

迴旋機械之振噪檢測研討會

Part 1

CAE分析與模擬在迴旋機械上之應用

2011/06/28

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

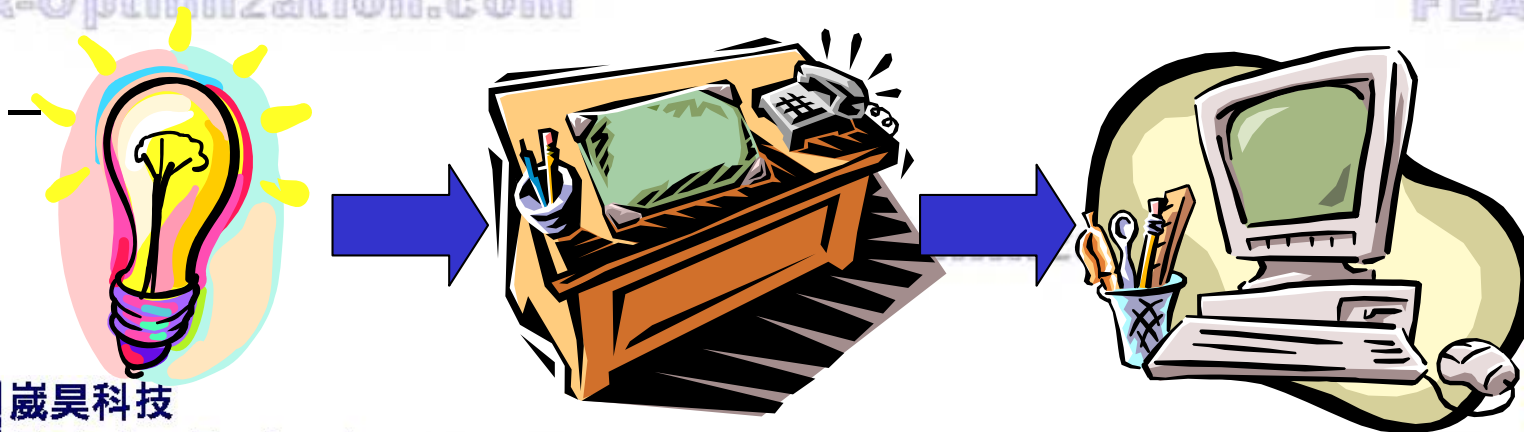
甚麼是CAE.為甚麼需要CAE

What is CAE, and, Why ?

甚麼是CAE

What is CAE

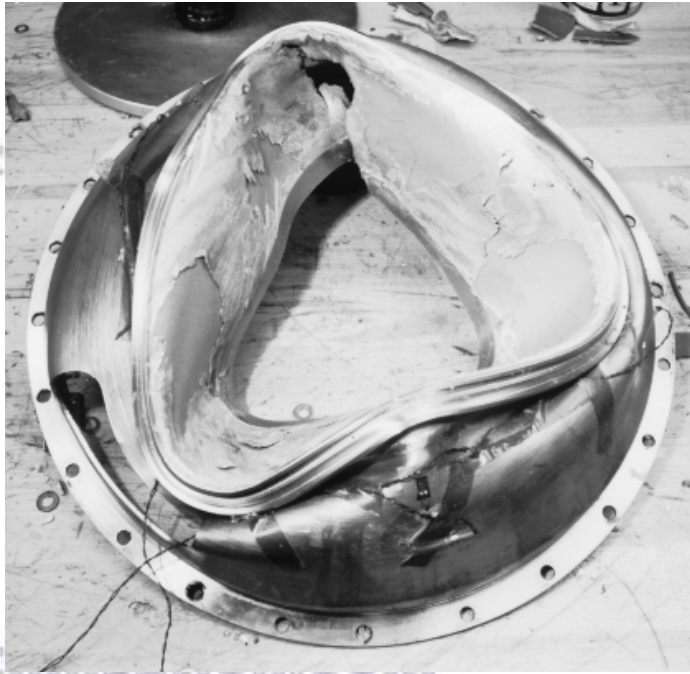
- Computer Aided Engineering, CAE, 電腦輔助工程
- 過去有很多種不同的稱謂 – 有限元素法FEM (Finite Element Method), Finite Volume, Finite Difference
- 用電腦運算協助並進行工程(Engineering)分析及運算
 - 將物理現象, 設計要求及其他工程(Engineering)流程以數學方程式描述
 - 以電腦程式求解這些方程式
 - 將運算結果化成可視圖樣



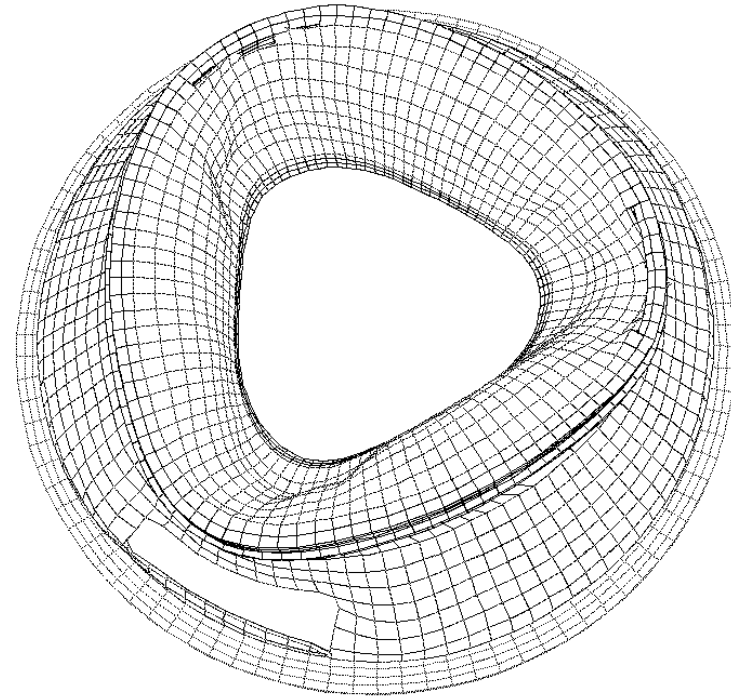
甚麼是CAE

What is CAE

FEA-Opti



實體



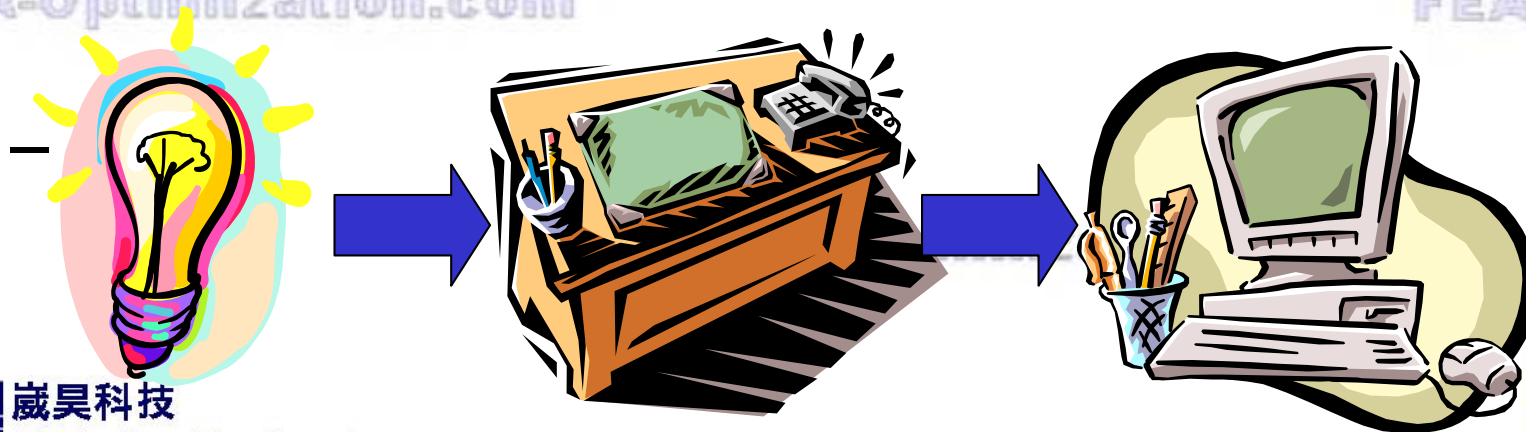
Finite Element Model

FEA-Optimization.com

為甚麼需要CAE

Why CAE

- 減少人為誤差,讓工程設計更安全
 - 加速工程開發週期
 - 累積人類工程經驗
 - 預測控制環境下之物理現象
- FEA-Optimization.com
- 人類在工程錯誤中,以生命代價學得慘痛而保貴的經驗. 如果這些經驗判斷都能寫成電腦程式,可以避免錯誤一再發生



為甚麼需要CAE

Why CAE

- 想像看看, 如果, 你是下列這些任一事件中的主要工程人員.....
- The collapse of Tacoma Bridge in 1940 let us realized the power of FSI/Fulttering
- The crash of the Comet Jet (from 1952 to 1954), the world's first commercial jet airlines, let us understand the problem of metal fatigue. The fatigue was caused by pressurisation of cabin.
- 1986 : Challenger Space Shuttle Disaster (seal failure)

Tacoma
Bridge
Incident



Challenger

為甚麼需要CAE

Why CAE

- 想像看看, 如果, 你是下列這些任一事件中的主要工程人員.....
- 2000 : Air France Concorde Flight 4590 Crash (tire failure during take off, caused by a debris dropped by previous flight).
- 2003 : Columbia Space Shuttle Disaster During Re-Entry (thermal isolation foam strikes into the shuttle wing during take off)



Concorde



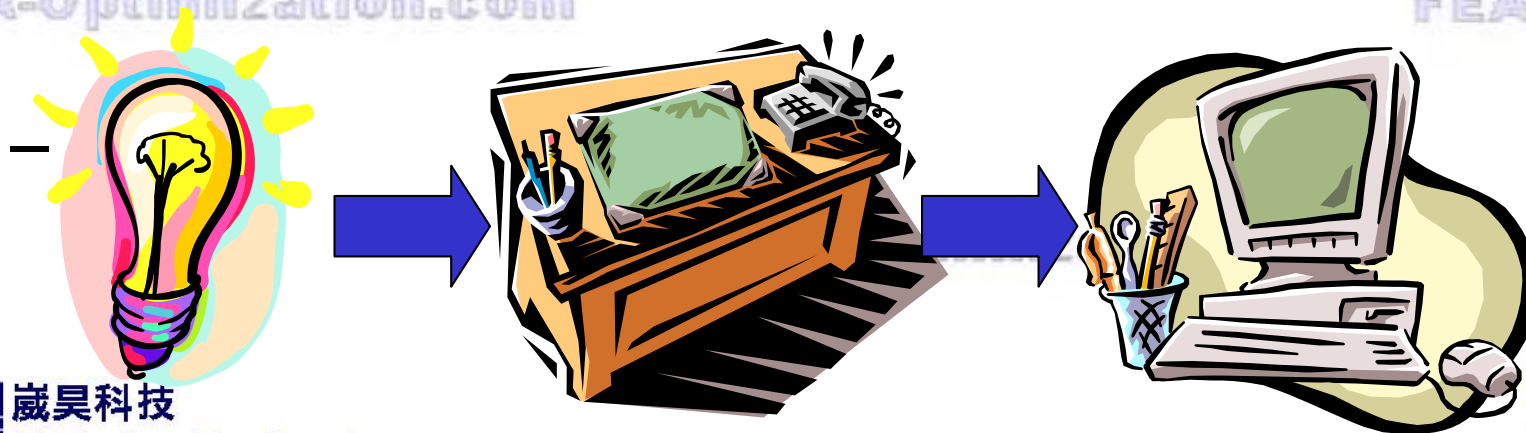
Columbia

為甚麼需要CAE

Why CAE

- 總而言之, 在實務應用上, 以下幾種情況下, 我們會選擇使用 CAE

- 無法使用解析解瞭解物理現象
- 硬體測試過於昂貴或不可能
- 需要預測產品性能及物理現象
- 設計自動化與最佳化



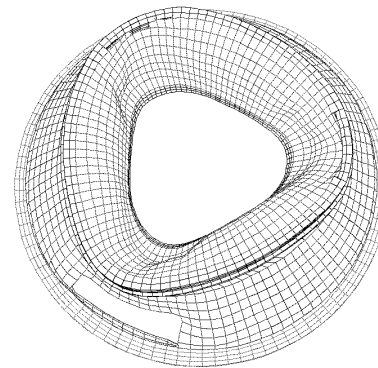
有限元素法/CAE電腦輔助分析 之基本觀念

CAE的基本觀念

- CAE基於種解析解,只是我們用數值方法求解. 當CAE條件設定正確,沒有理由CAE會比解析解不準確
 - CAE將物理實體切割成一小塊一小塊“規律”(regular)的element,在此element內,我們套用解析解公式
 - 將每一小塊“規律”(regular)的解積分起來,求得整體“不規律”(irregular)區間的解(牛頓積分原理)



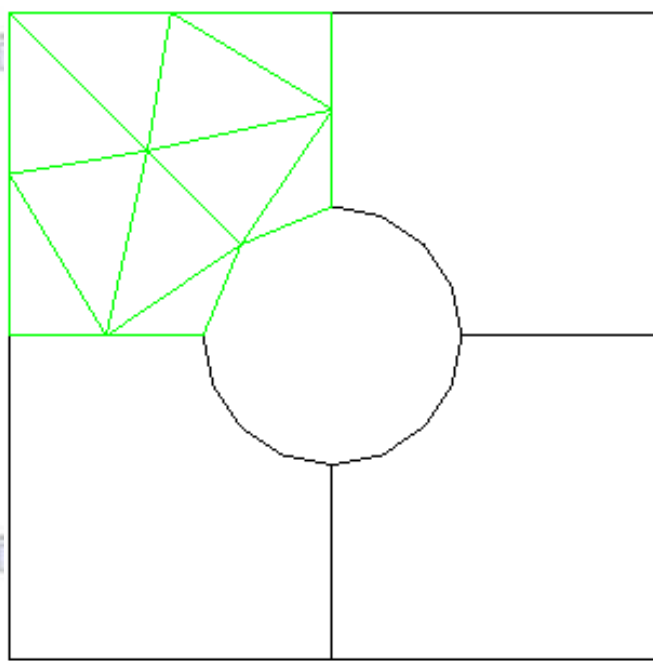
實體



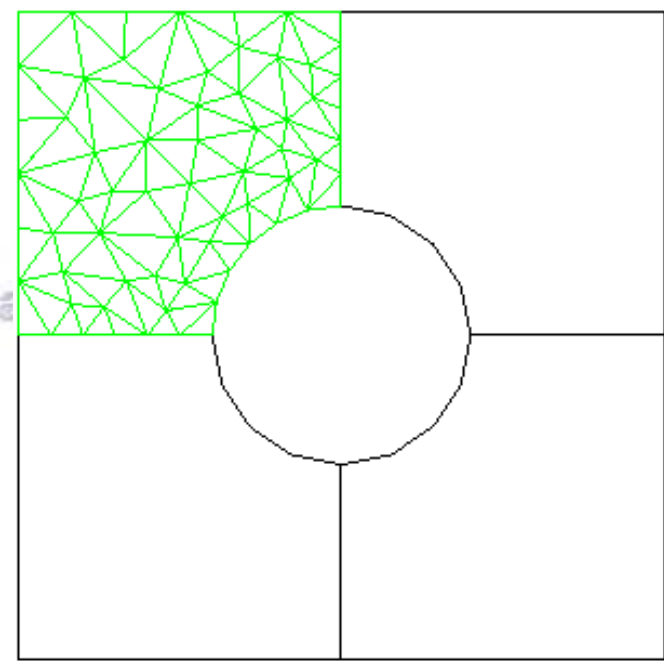
Finite Element Model

CAE的基本觀念

FEA-Optimization.com



Discretization error due to poor geometry representation.



Discretization error effectively eliminated.

FEA-Optimization.com

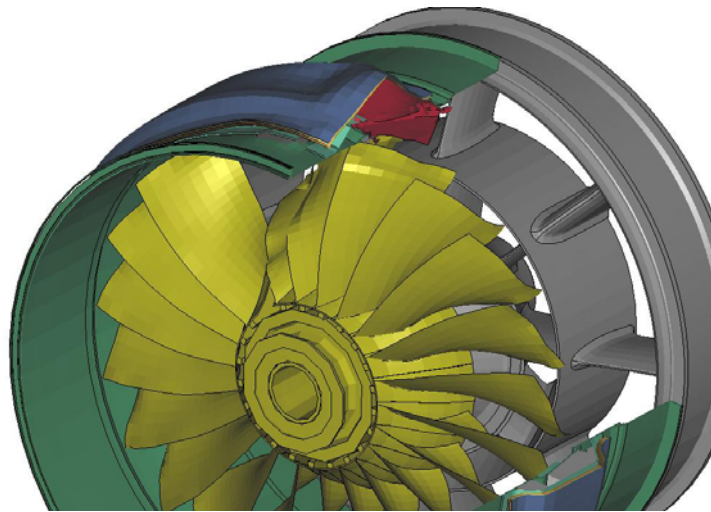
CAE的基本觀念

FEA-Optimization.com

- 當CAE模型夠精細時,應與測試結果相當接近
 - 以今天的技術而言,問題通常在於成本,而非技術上是否可行
- 測試一樣有許多問題,誤差及變異性
- 在很多設計驗證之情況,除了使用CAE,別無他法

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com



Fan Blade-Out
Kevlar Penetration

FEA-Optimization.com

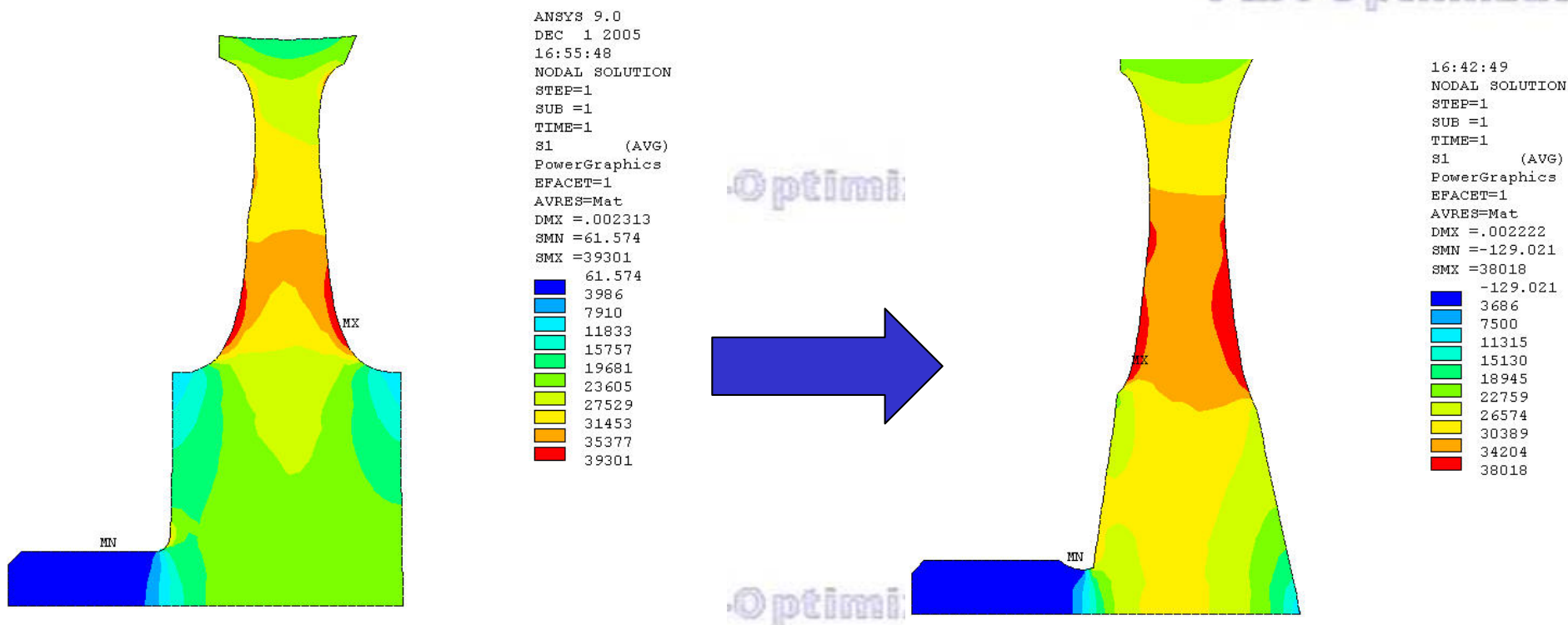
FEA-Optimization.com

CAE的基本觀念

FEA-Optimization.com

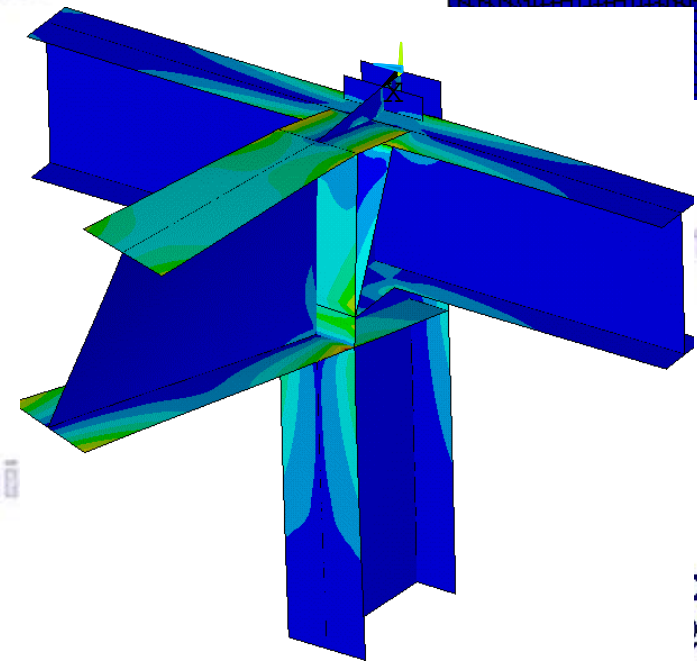
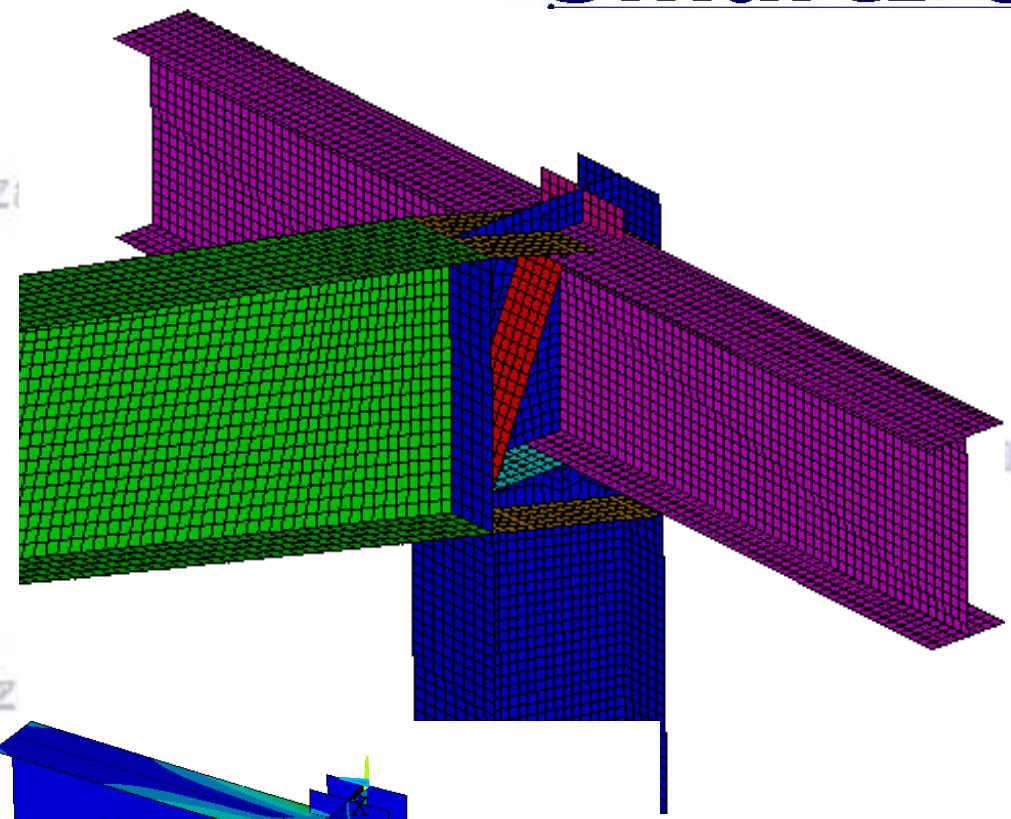
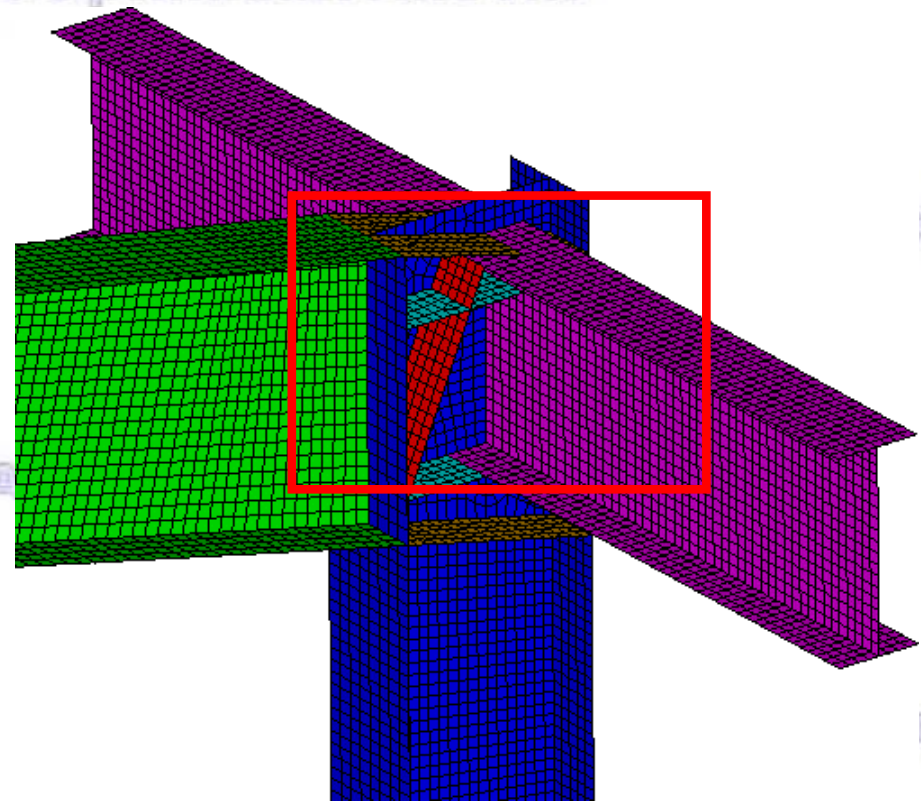
- CAE模型即使不夠精細,但只要其改變趨勢正確,在設計實務上仍能有很大的效用

FEA-Optimization.com



分析顯示,改變形狀可以降低重量,同時
降低一部份應力

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



ADINA V8.3
LS=4
SEQV

Blue	.280E-07
Light Blue	.203E-03
Cyan	.405E-03
Green	.608E-03
Yellow-Green	.811E-03
Yellow	.001014
Orange	.001216
Red-Orange	.001419
Red	.001622
Dark Red	.001825

雖然依設計規範無法明確決定加勁板之影響,但經分析證明,有無加勁板其強度及勁度差異不到1%

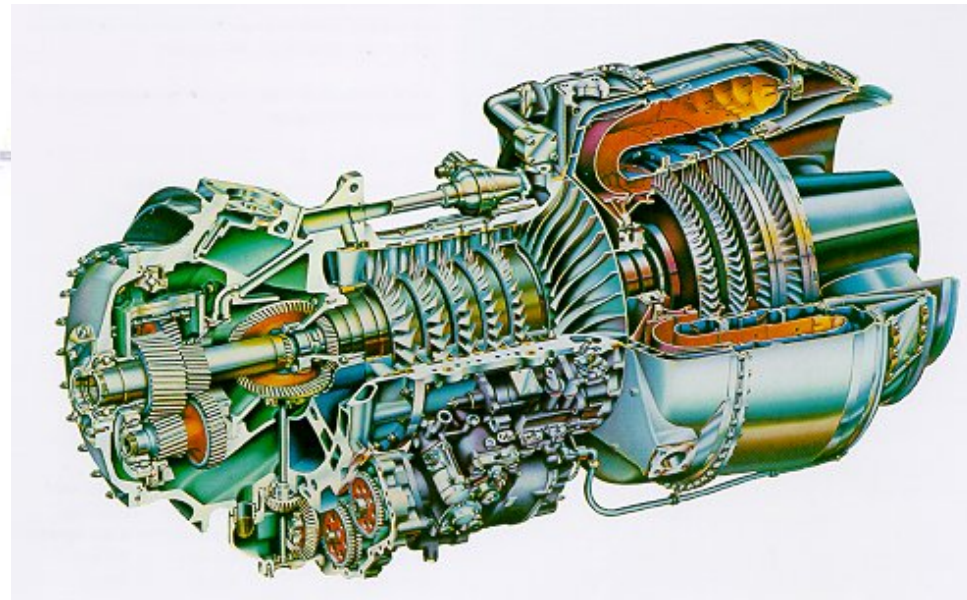
CAE在旋轉機械上之常見應用

旋轉機械之常見關心議題

FEA-Optimization.com

- 旋轉機械本身主要構件
 - 轉軸及轉子 (Rotating Part)
 - 軸承 (Bearing)
 - 油封 (Seal)
 - 結構體 (Frame)
- 週圍環境
 - 噪音震動傳遞

FEA-Optimization.com



FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA

轉動機械之主要關切行為

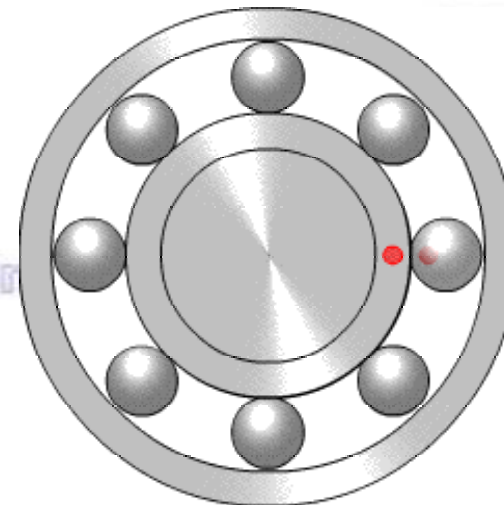
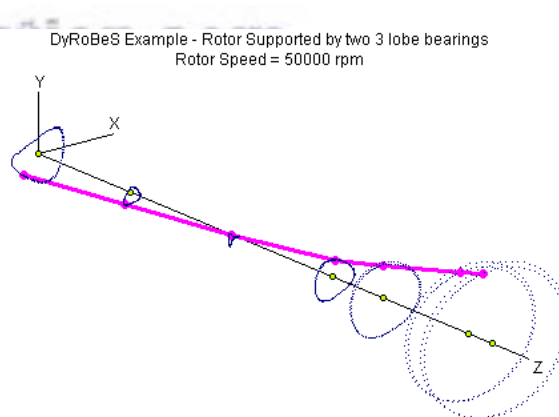
- 振動

- 不管製造如何精密, 振動行為永遠無法避免.
- 由於轉子長期處於轉動狀態, 任何的不平衡很容易就會被放大

- 軸承(Bearing)磨耗

- 軸承直接承受並束制來自轉子及轉軸的運動, 為轉子及定子間之界面
- 軸承磨耗通常不可避免, 軸承的壽命為決定機械之壽命之重要因素之

- 即使沒有重力, 振動及軸承磨耗仍然會發生



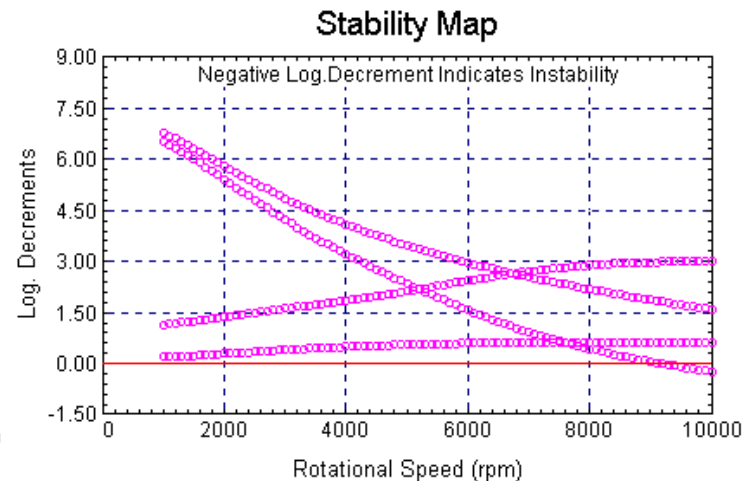
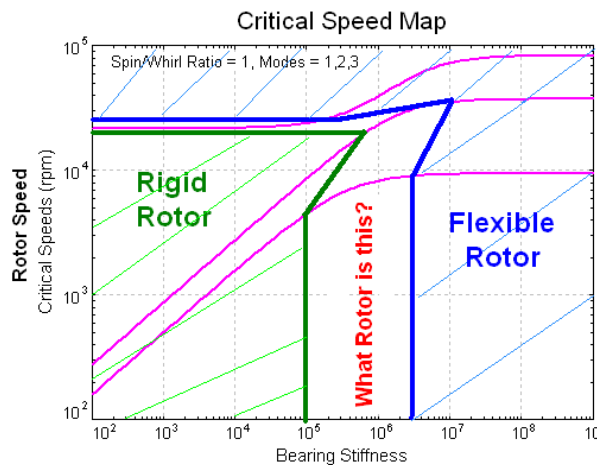
轉動機械之主要關切行為

: 振動

FEA-Optimization.com

● 臨界轉速

- 大部份的轉動機械對某個轉度速度會特別敏感,此稱為臨界轉速. 高於或低於此轉速, 振動皆會趨於穩定
- 大部份的轉動機械, (同一轉速下)振動量會隨著時間而趨驅於穩定. 少部份振動量會隨著時間增加而越來越大,此稱為不穩定. 不穩定開始產生的轉速,稱為 Instability Threshold
- 當轉速越來越高時,傳統的有限元素法分析會得到錯誤的答案!!



-Optimization.com

轉動機械之主要關切行為

: 振動

FEA-Optimization.com

- 絕對振幅大小

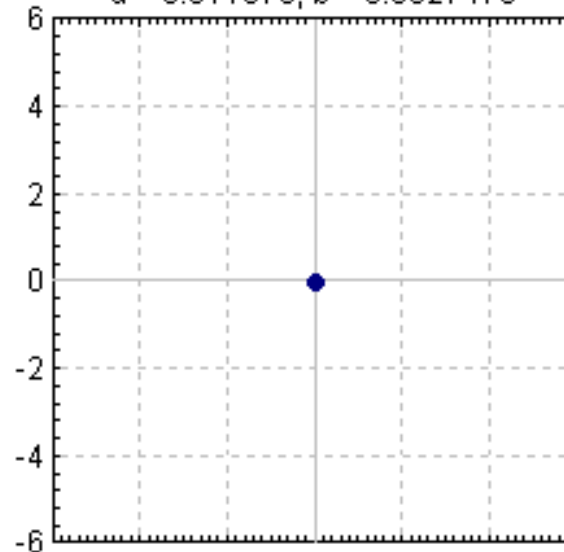
- 絕對振幅大小會隨著轉速而改變

- 一般轉子的斷面運動為橢圓形，並非正圓！！

- 絕對振幅不但會隨著轉速而變，且其相對高點亦不只一點

FEA-Optimization.com

Station: 1, Sub-Station: 1
Speed = 10 rpm
a = 0.011078, b = 0.0027475



FEA-Optimization.com

轉動機械之主要關切行為

: 振動

• 軸承反力及其他

– 軸承的特殊行為是造成轉子機械特有行為的兩大原因之一

– 液壓軸承行為是一種薄膜型的FSI(流固耦合)行為

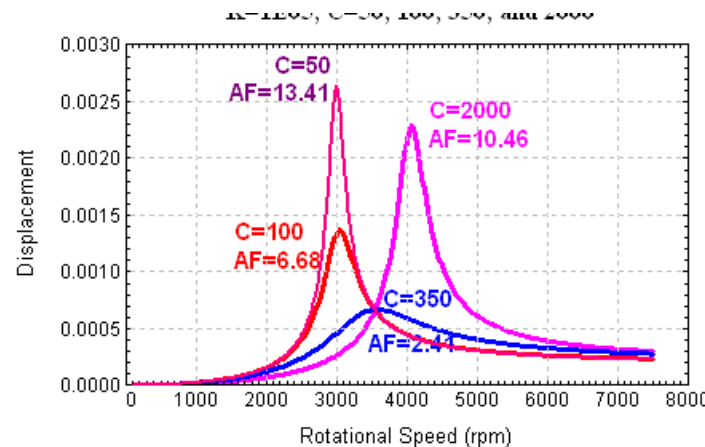
– 單純的線性彈簧模型並無法描述一般的軸承行為

– 軸承反力/變型與轉子的行為是互動的(並非單純的線性)

- 軸承性質影響轉子的振動及反力

- 轉子的速度影響軸承的彈性系數及阻尼

– 以液壓軸承為例,當軸承的反力油膜厚度,溫度及壓力不足以承載轉子時,嚴重的摩耗將會產生

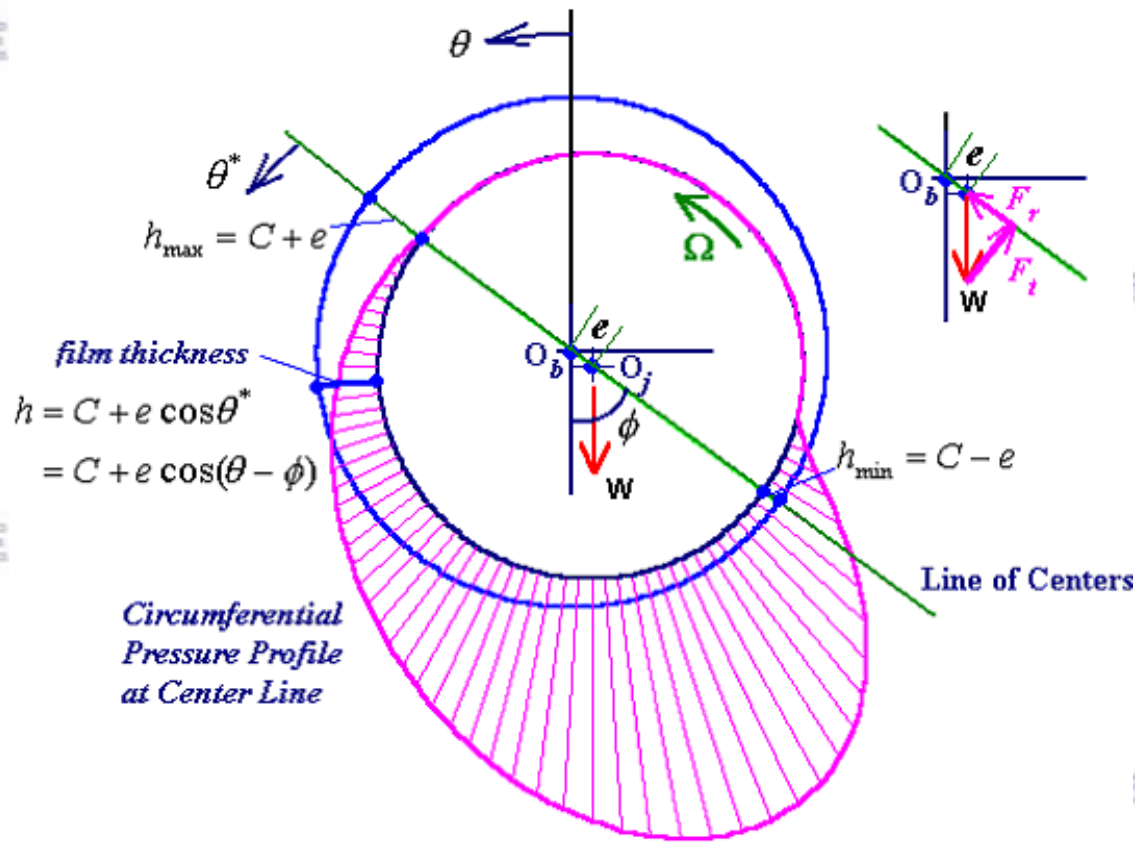


轉動機械之主要關切行為

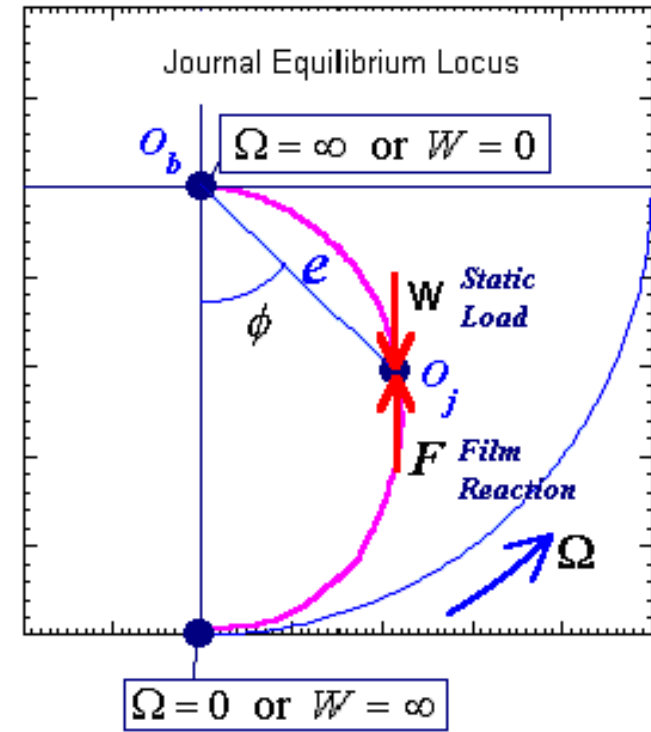
: 振動

FEA-Optimization.com

- 軸承反力及其他



DyRoBeS-Beperf
Plain Cylindrical Journal Bearing: $L/D = 0.25$



轉子動力分析之特殊考量

FEA-Optimization.com

- 當結構物處於轉動狀態時, 很多振動行為將隨之改變
- 當轉子轉速越來越高時, 傳統的有限元素法軟體並不適用, 必需使用轉子動力(Rotordynamics)分析軟體
 - 陀螺儀效應
 - 支撐/軸承非等向效應

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

轉子動力分析之特殊考量

:陀螺儀效應(Gyroscopic Effect)

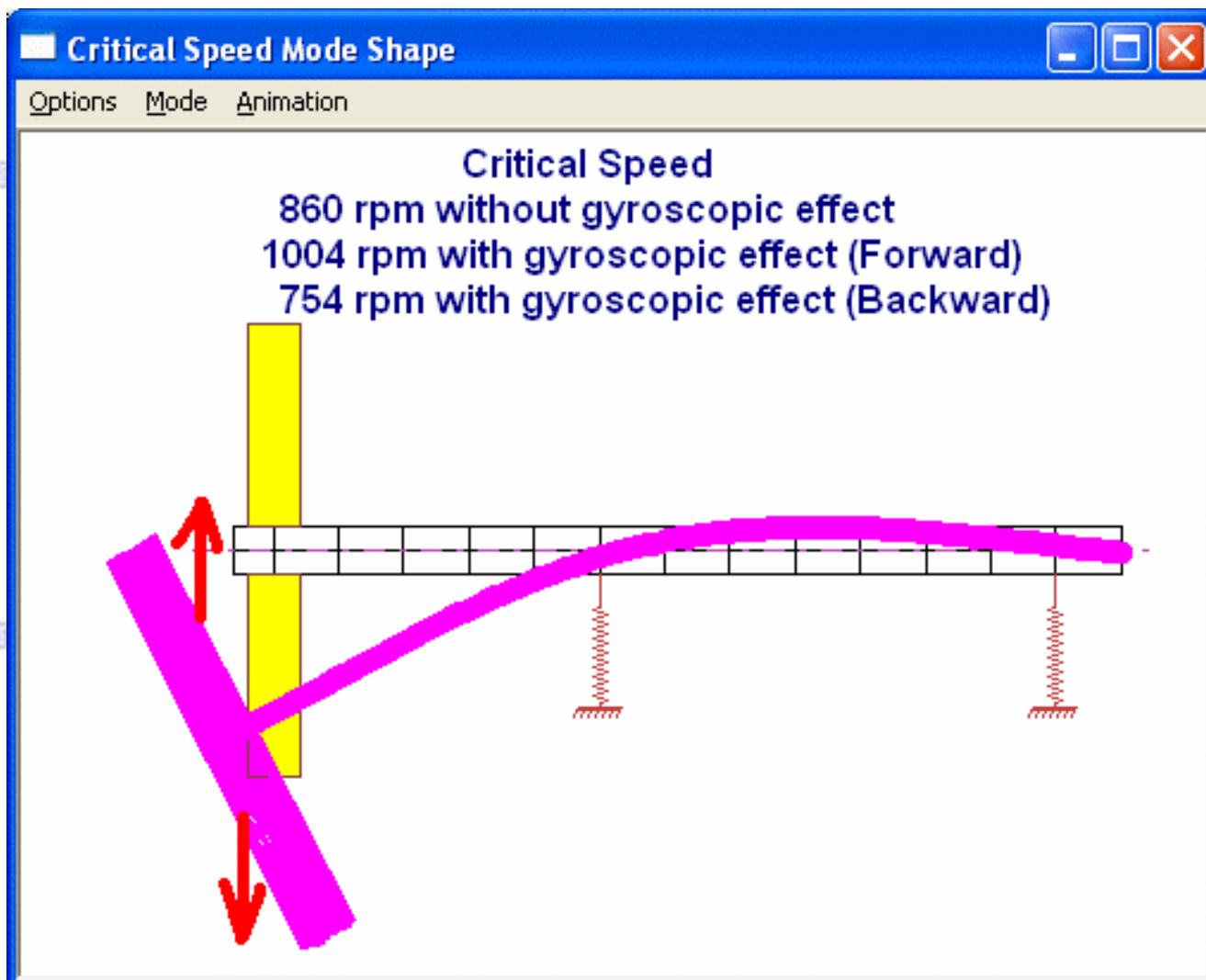
- 陀螺儀效應(Gyroscopic Effect)

- 大部份的轉子特有現象, 除了來自軸承的特殊行為, 另一個重要因素是陀螺儀效應(Gyroscopic Effect)

See Our Experiment

轉子動力分析之特殊考量

:陀螺儀效應(Gyroscopic Effect)

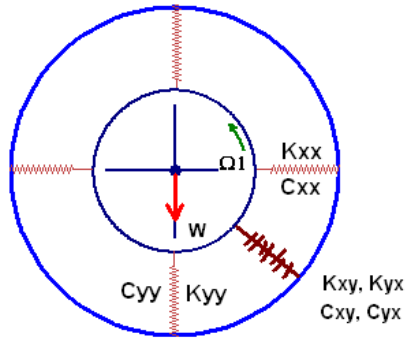


Shen-Yeh Chen, Ph.D.
S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
Tel : Mobile : 886-937-485-842
©Copyright. All Rights Reserved

轉子動力分析之特殊考量

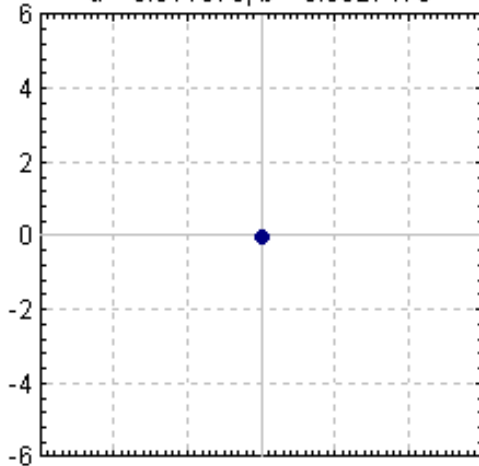
:支撐/軸承非等向效應

Bearing Cross-Coupling Stiffness

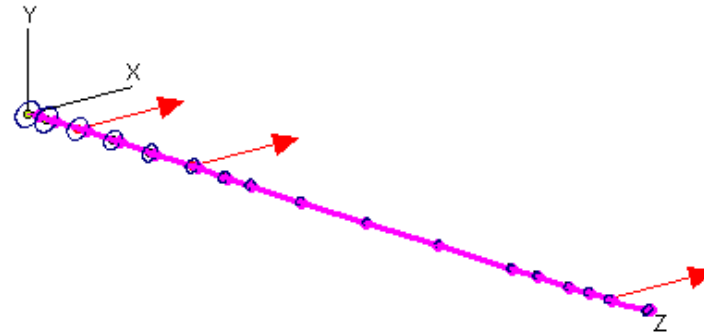


$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix}$$

Displacement Orbit
Station: 1, Sub-Station: 1
Speed = 10 rpm
a = 0.011078, b = 0.0027475



Shaft Response - due to shaft 1 excitation
Rotor Speed = 10000 rpm, Response - FORWARD Precession
Max Orbit at stn 1, substn 1, with a = 0.003124, b = 0.0030987

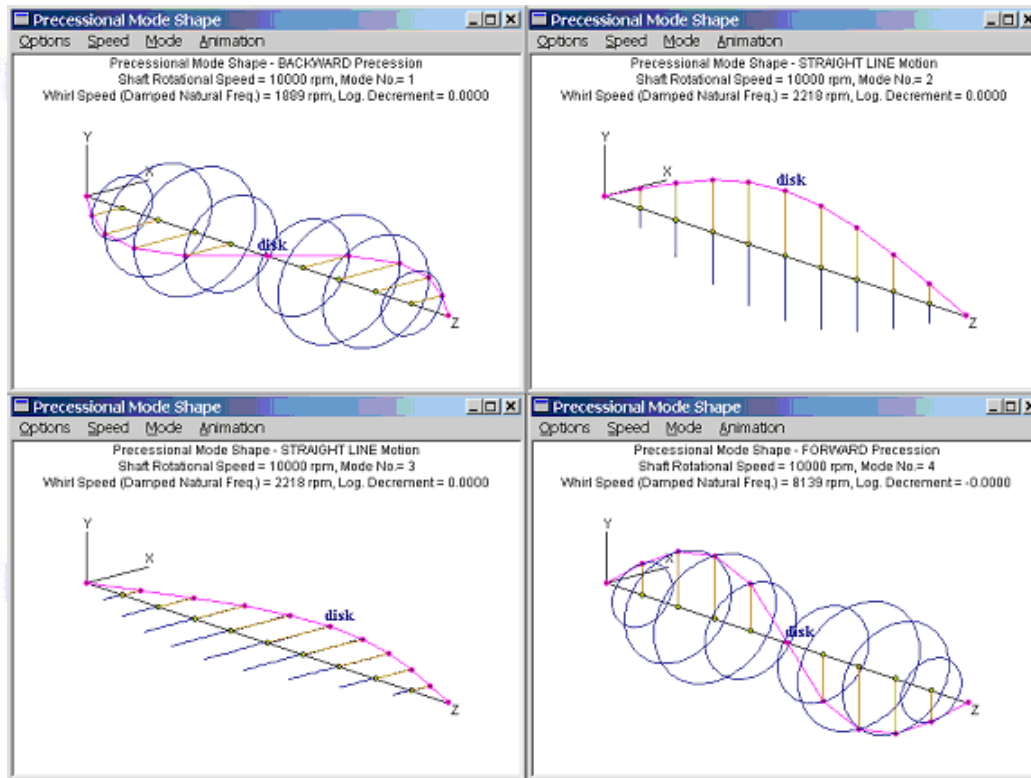


轉子動力分析之特殊考量

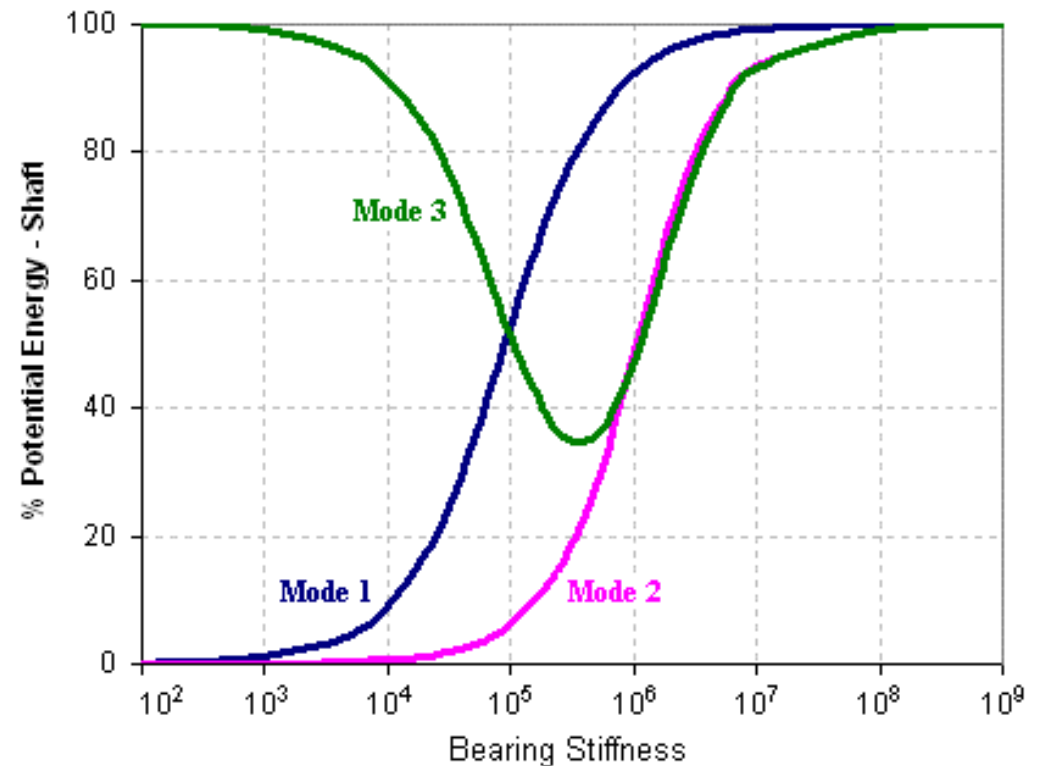
: 振動

FEA-Optimization.com

- Mode Shape & Energy Distribution



FEA-Opti

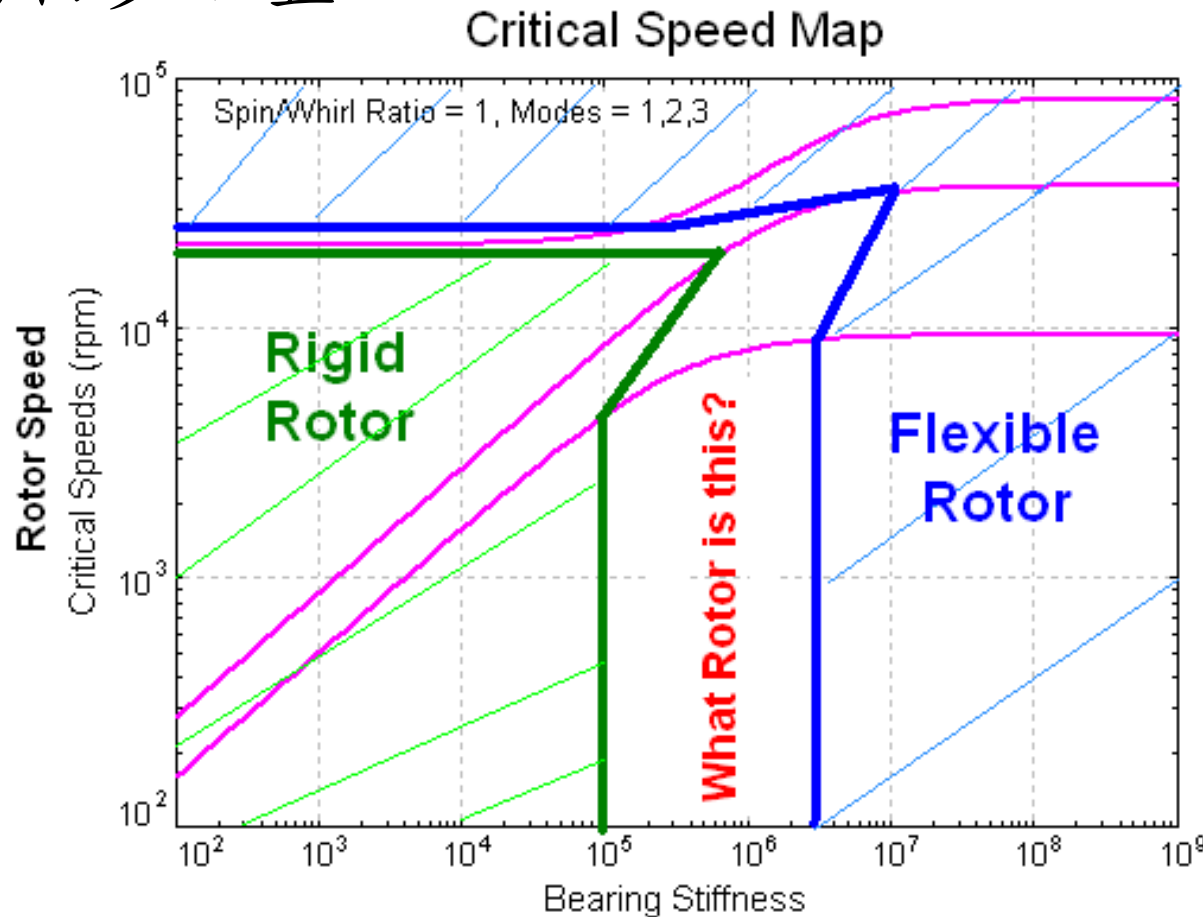


CAE在旋轉機械之設計應用與考量

轉子動力分析之特殊考量

: 設計考量 : 動平衡之前

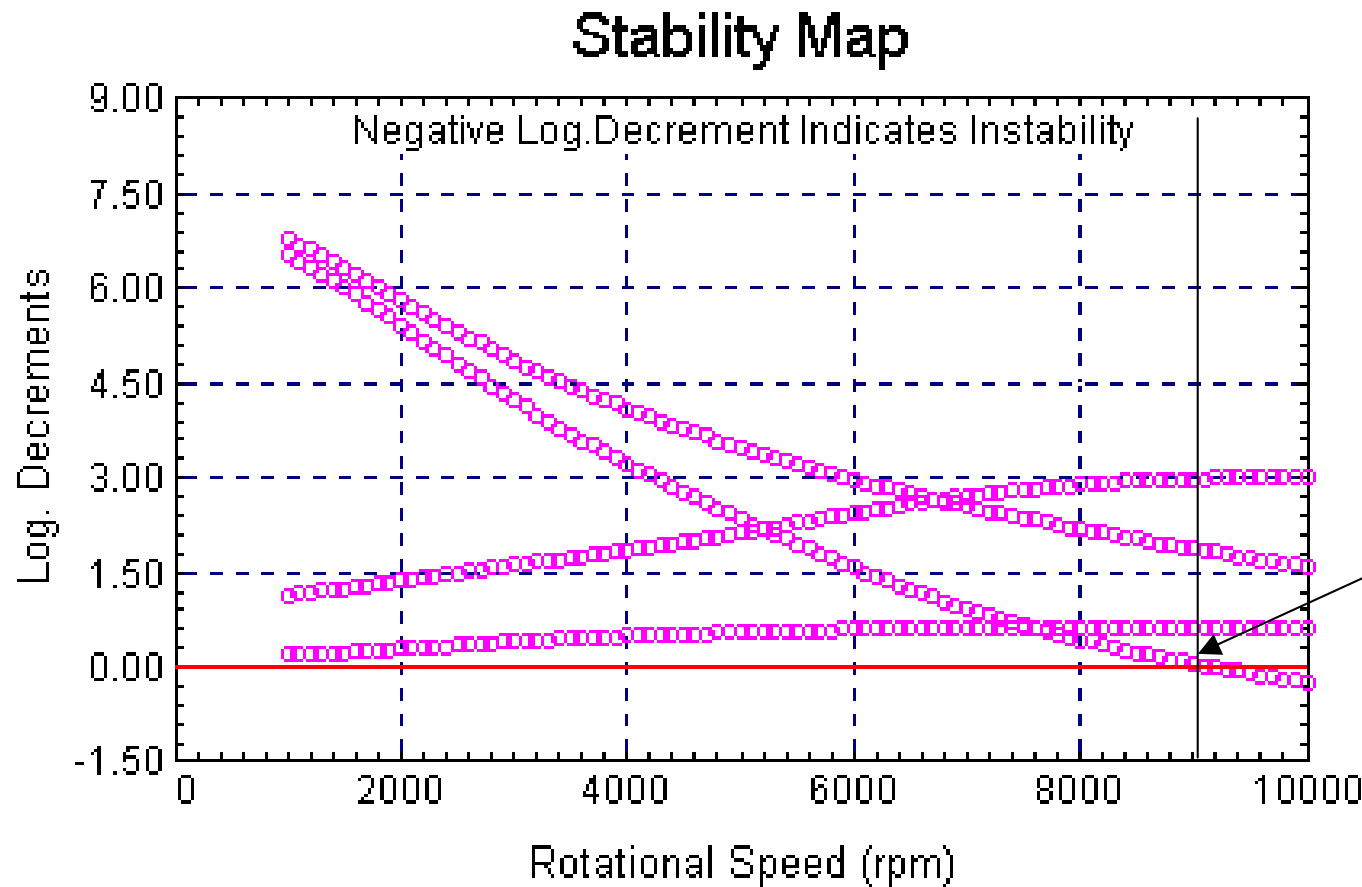
- 透過CAE分析製作critical speed map, 可以瞭解如何作軸承勁度的初步配置



轉子動力分析之特殊考量

:設計考量: 動平衡之前

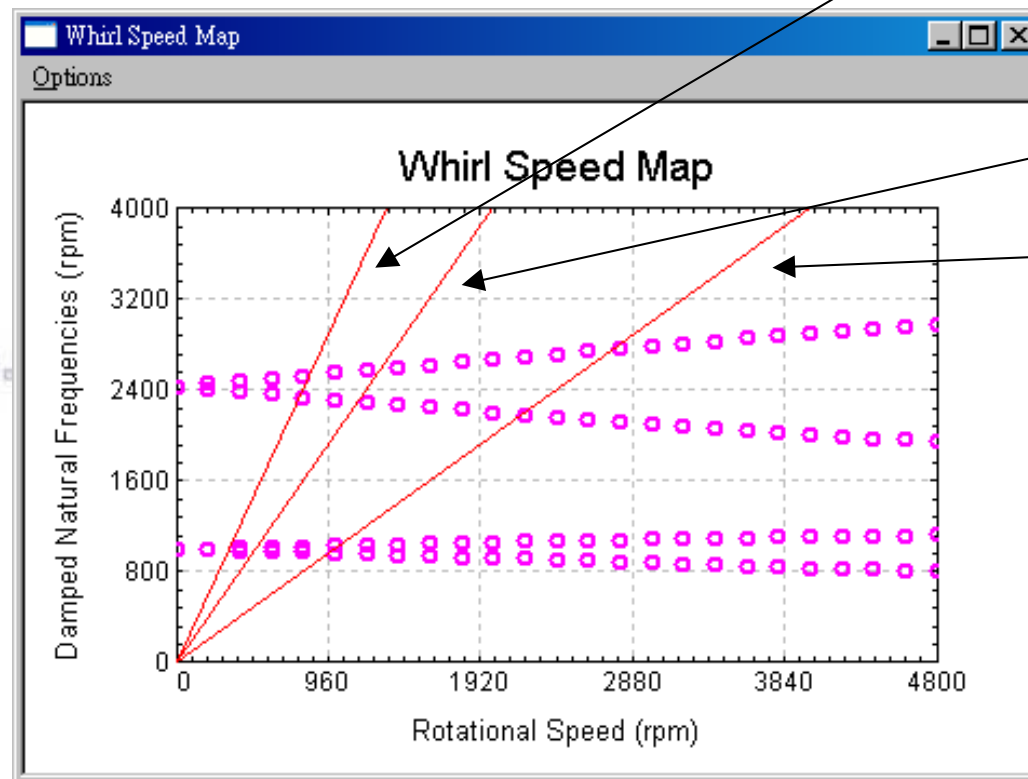
- Log Decrement : 判斷轉子是否會高於某轉速後驅於不穩定



轉子動力分析之特殊考量

設計考量：動平衡之前

- 透過CAE分析製作Whirl Speed Map,可以在考慮倍頻的情況下轉子的共振轉速
- 共振轉速應該避開運轉轉速



轉子動力分析之特殊考量

:設計考量: 動平衡之後

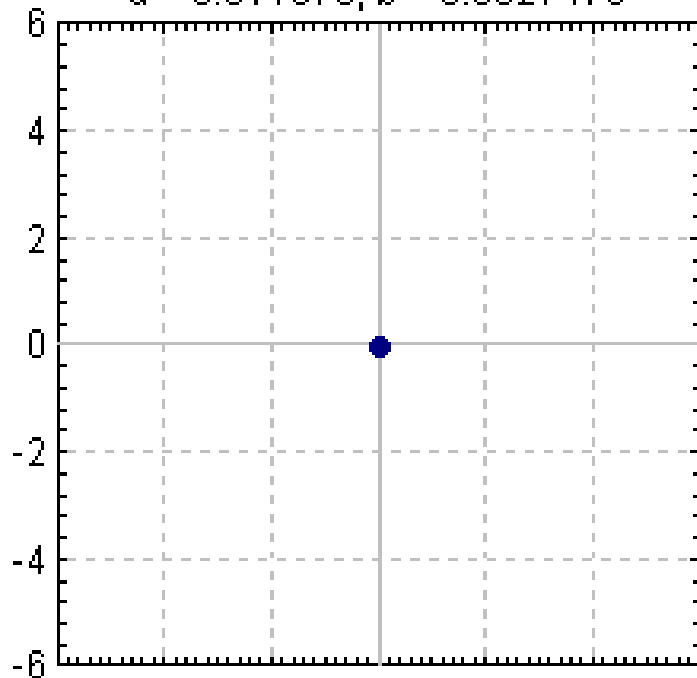
- 絕對振幅大小及斷面運動軌跡 (1/2)

Displacement Orbit

Station: 1, Sub-Station: 1

Speed = 10 rpm

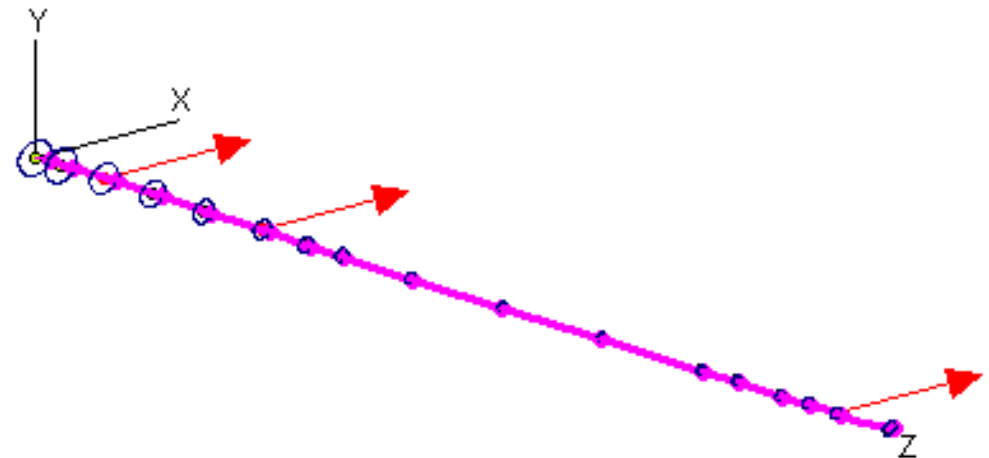
$a = 0.011078$, $b = 0.0027475$



Shaft Response - due to shaft 1 excitation

Rotor Speed = 10000 rpm, Response - FORWARD Precession

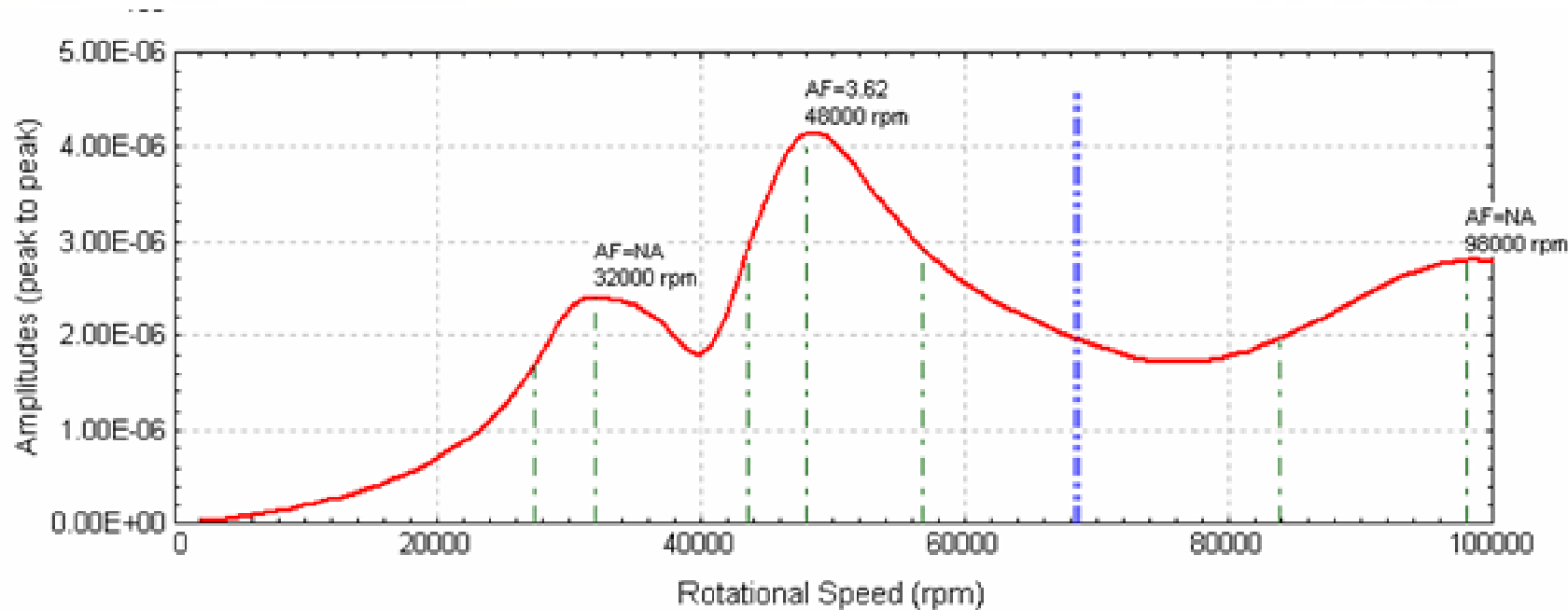
Max Orbit at stn 1, substn 1, with $a = 0.003124$, $b = 0.0030987$



轉子動力分析之特殊考量

設計考量：動平衡之後

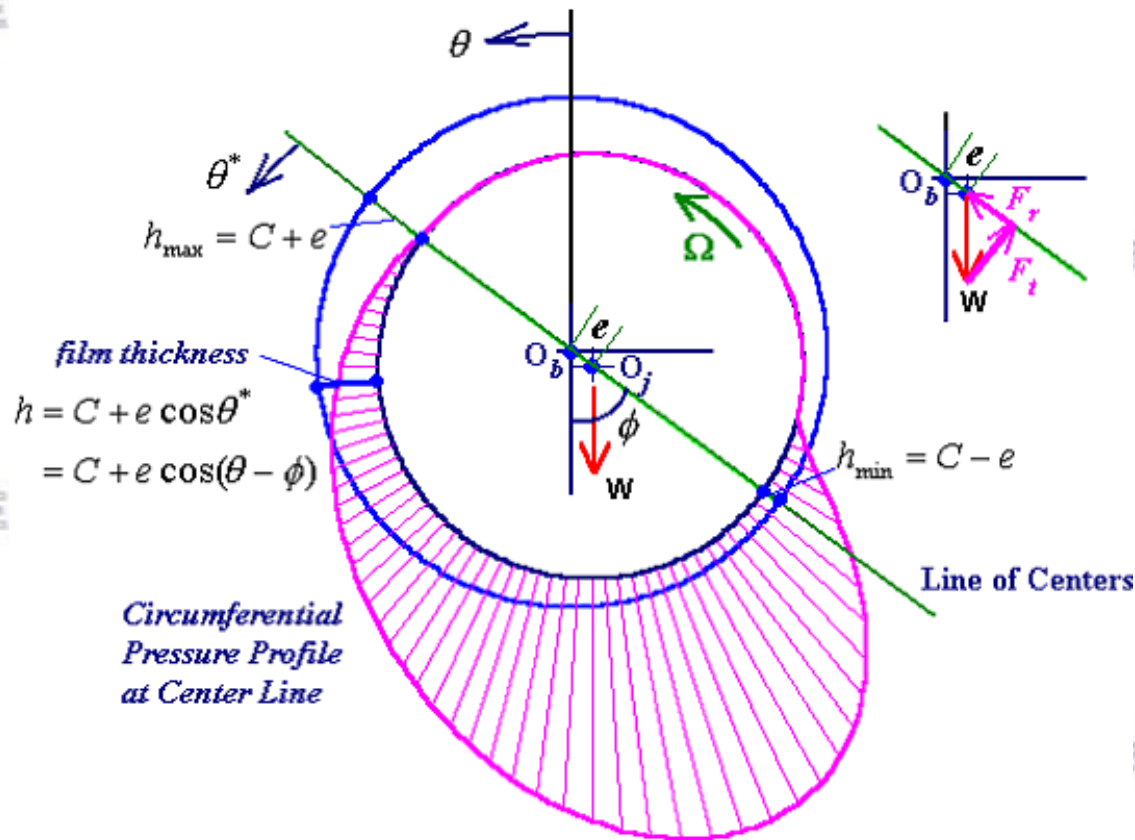
- 絕對振幅大小及斷面運動軌跡 (2/2)



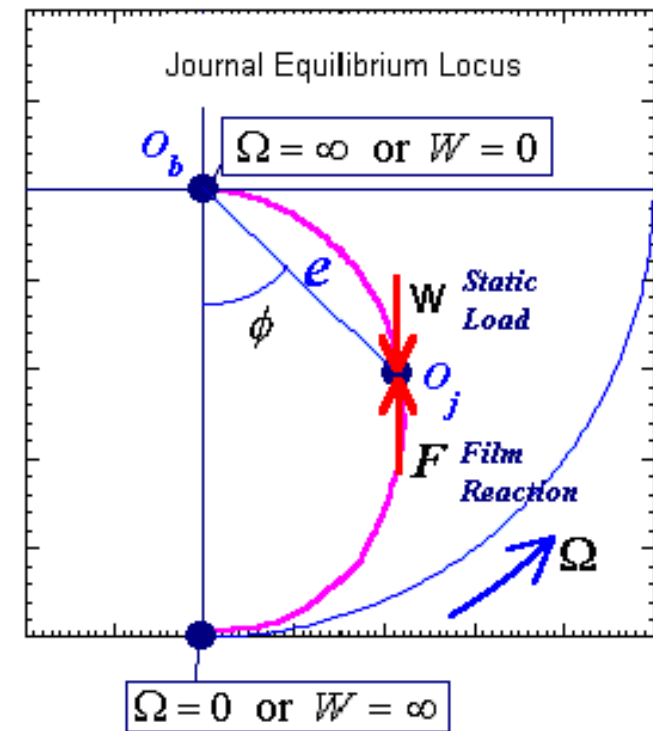
轉子動力分析之特殊考量

設計考量: 軸承

- 最小油膜厚度, 最高工作溫, 潤滑油量需求, Power Loss



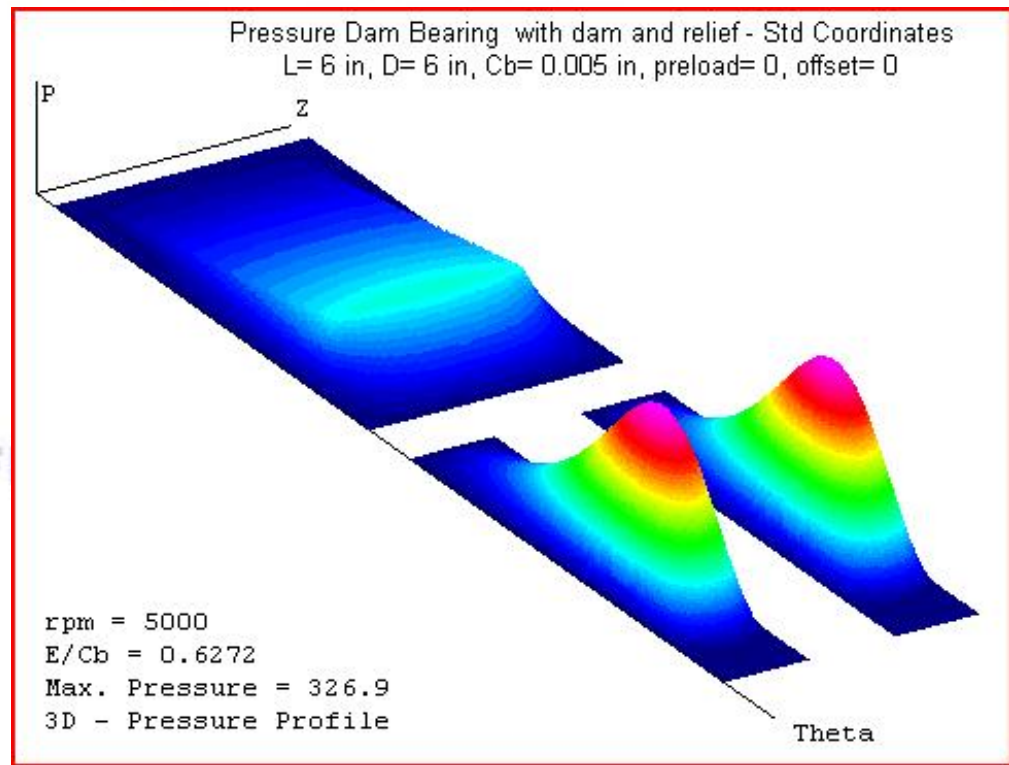
DyRoBeS-Bepref
Plain Cylindrical Journal Bearing: $L/D = 0.25$



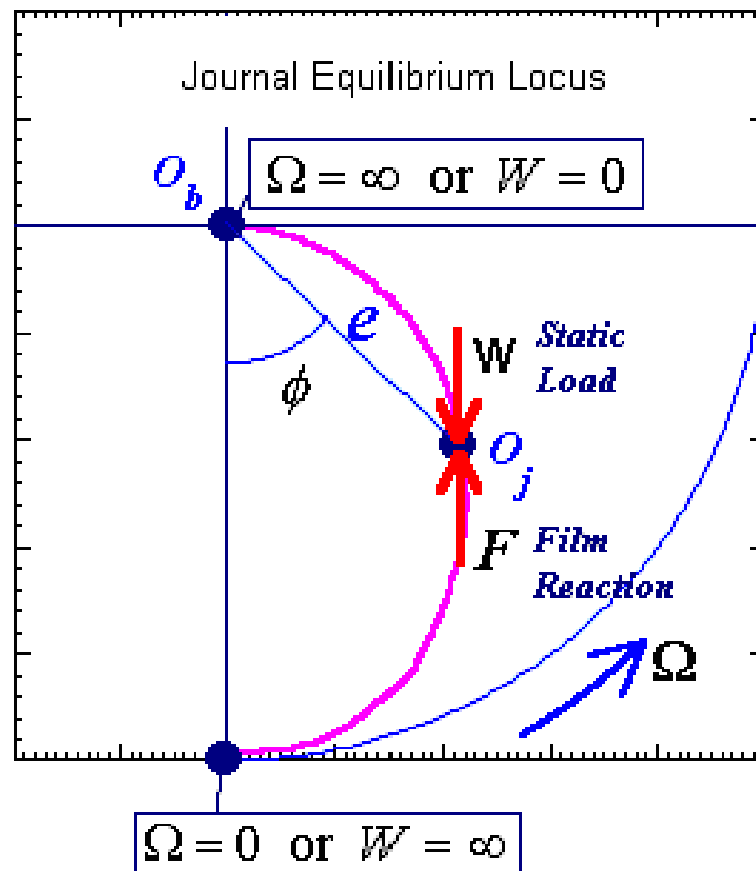
轉子動力分析之特殊考量

:設計考量: 軸承

- 壓力分佈與軸承反力, 勁度及阻尼, 軸承壽命



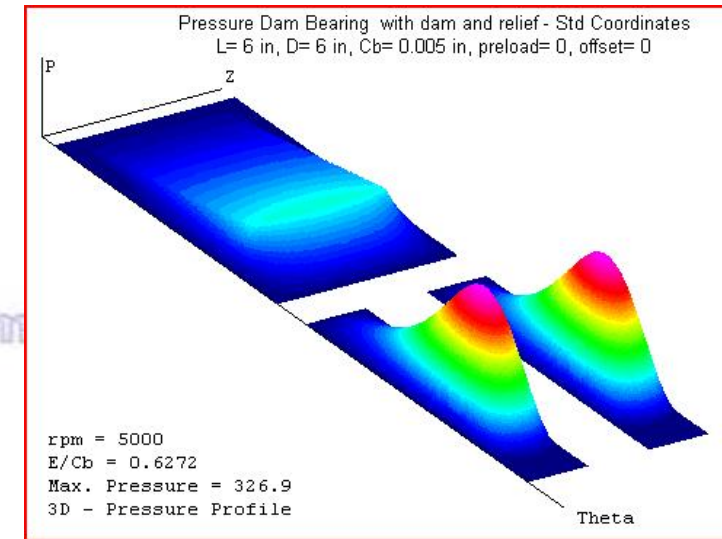
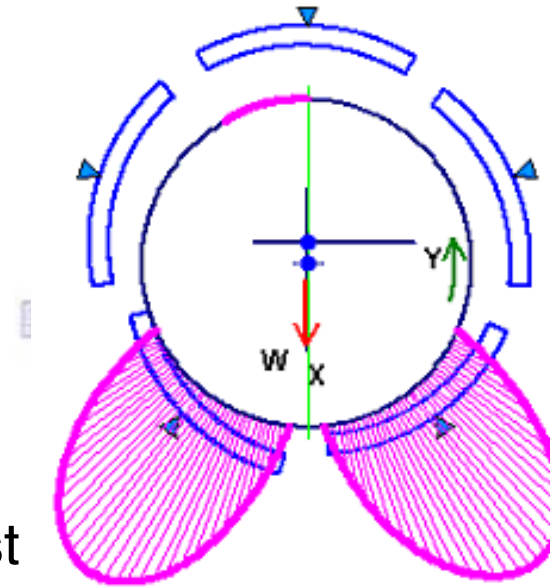
DyRoBeS-Beper
Plain Cylindrical Journal Bearing: L/D= 0.25



轉子動力分析之特殊考量

：特殊軸承考量

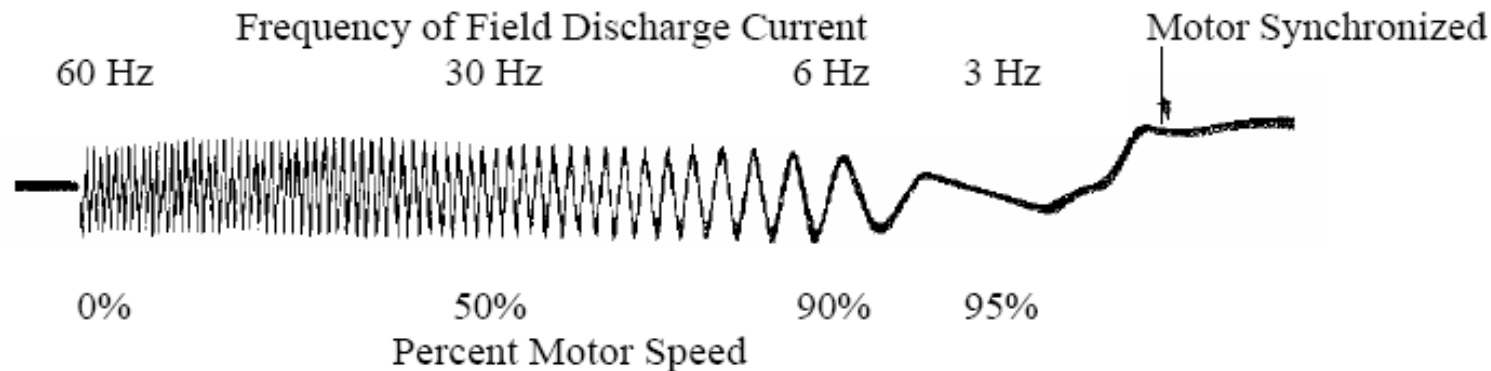
- 常見軸承模式, 包括
 - Fixed-Lobed
 - Tilting-Pad
 - Floating-Ring
 - Gas Journal
 - Thrust Bearing
 - Tapered Land Thrust
 - Tilting Pad Thrust
 - Hydrodynamic Pocket Thrust



轉子動力分析之特殊考量

: 同步馬達

- 同步馬達在起動時會產生振盪扭力, 如果其轉子動力性能未經周祥考慮, 經常造成重大破壞(感應馬達此問題較小)
- 通常起動分析是馬達製造商的責任(通常進行起動暫態分析 Start-Up Transient Analysis)



Waveform of Induced Field Current During Start

轉子動力分析之特殊考量

：其他特殊狀況

- 彎曲軸 Shaft Bow
- 錯位 Misalignment
- 轉盤偏斜 Disk Skew
- 重力效應 Gravity

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

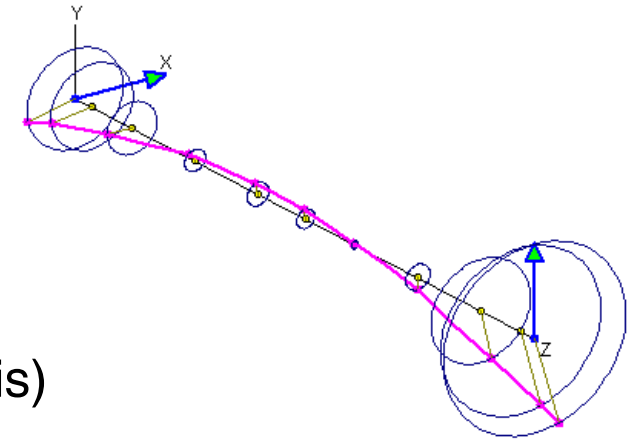
FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

轉子動力分析之特殊考量

：轉子計算特殊考量

- 旋轉機械實務上之關鍵參數
 - 靜態變型及軸承/邊界反力
 - 臨界速度(Critical Speed)
 - 臨界速度圖(Critical Speed Map)
 - 渦旋速度及穩定度(Whirl Speed and Stability)
 - 穩態響應反應(Steady State Synchronous Response Analysis)
 - 暫態(Time Transient)反應
 - 有無組尼之自然頻率與模態(Damped and Undamped natural Frequencies and Modes)
 - 穩態外力反應(Steady State Forced Response)
 - 起動全程反應(Startup Transient)
 - 短路及暫態激發反應(Short Circuit and Time Dependent Excitation Transient)



FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

CAE應用實例

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

分析實例

: (1) 高轉速離心空壓機

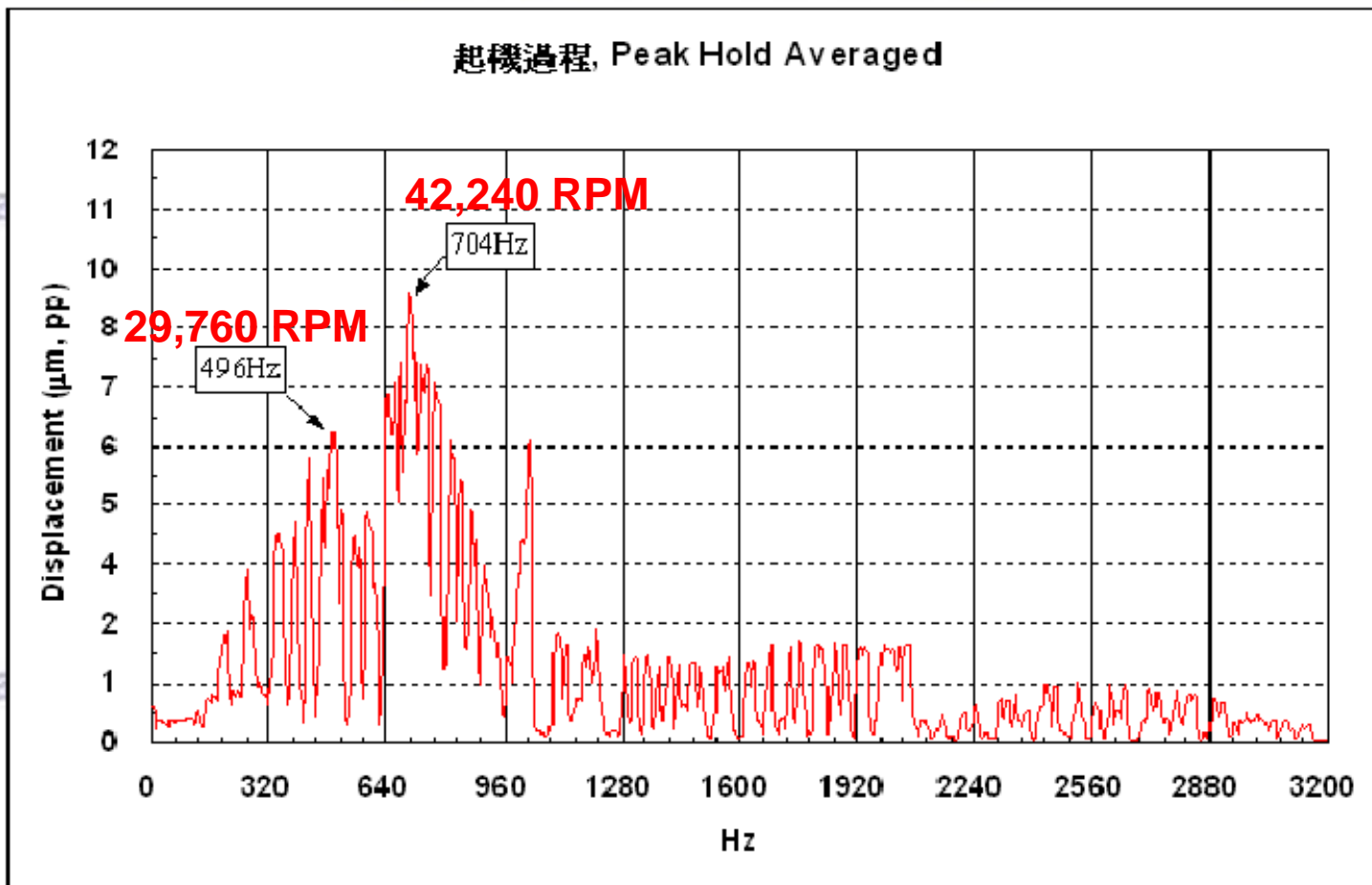
**Pictures are shown in the class.
Not available for print.**

Schenck 動平衡機 R 1B/RI 1

(左)離心空壓機之設計圖 (右)轉軸系統與齒輪箱之安裝圖

分析實例

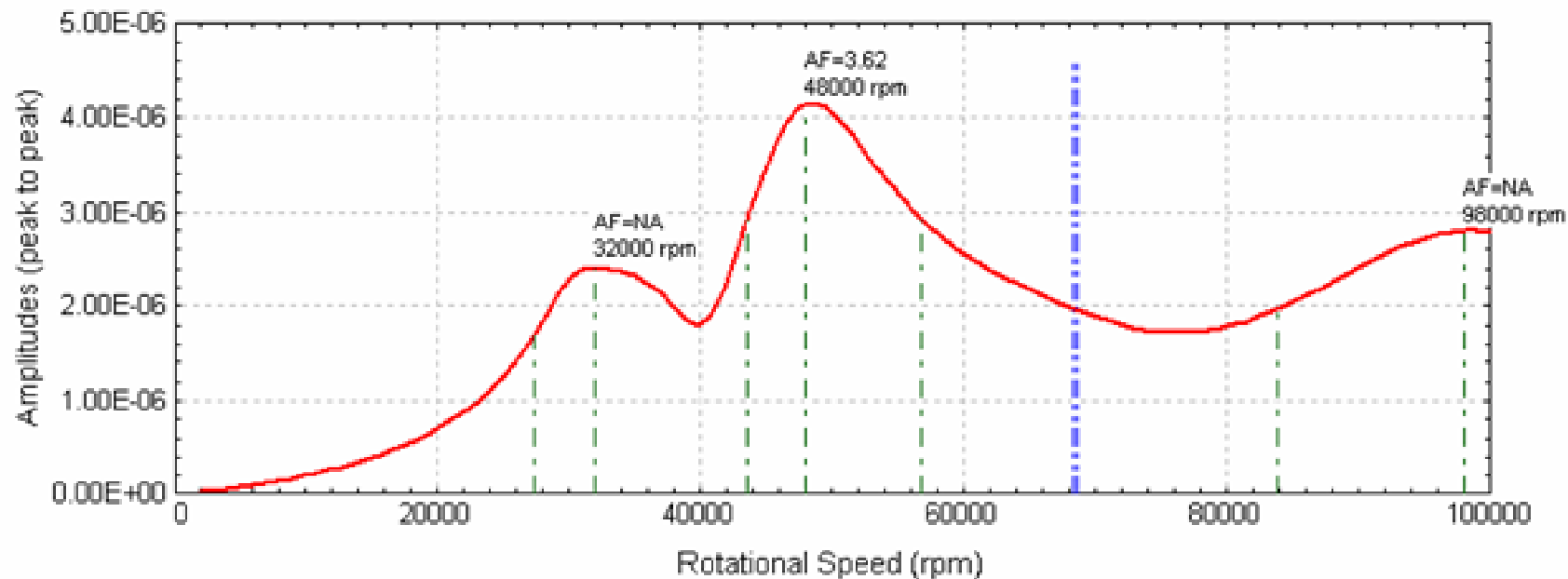
: (1) 高轉速離心空壓機



量測結果

分析實例

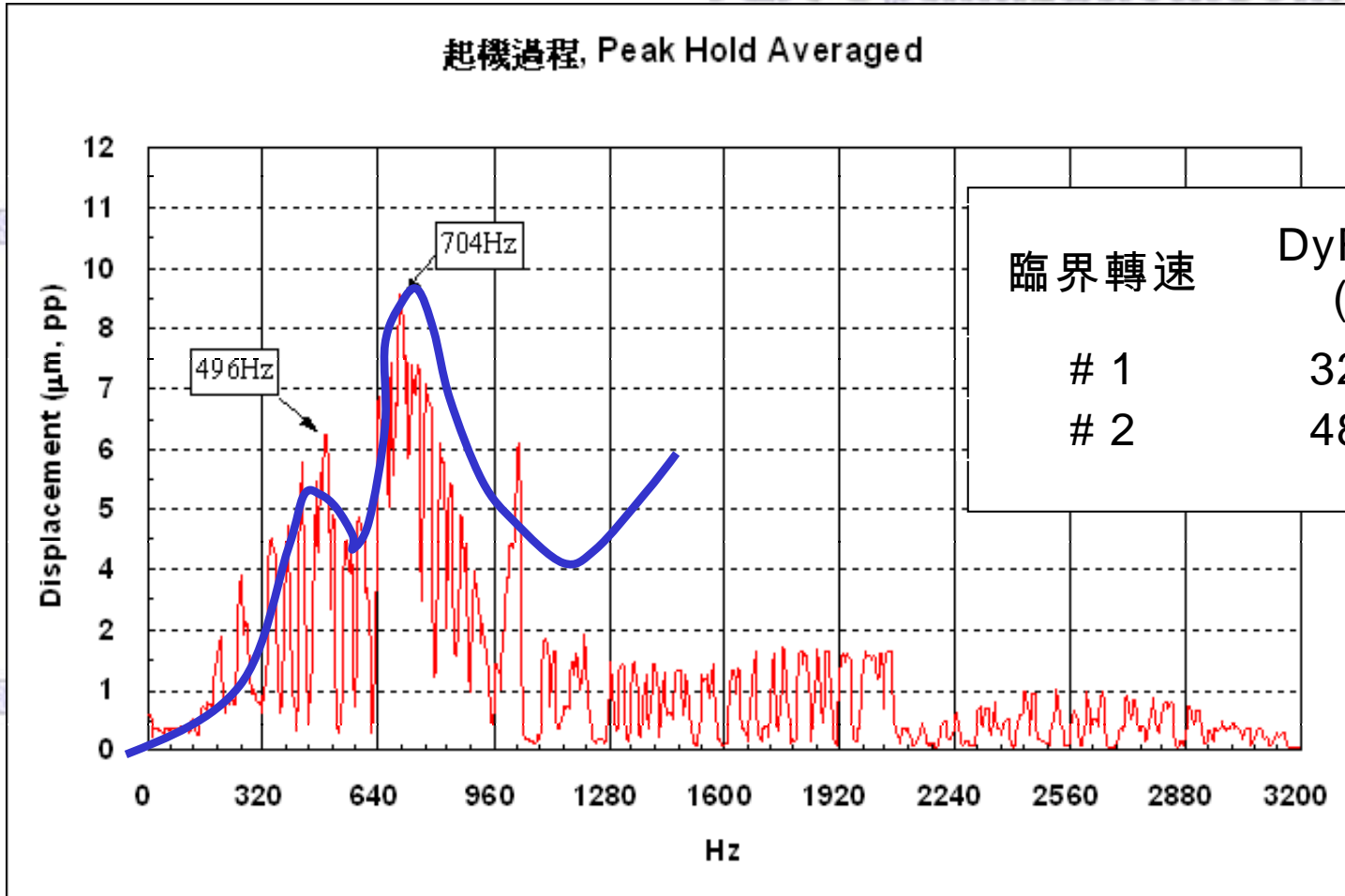
: (1) 高轉速離心空壓機



分析結果

分析實例

: (1) 高轉速離心空壓機



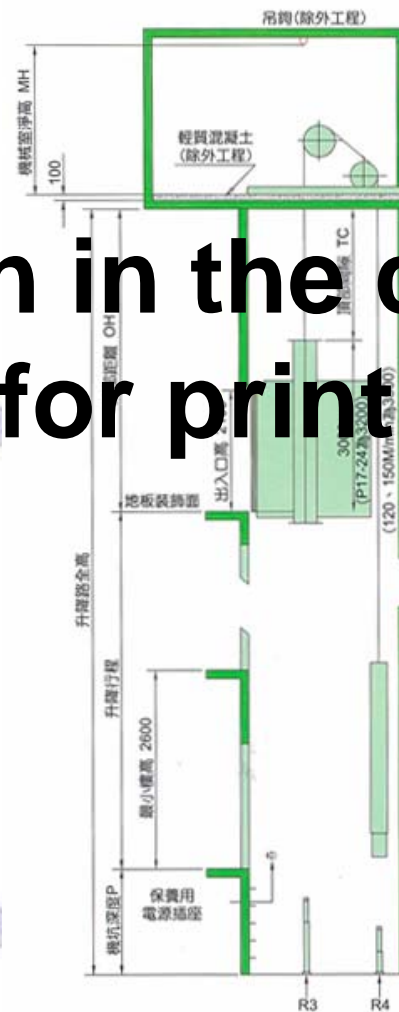
量測結果

分析結果

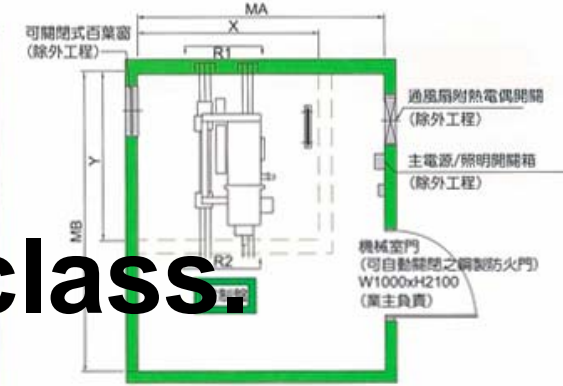
分析實例

: (2) 馬達振噪傳遞分析

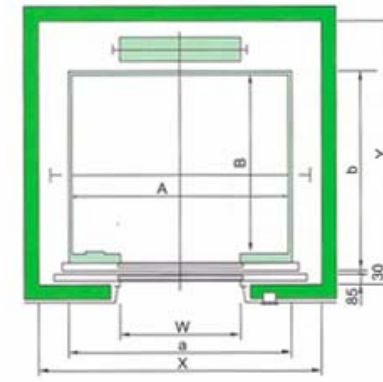
【升降路斷面圖】



【機械室平面圖】



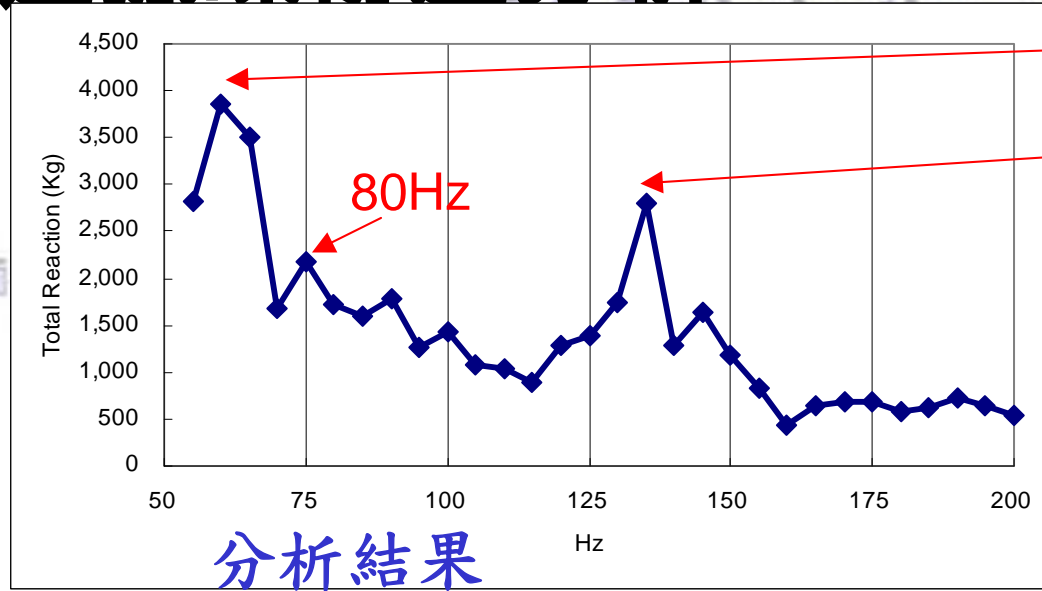
【升降路平面圖】



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

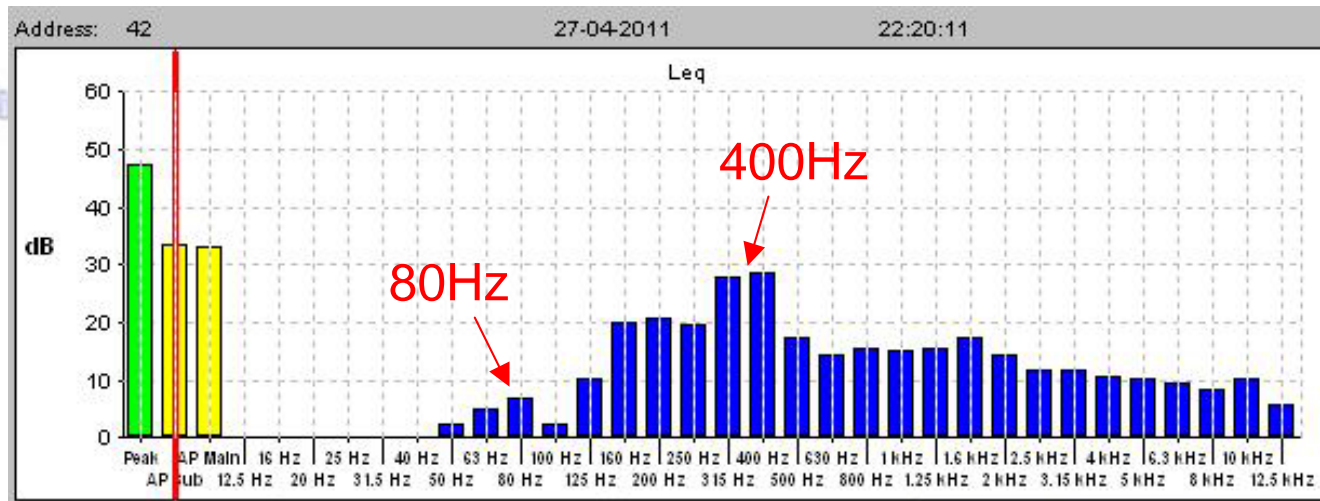
分析實例

: (2) 馬達振噪傳遞分析



60Hz 與馬達轉速吻合

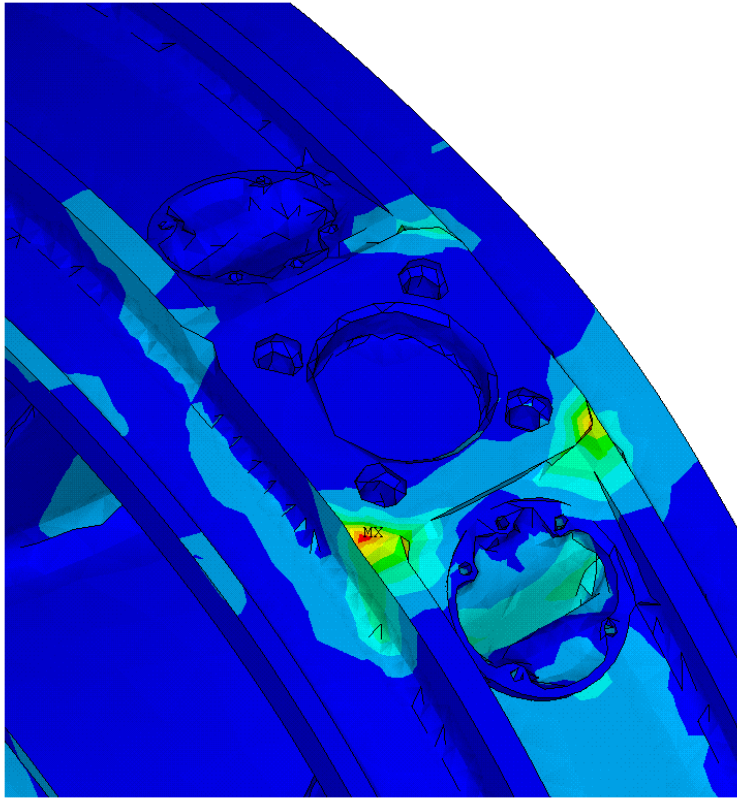
135Hz



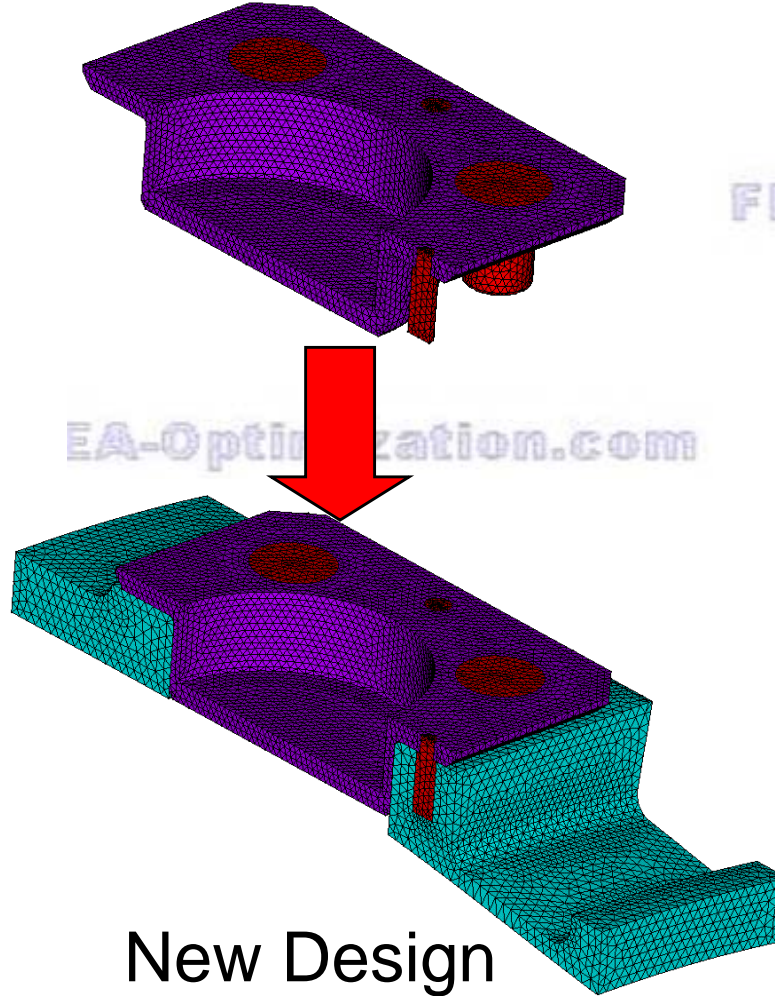
Shen-Yeh Chen, Ph.D.
S-Y.Chen@FEA-Optimization.com
Tel : Mobile : 886-937-485-842
©Copyright. All Rights Reserved

分析實例

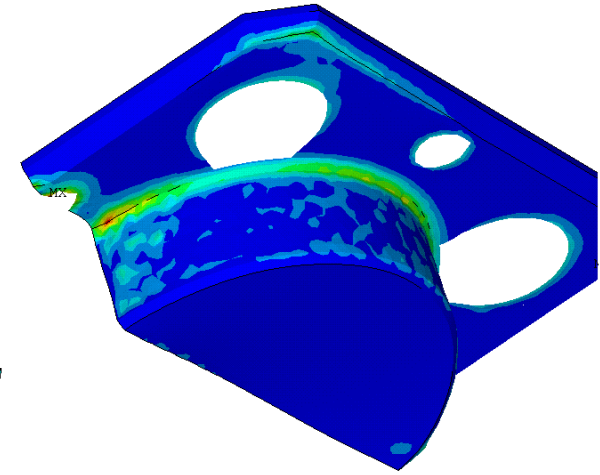
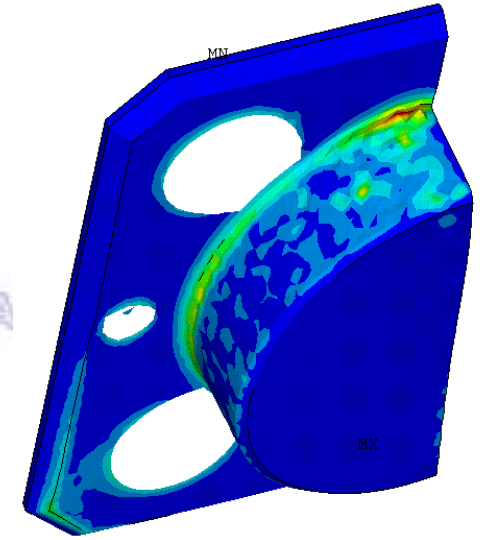
: (3) 結構體應力腐蝕分析與對策



Original Design



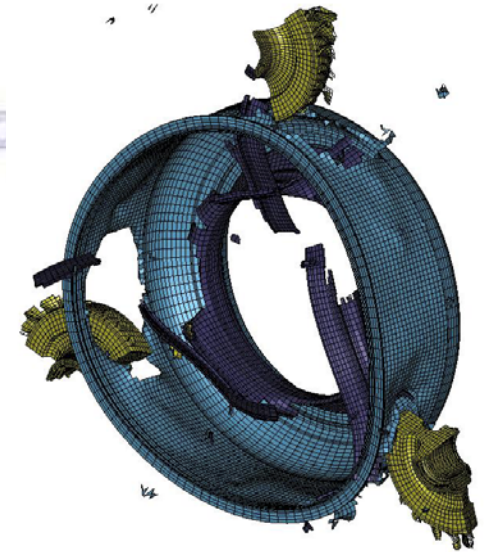
New Design
With Assembly



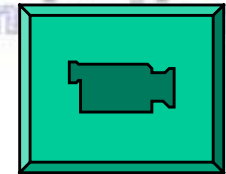
分析實例

: (4) 飛輪爆裂

FEA-Optimization.com



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



FEA-Optimization.com

分析實例

: (4) 飛輪爆裂

FEA-Optimization.com

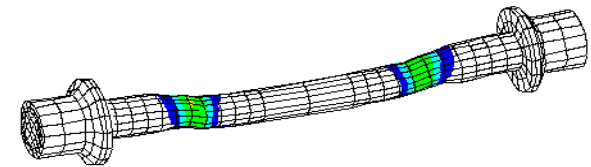
FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com

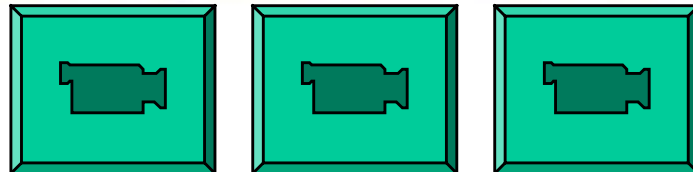
**Pictures are shown in the class.
Not available for print.**

FEA-Optimization.com

FEA-Optimization.com



FEA-Optimization.com **Test Result**



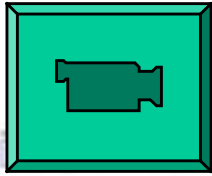
Simulation Result

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

FEA

分析實例

: (5) 其他



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

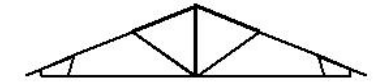
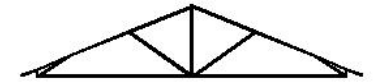
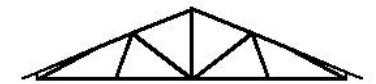
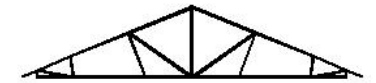
CAE的終極目標:數值最佳化設計

The ultimate stage in CAE : numerical design optimization

為甚麼使用數值最佳化設計

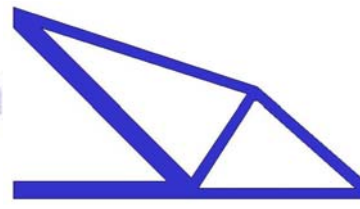
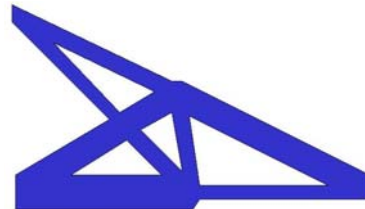
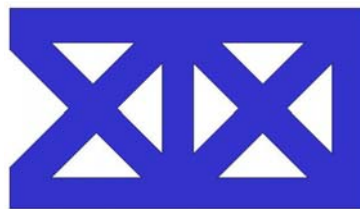
：

FEA-Optimization.com



- CAE的目的,在於最後能以電腦進行設計自動化及最佳化
 - 綠能環保 (ECO-Friendly)
 - 在激烈商業競爭環境下取得先機(Cutting-Edge Competition)
 - 精實的設計與開發(Lean Engineering)
 - 突破性的創意(Break-Through Creativity)
 - 多領域,多目標,多功能,多重物理之設計考量(Multi-discipline, multi-objective, multi-functional, multi-physics)

- 明天,我們將為大家介紹數值最佳化設計的基本概念與應用



im

FEA-Optimization.com

FEA

開放討論

