

從自動化 CAE 分析到產品自動最佳化設計-CAE 的未來與現況

陳申岳

S-Y. Chen, Ph.D.

歲昊科技有限公司
(FEA-Opt Technology)

摘要

CAE 技術的應用，一直是工業研發上的重要課題。但是 CAE 的繁複與多變性，卻也使許多技術人員及公司卻步不前。為了使 CAE 分析在操作上更為快速而簡便，全球的研究人員及科學家自 1970 年以來，就致力於將 CAE 分析及產品設計朝著更穩定、更為自動化的方向邁進。本文介紹自動化 CAE 之觀念，從分析模擬至自動化設計，說明近年來 CAE 的發展與走向。並藉由介紹 ADINA 多重物理分析軟體及 A2Design 最佳化設計軟體之應用實例，展現目前技術之可行性，並探討未來可能之走向。

關鍵字: A2Design、ADINA、有限元素法、CAE、最佳化設計、結構分析、多重物理現象分析

一、前言

CAE 一辭，全名為 Computer Aided Engineering，意為電腦輔助工程，為台灣大陸地區慣用的名辭。但在歐美地區，較常見的說法是 FEA (Finite Element Analysis)，FEM (Finite Element Method) 或 FVM (Finite Volume Method)。此法可追溯回 1960 年代末期美國某位土木系教授，為了計算水壩的應力而開發出來的離散式(Discretized)積分法，此後經學者專家們不停地發展改進而在理論及實用上近趨成熟。在 1970 到 1980 年代由於電腦的運算成本仍屬昂貴，故仍只限於大型企業及研究機構中使用。事實上有限元素法的大量普及，即使在美國，也是在 1995 年之後。1995 是個關鍵性的年代，這跟 Microsoft 的 Windows 95 推出有關。由於 Windows 95 的 32 位元特性及多工平台，使得 CAE 工程計算在個人電腦上執行變得更為實際。讀者如果仔

細回想，一定會發現有許多 CAE 軟體都是在 Windows 95 之後全力投入個人電腦的運算平台的市場。直至今日，個人電腦已成為 CAE 軟體的主要平台。台灣地區則是在 2000 年至今將 CAE 的應用推廣到前所未有的白熱化。這當然跟台灣本身 3C 產業的發達也有相當的關係。

而數值最佳化設計(Numerical Design Optimization)的觀念，事實上要起源得更早。早在達文西時代，就有所謂”黃金比例”(Golden ratio)的概念。數學上的推導及證明則早在有實數論及微積分的時代即已在。而真正專注於用數值的疊代方法(一如有限元素法的離散法)，則也大約是在 1960 年代末期。不過由於數值最佳化需要的運算量比一般的 CAE 更為繁複，故直至今日，尚未能完全被接受。另外數值最佳化在理論上也尚有些需要解決的問題，故可能無法如此地快速普及。不過事實上也早已進入實用階段。

不管在世界上的任一角落，以今天的現實面看，所有的用戶及 CAE 開發廠商都必需同意，

目前仍存在許多的瓶頸使得用戶卻步不前，或是抱怨連連。有些瓶頸是短期內無法解決的，有些卻是技術已成熟，可以加以改善或是已在市面上出現的。本文將針對一些市面上已存在的實用技術加以介紹，並對將來可能之走向作一探討。

二、前處理的困境及可能解決方案

目前 CAE 分析一般分為三大步驟，亦即前處理，求解及後處理。其中目前所最為全球廣大用戶所抱怨的(沒有任何一套軟體例外)，就是前處理。所謂前處理，簡單地說，是將實體的幾何定義(一般皆為 CAD 圖檔)，切割轉換成離散化的網格。目前常見處理的方式約有這幾種。

1. 直接在 CAE 軟體中建立 CAD 模型及網格。
2. 將 CAD 圖型由 3rd Party 軟體讀入，建立網格後再輸出至 CAE 軟體。
3. 由 CAE 軟體讀入 CAD，經修補後建立網格。
4. 直接在 CAD 中建立 CAE 網格，並輸出至 CAE 軟體。

當然所有用戶最期待的都是 CAD 與 CAE 完全整合的軟體，不過由於 CAD 與 CAE 各有其專長及關鍵技術，各家廠商在商業上多所考量，合作上有所困難，所以目前並無兩者皆強的軟體出現。目前大家所期待的多半是方法 3 與 4 能夠更穩定。其中方法 4 的問題在於，若由 CAD 開發人員撰寫網格生成軟體，通常品質無法完美。而偏偏網格品質又是 CAE 精確度的最重要因素之一。但 CAE 公司通常受限於本身之經營策略或其它考量，很難全力投入某一 CAD 開發。不過，國內科盛科技據聞已全力投入此一產品開發，並已有產品，讀者可向科盛科技洽詢。

方法 1 目前已少有用戶採用。方法 2 及方法 3 目前為最常見的模式。不過此法最常見的問題為

1. CAE 讀進 CAD 檔後，無法圍成實體。

2. 即使可以圍成實體，也經常無法建立網格。
3. 即使可以建立網格，若不進行切割或修補，其品質仍無法接受。但若在 CAE 軟體中修補，可能極不穩定。若回到 CAD 中修補，則可能再進入 CAE 中無法還原 CAD 中的設定。

所以一般的用戶都都希望能突破以下瓶景

1. 使用的軟體，種類能越少越好，以利維護和採購上之成本考量。
2. 幾何之修補，希望能儘量在 CAD 中完成即可。如在 CAD 中完成修補，希望在 CAE 可以不必再修補。
3. 希望在 CAE 中，可以減少修補動作，並快速型成高品質網格。

由此看來似乎所有的工作都會落在 CAE 開發者身上。不過目前已有 CAE 軟體可以達到部份嚴酷的要求。

以 ADINA 分析軟體為例，不管是多麼複雜的幾何，(由於其使用的是 Parasolid 核心，)所以只要是能在 Parasolid 裏縫合成一個實體，進入 ADINA 後多半都能直接立即進行網格建立。即使因 CAD 本身就有破面而需修補，在 CAD 中直接動作即可。也就是 ADINA 本身不太存在因轉檔而失真的問題。更為強大的是，ADINA 有所謂的自由六面體建網(free hex-meshing)功能。也就是不管實體是甚麼型狀，也不管拓樸性質為何，可以一個按扭就建立大部份都為六面體的網格組合。而且可以限制在邊界一定都要以六面體存在。

圖一所示為幾個較簡單的幾何。這些實體皆是在無經過任何修改情況下，就可以直接進行網格建立而型成如圖的六面體網格。

為了進行更完整的測試跟驗證，本公司人員找到一非常複雜之 CAD 圖檔。此 CAD 圖檔共計有一千多個分離的破面，連在 CAD 中都無法一次縫合成實體。圖二所示為該檔在 SolidEdge 中的局部放大(為顧及客戶權益無法顯示全圖)。經

在 SolidEdge 中修補縫何成實體後，送入 ADINA 中直接進行網格建立，得到如圖三的結果。若將其斷面切開，可發現內部網格仍微持完整的六面體。而計算結果顯示本網格僅含不到 0.1% 的四面體元素。以此方法建立的網格，元素個數約為十萬個左右。若以同樣網格尺寸建立四面體網格，則元素個數將超過四十萬個。所以較精密穩定的前處理，不但可以省下用戶許多時間，更可以達到更精確的結果，甚至可以用更少的運算時間跟記憶體容量。

三、求解之問題

當用戶開始逐漸習慣 CAE 前處理帶來的痛苦，而準備要開始進入量產的階段時，便會開始面臨求解器穩定性的問題。以結構分析來說，可分為兩大類

1. 非線性問題的收斂穩定性。
2. 元素種類的選擇。

其中第一項，所有曾經從事過非線性分析的讀者應該都感同身受。常見在收斂上會發生問題的情況

1. 結構的束制定義不完整，造成結構本身定義不穩定。
2. 結構在接觸過程中，因接觸面太過複雜而造成發散。
3. 結構在非線性變型過程中有能量釋放的行為(如挫屈)，使得平衡方程式完全崩潰。
4. 結構局部脫離或崩潰，使得勁度矩陣解體。

這些情況，可以看出都是常見的情況，且為數學方程式上的奇異帶。也就是可能存在解，也可能存在非唯一的解。現今雖然大部份的 CAE 軟體都存在著處理這些問題的方法，但很多都只是所謂的暴力法(Brute-Force Approach)。基於非線性問題的特色，這樣的問題即使得到答案，如果方法錯誤，很有可能其結果也是錯誤的。所以基本理論上的突破非常重要。

ADINA 公司的主要開發領導人 K-J Bathe 為麻省理工學院教授，是 80 年代全球知名的有限元素法大師，而且其專長橫跨熱，流，結構各領域。其中具突破性的 Load Displacement Control 非線性運算法[1]到今天都還被認為是具有重大意義的革命性突破。除此之外，ADINA 還具有以下各種獨創的方法，都是在理論上經過全學者檢視，且經過實例考驗的

1. Load Displacement Control：對平滑的非線性問題具有保證收斂性質，如回彈，挫屈等問題。
2. Low Speed Dynamics：對不平滑且可能不連續的問題具有保證收斂性質，如破裂，接觸等問題。
3. Stiffness Stabilizer：對於束制不完整的問題有自動平衡的功能，無需調整參數且不影響結果。

本公司及 ADINA 原廠都建立了許多驗證模型，許多以往認為無法用正常發法求解的問題皆可輕易解決。限於篇幅無法在此一一詳述，有興趣之讀者可至本公司網站 www.FEA-Optimization.com 瞭解。其他各方法的詳細推導，可參考文獻[2]。

上述是較為複雜的數學問題，對很多用戶來說較為艱深。接下來我們談到較為直接的問題，也就是元素的選取。如果我們將元素的選取限定在三維的一般實體，那麼至少要考慮到以下因素

1. 材料特性
2. 元素節點數
3. 特殊運算需求

其中材料特性因為是基本性質，所以事實上選項並不困難。元素節點數事實上跟模型的大小及解析度有關，所以選擇上技術性也不高。剩下的特殊運算需求，卻相當棘手。常碰到的問題是

1. 某元素並不支援所有的點數構成，造成建模時的問題。
2. 常用元素不支援某種材料特性，以至於舊網格無法重複使用。

3. 用戶根據手冊作了自認為最好的組合，卻被告知該組合的結果有問題。

ADINA 基於其完整嚴密的理論架構，將這些問題減到最少。在 ADINA 中，選取元素的步驟已減化為

1. 用戶定義材料特性
2. 用戶在網格建立時，指定單一元素構成節點數。

ADINA 元素支援 4 點(四面體)至 27 點元素，包含所有的可能組合。所以也不會有介面不相容(incompatible)的問題。

所以基本上來說，用戶只需決定材料特性，其他一切必要參數都由 ADINA 來決定。更重要的是這些參數並不是勉強的組合，而是精密計算後的結果。所以基本上 ADINA 的三維結構實體元素只有一種。讀者也許會覺得不可思議，但如果有修過有限元素法的課，回想起來應該會瞭解，有限元素法的基本理論本來就允許作到這樣參數分離簡化的結果，只是在程式撰寫上可能較為困難。(筆者在幾所大學研究所授課，當操作商用軟體時都常被問到這樣的問題：為什麼要分這麼多種元素？)。

四、多重物理耦合分析之現況

自 2000 年起，多重物理現象的耦合分析已經越來越重要，其中最重要的原因，當然是因為自然界的物體，本來就都是處在多種物理現象的影響，而非單一事件。

常見的情況，如模具澆注後，因散熱程度不同，使得各處收縮量不同而產生翹曲現象。或是引擎內部因燃燒的情況，而使得熱分布不均，產生局部變型而至氣閥閉鎖不佳。

多重物理耦合分析，有兩種最常被討論的方法，一為單向耦合，一為雙向耦合。以熱應力的計算而為例，一般會先計算溫度分布，然後將溫度分布對應到結構模型，進行結構應力分析。結構分析完後即結束分析，並不考慮變型或其他因素所產生對溫度場的影響，此稱之為單向耦合。

但有些物理現象，卻無法以單向耦合來解析。

最常見的現象，是所謂的「抖動」(Fluttering)。舉例說明，飛機的機翼及風扇的葉片，因受風壓而變型，但這個變型導至流場的改變，使的風壓減小而回彈，週而復始。這個循環可能趨於穩定，也可能逐漸擴大而造成相當嚴重的破壞。這種行為不能單純以結構分析來瞭解，也不能以單向耦合來解析，只能以雙向耦合的流固互動(Fluid-Structure Interaction, FSI)原理來計算。流固雙向耦合有許多困難的技術及理論問題需解決，即使流固界面的網格吻合。若界面網格不吻合，將衍生出更多額外之問題。對細節有興趣的讀者可參文獻[3]。

基於文獻[3]的理論基礎，ADINA 對於 FSI 問題已可作到接受不穩合的流固網格界面，但仍可作到直接耦合。這樣的技術，筆者認為將可使 CAE 分析推展到人體及病理學的瞭解及預測，進而成為醫學上的重要工具。

圖五至七所示為心室瓣膜閉鎖模擬。藉由電腦的模擬分析，醫師可研究是否可藉由改變外新室型狀，來治療瓣膜閉鎖不全之病症。

五、自動化、最佳化設計之曙光

近代工程設計技術的發展，我們可以說，幾乎都是直接或間接地以自動化及最佳化設計為目標發展的。但是即使在直覺上也可理解，自動化及最佳化設計的問題，遠比數值分析模擬又要複雜許多。

一般工程設計的概念，大致可以如圖八的流程表示，也就是不外乎是反復的設計變更、產品驗證的行為。在產品驗證方面，現今我們可以用 CAE 來取代。而最佳化設計的概念，就是如圖八將設計迴圈以電腦程式，數學理論及數值技巧將之自動化。此概念聽起來頗為抽象模糊，但事實上已進入實用化階段。

國內目前已有一套，經由多年累積的研發及

應用，自行開發完成的數值最佳化設計套裝軟體 A2Design。A2Design 目前的產品模式較為特殊，並非為一執行檔，而是一組龐大之程式庫。開發者或服務廠商透過呼叫程式庫撰寫成終端客制化、最佳化產品設計程式。由於其概念較為抽象複雜，我們將直接以實例來解說其應用。這些實例，一項為筆者參與主要開發，三項為筆者獨力開發完。

1. 廠房結構物最佳化設計

圖九所示為美國某公司所生產，為廠房屋頂所設計製造之結構模組在實驗室中測試之照片。由於該公司大量生產同類行之產品，亟需要有一套專用程式，希望能快速減化設計流程，並降低成本。而基於文獻[4]發表之技術，結合 CAE 結構分析及最佳化設計程式，已於 1996 年年間成功地為該公司開發出一套最佳化自動設計軟體。用戶只要輸入設計參數及條件，只要一個按扭就可完成設計。圖十為兩個結構物的自動設計過程。最上方為原始設計，最下方為經電腦運算後之最佳化設計。經計算每個結構物可省下平均 40% 之成本，廠商並已為圖中兩個最佳化結構物申請專利。

2. 眼球外科手術專家系統

眼科醫師對近視患者的治療方法之一，是在眼球角膜上作一定的切割，使眼球因眼壓自然變型而產生矯正透鏡的效果。但切割之長度深度及位置傳統上只能憑醫師之經驗，相當危險。透過結合結構分析程式及最佳化設計程式，並與診斷掃描儀器連線，醫師在掃描完病人眼球型狀、構造尺寸、眼壓等參數後，即可由程式自動計算手術之最佳切割長度、深度及位置。圖十一所示為某病患眼球表面於手術前之形狀，並經由程式運算最佳手術切割後之變型預測。

該專案由美國某醫院贊助完成。系統於 1993 年左右完成而於 1995 年左右通過 FDI 認證正式啟用，並已申請多項專利。

3. 機械零件減重及強化設計

某公司希望用特殊材料製造某一常用零件，以達到強化耐用並節省成本之目標。但因該材料特性不同於傳統材料，經過數年之設計後無法突破。後經用最佳化設計及 CAE 分析，於一週內成功達到目標。電腦最佳化運算改變該零件之過程如圖十二所示。該設計可強化 10% 強度，並減重 40% 左右。

4. 以 A2Design 從田口法數據中搜尋最佳解

圖 13 所示為某防爆結構物，經用 LS-DYNA 商用軟體分析後，發現無法抵擋投射物攻擊，故必須進行重新設計。利用田口法運算，由於有三組設計變數，一共需 27 組分析運算。運算工作分由三台 HP C3000 工作站執行，耗時約 24 小時。田口法中得到幾組可合乎要求之設計。

此 27 組數據結果，輸入 A2Design 後，以 Lagrangian Interpolation 求出反應曲線(Response Surface)，並用 A2Design 搜尋最佳設計點。此段計算耗時只有數秒鐘。此最佳設計點，比田口法所得之點減少 10% 之重量。經 LS-DYNA 模擬驗證，該設計仍可抵擋投射物之攻擊。此例於 2001 年發表於文獻[5]。

六、結論

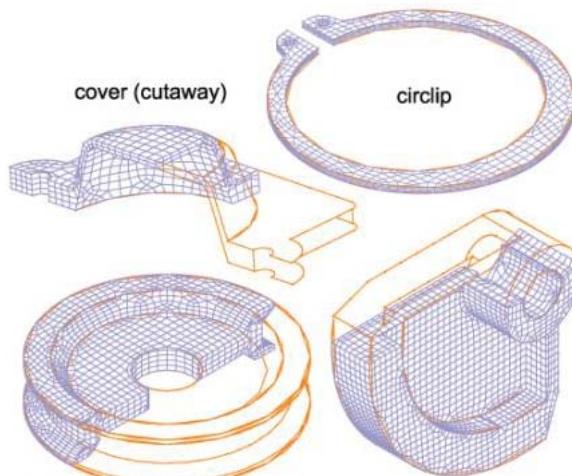
在本文中我們探討了許多 CAE 分析功能及界面漸趨自動化的走向，並介紹了 ADINA 多重物理分析軟體許多強大穩定的新功能。因為其在 FSI 分析上的重大突破，我們相信 CAE 將會向生醫病理分析的領域開始跨進。

藉由 CAE 分析的自動化及穩定化，再加上數值最佳化設計之技術，我們發現全自動的工程最佳化設計已經開始進入實用階段。另外藉由對 A2Design 客制化，也顯示了正確地運用各項 CAE 技術，的確可以實現自動化 CAE 分析及設計的目的。未來的十年內，這也必然是 CAE 發展的重大課題之一。

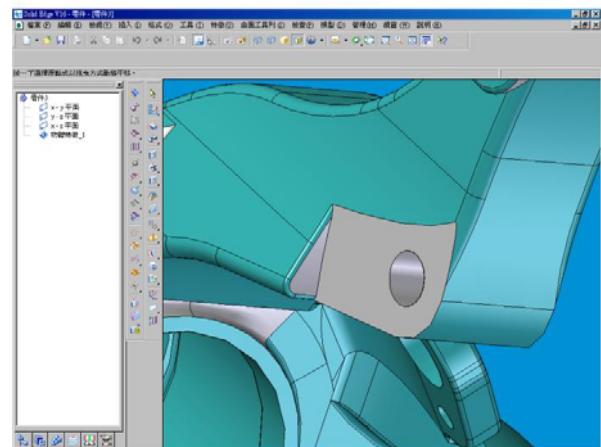
七、參考文獻

1. K-J Bathe and E.N., "On the Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equations", Journal of Computers and Structures, Vol . 17, No. 5-6, pp.871-879, 1983.
2. K-J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 1996.
3. H Zhang and K-J. Bathe "Direct and Iterative Computing of Fluid Flows Fully Coupled with Structures", Computational Fluid and Solid Mechanics, K-J. Bathe, editor, Elsevier Science, 2001.
4. S-Y. Chen and S. D. Rajan, October 2000, "A Robust Genetic Algorithm for Structural Optimization", Structural Engineering & Mechanics Journal, Vol 10, No 4, pp313-336.
5. S-Y. Chen, March 2001, "An Approach for Impact Structure Optimization Using The Robust Genetic Algorithm", Finite Elements in Analysis and Design, Vol 37, No 5, pp431-446.

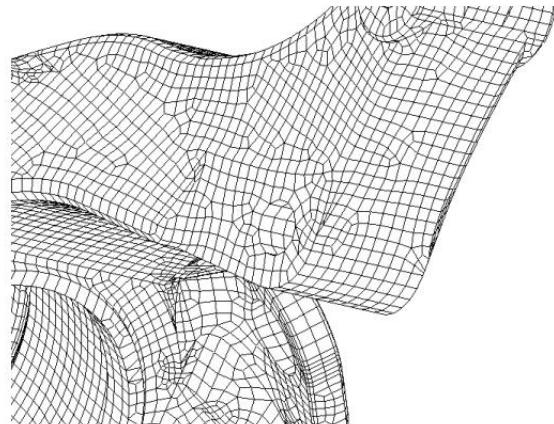
八、圖表彙整



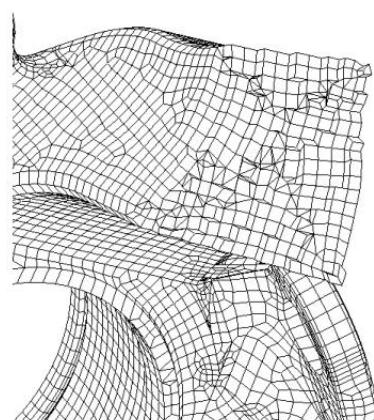
圖一、一般實體在 ADINA 中的自由六面體建立
網格結果



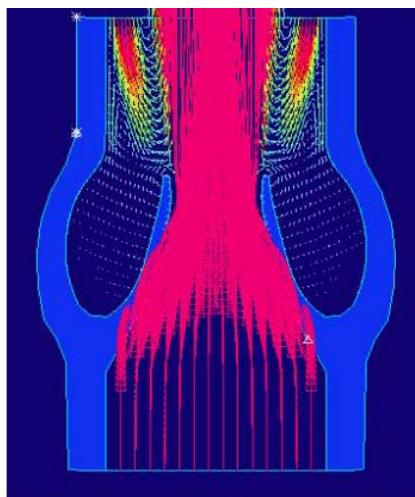
圖二、某複雜曲面實體在 SolidEdge 中之局部放大



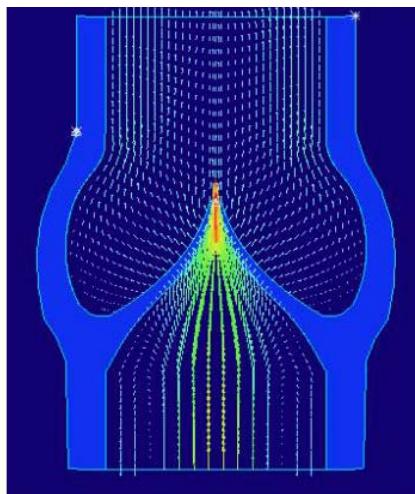
圖三、圖二曲面實體在 ADINA 中以自由六面體
建立網格之結果



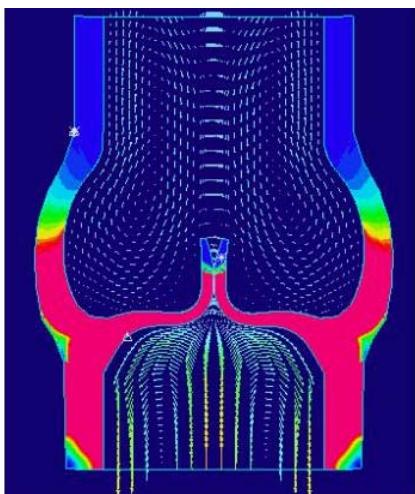
圖四、圖三網格之切開斷面觀察



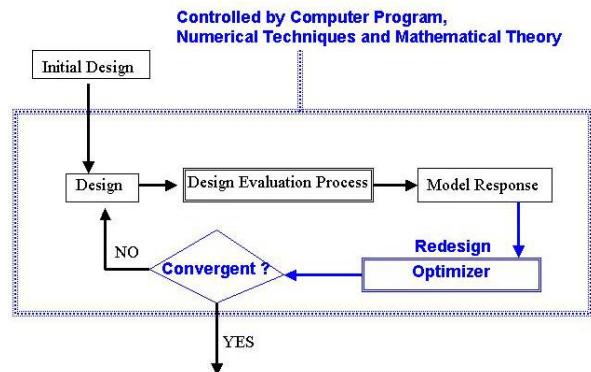
圖五、心臟瓣膜閉索分析:血液流出，瓣膜開啟



圖六、心臟瓣膜閉索分析:血液回流，瓣膜開始閉鎖



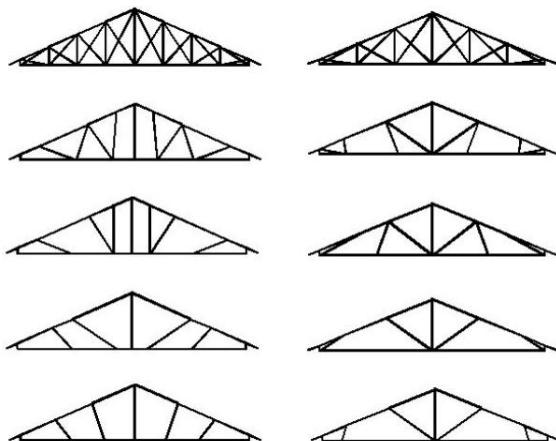
圖七、心臟瓣膜閉索分析:迴流產生，瓣膜完全閉鎖



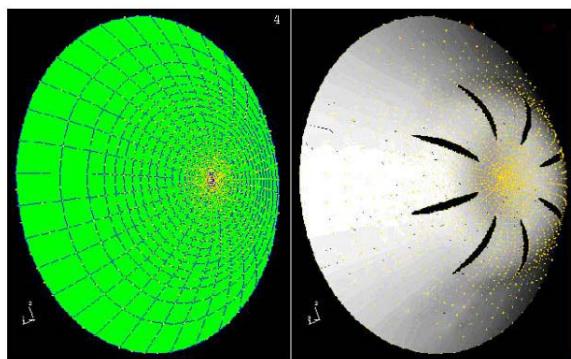
圖八、一般工程設計流程示意圖



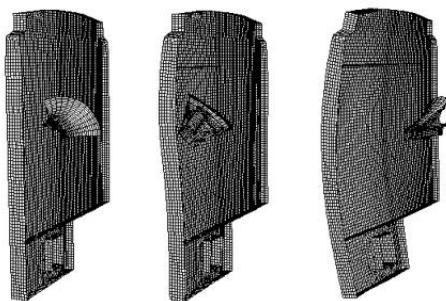
圖九、廠房屋頂結構物於實驗室中測試



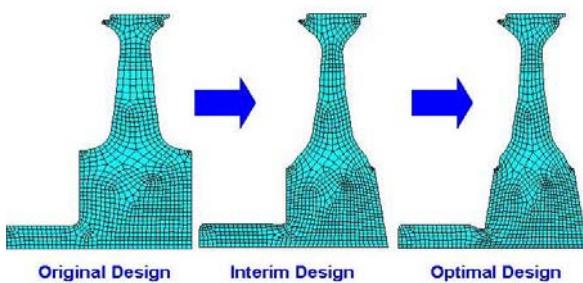
圖十、屋頂結構物最佳化設計演進過程



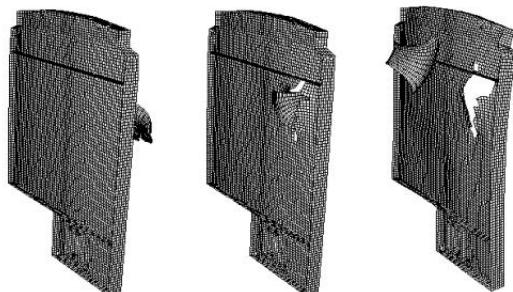
圖十一 以最佳化設計及 CAE 分析計算眼科手術之最佳切割型式



圖十四 防爆結構物經最佳化設計後達到設計目標並減重



圖十二 機械零件之最佳化設計演進過程



圖十三 防爆結構物穿透分析