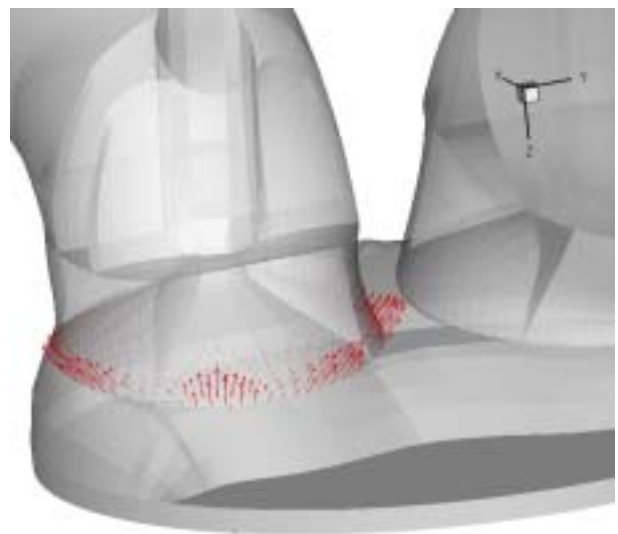
圖六(b)、曲軸角度 109 度時之三維網格剖視圖



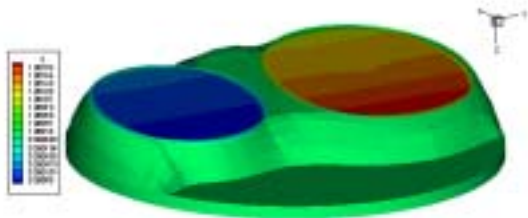
圖八、進氣閥背面與排氣閥背面之壓力分佈
(曲軸角度 0.025 度)



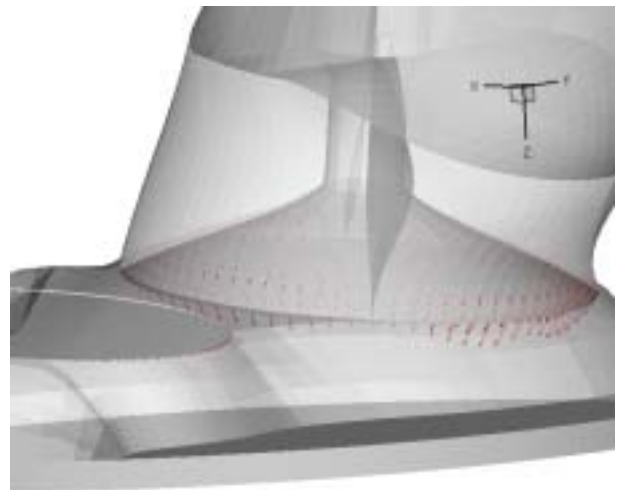
圖六(c)、曲軸角度 607 度時之三維網格剖視圖



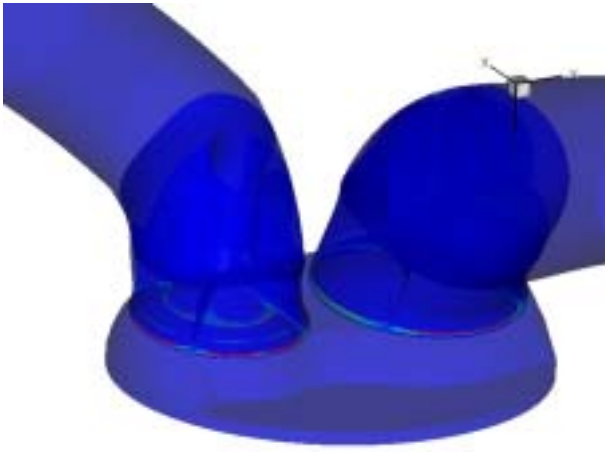
圖九、進氣閥開啟排氣閥關閉時之速度場
(曲軸角度 0.025 度)



圖七、進氣閥開啟排氣閥關閉時缸內壓力分佈
(曲軸角度 0.025 度)



圖十、進氣閥開啟時速度場
(曲軸角度 0.025 度)



圖十一、進氣閥開啟排氣閥關閉時之 entropy 分佈
(曲軸角度 0.025 度)