

出國報告（出國類別：進修）

美國南加州大學碩士進修報告

服務機關：國防大學

出國人員：上尉 丁翊

出國期間：112 年 8 月 12 日至 114 年 8 月 14 日

報告日期：114 年 9 月 10 日

摘要

本次出國進修係奉核前往美國南加州大學（University of Southern California, USC）航空工程系攻讀碩士學位，研究專業為「噴射推進與燃燒」之應用，研究主題著重於超音速衝壓引擎（Scramjet）燃燒過程之數值模擬與性能分析。南加州大學為美國私立研究型大學，在航太工程、燃燒科學與流體力學領域擁有專業的師資及豐富的研究能量。進修期間，完成碩士學程各項課程要求，並於指導教授指導下，參與「超音速引擎燃燒室壓力特性及燃料混合模擬」之研究計畫。透過課程與研究的系統訓練，深化對燃燒機制、化學動力學模型及高溫氣體力學的理解，並能應用計算流體力學方法進行燃燒流場模擬。期望將所學理論與技術應用於國防大學理工學院機械及航太工程系之專業課程授課，並更進一步應用於國防航空推進系統之研究，提升我國推進系統效能及高超音速飛行器發展研究能量。

目錄

壹、目的

貳、進修過程

參、心得及建議

肆、參考資料

壹、目的

本次赴美國南加州大學航空工程系進修，主要目的在於強化噴射推進、燃燒理論及火箭推進系統之專業能力，並深化對超音速引擎燃燒之理解。隨著高超音速飛行與太空運載技術的快速發展，超音速燃燒技術及進階推進系統已成為航空推進領域的重要研究方向。過去相關研究在多著重於渦輪或火箭推進系統，對於「空氣吸入式高超音速推進循環」之研究仍屬初階。本次進修以「超音速衝壓引擎燃燒室流動特性與燃料混合行為」為核心主題，期能建立高超音速燃燒理論基礎，提升國內於此領域之研究深度與能量，並為未來國防飛行器研製提供研究能量。

貳、進修過程

一、學校與系所介紹

南加州大學 (University of Southern California, USC) 創立於 1880 年，位於加州洛杉磯市中心，為美國私立研究型大學之一。該校航空暨機械工程學院 (Department of Aerospace and Mechanical Engineering, AME) 在燃燒科學、推進系統與流體力學研究方面擁有豐富師資及研究能量。其研究領域涵蓋：空氣動力學/流體力學、自動控制、氣動設計、機體結構設機、電腦模擬、噴射推進等專業領域課程。學院下設多個研究中心，包括燃燒與能源研究實驗室 (Combustion and Fuels Research Lab) 與航太電腦模擬研究室 (Computational Aerospace Lab) 等，提供完善的實驗與模擬資源。

二、課程與研究內容

1. 課程修習概述

碩士課程要求修習 27 學分，噴射推進專業課程主題涵蓋高溫氣體動力學、燃燒理論、推進系統設計、計算流體力學等，主要課程如下：

- AME 414 Engineering Thermodynamics II
- AME 436 Automotive and Flight Propulsion

- AME 511 Compressible Gas Dynamics
- AME 513a/b Fundamentals and Applications of Combustion I/II
- AME 530a Dynamics of Incompressible Fluids
- ASTE 501a Physical Gas Dynamics
- ASTE 570 Liquid Rocket Propulsion
- ASTE 572 Advanced Spacecraft Propulsion

課程架構由基礎熱力學、壓縮氣體力學延伸至燃燒理論、火箭推進與太空推進技術，內容兼具理論深度與工程應用廣度。火箭推進課程特別著重於燃燒室壓力、噴嘴膨脹比、推進效率與冷卻結構設計，並涵蓋液態推進劑供應系統與燃燒穩定性分析，完整理解不同推進循環間的性能差異與熱力學特性。

2. 研究主題：超音速燃燒室混合與穩焰特性

本研究以碳氫燃料為主要燃料，針對矩形燃燒室內的燃料噴射混合行為及溫度、壓力進行數學計算及模擬分析。利用 Navier-Stokes 方程等計算，模擬不同當量比、馬赫數與噴射角下各物理性質及燃燒效率變化。研究目的在於探討燃料預混比例與燃燒效率之交互關係及燃燒室內各項基本性質模擬，並比較不同燃料對燃燒之差異。

3. 研究主題與應用

本次進修研究主題以固定幾何構型之超音速燃燒衝壓引擎為主要研究對象，針對其在飛行範圍內的燃燒行為與推進性能進行數值模擬與參數化分析。研究核心在於建立可整合空氣動力、燃燒化學與熱力學效應的準一維 (Quasi-1D) 流動模型，以探討燃料選擇與操作條件對整體引擎性能之影響。

本研究使用南加州大學航空工程系建立的 AirCycle4Hypersonics V2.5 模型加以編寫細化計算。模型基於能量守恆與雷利流 (Rayleigh Flow) 理論，結合多區域熱化學分析與動量方程求解，能快速預測在不同燃料、當量比與飛行高度條件下之燃燒室與噴嘴的流場行為。引擎模擬由三個主要模組組成：進氣道 (Inlet)、燃燒室 (Combustor) 及噴嘴 (Nozzle)，並以美國標準大氣模型 (U.S. Standard Atmosphere) 模擬高空環境條件，使分析結果能反映實際飛行熱力狀態。

在進氣道部分，模型假設外壓縮為理想斜波系統，並評估不同進氣角與壓縮比下之總壓損影響。燃燒室段落為整個推進循環的關鍵，研究採用可變比熱 (Temperature-Dependent C_p) 及化學平衡模型，考慮燃料燃燒放熱對局部流速、靜壓與溫度分布的影響，並以雷利流理論 (Rayleigh Flow Theory) 分析燃燒造成之熱室阻 (Thermal Choking) 條件。燃燒效

率實際放熱量與理論燃燒熱釋放量之比值定義，用以衡量各燃料在特定幾何燃燒室與操作條件下的燃燒完整性與能量轉換效果。噴嘴模組則以可變面積等熵膨脹模型求解出口靜壓與速度分布，進而計算推力與比衝 (Specific Impulse)。

燃料部分，研究選取氫氣 (H_2)、甲烷 (CH_4) 與乙炔 (C_2H_2) 三種代表性燃料進行比較，分析其在相同幾何與操作條件下之性能差異。氫氣具有極高比能與反應速率，其燃燒後溫升大且火焰穩定區較廣，可在高馬赫數條件下維持較高的燃燒效率與出口馬赫數。甲烷雖具較低比能，但因分子結構穩定且儲存與處理安全性佳，在實際飛行器應用中具工程可行性。不同燃料的性能比較，提供燃料選擇對於燃燒效率、熱流分布與比衝影響的整合性參考。透過多組參數設定，整合性分析不同燃料空氣比 (Fuel - Air Ratio)、飛行高度及入口馬赫數下的性能變化，並繪製推力、比衝、燃燒效率參數的特性曲線。

本研究建立之模型具有低計算成本、高可擴充性與物理一致性等特點，適用於高超音速推進系統初步設計及性能評估階段。相較於傳統 CFD 模擬需耗費大量計算資源，該準一維方法可快速模擬多組設計變數並提供設計趨勢。其結果可作為燃燒室幾何設計、燃料噴射策略與熱保護系統設計之初步依據，亦能提供 CFD 與實驗研究之基準條件。

總結而言，本研究整合熱力循環理論與燃燒化學分析，建立具備物理代表性的 Scramjet 性能預測模型，並以多燃料比較方式深入探討高超音速推進之燃燒效率與設計趨勢。研究成果除可作為未來高超音速燃燒室與混合推進系統的設計工具外，亦對國防應用之高動能飛行器性能優化與燃料選擇提供具體參考，為後續建立更高維度數值模擬及實驗驗證平台提供運算模擬基礎。

三、學習與生活經驗

在南加州大學就讀期間，除專注於課業與研究外，亦參與多項系所舉辦的實驗室技術工作與研究展示活動，進一步了解不同研究領域的最新進展。透過與同儕及助教之間的討論與合作，逐漸熟悉美式研究訓練環境，培養獨立思考與跨文化溝通能力。此外，因校內學生組成多元，常與來自歐洲與亞洲之研究生合作撰寫專案報告，於合作過程中學習國際學術溝通與專案管理能力。

於進修期間，國防大學理工學院亦於每季定期召開線上心得分享會議，由理工學院院長主持、學院內於國外進修同仁進行經驗分享。內容包含各學校校園特色、教學方式、生活經驗等。對於剛開始到國外進修時，提供十分豐富的學習、生活經驗來源，增進國外修學的適應。同時也會做各不同學校間上課方式的優缺點分享，有利於後續擔任教職的同仁汲取經

驗，豐富教學。

參、心得感想

一、語言與文化適應

在進修初期，最具挑戰的部分為全英語學術環境與研究溝通方式的轉換。透過日常課堂報告與技術討論，逐步養成以英文思考並清晰表達專業概念的能力。此過程不僅提升了語言能力，也增進了在國際學術場合中溝通與發表的自信。

二、專業知識與研究能力提升

本次進修提供了完整的推進系統理論架構與實務應用訓練，能夠從高溫氣體動力學、燃燒理論到火箭與高超音速推進等領域建立整合視角。課堂中所學之 CFD 模擬、化學動力學分析與系統設計方法，期望應用於國防與航太相關研究計畫，為未來技術發展提供支撐。

三、教學應用與技術延伸

推進與燃燒技術在國防領域中具關鍵性地位，其成果可廣泛應用於高超音速武器系統、載具熱防護設計及航太器燃燒控制等方面。期望未來能將本次學習所得轉化為教學材料，豐富國防大學理工學院教學能量；並結

合國內研究能量，推動高溫燃燒實驗與數值模擬建構，以強化各式飛行器
自主研發能力。

肆、參考資料

1. University of Southern California, Department of Aerospace and Mechanical Engineering. <https://ame.usc.edu>