

海底地震儀關鍵技術設計與研發

Design and Development of Key Technologies for Ocean Bottom Seismometer

主管單位：台灣海洋科技研究中心

蕭毓宏

陳柏棋

張家溥

張旭光

楊益

Hsiao, Yu-Hung Chen, Bo-Chi Jang, Jia-Pu Chang, Shih-Kuang Yang, Yih

台灣海洋科技研究中心

摘要

海底地震儀 (Ocean bottom seismometer, OBS)，是佈放於海底的地震觀測儀器，不僅可研究海底地質構造特性，亦可應用於天然水汽化合物等天然資源探勘。長期以來我國所使用的海底地震儀均仰賴國外進口，因此若想建立密集之長期海底地震觀測站，或是天然資源探勘，相關設備之研發是勢在必行。依據海上作業環境及佈放深度需求，已完成低成本、小型化、易回收、能長期佈放之 2000 米海底地震儀。本文針對海底地震儀週邊儀器設備，研發感震器平衡環系統及 5000 米水密技術。上述關鍵技術的掌握不只可降低因維修造成的成本及時間，更擺脫商用儀器的功能限制，能依實際需求提升或改善現有儀器功能之限制。

關鍵詞：海底地震監測、海底地震儀、儀器研發

Abstract

The Ocean bottom seismometer is to deploy seismometer on the ocean bottom, to observe not only the characteristics of geology structure, but also natural resource of hydrate. In addition, the ocean bottom seismometer we used almost import from oversea, it costs quite expensive; that was why we using not frequently. If we would like to make more long-term ocean earthquake observation station or survey more natural resource with limit budget. Developing relevant facility will become critical. Due to the environment of ocean and depth requirement, 2000m ocean bottom seismometer was successful developed with low cost, small size, easy recovery and long-term deployment. This research develops gimbals and 5000m waterproof technology not only to reduce the cost and time of instrument repair but also to break away from the limit of commercial product to promote and improve the function of the instrument by the requirement.

Keywords : Earthquake observation, Ocean Bottom Seismometer, OBS

一、前言

在天然災害中，地震對人類所產生的影響與衝擊可以說是難以預估的，與其他天然災害現象相比，其主要原因除了地震發生時會對人類的生命與財產安全，帶來嚴重的威脅外，以目前的科技而言，並無法準確地預測何時、何地，會發生多大的地震。因此，為了進一步了解地震生成之原因，世界上大部分陸地區域已經建立了大量的地震觀測站，且透過長期觀測，取得了豐富的地震資料。然而佔全球面積 70% 及地震主要發生地點的海洋地區卻非常少有長時間的觀測站。因此，建立適合於長期海洋地震觀測的設備，一直是地球科學界的重要目標之一。而在眾多的相關地震觀測設備中，以海底地震儀（Ocean Bottom Seismometer, OBS）更顯的重要，海底地震儀是一種直接把感震器放置在海底的地震觀測系統，在海洋地球物理調查與研究中，既可以用於海洋人工聲源對於地殼剖面的探測[1]，也可以用於對天然地震觀測，其探測與觀測結果可以用於研究海洋地殼地幔的結構與天然地震的地震層析成像。因此，以美、日、德、法等先進國家而言，其發展已有超過 20 年的歷史，且種類不只一種[3-6]。以我國而言，由於四面環海且位處環太平洋地震帶上，對於海洋地震的觀測已成為研究地球科學學者的重點項目之一。但是長期以來所使用的海底地震儀均仰賴進口，由於造價昂貴（每套造價 60 萬到數百萬不等），所以數量不多。有鑒於此，本中心於 2009 年由德國 KUM 公司引進 3 部寬頻地震儀[5]並於同年 5 月於東南海域開始收集地震資料。整合上述所引進之地震儀可以發現，短週期地震儀由於缺乏感震器平衡裝置，容易造成所量測到地震之水平訊號與垂直訊號相互干擾，進而使所收集到的地震訊號處理困難，且因電源供應及儲存裝置限制，佈放期限無法達數月或一年之久。依據上述之問題點及海上作業與深海壓力需求，寬頻、低成本、小型化、易回收、能長期置放於海底的地震儀設計將是地球科學研究者最殷切期盼的。因此，若想在有限經費下建立較密集之海底地震長期觀測站，則相關設備之開發已是勢在必行。綜觀上述，本研究希望藉由建立海底地震儀系統，整合國內相關的儀器設計、製作、研發等技術，根植台灣自行研發海底地震觀測儀器的能力。

OBS 需長期佈放在海底，因此在設計時必須要滿足下列要求：(1) OBS 功能為量測海底地動訊號，因此在設計上必須使其感震器能直接接觸海床，以避免訊號傳遞過程因過多結構物阻隔，而使所量測之地震訊號失真。(2) 以寬頻地震儀而言，感震器係架設在平衡環上，因此在整體開發時除必須考慮機械結構的共振因素，避免影響地動資料之收集外，在訊號解析度上亦必須加以提高。另外，OBS 在量測地動訊號時，亦須考慮海流等背景雜訊影響，以減低地震訊號分析之誤差。(3) 為達到長期觀測之目的，OBS 需在海底獨立運作一段時間，當系統發生故障時無法由人為加以排除，因此系統穩定性在設計時必須要加以考慮。除此之外，系統在設計時必須朝向低功耗方向加以設計，以延長觀測時間。(4) 能否順利成功回收 OBS 是研究海洋地震資料的重要關鍵之一，因此 OBS 在使用時必須要有水下通訊裝置、釋放機構及海面搜尋輔助裝置等以提高回收率。(5) 由於海上作業的特殊性，OBS 在設

計時必須要儘量減少其體積與重量，除方便佈放及回收外，過大之體積與重量會因為海底壓力因素使結構件設計更為困難。

海洋中心結合學研界的能量，與中研院及中山大學共同合作研發海底地震儀-庭園鳥(YardBird)。在關鍵技術開發上，已完成:(1)主動式平衡機構設計與實作，相關專利「微型地震感測器平衡系統」正在申請中；(2)感震器水平姿態修正機構記錄裝置的設計，可準確掌握海底地震儀內部之三軸感震器(geophone)著於海床的角度及方位，有利於掌握資料的後處理品質；(3)深海錄影系統之研發，可觀測海底地震儀著落海床的姿態，作為水平姿態資料比對及驗證。

二、感震器平衡環系統

2.1 感震器與平衡環之關係

地震儀在接收地震訊號時，需要三軸向的感震器(geophone)分別朝與地心垂直及水平方向擺放，但海底地震儀(Ocean Bottom Seismometer)是利用投放的方式，從海平面沉降於海床上，其著於海床的位置無法準確的掌控，更沒有辦法知道海床上傾斜角度，因此需要感震器平衡環來輔助調整三軸感震器的位態。

一般感震器平衡環分為主動式與被動式兩種，被動式感震器平衡環通常利用重力垂直重力場的原理讓機構達到平衡，再用馬達煞車的機制使整個機構進入鎖定狀態，而主動式感震器平衡環則是利用馬達調整平衡機構進入穩定狀態，並利用組件精度與齒輪組配合加以固定。目前大部分的平衡機構加工精度需求高、設計複雜、回正角度有限，雖說有限的回正角度已經足以應用，但卻無法應付各種海上的突發狀況。本文的研發要點在於開發穩定度高，且可以應付各種複雜海況的感震器平衡環，利用較大的摩擦力與高減速比的直流馬達，使機構長時間維持再鎖定與可校正的狀態之下。

新型主動式感震器平衡環內部利用微控制器與角度感應器搭配取得機構的角度，再控制兩顆垂直軸馬達調整機構 X 軸與 Y 軸的角度，使機構達到平衡的目的。主動式感震器平衡環鎖定的方法是屬於長時間鎖定，運用齒輪、蝸桿與馬達的大齒輪比固定機構，其機構並不會有放鬆的狀態與鎖定狀態的差別。以這種設計角度來看，感震器以對抗 5 G 以上之重力加速度而不會使機械構件有鬆脫現象。主動式感震器平衡環在於其擴充性與泛用性可程式化依照需求調整水平角度外，更可以搭載其他設備來進行實驗或校正，不會因為搭載多於零件改變重心而對於平衡造成不良影響。

2.1 機構設計概念

機構設計主要為建立於一個可旋轉的 Y 軸底座，中間利用一根主軸螺絲來做為其旋轉中心，螺絲貫穿整個底座與底部的螺帽對鎖，其螺帽與螺絲的鬆緊度則會影響主軸磨擦力的大小。圖一為底座的剖面圖，可清楚看到主軸螺絲貫穿主軸將其鎖在底座上，而主軸內外的三個軸承則可以防止螺絲鎖緊時過大的摩擦力使主軸無法

轉動，進而達到利用摩擦力將機構固定又可隨時調整的目的。

另外 X 軸藉由一軸承固定座與底座連接，軸承固定座與底座連接處必須利用加工精準度與工件槽配合的方式來確認與底座準確的連接。而感震器固定座則穿過軸承固定座形成另一個旋轉軸，倘若穿過軸承固定座而不加以利用其他方法固定會因為其軸承的公差間隙使 X 軸搖晃無法固定的情況產生，為了消除軸承間隙而在軸的另一側套入一固定環，讓感應器固定座能夠夾住軸承固定座達到穩定 X 軸的效果。由圖二的組合圖可以看到在感震器固定座上除了可以將三軸感震器結合上去，更可以架上角度感應器與校正用的雷射光。

機構上使用高減速比的馬達(392:1)來克服機構擁有的摩擦力，並利用蝸桿來控制齒輪提高機構的可控制性，且高減速比齒輪不只擁有較大的扭力，更擁有小間隙的特性，如此組成不只能驅動機構，更能夠進一步固定機構，使機構受到劇烈搖晃與撞擊時能夠維持平衡的狀態。齒輪所使用的齒數為六十齒，每一齒可控制的度數為六度，故蝸桿轉一圈可以帶動一齒則馬達轉動一圈則可調整機構六度，馬達轉動一度則機構轉動的角度為六十分之一度，所以利用蝸桿可以縮小機構的控制角度增加控制的精度。表一為齒輪與蝸桿規格，圖三為平衡機構架上馬達、蝸桿與齒輪。

最後的步驟則是為機構配線，在設計機構的過程當中每一個零組件內都會預留感震器、馬達與角度感應器所需要的線路空間，所有的線路會從軸承內部通過，再經過主軸螺絲由底部通向外側。為了讓線路能夠纏繞數十圈而不會斷線，除了線路需要預留長度之外，還要有設計線路的位置從中心點通過，如此線路雖然會互相纏繞，卻不至於卡住機構或纏繞機構太多圈而繃緊損毀。最後完成之實品可由圖四所示。

三、5000 米水密技術

在海洋中，每十公尺深度會增加相當於一大氣壓的水壓，意指在 5000 米水深的環境，其水壓約高達 500 大氣壓。如此強大的水壓施加於裝載儀器設備的艙體上，如果設計不良，會造成艙體破壞甚至於炸裂。因此在高壓環境的水密結構上，需要專業的技術來克服，此項關鍵技術不只適用於深海科學研究上，在軍事上的應用也相當廣泛。

在深海中高壓的環境底下，如何將壓克力或是玻璃等透明的元件，與鋁合金的壓力艙體結合需要長時間的經驗累積與時間測試。除了要利用壓力使視窗與水密艙體及防水環緊密的貼合外，同時鋁合金在高壓下產生的變形量亦不能破壞視窗。國外在設計深海壓力視窗有一定的經驗公式，本研究參考 2004 年 Jerry[7]發表論文提到的壓力視窗設計方法，此法可以作用在-14.5~20000psi(水下 13000 米)的壓力下。根據 ASME PVHO-1 法規的設計有三種壓力視窗設計方法：(1)平板視窗。(2)錐型視窗。(3)雙面錐形視窗。

其中平板視窗為最容易加工的壓克力視窗設計，直接裁切壓克力板材即可取得。而錐型視窗與雙面錐形視窗在加工上需要製作模具，生產較為不易；但是錐形斜面可以分散視窗在海底所承受的壓力，讓視窗較不易受到應力破壞。而本研究參

考 Laughton[8]文章利用錐形壓克力視窗成功做出一 5000m 深海攝影系統設計。其中利用 ASME PVHO-1 的公式可驗證當壓克力透鏡厚度(t)在 0.5inch 以上時，可套用其與透鏡內直徑(D_i)的關係公式如下：

$$\frac{t}{D_i} \geq 0.08 \quad (1)$$

由公式可知當透鏡厚度與錐形內圓比例大於 0.08 時，在深海的壓力下是安全的。但是為了驗證規範的可信度，利用機械設計軟體對該設計進行應力分析，計算出壓克力視窗的安全係數與變形量。

壓克力視窗在應力分析下給予視窗正面 12000psi 的壓力，所得到的安全係數(FOS)為 1.0583，正中央變形量為 0.916mm 通過應力測試。為配合壓克力視窗錐形的角度，在鋁合金水密艙體上必須做出不同的設計來配合壓克力視窗的角度，並在配合的角度上設計 O 型防水環。讓壓力藉由斜面分散在水密艙體上，同時壓迫防水環增加水密效果。水密艙體的設計也經過應力分析後加工製作。並且水密艙體上搭配 Subconn 所生產的 12PIN 水密接頭。圖五為水密蓋及水密艙體應力分析變型量結果，在 9000psi 壓力下安全係數(FOS)分別為 1.612 與 1.142，FOS 皆在 1 以上。圖六為視窗與水密艙體的剖面圖，與 O 型水密環的配合方式為了放入海中時，防止高壓的海水進入外也防止壓克力透鏡與鋁合金件接觸產生傷痕。

四、結論

為確保海底地震儀資料收集之準確性，本研究利用主動式感震器平衡環進行設計與分析。由設計結果可以歸納如下：(1)為使內外平衡環均能達到調整最小傾角之能力及降低系統體積，感震器固定座必須除必須使用高密度之材料外，其重心位置與轉軸距離亦必須加以設計，則感震器固定座及內平衡環平衡時之傾角誤差才能維持在 1 度之內。(2)當平衡環設計完成後，必須針對其加工精度（公差設計）及組裝步驟嚴加考慮，以避免組裝時造成誤差。(3)由結果可以發現，在自由擺動與煞車裝置致動下，其平衡環傾角誤差來自於導引螺桿與煞車夾爪在運動時，組裝平行度不佳所造成。(4)經過頻率響應分析，平衡環系統之截止頻率為 26.3Hz，而共振頻率為 33.7Hz，均可以滿足一般地震觀測儀器之需求。

完成之成品經由研究船帶往深度約 5600 公尺之海域進行測試，將其掛載於船用 CTD 架上，並在 CTD 架掛載 60 公斤重錘，將其纜繩下放至 5050 米處，全程測試時間為七小時，而水密艙體位於底層時間為 30 分鐘。回收後經檢查並無水痕及水氣的痕跡，可驗證本研究的水密設計是可以耐 5000 米水深。

常用於海底地震儀回收用之信標主要有閃光燈與無線電信標兩種[2]，閃光燈信標開啟時會閃爍，方便於夜間進行回收作業。無線電信標開啟時則會發送一定的信號聲響，當接收端收到之後可以透過訊號的強弱判別出信標的相對方位。我方應用本文所闡述之水密技術，亦已設計一套可發送 GPS 座標的無線電信標，透過 GPS 提供精確的座標位置，當接收端接收到信標回傳的 GPS 位置，即可有效率的將船隻行

駛到信標附近回收海底地震儀，避免因為海況與氣候的影響，有效提高海底地震儀的回收效率與成功率。本信標為外掛方式設計，不僅可以用在海底地震儀上面，亦可運用於任何海底觀測設備上（如水下錨錠鏈、遙控式水下載具…等），此外亦應用於海底地震儀感應器之水密艙體，可將其作業深度提升至 5000 米水深。

參考文獻

1. 陳松春、王詠綸，(2007)，「天然器水合物探勘技術」，科學發展，412 期，第 26-31 頁。
2. 林慶仁、陳柏棋、王兆璋、張旭光、張家溥、田蓉禮，(2010)，「新一代沈浮式海底地震儀之研發」，第 32 屆海洋工程研討會論文集，第 735-740 頁。
3. L. M. Dorman, “Seismology Sensors”, Encyclopedia of Ocean Sciences, pp. 2737-2744, 2003.
4. Spahr C. Webb, Thomas K. Deaton, and Jacques C. Lemire, (2001) “A Broadband Ocean-Bottom Seismometer System Based on a 1-Hz Natural Period Geophone”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No.2, pp. 304 – 312, 2001.
5. http://www.kum-kiel.de/frameset_eng.htm
6. http://www.ifremer.fr/drogm_uk/Realisation/Vulgar/OBS/obs.html
7. Laughton, A. S., “A New Deep-Sea Underwater Camera”, Deep Sea Research, Vol. 4, pp120-124, 1957.
8. Stachiw, J. D., “Acrylic plastic as structural material for underwater vehicles”, Underwater Technology 2004, pp289-296, 2004.

表 1、齒輪與蝸桿規格

規格名稱	模數	齒數	壓力角	導程角	中心距	外徑
齒輪	MN1	60	20 度	4.279 度	39.8mm	69.18~69.00mm
蝸桿	MN1	單牙嘴	20 度	4.279 度	39.8mm	15.40mm

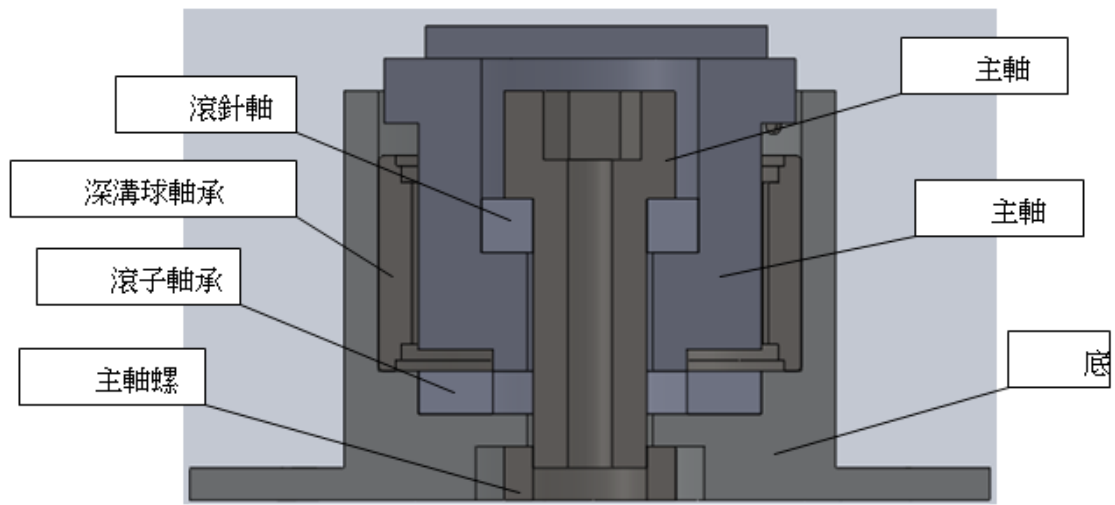


圖1、平衡機構底座剖面圖

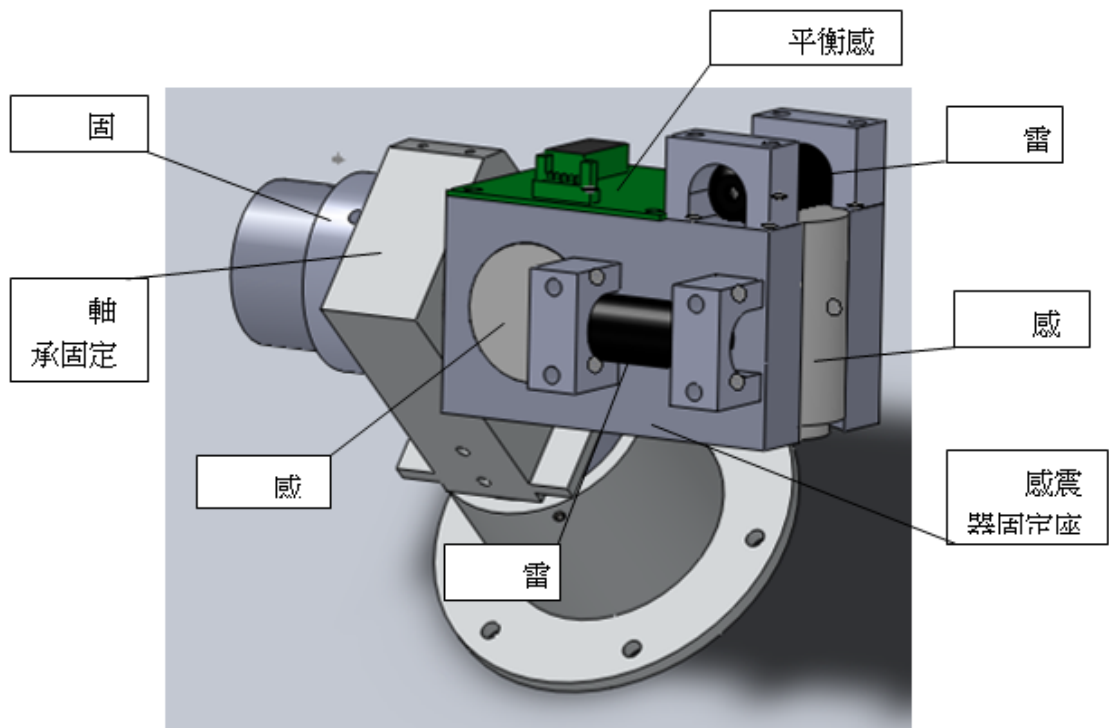


圖2、機構圖

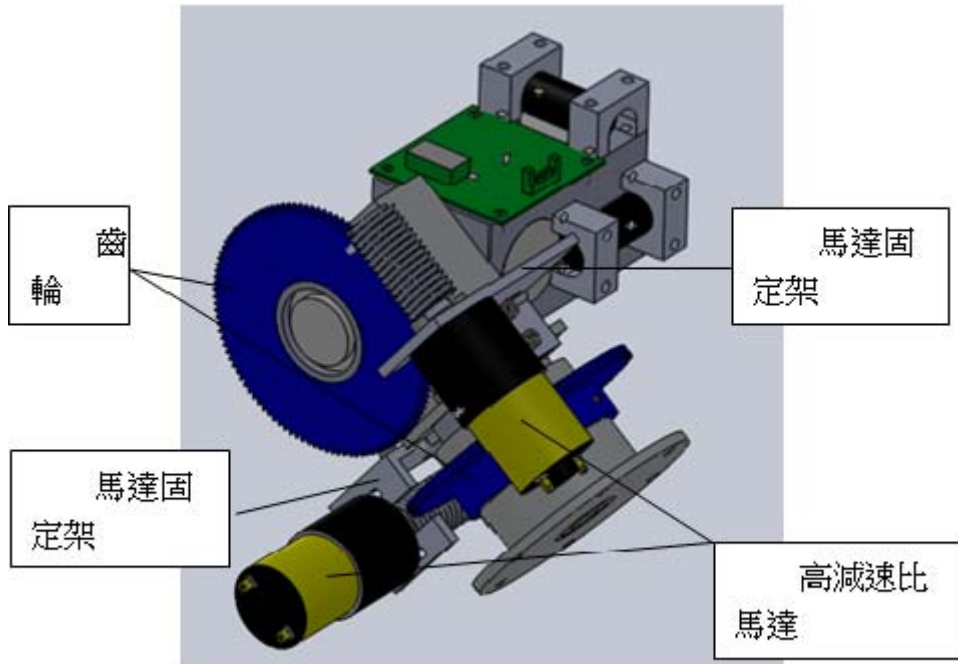


圖 3、馬達、蝸桿、齒輪架設圖

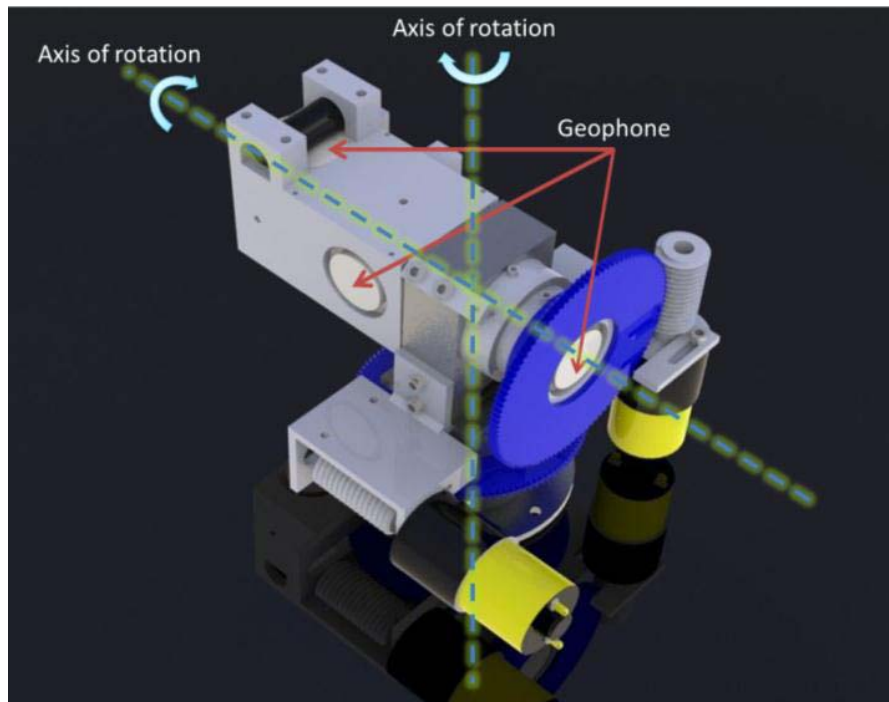


圖 4、平衡機構組裝完成圖

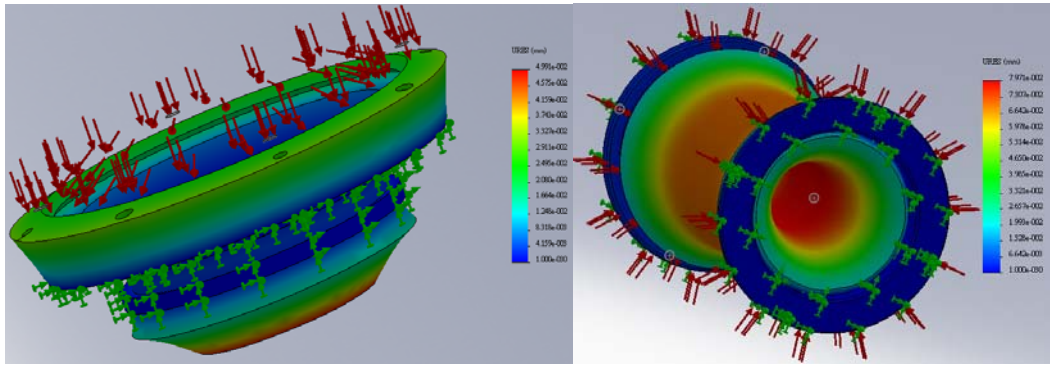


圖 5、水密蓋及水密艙體應力分析

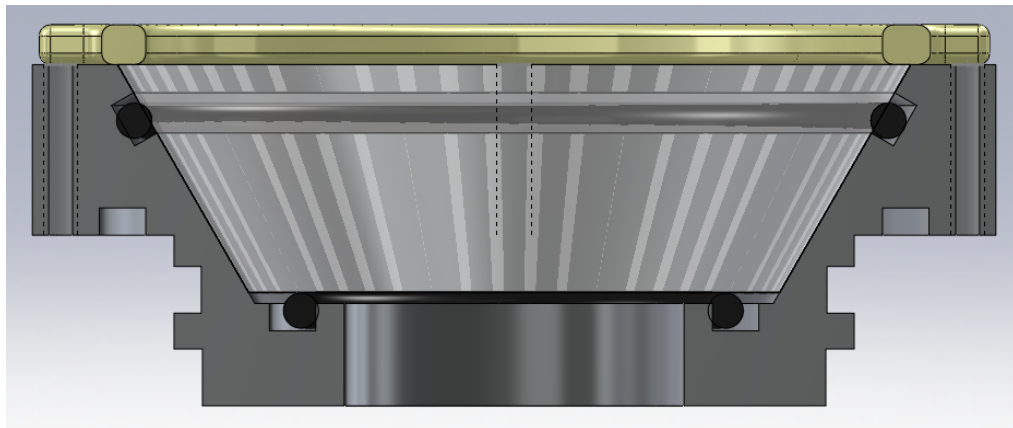


圖 5、視窗及水密艙體組裝剖面圖