

迴旋機械之振噪檢測研討會

Part 2

數值最佳化設計在旋轉機械上之應用

2011/06/29

講師簡介 陳申岳博士 (1/2)

- 國立中興大學土木系，美國亞歷桑那州立大學土木工程系結構力學組碩士及博士。於1995年7月進入美國亞歷桑那州立大學博土木工程系結構力學組攻讀博士學位，於1997年12月畢業。專攻結構力學，有限元素法及數值最佳化設計。
- 1998年初至2002年7月於美國Honeywell Engines, Systems & Services鳳凰城分部從事噴設引擎之設計及研發工作，因工作關係每天需使用各類CAE工具（如ANSYS,LS-DYNA,PATRAN,ABAQUS等），分析內容涵蓋全方位結構力學有限元素法分析、熱傳/結構力學重合分析應力、振動、變型、挫屈、非線性及接觸、撞擊、耐撞、掉落、動態全程分析、疲乏、破壞力學、潛變、塑性、流體力學及數值最佳化設計.....等。
- 除精密CAE實務分析及產品除錯外，亦為Honeywell開發全自動最佳化設計之系統程式及流程，解決了多項延宕多年之設計問題。擁有獨立開發之最佳化核心計算程式及部份CAE分析程式。
- 於服務Honeywell期間為該公司成功地建立以CAE從事全引擎爆裂分析技術之虛擬實驗室技術，其模型複雜度含蓋全引擎所有重要零組件，精密度足以準確預測聯結螺絲是否斷裂。此技術可精確預測每次耗資千萬美元的全引擎爆裂測試。基於此技術基礎，於2001年獲美國聯邦航空管理局（FAA）支助主持並主導一項撞擊分析模擬的研究計劃，成員包括Honeywell，美國聯邦航空管理局（FAA），美國太空總署（NASA），史丹佛大學研究中心（SRI）以及亞歷桑那州立大學（ASU）。

講師簡介 陳申岳博士 (2/2)

- 2002年8月獲聘為Pratt & Whitney (United Technology Corporation)之Principal Engineer。因個人家庭因素而放棄返台。2002年8月至2004年8月回國任職虎門科技公司技術研發及顧問服務中心之副總經理，主持工程顧問部門業務及技術建構，成功開拓國際市場及客戶，為開創台灣CAE顧問業之知名且代表性人物。
- 2004年9月起，擔任國立交通大學精密與自動化工程專班研究所兼任助理教授，以及國立中央大學機械系博士生共同指導教授。
- 2005年起，創立歲昊科技並擔任歲昊科技總經理。2006年8月，發佈商用設計最佳化軟體SmartDO，隨即受國內外產學界熱烈討論並採用。
- 曾擔任AIAA Journal及International Journal of Mechanics of Structures and Machines審稿員。著有學術及技術論文二十餘篇，擁有兩項美國專利，一項台灣專利及一項中國大陸專利。至2011年4月止，共累積超過十七年之CAE實務工作經驗。
- 除航太界工作經驗外，亦曾任鋼構廠總經理室一級技術專員，及國道高速公路局標段主辦工程師。專長及經驗涵蓋結構，流體及熱傳，除了在CAE領域有豐富的實務經驗，廣為國際專業人士熟知，在最佳化設計領域並有多篇革命性的論文及技術突破。
- 自2005至2010年止擔任歲昊科技總經理期間，共主導近百件CAE技術顧問案，橫跨機械、航太、國防、電子、醫藥、核能、土木、電子、民生消費等領域。曾任台灣工業技術研究院機械所技術顧問。目前並兼擔台灣原子能委員會核能研究所及環隆電器之技術顧問。

Shen-Yeh Chen, Ph.D.
S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
Tel :Mobile : 886-937-485-842
©Copyright. All Rights Reserved

數值最佳化之基本觀念

The Basics of Numerical Optimization

甚麼是設計自動化與數值最佳化

基本概念

- 簡單地說，我們希望用系統性的方法，使設計的行為變得更快速，更容易預測，更容易成功，更容易掌控且共自動化
- 數值自動化，就是把設計問題，設法以通用的數學模式來描述，然後以系統性的方法將此數學模式求解，進而達到設計自動化的目標
- 透過數值最佳，設計問題被轉變成數學問題，而不再只是經驗，心理及藝術的交織行為



甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

人類摸索的過程與歷史

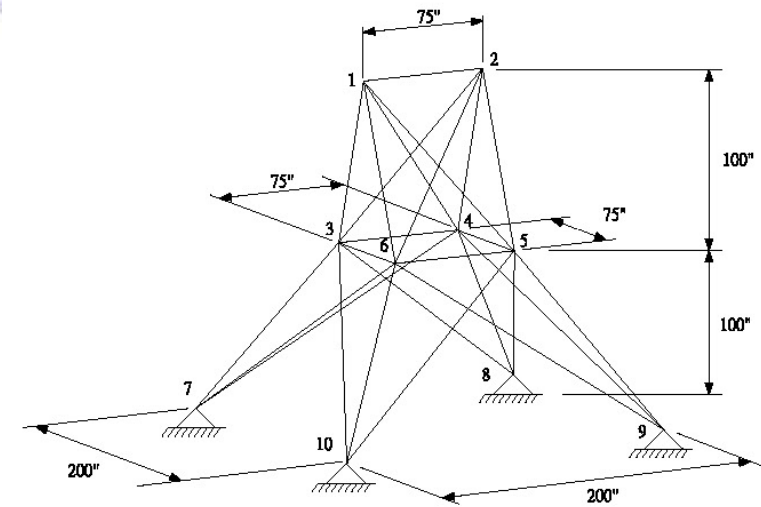
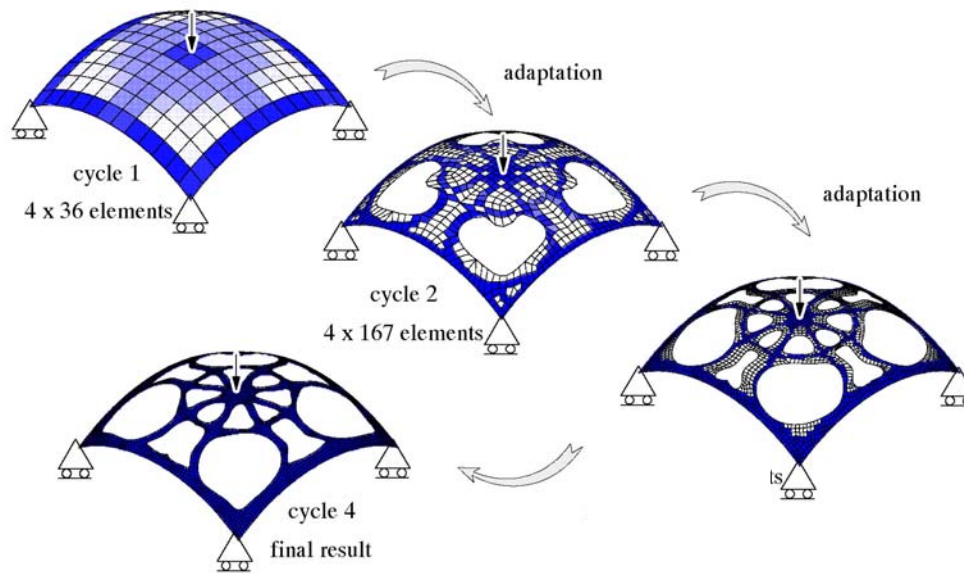
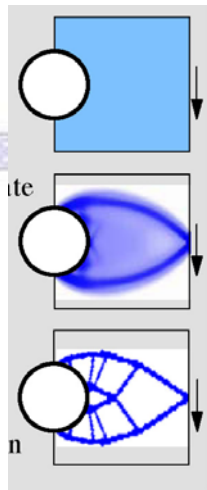
- 首先找出所有設計問題的共同模式與特色
- 接著針對這些特色建立起一般性的通用數學模式
- 開發出求解此數學模式的演算法
- 開發執行演算法的電腦程式
- 將電腦程式與CAE分析程式組合
- 真對特定產業及產品, 將系統客制化, 達到“單鍵設計”(push-button design)的目的



甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

人類摸索的過程與歷史

- 早在1638年，將設計問題數學化的想法已萌芽且付諸實現
- 1904年，Mitchell即成功地以數學方法，求出特定結構物的最經濟設計，此被稱作為Mitchell Structure
- 1970年代，NASA已能使用電腦作大型結構物的自動最佳化設計運算

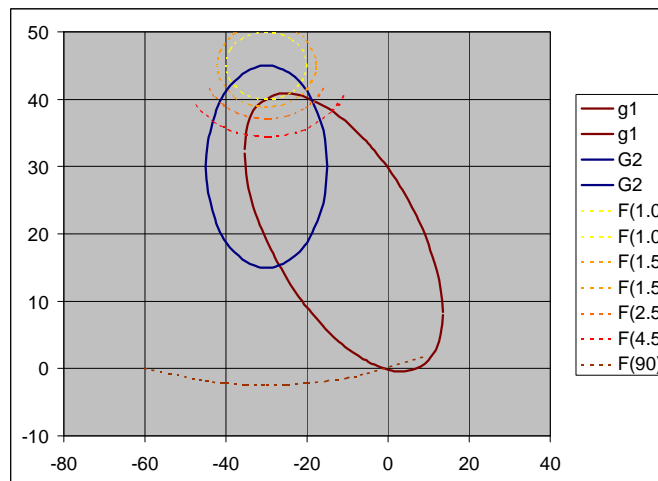


Shen-Yeh Chen, Ph.D.
 S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
 Tel :Mobile : 886-937-485-842
 ©Copyright. All Rights Reserved

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

人類摸索的過程與歷史

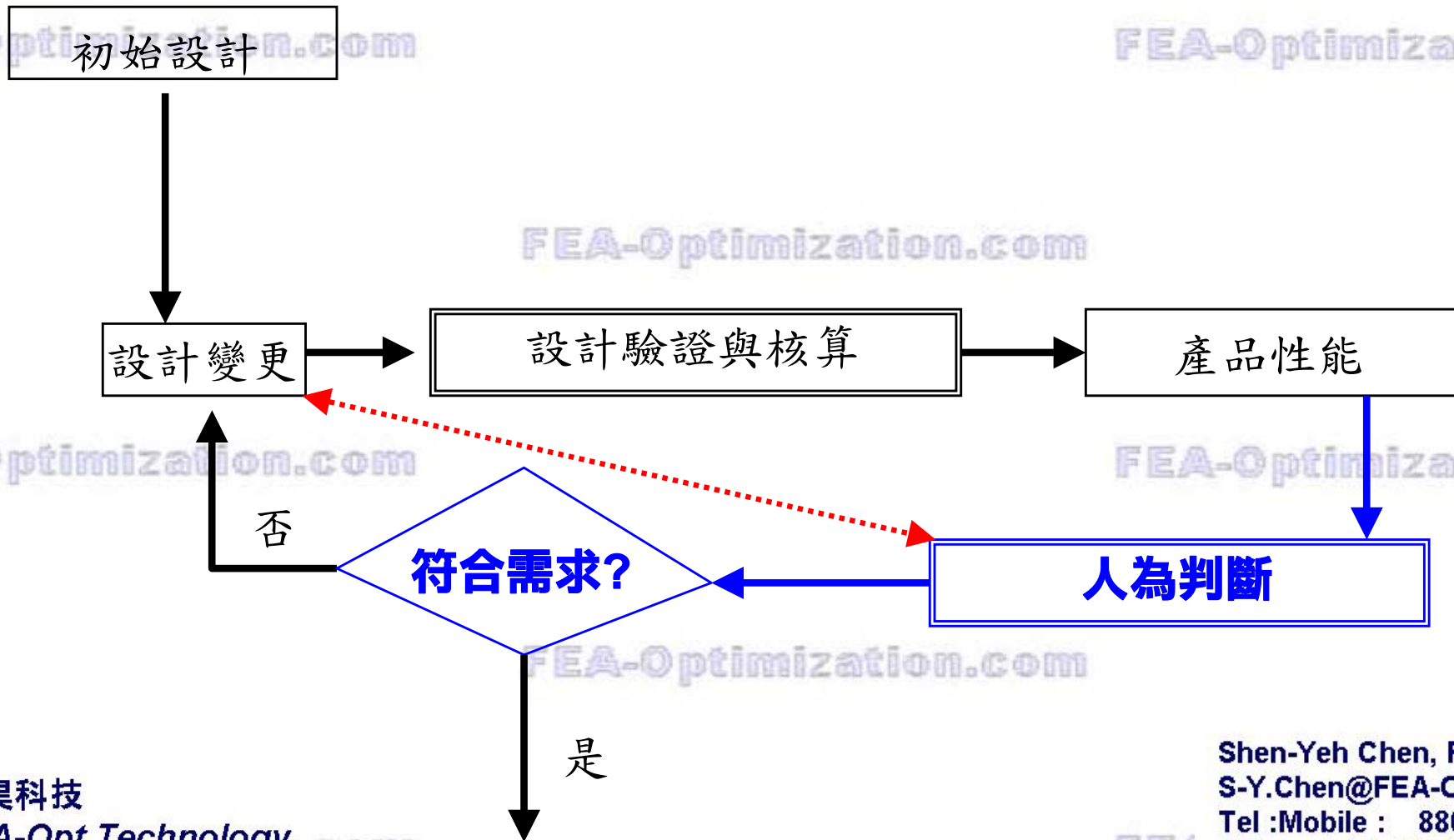
- 我們發現，許多的思考行為都可以套用類似的數學模式與理論。也就是說，數值最佳化與設計自動化的原理，事實上可以套用在許多的行為上
 - 設計，排程，決策，人工智慧
 - 經濟行為(remember the movie “A Beautiful Mind” about John Nash’s research and achievement)
 - 生物演化(The golden ration existing in the nature).



甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

人類摸索的過程與歷史

- 一般的設計通則



甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

人類摸索的過程與歷史

- 目前最通用的數學模式: Nonlinear Programming (NLP)

find $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_{NDV}\}$

Design Variables

to minimize $f(\mathbf{x})$

Objective Function

subjected to $G_i(\mathbf{x}) = \frac{g_i(\mathbf{x})}{g_i^0} - 1 \leq 0 \quad i = 1, \dots, NINEQC$

Inequality Constraints

$H_j(\mathbf{x}) = \frac{h_j(\mathbf{x})}{h_j^0} - 1 = 0 \quad j = 1, \dots, NEQC$

Equality Constraints

$x_k^L \leq x_k \leq x_k^U \quad k = 1, \dots, NDV$

Lower/Upper Bounds

- Analytical condition exist for local minimum (Kuhn-Tucker Condition)
- 數值最佳化設計, 就是求解上述數學式

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

人類摸索的過程與歷史

- Kuhn-Tucker Condition

find \mathbf{x}

to minimize $f(\mathbf{x})$

subjected to $g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, \dots, NINEQC$

$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, NEQC$

- The necessary condition for the optimum is

$$g_i(\mathbf{x}^*) \leq 0; \quad h_j(\mathbf{x}^*) = 0$$

$$\lambda_i \cdot g_i(\mathbf{x}^*) = 0; \quad \lambda_i \geq 0$$

$$\nabla f(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^{NINEQC} \lambda_i \cdot g_i(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^{NEQC} \lambda_j \cdot h_j(\mathbf{x}^*) = 0 \quad \lambda_i \geq 0$$

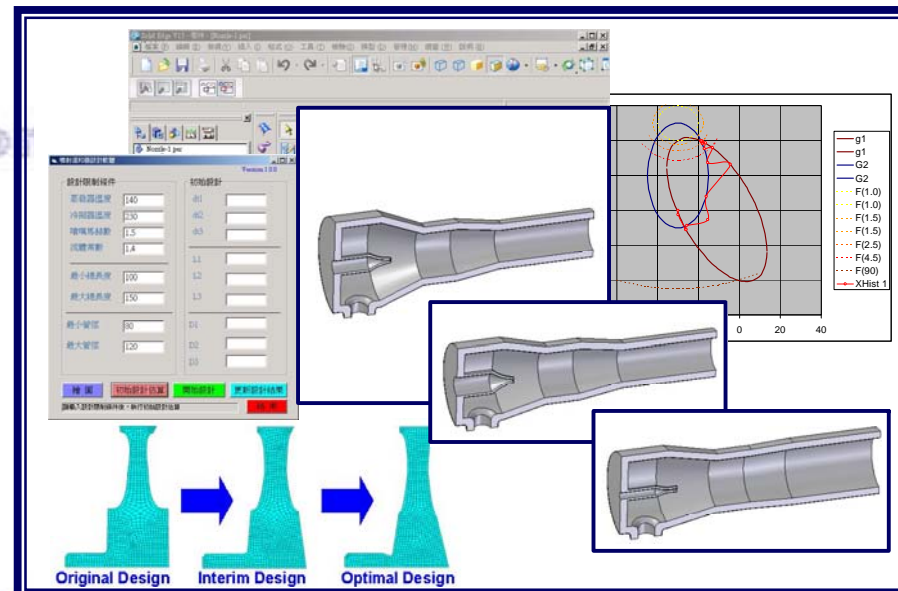
甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

設計實務上的意義

FEA-Optimization.com

- 在限制條件下,讓設計達到最佳性能與狀態
 - 將結構儘量減重,且維持在一定強度與安全以上
 - 將零件用量儘量減少,且維持在一定強度以上
 - 將性能儘可能提高,且成本限制在一定範圍之下
 - 將性能儘可能提高,且產品大小必需維持在一定範圍內

FEA-Optimization.com



FEA-Optimization.com

Shen-Yeh Chen, Ph.D.
 S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
 Tel : Mobile : 886-937-485-842
 ©Copyright. All Rights Reserved

FEA

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

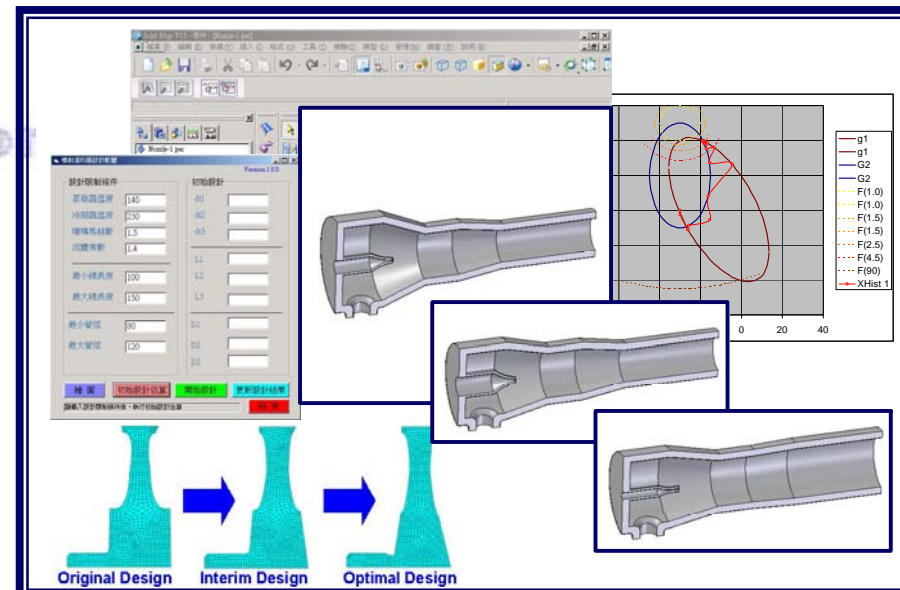
設計實務上的意義

FEA-Optimization.com

- 物理及工程意義
 - 截長補短
 - 不適當的過度設計結構, 並不會比較安全
 - 所謂最佳化, 同時包含成本與安全考量

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com



FEA-Optimization.com

Shen-Yeh Chen, Ph.D.
 S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
 Tel : Mobile : 886-937-485-842
 ©Copyright. All Rights Reserved

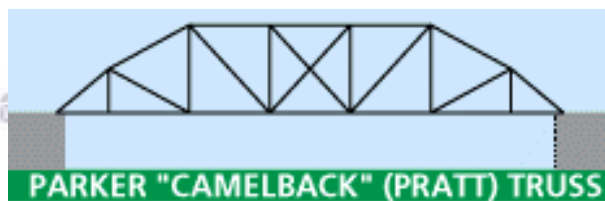
FEA

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

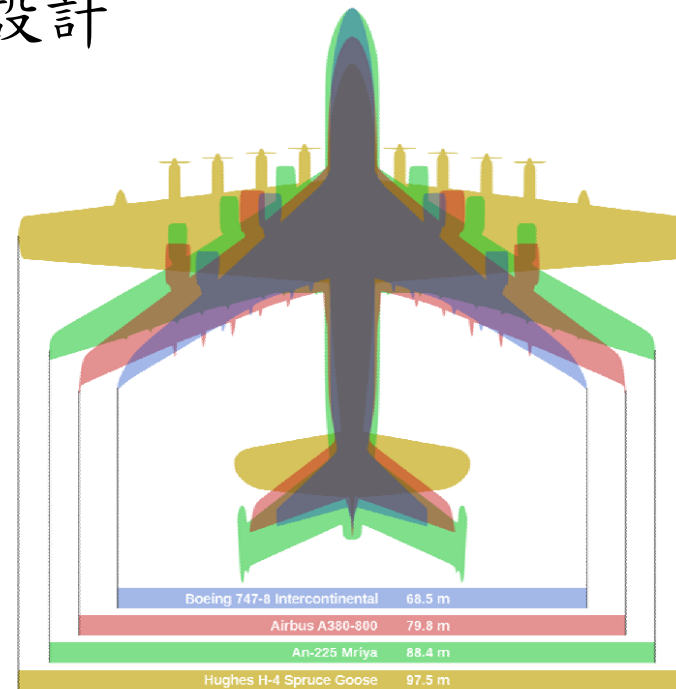
設計實務上的意義

FEA-Optimization.com

- 歷史證明，所有工程產品都在往最佳化的目標前進－更輕，更節省空間，卻更安全
- 自1970年以來，我們累積人類的工程經驗與科學技術，以數值分析與數學理論研究其特性，寫成電腦程式。過去數十年的工程演化，可以數小時至數日之內完成－數值最佳化設計



橋樑設計之演化



飛機設計之演化

Shen-Yeh Chen, Ph.D.

S-Y.Chen@FEA-Optimization.com

Tel : Mobile : 886-937-485-842

©Copyright. All Rights Reserved

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

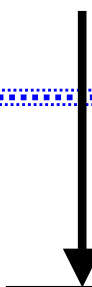
簡單原理

SmartDO+

A Smart Design Optimization System

由電腦程式, 數值技巧及數學理論控制

初始設計



設計變更



CAE, FEA, FVM...
設計驗證與核算



產品性能



設計方向探討
最佳化計算核心



否



是

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

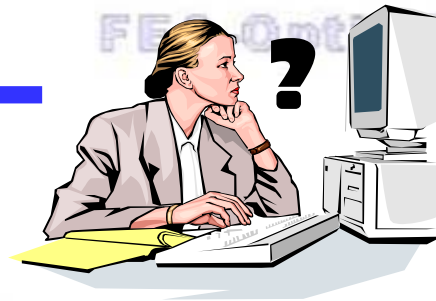
我們如何以經驗進行產品設計

DV1=0.23
DV2=0.54
DV3=1.21



成本 性能

限制條件



DV1=0.41
DV2=0.20
DV3=2.16



成本 性能

限制條件



Shen-Yeh Chen, Ph.D.
S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
Tel : Mobile : 886-937-485-842
©Copyright. All Rights Reserved

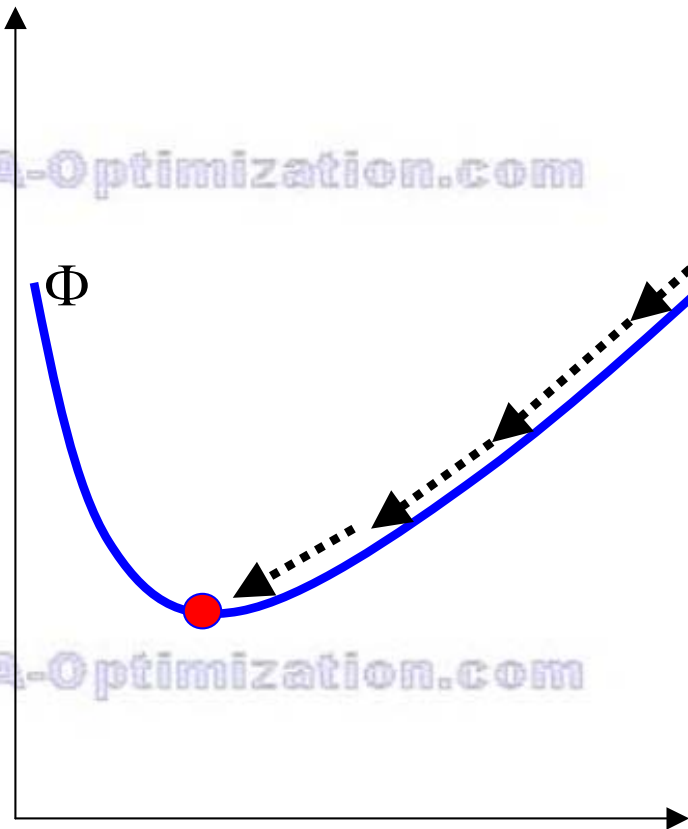
甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

電腦程式如何以演算法進行產品設計

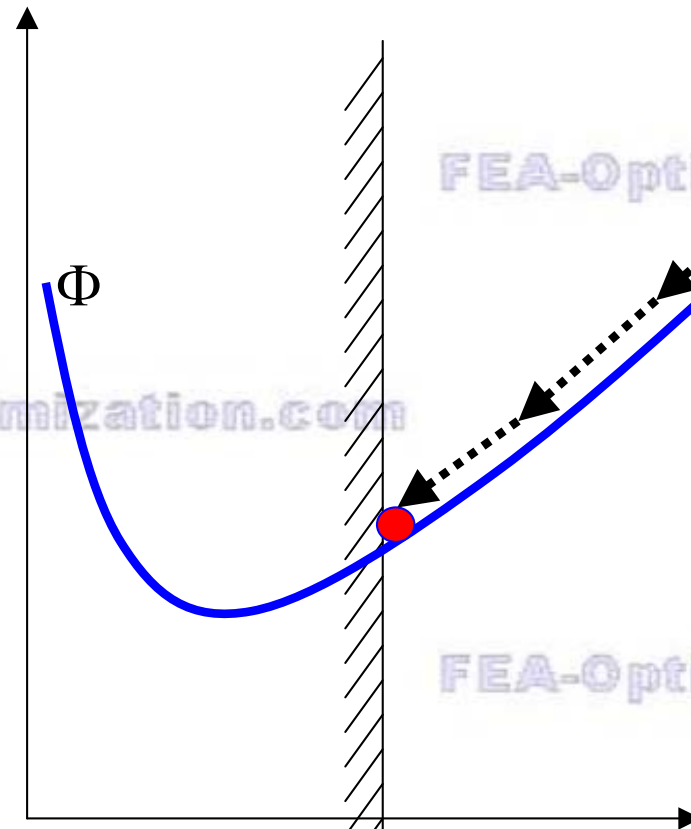


甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

數學上如何求得其解(1)



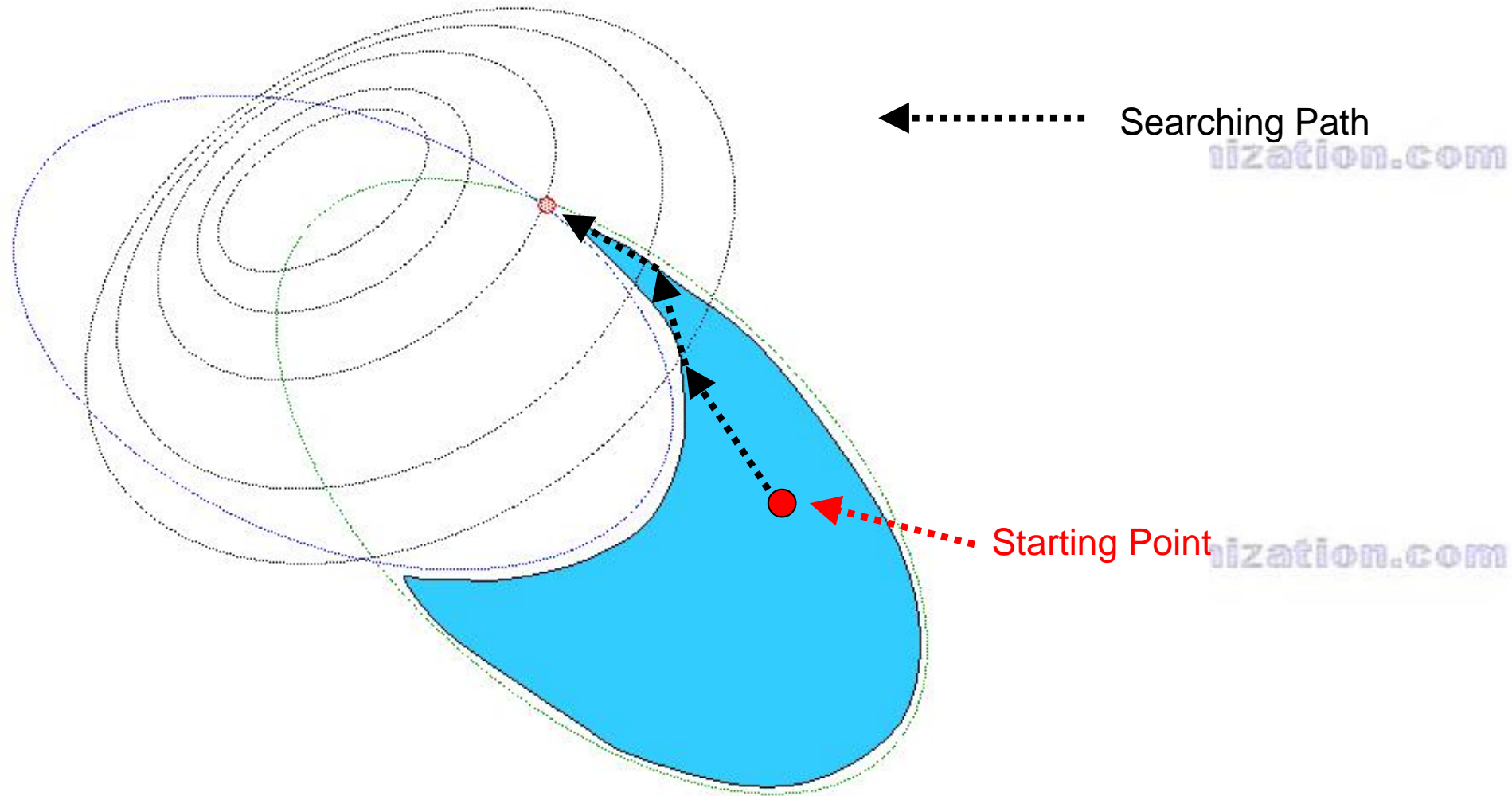
No Constraint



With Constraint

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

數學上如何求得其解(2)



FEA-Opti

FEA-Opti

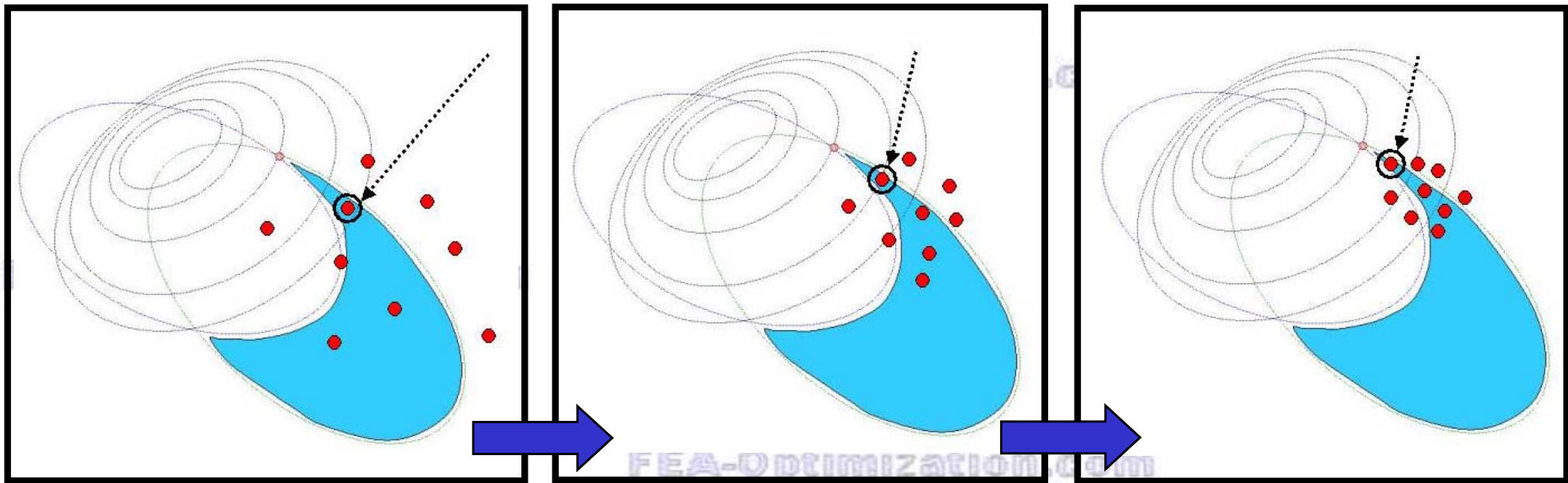
ization.com

ization.com

甚麼是數值最佳化設計與設計自動化

數學上如何求得其解(3)

- Temporary Optimum
- Testing Points



為甚麼使用數值最佳化設計技術

- 一般而言,我們必需同時兼顧成本及其它許多考量,而這些需求通常都是互相抵觸的
 - 以結構設計為例,我們一方面希望強度越高越好,一方面又希望用料越省越好
 - 以空氣動力零組件設計為例(如壓縮機葉片或飛機翼),通常我們希望葉片越薄越好以提高空氣動力效能,但這卻會使結構強度過於薄弱
 - 以轉子動力為例,轉子重量與勁度必需達到微妙的平衡,否則將會很容易在未預期到的轉速激發振動
- 解決這些互相抵觸的複雜問題,通常不是人腦所能負擔

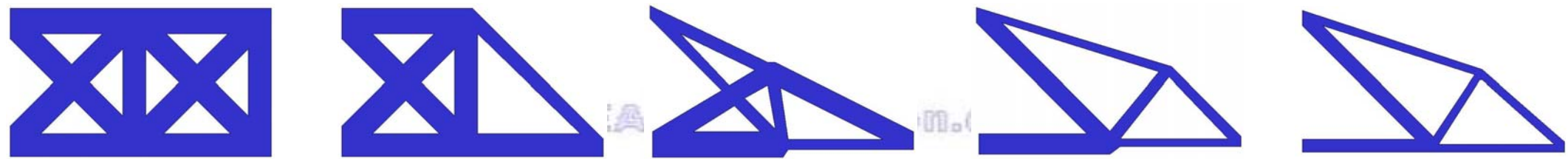
FEA-Optimization.com

為甚麼使用數值最佳化設計技術

- Numerical Optimization不是暴力法
- Numerical Optimization一般用嚴謹之演算法,用更短時間求得更好結果
 - 假設一共有10個設計變數,一個設計變數有3種選擇,那麼一共需要作約60,000運算
 - 如果每次運算費時1分鐘,共需運算40天
 - Numerical Optimization之先進技術運算,約只需花費200~300次運算以求得最佳化設計
- 我們的實務經驗證明, Numerical Optimization總是比人工設計之結果優異10%~20%以上,甚至經常優異達40%~50%以上
- Numerical Optimization通常比其它軟體產生更好的結果。

工程最佳化設計的三個基本概念變數： 參數, 外形及拓樸

The Three Basic Conceptual Variables of Engineering Optimization : Sizing, Shaping and Topology



最佳化設計,到底在設計甚麼?

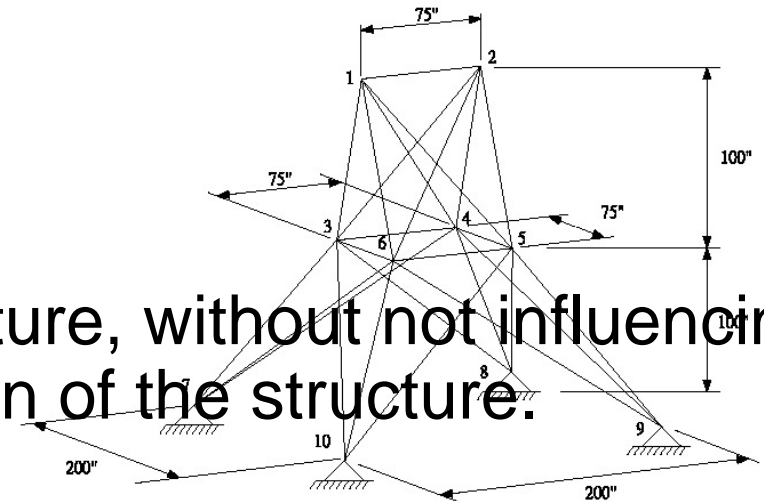
- 在數值最佳化設計中,我們藉由改變設計的參數來達到設計目標並加以優化
- 在工程應用上,最常見的三個變數概念
 - 參數(Sizing)
 - 外形(Shaping)
 - 拓樸(Topology)

What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- 事實上並沒有很明確的定義來區分參數,外形及拓樸設計變數的差別,但是以數數值最佳化設計而言,通常可以這樣區別

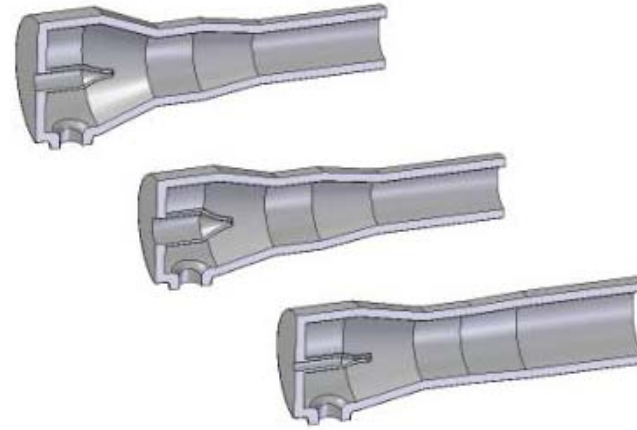
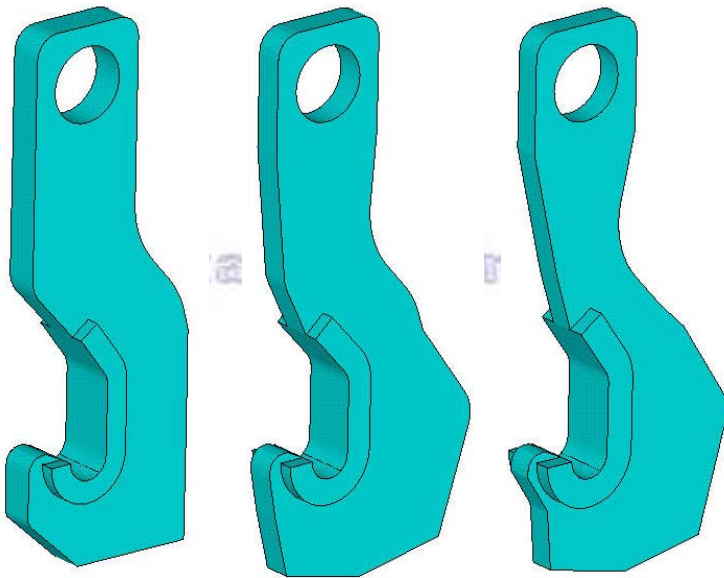
• Sizing –

- changing the parameters of the structure, without not influencing the geometry, shape and configuration of the structure.
 - Thickness of the shell element
 - area of a truss member
 - cross-sectional dimension of a beam member
 - Variables in the analytical solution



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Shaping** –
 - changing the parameters of the structure, which will alert geometry, shape and configuration of the structure.
 - However, the shaping is limited in the cases that the **topology** of the structures is not changed



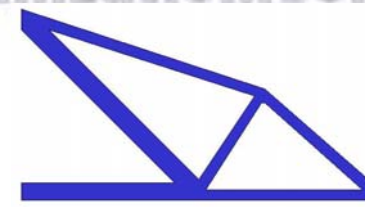
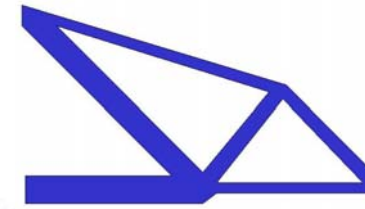
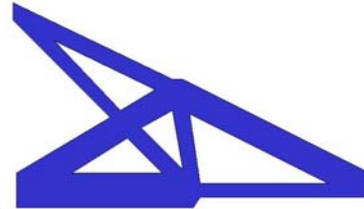
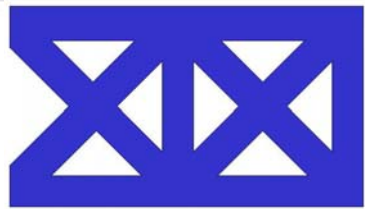
What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology –**

- To understand topology optimization, it is necessary to understand the term “topology”.

- Topology is very conceptual. However, for our case, it is all about two things (so far)

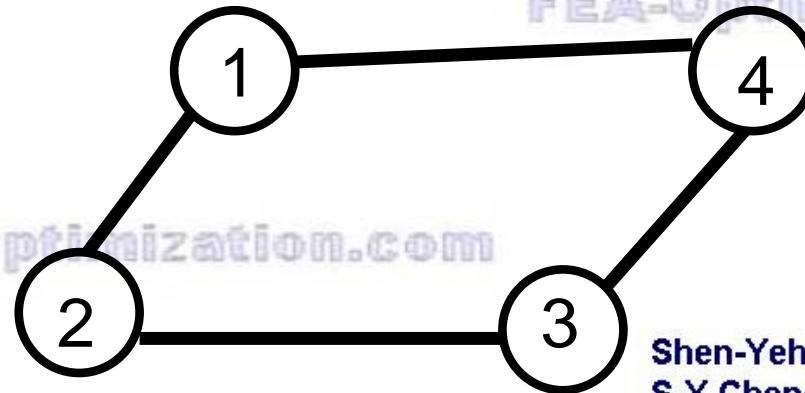
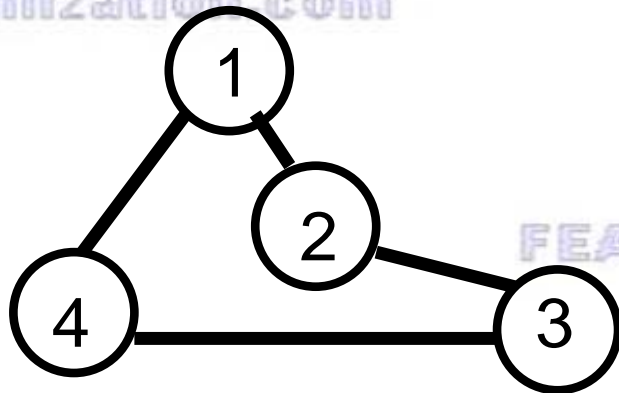
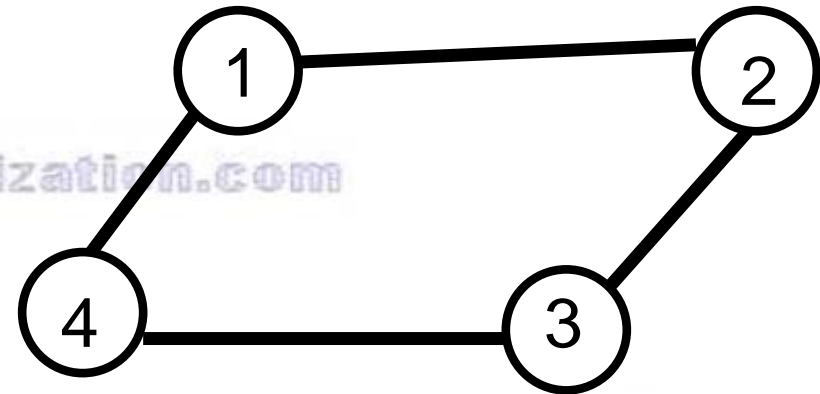
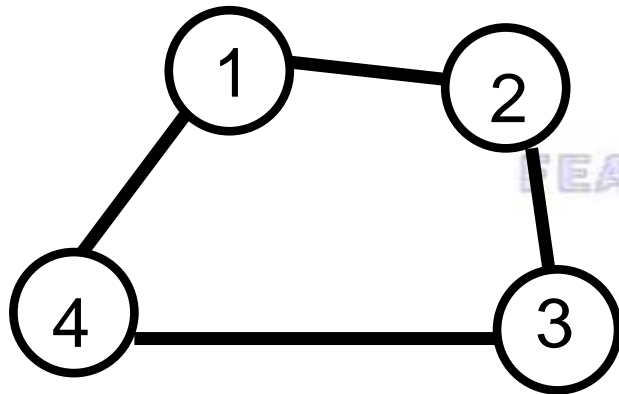
- Connectivity
- Void/Holes



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Connectivity**

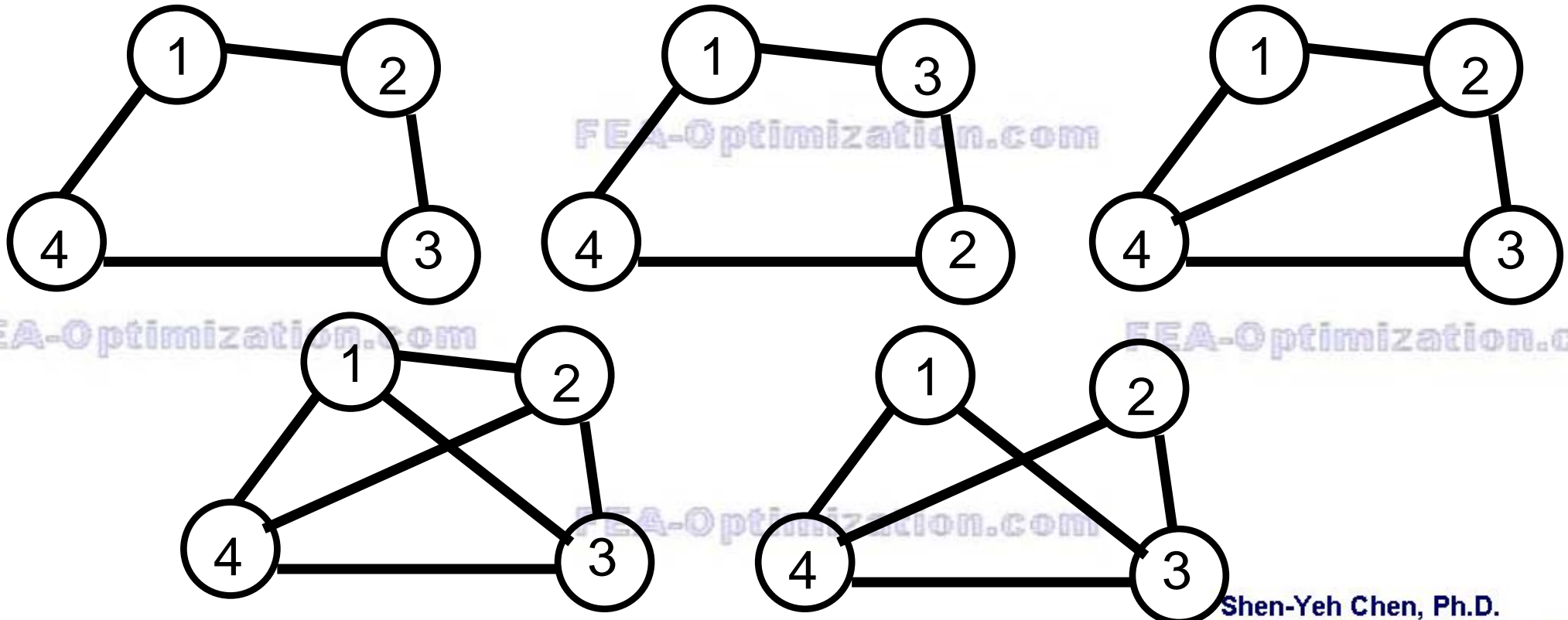
- The following structures/network has the same Topology of Connectivity



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Connectivity**

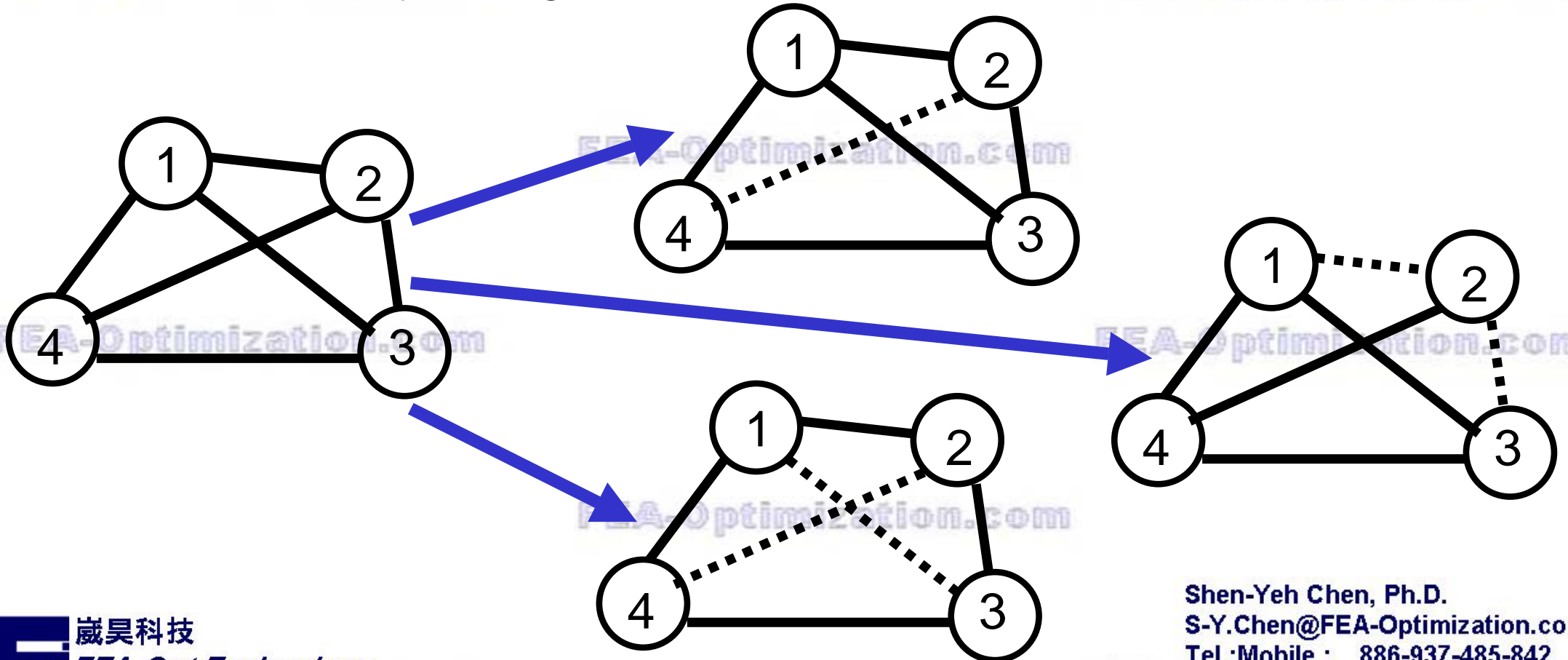
- The following structures/network has the different Topology of Connectivity



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Connectivity**

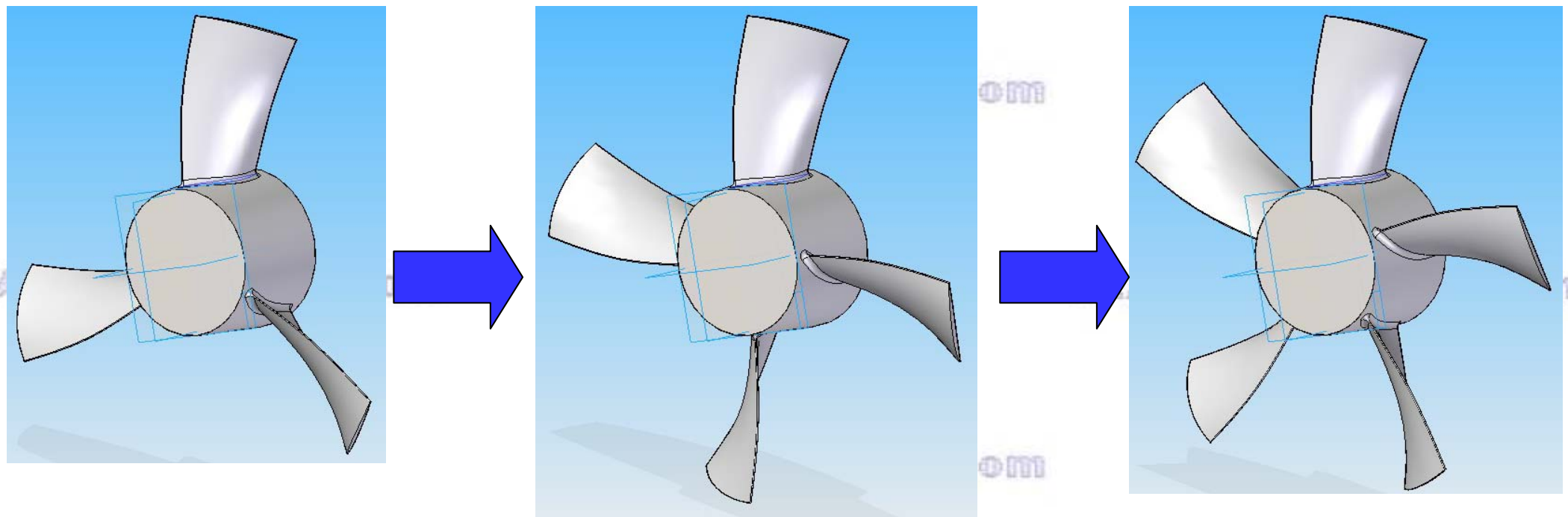
- The design domain for topology of connectivity can sometimes be defined by the “ground structure”



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Connectivity**

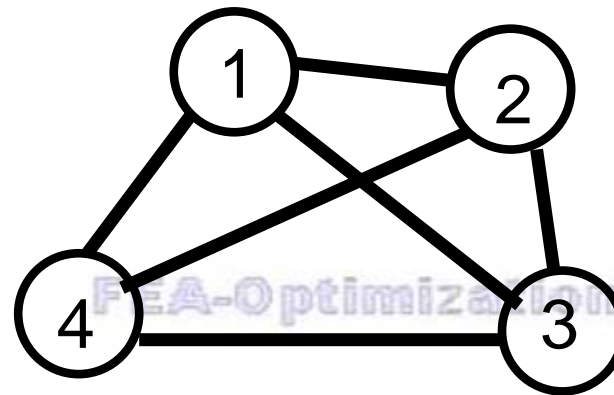
- The design domain for topology of connectivity can also be defined by the Boolean operation of geometry



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Connectivity**

- In the “ground structure” with n nodes, we establish the ground structure by connecting every two nodes. This will create a structure with $m = (n * (n - 1) / 2)$ connecting lines
- If each line is associated with one binary DV (0 or 1) to represent its elimination or existence, there are totally 2^m possible combination of topology for this group structure.

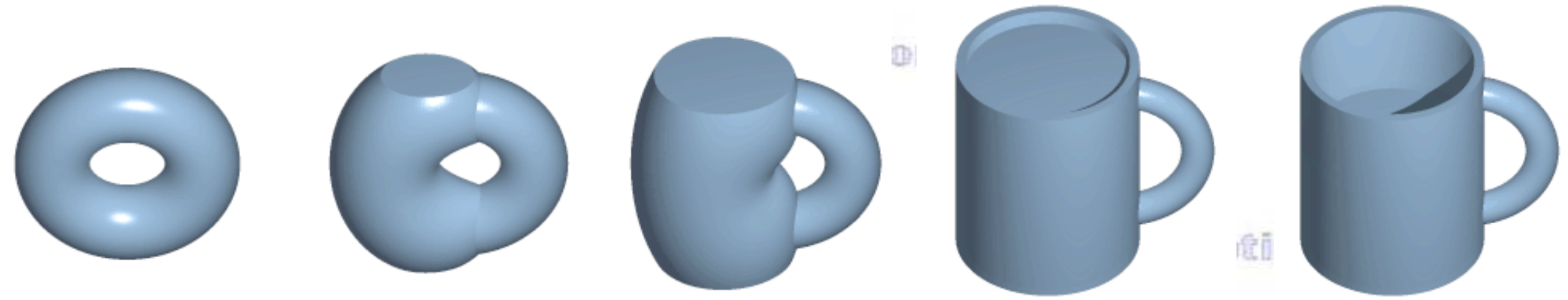


What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Voids/Holes**

- The following geometry has the same topology of voids

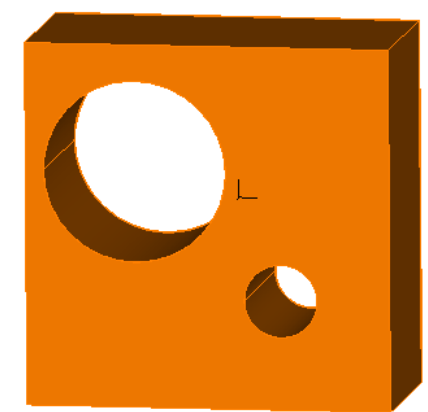
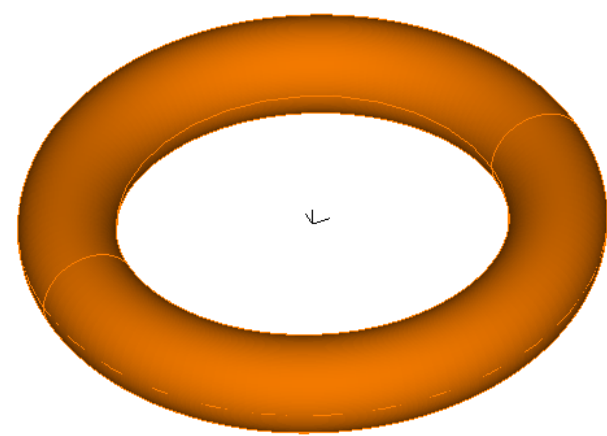
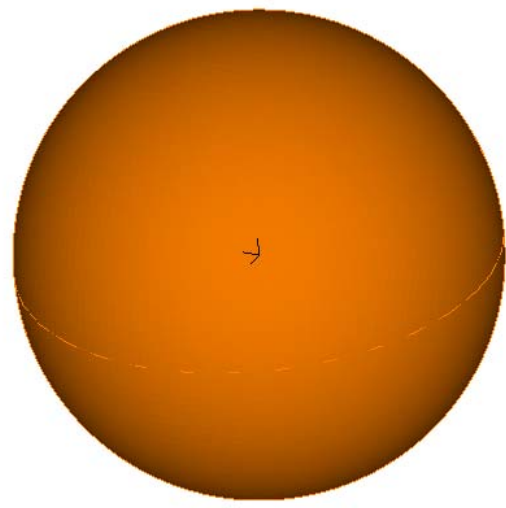
- (pictures from www.wikipedia.org)



What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Voids/Holes**

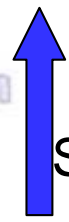
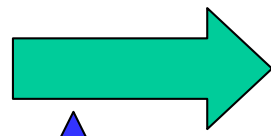
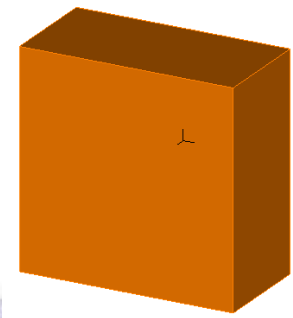
- The following geometry has the different topology of voids



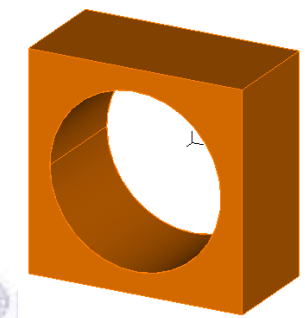
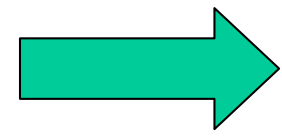
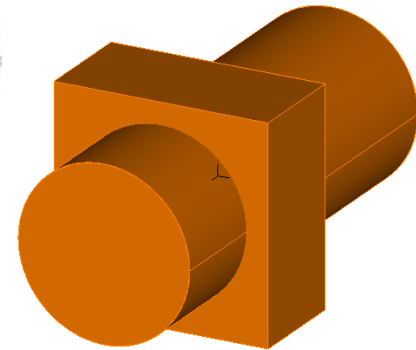
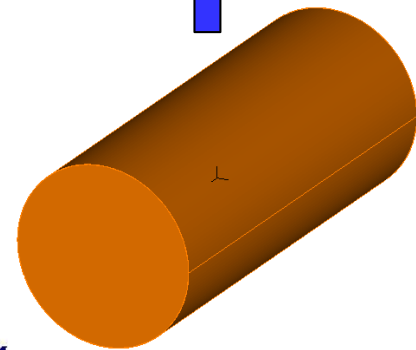
What Is Structural Sizing, Shaping And Topology Optimization

- **Topology of Voids/Holes**

- The design domain for topology of voids and holes can sometimes be defined by Boolean operations of geometry



Subtract



FEA-Optimization.com

實例探討

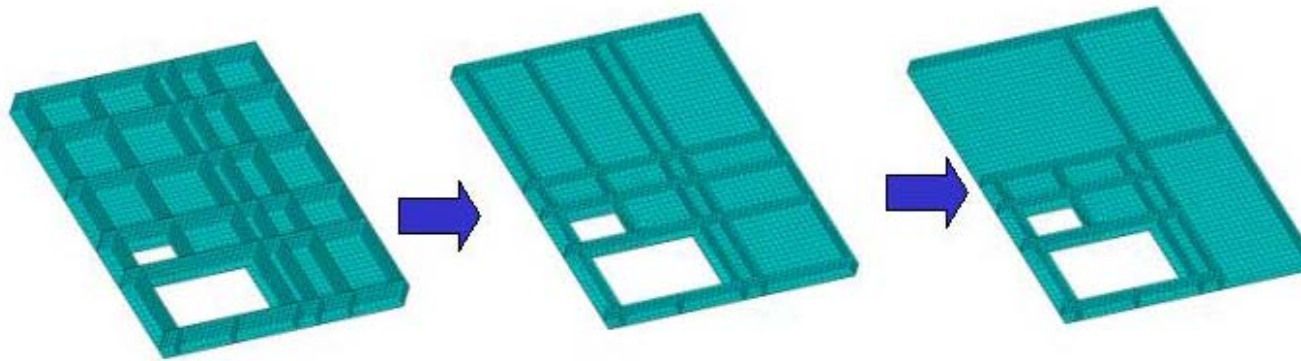
Real-World Examples

FEA-Optimization.com

實例 (1)

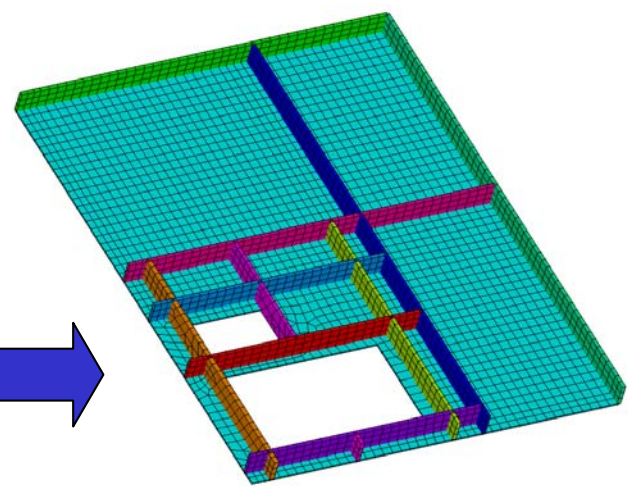
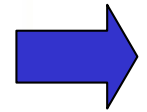
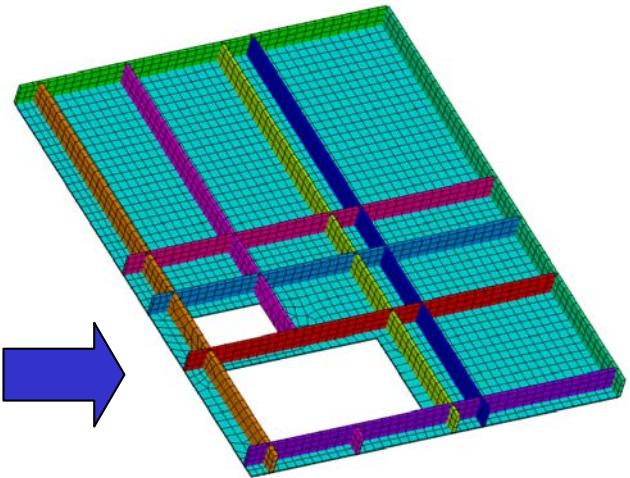
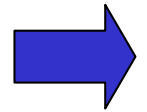
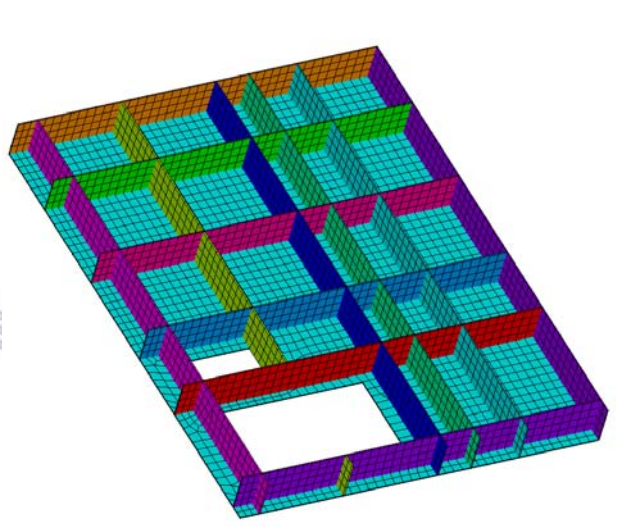
航空器載重板最佳化設計

- 航空器上之載重板, 需要重量極輕, 但維持一定之強度與勁度
- 設計限制包括製造, 材料, 成本, 空間與尺寸之考量
- 以 numerical optimization 進行尺寸, 形狀及拓樸同步最佳化, 成功減重並降低成本近40%, 並達到設計要求.



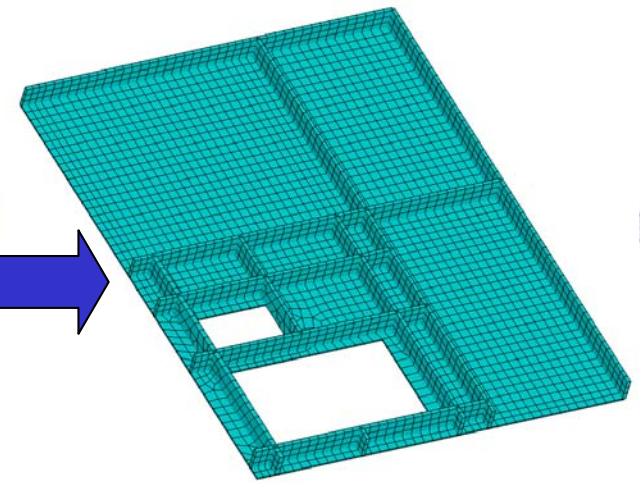
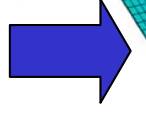
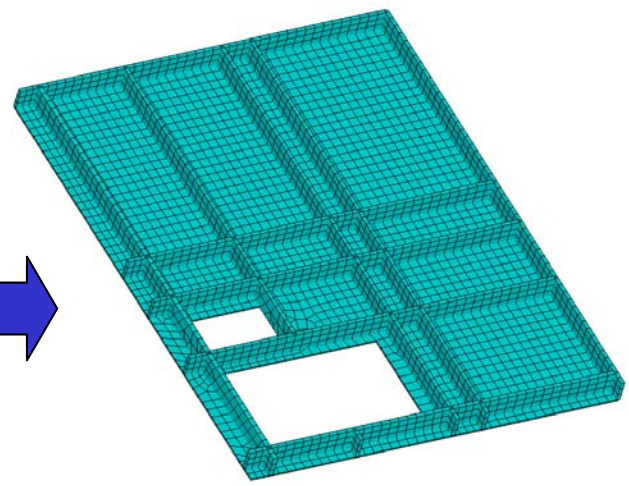
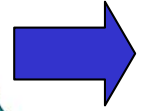
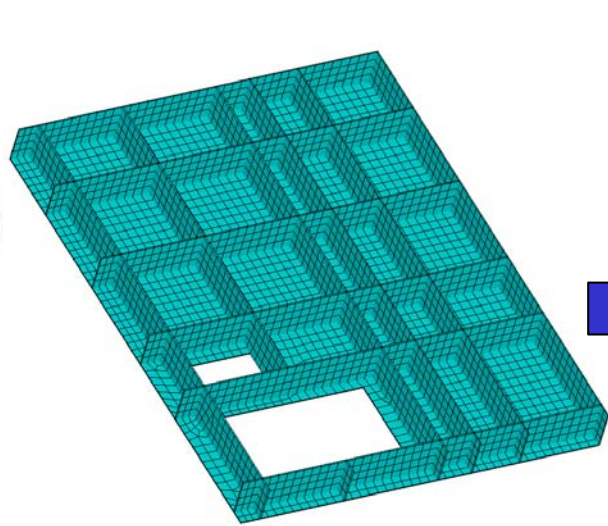
-

FE



FEA-Optimization.com

FEA-O

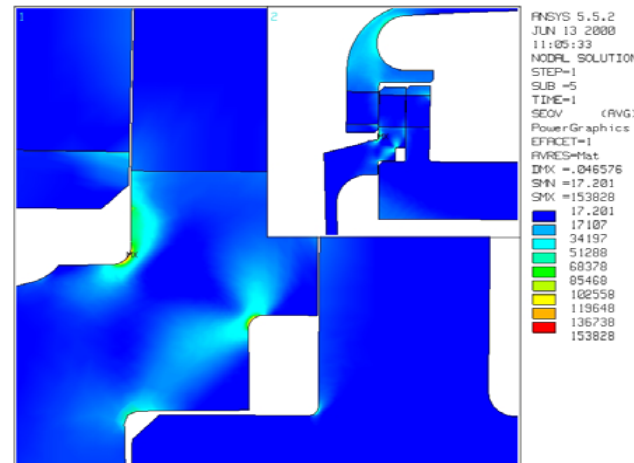
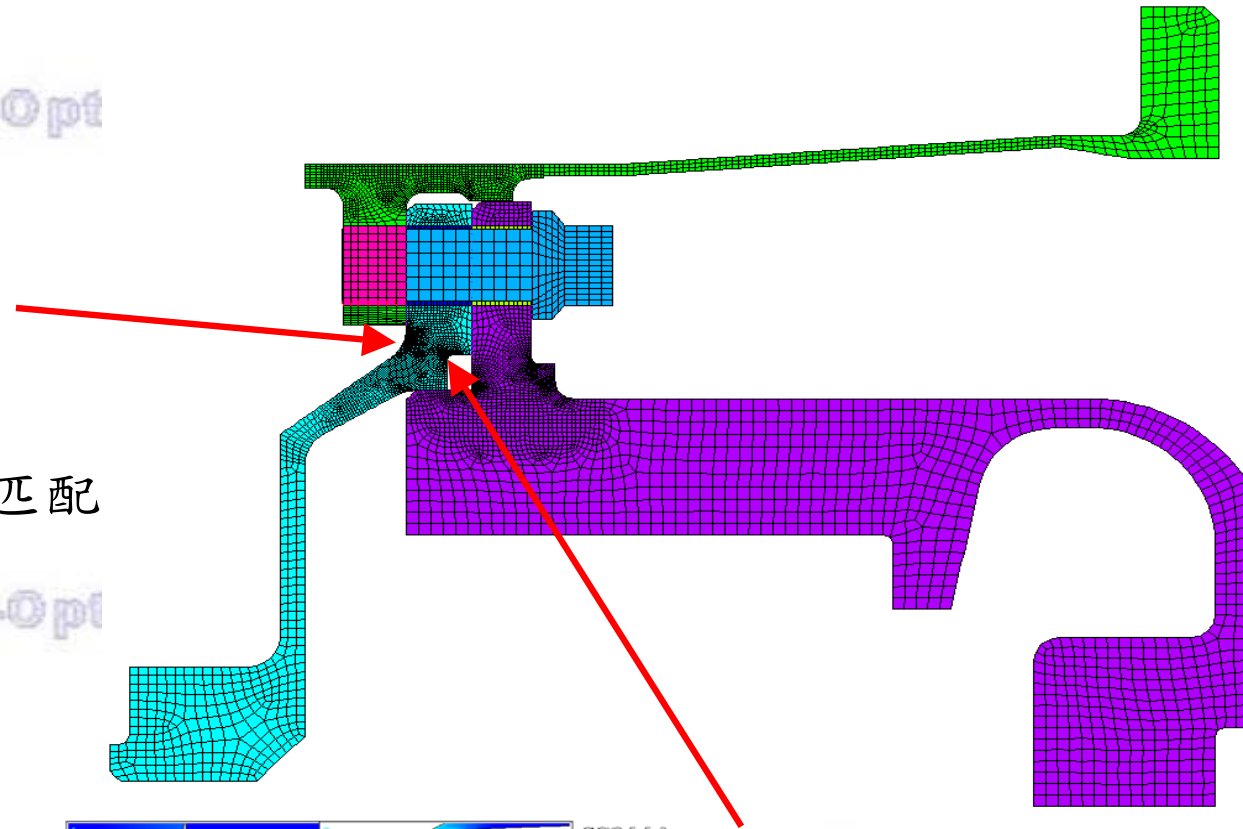


FEA

實例 (2)

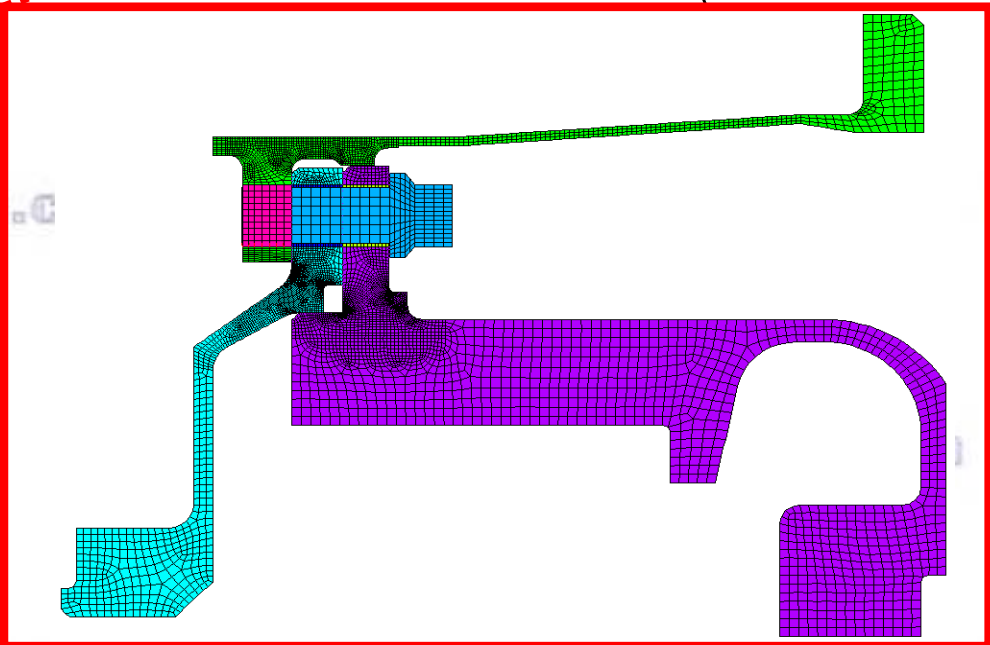
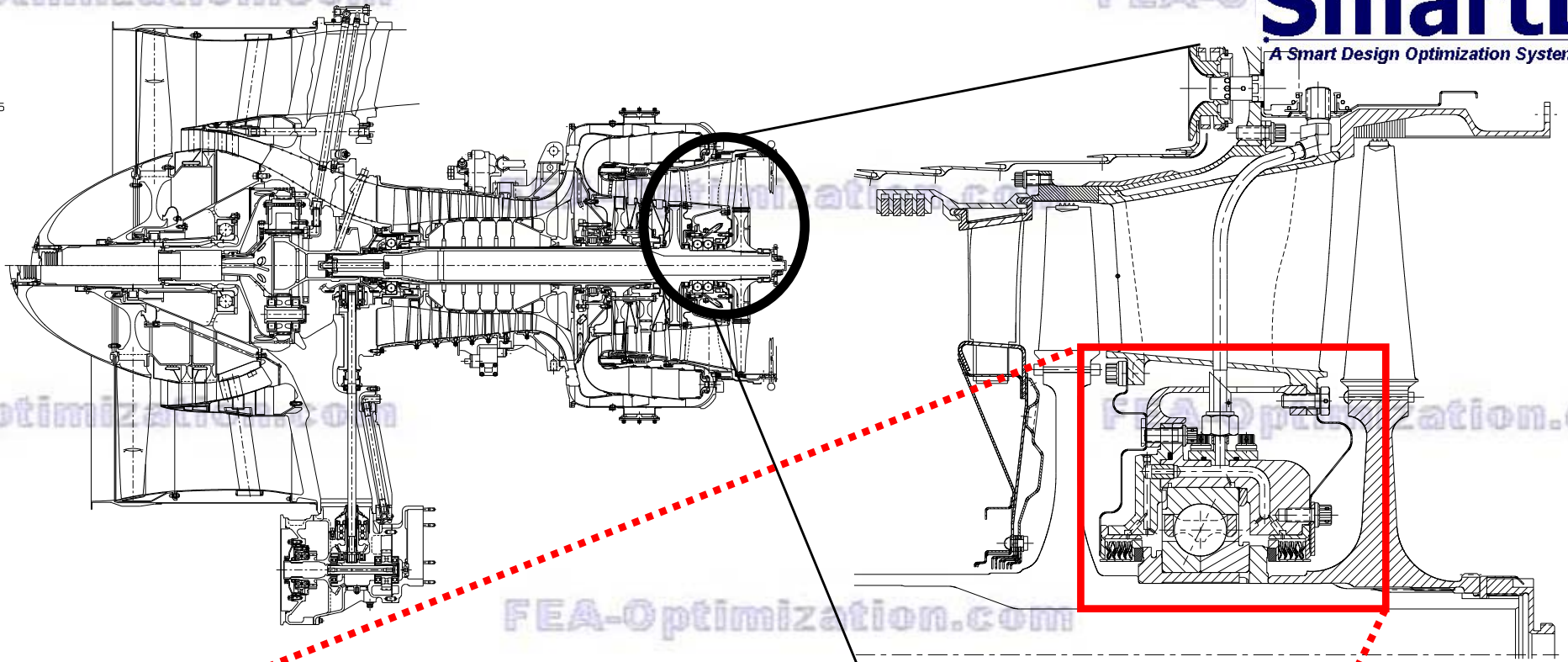
突緣及組合件強度設計

- 目標
 - 將強度儘量增加。
 - 重量不可增加。
 - 強度及耐久度必需符合要求。
 - 各零件間之組合界面必需戶相匹配
 - 易於製造。
- 設計參數及結果
 - 突緣厚度及零組件型狀。
- 成果
 - 解決長期無法達到的設計目標。
 - 強度增加30%。
 - 重量不變。



ALF502-R5

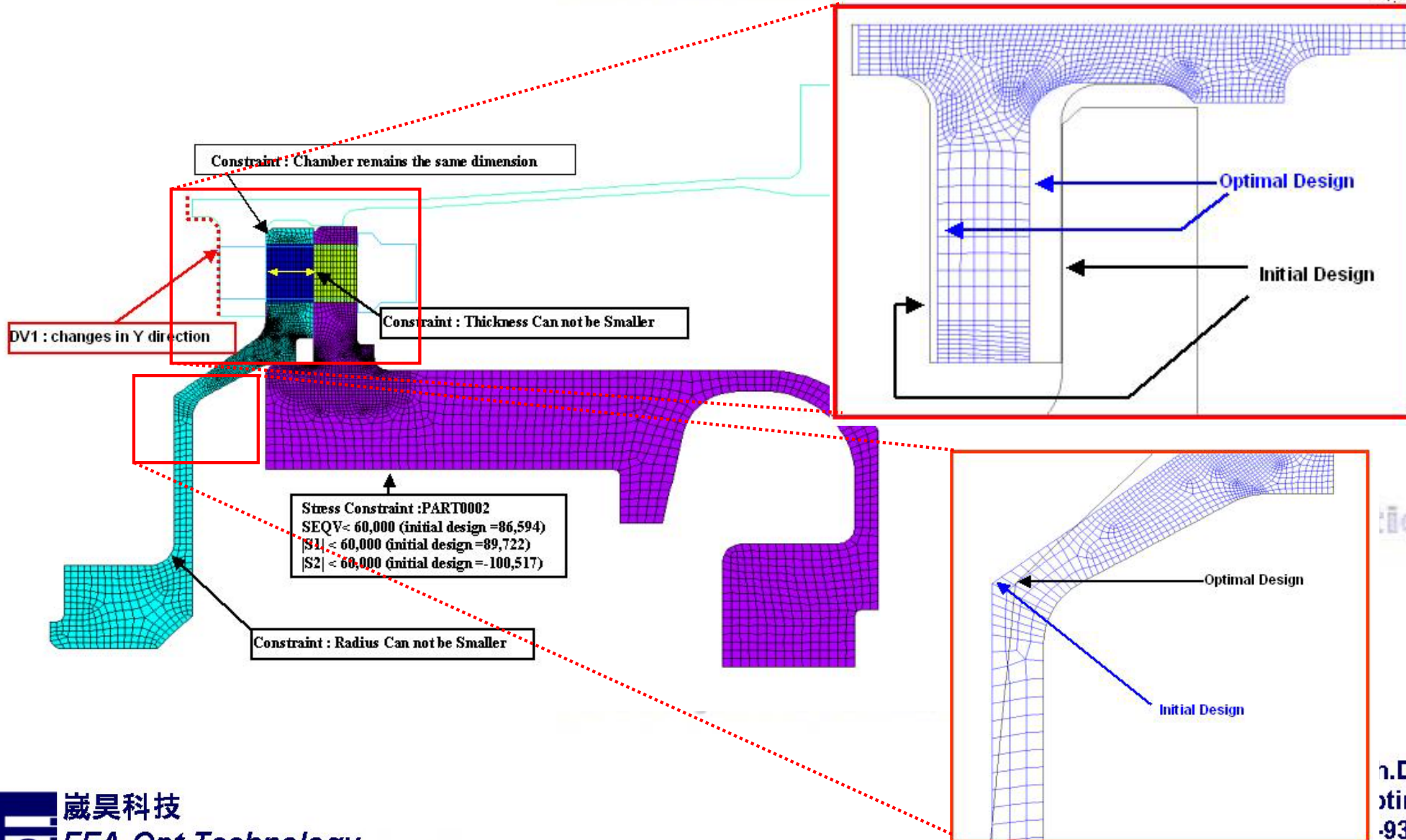
LF507-1F



Shen-Yeh Chen, Ph.D.
 S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
 Tel :Mobile : 886-937-485-842
 ©Copyright. All Rights Reserved

實例 (2) 突緣及組合件強度設計

FEA-Optimization.com



n.com

ion.com

n.D.
timization.com
-937-485-842

實例 (3)

轉子減重設計

FEA-Optimization.com

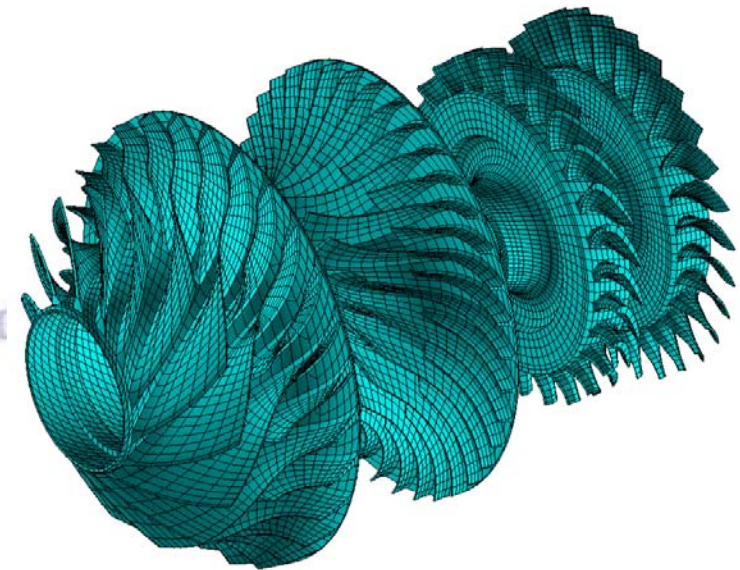
- 目標
 - 將重量減到最小。
 - 強度, 穩定度及振動性能必需符合要求。
 - 易於製造。
- 設計參數
 - 斷面型狀(曲線控制點之參數)。
- 成果: 全自動化專家系統
 - 強度增加5%。
 - 重量減少22%。

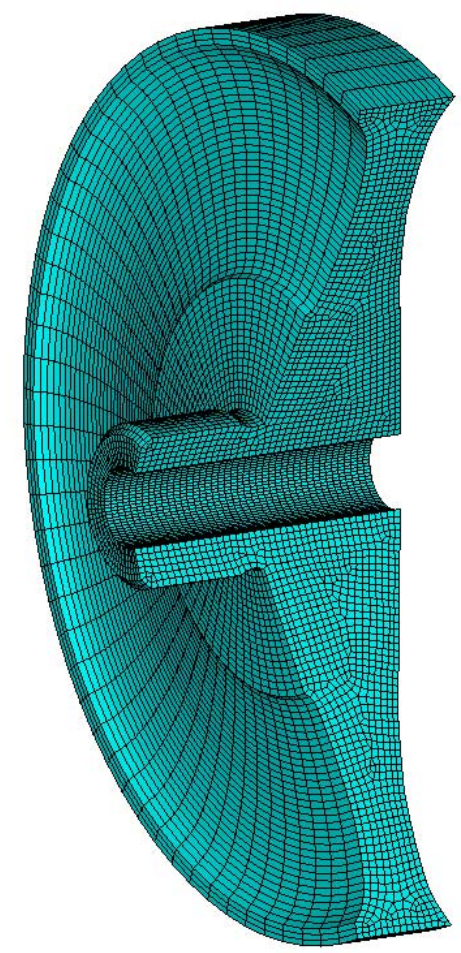
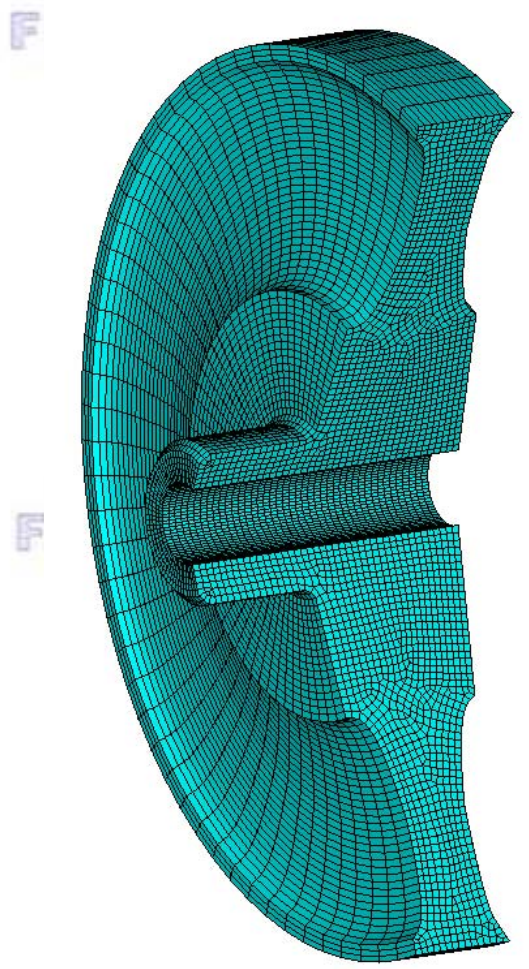
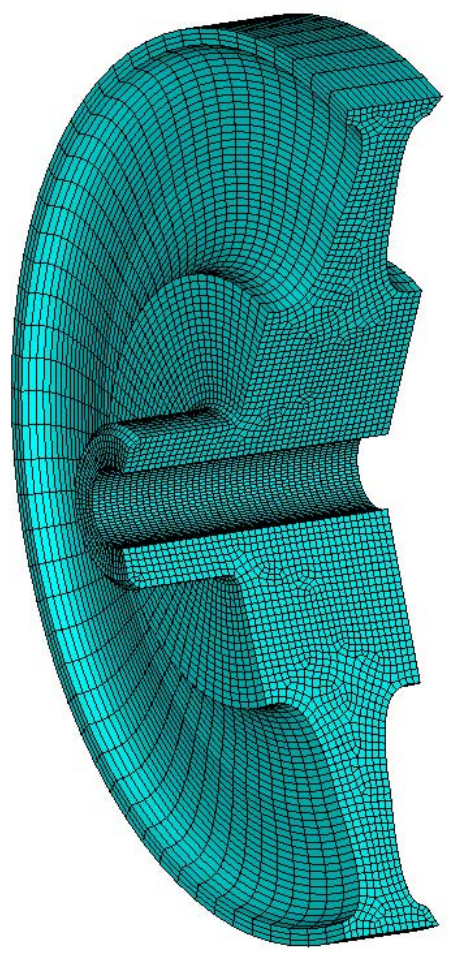
FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com



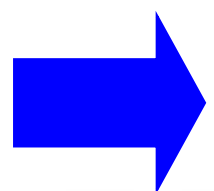
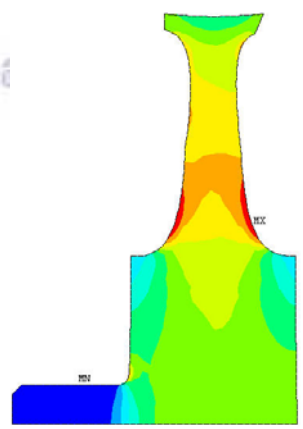
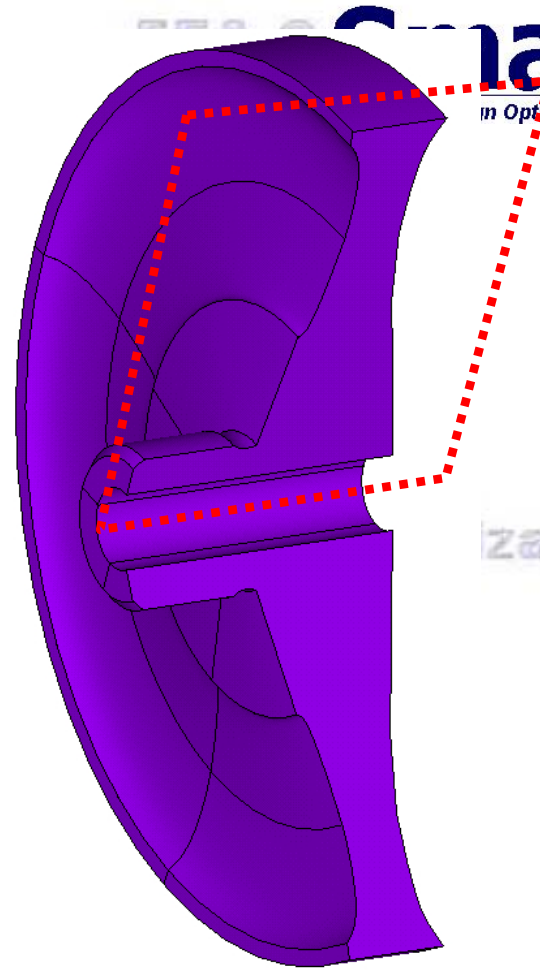
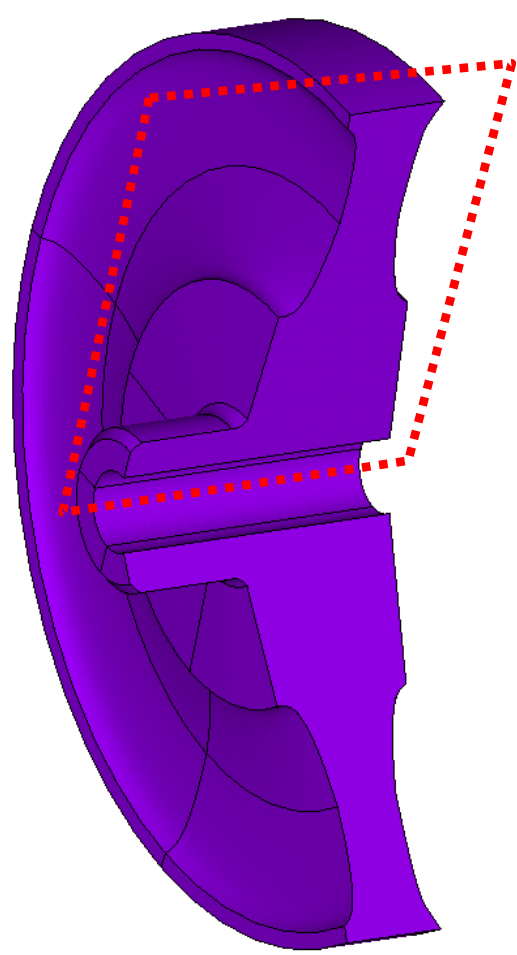
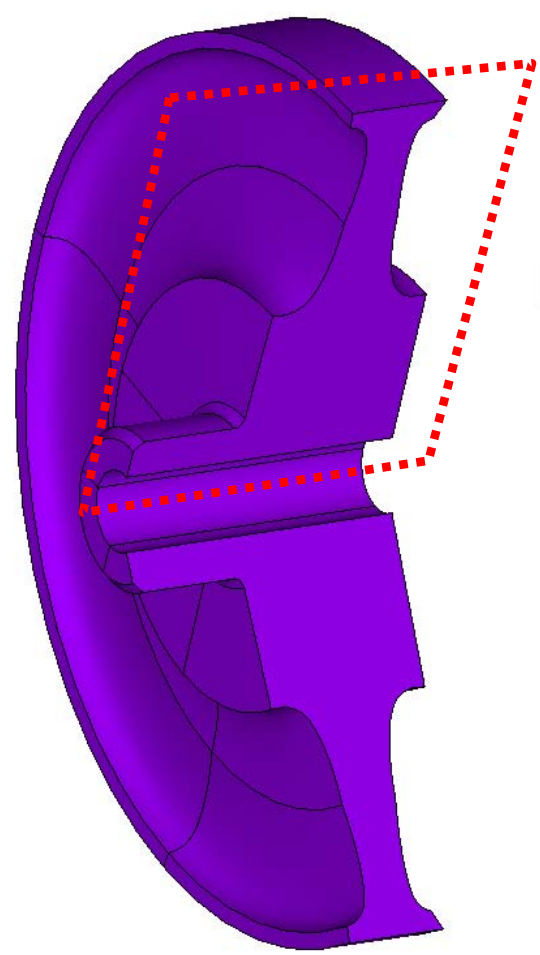


FEA-Optimization.com

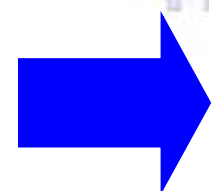
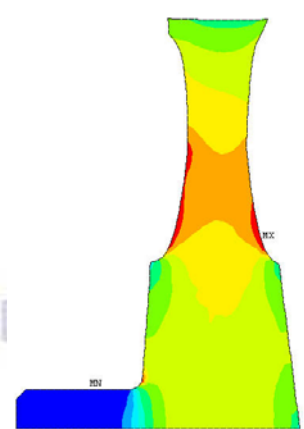
FEA-Opt

FEA-Opt

FEA-Optimization

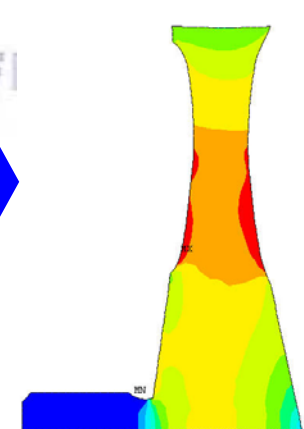


FEA-O



F

I.COM



zation.com

zation.com

en, Ph.D.

S-Y.Chen@FEA-Optimization.com

Tel :Mobile : 886-937-485-842

©Copyright. All Rights Reserved

實例 (4)

轉子系統臨界轉速之最佳化與迴避設計

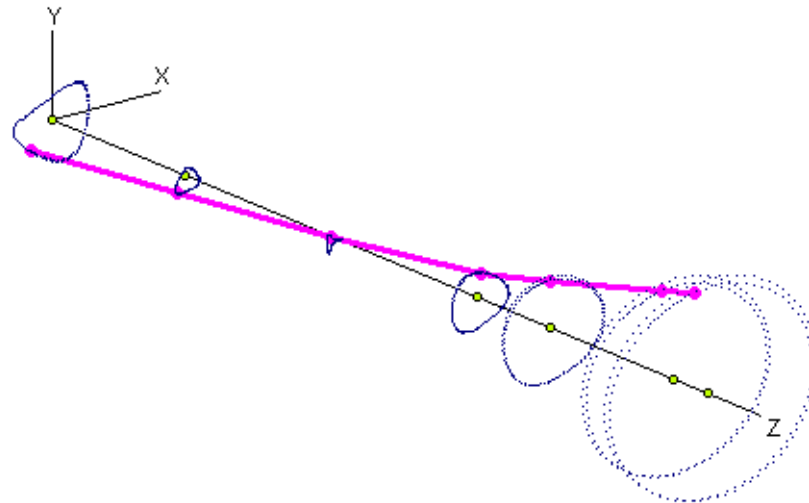
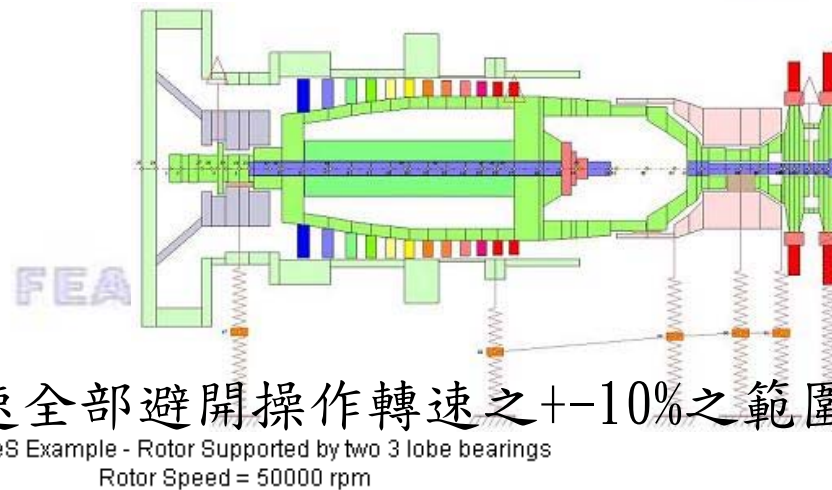
- 目標
 - 所有臨界轉速, 必需避開操作轉速(15K RPM)之 $\pm 10\%$ 之範圍。

設計參數

- 轉軸內徑尺寸。
- 軸承勁度。

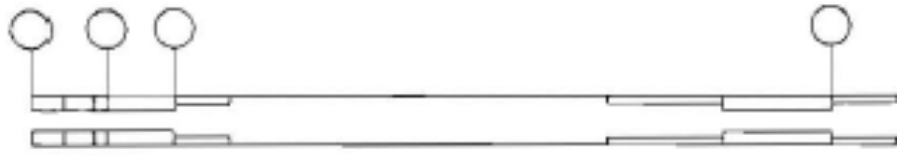
成果:

- Mode 1~mode 3 臨界轉速全部避開操作轉速之 $\pm 10\%$ 之範圍。

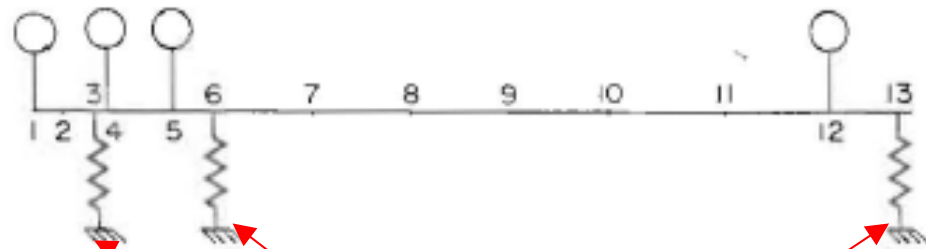


實例 (4)

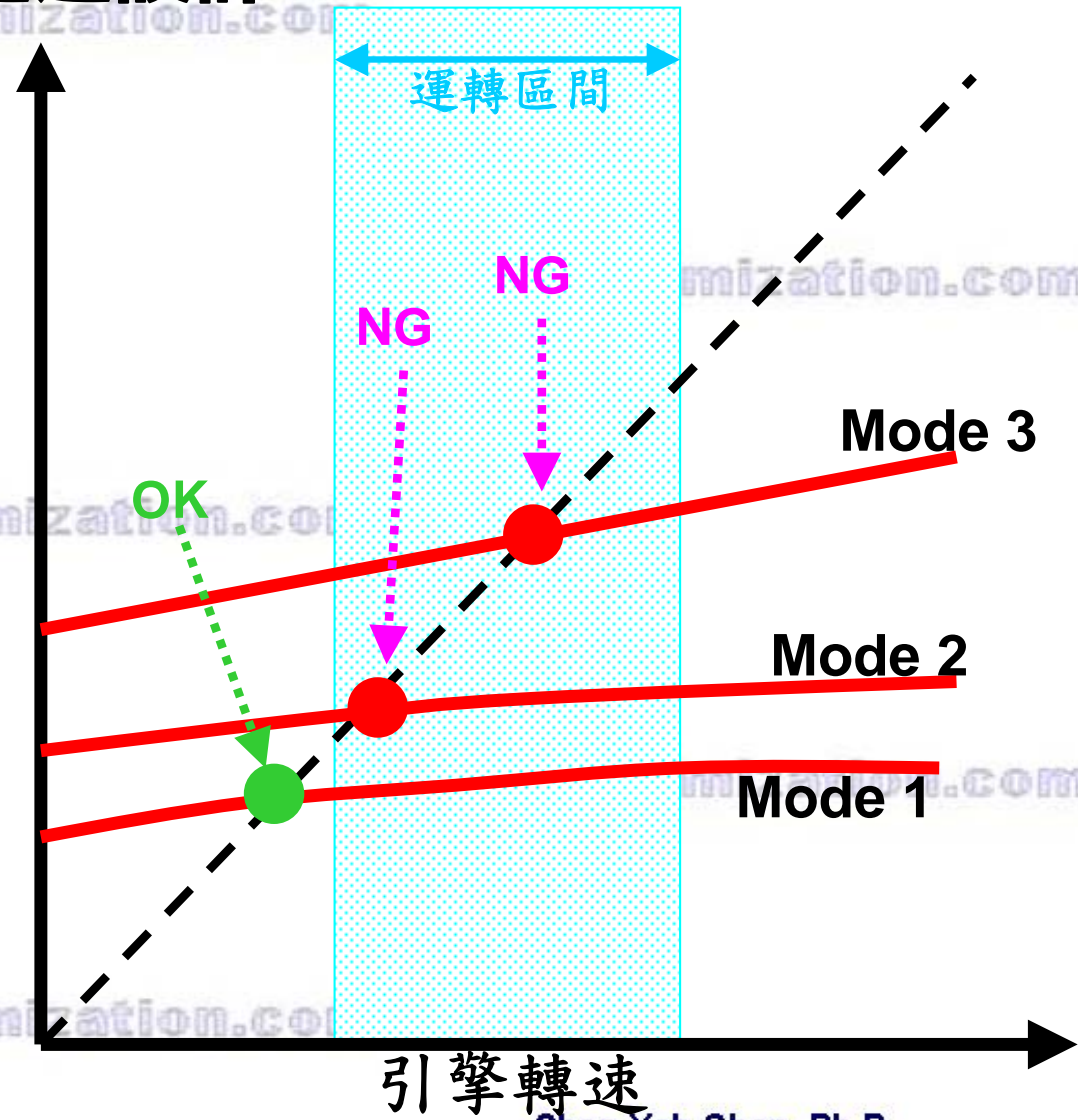
轉子系統臨界轉速之最佳化與迴避設計



轉軸內徑尺寸分佈及轉子配重



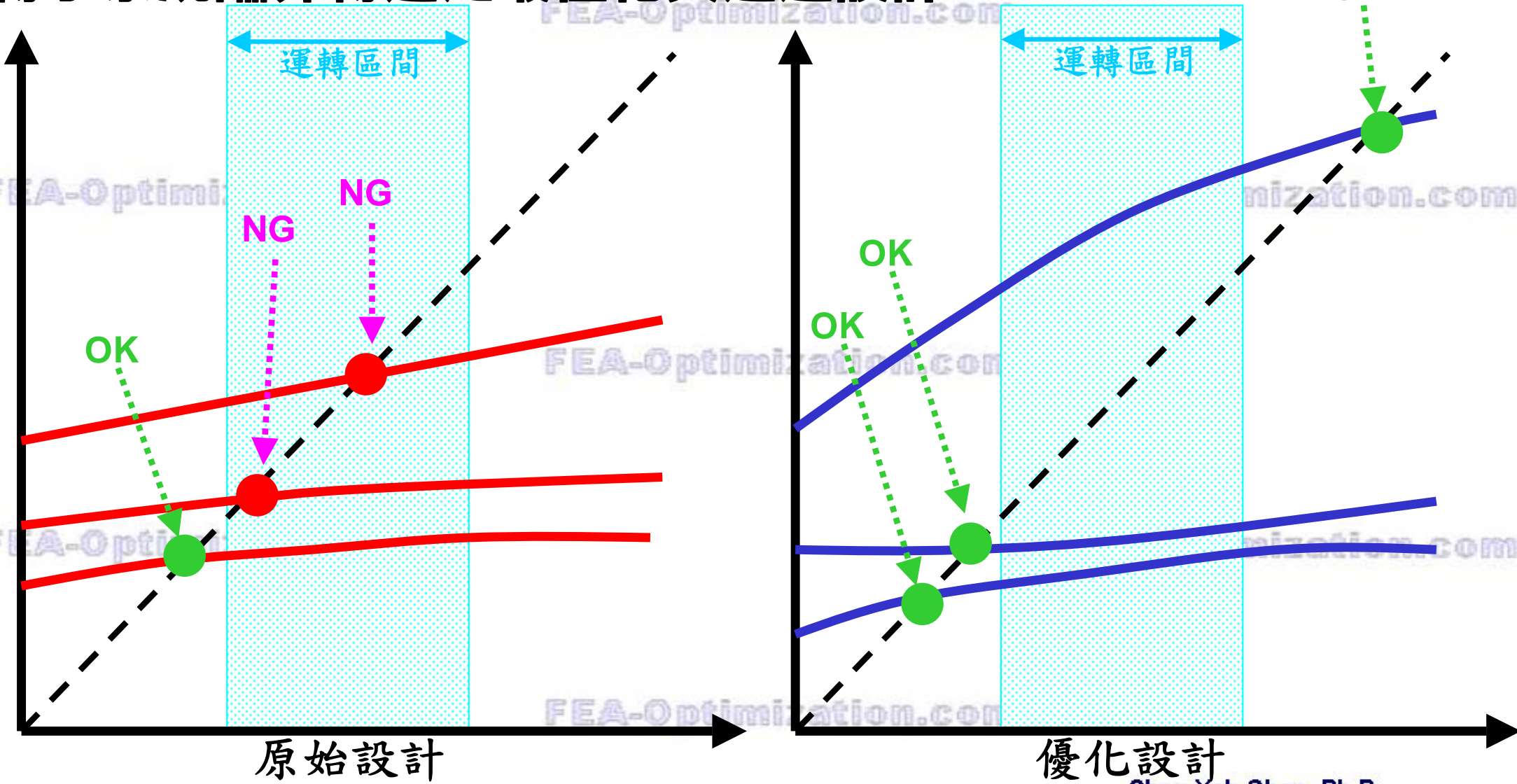
軸承位置



引擎轉速

實例 (4)

轉子系統臨界轉速之最佳化與迴避設計



原始設計

優化設計

Shen-Yeh Chen, Ph.D.
 S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
 Tel : Mobile : 886-937-485-842
 ©Copyright. All Rights Reserved

實例 (5)

虛擬模型與測試數據之吻合校正

- 目標

- 調整數值模型, 使得其所有反應與測試所得數據完全相同
- 若調整校正成功, 此數值模型可以做為精確的虛擬實物硬體, 取代許多硬體測試

Real-World Hardware



**Pictures are shown in the class.
Not available for print.**

Finite Element Model



**Pictures are shown in the class.
Not available for print.**

實例 (5)

虛擬模型與測試數據之吻合校正

Mode	Test	模態頻率			
		原始模型		優化後模型	
		預測	Error(%)	預測	Error(%)
1	21.57	21.03	2.50	21.58	0.05
2	31.01	29.23	5.74	31.03	0.06
3	55.78	52.63	5.65	55.78	0.00
4	60.28	58.72	2.59	60.28	0.00
5	63.17	64.10	1.47	63.16	0.02
6	86.23	84.50	2.01	86.23	0.00
7	90.48	81.82	9.57	90.48	0.00

FEA-Optimization.com

新世代CAE的新希望:數值最佳化設計

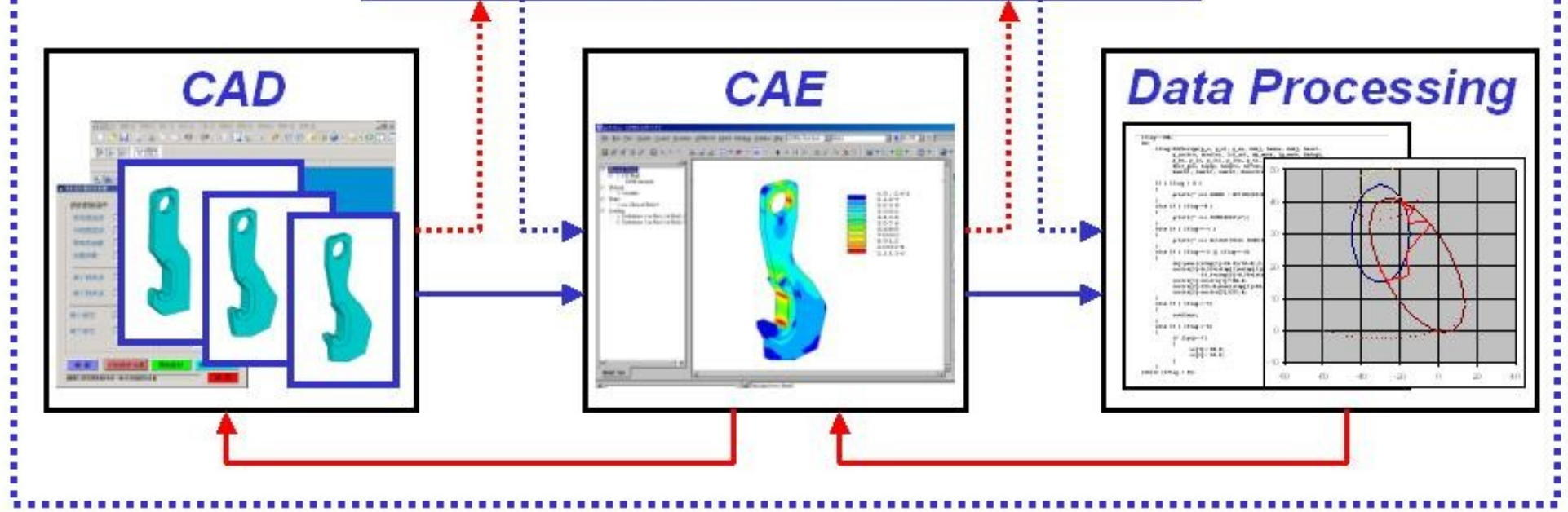
Numerical Design Optimization :

A New Era of CAE

- 今天的最佳化設計，已經不只是個概念或是趨勢，它已經被許多單位及公司接受成為標準流程
- 不僅是一個設計工具，它是一個工程週期整合(Engineering Lifecycle Integration)的基礎平台，實現了專家系統及人工智慧的部份夢想

SmartDO+

A Smart Design Optimization System

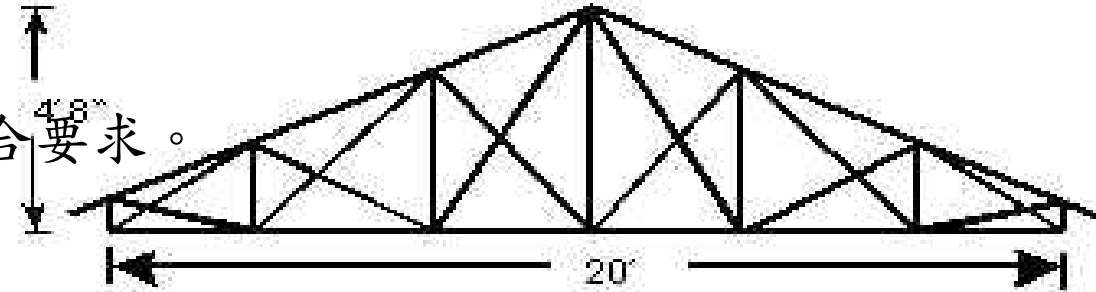


實例

大型鋼架全自動設計工程週期整合

- 目標

- 將製造成本或重量減到最小。
- 結構強度, 穩定度及振動性能必需符合^{4.8}要求。
- 易於製造。
- 實驗所得結果需列入考慮。



- 設計參數

- 桿件斷面(限由現存的型錄中挑選)。
- 接點位置。
- 結構組成架構型式。

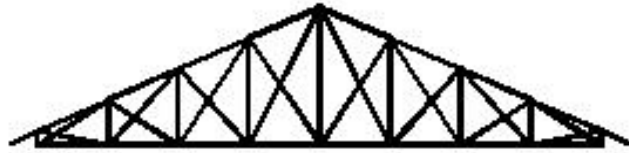
- 成果:全自動化專家系統

- 強度增加20%。
- 成本降低40%。

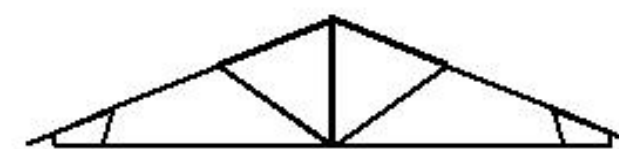
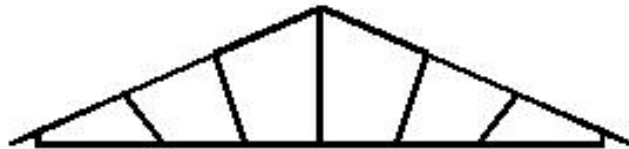
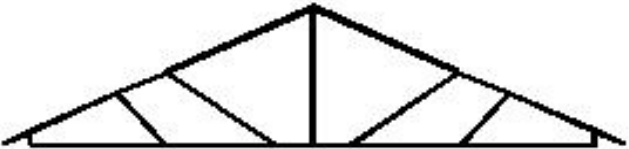
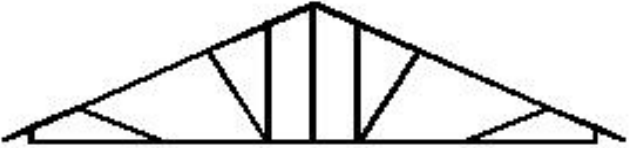
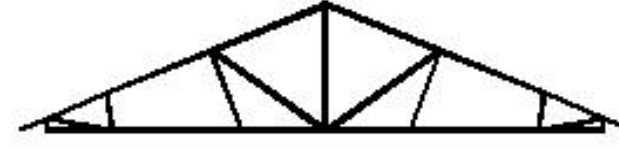
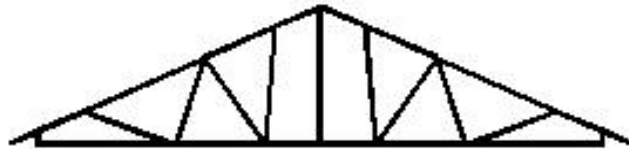
實例

大型鋼架全自動設計工程週期整合

Original Design



Original Design



Optimal Design

Optimal Design

實例

噴射式混合器自動設計系統工程週期整合

- 目標

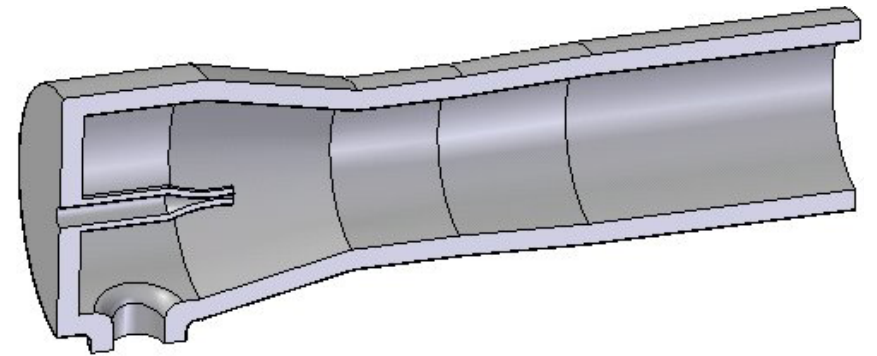
- 性能達到各種不同設計要求。
- 各部尺寸合乎規格及實驗所得之經驗式。
- 與CAD完全結合。
- 自動產生初始設計。

- 設計參數及結果

- 各部零件尺寸。

- 成果

- 全球第一套全自動化噴射式混合器自動設計專家系統。
- 尺寸細微變化下, 效率提高 50%



實例

噴射式混合器自動設計系統工程週期整合

FEA-Optimization.com

噴射混合器設計軟體 Version 1.0.0

設計限制條件		初始設計	
蒸發器溫度	140	dt1	
冷凝器溫度	230	dt2	
噴嘴馬赫數	1.5	dt3	
流體常數	1.4	L1	
最小總長度	100	L2	
最大總長度	150	L3	
最小管徑	80	D1	
最大管徑	120	D2	
		D3	

請輸入設計限制條件後，執行初始設計估算

2D Plot Legend:

- g1 (Red solid line)
- g1 (Red dashed line)
- G2 (Blue solid line)
- G2 (Blue dashed line)
- F(1.0) (Yellow dashed line)
- F(1.5) (Orange dashed line)
- F(2.5) (Red dashed line)
- F(4.5) (Dark red dashed line)
- F(90) (Dark red dotted line)
- XHist 1 (Red line with markers)

FEA-

FEA-O

開放討論

