

2015 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100015

參展科別 工程學

作品名稱 內擺運動減速機之研究

得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 國立嘉義高級工業職業學校

指導教師 黃永國

作者姓名 林昱廷、王家慶

關鍵字 減速機、內擺運動

作者簡介



我名叫林昱廷，出生於高雄，小時候因家庭因素搬去臺北，從小我就熱愛機器人，原因是機器人太帥了！我常沉迷於研究機械的運動原理，收集一堆東西來改裝，自己做玩具。

之後我進入大安機械科，讀完一年級，又因為家庭因素搬到嘉義東石，我轉學到嘉義高工機械科，很榮幸遇到我的指導老師，一開始是他邀請我參加科展的，讓我在這兩年成長，並且讓我學習更深的研究與領導管理，過程雖然有時令人沮喪，但我會學習去享受每一次的失敗。



科展製作生，名叫王家慶。因緣際會之下，便開啟了研究之路。而自小便成長於一個純樸且務實的家庭，在環境的塑造之下，造就了現今的自我人格：處事時，都是以全力以赴的心態來面對大小事物，不馬虎，更不輕言放棄。因此對於從事研究的部分，更是積極以對。對於自己未來的人生規劃，便早早在高一時，奠定了人生方向，而這個方向便是從事一些有關機械的行業，其中更以工程師這條路最為嚮往且視為夢想。

Abstract

Based on the advantage of high reduction ratio of gear trains, this project aims to designing a new gear reducer mechanism with a special cross-link transmission. The proposed design has a planet gear rolling inside the ring gear, so it is also called the “hypocycloidal gear reducer.” During this study, we found that the function of the speed reducer can be accomplished as long as the mechanism contains a kinematic pair that makes a hypocycloid motion. Accordingly, we are motivated to design another similar type of the new design, which is made of a cycloid rotor and a set of pin stators. The design concept of cycloid rotors has several advantages including compact structure, small working space, and self-locking, i.e., when the driving shaft is not actuated, the driven shaft will be locked. To validate our designs, we built a prototype and completed several experimental tests. The result shows that our prototype has a very good transmission efficiency, which can even reach 92%. Furthermore, in order to investigate the vibration problem due to the offset of the gravity centers of the links, we employ the vector loop approach to understand the displacements of the centers of gravity of each link. Then, an “offsetting gravity centers” strategy is presented for improving the vibration problem.

摘要

本專題利用行星輪系具高減速比之優點，並運用一種具十字滑塊的特殊傳動機構，設計一個不同於傳統齒輪箱式的減速機。本設計的行星齒輪可在環齒輪中做內擺運動，所以亦稱為內擺運動減速機。由專題的製作過程中，我們發現只要可以做內擺運動的二個運動對偶(Pairs)，都可以達到減速機的效果。所以，本專題中又設計一個擺線轉子及針狀定子的減速機，不同於使用齒輪來做為轉子及定子的方式，來驗證內擺運動減速機的理论。本擺線轉子設計概念的最大優點除了具備齒輪機構的高傳動效率外，亦具有結構緊湊、節省空間以及自鎖功能（即當輸入軸無動力輸入時，輸出軸即鎖定不動）等特性。根據設計結果，我們自行加工了一組新型減速機原型機，並進行傳動效率實驗。實驗結果證明，本設計之傳動效率極高，可達 92%。此外，為探討本設計由於偏心現象所導致的震動問題，我們也使用了向量迴路法分析機構桿件重心的位移情形，並提出「重心偏移」策略以改善震動現象。

壹、研究動機

課程中，提及減速機的原理及應用，內容提到使用輪系(齒輪、皮帶輪或鏈輪)來達到增減轉速的效果，其中又以齒輪的設計為最多。減速機應用的層面廣泛，包括在機械的各種領域。減速機顧名思義就是把馬達輸出的高轉速降低，以提高扭矩，大部份的減速機皆使用齒輪製作，齒輪間傳動穩定。現有減速機大多以齒輪為主，但非同軸性、小型輸出扭矩受限制(齒型變小)為其限制條件。另有齒輪式的行星太陽輪系，其元件多、不易配合、減速比不為簡易整數比、設計條件還受限、尺寸精密製造不易等缺點。而渦桿渦輪減速機雖可達到較大之減速比且有不可逆轉之安全性，但傳動效率差、兩軸需在空間上為正交、且摩擦損失大。所以不同齒輪式減速機雖多樣化但限制條件仍多。

二十一世紀的來臨隨著科技的日新月異，在未來是個機器人的時代，現代的機器人在體型方面，較講求體積小，且偏向於生活實用性，能包辦一切事物，輔助人類讓生活更方便。對於機器人構造而言，由於機器人內部有許多桿件運動，桿件尺寸及重量都會影響其慣性和負荷能力，若使用結構緊湊的減速機將可降低慣性。在台灣發展研究院智能機器人研究所分析到在產業用機器人的整體成本結構當中，減速機所占整體成本的三分之一。因此，若能發展運用於產業用或服務型機器人之傳動平穩且轉速比穩定、裝置簡單、成本便宜的減速機，那麼未來的商機可是不容小覷的。

課後時間便和老師討論，是否能設計出整合齒輪式等各種減速機優點於一身的減速機。其中發現到可以做出內擺運動方式的轉子，實際上是以一個公自轉運動的組合方式，內擺運動中公轉及自轉即含有轉速差的物理量。假設能夠控制公自轉，即可以設計出構造簡單、同軸輸出、相同大小的零件便可做出不同減速比之減速機的可行性。最後討論出公轉可以由一個偏心軸來產生，做為輸入；而自轉的輸出則由十字滑塊(等腰曲柄機構的一種)來引導輸出，是一個可以達到減速目的的方式。

貳、研究目的

本專題研究目的在於探討如何使用內擺運動產生公轉及自轉的轉速關係，達到減速效果。再設計兩種不同的公、自轉子式減速機，使用最少零件達到節能減碳、大減速比及同軸輸出，可提供機械設計的便利性之特性。在整個專題研究過程中，包含構想討論、零件設計、零件加工製造、機構組裝測試等步驟。讓我們在過程中體會到一個機構的設計製造程序，增加學習興趣，並體驗團隊合作精神。

參、文獻探討

減速機是一種動力傳達機構，利用機構的速度轉換器，將馬達的迴轉數減速到所需的迴轉數，並得到較大扭矩的機構。在目前用於傳遞動力與運動的機構中，減速機的應用範圍相當廣泛。幾乎在各式機械的傳動系統中都可以見到它的蹤跡，從交通工具的船舶、汽車、機車，建築用的重型機具，機械工業所用的加工機具及自動化生產設備，以及日常生活中常見的家電，鐘錶等等...其應用從大動力的傳輸工作，到小負荷，精確的角度傳輸都可以看到減速機的應用，且在工業應用上，減速機具有減速及增加扭矩功能。因此廣泛應用在速度與扭矩的轉換設備。市上減速機種類繁多型號各異，不同種類有不同的用途，機械上常用的可分成兩大類，其中包含數種不同型態且功能不同的減速機，為因應本主題而做下列各減速機的分析。

一、齒輪式

正齒輪減速機：利用小齒輪帶動從動大齒輪，造成速度遞減。但單段的減速比限制於 $1/5$ 以下。

渦桿渦輪減速機：具有極大的單段減速比可由 $1/5$ 至 $1/100$ 、且有不可逆轉之安全性(自鎖功能)，但因為渦桿推動渦輪之最大靜摩擦力較大且兩軸需在空間上正交，故效率低於正齒輪減速機且佔較大之空間。

行星齒輪減速機：由正齒輪組合而成。結合 2 至 3 段減速齒輪組，小體積即可達到很大的減速比，結構緊湊，但製作成本較高且減速比較難達到簡易整數比。

傘齒輪減速機：主要用在輸入和輸出軸上呈 90° 度的場合，但減速比較小。

二、機械式

皮帶輪減速：依據功能原理藉由皮帶兩邊不一樣的拉力產生一扭矩而對從動輪達到減速的功能，但因皮帶有滑動的缺點，故速比不一定。

鍊條減速：傳動距離可較遠，速比較正確，可用在工作環境濕度大及高溫的情況下使用，但因弦線作用造成鏈輪傳動速率不穩定及產生振動和噪音。

圓柱減速：通用性強、可靠性高、熱交換性能好，承載力高，但因摩擦會產生速度損失，故有與皮帶輪速比不定之缺點。

球體減速機：無背隙、定位精度高，且傳動速比可大可小。減速器中心部份採用滾珠取代齒輪而達到無背隙、極精準的反覆定位精度。優越的剛性表現：球體減速器是以結構上彼此銜接的軌道中運作，並非以滾珠摩擦傳導，因此不會發生打滑的現象。低軸向尺寸，節省空間：球體減速器使用軸向安裝，可減少體積空間。解決安裝空間不足的問題。滾珠接觸式傳動，運轉時只有滾珠轉動聲音，達到低噪音。密封式設計，採用特殊潤滑油，因此無須換油及補充、安裝方便。此外，球體減速器並無安裝方向的限制，安裝方便。

肆、研究過程與方法

一、研究設備及器材

(一)車床

(二)銑床

(三)切削中心機

(四)鑽床

(五)刀具及量具

(六)軸承

(七)馬達

(八)Solidwork 及 Mastercam 軟體

表 1：內擺運動減速機之一:齒輪式

項次	設備名稱	規格	備註
1	固定架	鋁，數控加工	
2	輸入軸	中碳鋼，依尺寸加工	偏心軸
3	十字滑塊	銅，依尺寸加工	
4	輸出軸	中碳鋼，依尺寸加工	有槽

表 2：內擺運動減速機之二:擺線轉子式

項次	設備名稱	規格	備註
1	固定架	壓克力，數控加工	
2	輸入軸	中碳鋼，依尺寸加工	偏心軸
3	十字滑塊	銅，依尺寸加工	
4	輸出軸	中碳鋼，依尺寸加工	有槽
5	擺線轉子	中碳鋼，數控加工	
6	銷(定子)	中碳鋼，依尺寸加工	10 個

二、創意機構設計策略

(一) 設計策略及發想

分析各種減速機之設計原理後，我們參照「機械裝置的創意性設計」一書【1】所述之創意機構設計之流程。我們選定之設計策略如圖 1 所示。分析各種減速機的減速原理，除了齒輪的定心輪系外(一般的齒輪箱或皮帶輪)，不是定心輪系的減速機大致可分為公轉、自轉模式以及差動位移模式二種，因此我們分析一個轉子在一個定子內部做內擺運動時，若定子及轉子間的接觸狀態為滾動接觸無滑動產生時，定子及轉子為一個具有轉速差異的公轉及自轉的關係，而且公轉及自轉的轉速比值可由定子及轉子的直徑來決定，因此公轉及自轉的運動型態及轉速的比值，來做為設計內擺運動式減速機的基礎。

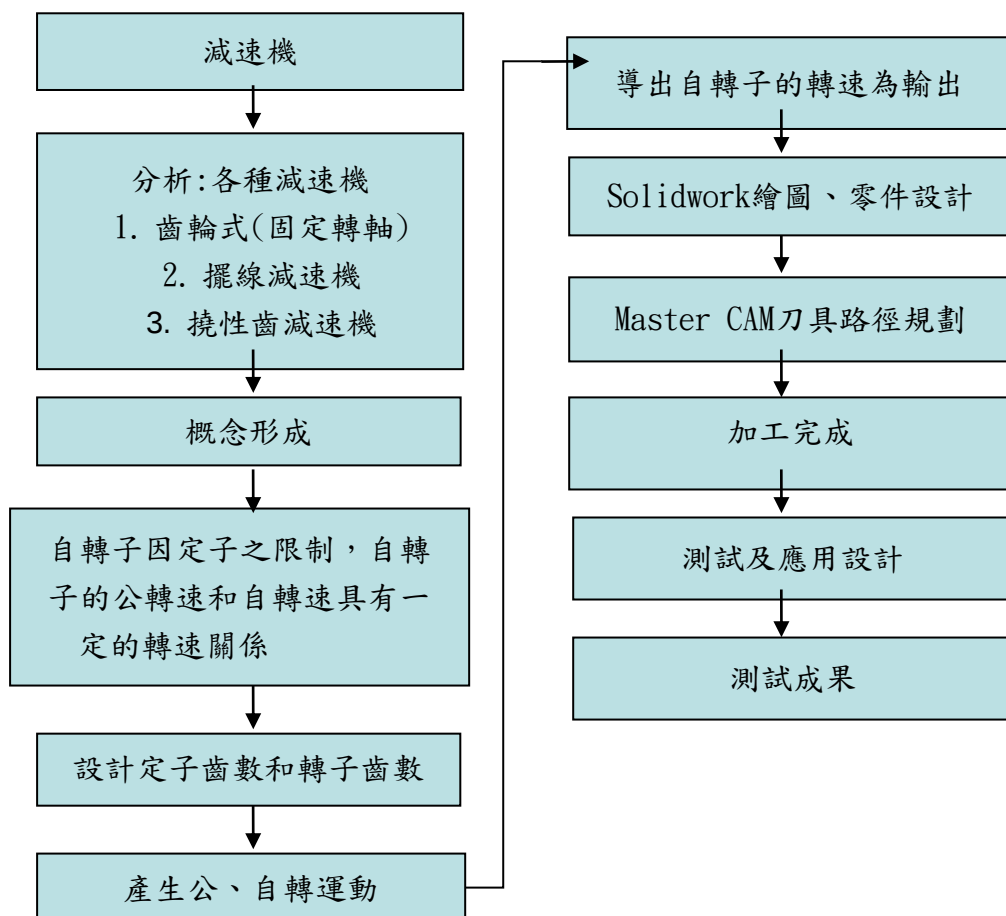


圖 1 非齒輪式減速機設計策略流程圖

(二)理論分析

如圖 2 所示，若一個直徑為 D_b 的轉子(B)在一個直徑為 D_a 的定子(A)內做內擺運動，而且定子 A 和轉子 B 接觸點為純滾動(即無滑動產生)時，當轉子 B 以 W_2 的角速度轉動時，轉子 B 的圓心即以一個 W_1 的角速度以 O_1 為圓心來做公轉運動，而且公轉的軌跡為一個圓形，相反的，若使用機械的方式來讓轉子 B 產生公轉，在定子及轉子接觸點為純滾動的條件下(內外齒輪接觸)，轉子就會產生自轉，所以當轉子的公轉角速度 W_1 為輸入時，轉子的自轉 W_2 就可做為輸出。但是在這裡會有一個問題產生，轉子在自轉時轉子上的一個定點是在做內擺線運動，那如何將轉子的自轉輸出呢?在機械科二年級的機件原理課程中第 14 章有提到一種叫歐丹聯軸器的聯軸器，它是一個等腰連桿組的變化，在應用上它可以聯接二個平行軸但有允許中心有一段距離的裝置。在圖 2 的裝置中，轉子的自轉旋轉中心和公轉的旋轉中心即為平行。十字滑塊(類似歐丹聯軸器)可連接兩個呈 90° 角度差的滑槽，當轉子上的滑槽和輸出軸上的滑槽由十字滑塊連接，轉子上的自轉運動即可藉由十字滑塊傳遞到輸出軸，其運動的理論分析將在第六節說明。

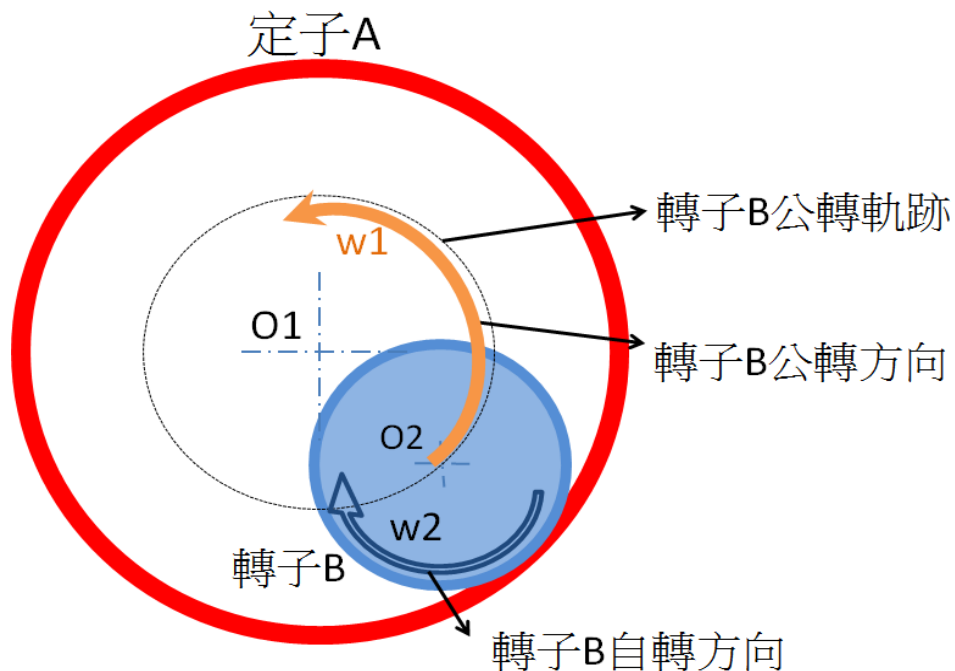


圖 2 內擺運動示意圖

(三) 內擺運動分析

在上述的圖 2 中，轉子公轉的軌跡為一個圓形，它的直徑 D_c 大小為：

$$D_c = D_a - D_b \cdots \cdots \cdots (1)$$

當轉子 B 以 W_1 的轉速運轉時(自轉)， W_2 的轉速(公轉)可由機件原理課程中的週轉輪系的觀念來計算，即

$$\frac{0 - W_1}{W_2 - W_1} = \frac{D_b}{D_a} \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$W_2 = \left(1 - \frac{D_a}{D_b}\right) W_1 \cdots \cdots \cdots (3)$$

在我們的設計中，定子為一個模數 1，60 齒的內齒輪，轉子為模數 1，55 齒的正齒輪，所以 W_1 比 W_2 的轉速比計算結果為 11:1。

由上述的分析可以得知轉子的公、自轉是一個內擺運動關係，一開始自轉子做自轉運動，但因定子的拘束，產生公轉軌跡，並且得知自轉子的旋轉中心移動的軌跡為一圓形，這個軌跡即為自轉子公轉的軌跡。而圓形軌跡直徑為定子及自轉子之半徑差值，因此在本專題中設計一個偏心軸為輸入軸(公轉產生器)，當輸入軸轉動時，因偏心作用使自轉子產生公轉，轉子公轉時，因為外部的幾何關係及定子的拘束，使得自轉子產生自轉作用，那如何把自轉子的自轉作用引導出做為輸出的旋轉運動(角速度)呢?於是我們便利用十字滑塊運動方式(如圖 7)，十字滑塊為等腰連桿組的一個應用，它是一個具有二個自由度的滑動對偶，利用十字滑塊把自轉子的自轉運動導出，作為輸出軸。如何只引導自轉子的自轉運動為輸出而不受公轉運動影響呢?因為十字滑塊在內擺運動減速機中，自轉子的公轉運動由十字滑塊在滑槽吸收。

整個減速機由公轉帶動自轉子，再由十字滑塊帶動輸出甚為容易，但若用十字滑塊反過來帶動自轉子產生自轉子自轉，再由自轉子公轉輸出，是不可能的。所以整個減速機就成了自鎖的作用，輸出軸不能帶動輸入軸，此特點和渦桿渦輪一樣，渦桿(輸入)可以帶動渦輪(輸出)渦輪則不可帶動渦桿。

此機構有下列幾種優點：

※輸入軸可作正反轉運動，當輸入軸停止時，輸出軸也會停止轉動。

※相同的尺寸設計下只要變更不同的轉子大小，及偏心軸的偏心距，就可達到不同的減速比。

※只能由輸入軸(偏心)帶動自轉子，不能由自轉子帶動公轉產生器。

(四)針齒輪定子及擺線轉子

上述理論是由市售內接正齒輪來呈現，來達到轉子和定子之間可以維持純滾動的狀態，故此原理的設計過程較簡單有現成零件可以運用，但是除了齒輪以外是否還有其它的方式可以實現以擺線運動來達成減速機的功能呢？因此，一番的資料收集後我們使用二種機構可達成純滾動接觸的原理，再設計出針齒輪定子及擺線轉子(自行設計外形尺寸及製造)，目的是創新與找尋何種樣式為此原理做出的呈現。

設計的擺線轉子一開始由 $\phi 10$ 滾圓沿 $\phi 90$ 之導圓滾動，滾圓圓周上任一點之運動軌跡為一擺線(後來作為刀具路徑中心)，將此擺線往內偏移 5mm 後，導 $\phi 10$ 之圓角(方便定子配合)，形成擺線型狀(9 個圓弧凹槽)，如圖 3 所示。

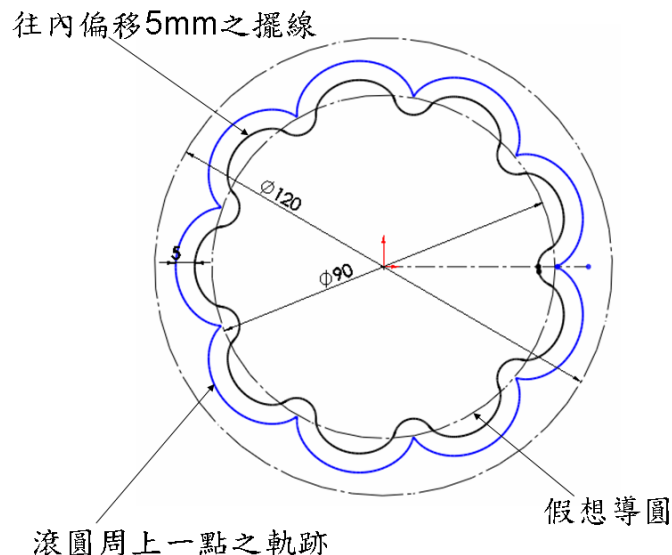


圖 3 自行設計之外擺線

再設計外圍的針齒輪定子如圖 5 所示，定子是由 10 個 $\phi 10$ 的銷組成，配合擺線形狀做環狀排列，擺線轉子圓心公轉一圈，每個凹槽只跳一個銷(1/9)，達到 9:1 減速效果，實體圖(solidworks 繪製)如圖 4、5 所示。

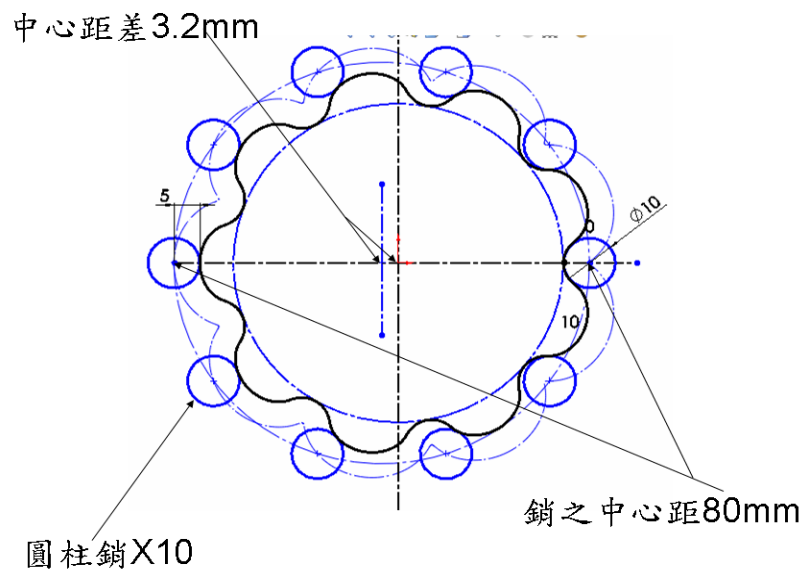


圖 4 10 顆銷的位置排列圖

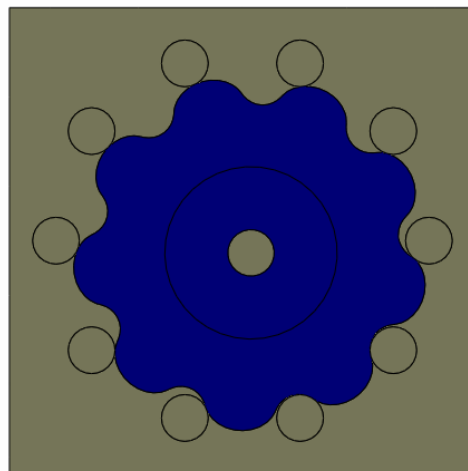


圖 5 擺線轉子式 實體圖

(五) 擺線轉子速比分析

擺線轉子和針狀定子之間可以看成和圖 2 相同，一個自轉圓在一個固定圓內部做純滾動，所以當擺線轉子以外來的趨動力量公轉一圈時，會因為定子的拘束自轉一個齒隙的角度(或是滾圓 10mm 在導圓 90mm 上自轉一圈的距離)，所以本專題的設計範例，速比為 9:1。

(六) 雙滑塊機構分析

課程中有介紹到歐丹聯軸器(如圖 6 所示)，它可聯結二個平行軸輸入及輸出軸之間的角速度不會變化，這就是十字滑塊的應用，因此本專題想利用等腰連桿組的原理來聯結自轉子和輸出軸，把自轉子的角速度穩定的輸出。但自轉子的運動方式除了自轉還有公轉，呈現內擺運動，所以不像歐丹聯軸器一樣是都有自己固定的旋轉中心。所以我們要探討自轉子的公轉運動在等腰連桿組中是否會影響到輸出軸穩定的輸出。

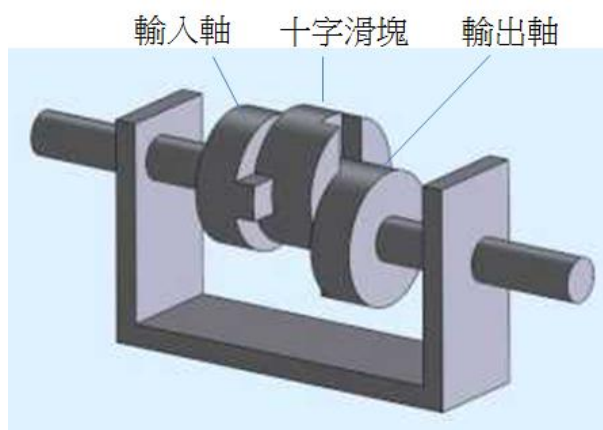


圖 6 歐丹聯軸器

歐丹聯軸器中十字滑塊運動為等腰連桿的變形，在我們設計的減速機結構中，是要將公轉中的自轉導出來(同軸性)，所以我們必須了解等腰連桿是否能將公轉中的自轉穩定導出。如圖 7 所示，自轉子滑槽、十字滑塊及輸出軸滑槽形成一個等腰連桿機構機構，在減速機運動時，自轉子滑槽會以 ω 的角速度自轉及繞著輸出軸的旋轉中心公轉。若自轉子不自轉，以相同姿態繞著輸出軸的旋轉中心公轉時，十字滑塊會在自轉子滑槽及輸出軸滑槽中前後移動，輸出軸滑槽而不會有任何的轉動；若當自轉子滑槽以 ω 的角速度自轉時而不公轉時(歐丹聯軸器的形態)，十字滑塊也會以 ω 的角速度轉動進而帶動輸出軸滑槽以 ω 的角速度轉動，這就是歐丹聯軸器的原理，由運動的疊加原理知道，自轉子的公轉運動會引起十字滑塊在滑槽中滑動，而不會使滑槽轉動，自轉子的自轉運動經由十字滑塊，帶動輸出軸滑槽轉動，所以自轉子滑槽會以 ω 的角速度自轉及繞著輸出軸的旋轉中心公轉時，輸出軸滑槽則會以 ω 的角速度轉動輸出。自轉子的公轉運動並不會影響到角速度的輸出。

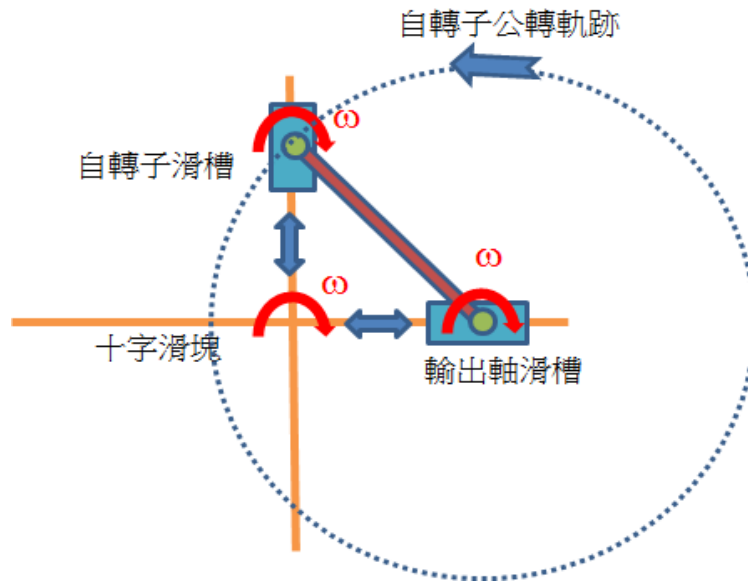


圖 7 自轉子公、自轉運動及輸出軸轉動關係

(七)機構模擬

為了了解本專題減速機的減速比是否正確，以及雙滑塊機構是否可以把齒輪自轉子的自轉角速度平穩及準確的輸出，我們使用 solidworks 軟體的模擬功能，模擬圖中的內齒輪定子及齒輪自轉子的尺寸是以節圓直徑來代替，而且接觸點設定為純滾動的拘束條件，當我們設定輸入軸為 600rad/s ，輸出軸的轉速為 54.5rad/s ，速比為當初設計的相同，而且由輸出轉速的圖 8 中可以看出輸出軸的轉速是平穩的，並無明顯的跳動或週期性的變化產生。

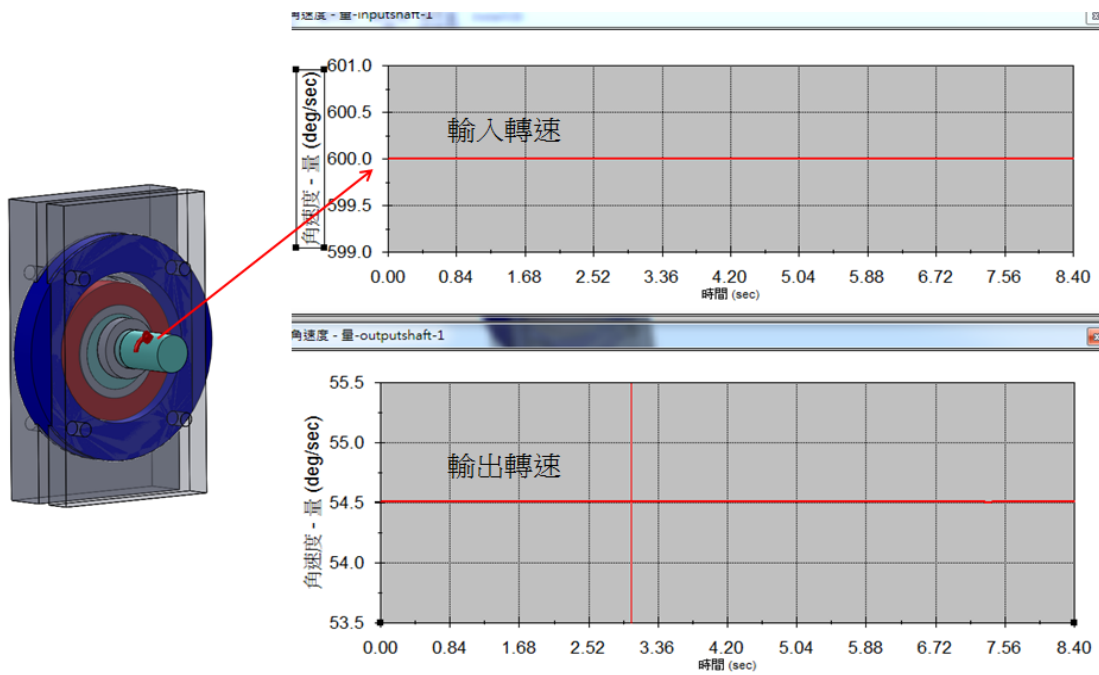


圖 8 電腦模擬輸出、入軸轉速關係

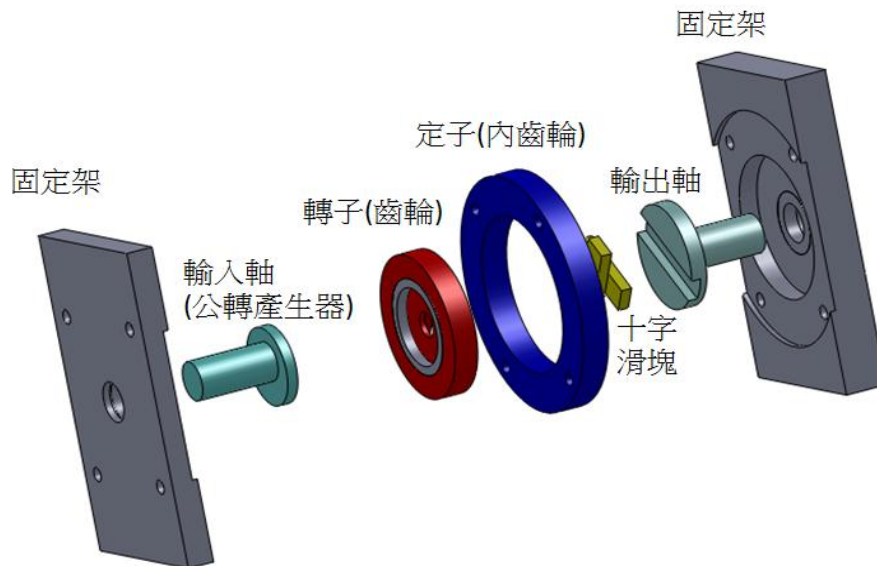


圖 14 a. 內擺運動齒輪式減速機 零件爆炸圖

三、零件細部設計

1. 公轉產生器
2. 內擺自轉子
3. 前固定架
4. 後固定架
5. 定子
6. 十字滑塊
7. 輸出軸

除了標準零件(固定螺絲、軸承)外和齒輪，其它零件由自己設計及加工製作。

(一) 內擺運動齒輪式減速機：

1、公轉產生器之設計(輸入軸):

由上述的討論，在減速機的輸入端採用偏心，我們以設計大小和齒輪的齒數計算出偏心量的多寡(偏 2.5mm)。

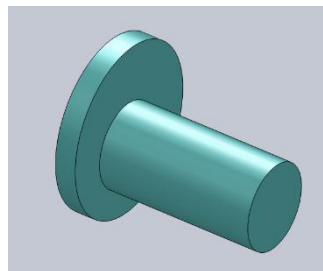


圖 9 公轉產生器設計圖

2、固定架：

前後蓋屬於固定基件、圓形的階級槽形狀可供歐丹聯軸器在裡頭自由滑動，最上層的大面積小深度的圓槽是來固定定子(內齒輪)的位置

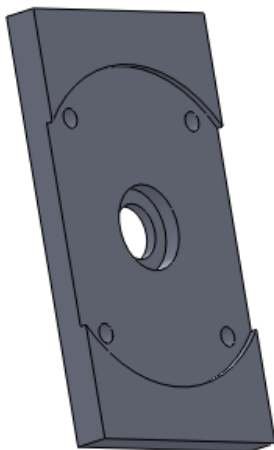


圖 10 前後固定架

3、齒輪式擺線運動轉子(齒輪)：

一般的市售正齒輪 KHK SSA1-55，當公轉產生器(偏心)旋轉帶動轉子時，轉子繞內齒輪(自轉產生器)作擺線運動產生自轉(此時內、正齒輪節點為滾動接觸)，自轉與公轉的減速比為 11:1

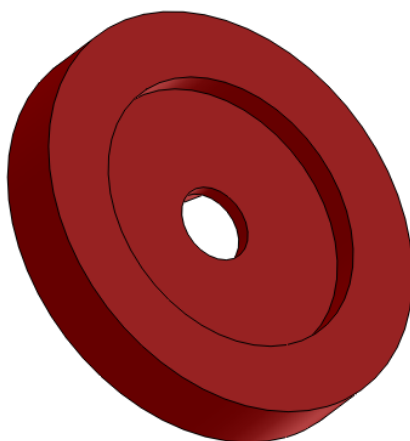


圖 11 擺線運動自轉子(齒輪)

4、定子:

一般市售內齒輪 KHK S11-60，為了讓公轉中的自轉子產生自轉而加入的限制條件，也就是我們稱呼的定子。

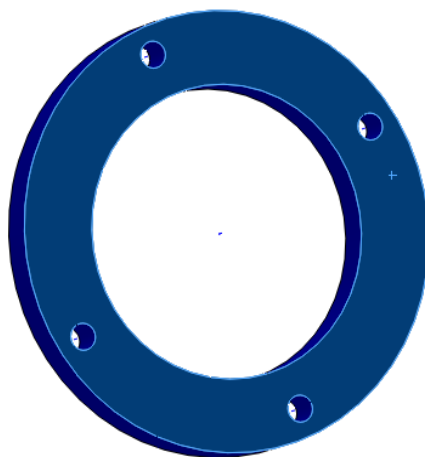


圖 12 定子(內齒輪)

5、十字滑塊:

將公轉中的自轉子的自轉導出來，轉子與輸出軸之滑槽為 90°

6、輸出軸:

連接十字滑塊的輸出轉軸，與轉子滑槽成 90° (如圖 13 所示)

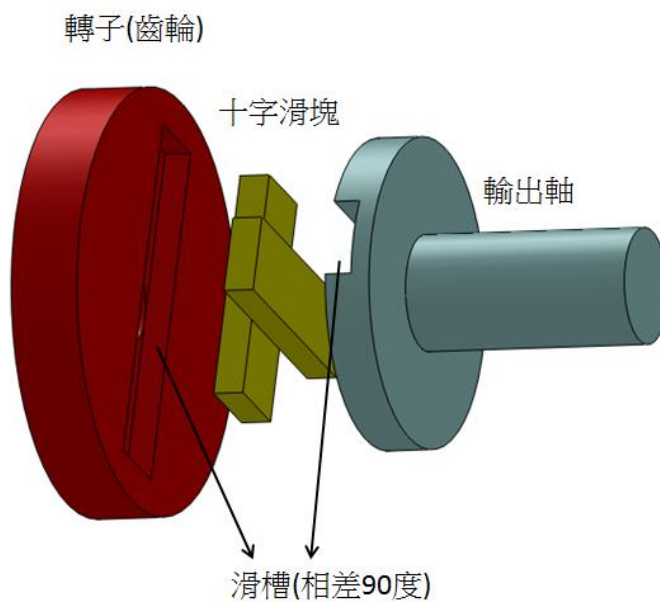


圖 13 轉子、十字滑塊和輸出軸的組合關係

7、組合圖：

各零件設計完成後組裝的爆炸圖如圖 14 所示。

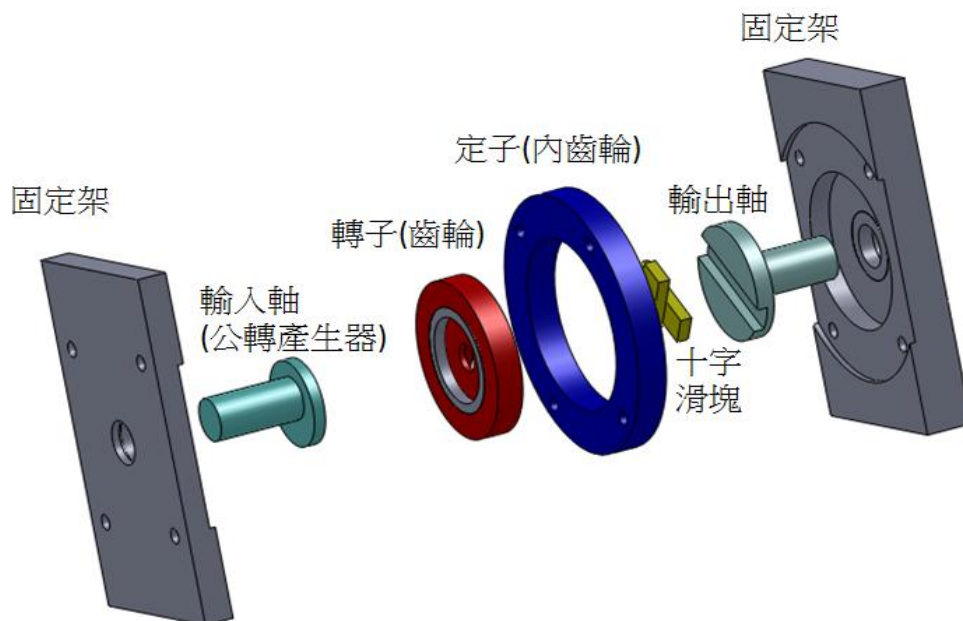


圖 14 b. 內擺運動齒輪式減速機 零件爆炸圖

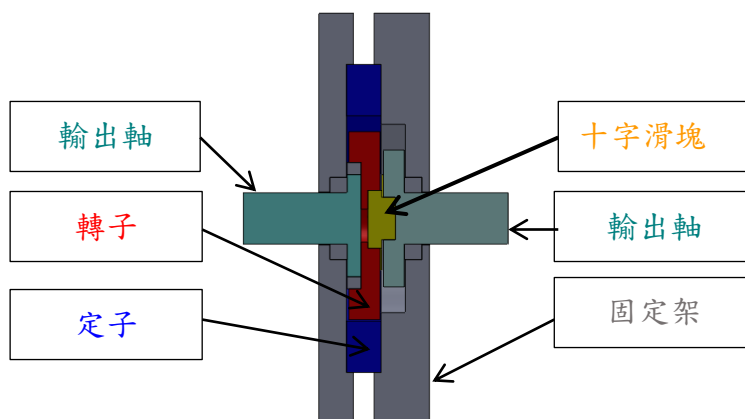


圖 15 電腦模擬立體圖和剖面圖

8、實體零件圖：

我們依照零件圖的尺寸，實際使用車床、銑床等把零件加工完成，並進行組裝及測試，

各零件實體圖如圖 16 所示，圖中內外齒輪及滾珠軸承為市售成品。

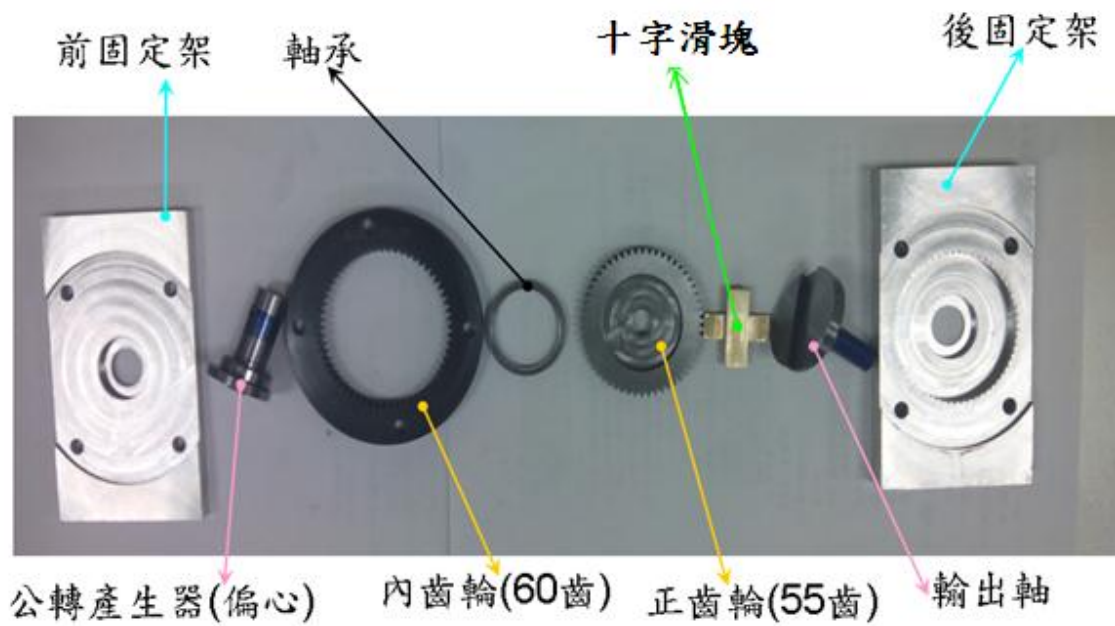


圖 16 實體零件圖

9、實體組合圖：

組裝完成後，如圖 17 所示，利用手動就可以使輸入軸轉動，代表我們所設計出來的減速機效率是很高的。

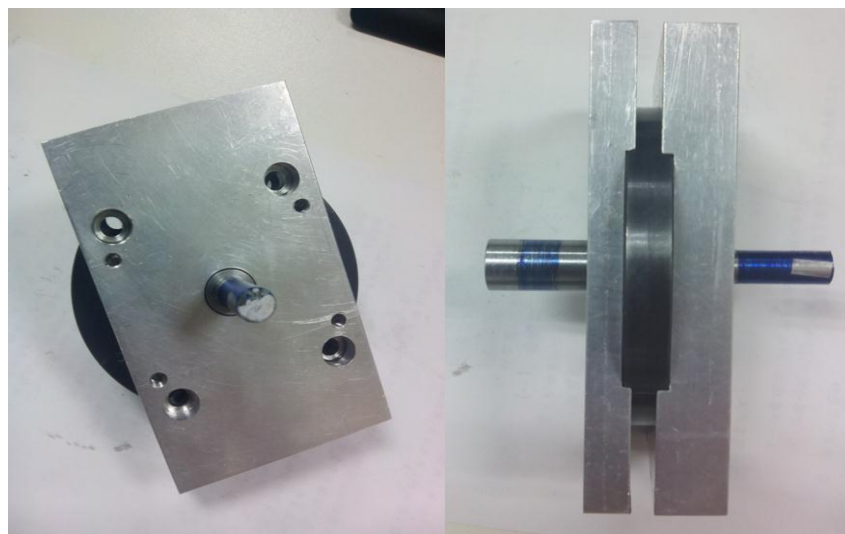


圖 17 實體組合圖

(二)內擺運動擺線轉子式減速機：

1、公轉產生器(輸入軸)：

和齒輪式類似功用，目的也是使自轉子產生公轉。

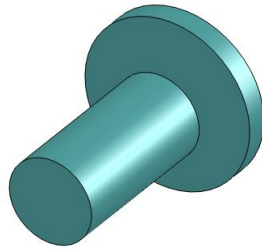


圖 18 公轉產生器(偏心 3.2mm)

2、前固定架：

前後蓋屬於固定基件、圓形的階級槽形狀可供歐丹聯軸器在裡頭自由滑動，其中十個小圓深度的圓槽是用來固定定子(銷)的位置。

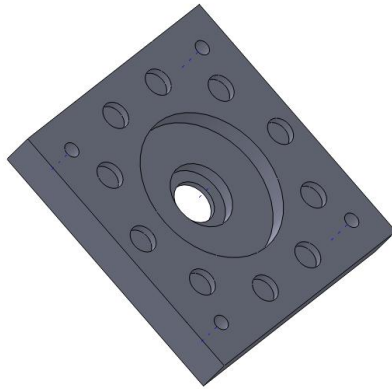


圖 19 前固定架

3、擺線轉子(擺線齒輪)：

自行設計並製造的擺線齒輪，擺線轉子的外形較為特殊，所以使用切削中心機進行加工，擺線轉子為 9 個週期的變化，並在定子(10 個銷)上做滾動運動。

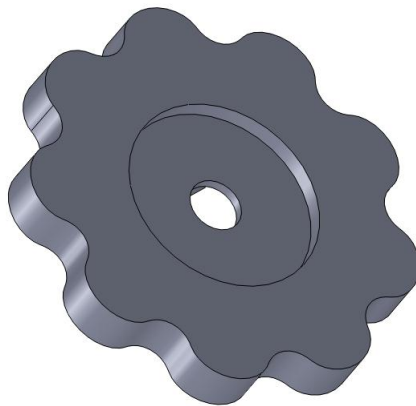


圖 20 擺線轉子

4、後固定架及定子：

由 10 個 $\varnothing 10 \times 16$ 圓柱銷環狀排列組合，目的是讓擺線轉子公轉時產生自轉的軌道。

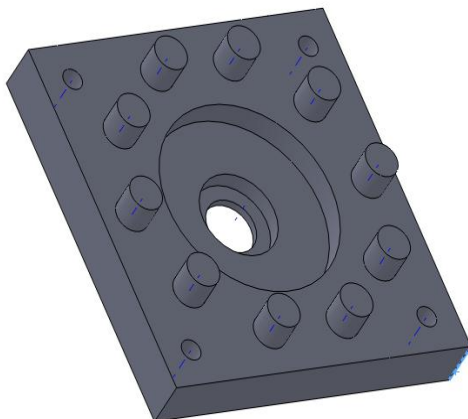


圖 21 後固定架配合定子

6、十字滑塊

與齒輪式的滑塊相同，目的也是將自轉子的自轉速正確的導出來，使用銅作為材料。

7、輸出軸：

與齒輪式的輸出軸相同

8、擺線轉子減速機 爆炸圖：

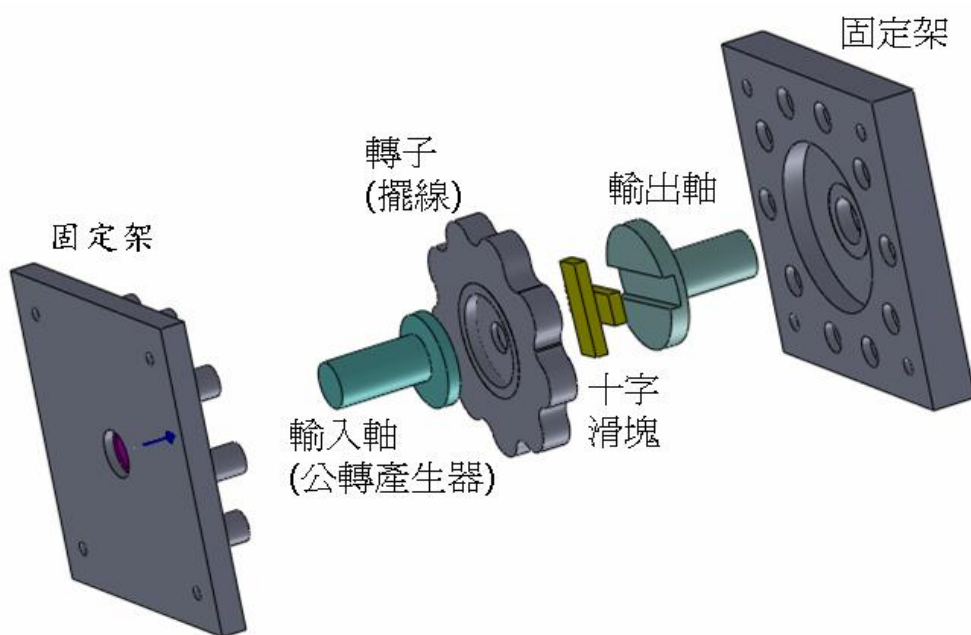


圖 22 擺線轉子減速機 零件爆炸圖

9、組裝及完成圖：

擺線轉子減速機組裝後如圖 23 所示，為了要方便觀察內部運動情況及整個減速機的作動原理，固定架材質選用透明壓克力板製作，組裝後觀察出效果不錯，更進一步了解內擺運動減速機的原理。

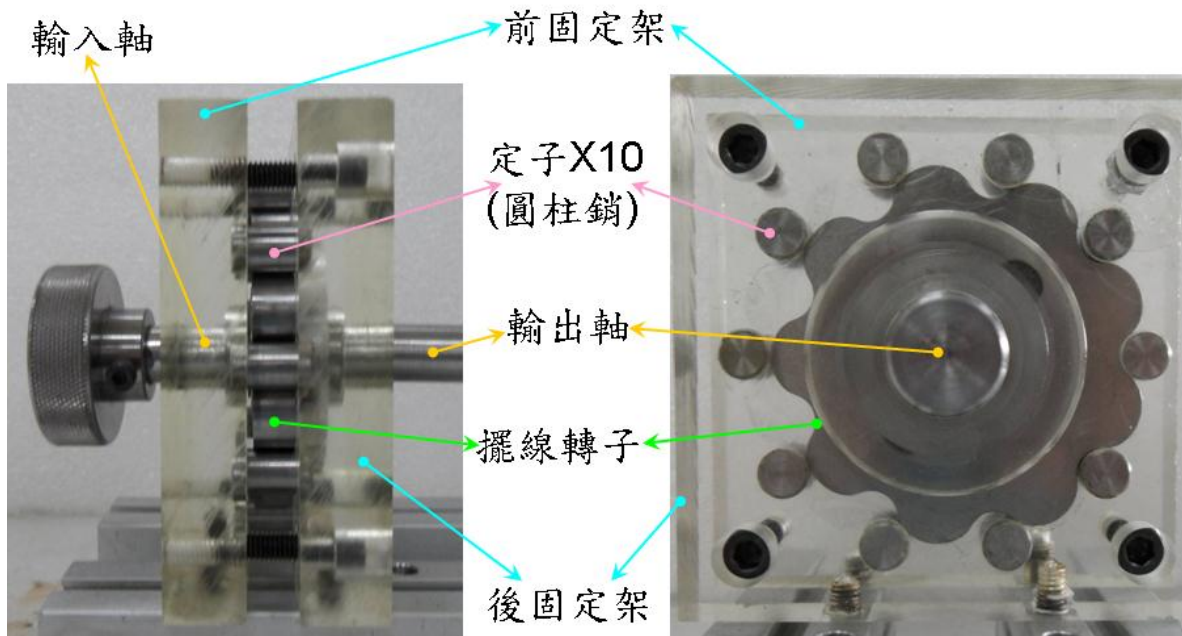


圖 23 擺線轉子減速機實體組合圖

伍、研究結果

為了要了解本專題所設計減速機是否可以達到設計目的，組裝一個測試平台，平台包含馬達、非接觸式轉速計、電腦和轉速計軟體等。如圖 24 所示。主要測試減速機三個功能：第一為減速比測試，第二為輸出軸端之角速度是否穩定輸出測試，第三為機械效率測試。

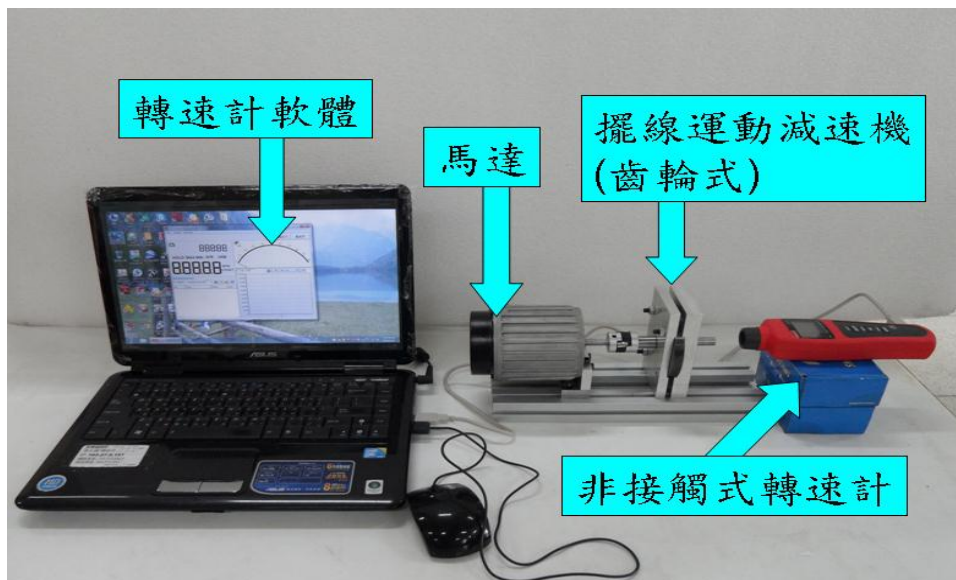


圖 24 測試平台(齒輪式)

(一)減速比測試

首先選擇由內擺運動擺線轉子式減速機來進行此測試，由兩個人利用手動和目測的方式進行減速比的測試，旋轉輸入軸端 90 圈，輸出軸端是否有旋轉 10 圈，初步觀察結果，有達到 9:1 的目標。(此為擺線轉子式的資料)

(二)角速度穩定輸出測試

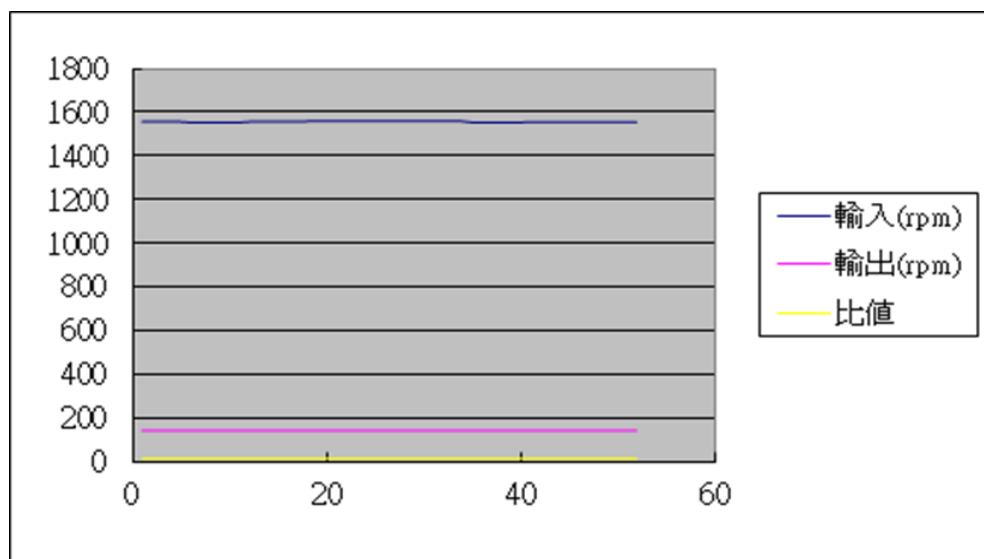
將馬達與內擺運動之齒輪式減速機固定在條狀鋁架上，再將馬達圓心對準輸入軸圓心高度(如圖 24 所示)，並且使用聯軸器聯軸，目的是要讓馬達和減速機能順利傳動轉速。非接觸式轉速計是運用反光貼紙對紅光的反射來測轉速，每一轉反射一次，由此計算出轉速(rpm)，由於轉速計只有一個，因此我們選擇先測輸入轉速，再來測輸出轉速，雖然此方法無法直接測出真正的轉速比值，但經過多次測量後，必定能降低誤差，此測驗結果驗證其減速機之角速度(輸出轉速)為一穩定值。(表 1 為眾多樣本中隨機取樣的資訊)

表 1 電腦擷取的 輸出、入軸轉速比

取樣	輸入(rpm)	輸出(rpm)	比值
1	1555.5	140.79	11.04837
2	1555.5	140.79	11.04837
3	1555.5	140.79	11.04837
4	1555.5	140.79	11.04837
5	1555.5	140.79	11.04837
6	1552.3	140.79	11.02564
7	1552.3	140.79	11.02564
8	1552.3	140.79	11.02564
9	1552.3	140.57	11.0429
10	1552.3	140.57	11.0429
11	1552.3	140.57	11.0429
12	1555.7	140.57	11.06708
13	1555.7	140.57	11.06708
14	1555.7	140.57	11.06708
15	1555.7	140.57	11.06708
16	1555.7	140.57	11.06708
17	1555.7	140.57	11.06708
18	1557.7	140.57	11.08131
19	1557.7	140.57	11.08131
20	1557.7	140.99	11.0483
21	1557.7	140.99	11.0483
22	1557.7	140.99	11.0483
23	1557.7	140.99	11.0483
24	1557.6	140.99	11.04759
25	1557.6	140.99	11.04759
26	1557.6	140.99	11.04759
27	1557.6	140.99	11.04759
28	1557.6	140.99	11.04759
29	1557.6	140.99	11.04759
30	1557.6	140.79	11.06329

由表 2 看出此減速機的穩定性，輸出軸無週期性的變化，以及正確的減速比為 11，和當初設計時所計算出來的理論值及功能的預測是相同的，(輸出軸轉速成一直線--粉紅色)。

表 2 隨機取樣圖表



(三)機械效率測試和現有齒輪式減速機性能分析比較

從設計到零件組裝和運轉測試後，接下來最重要的就是效率的測試與分析。根據（利海電機有限公司）所提供之一般定心齒輪減速機性能表(表 3 所示)，利用功能原理的方法，比較輸入功率及輸出功率，計算可得知齒輪式減速機效率大約在 89%~90%之間，表 4 所示。由表 4 也可觀察出，齒輪式減速機的效率，和輸入的功率沒有很大的關係。

表 3 齒輪減速機性能表（利海電機有限公司提供）

減速比	出力軸迴轉速 (RPM)	出力軸容許值		
		0.1KW	0.75KW	2.2KW
	60HZ	Kg-m	Kg-m	Kg-m
1/3	570	0.13	1.0	3.5
1/5	360	0.25	1.9	5.6
1/10	180	0.50	3.8	11.2
1/15	120	0.75	5.7	16.8
1/20	90	1.0	7.5	22.4
1/25	72	1.2	9.4	28.0
1/30	60	1.5	11.3	33
1/40	45	1.9	14.6	43
1/50	36	2.4	18.3	54
1/60	30	2.9	21.9	
1/75	24	3.6	27.4	
1/100	18	4.9	36	
1/120	15	5.8	43	
1/150	12	7.3	54	
1/200	9	9.7	73	

表 4 齒輪式減速機效率計算

B	C	D	E	F
輸入功W	輸出力矩Kg*m	轉速rpm	輸出功W	效率百分比
100	0.13	570	76.00684	76.01%
100	0.25	360	92.316	92.32%
100	0.5	180	92.316	92.32%
100	0.75	120	92.316	92.32%
100	1	90	92.316	92.32%

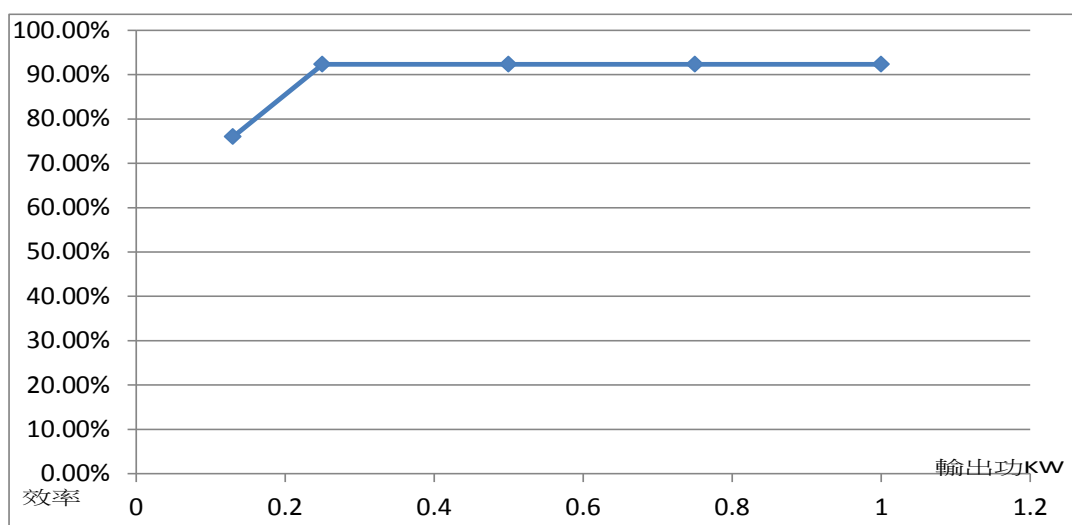


圖 25 齒輪式減速機效率曲線(輸入功率為變數)

為了測量內擺運動減速機的機械效率，本專題使用靜態的效率測試方式，量測力矩輸出的比值和減速比的差異百分比即為機械效率，公式如下：

$$\text{Mechanical Efficiency} = \frac{\text{Output Moment of force}}{\text{Input Moment of force} \times \text{Speed reducing ratio}} \times 100\% \quad (4)$$

使用兩個彈簧拉力計來進行扭矩大小的測量，藉由輸入力矩及輸出力矩的比較來計算本專題減速機的效率，測量方法為先用兩根長度相同的金屬棒作為輸入、輸出力臂如圖 26，測量方法為在輸出軸上以手對彈簧拉力計施加固定力量(因不可逆性，仍維持不動)，同時觀察輸入軸以手對彈簧拉力計的力量慢慢變大，紀錄輸出軸移動的瞬間(力矩相等)，輸入軸與輸出軸的在彈簧拉力計上的數據。

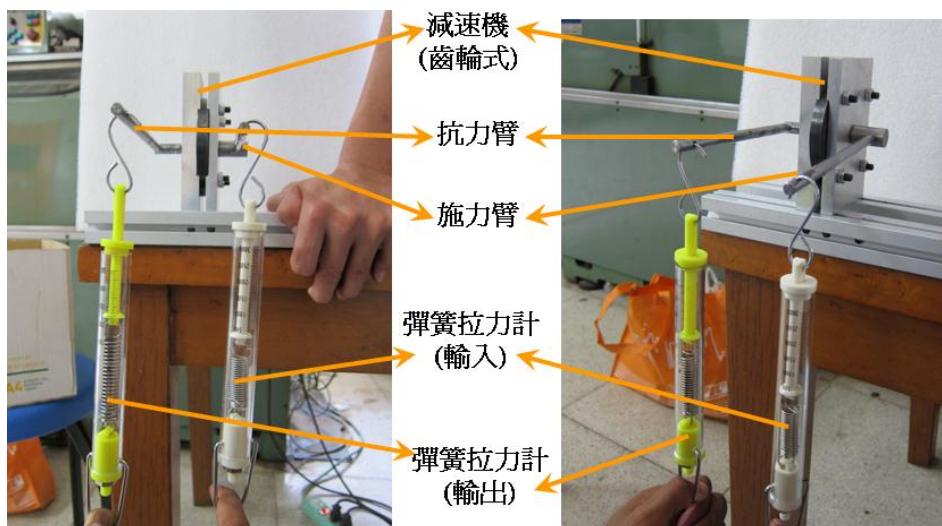


圖 26 效率測試情形

將數據紀錄下來，一共有四組測試結果，將數據代入公式算出效率，並製作成表格，由於扭矩的力臂相等，直接設為 1。

機械效率公式：

$$\eta = \frac{T_o}{T_i \times 11} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

表 5 內擺運動減速機效率計算

次數	輸出力矩(T_o)	輸入力矩(T_i)	效率 η
1	2000g*cm	210g*cm	86.58%
2	3000g*cm	310g*cm	87.98%
3	4000g*cm	400g*cm	90.91%
4	5000g*cm	490g*cm	92.76%

由此初步計算從表 5 可得知，本專題減速機的效率約 87%--93%左右，而且隨著力量的增大效率就愈高，因為輸入力量大時，最大靜磨擦的力量影響就相對減少所以效率就提高了。比較上文中一般齒輪箱的效率和內擺運動減速機的效率相差無幾。

陸、問題與討論

一、內擺運動減速機優缺點之討論

在機構的設計中若有使用減速機，對減速機的需求除了減速比外，輸出軸的角速度須穩定輸出而沒有週期性的變化產生(震動)。本專題在測試時，我們觀察出所設計減速機有振動的現象產生，可能的原因如下：

- 1.減速機之輸入軸連結馬達軸心時，有誤差所造成。
- 2.製造零件的精度不夠。
- 3.減速機與馬達的底座是質輕鋁條，重心位置過高。
- 4.內部齒輪轉子是做公轉運動，故重心會隨轉子位置不斷改變，產生週期性震動。

上述缺點我們進行改善的討論，提出改變材質為多數，將中心位置不斷改變的轉子改為質量較輕但堅固的材質(鈦金屬)，並將底座改為質量大的金屬(鋼料)，若使重心位置穩定，便可減少震動的發生，並且在輸入軸加裝配重，利用力距原理使重心平衡。

雖然我們製造出來的模型在作動時有些許震動，但由效率的角度來看，本專題所設計的減速機實用性非常高。未來如果使用更專業的材料與更精密的製造方式來實踐此機構設計的話，將會帶來龐大的商機，原因除了它是嶄新的減速機外，還有以下優點：

- 1.輸出完全從動於輸入：輸入軸可作正反轉運動，當輸入軸停止時，輸出軸也會停止轉動。
- 2.減速比設定容易：相同的尺寸設計下只要變更不同的轉子大小，就可達到不同的減速比。
- 3.效率和一般齒輪式的減速機相當，若以不可逆的特點和蝸桿蝸輪比較，則高出許多。
- 4.不可逆性質：只能由公轉產生器(偏心)帶動自轉子，不能由自轉子帶動公轉產生器，若此性質利用在起重機等機械上的話，安全和精密方面將會有所提升。
- 5.角速度輸出穩定：由上述測試資料中證明了此減速機輸出的穩定度。
- 6.構造簡單：本專題減速機一台只有用到七種零件，結構簡單，製造容易。
- 7.同軸輸出輸入：兩軸軸心連成一線，此優點在於配合機械設計時增加設計上的單純性。
- 8.成本低：尤其是擺線轉子式，構造簡單製造容易，以現今工業學校的電腦整合製造技術即可完成。

二、震動問題改善方式

測試功能當中，「角速度穩地輸出測試」發現到有振動的現象，其中在高轉速輸入的情況下特別明顯，所以為了解決這個問題，必須分析震動的來源。

首先，震動的來源是由於各機件的質心不斷運動，重心沒有穩定的在同一點上，產生的搖撼力 shaking force(公式 6)，一旦輸入高轉速，就會有極大的向心加速度，造成搖撼力的產生，藉由公式可以知道，除了降低轉速外，降低質量 m 以及減少各機件重心與軸心的距離 r ，都可以降低搖撼力的大小。

$$F = m \times r^2 \omega \dots\dots\dots (6)$$

藉此公式，我們必須了解各機件的運動情形，分析所有機件的位移，並且進一步研究哪些機件需要重量減輕或減少質心和軸心的距離，最後再加工模型。

所以以下方向可以分為兩部份，其一為位置分析，必須要了解各機件的位置才能分析如何解決震動，其二為實際上的震動解決，藉由位置分析的結果，來研究實際上的解決方案。

三、位置分析：向量迴路法 Vector Loop Method

本機構內部只有四個機件在運動，其餘都是固定的。

我們可以用想像或看示意圖的方式，了解齒輪作內擺運動的運動情形，齒輪圓心繞著軸心公轉，其距離為公轉的半徑(如圖 27)，輸入軸偏心也是繞軸心公轉運動，輸出軸單純在軸心上轉動，沒有公轉，以上機件的運動都是單純的圓周運動，重心與軸心距離也都維持一定，計算上容易，但是十字滑塊的運動不單純，它的位置不是圓周變化，所以必須利用向量迴路法才能了解其的位置關係。

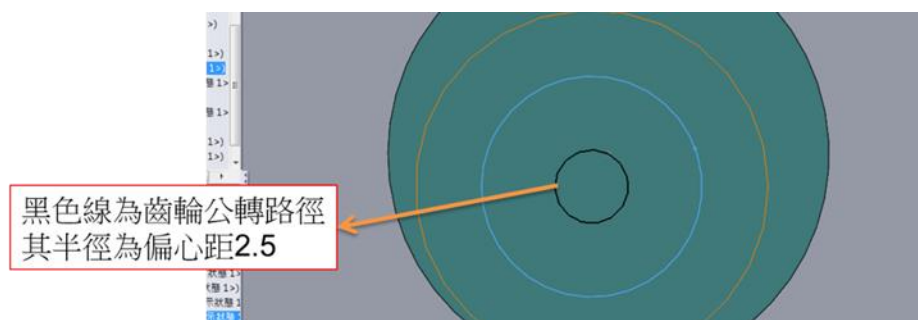


圖 27 Solid works 描繪出的偏心距

本段落將利用**機構學**理論證明其數學的關係式。本機構一共七種零件，其中固定架和定子視為固定的剛體，視為一個機件 r_1 ，模擬五個機件相對的位置及配合關係，利用 2D 平面簡化各零件，畫出其機構簡圖(如圖 28 左)，並且藉由機構簡圖畫出機構的向量迴路圖(圖 28 右)，以向量迴路法分析各向量(機件)的位移、角度變化量等等。

向量迴路法 Vector Loop Method :

是把機構給予適當的向量，使其繞成一迴路。每一迴路可以產生對應的方程式，以分析其運動，以輸出軸的圓心當原點，利用向量迴路法來推導其位移方程式。

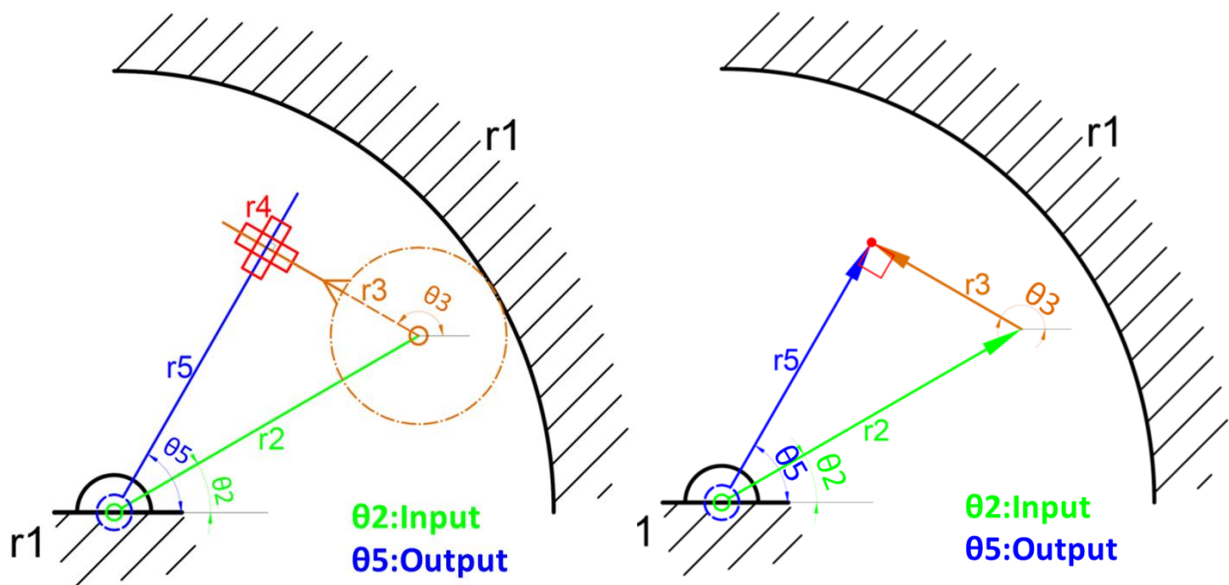


圖 28 機構簡圖&向量迴路圖

(這裡 r_1 代表固定架、 r_2 代表輸入軸、 r_3 代表正齒輪、 r_4 代表十字滑塊、 r_5 代表輸出軸)

由於本機構十字滑塊中心恰巧相交於齒輪滑槽和輸出軸滑槽，齒輪滑槽上的滑塊中心與輸出軸上的滑塊中心在同一點，距離為零，故其向量 r_4 為零。若任意改變形狀及向量的大小，就不會是單純的零向量，需要加入更多的方程式才能分析，目前先分析本機構的向量迴路法的位置關係。

圖 28(右側)能看出由每個向量連接而成的三角形為一閉鎖多邊形。其中以 r_2 ：輸入軸、 r_3 ：齒輪滑槽、 r_4 ：十字滑塊(由兩矩形滑塊交叉形成，故向量為 0)、 r_5 ：輸出軸， r_1 為固定機件、前後固定架以及內齒輪定子。

將輸入軸 2D 平面圓心設定座標系為(0,0)原點，藉由向量迴繞成一閉鎖多邊形為 0 向量的特性，再將每一向量迴路分解成在座標軸方向 X、Y 方向其合力為"0"，列出方程式為：

$$\vec{r}_2 + \vec{r}_3 + \vec{r}_4 - \vec{r}_5 = \vec{0} \dots\dots\dots(7)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} r_x : |\vec{r}_2| \cos(\theta_2) + |\vec{r}_3| \cos(\theta_3) - |\vec{r}_5| \cos(\theta_5) = 0 \\ r_y : |\vec{r}_2| \sin(\theta_2) + |\vec{r}_3| \sin(\theta_3) - |\vec{r}_5| \sin(\theta_5) = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

未知數：r2、r3、r5、θ2、θ3、θ5 六個，其中 r2 為已知，θ2 可自行設定，還差兩項方程式。而我們可以利用到周轉輪系公式求知 θ2、θ3 的關係為公式(2)，其中 Da 是內齒輪直徑，Db 是正齒輪直徑。

$$-(180^\circ - \theta_3) = \left(1 - \frac{D_a}{D_b}\right) \theta_2 \dots\dots\dots(9)$$

為何要-(180°-θ3)呢?因為假設在 θ2 為 0°時，θ3 是 180°，θ5 是 90°(如下圖 29)，故 θ2 的變化量為 θ3，θ3 的變化量為 -(180°-θ3)，為一負值，θ5 的變化量為 -(90°-θ5)，為一負值。

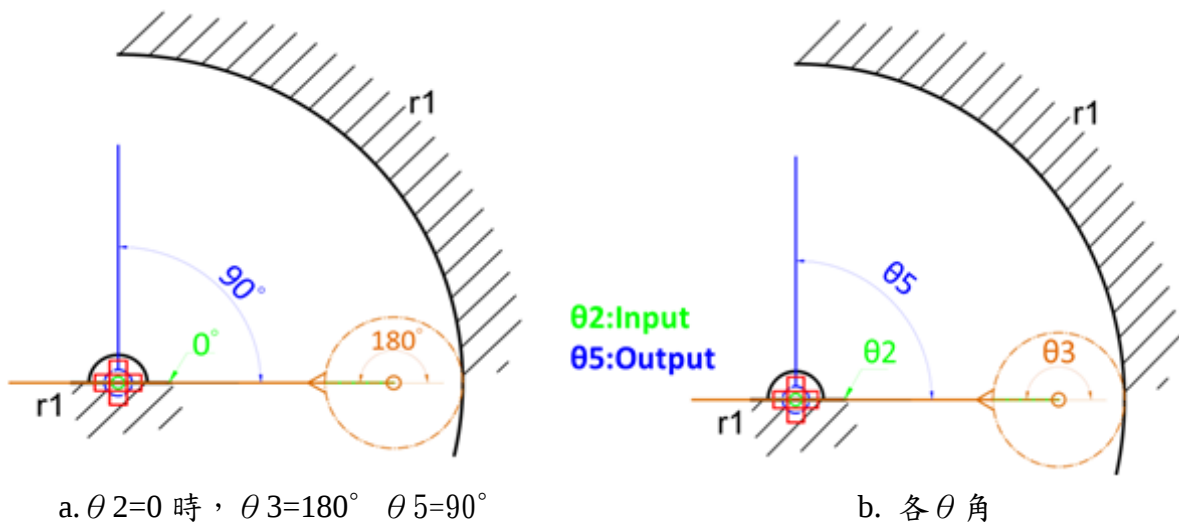


圖 29 機構簡圖初始狀態(θ2 為零)

接著，藉由 r3 和 r5 永遠互相垂直的特性(如圖 29 a、b)，可以利用直角三角形的相關規則，θ5-θ2 為三角形頂點為(0,0)的角，180°-θ3+θ2 為三角形靠近齒輪的角(運用平行等角)，兩者相加等於 90°，證明 θ3 和 θ5 的相對關係如下公式(10)。

$$90^\circ - (180^\circ - \theta_3 + \theta_2) = \theta_5 - \theta_2 \Rightarrow -90 + \theta_3 = \theta_5 \dots\dots\dots(10)$$

有了這些公式可以得知每個機件(向量)的位置分析，包括十字滑塊的質心位置，以及它的運動位移，藉由 θ_2 的值解出 r_3 ，十字滑塊的重心就在 r_2+r_3 的位置，以下是十字滑塊位移的路徑(圖 30)。

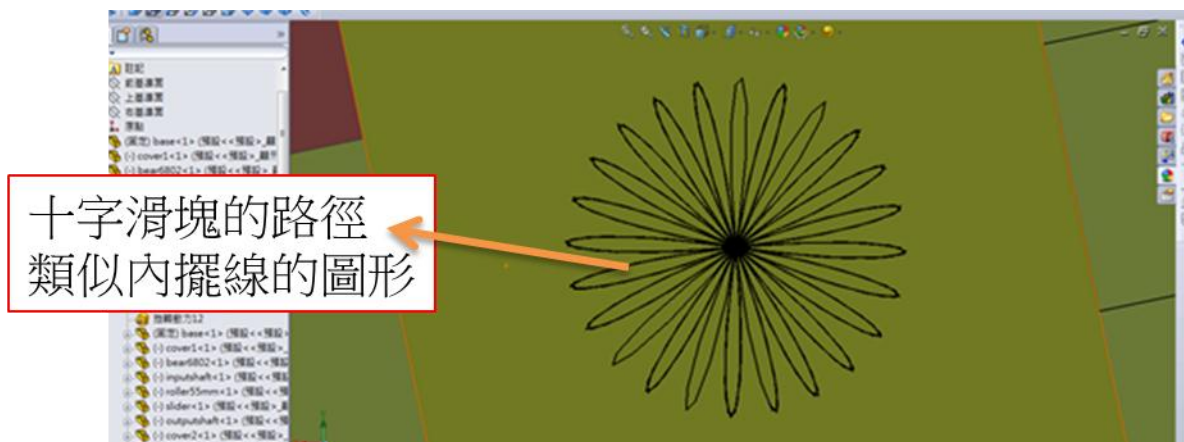


圖 30 十字滑塊偏移路徑

(二)實際上震動的解決

由上述位置分析可知，十字滑塊的路徑過於複雜，不易改善重心和軸心距離，所以以下章節不考慮十字滑塊造成的震動。就以單純實際上的模型而言，震動主要是由質量最重的齒輪造成，在不考慮十字滑塊的重量下，要解決震動問題的話，勢必要有以下針對齒輪的兩種行動，第一為齒輪的質量減輕，第二為減少重心與軸心距離。

1、齒輪的質量減輕：

由於齒輪是一個作內擺運動的機件，重心假如不在齒輪圓心的話，重心路徑將會是一個內擺線，造成更大的振動，所以不允許齒輪有重心偏移的情形，但是齒輪的重量最重，距軸心也最遠，要降低它造成的搖撼力，只能用減輕重量的方法才行，我們利用 solidworks 軟體，盡量切除齒輪上不必要的空間，來達到齒輪減輕重量的功用，其中沒有改變齒輪重心位置，都是以環狀排列或對稱圖形切除。觀察可行性後再加工而成。(圖 31 為 solidworks 齒輪減輕重量後的型態)

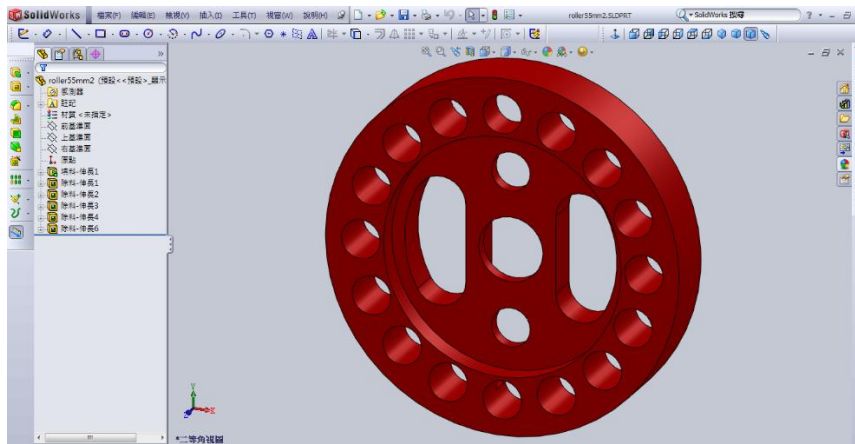


圖 31 齒輪減輕質量後

2、減少重心與軸心距離:

上述可知道齒輪不能改變重心位置，只減輕重量，要讓齒輪重心位置穩定的在軸心的話，只能在輸入軸加裝配重，達到整體重心在軸線的情況，重心到軸心的距離就會為零，因此我們設計一個簡單的配重加裝在輸入上，將整體重心穩定保持在軸心(組合圖 如圖 33)。

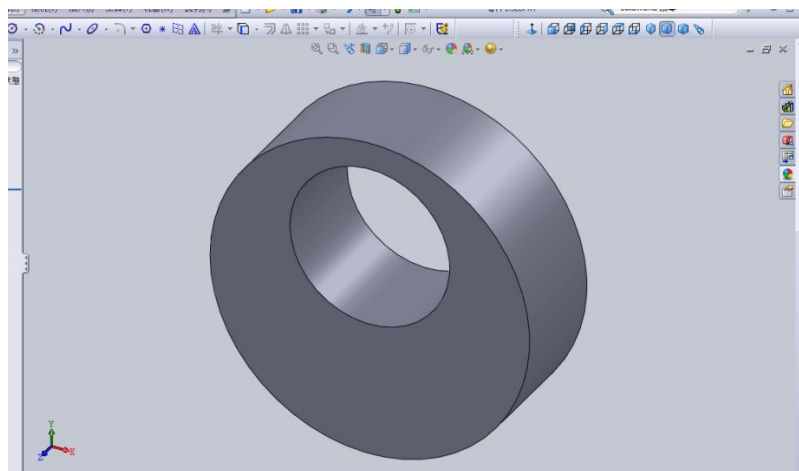


圖 32 輸入軸上配重質量設計

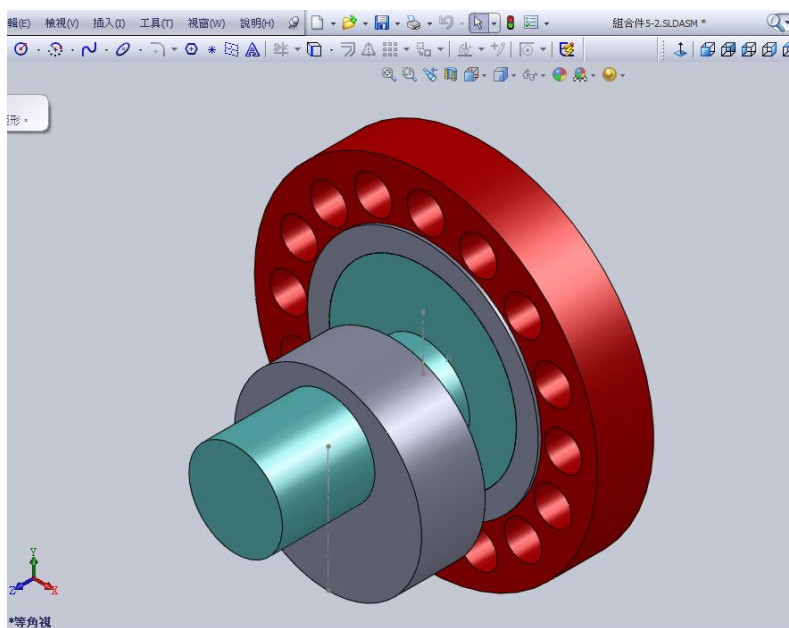


圖 33 輸入軸配重與正齒輪組合圖

三、內擺運動減速機和其它減速機之特點比較

為了更清楚的表達本專題「內擺運動式減速機」之特點，我們進行了課本中減速機的整理和比較，其中有 周轉輪系的行星齒輪減速機、渦桿渦輪減速機和最常見的定心輪系傳動。

(一)各種減速機減速比之比較

1.本專題"內擺運動式減速機"

(1)內擺運動減速機速比公式:

$$W_2 = \left(1 - \frac{D_a}{D_b}\right) \times W_1 \dots\dots\dots (11)$$

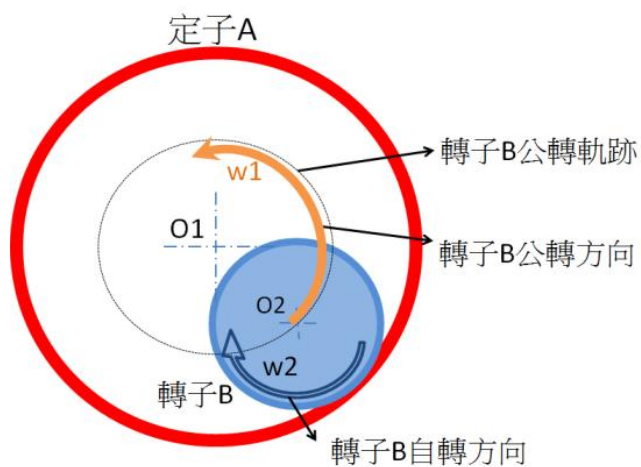


圖 34 內擺運動示意圖

(2)齒數及速比分析:

由公式和圖 35 第二、三項，我們可以知道自轉子齒數越接近定子齒數，其減速比會越大，且因為齒輪數只有兩種，速比計算容易，且容易設計為簡易整數比。

自轉子B 齒數	定子A 齒數	W1:W2 速比
9	10	9:1
55	60	11:1
59	60	59:1
99	100	99:1

圖 35 內擺運動式減速機齒數和速比關係

2.行星齒輪減速機

(1)周轉輪系基本公式:

$$\frac{\text{末輪轉速}-\text{搖臂轉速}}{\text{首輪轉速}-\text{搖臂轉速}} = \frac{\text{主動輪齒數乘積}}{\text{從動輪齒數乘積}} \dots\dots\dots (12)$$

(2)齒數及速比關係分析:

從圖 37 可以看出周轉輪系速比不容易為簡易整數比，原因可能是齒輪數有三個以上，中間的遊星必須配合太陽輪和環齒輪的節圓，齒數受限(常為基數)，導致速比不易整除計算。

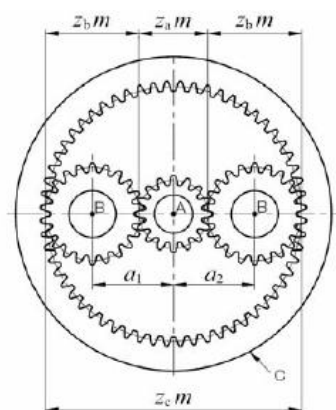


圖 36 行星齒輪

太陽輪齒數 Zs	行星輪齒數 Zp	環齒輪齒數 Zr	環齒輪固定、太陽輪輸出 行星架輸出時之傳動比
13	32	77	6.9231
13	38	89	7.8462
17	58	133	8.8235
13	53	119	10.1538
17	76	169	10.9412

圖 37 齒數和速比關係表(此為數據中一部份)

3. 渦桿渦輪減速機

(1) 渦桿渦輪速比公式:

$$\frac{\text{渦桿之迴轉轉速}}{\text{渦輪之迴轉轉速}} = \frac{\text{渦輪之齒數}}{\text{渦桿之紋數}} \dots\dots\dots(13)$$

(2) 齒、桿數及速比關係分析

由公式可以直接看出，只要渦桿紋數能整除渦輪齒數，其速比比值易為簡易整數比以及大減速比，但渦桿渦輪減速機的效率大約在 60% 左右。

4. 定心齒輪傳動

(1) 輪系公式:

$$\frac{\text{末輪轉速}}{\text{首輪轉速}} = \frac{\text{主動輪齒數乘積}}{\text{從動輪齒數乘積}} \dots\dots\dots(14)$$

(2) 齒數及速比關係分析

此減速機是最單純的減速機構，可以輕易調整速比大小，利用複式輪系便可在有限空間達到大減速比。

(二)各種減速機特性之比較

除了速比外，減速機還有許多特質可以比較的，以下是整理其他減速機優缺點比較，如表 6 所示：

表 6 各種減速機比較表

	內擺運動式減速機	行星齒輪減速機	渦桿渦輪減速機	定心齒輪傳動
不可逆	✓	✗	✓	✗
簡易整數比	容易	較不容易	容易	容易
成本高低	低	高	高	低
同軸出入	✓	✓	✗	✗
機械效率	高	高	低	高
整體結構	緊湊	緊湊	體積較大	體積較大

比較過後，我們可以更清楚的了解本專題減速機的價值，也知道本專題減速機可以和何種減速機競爭，能否取代其他減速機的可行性，且為未來商機定好方向。

柒、結論

本專題驗證了內擺運動配合十字滑塊做為一個減速機的可行性，我們設計了一個新的樣式來驗證由擺線運動所產生的公、自轉的關係來達到減速機的功能，並且發現等腰曲柄連桿組的十字滑塊可以消除公轉運動對自轉運動的影響，進而從自轉子的內擺運動中引導出自轉子的自轉，來達到減速的目的，這個過程讓我們在課堂上所學的專業知識，從概念設計、理論分析、零件設計、零件實作、組裝測試等步驟可以作一個整合的應用。

本專題設計的減速機除了上述這些優點外，還有許多功能、缺點及用途需要發現，例如：若將此減速機零件縮小，是否能助於精密產業的應用(ex:機器人)? 若將此減速機零件材質做更改，會有什麼改變? 若要增加減速比，正內齒輪齒數有無限制條件(ex:齒高干涉)? 若不可逆性質的減速機逆向操作的話，能承受多少力量而不被破壞? 可否消除背隙等等，這些問題我們將會在未來繼續探索，朝向發明最完美的減速機和它的應用層面前進。

另外，擺線轉子減速機的固定架使用透明壓克力製作，方便操作者觀察內部機件運動情況，適合做為教具的使用。

振動問題方面，以找出較合適的方式做出改善，利用了機構學中的：[向量迴路法](#)，使用了向量迴路法分析機構桿件重心的位移情形，並提出「重心偏移」策略以改善震動現象。

捌、參考文獻

- 1、徐孟輝(民 95)，創意機構設計，東大 台南
- 2、李文欽(民 80)，自動省力化機構，建興 台北
- 3、葉倫祝(民 99)，機件原理，全華 台北
- 4、陳海清(民 99)，機械力學，全華 台北
- 5、賴光哲(民 90)，機械構造解剖圖鑑，世茂 台北
- 6、顏鴻森(民 103)，機構學 Mechanism，台灣東華
- 7、<http://www.gtc-gearbox.com/?lg=T> 鼎縊有限公司
- 8、<http://www.chusheng.com.tw/> 嘉晟精密有限公司
- 9、<http://www.sh-lihai.com/> 上海利海電機有限公司
- 10、<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%92%9B> /鈦金屬 維基
- 11、<http://www.iir.tw/index.php/> 台灣發展研究院機器人研究所

【評語】 100015

1. 作者對減速機有完整的了解，原理應用及優缺點等，皆有清楚描述。
2. 內擺如何達成減速有詳敘有成品但仍有改善空間特別是在震動方面。
3. 多增加測試數據。