

出國報告（出國類別：進修）

美國密西根大學航太工程系博士班-
俯仰平板之非定常空氣動力學

服務機關：國防大學理工學院

姓名職稱：尤懷德

派赴國家：美國

出國期間：自民國 99 年 8 月 25 日至民國 103 年 8 月 24 日

報告日期：民國 103 年 9 月 24 日

摘要

本報告係依據「行政院及所屬各機關出國報告綜合處理要點」相關規定撰擬，旨在提報個人進修經驗與所見所聞，除有利大眾查閱外，更可提供日後國內大專院校相關行政與教學人員運用參考。

個人於 99 年 8 月 25 日奉派至美國密西根大學安娜堡校區(University of Michigan, Ann Arbor)攻讀航太工程博士，進修目的在於培養國防大學理工學院機械暨航太工程系未來師資，並於 103 年 8 月 24 日修業期滿，畢業返國報到。

於美國密西根大學進修期間，除於進修系所進行學術合作交流和建立良好友誼外，更充分體會美國風土人情、教學理念及研究專業，從而得以吸收所見所聞，並進一步應用於院內之教學、研究、服務及輔導工作。

本報告首先逐一介紹進修博士目的、過程、心得與建議進行介紹，以供國內大專院校相關行政和教學人員運用參考。

目次

壹、	目的.....	1
貳、	過程.....	1
參、	心得及建議.....	7
肆、	參考資料.....	7

壹、 目的

個人於民國 99 年 8 月 25 奉國防部國力培育字第 0990002306 號令至美國密西根大學 (University of Michigan) 航太工程系 (Aerospace Engineering Department) 攻讀博士，為期 4 年。於 103 年 8 月 24 日修業期滿，取得博士學位返院報到。進修目的如下：

- 一、培育國防大學理工學院機械能源暨航太工程學系師資。
- 二、了解大自然界飛行生物飛行原理和所延伸之非定常空氣動力學，期提供微型飛行器設計參考和理論建立。

本報告係依據「行政院及所屬各機關出國報告綜合處理要點」相關規定撰擬，旨在提報個人進修經驗與所見所聞，並提供日後國內大專院校相關行政與教學人員運用參考。

貳、 過程

一、系所簡介

密西根大學是間公立機構，於 1817 年建立，學生對教師的比例為 15 比 1。密西根大學於 1914 年開始航空學系，自今培育超過 6000 名航空和航太工程師。美國新聞 (U.S. News) 於 2013 年調查結果顯示，該系於公立機構中研究部 (graduate program) 排名第 1 位、大學部 (undergraduate program) 排名第 3 位。

二、師資與人員

密西根大學航太工程學系之核心教師計有 33 位、兼任教師 4 位、榮譽退休教師 13 位。教師成員區分為 4 個群組，包含氣體動力 (Gas Dynamics)、動態和控制 (Dynamics and Controls)、太空系統 (Space Systems) 及結構與材料 (Structures and Materials)。

氣體動力群組有 6 間實驗室：數值航空科學實驗室 (Computational Aerosciences Laboratory)、氣體動力學影像實驗室 (Gas Dynamics Imaging Laboratory)、計算流體動力學實驗室 (Laboratory for Computational Fluid Dynamics)、非平衡氣體和電漿動力學實驗室 (Non-Equilibrium Gas and Plasma Dynamics Laboratory)、電漿動力學和電子推進實驗室 (Plasmadynamics and Electric Propulsion Laboratory) 及推進與燃燒工程實驗室 (Propulsion and Combustion Engineering Laboratory)。

動態和控制群組有 5 間實驗室：自動化航太系統實驗室 (Autonomous

Aerospace Systems Laboratory)、航太、機器人與控制實驗室 (Aerospace, Robotics and Controls Laboratory)、姿態動力學與控制實驗室 (Attitude Dynamics and Control Laboratory)、密西根探索實驗室 (Michigan Exploration Laboratory)、噪音、震動與運動控制實驗室 (Noise, Vibration and Motion Control Laboratory)。

太空系統群組有 3 間實驗室，部分實驗室隸屬氣體動力或動態和控制群組：非平衡氣體和電漿動力學實驗室 (Non-Equilibrium Gas and Plasma Dynamics Laboratory)、電漿動力學和電子推進實驗室 (Plasmadynamics and Electric Propulsion Laboratory)、密西根探索實驗室 (Michigan Exploration Laboratory)。

結構與材料群組有 5 間實驗室：自適應材料與結構實驗室 (Adaptive Materials and Structures Laboratory)、自適應氣動彈力學與結構研究實驗室 (Active Aeroelasticity and Structures Research Laboratory)、合成結構實驗室 (Composite Structures Laboratory)、複合網絡設計最佳化實驗室 (Multidisciplinary Design Optimization Laboratory)、複合尺度結構模擬實驗室 (Multi-Scale Structural Simulations Laboratory)。

三、修課科目

為獲取密西根大學航太工程博士學位，所有學生必須依序完成下列事項：

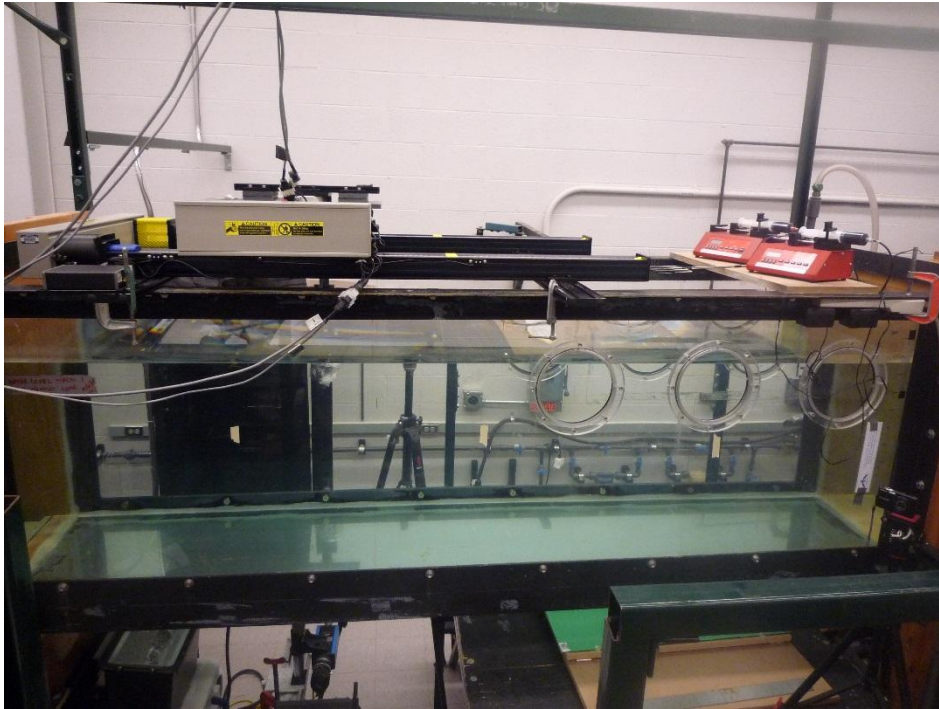
(一) 預候選人資格：學生必須向航太工程系研究生指導委員會提出申請。申請人必須修習博士學位相關課程，平均成績須維持在 3.5 或以上，且經航太工程系教師背書。所修習科目至少 5 門研究生等級並且在密西根大學取得，但不包括直接研究 (AE 590) 和研究生研討會 (AE 585)。個人所選擇修習科目以基本能力測驗科目為主，另修習一門流體機構實驗方法，以熟悉研究工具。

(二) 研究參與：每位博士生在密西根大學的第一年必須選擇一位教師當指導老師，並開始從事研究活動。研究參與可透過以下方式達成：

1. 修習直接研究 (AE 590)。
2. 擔任研究生研究助理 (graduate research assistant)。
3. 直接和指導教師安排。

個人選擇與指導教師於學期間修習直接研究 (AE 590) 課程，題目依個人進修目的設定。先期每週以書面簡報方式向指導教師報告研究進度，期中進行實驗矩陣設計與實驗，後期分析結果、撰寫研究報告書，以為評分依據。透過一系列實際操作與結果討論，個人從中深刻體會、熟悉指導教師於研究上精闢見解與獨特觀點。

圖一 密西根大學航太工程系循環式水洞。



(三) 基本能力測驗 (Oral Preliminary Examination) :

成為候選人前，學生必須通過口試基本能力測驗，驗證是否已具備高水準之航太工程領域能力。學生必須從核心課程中選擇 3 門科目、其他科目中選擇 2 門科目進行口試。每年有 2 次測驗時間，分別於秋、冬季舉行。考試期間，學生以一對一方式，至相關教師辦公室進行測驗，每科時間 30 分鐘。必要時，學生得運用黑板或白板解釋或回答問題。測驗題目皆與所選科目內容相關，但更貼近研究、實驗的實踐，比上課考試更靈活。試後，所有參與測驗教師集合開會，對會考學生進行評選，評選內容除考慮口試結果外，亦包括學期成績和研究參與狀況進行評分。當日或隔日，會考人員會收到正式電子信件通知結果。

個人選擇核心科目包含可壓縮流 (compressible Flow)、黏流 (Viscous Flow)及結構動力學 (Structural Dynamics)，其他科目包含數值流體力學 (Computational Fluid Dynamics) 和紊流 (Turbulent Flow)。

(四) 候選人資格：要成為候選人，學生除須通過基本能力測驗，亦須保持良好成績與展現獨立研究能力，完成 18 個學分課程，滿足瑞克漢學院 (Rackham School) 修課要求。

四、研究設備

個人所有研究結果皆於低紊流循環式水洞(如圖)中獲得，該設備是在個人指導教師指導下，由一位碩士班學生設計，由一位該系專屬技工製作組裝完成，歷經近 20 年測試、改良、實驗，該水洞可提供相當均勻自由流速，其在穩定性和可重複性上之表現相當優異，據了解，該水洞推

進風扇是屬海軍專用等級。該名技工尚在系上工作，當設施發生故障時，可立即提出申請檢修。

個人研究採取流場可視化、粒子圖像測速 (Particle Image Velocimetry) 及測力等 3 種實驗方法進行，期對非定常空氣動力學能有完整瞭解，並提供數值模擬學者參考依據。這 3 種實驗方式皆須先經過思考，再動手將各器材(具)連結，以配合不同實驗矩陣需求，並非商用模組，須花費心力透過廠商執行各項內部原件變動設計。

五、口試與論文

個人於口試前 6 個月成立口試委員會，成員由個人尋找、指導教師推薦等交互討論後確定。委員會成員以實驗、數值模擬及氣動力等專長之學者為考量對象。

為能如期取得學位並加強自我語言能力，在指導教師建議下，個人於第 3 年開始，每週撰寫研究進度，內容以描述當週完成事項為主，包含理論推導、程式撰寫、實驗工具設計、實驗儀器組裝及實驗流程設計等。口試前 6 個月，開始將每週研究進度重新編排，將先前參加研討會內容選擇性編排於本文。口試前 4 個月開始將文獻回顧進行撰寫，含資料整理、製作圖表等。並依學院規定論文於口試前 15 天，提交論文委員審閱，論文委員最遲於口試前完成審查結果上線。指導教師或候選人於口試前須列印審查表並帶至口試會場。口試後，該審查表須由委員會成員簽名，並提交瑞克漢學院 (Rackham School)。口試後，候選人依自我期程安排，將修改後論文提交瑞克漢學院 (Rackham School) 申請畢業，屆時瑞克漢學院 (Rackham School) 會提供一份證書，以代表完成所有畢業文件提交。候選人得憑該證書申請業界、學界工作。畢業證書將於統一由瑞克漢學院 (Rackham School) 寄發至個人指定地址。

六、發表文章

密西根大學航太工程系要求博士班學生必須能自己執行原創性和可發表性研究，將結果寫成論文，並在最後口試時為自己論文內容辯駁。該學系並沒有要求博士生畢業前發表期刊文章篇數。但一般來說，研究生為確認自己研究具有可發表性且方向正確，會投稿參加研討會。透過研討會專家學者建議適切調整研究方向。

七、論文研究簡介

天空翱翔是大部分人類曾有過的夢想之一，自從 1903 懷特兄弟成功測試具有操控與動力系統的飛行器以來，空中飛行不再只是睡夢中才能做到。這夢想的實現也是人類對大自然飛行生物觀察的成果。大自然具有飛行能力的生物包含鳥類、蝙蝠及昆蟲類。從外觀來看，鳥類與蝙蝠具有一對翅膀，但鳥類翅膀覆蓋著羽毛，蝙蝠則僅有短毛覆蓋在薄薄翅膀上。昆蟲翅膀比鳥類與蝙蝠翅膀更具多樣性，昆蟲不是具有一對翅膀就是具有二對翅膀。部分昆蟲的前翼大於後翼，部分昆蟲前翼是硬殼，部

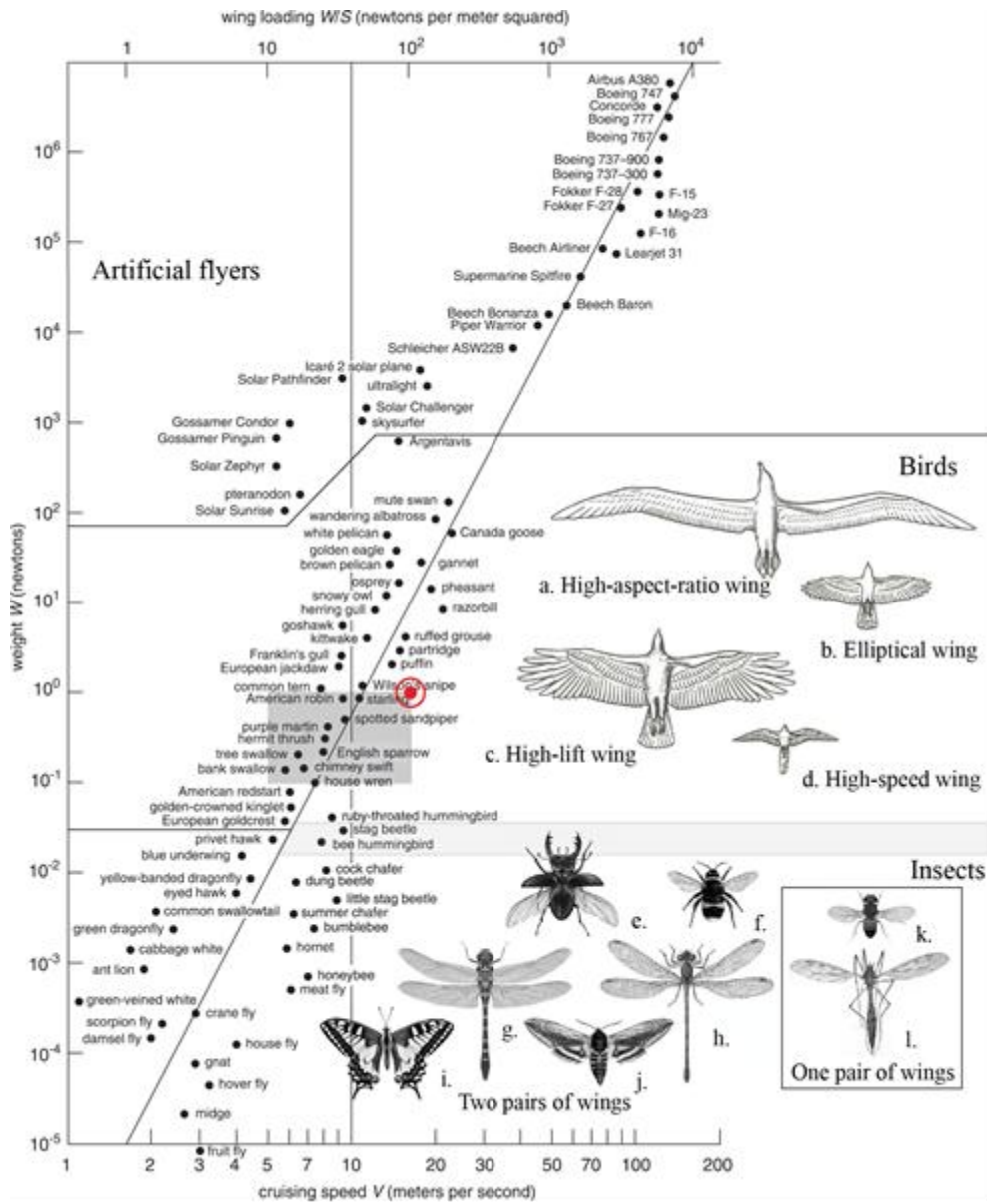
分昆蟲的後翼退化成一對小槌子以保持平衡。圖二顯示上述飛行生物翅膀的差異，圖中詳細敘述請參考論文內文。

大自然飛行生物飛行時一定會拍動翅膀，為研究翅膀拍動對飛行的影響，許多學者利用高自由度機翼運動模式(如圖三)來探討空氣動力理論。一般空氣動力理論是建立在靜止機翼於特定攻角姿態，個人論文研究是針對流體流經動態機翼對空氣動力的影響，兩者差異在於機翼運動型態的考量，後者稱為非定常空氣動力理論。

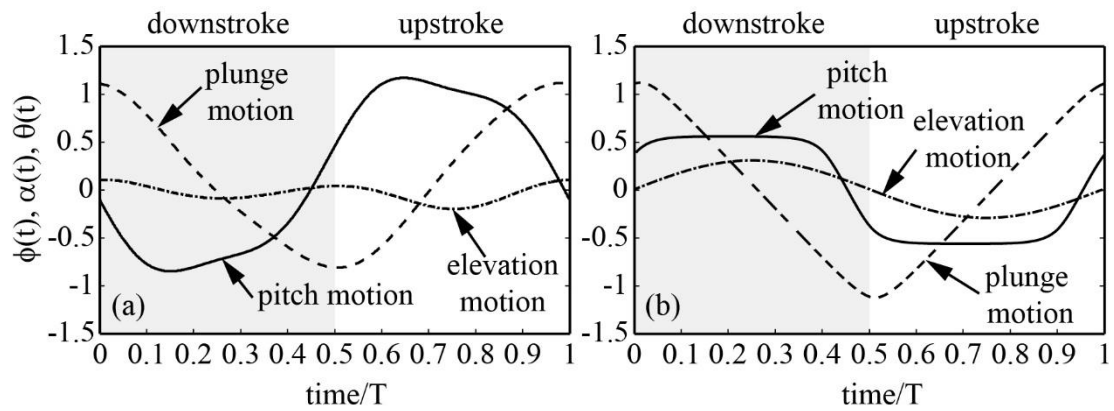
個人論文研究係運用單一自由度機翼運動來探討空氣動力學之非定常流體動態與力生成。這運動模式具有明顯之恆定俯仰速率與加速度區間，有助於釐清相關效應。這種俯仰機翼運動與鳥類和昆蟲操控其翅膀降落棲息地相似，相關大自然飛行生物空氣動力學之文獻回顧亦提供在本文中。飛行生物之操控能力很難被效仿並運用在工程系統，高自由度機翼運動模式所生成非定常流場問題增加分析困難度。簡單單一自由度的機翼運動可提供固定機翼系統重要資訊。

論文中亦略探討有限展弦比之俯仰機翼在不同固定俯仰速率與自由流所生成動態流場，以便瞭解機翼運動與自由流間之時間尺度相互作用，歸約俯仰速率(reduced pitch rate)範圍為 $0 \leq K \leq \infty$ 。實驗方法包括流場可視化、測力及粒子圖像測速，所有實驗量測在開放式水洞中進行，翼弦雷諾數(chord Reynolds number)區間為 $0 \leq Re \leq 13K$ 。簡單線性勢流理論用來闡明實驗數據，這理論涵蓋歸約俯仰速率、樞軸位置及機翼平面形狀等效應。此外，文中初步探討渦流結構與力生成之關聯。

空氣動力的迅速增加與尾流中起動旋渦和歸約俯仰速率有關。在恆定俯仰速率區間，空氣動力的溫和增長與前緣旋渦形成和後緣旋渦脫落有關。低翼縮比與高歸約俯仰速率可提高力之產生。樞軸位置決定起動旋渦位置，且延遲了前緣旋渦演變。俯仰運動結束後，延遲時間是前緣至樞軸位置之對流時間。文中線性勢流理論包含旋轉速率效應，並可用來合理估算相關動力係數。



圖二 Great Flight Diagram (資料來源：參考資料[3])。



圖三 高自由度機翼運動模式 (資料來源：參考資料[3])。

參、心得及建議

- 一、密西根大學航太工程系是所即將進入百年的學系，該學系依舊保有數名技術工程師，包括一位實驗室服務監督管理師 (Supervisor of Laboratory Services)、一位電子技師 (Electronic Technician)、兩位工程技師 (Engineering Technician)、一位系統軟體技師 (Systems Administrator)、一位儀器製造師 (Instrument Maker)。這幾位技術師負責提供實驗室服務、實驗課程整備、實驗工具(器材)製作、電路檢整、電腦軟體服務等。所有實驗室的服務須透過一套資訊系統申請，申請時須註明預算代號。若需製作器具時，必須提供所設計之工程圖，同時驗證所學技能。技術工程師的存在確保學生課程學習進度順遂和儀器檢整經驗傳承、減少儀器檢整等待時間與經費，進而保有學系獨特性，這樣的體制或許值得國內大專院校參考。
- 二、為減少人力、達成資訊公開，學生可藉由學校網頁獲得各項資訊，包含即時訊息，如龍捲風警訊和犯罪即訊。以國際學生為例，學生所在乎的簽證、保險費用、校園生活、租屋等資訊，皆可在國際中心 (International Center) 網頁中搜尋得到資訊與申請步驟。校方另有課務系統 Wolverine Access 提供已註冊學生、教師及畢業校友使用，但各使用者之介面功能略有不同，亦須先設定帳號和密碼方能使用。學生透過 Wolverine Access 進行註冊、選課、繳學費、列印非正式成績單、申請畢業、申請獎學金、找校園工作等。校方亦可透過 Wolverine Access 進行問卷。另外，教師透過 CTOOL 系統得知選課人數、學生姓名及樣貌，並與學生進行課業聯繫，如發佈回家作業、繳交作業、公佈成績、調動課程、變更教室等。校園網頁、Wolverine Access 及 CTOOL 等系統設置與使用者相當貼近，除減少行政人員工作量，亦透露系統管理人員的重視，值得國內大專院校參考。

肆、參考資料

1. 密西根大學網頁 www.umich.edu。
2. 密西根大學航太工程系網頁 <http://www.engin.umich.edu/aero>。
3. Huai-Te Yu, “Unsteady Aerodynamics of Pitching Flat Plate Wings,” Ph.D. Dissertation, Aerospace Engineering Dept., Ann Arbor, University of Michigan, 2014.