



電腦數值模擬設計之應用



摘要

車輛工程系 戴昌賢教授兼學術副校長

數值模擬為結合數學法則、電腦科技、工程及相關之專業學科而成的學門。近幾年來，由於電腦軟硬體進步、數值運算方法改良、實際物理問題解析結果更為精進，電腦數值模擬計算模式已廣泛應用在 CAE (Computer-Aided Engineering) 電腦輔助工程；從車輛等載具之外形設計到飛機研發改良、天氣氣象預報到土木結構驗證、武器系統或電子產品之設計等都可見到其使用之蹤跡，數值模擬

不僅可大幅縮減研發所需時程，更可顯著地降低可觀之實驗操作耗費；本校數值模擬實驗室源於國防科技產業設計，近 10 年廣泛應用於民生產業科技，成果豐碩。

一、何謂計算流體學

計算流體力學為運用數值方法、電腦科技、物理經驗及理論式加上工程專業學門，求解流體的學問(圖 1)。將描述流體的應力及應變率關係式與運動方程式整合在一起，就可得到

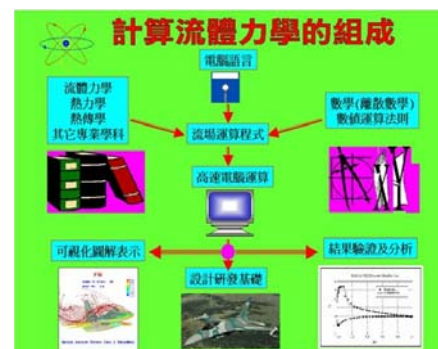


圖 1. 計算流體力學組成之學門

Navier-Stokes 方程式，可為流體力學核心，即求解此高難度之非線性偏微分方程，因為此方程式包含了大量的物理現象，於科學與工程應用極為廣泛。發展之初，是用以計算大氣氣候預測，繼而運用於龐大國防武器系統有關流體流動、熱傳等範疇，迄今日應用於工業上各類型工業研發設計，因此其為數值模擬中，運用最廣泛的學門之一，近年來因各類物理經驗累積、理論推導式精進、數值方法大幅改良及電腦運算、儲存能力提昇等條件下，計算流體力學成為探討研究流體流動問題及其物理現象的主要工具。

計算流體力學發展迄今除了解決國防武器及太空載具於高速飛行時的氣動力問題，這種科技已為民間工業大量應用，發揮了更大的效能；例如火炮中間彈道的模擬，其結果就可運用於車輛、飛機等排氣噪音分析及防制裝置的設計參考。除此之外船艦、車輛外形，各類引擎燃燒系統，大氣氣候預測，電路板熱傳導對流分析，電子封裝、製程，空調系統設計，空氣及水污染擴散預測，建築結構受流體之影響，心臟、血管內血液流動之醫學工程等(圖 2)，也可利用計算流體

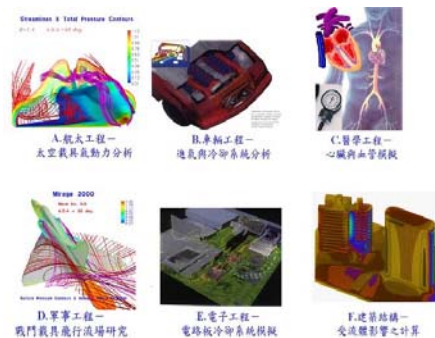


圖 2. 計算流體力學模擬計算範疇

力學的方法來模擬。近半世紀來的趨勢可知，由於計算流體力學沒有安全上的顧慮、成本低、時效快，不受實驗本身的干擾，在設計上可取代大量的實驗，作為系統研發之主要工具。這種用電腦運算來模擬流動場情況的方法，就是所謂數值風洞(Numerical Wind Tunnel)。

二、計算流體運算程序

計算流體力學所運用的數值模擬運算是非常複雜繁瑣，不僅要求正確

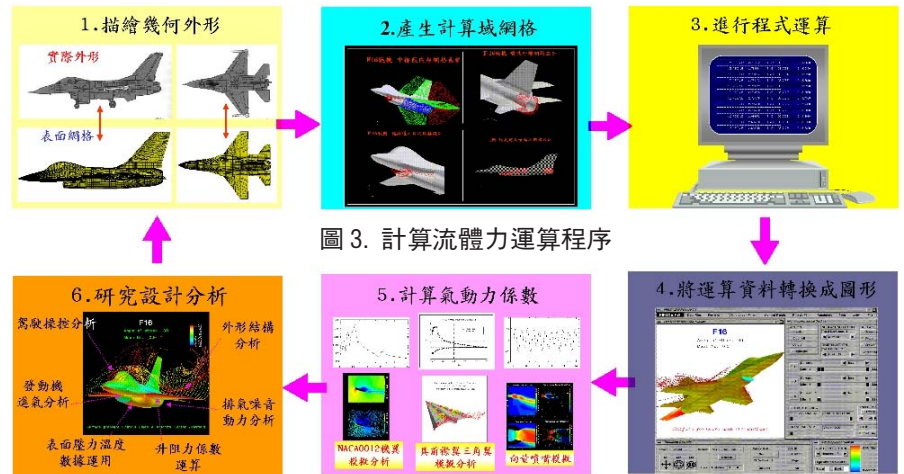


圖 3. 計算流體力學運算程序

的資料輸入，運算程序所採用的數值方法，包括通量計算、殘值收斂、空間離散、時間積分等，必須合適，且運算過程必須不斷檢視、分析，最後結果之驗證，各步驟都須審慎精確，才能獲得正確的解。計算流體力學運算過程主要分為計算區域之格點建立、流動場物理現象計算及計算結果之圖顯示、數據分析等三大階段[3]，於此僅以最簡要之模擬計算程序實例(圖 3)說明：

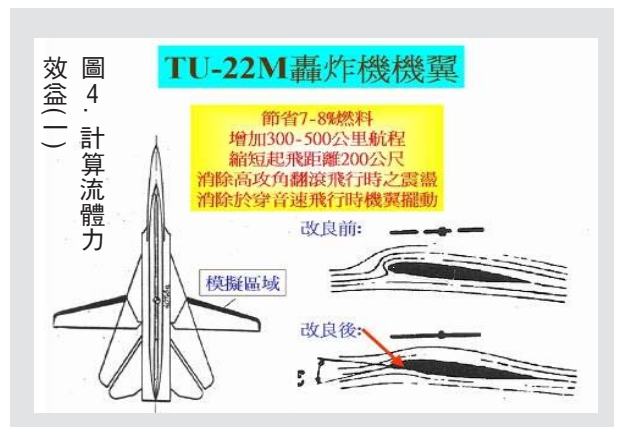
1. 運用網格產生軟體、電腦語言、數值方法，描繪物體幾何外形，並依其幾何形狀、可能之物理現象，適切定義計算區塊(block)。
2. 產生各計算區塊的網格(cell)。
3. 定義物體本身及周圍環境的初始及邊界條件，同時設定流場運算參數，作為程式運算之輸入條件。
4. 依照不同的物理性質，選用適合的數學模式及法則，進行模擬程式的運算，同時檢視運算情形，以便重新訂正不當之輸入或運算法則。
5. 將運算結果之數值，轉換為流場物理計算氣動力係數(如溫度、壓力、密度、升阻力係數等數值資料)，同時與實驗值相互比對、驗證。
6. 最後再將運算資料，依所欲求解之流場現象，透過後處理繪圖軟體，轉換成利於分析、觀測的圖示。

於以上的程序中，依據所欲模擬流場之屬性、流場特性正確的選取輸入

參數，與邊界條件，以決定軟體之計算流程與步驟。若任何一個步驟若產生問題，則無法求得正確的解，即使運算結果與實際物理現象有不符之處，都須改善相關程序中的問題。當然，運用發展成熟的模擬程式，加上適當的流場控制參數，則所運算結果的精準度，不僅可超越實驗結果，更可大量模擬各種不同條件下的流場現象。

三、數值模擬技術的應用及效益

國防工業是最早使用數值模擬技術的，其運用的範圍包括了戰鬥載具設計、武器研發、推進系統、電腦兵棋、氣象預測、教育訓練、製程精進、電子戰、工事設計等。國際上有許多運用此技術而設計成功及降低成本的實例，如俄羅斯僅運用最小成本，卻發揮最大效益的數值計算，將當時正在服役的 TU-22 轟炸機機翼，透過修改模擬、計算其氣動力特性，繼而實驗及製造運用、大幅提昇其空軍戰力(圖 4)。其它如美軍先進戰機之



研發、設計、生產過程，均透過數值模擬計算方式，作為產品實驗及製造的先期設計。由近數十年來，先進國家工業發展上的經驗得知，數值模擬帶給工業界另一種革命性的發展，其產生的效益有：

1. 成本低、時效快、安全無顧慮：許多實驗具有很大的危險性，如火砲彈道軌跡的計算(圖 5)，傳統方式得須發

5. 工程應用上可大幅縮短研發程：如 1990 年代起，波音公司所發展的新型客機，都採用數值模擬方式來設計飛機外形、動力機構、起落架系統等。

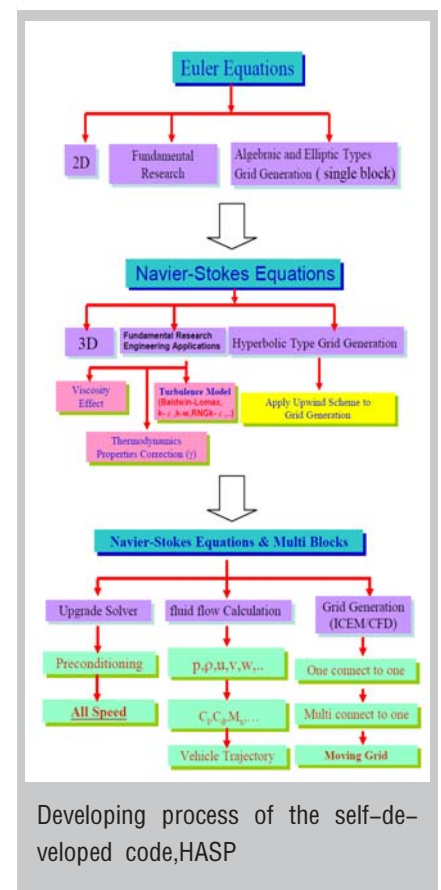
四、屏科大數值模擬實驗室近年研究成果簡介

1. 全流速域計算流程式開發之研究

當數值解算器(numerical solver)的應用遍及於工業與學術界時，計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)必須能夠強健與有效(robust and efficient)地運用於各種馬赫數與雷諾數之流場，為能模擬存在有複雜幾何構型和跨越各種長度比例(scale)特徵(feature)的重要流場結構，建構一套適用於各種流速之解算器並具備可製作複雜構形網格系統之前處理界面與

可視化後處理界面是 CFD 終端使用者最基本的要求，同時也是現今許多套裝軟體發展之基本架構。為達此要求有許多的措施，如數學模式、網格系統和各種算則(algorithm)均需要徹底地瞭解而決定採用何者為佳，本人之研究重點在於選擇較能節省電腦資源(如記憶體需求量和單一疊代所需之 CPU 時間)，又不失去所需的精度與效率之模式，並據以發展出一套可模擬全流速、全雷諾數與複雜構型流場能力的解算器。

本研究成功地以預調法來求解結構性多區塊之可壓縮與不可壓縮的複雜流場；本研究方法的選擇是基於兼具未來發展之潛能與節省電腦資源又能達到所需的精度與效率，結合成一解算器以顯示具有解全速流場與複雜構型的能力，這個問題雖然已有一些人研究過，但文中各種方法的組合且絕對是新的創意，如何在有限之電腦資源下處理實際又複雜之工程問題，本研究成果可提供一項高效能與高精確之模擬分析工具。



2. 振翅微飛行器之研究

本研究的目的是針對各種飛行生物拍撲翼翅之氣動力特性進行研究，模擬翼形包括橢圓翼、NACA0012 及可撓性 NACA0014，流場主要求解 Navier-Stokes 統御方程式，以獲得相關流場之參數。計算域則以複合式一致性網格系統建構，運用動態網格技術配合 C 語言程式控制技巧，以實際模擬生物翼翅拍撲之動態行為。初期採用橢圓翼形(1:8)為蜻蜓翼翅的拍撲模型，藉由簡化之平移、旋轉作為運動機構，在非穩態流場計算中，結合動態網格技術以控制網格配置。重點於分析橢圓翼拍撲運動下所產生的升力與推力，同時亦針對翼翅厚度做進一步之分析，模擬中使用 1/4、1/8 及 1/12 不同厚度之翼翅做氣動力特性比較，結果顯示氣動升力會隨著翼翅變薄而提昇。其次，針對八字形滯空拍撲傾角及縱橫比參數對氣動力特性的影響做完整之分析與比較，目前結果顯示，當採取水平拍撲模式時，質量比功率隨著傾角的增加而呈現出指數型態上升之趨勢。八字形拍撲之縱橫比每增加 0.1，則可以提昇約 15% 左右之

火砲中間彈道流場

減少費用
降低實驗風險
確實掌握彈道軌跡
獲得實驗無法得到之數據

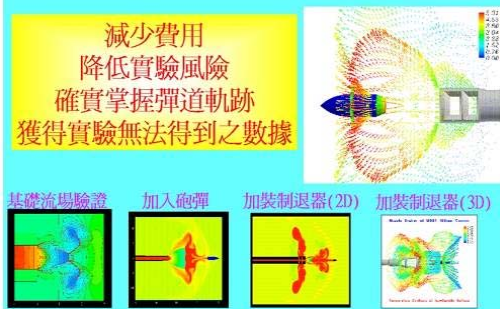


圖 5. 計算流體力效益 (二)

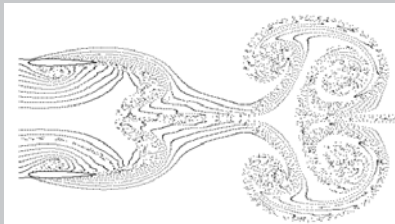
射上萬發的砲彈，透過實驗累積及計算，才能成為可用的射表；此過程除了具有高風險且受限於天候、地域、環保及高費、時程等因素限制，若於前期研究階段，先運用加入各類外在條件的數值模擬計算，繼而採用少量的實驗驗證，則必能縮減射表製作時程。

2. 與實驗結果及實際現象相驗證：數值模擬與實驗所求的解，與真實物理現象絕對有誤差，而工業運用上所允許一定範圍的誤差，得視其應用之對象而定。

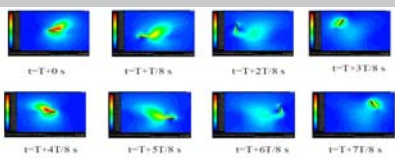
3. 不受實驗本身的干擾：小至數毫米以下之微機電、大至如數十公尺之運輸機等，除了其實驗設施因高精密或規格尺寸要求外，高耗費之設施獲得不易，往往造成研究或設計上的障礙。電腦運算則無此干擾。

4. 可提供詳細資訊、不受量測技術限制：如進入測試階段的飛機實驗或測試，有許多氣動力相關係數(如發動機內部燃燒、熱傳，高攻角飛行之升、阻力等現象)，難以用以上方法獲得，而數值模擬計算之結果，可提供用完善之相關資料，以作為驗證及進一步改良設計之基準。

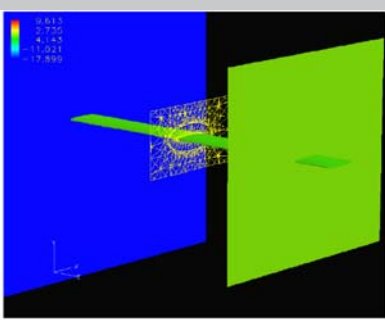
平均升力，而質量比功率僅呈現出近似線性的增加，除此，當縱橫比超過 0.2 後，會在拍撲週期內造成較大之升、阻力變化，對滯空飛行穩定性有不利之影響。最具貢獻的模擬為撓性翼拍撲之分析，運用向量幾何理論，以 C 語言控制複雜的網格變形，將撓曲的翼翅拍撲運動與非定常流場分析做緊密之耦合計算，未來將嘗試進一步分析 3D 拍撲模式，以更真實之 3D 實體拍撲模型，完成預測模式之建立，快速有效地計算出最佳參數組合，提供拍撲微飛行器設計之重要參考。



Flow particle tracer of a flexible flapping wing



Vortices field illustrate the formation and dynamics during hovering

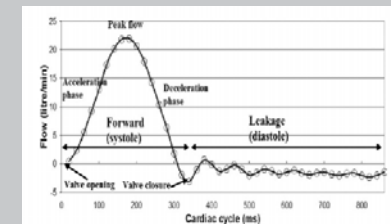
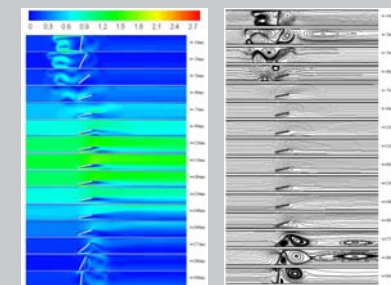
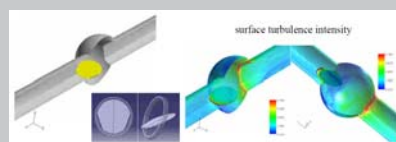


3D flexible flapping wing

3. 人工心瓣動態開關閥之研究

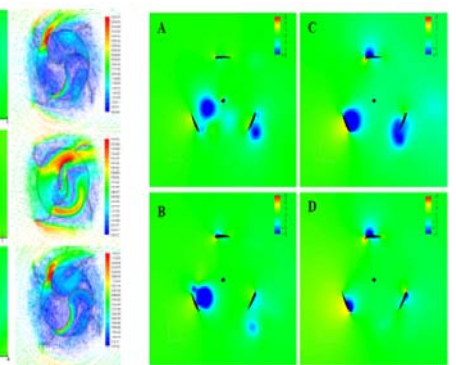
本研究主要發展一套程式系統以求解動態斜開瓣於脈動流中之流－固完整耦合問題。為仔細驗證脈動血流誘使心瓣運動之非定常特性，較以現有之計算流體力學(CFD)算則發展求解此

一問題之系統模組(以 CFD 軟體 Fluent 為主，結合自行開發之結構自由度運動程式)。本研究分析了非停滯狀況下之瓣膜運動，使用結構－非結構耦合格點法(hybrid grid)於每一時間疊代下建構更新網格，並利用單自由度之瓣膜旋轉運動副程式於計算流力算則求解每一時間步階過程中加以耦合計算。根據本研究所發展出的流－固耦合算則系統分析結果可知，過去文獻以暫態定常(quasi-steady)方式去求解不同時序之開閥動態流場現象，其所分析之問題為簡化流場假設，無法準確評估瓣膜開啓、關閉過程及關閉後之逆流血動力特性。本研究成功利用現有數值方法及算則建構一套程式系統以求解動態二維斜開瓣於脈動流中之流－固完整耦合問題。本模擬發現在瓣膜兩側均存在強健之逸放渦流發生，並且一直持續至關閉之後，這些閉閥渦流(closure vortices)對逆流特性形成強烈之擾動，並且影響後續之開閥流場特性。根據本研究所發展出的流－固耦合算則系統分析結果可知，過去文獻



以暫態定常方式去求解不同時序之開閥動態流場現象，其結果無法準確描繪葉瓣在開啓及關閉過程中的流場特徵。對於逆流及葉緣間隙的血液傷害程度也因無法準確模擬關閉渦流的影響而造成過高的指數誤判。

4. 垂直式風力機氣動力設計之研究



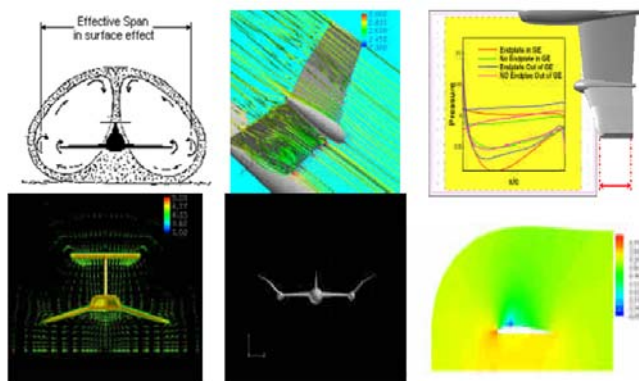
垂直式風機發展迄今不如水平式風機廣泛，主要是其效率不佳之問題，其作用主要為升力產生間歇性扭矩慣性力，帶動風機完成週期性作動；但負扭矩的產生使其效率降低，故由改善負扭矩或增加正扭矩之設計為提升垂直式風機效率方法之一，經由扭矩之分析可作為風機葉片構型設計之重要參考依據。

由於垂直式風機是全方位，結構更簡易、成本低與安靜的操作特性，使其在市中心高樓屋頂，以及偏僻地區漁事碼頭上之應用，有相當大的市場存在。所以研究的重點將利用 CFD 的技術以探討不同翼剖面構型垂直式軸向風機之流場特性，並以無負載下風機由自然風帶動，以觀察其尾渦流場對扭矩之影響。以往之 CFD 動態研究大多以某固定轉速下去探求流場特性，並無法將風機動態響應之流固耦合流場特性精確模擬，故本研究以 CFD 程式外掛結構運動角動量守恒方程副程式，並配合旋轉與固定座標系統，以旋轉滑動格點方式處理風機作動，以真實模擬方式探討此一流固耦合之非定常渦流特性。

5. 飛翼船(地面效應飛行器)之研究

飛翼船(WIG)為地面效應載具的一種，當機翼接地面(或海面)時、翼尖渦流強度受到地面(或海面)的影響而減小，因而使下洗(Down Wash)氣流強度也減小，因而誘導阻力隨之遞減，此種現象現稱為地面效應。機翼愈接近地面

飛行，它的升阻比愈高；根據研究顯示，在離地面距離大約是翼弦長的 4%至 20%處，WIG 載具的升阻比是一般飛翔在空中的飛機的三倍以上，整體而言，WIG 載具之速度較船快、較飛機慢；但於中程之航距(500KM 以內)，在相同的航程與油量下，WIG 之載重大於飛機，故其具有一定之經濟效應。可是於海上飛行由於海象之變化，對 WIG 之機翼產生滑動邊界，使得俯仰的穩定性變得較差，原因乃出自機翼的空氣動中心(Aerodynamic Center)隨機翼對地(海)距離的改變而移動，飛機一般空氣動力中心位於翼弦前緣 25%，但 WIG 因地面效應，此中心會向後移動至 30%至 33%翼弦處；在海面上，由於波浪的影響會使空氣動力中心移動的更加明顯，飛行控制的不易連帶地影響 WIG 載具的發展。對飛機而言，在低空域飛行是屬於高危險與高專業的；但對飛翼船而言，確是被設計成在此空域具安全與穩定性之飛行工具。在本項研究主要使用計算流體力學之方法，用以模擬氣流流經飛翼船翼面與滑動邊界間所產生現象。



6. 爆震波與防爆掩體交互作用之研究

爆炸產生之爆震波呈球形狀向外擴張，直接衝擊傳導路徑上的物體，進而產生反射震波，而此反射震波將與原爆震波及物體相互作用，除了產生複雜的震波結構外，亦可能產生較爆震波更高壓力的震波，而對物體或人員產生嚴重危害。

有關爆炸所產生爆震波物理現象研究已有半個世紀，其中包括了震波的反射、繞射現象、震波間，及震波與渦流的相互影響，於超音速和爆炸流場之研究範疇中，作為安全評估和災害預測技術重要的根基。本研究主要目的乃針對爆震波之傳導行為模式及與障礙物、反射震波等產生交互作用之影響，進而解算震波產生噪音之現象。研究採用計算流體方式，模擬爆震波傳導並衝擊封閉式與開放式防爆掩體，分析震波結構及反射波模式，且探討反射震波與主爆震波合併、消散等流場現象。

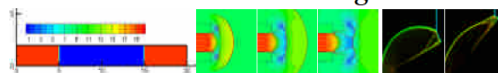
7. 其它

電磁趨動微管流、室內空調、車輛設計、導彈設計、潛艇及魚雷設計、電腦風扇設計、MAV、UAV、兩相流、平行高速運算等多項研發成果亦發表各類 EI/ SCI 期刊。

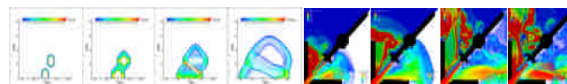
五、結論

目前，國內工業界與製造業正處轉型期，政府將引導臺

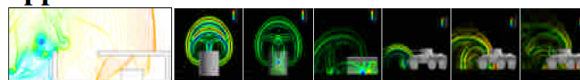
◆ Verification of numerical algorithms



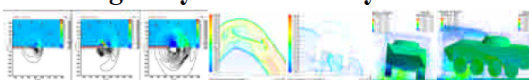
◆ Fundamental behaviors



◆ Applications in 3-D flow fields

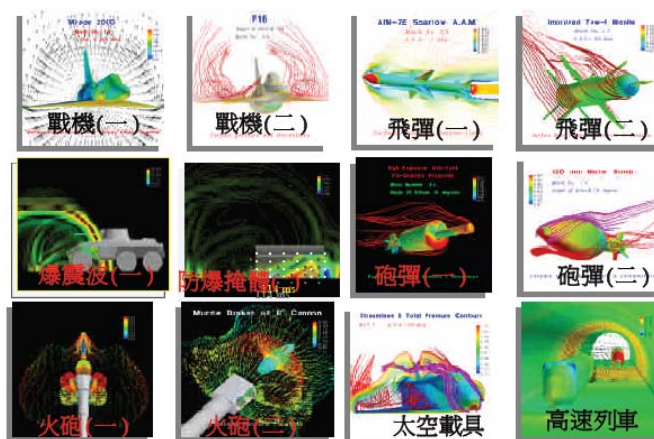


◆ Modeling of dynamic mesh system



灣走向亞太科技中心與製造中心，國內各項工業產品實應具備自行設計研發的能力，然就有關電腦模擬計算工具上，在實際的工程設計與應用上，仍屬鳳毛麟角，不如歐美國家受到重視，要提高產品研發生產效率，勢必結合國內學術、產業界之技術，將 CAE/CAD/CAM 及 CFD 等電腦模擬計算學科，擴大研發範圍；以成本低、維護簡易、運算精準快速的數值模擬作為研發先期之設計工作，同時學習國外成功經驗，那麼未來國人自製進武器系統的能力定能大幅提昇，且國內整體之工業技術水準亦能達到世界一流境界。

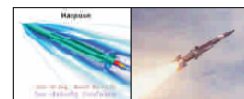
HASP 程式應用案例



爆震波衝擊影響



飛行載具模擬分析



陸上載具模擬分析



海上載具模擬分析

