

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告 期末報告

以三維時變離散模式進行大型風力機用單/多階增速螺旋行星齒輪箱動態特性之研究

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSC 101-2221-E-216-046-
執行期間：101年08月01日至102年11月30日
執行單位：中華大學機械工程學系

計畫主持人：黃國饒

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：李福恩
碩士班研究生-兼任助理人員：陳威伸
碩士班研究生-兼任助理人員：陳證勳
碩士班研究生-兼任助理人員：蔡楠泓

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：

1. 公開資訊：本計畫可公開查詢
2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：否
3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考：否

中華民國 103 年 02 月 21 日

中文摘要：大型風力發電機組已為最具成效的綠能方案，然而機組運轉可靠度仍需進一步提升，增速齒輪傳動系性能為其關鍵，本計畫以三維非線性動態模式進行螺旋行星齒輪箱於受變動負載的動態響應分析，希望獲得風力機齒輪箱分析、設計與應用技術。先獲得螺旋齒輪對等效嚙合剛度以建立非線性時變離散動態模式，然後進行分析以探討不同設計與操作條件下齒輪箱動態特性，數值計算獲得嚙合對間的動態作用力，作為齒輪與軸承的壽命預測基礎，並將動態嚙合力的穩態結果與文獻的實驗結果作比較驗證。在參數分析分面，先討論轉速與扭矩操作條件變動時的動態嚙合力特性，並獲得增減速條件與動態嚙合力的關係，結果也顯示越激烈扭矩改變其動態效應也越明顯。另也分析不同輸入端慣性矩與最大動態嚙合力的關係，顯示慣性矩對於動態力有明顯影響。最後也初步進行二級行星齒輪系統分析，可作為後續多級增速齒輪箱各種條件下的動態特性探討。本計劃所獲得行星式齒輪箱動態技術可以應用大型風力機增速齒輪箱設計與應用，計畫執行過程並培育傳動系統與齒輪實務設計人才。

中文關鍵詞：行星式螺旋齒輪系，變動負載，動態響應，離散模式，非線性剛度，嚙合相位

英文摘要：Large wind turbines have been the most compatible measure for the green energy. Still, a remarkable enhancement of operation reliability is urgently demanded. Among which, an agreement is that their weakest point is the speed-increase gearbox. The objective of this study is further the investigation on the single stage planetary gearing using the three dimensional nonlinear and time varying discrete model under fluctuating loading. The dynamic analysis and design knowledge are pursued. At first, the equivalent meshing stiffness of helical gear pairs is calculated. The derived nonlinear time varying discrete model is established for dynamics for the planetary gearing by which the dynamic characteristics of the gearbox are obtained under various design and operation conditions. The dynamic contact forces of the contact pairs among the gears or bearings are resulted which can be served for life calculation of the gears and bearings in gearbox design. For verification, a steady state dynamic response of a gearbox is compared with a published

experimental result. Besides, the transient meshing force in meshing pair under various operations of speed and torque change are analyzed. The dynamic force of kinds of acceleration and deceleration are obtained. The results also show more of torque change induces server dynamic effect. The effect of inertial is also discussed. The inertial moment imposing on the input shaft also significantly affects the dynamic force. Finally, a dynamic analysis using the approach to the multi-stage planetary gear system is also included. This study establishes an ability of the gear transmission system. The results expect to be applied in the design and application of the gearboxes in the scale of wind turbines. The research assistants are well trained in the gearing and transmission knowledge.

英文關鍵詞： Planetary helical gearing, Fluctuating loading, Dynamic response, Discrete model,

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

(期中進度報告/期末報告)

以三維時變離散模式進行大型風力機用單/多階增速螺旋行星齒輪箱動態特性之研究)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 101-2221-E-216-046

執行期間：101 年 8 月 1 日至 102 年 7 月 31 日

執行機構及系所：中華大學機械系

計畫主持人：黃國饒

共同主持人：

計畫參與人員：李福恩，陳證勛，陳威伸，蔡楠泓

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 1 份：

執行國際合作與移地研究心得報告

出席國際學術會議心得報告

期末報告處理方式：

1. 公開方式：

非列管計畫亦不具下列情形，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

2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：否 是

3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考 否 是， （請列舉提供之單位；本會不經審議，依勾選逕予轉送）

中 華 民 國 103 年 2 月 22 日

摘要

大型風力發電機組已為最具成效的綠能方案，然而機組運轉可靠度仍需進一步提升，增速齒輪傳動系性能為其關鍵，本計畫以三維非線性動態模式進行螺旋行星齒輪箱於受變動負載的動態響應分析，希望獲得風力機齒輪箱分析、設計與應用技術。先獲得螺旋齒輪對等效嚙合剛度以建立非線性時變離散動態模式，然後進行分析以探討不同設計與操作條件下齒輪箱動態特性，數值計算獲得嚙合對間的動態作用力，作為齒輪與軸承的壽命預測基礎，並將動態嚙合力的穩態結果與文獻的實驗結果作比較驗證。在參數分析分面，先討論轉速與扭矩操作條件變動時的動態嚙合力特性，並獲得增減速條件與動態嚙合力的關係，結果也顯示越激烈扭矩改變其動態效應也越明顯。另也分析不同輸入端慣性矩與最大動態嚙合力的關係，顯示慣性矩對於動態力有明顯影響。最後也初步進行二級行星齒輪系統分析，可作為後續多級增速齒輪箱各種條件下的動態特性探討。本計畫所獲得行星式齒輪箱動態技術可以應用大型風力機增速齒輪箱設計與應用，計畫執行過程並培育傳動系統與齒輪實務設計人才。

關鍵詞： 行星式螺旋齒輪系，變動負載，動態響應，離散模式，非線性剛度，嚙合相位

Abstract

Large wind turbines have been the most compatible measure for the green energy. Still, a remarkable enhancement of operation reliability is urgently demanded. Among which, an agreement is that their weakest point is the speed-increase gearbox. The objective of this study is further the investigation on the single stage planetary gearing using the three dimensional nonlinear and time varying discrete model under fluctuating loading. The dynamic analysis and design knowledge are pursued. At first, the equivalent meshing stiffness of helical gear pairs is calculated. The derived nonlinear time varying discrete model is established for dynamics for the planetary gearing by which the dynamic characteristics of the gearbox are obtained under various design and operation conditions. The dynamic contact forces of the contact pairs among the gears or bearings are resulted which can be served for life calculation of the gears and bearings in gearbox design. For verification, a steady state dynamic response of a gearbox is compared with a published experimental result. Besides, the transient meshing force in meshing pair under various operations of speed and torque change are analyzed. The dynamic force of kinds of acceleration and deceleration are obtained. The results also show more of torque change induces server dynamic effect. The effect of inertial is also discussed. The inertial moment imposing on the input shaft also significantly affects the dynamic force. Finally, a dynamic analysis using the approach to the multi-stage planetary gear system is also included. This study establishes an ability of the gear transmission system. The results expect to be applied in the design and application of the gearboxes in the scale of wind turbines. The research assistants are well trained in the gearing and transmission knowledge.

Keywords: Planetary helical gearing, Fluctuating loading, Dynamic response, Discrete model, Nonlinear stiffness, Mesh phase

1. 前言

溫室氣體排放與石油枯竭當前最迫切面對的環保與能源兩大課題，各種新能源方案都被賦以高度期待，其中MW級大型風力發電由於具備發電能量、環保、成本競爭與運轉成效，已確立其綠能領域的主要地位，未來對於更大型離岸風機發展更受高度期待，台灣因其相當優良海陸域風場條件[1]，近期對於風能運用相當重視[2]。然而風力機故障損壞事件仍於世界各地不時發生，其中增速傳動齒輪箱可靠度為其重要關鍵。由於齒輪箱構造複雜，且需要承受風場激烈變化與符合電網安全等規格與環境等多方面嚴苛要求[3]，經驗顯示齒輪傳動系為機組中脆弱點，加以地點偏僻維修點不易到達，維修費用與時程皆高，一直是系統穩定與能源成本預估極不確定因素，當前普遍認為增速齒輪箱可靠度提升是風力機組的運轉性能與可靠度的技術關鍵 [4]，限於篇幅僅相關部分研究列出[5-7]。事實上，MW 級風力發電機組設計為增加扭矩體積比與傳動效率，多需採用行星式齒輪系統型式或行星式齒輪系搭配固定軸式設計或三級全為螺旋行星式齒輪系統。

風力機傳動系動態探討可採用有限元素分析與離散模式兩種分析方法，由於軟硬體限制以及傳動鏈之齒輪系統構造與分析模式皆極為複雜，以FE進行風力機傳動系動態響應計算仍未達實用可行[8]，齒輪傳動系動態分析仍以等效離散模式為主。較早離散模式是以非時變模式計算出系統之自然頻率、振動模態、動態變形與動態力[9, 10]。而August 與Kasuba [11]則進一步考慮齒輪對啮合剛性之變動與太陽齒輪固定方式，對於行星輪齒系統動態力之影響；而Kahraman [12]則考慮不同行星齒輪之個數來計算振動模態以及齒型誤差造成之激振力。另Velex 和Flamand [13]則指出啮合齒對剛性對於行星齒輪系較之太陽齒與環齒之支撐剛性影響大。而Paker [14]則研究啮合相位與齒輪系統動態之關係，而最近有以分析或實驗方法進行行星齒輪的均載特性的研究，以瞭解行星齒輪各齒輪對負載分配情形[15, 16]。本計畫以三維非線性時變模式從事螺旋行星齒輪箱承受變動負載之動態分析，探討各種條件下的齒輪箱動態特性，以獲得行星式齒輪箱的分析設計技術。

2. 行星齒輪系離散動態模式

2.1 行星齒輪系架構

行星齒輪系藉由行星架連接數個行星齒輪軸心繞著太陽齒輪行公轉運行，其分析模型為複雜且多自由度振動系統，圖1(a)是風力機傳動最常使用的2K-H型單階行星齒輪系機構，以行星架c為輸入端太陽齒輪s為輸出端來達成增速的目的，本研究等效離散分析模型如圖1(b)所示。

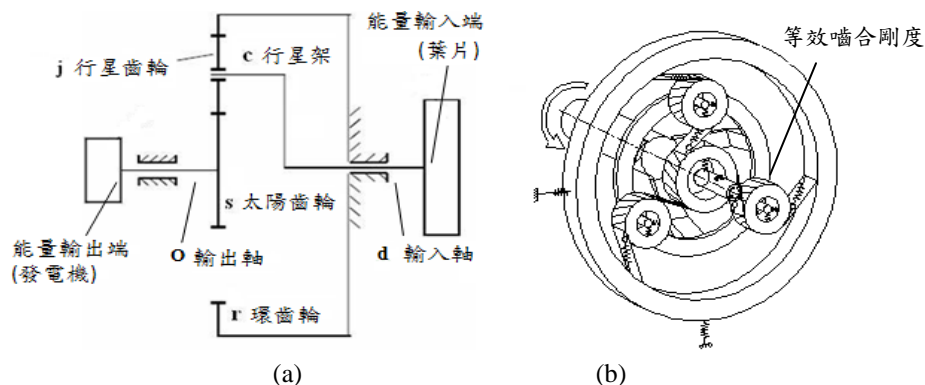


圖1 (a) 2K-H行星齒輪系統組成; (b)等效離散模式

2.2 離散動態方程式

本研究單階行星齒輪系統之彈簧-質量的等效離散模式如圖1(b)，並以拉格蘭吉方程式推

導其運動方程式，包含剛體運動自由度之單級螺旋行星齒輪系離散模式的動態方程式可表示如下

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{F} 分別代表行星齒輪系統質量矩陣、阻尼矩陣、剛度矩陣與激振向量。然後將彈性變形自由度 \mathbf{x}_f 與剛體運動自由度 \mathbf{x}_R 分開表示

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ff} & \mathbf{M}_{fR} \\ \mathbf{M}_{Rf} & \mathbf{M}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_f \\ \ddot{\mathbf{x}}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ff} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_f \\ \dot{\mathbf{x}}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ff} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_f \\ \mathbf{F}_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 \mathbf{K}_{ff} 的構成，包含 n_p 個行星輪與其他組件的齒輪系組合剛度矩陣 \mathbf{K}_{ff} 可寫成(3)式

$$\mathbf{K}_{ff} = \begin{bmatrix} k_{s,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sum_j k_{ij} + k_{s,22} & -k_{ij} & \dots & -k_{m_j} & 0 & 0 \\ & (k_{i1} + k_{i1} + k_{s,22}) & \dots & 0 & -k_{i1} & k_{c1,21} \\ & & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & (k_{m_p} + k_{m_p} + k_{s,22}) & -k_{m_p} & k_{c1,2n_p} \\ & & & & \sum_j k_{ij} & 0 \\ & & & & & \sum_j k_{c1,j} + k_{c1,1} \\ & & & & & k_{c1,22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sym.

2.3 螺旋齒輪對時變等效嚙合剛度

建立離散分析模式之前需邀先獲得螺旋齒輪對時變等效嚙合剛度，齒輪模式考慮包括廣泛齒輪設計參數，如壓力角、螺旋角、齒數搭配、嚙合位置、齒輪移位與修整等。齒輪剛度計算包括輪齒變形、本體基礎變形及赫茲接觸變形影響。圖2說明內/外螺旋齒輪對嚙合與等效彈簧模式的關係，會受到主被動關係、螺旋方向與旋轉轉向影響。圖2(a)是太陽齒輪為主動的右手(RH)螺旋，扭矩為逆時針旋轉方向的等效彈簧的作用方向表示。圖2(b)表示主動左手螺旋行星齒輪(LH)，扭矩方向為順時針旋轉的等效彈簧作用方向。

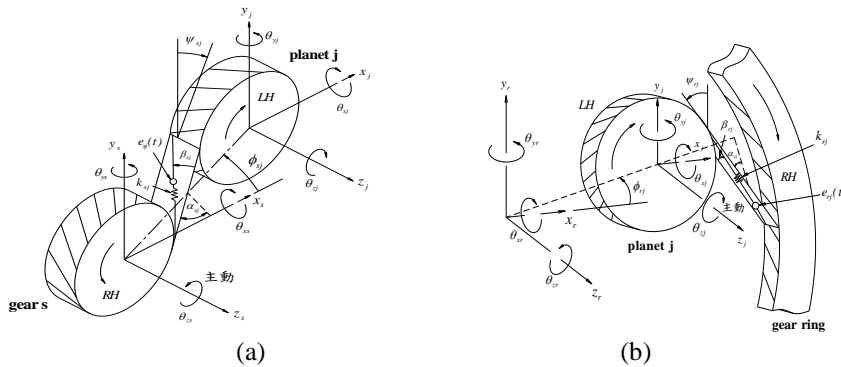


圖2 螺旋齒輪對等效模式：(a)外螺旋齒輪對；(b)內螺旋齒輪對

2.4 軸承剛度

齒輪系統另需軸承、箱體構成以及施加輸出軸的負載慣性矩，其模型如下：

- (i) 軸承剛度矩陣：可由廠商技術資料獲得更精確的軸承剛性值
- (ii) 箱體剛度：齒輪箱體剛度影響的模式複雜，可以進行有限元素分析來獲得其剛度模式，在此先視為剛體，不考慮箱體變形的影響。

2.5 激振條件與動態求解

齒輪系運動方式(1)之動態激振力 \mathbf{F}_1 可包括傳動扭矩、剛體運動慣性力與傳動誤差等來源

$$\mathbf{M}_{ff}\ddot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{M}_{fR}\ddot{\mathbf{X}}_R + \mathbf{C}_{ff}\dot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{K}_{ff}\mathbf{X}_f = \mathbf{F}_f \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{Rf}\ddot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{M}_{RR}\ddot{\mathbf{X}}_R = \mathbf{F}_R \quad (5)$$

當剛體運動加速度為已知條件，如輸出、入軸之角加速度 $\ddot{\mathbf{X}}_R$ 為已知時，直接由(4)式計算出彈性位移 \mathbf{X}_f 如下

$$\mathbf{M}_{ff}\ddot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{C}_{ff}\dot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{K}_{ff}\mathbf{X}_f = \mathbf{F}_f - \mathbf{M}_{fR}\ddot{\mathbf{X}}_R \quad (6)$$

3. 結果與討論

3.1 齒輪對剛度結果

分析一組用於2.2 MW大型風力機第一階螺旋行星齒輪系(21-39-99)，輸入扭矩為 $3 \times 10^5 \text{ Nm}$ ，其法向模數 $m = 10 \text{ mm}$ ，法向壓力角 20° 、螺旋角 $\beta = 7.4947^\circ$ 、齒寬 195 mm 。

首先改變外螺旋齒對的齒輪設計參數，以了解齒對嚙合角度與非線性時變齒對剛度的變化圖3(a)討論螺旋角對於齒輪對剛度的關係，分別設定螺旋角 β 為 7° 、 8° 、 9° 、 10° 與 11° 時各嚙合角度之齒對剛度，在五種螺旋角中 $\beta = 10^\circ$ 有最大的齒對剛度， $\beta = 10^\circ$ 與 $\beta = 11^\circ$ 不同嚙合角度剛度值有較明顯的變化，而螺旋角 $\beta = 8^\circ$ 之齒輪對剛度較為均勻。圖3(b)為分別設定齒寬為330、380、430、480與530mm時各嚙合角度之齒對剛度，五種齒寬中以380 mm時的齒對剛度較均勻，螺旋齒輪對剛度隨著齒寬增大約呈正比增加。圖3(c)為計算齒輪齒數對於齒輪對剛度變化的結果，行星齒輪固定為34齒，太陽齒輪齒數設定為19、21、23、25與27齒時，計算各齒數搭配的齒輪對剛度值，不同齒數搭配下剛度值有規律的變化，且五種齒數中齒對剛度隨著齒數增大約呈正比增加。

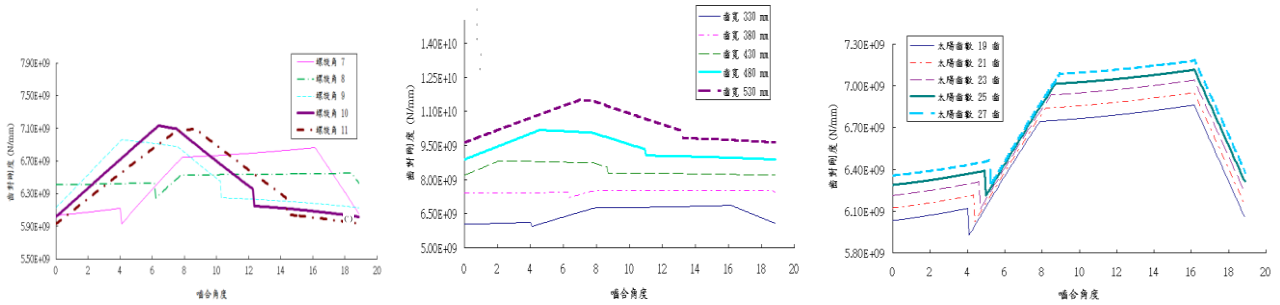


圖 3 齒輪設計參數與齒輪對剛度變化: (a)不同螺旋角;(b)不同齒寬;(c) 不同齒數

3.2 分析結果與 NREL 實驗結果比較

為了驗證所提分析方法與數值結果正確性，因此將所得穩態分析結果(負載慣性矩 $J_c = 15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)先與 NREL 的行星架轉一圈所得到的實驗量測的動態結果進行比較[16]，圖 4 顯示 s-p 與 r-p pair)齒輪對以及 p-c pair 嚙合對間作用力皆與實驗接近，動態分析結果有高頻振動，動態實驗結果所呈現較低頻弦波動與行星架轉動週期性的自重影響有關，本研究結果則尚未考慮自重之影響。

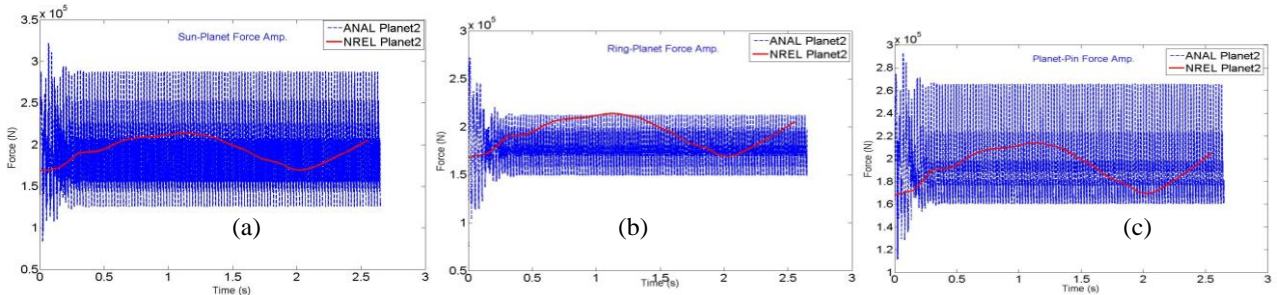


圖 4 行星齒輪系統動態力與 NREL 實驗結果比較：(a) s-p pair；(b) r-p pair；(c) p-c pair

3.3 動態變形與動態嚙合力

以下為行星齒輪系統在額定轉速 20rpm 總運轉期間 0.2 秒共三種起動與停機條件的動態響應特性。分析過程從 $t_0=0$ 秒，靜止開始進行等加速行程，在 t_1 時輸入軸到達額定轉速 ω_1 ，維持定速到 t_2 開始減速 t_3 時到達停止並保持自由振動到 t_4 。三個加速度比率 α_1 設定的行星齒輪的平移與旋轉位移如圖 5 所示，較小 α_1 值有較大的變形量。因為小 α_1 代表齒輪系起動與停機的速度改變較為激烈。

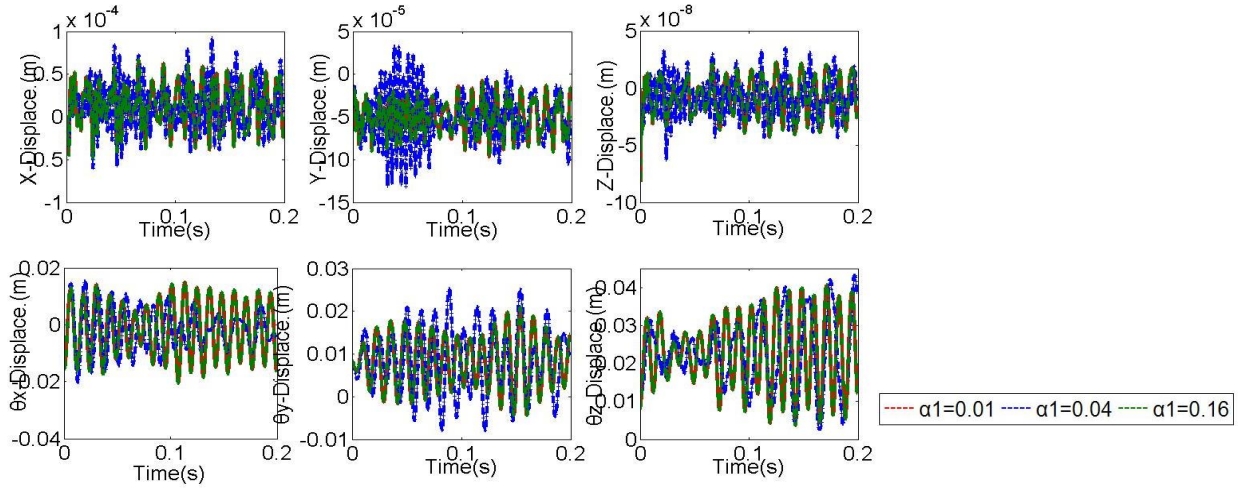


圖 5 三種加減速比率 (α_1) 條件下之第二個行星齒輪的 6 自由度動態位移

圖 6(a) 與 6(b) 分別是太陽齒輪與行星齒輪間的嚙合力以及環齒輪與行星齒輪間的嚙合力，而圖 6(c) 則是行星齒輪與支撐軸承間作用力。同樣的動態響應最嚴重的是出現啟動的停止最激烈的條件下，即 $\alpha_1=0.01$ 時。寫出其動態作用力最大值在 $\alpha_1=0.0$ 時，太陽齒輪與行星齒輪間的嚙合力為 $2.99 \times 10^5 \text{ N}$ ，而在 $\alpha_1=0.05$ and 0.1 則分別為 $2.84 \times 10^5 \text{ N}$ 與 $2.50 \times 10^5 \text{ N}$ 。環齒輪與行星齒輪間的嚙合力在 $\alpha_1=0.0$ 時為 $3.29 \times 10^5 \text{ N}$ 較大於 $\alpha_1=0.05$ 與 0.1 設定的 0.17×10^5 與 $2.61 \times 10^5 \text{ N}$ 最後行星齒輪與支撐軸承間作用力方面即在 $\alpha_1=0.0$ 時其動態作用力最大值 $4.55 \times 10^5 \text{ N}$ 大於 $\alpha_1=0.05$ 與 0.1 的 $4.33 \times 10^5 \text{ N}$ 以及 $3.77 \times 10^5 \text{ N}$ 。

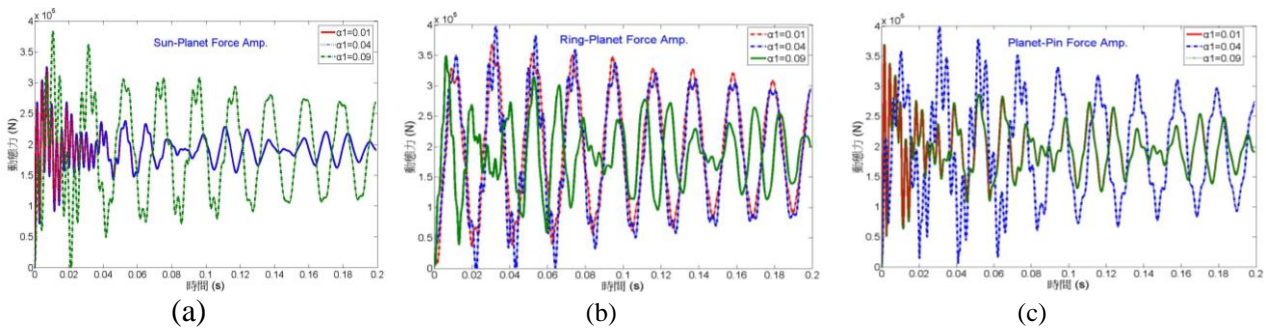


圖 6 三種加速時間比率 (α_1) 的行星齒輪動態嚙合力：(a) s-p 對；(b) r-p 對；(c) p-c 對

3.4 不同加速度動態力響應

討論改變齒輪系統加減速度狀態有助於齒輪系統在速度變動條件下的動態響應分析。初始 $\omega_0=0$ 增到 $\omega_1=22.2 \text{ rpm}$ 的動態特性， $\alpha_3=1$ ，並設定 10 種加速時間比率設定。圖 7(a) 是所得到一組行星齒輪與各嚙合齒輪與軸承間的動態作用力響應曲線。圖 7(b) 則為不同加速比例設定的嚙合對間的最大動態嚙合力，顯示在小 α_1 條件下齒輪對或與軸承間有較大動態嚙合力，越快增速過程的動態效應而出現較大動態嚙合力。

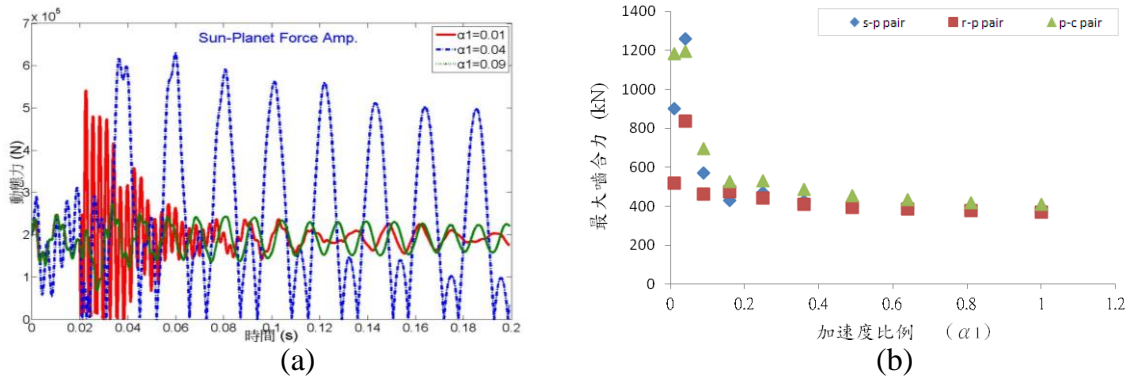


圖 7 三種加速時間比率(α_1)動態響應：(a) s-p 對的嚙合力；(b)各嚙合對最大動態嚙合力

3.5 不同增載條件的動態力特性

分析行星齒輪系統在傳動扭矩變動的操作條件下的動態嚙合力響應特性，討論五種扭矩負載增加條件下行星齒輪動態響應特性。額定轉速 $\omega_1=22.2$ rpm 並持續轉速到一段時間，其過程為從五種起始扭矩增加負載到 3.226 kNm，圖 8(a)三種不同起始扭矩下 s-p 對的動態嚙合力。圖 8(b)則是五種增加負載下一組行星齒輪與各嚙合齒輪與軸承間的最大動態嚙合力，顯示越小起始負載條件下齒輪對間動態力有較大的嚙合力，與起始扭矩負載條件呈合理變化，越大程度的負載變動會有越激烈的動態效應。

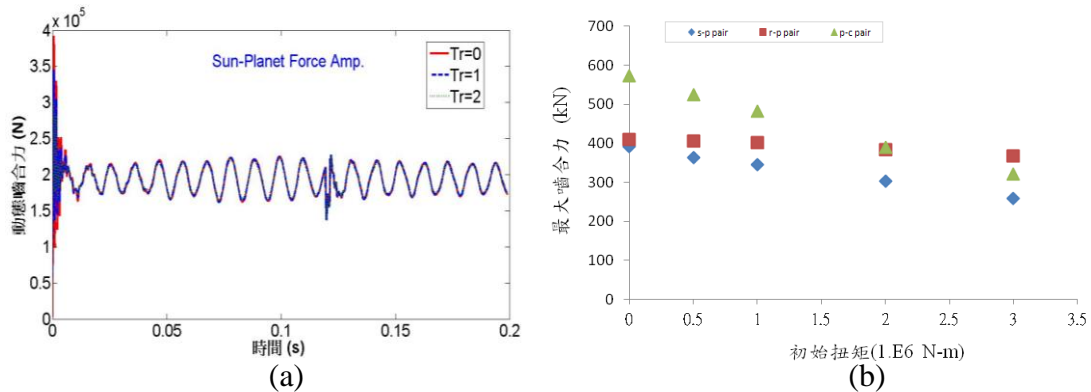


圖 8 三種不同扭矩增載動態響應：(a) s-p 對的嚙合力；(b)各嚙合對最大動態嚙合力

3.6 不同慣性矩條件下的動態力特性

討論行星齒輪系統，通過增速行星齒輪系統將動力由連結太陽齒輪之傳動軸增速輸出，討論行星齒輪系統在額定轉速 22.2rpm 總運轉期間 0.2 秒，分析三種慣性矩($J_c = 1.5, 15, 150\text{kg}\cdot\text{m}^2$)條件的動態，數值結果不同線形表示：(--- $J_c=1.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$ --- $J_c=15\text{kg}\cdot\text{m}^2$ --- $J_c=150\text{kg}\cdot\text{m}^2$)。圖 7 則為三種不同慣性矩的內/外齒輪對間或者齒輪與支撐銷間的作用力圖 9(a)與 9(b)分別是太陽齒輪與行星齒輪 (s-p pair)間的嚙合力以及環齒輪與行星齒輪(r-p pair)間的嚙合力，圖 9(c)則是行星齒輪與支撐軸承(p-c pair)間作用力。

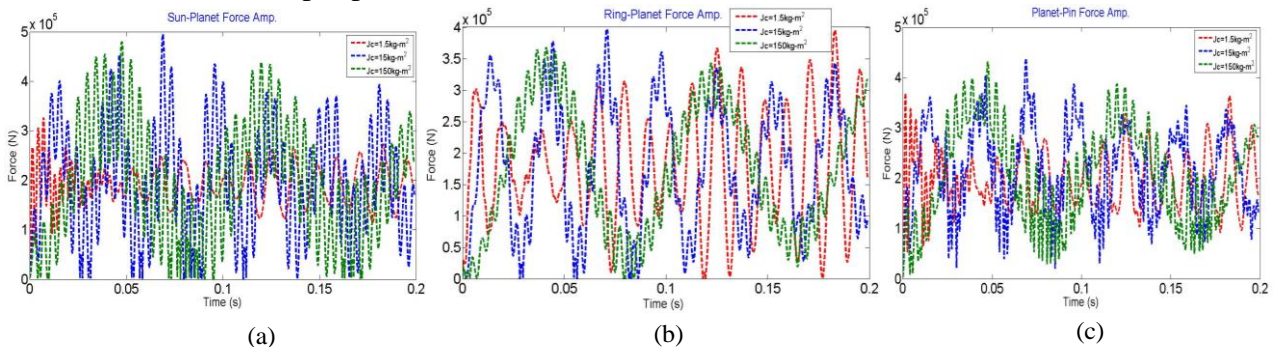


圖 9 三種慣性矩條件的行星齒輪動態嚙合力：(a) s-p pair；(b) r-p pair；(c) p-c pair

3.6.1 不同速度的最大動態嚙合力

圖 10 整理不同輸入軸(風力機葉片)運轉速度設定所得到其中一組行星齒輪與各嚙合齒輪隊與軸承嚙合間的動態作用力最大值，顯示在不同慣性矩與相同 α_1 值條件下，增加輸入軸轉速時其加速度將隨之增加，因此其三種慣性矩下的各嚙合對的暫態的動態嚙合力最大值皆呈現些微增加，即其增幅並不明顯。

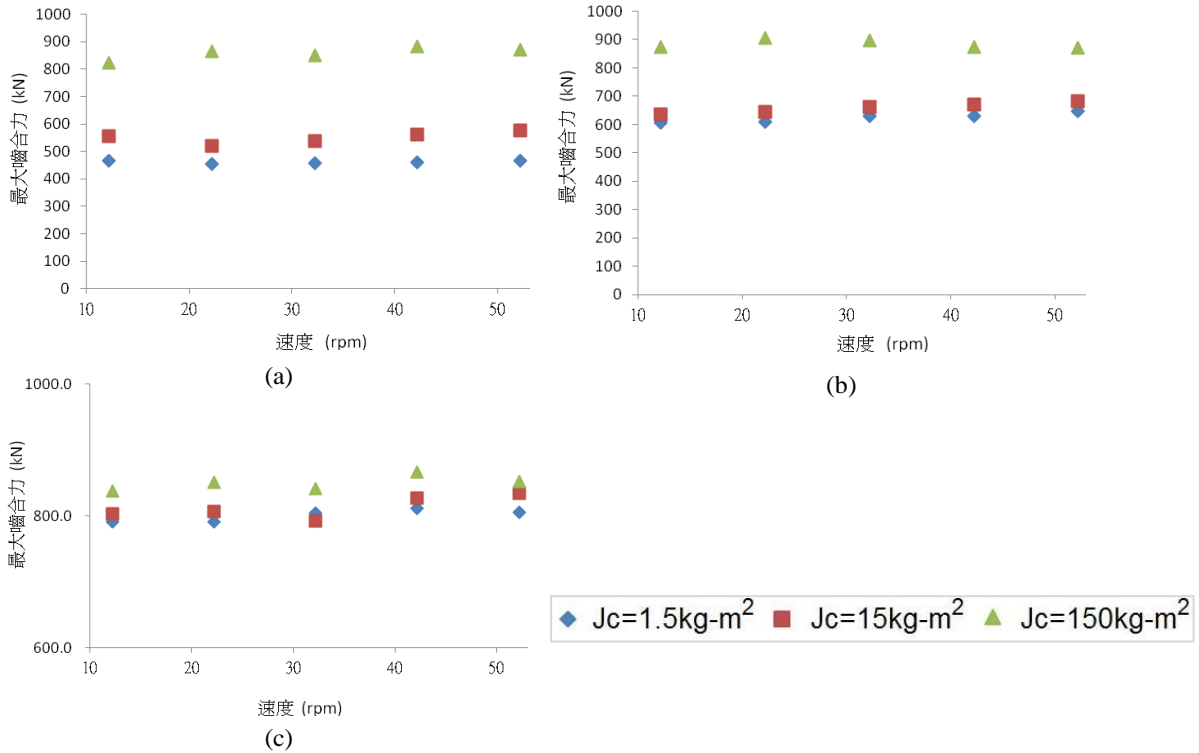
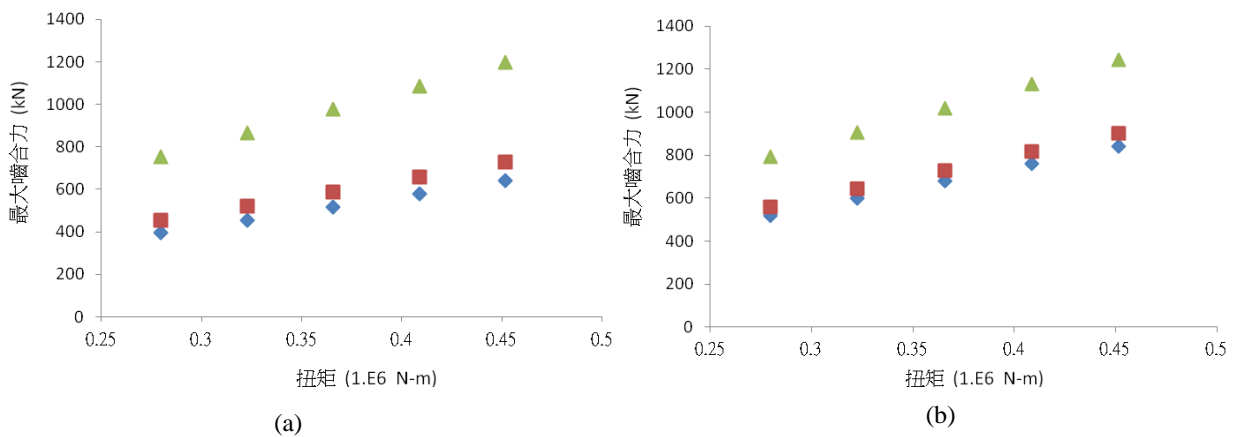


圖 10 不同速度下嚙合對的最大動態力：(a) s-p pair；(b) r-p pair；(c) p-c pair

3.6.2 不同輸入扭矩的最大動態嚙合力

圖 11 則是改變齒輪系輸入軸扭矩(連結風力機葉片)下所得到其中一組行星齒輪與相嚙合的太陽齒輪與環齒輪以及與行星架軸承間的動態嚙合力。結果顯示大慣性矩會出現明顯大動態作用力最大值，而較大傳動扭矩也造成較大的動態力最大值，其最大動態力數值與慣性矩與傳動扭矩值約呈比例關係。



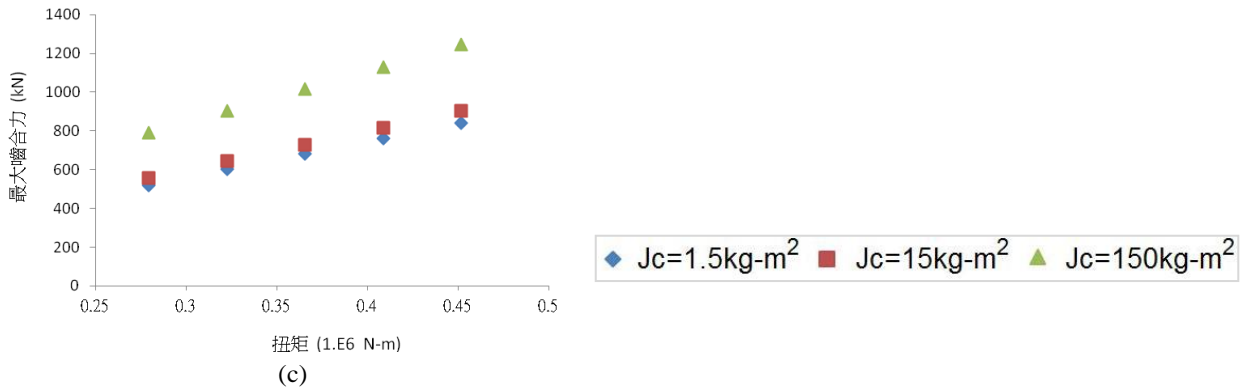


圖 11 不同扭矩嚙合對的最大動態力：(a) s-p pair；(b) r-p pair；(c) p-c pair

3.7 二階行星齒輪系動態分析

以下分析二階行星齒輪系模態特性，二階行星齒輪系是由第一階輸出端和第二階輸入端連結所組成的，第一階為行星齒輪系為 (72-36-144) 系統，第二階行星齒輪系 (34-61-154)，其 2D 網格與離散模型如圖 12 所示，經模態數值分析，其結構模態共有 48 個，結構模態包含 22 個平移模態、8 個旋轉模態、18 個行星模態，其自然頻率與模態型式如表 1 所示，部份自然頻率與模態圖顯示於圖 13(a)-13(c)。

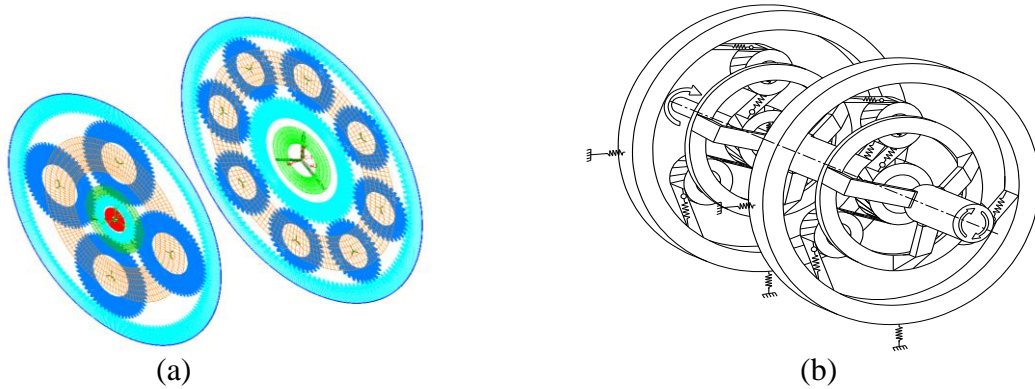


圖 12 二階行星齒輪系分析模式：(a) FE 模型；(b) 離散模型

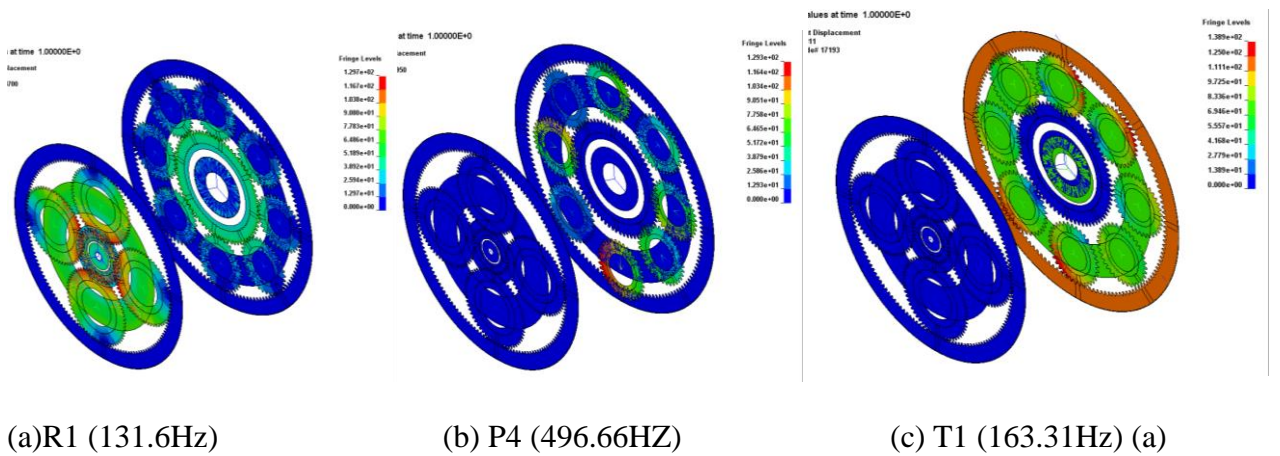


圖 12 二階行星齒輪系動態分析結果

表 1 二階行星齒輪系之自然頻率與模態型式

模態型式	重複數	自然頻率 ω (Hz)
平移模態 T_i	2	163.31、163.35、312.9、313.72、452.34、460.1 614.81、616.23、628.55、630.85、952.33、965.24 1171.8、1185、1333.9、1338、1526.5、1528.1 1706.7、1706.9、2490.8、2568
旋轉模態 R_i	1	131.61、497.15、715.62、1031.9、1271.4、1443.7 1751.3、2855.9
行星模態 P_i	N-1	496.65、496.65、496.65、496.66、496.66 885.48、1216.2、1288.7 1297.9、1297.9、1299.6、1299.6、1300.2 1549.9、1550、1551.4、1551.5、1552.1
備註 N：行星齒輪的個數		

4. 結論

MW級大型風力發電機組是已具成效的綠能方案，然而機組運轉可靠度仍需進一步提升，增速齒輪傳動系亦為關鍵，因此分析經年風場變動與電網安全嚴苛的速度與負載動態條件下的齒輪響應特性對於提升風力機可靠度極為重要。本文應用三維等效離散剛性模式探討具有加減速與負載變動運轉條件的單級增速螺旋行星齒輪系統暫態與穩態特性，應用等效彈簧表示螺旋齒輪對並考慮齒輪嚙合、軸承、輸出入軸與箱體模型，施加轉速與傳動扭矩運轉條件，計算出齒輪對與軸承間動態位移與動態嚙合力，穩態嚙合力數值結果並與文獻的實驗結果比較(未顯示)，最後討論各種轉速與負載變動時動態嚙合力特性，顯示在各種加速與減速時間比率條件下齒輪對與軸承嚙合動態力與加速度接呈合理變化，越激烈的增減速與負載變動有越大的動態嚙合力，同樣的激烈扭矩改變則動態響應越明顯，此外也分析慣性矩對於最大動態嚙合力僅有些許影響。所得結果希望作為相關領域齒輪傳動系統設計與運轉應用，初步的二級系統結果則為後續多級增速齒輪箱動態分析基礎。本計劃所獲得行星式齒輪箱動態技術與結果可以用於提升大型風力機增速齒輪箱設計與應用技術。

5. 誌謝

本報告為國科會編號NSC101-2221- E-216-046之計畫，由於國科會的支持，讓本研究得以順利進行，特此致謝。

6. 參考文獻

1. T. J., Chang, Y.T. Wu, H. Y. Hsu, , C. R. Chu, and C. M. Liao, 2003, "Assessment of Wind Characteristic and Wind Turbine Characteristic in Taiwan," *Renewable Energy*, Vol.28, pp.851-871.
2. <http://wind.itri.org.tw>
3. U. Giger, K. Arnaudov, 2011, "Redesign of a Gearbox for 5MW Wind Turbines," ASME IDETC/CIE 2011, Washington, DC, USA.

4. Wind Turbine Data Summary Table 2. Wind Stats Newsletter.
5. T.J.,Chang,Y.T.Wu,H.Y.Hsu,C.R.Chu, andC.M.Liao,Vol.28,pp.851-871, “Assessment of Wind Characteristic and Wind Turbine Characteristic in Taiwan,” *Renewable Energy*, 2003
6. W. Musial, S. Butterfield, and B. McNiff, “Improving Wind Turbine Gearbox Reliability,”NREL/CP-500-41548, European Wind Energy Conference, Milan, Italy , 2007.
7. U. Giger, K. Arnaudov, “Redesign of a Gearbox for 5MW Wind Turbines,” ASME IDETC/CIE 2011, Washington, DC, USA, 2011.
8. P. Prueter, R. Parker, and F. Cunliffe, 2011, A Study of Gear Root Strains in a Multi-stage Planetary Wind Turbine Gear Train Using a Three Dimensional Finite Element/Contact Mechanics Model and Experiments, *Proceedings of the ASME IDETC/CIE 2011*, Washington, DC, USA.
9. M. Botman, 1976, Epicyclic Gear Vibrations, *ASME Journal of Engineering for Industry*, pp. 811-815.
10. T. Hidaka, Y. Terauchi, and K. Nagamura, 1979, Dynamic Behavior of Planetary Gear-5th Report, Dynamic Increment of Torque, *Bulletin of the JSME*, Vol. 22, pp.1017-1025.
11. R. August and R. Kasuba, 1986, Torsional Vibrations and Dynamic Loads in a Basic Planetary Gear System, *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 108, pp. 348-352.
12. Kahraman, 1994, Planetary Gear Train Dynamics, *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 116, pp.713-720.
13. P. Velez and L. Flamand, 1996, Dynamic Response of Planetary Gear Trains to Mesh Parametric Excitations, *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 118, pp.7-14.
14. R. B. Parker, 2000, A Physical Explanation for the Effectiveness of Planet Phasing to Suppress Planetary Gear Vibration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 236, pp. 561-573.
15. A. Montestruc, 2011, Influence of Planet Pin Stiffness on Load Sharing in Planetary Gear Drives, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 133, pp. 014501-1–014501-7.
16. H. Ligata, A. Kahraman, and A. Singh, 2008, An Experimental Study of the Influence of Manufacturing Errors on the Planetary Gear Stresses and Planet Load Sharing, *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 130(4), pp. 041701.1-041701.
17. W. Musial, S. Butterfield, and B. McNiff, 2007, “Improving Wind Turbine Gearbox Reliability,” NREL/CP-500-41548, European Wind Energy Conference, Milan, Ital

報告人姓名	黃國饒	服務機構及職稱	中華大學, 教授
時間 會議 地點	10/1 -10/ 4, 2013, Singapore, Nanyang Technological University	本會核定 補助文號	NSC-101-2622-E-216-046.
會議 名稱	(中文) (英文) The 3rd IFTOMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, Singapore (ISRM 2013)		
發表 論文 題目	(中文) (英文) Dynamic Analysis of Planetary Gear Increaser Using a Varying Stiffness Discrete Model		

報告內容應包括下列各項：

一、參加會議經過

- 10/1, 07:40 - 12:00 上午至台灣桃園機場搭乘 BR-225 直飛新加坡樟宜機場，並下行李到飯店後直奔 NTU 開始參與大會活動。
- 10/1, 14:30 - 19:00 註冊報到(圖 1)、參加 NTU 校園導覽活動(圖 2)與歡迎會。
- 10/2-10/4 全程參加 ISRM 2013，共聆聽了包括 Keynote speech 約 25 篇之論文與技術發表並提問討論 (圖 3)。
- 10/2, 13:20-15:20 於 WeB2 場次進行本次發表之論文宣讀約 20 分鐘 (圖 4、圖 5)。
- 10/3, 14:00-18:30 參加大會安排的 Culture tour (圖 6)。
- 10/3, 18:30 參加此次 ISRM 2013 聚會，與各地區領域研究者進行討論交流。
- 10/4, 15:10-17:30 參加大會安排的 Technological tour，參觀 NTU 的機器人研究中心 (Robotics Research Centre , RRC) (圖 7)與 Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech) (圖 8)。
- 10/4, 17:30-19:30 參加離別會，再與各地區學者交流並到再會。
- 10/5, 上午至樟宜機場搭乘 BR-226 於晚上返抵桃園機場。

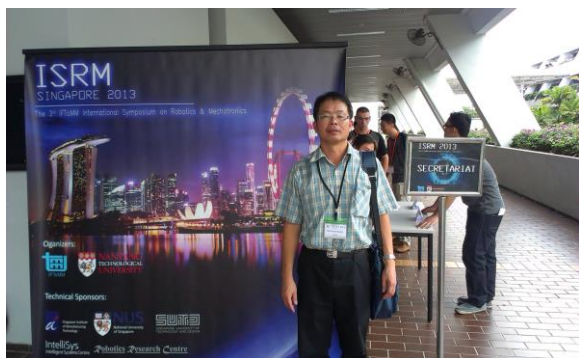


圖 1 報到註冊



圖 2 NTU 校園導覽活動



圖 2 聆聽論文發表



圖 4 進行論文宣讀



圖 5 論文宣讀後意見討論



圖 6 參加 Culture tour



圖 7 參觀 NTU 機器人實驗室



圖 8 參觀 SIMTech

二、與會心得

此次為本人第四次參加於國外舉辦機械傳動與自動化技術相關領域的主要國際學術研討會，由 IFToMM 相關組織所舉辦之交流活動則是首回，在機器人技術與機電整合領域有相當收穫，對於增進國際視野與相關研究現況了解與方向規畫，頗有幫助。本次 ISRM2013, Singapore 是由 IFToMM TC 新近所倡議支持每兩年舉辦一次的世界性學術交流會議，其目的在促進各地區機器人與機電整合相關領域的學術研究與產業連結交流。此次 ISRM 為第 3 屆會議，由新加坡的機器人研究重鎮點大學的 NTU 機械與航太系所承辦，相關領域主要研究者出席者眾，包括台灣、中國、日本、俄羅斯、越南、法國等 15 國相關研究者與會計 78 篇論文發表，主要領域包含 parallel manipulators, bio-inspired robotics, mobile robotics, locomotion and gait planning, sensors and sensing systems, actuators and drive mechanisms, compliant mechanisms, 與 motion tracking and localization 等，本人此次發表之論文為 Dynamic Analysis of Planetary Gear Increaser Using a Varying Stiffness Discrete Model 提出以離散模式進行大型風力機的單接行星齒輪系統之動態特性分析將可以應用於廣泛行星齒輪系統之動態與模態與設計應用，此論文雖是風力機的傳動系統動態的探討，所建立的離散分析方法與齒輪動態結果應有機會應用於磯崎人研

究上，在論文宣讀後並與現場提問者交流討論。全程參與研討會各分組之論文發表共聆聽了約25篇之論文發表，包括parallel manipulators, actuators and drive mechanisms, Modeling and Analysis等領域相關研究，也包含兩篇的風力機一些機電研究相關發表，並主動與各國與會學者與專家交談，進行廣泛交流，包括北京航天大學的顏教授，上海交大，日本東京工業大學的武田教授，越南河內大學教授，等。而兩場Keynote speech中其一為現任IFToMM總裁的日本東京大學Yoshihiko Nakamura教授提出核電廠災變與除役所需機器人技術與展望提出看法，另一則由相當工研院機械所的SIMTech執行長對於新加坡製造設備與應用技術的發展現況與未來展望進行介紹，希望對於新加坡的未來經濟發展提供穩固的基礎，並且也希望透過學術與產業交流擴大國際合作並促進產業發展，接著並SIMTech的工業機器人應用於製造業發展，對象由各執行計畫負責人在工業論壇中說明與交流，並初步以發展飛機發動機航太維修為機器人的初步應用目標。透過學術研討會進行產學聯結與溝通是很值得學習的方式，然而深度則仍有待加強。

三、考察參觀活動(無是項活動者省略)

本人於10/3, 14:00-18:30 參加大會安排的 Culture tour (圖9)，據稱此園區以生態環保概念構建，共花費10億新幣鉅額建造於2012剛完成開放，以此觀念，除巨大園區建設搭配大量種植世界各區的珍奇植物，來構建出高度引人注目的世界級教育與旅遊景點，結合具特色建築與高度環保視野達到厚實豐富新加坡原本已具備高度競爭力的服務業，此部分於國內產官民單位應可有相當參考性。此外於10/4, 15:10-17:30 參加大會安排的 Technological tour，參觀NTU Robotics Research Centre, RRC (圖9、圖10)與Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech)，參觀各些科技研發的執行與成果後，都可看到新加坡在已具備深厚旅遊與服務業的基礎下，為確保國家的永續發展，擇定目標、集中資源進行重點發展的成果，此部份發展水準目前與國內研究機構與學術單位最多應僅相當，然而集合官產學各方並且集中資源與持續投入與決心，往往是我們所比不上的。



圖9 Culture tour 參觀生態

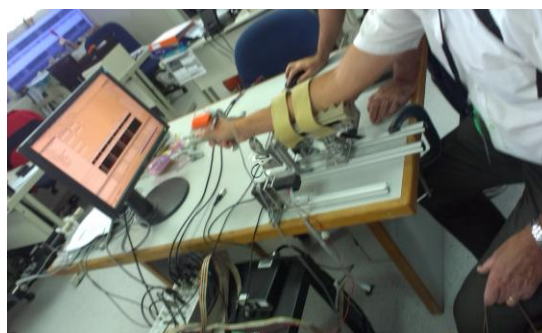


圖10 參觀 NTU 機器人實驗室

四、建議

機器人產業未來在各個領域進一步應用與發展是必定，包括工業、商業、生醫、娛樂、起居生活等，主要技術關鍵包括系統技術、機電軟硬整合、機構創新設計、高階精密機械以及軟體技術等，台灣在精密數值工具機與精密產業機械設備的系統發展都已經有相當經驗與成果，在這些基礎下未來機器人產業發展在台灣應該會相當有機會，然而目前國內機器人技術研發成果現況與工研院機械所在多年前相關的研究計畫比較，除了國內產業環境與研究者水準改善，因而在系統性技術與產業結合有一些進展，然而在機電與控制的關鍵硬體基礎技術與產品紮根仍遇到瓶頸，至今具備高競爭力產業發展似有陷滯不前的窘況，此次來自台灣論文發表仍以大學與研究單位為主，仍著重在創新機構發

展與有限度分析成果及仍屬新開發階段產品嘗試，並無法看到讓人稱佩的高技術層次發展，尤其在機電與控制器等關鍵零組件的技術發展尤為明顯。個人近年研究領域著重在大型風力機的齒輪傳動系統動態之研究，著重較完整分析模式建立以進行齒輪傳動系統的設計與動態分析，此部分更成果希望在機器人領域齒輪傳動系統有效應用，因為目前在製造業與服務業的機器人技術驅動器與傳動技術尤其齒輪減速機技術基礎，仍是極為關鍵的技術，進行精密機器人開發主要傳動零件幾乎仍須採用歐、美、日的產品，這樣的情況似乎與國內精密機械的發展現況極為類似，個人期許產學研單位應在精密機械用齒輪傳動系統研究應持續紮實投入，發展技術門檻關鍵組件可能才是機器人與工具機等精密機械產業健全發展的關鍵。

另外由於新加坡的包括服務業發展已經相當成熟，大量的跨國公司亞太地區總部設置於此，高度國際競爭力令人稱羨，而新加坡的大學發展快速力求朝國際化發展，包括透過全英語的學習環境以吸引優秀師資與人才來從事教學研究，台灣的大學發展在師資引進、學生吸引以及英語化程度等國際化發展指標皆遠遠不及，然而個人淺見，台灣的大學普遍在教學品質與研究深度方面都已經具備極為良好基礎，如何藉由包含兩岸學術教育合作而深化大學教育國際化與產業鏈結，並增進到過內大學教育與研究國際競爭力，個人認為是各單位有識者或在位者可以思考與執行的課題。

五、攜回資料名稱及內容

Proceedings of the 3rd IFTOMM international Symposium on Robotics and Mechatronics.

六、其他

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2014/02/11

國科會補助計畫	計畫名稱: 以三維時變離散模式進行大型風力機用單/多階增速螺旋行星齒輪箱動態特性之研究
	計畫主持人: 黃國饒
	計畫編號: 101-2221-E-216-046- 學門領域: 機構與傳動
無研發成果推廣資料	

101 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：黃國饒		計畫編號：101-2221-E-216-046-				計畫名稱：以三維時變離散模式進行大型風力機用單/多階增速螺旋行星齒輪箱動態特性之研究	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	2	2	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	3	3	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	2	2	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	1	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	2	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

大型風力發電機組是已具成效的綠能方案，然而機組運轉可靠度仍需進一步提升，增速齒輪傳動系亦為關鍵。本計畫應用三維非線性時變模式進行螺旋行星齒輪箱於受變動負載的動態分析建立齒輪箱分析、設計與應用技術。先獲得螺旋齒輪對等效嚙合剛度以建立非線性時變離散動態模式，然後進行分析以探討不同設計與操作條件下齒輪箱動態特性，數值計算獲得嚙合對間的動態作用力，作為齒輪與軸承的壽命預測基礎，並將動態嚙合力的穩態結果與文獻的實驗結果作比較驗證。在參數分析分面，先討論轉速與扭矩操作條件變動時的動態嚙合力特性，並獲得增減速條件與動態嚙合力的關係，結果也顯示越激烈扭矩改變其動態效應也越明顯。另也分析不同輸入端慣性矩與最大動態嚙合力的關係，顯示慣性矩對於動態力有明顯影響。本計劃所獲得單/多級行星式齒輪箱動態技術，希望提升大型風力機增速齒輪箱設計與應用技術。