

出國報告(出國類別：進修)

赴美國匹茲堡大學進修工業工程碩士 心得報告

服務機關：國防部軍備局第二〇二廠

姓名職稱：葉辰宇上尉

派赴國家/地區：美國

出國期間：112年8月14日至114年8月15日

報告日期：114年9月30日

摘要

本次進修係奉國防部 112 年 7 月 18 日國人培育字第 1120195580 號令核定赴美國匹茲堡大學(University of Pittsburgh)工業工程碩士班進修，核定進修時間自民國 112 年 8 月 16 日至 114 年 8 月 15 日止。職於規劃期程 2 年間完成學業取得碩士學位，並於 114 年 8 月 15 日返國，於是日赴軍備局第 202 廠辦理報到手續。

本報告係針對個人在美國期間之進修過程及論文研究等心得，內容格式分為目的、過程、心得與建議、參考資料來源等項次。本次碩士論文範疇主要針對「鐵電陶瓷材料表徵」及「磨損進程」進行研究，探討其材料之「電容效能」、「微觀表徵之變化」及「樣本失效肇因之探討」，後續可應用於第 202 廠產品設計及優化之研究。

目錄

壹、目的	3
貳、進修過程	3
參、心得建議	22
肆、參考資料	27

壹、目的

本次係奉國防部 112 年 7 月 20 日國人培育字第 1120195580 號令，赴美國匹茲堡大學(University of Pittsburgh)工業工程研究所進修碩士學位 2 年，主要研究項目係針對電黏附離合器電容及表徵之探討，進修期間自 112 年 8 月 16 日至 114 年 8 月 15 日止，並於 114 年 8 月份達成各項學業要求後取得碩士學位，於核定修業期間(含交通往返路程)前返廠辦理報到手續。

本報告係依「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，期能分享進修經驗及論文研究心得予相關人員參考運用。

貳、進修過程

一、校園與環境簡介

美國匹茲堡大學 (University of Pittsburgh) 簡稱 PITT 或匹大 (校徽如圖 1)，創建於西元 1787 年，主校區奧克蘭校區位於賓夕法尼亞州匹茲堡 (Pittsburgh, Pennsylvania)，其餘分校位於 Bradford, Greensburg, Johnstown 和 Titusville 等地區。該校原屬私立學校直至 1966 年加入賓夕法尼亞邦高等教育系統 (Commonwealth System of Higher Education) 後，轉型為公立研究型大學。主校區下轄醫學院、工學院、商學院及教育學院等 16 個學院，校區最具代表性建築為學習大教堂 (Cathedral of Learning 如圖 2)，建於西元 1934 年，共 42 層，高 163 公尺，為世界上第二高的哥德式建築，其最著名為內部的國際教室 (Nationality Rooms)，設計成 30 個不同國家文化風格的教室，平時僅部分開放，惟於每年聖誕節之際，會舉辦開放日 (Open house)，全面開放給校友及民眾參觀教室內部。



圖 1：匹茲堡大學校徽



圖 2：學習大教堂

其中史旺森工程學院（The Swanson School of Engineering）建立於 1846 年，根據 2025 年 US News 公佈，該校列為最佳工程學院排名第 47 名，現名係於 2008 年更訂，因校友 John A. Swanson（ANSYS 創辦人）捐款予匹茲堡大學，故於是年通過決議，以史旺森先生名字命名該校工程學院。現下轄科系計有生醫工程、化學工程、機械及材料科學以及工業工程學系等 8 個科系，依科系間不同設有大學、碩士班及博士班等學制。

二、修業規定

學業部分，針對工業工程系碩士畢業標準總共為 30 學分，共計 10 門課，其中包含系上必修及選修各 3 門，另外 4 門可自由選擇院內選修或研究學分，若英文測驗未達學院入學要求，則須另外選修英文寫作或口說課程，但該課程不列計畢業學分。囿於學生可自行決定是否撰寫論文，若選擇撰寫論文選項，則必須選修論文研究課程至少 6 學分以上，可列計畢業學分，並於最後一學期完成論文撰擬且通過口試，即符合研究型碩士學位畢業要求。

關於課程規劃，於每學期開放選課前，均需提交課程規劃表，並經指導教授同意後，由系上辦公室提供選課密碼，方可進入學校系統完成選課流程。通常於開學後兩週內，學生可先行旁聽有興趣的課目，並開放自由加退選，惟如課程適應不良或其他因素於學期中退選課程，則需另外繳交罰金，並會影響該學期學業成績，因此建議學生於選課前先行與指導教授討論或諮詢系上學長姐，以妥善分配各學期課程配置。

美國大學評分制度採 GPA (Grade Point Average) 制，即區分為 A+ 至 F 等 13 個級別，換算對應成績 A+ 及 A 為 4.0、A- 為 3.75，依序向下遞減至 0 即未通過 F (Fail)，少數課程評分採 H/S/U(Honors/Satisfactory/Unsatisfactory)，即區分優異、通過及未通過，通常教授會於第一堂課說明授課大綱及評分標準，公佈期中考、期末考、作業及報告分數之佔比，供學生於加退選截止前評估是否意願參與該課程。

三、課程介紹

(一) 學術寫作 (Technical Writing)

本課程專為非英語母語之國際學生而設計，旨在培養學生學術寫作能力，包含文章結構、精準用詞及寫作邏輯等，皆為研究生於發表期刊或撰寫論文時不可或缺之核心技能。該課程雖無期中及期末考，但每周均有作業，透過大量閱讀文獻、分析文章及正確引用，逐步提升專業寫作能力。於期中及期末時，亦運用課程所學，分別繳交一份與自身研究領域相關之報告及研究文章，並要求上傳至學校系統進行查核，檢測是否有抄襲嫌疑，以確保符合學術倫理，此課程對於未來需撰寫碩博士論文或進行學術發表之學生，具有極大助益。

本課程專為非英語母語之國際學生而設計，旨在培養學生學術寫作能力，包含文章結構、精準用詞及寫作邏輯等，皆為研究生於發表期刊或撰寫論文時不可或缺之核心技能。該課程雖無期中及期末考，但每周均有作業，透過大量閱讀文獻、分析文章及正確引用，逐步提升專業寫作能力。於期中及期末時，亦運用課程所學，分別繳交一份與自身研究領域相關之報告及研究文章，並要求上傳至學校系統進行查核，檢測是否有抄襲嫌疑，以確保符合學術倫理，此課程對於未來需撰寫碩博士論文或進行學術發表之學生，具有極大助益。

(二) 製造系統概論 (Introduction to Manufacturing)

本課程為系上基礎必修課程，旨在介紹製造系統與程序的基本原理，內容涵蓋材料機械性質、變形與失效機制、鍛造與軋製等體積變形製程、鑄造、材料去除製程及製造系統設計。課程著重於產品設計與製造流程的整合，並透過專題報告培養學生從材料到製程的系統化思維。期中專題將以具新穎特性的材料為題，要求學生提出應用構想並設計相應製造方法；期末專題則針對選定產品，規劃完整的設計與

製造工藝，包括零件拆解與部件製程設計。透過專題與課堂所學，學生將培養從材料特性到產品設計與製造系統規劃的整合能力。

（三）機率與統計（Probability and Statistics）

本課程主在介紹機率與統計的基礎概念，並著重實際問題之應用。課程內容涵蓋隨機變數、常見離散與連續機率分配（如伯努利、二項式、常態分配等）、期望值與中心極限定理，以及由常態分配延伸出的卡方、T 及 F 分佈，貝氏定理、機率質量函數與機率密度函數等基礎工具。在統計推論部分，涵蓋參數估計、假設檢定、適合度檢定及樣本比較。課程同時結合統計軟體，並教導學生分析與視覺化資料的能力，藉此建立統計思維，並學會如何運用統計方法，建立其在工程與相關領域中有效決策的重要性。

（四）數據科學：統計學習、建模及預測（Data Science: Statistical Learning, Modeling and Prediction）

本課程為數據科學建模與預測入門課程，由職指導教授授課，並採美國三所大學（凱斯西儲大學、匹茲堡大學及南佛羅里達大學）合作授課方式進行。課程內容著重於 R 語言在數據科學中的應用，涵蓋線性回歸、邏輯回歸、決策樹、資料視覺化、機器學習與深度學習等方法，並結合實務案例進行分析與建模。研究生另須完成一份學期專題報告，於每週提交進度更新，並於學期中進行三次口頭報告。透過同儕審查與互評，以檢視專題內容是否清晰易懂，並強化從資料準備、程式撰寫、模型建立、結果評估到 Git 使用的完整實作能力，藉此培養專業的數據科學素養。

（五）資料庫設計（Data Base Design）

本課程主要介紹資料庫系統的設計原理與實務應用，內容涵蓋資料模型、關聯式資料庫設計、正規化理論、SQL 語法與資料庫管理系統（DBMS）的操作，學生將瞭解如何分析資料需求、設計資料結構、

建立資料表、設定關聯及約束條件，並進行查詢、更新及資料整合等操作。課程強調理論與實務並重，透過案例分析與專題練習，使學生能熟悉資料庫規劃、優化查詢效率與維護資料完整性的技巧，課程結束後，期盼學生具備設計、實作及管理中小型資料庫系統的能力，為資訊系統開發與資料管理打下扎實基礎。

（六）作業研究（Operations Research）

本課程為系上基礎必修課程，涵蓋線性規劃、整數規劃、非線性規劃、網路分析、排程與庫存模型等主題，並介紹作業研究的一般方法與數學建模。學生將學習建模與求解技巧，包括線性規劃模型建立、單純形法、後最優分析，以及運輸、轉運與指派問題，並應用於整數與線性模型、各種網路流問題及專案計畫管理，課程強調理論基礎與實務應用，培養學生運用數學方法分析與優化資源配置、決策制定及生產流程，解決工程、管理及物流等領域的實際問題。

（七）工作設計（Work Design）

本課程運用工業工程常用工具，分析與設計工作空間與流程，涵蓋成本效益、功能效益、人機介面設計與生產力改善，內容包含成本模型、廠房佈局與物流系統、認知工程、累積性創傷分析、作業測量與時間動作分析等。在製造業、醫療及一般工業環境中，將運用生產力、人因工程、動作分析、學習曲線、認知工作與佈局設計等原理進行實務應用。課程透過考試、作業與討論，培養學生量化人機介面因素、分析生產效率，並掌握工業操作規劃與管理，包括訓練、激勵、獎勵及安全計畫評估，建立完整工業工程設計與評估能力。

（八）微分方程（Differential Equation）

此課程為機械工程學系必修課程，內容涵蓋一階與高階微分方程、線性與非線性方程、常係數與變係數方程，以及解的存在性與唯一性理論。課程教授解析解與數值解方法，並介紹級數解法、拉普拉

斯轉換、尤拉級數等基本概念，應用於工程、物理及其他科學問題，如振動系統、人口模型與熱傳導問題。課程強調理論理解與實務應用，旨在培養學生分析、建模及解決動態系統問題的能力。

（九）供應鏈分析（Supply Chain Analysis）

本課程為系上基礎選修課程，旨在介紹供應鏈分析的核心概念與方法，特別強調以數學模型進行定量化分析與決策。課程內容包含供應鏈概論、需求預測、整體生產規劃，以及生產與庫存管理（例如：靜態及動態需求模型、不確定性下的模型及多階層系統等）。同時涵蓋供需管理、倉儲與配送、運輸規劃、供應鏈策略及採購決策，並探討供應鏈韌性與協調整合的重要性。透過這些主題，學習如何運用數學與統計工具建構並分析營運模型，解決供需平衡與資源配置問題，並能在不確定環境下制定有效策略。

（十）簡約工程（Frugal Engineering）

本課程著重於產品與流程設計在永續發展與循環經濟中的工程應用，課程涵蓋價值工程/價值分析及功能分析，並結合顧客需求識別、品質工程、精實流程設計等方法，培養以系統化與工程化思維，建構兼具效能與顧客導向的設計方案。課程亦安排多項實務導向活動，實作價值分析流程，使學生在時間有限及資源限制下的工程設計與決策能力。

（十一）六標準差（Lean Six Sigma）

本課程旨在介紹精實管理（Lean）與六標準差（Six Sigma）之核心原則，其中包括流程圖繪製、精實工具、DMAIC（定義、測量、分析、改進、控制）方法，以及資料收集與測量技巧。透過大量案例分析與實務應用，學習如何進行流程分析、掌握顧客需求，並運用系統化方法改善與優化流程。課程結束時，學生亦可選擇參加六標準差

綠帶 (Green Belt) 認證，此為業界廣泛承認的專業資格，象徵具備中階六標準差實務能力，有助於學生提升職場競爭力。

四、論文研究

研究部分，建議於學期間先與多位教授面談，依個人興趣選擇實驗室並確認研究方向，隨後針對該方向進行文獻蒐集、實驗設計與資料分析，並定期回報研究進展，與指導教授密切討論各階段成果，同時應研讀相關書籍及已發表期刊，以培養數據整理與分析能力，最後將研究成果撰寫成完整論文。另本校工程學院規定，完成論文撰寫後，須召集口試委員進行答辯，通過後依委員建議修訂完成最終版本，並上傳至系統完成格式審查，以完備論文提交流程。

(一) 摘要

隨著機器人、穿戴裝置及自動化技術的發展，對於小型化、低耗能，且反應快之驅動元件需求日益增加，電黏附離合器因能透過施加電壓產生吸附力，在不依賴傳統齒輪或液壓結構的方式實施控制，其輕量化及快速反應能力使其逐漸受到重視。本次研究係以聚合物為基體，加入高介電常數的鈦酸鋇 (BaTiO_3) 與二氧化鈦 (TiO_2) 奈米填料，形成複合介電層，藉此探討材料之微觀結構對離合器性能之影響。本次研究範圍包含線性和旋轉型兩種離合器，並透過光學輪廓儀、掃描式電子顯微鏡、電性分析及奈米壓痕分析等方法，剖析其微觀表面形貌、介電特性及機械性質。

(二) 研究背景

電黏附離合器的作用原理係當電壓施加於兩電極之間時，中間的介電層內會產生極化效應，進而產生靜電吸附力，使電極板彼此貼合達到接合效果（如圖 3）。此設計可視為承載型電容器，透過正負電荷之吸引力達成介面間之接觸，吸附同時亦提供足夠的摩擦力，使其

可承受相當程度之負載，不會輕易滑動；當電壓移除後，吸附力隨之消失，電極迅速分離，實現低摩擦甚至無接觸的分離狀態。本研究亦可應用於旋轉型離合器，並可透過疊加方式提升承載能力（如圖 4），展現出系統在不同應用場景下的延展性與靈活性，同時兼具輕量化與高可靠度。

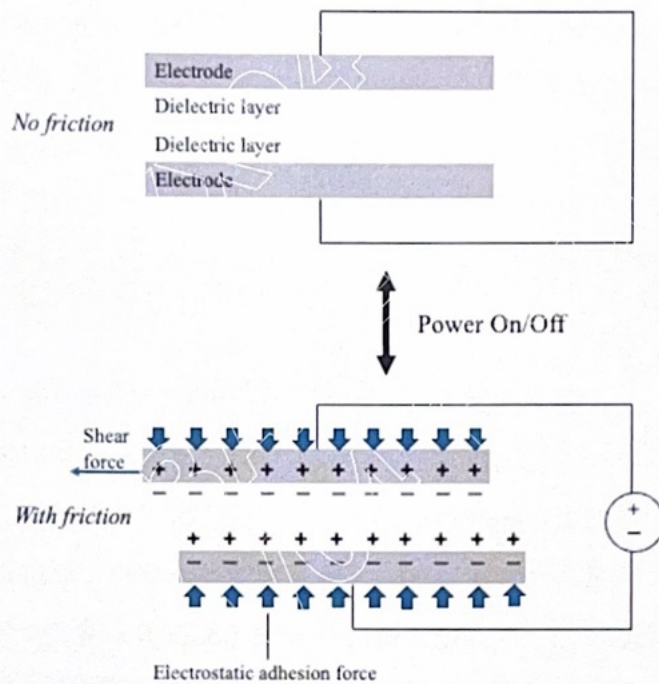


圖 3：線性離合器作動示意圖

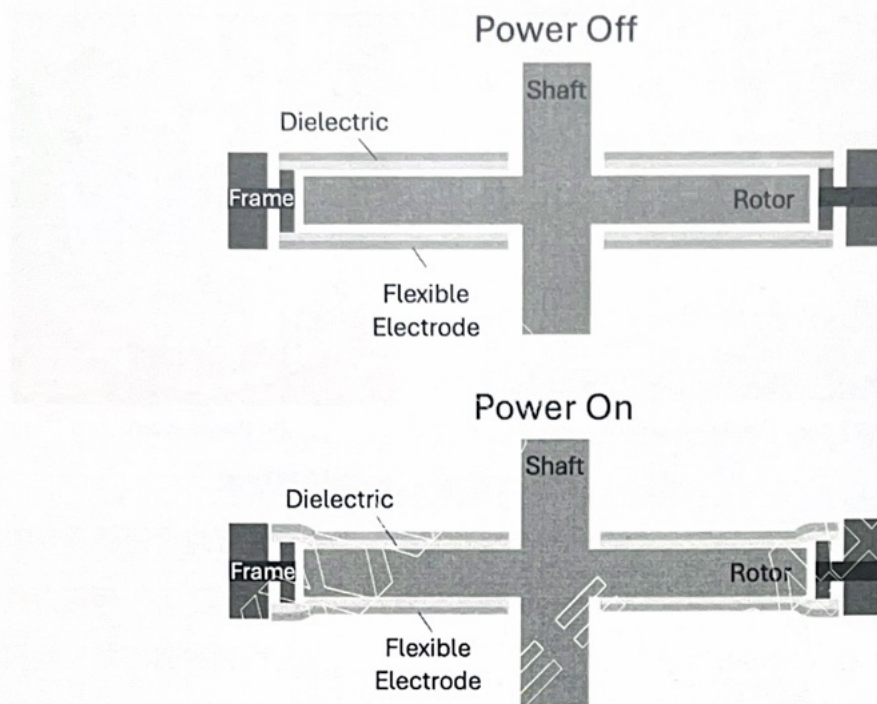


圖 4：旋轉型離合器作動示意圖

（三）研究設備及方法

本次研究樣本係由 ESTAT Actuation 公司所製供，其中包含線性與旋轉型兩類（如圖 5）。首先針對線性樣本進行配方參數分析，包含表面粗糙度量測、介電層厚度檢測以及元素成分分析，以探討不同材料組成對介電特性的影響。接著針對旋轉型樣本則進行失效測試後之比較，搭配表面酸洗處理，移除作動時產生之金屬沉積，更有效觀察其表面形貌及磨耗行為之變化。

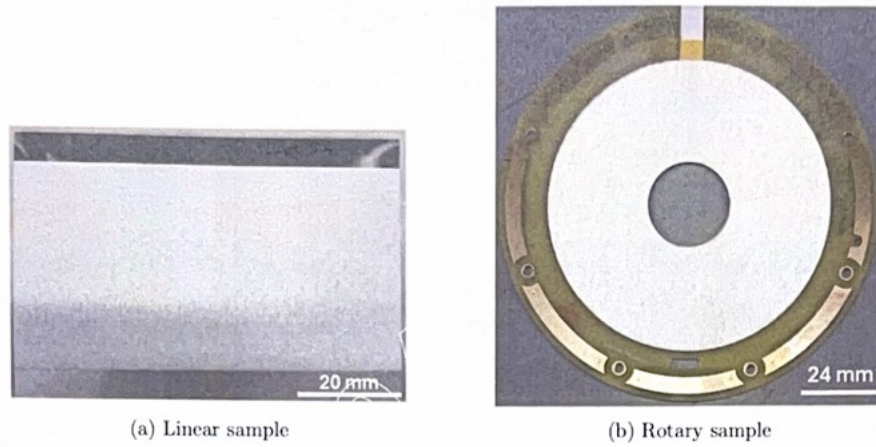


圖 5：(a)線性樣本，(b)旋轉型樣本

由於靜電力主要作用在垂直方向，因此在估算離合器能承受的剪切力，即抵抗平面滑動的能力時，須引入靜摩擦係數 μ ，靜電力產生正向壓力，透過摩擦作用，轉換為能抵抗側向移動的剪切力，並假設在靜電力造成的高負載下，摩擦係數 μ 保持不變，則樣本可承受的剪切力就可以用公式 1 表示，其中 ϵ 為相對介電常數 ϵ_0 ，為真空介電常數 ($\approx 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)， A 為有效接觸面積， d 為介電層厚度， V 為施加電壓。本研究將透過以下實驗方法，探討各參數對離合器性能之影響：

$$F_s = \mu \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{2d^2} V^2 \quad \text{公式 1}$$

1. 光學輪廓儀 (Optical Profilometry)

本次研究主要運用 3D 光學輪廓儀來量測樣品表面粗糙度，該設備採非接觸式白光干涉系統，具有奈米級垂直解析度，能快速取得高精度之表面形貌，且測量過程不會破壞樣品，適合介電層表面的微米級粗糙度分析。表面粗糙度會影響兩層介電

層的實際接觸面積，進而影響離合器效能，此次以平方根粗糙度 (S_q) 為主要參數，可有效反映表面峰谷高度之變化。

2. 掃描式電子顯微鏡/能譜分析 (SEM/EDX)

此設備可提供樣本高解析度的影像及局部元素分析，主要使用加速電壓 10kV，對樣品進行表面 SEM 成像，可呈現精細的微觀形貌特徵，同時搭配局部 EDX 分析，可獲得元素組成的空間分布資訊，以評估樣品之均質性，並透過橫剖面視角 (cross-sectional view) 測量各樣本之介電層厚度 (如圖 6)，以利後續計算及執行資料分析。

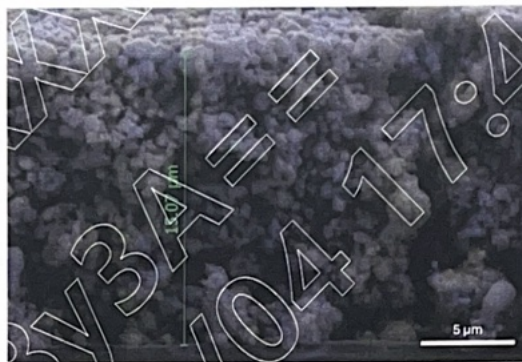


圖 6：SEM 橫剖面量測介電層厚度

3. 半導體參數分析儀 (Semiconductor Device Analyzer)

透過半導體元件參數分析儀及探針台 (Keysight B1500A with Probe station) 對奈米複合材料樣品進行電容測量，其中為確保電容測量的一致性與準確性，介電層表面須經過金屬化處理，採用格狀遮罩蒸鍍法，以透射電子顯微鏡使用之網格片 (TEM Grids) 為遮罩定義測量範圍，金屬沉積係使用 Plassys 電子束蒸鍍系統進行，首先沉積 10 nm 的鈦層作為黏附層，以增強介電表面與後續金屬層的結合，再蒸鍍 200 nm 鋁層作為電容測量的上電極 (如圖 7)，完成金屬化後，樣品即可使用 CV 測量模式，執行電性表徵測量。

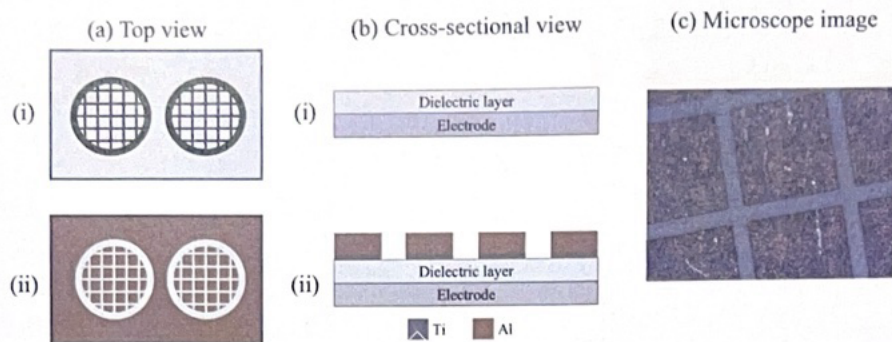


圖 7：樣本金屬化製備流程

(四) 研究結果

1. 線性離合器

滑動測試 (Slip Testing) 針對多組樣本進行，並以四種樣本名稱 (INK03、INK04、INK05、LUX) 進行統計分析，每片介電片均使用標準化設備與測試夾具組裝成離合器配置 (如圖 8)，接觸面積約為 20 cm^2 ，在電極上施加 300 V 或 400 V 電壓，並在測試過程中實時監測作用力，當樣品開始滑動時所測得的最大力即定義為該樣本的滑動力 (Slip Force)，測試結果統計如圖 9 所示。

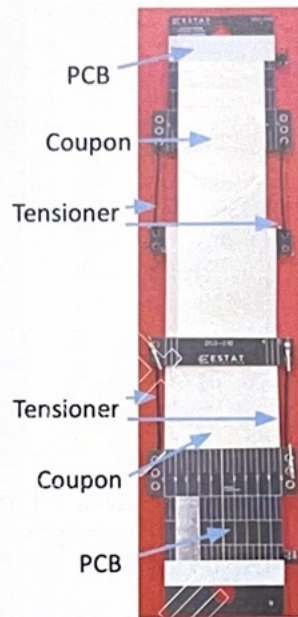


圖 8：滑動測試配置

Sample Series	300 V (N)	400 V (N)
INK03	1.00 ± 1.91	1.50 ± 0.14
INK04	—	3.90 ± 4.67
INK05	3.24 ± 0.53	—
LUX	4.15 ± 0.92	—

圖 9：線性樣本最大滑動力

經量測及資料分析後，其表面粗糙度、電容率及樣本厚度統計如圖 10-11 所示。

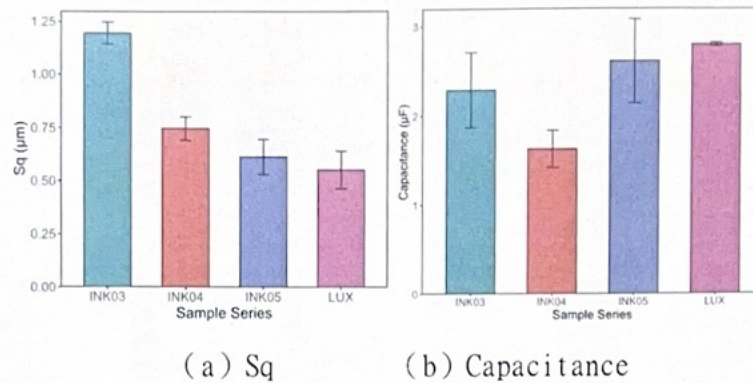


圖 10：(a) 平方根粗糙度，(b) 電容率

Sample Series	Thickness (μm)
INK03	19.50 ± 7.50
INK04	7.83 ± 2.25
INK05	13.31 ± 1.23
LUX	12.83 ± 0.62

圖 11：樣本厚度

藉由電容與介電常數之間的關係，可進一步計算樣品的相對介電常數。為確保不同樣品系列之間比較之準確性，計算所得的介電常數皆依各介電層實測厚度進行歸一化處理

(Normalization)。如圖 12 所示，LUX 系列相對介電常數最高，其次依序為 INK05、INK03 和 INK04，惟與實際滑動測試結果交叉比對後發現，介電常數最高之 LUX 系列並非性能最佳；相對而言，INK05 與 LUX 系列的數據表現較為穩定，且具備較高電容率，因此，後續旋轉型離合器製備皆採用 INK05 系列相關參數，但因涉及與該公司之 NDA 協議，具體製備參數不予公開。

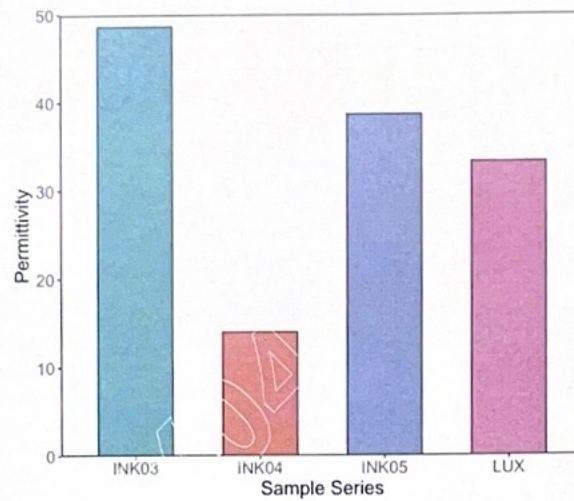


圖 12：介電常數

2. 旋轉型離合器

此型離合器的作用原理與前述線性型相似（如圖 4），均依靠電壓產生的吸附力，不同之處在於旋轉型離合器新增了內部轉子（Rotor），其與花鍵軸接合，而外部電極則固定於離合器框架上，在運作過程中通常承受更多動態及高頻操作，長時間使用易造成介電層表面產生表面磨損及金屬沉積，減少有效接觸面積，進而降低吸附力，因此，本研究將針對其表徵結構進行深入探討，以分析長時間運作至失效（Run to Failure）之肇因，重點關注於反覆運作後表面形貌及機械性質的變化，並透過各項實驗方法驗證與評估影響樣本性能的主因，最終提出可行的工程優化建議。

圖 13 為一運作至失效之樣本，其介電層表面可見大量材料沉積及變色，並出現數個明顯的同心灰色與棕色殘留圈，顯示材料逐漸轉移至介電層表面。

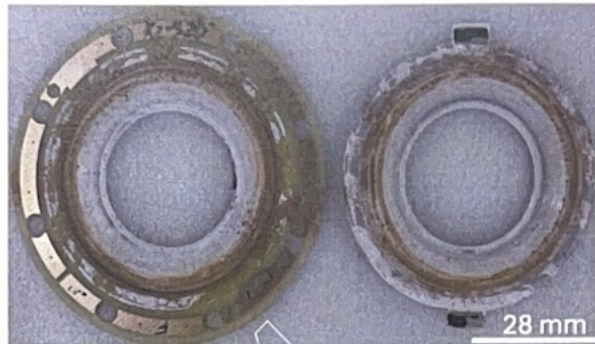


圖 13：失效樣本範例

針對前述樣本，將其分為三個區域進行 SEM/EDX 分析以探討元素組成（如圖 14），受限於前述 NDA 協議，故本部分僅針對檢測到的外來物（foreign material）進行討論：

- （1）區域 1：此區以明顯的棕色沉積物為特徵，相關金屬元素含量高，顯示氧化金屬磨損碎屑的累積，來自電極表面及轉子之機械接觸。
- （2）區域 2：呈淺棕色與灰色混合區域，包含金屬與陶瓷成分混合而成，金屬來源自轉子接觸及軸的磨損碎屑。
- （3）區域 3：呈現較深灰色區域，金屬含量相對區域 2 更高，歸因於靠近中心軸，其金屬元素比例上升，但陶瓷元素仍顯著，顯示以介電矩陣為主的混合組成。

整體而言，離合器的磨損過程涉及金屬組件、陶瓷填料及聚合物基材之間的複雜交互作用，形成不同區域的沉積與降解現象（deposition and degradation）。

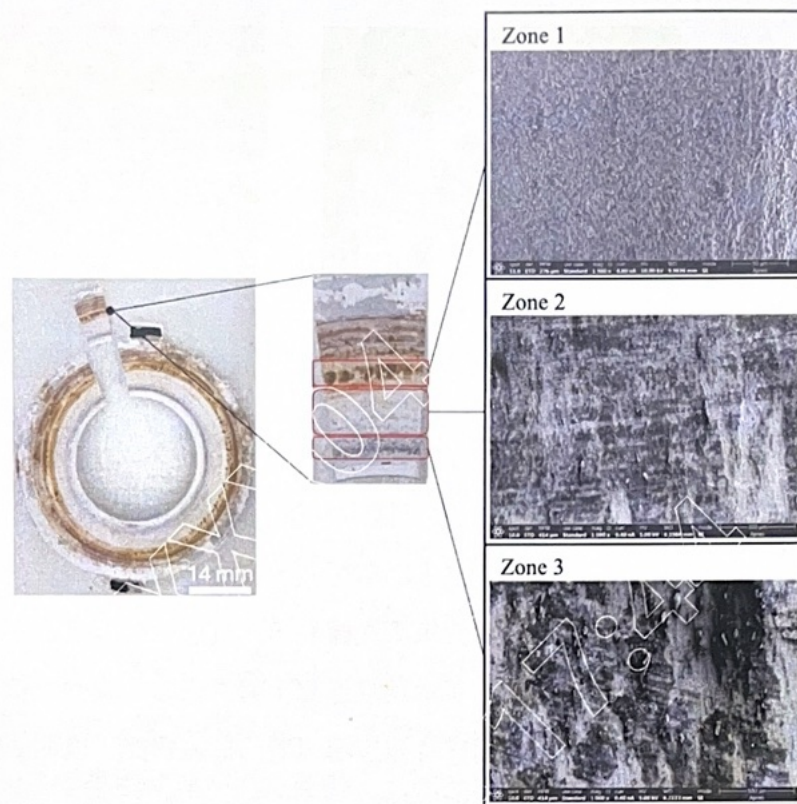


圖 14：失效樣本分區執行 SEM/EDX 組成元素分析

另一樣本 G 也觀察到與樣本 N 類似之沉積態樣（如圖 15a），藉此針對該樣本執行表面酸洗處理，主要目的是去除表面沉積物，以更有效地分離與評估磨損所造成的表面形貌變化，經處理後，大部分之金屬沉積物可有效去除（如圖 15b），以執行表面粗糙度及表徵之分析。

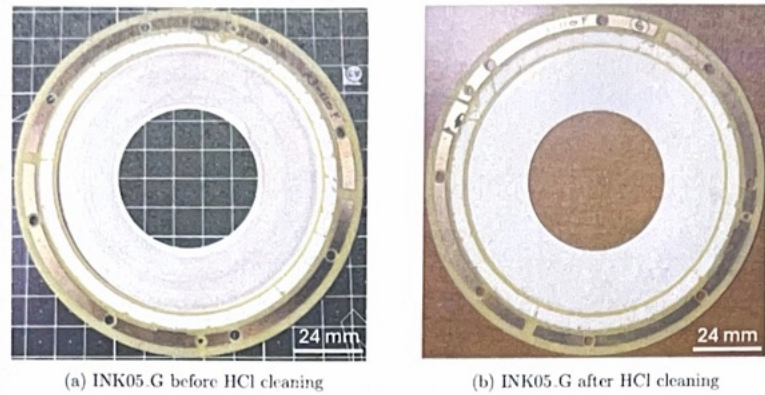


圖 15：（a）樣本酸洗處理前，（b）樣本酸洗處理後

圖 16 比較了樣本 G 在不同半徑位置下，HCl 清洗前與清洗後的平方根平均粗糙度，實驗結果顯示清洗後樣品的中位粗糙度普遍高於未清洗樣品，尤其在內半徑（24 - 26 mm）區域增幅明顯，顯示其經過 HCl 清洗去除了表面沉積物，暴露出底層的微觀結構特徵，增強表面形貌對比，進而影響離合器的界面附著力及整體性能。

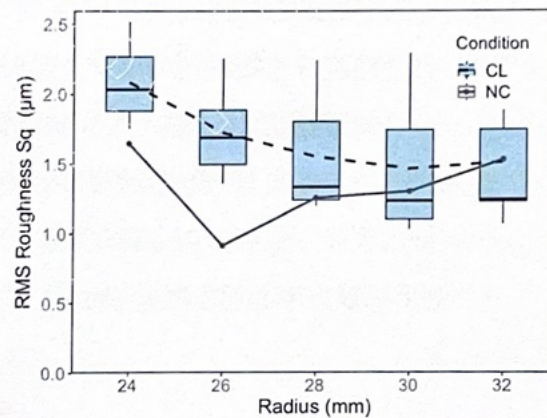


圖 16：平方根粗糙度（Sq）

（五）研究結論及未來發展：

本研究針對以鐵電與陶瓷材料混合，經網版印刷製備之電黏附離合器進行材料表徵分析，由線性離合器之基本特性為起始，進展至針對旋轉型離合器樣品進行運作至失效測試的分析，結果顯示各關鍵參數（如表面粗糙度、電容率及介電層厚度等）間之相互作用，對離合器整體效能與壽限皆具有顯著影響，其奈米複合材料中均勻分散 BaTiO_3 、 TiO_2 於聚合物基質中，可有效提升相對介電常數，進而強化及維持良好之致動表現，有關長期可靠度則取決於材料配方與結構設計對機械磨損的抑制能力，包含評估介電層與轉子材料之匹配性，維持適中之介電層厚度及表面粗糙度，並均勻分布高介電填料等。

此外，本研究具備以下優點可供未來發展運用：快速致動能力、能耗低（微量電流需求）及運作過程無傳統機械磨耗與震動噪音現象，其中網版印刷產製之介電層，具批次可控性及重複性，使其具有大量生產與快速替換之優勢，上述特性使其具備可應用於輕量化及高可靠度機電系統之潛力，如傳動模組、控制裝置或無人載具等。

未來研究目標建議可針對長時間可靠性與環境穩定性兩個面向執行，並導入即時電容及溫度感測感測，以監控運轉中之介電行為變化；同時透過製程精進優化，以降低印刷過程中產生之顆粒團聚現象（Agglomeration），進一步提升材料一致性及批次良率，為電黏附離合系統之可擴展性與輕量化奠定良好基礎。

參、心得建議

一、求學歷程

美國的教育體制與臺灣有所不同，職於學期初便深有所感，上課期間可見同學們積極發問，不吝分享個人觀點，各科成績也不僅依考試結果評定，而是更重視課堂間師生互動、小組討論及上臺報告等綜合表現。

有別於傳統教育思維，僅藉由期中、期末及作業成績方式決定該科目成敗，藉此可培養學生的獨立思考及溝通能力，遇到問題時，能提出觀點進行討論，適時給予正向回饋。進行研究時更能感受到差異，面對新領域，不再一味仰賴老師或學長姐直接給予指導，而是透過自主蒐集資料、自學程式與工具，並在遇到困難時主動討論，藉此更有效率地發現並彌補自身不足，持續提升能力。

其中語言能力更是每位赴美進修學生不可或缺的能力，雖然多數學生從小就開始接觸英文，熟悉單字、文法及各類測驗，但實際與母語人士溝通才發現，如何將所學化為實際應用，如全英文授課、閱讀教材或同學間討論，卻是另一項挑戰。雖然前期會經歷一段適應期，不過鼓勵未來有意願出國深造之同仁，勇敢踏出舒適圈，積極結交來自世界各地的同學，才能快速融入當地生活，並在異鄉找到歸屬感。

二、學術研究

研究生生活處處充滿挑戰，往往在專注解決一個問題時，才發現其背後牽涉到多個領域，需要透過大量文獻閱讀來掌握最新趨勢，以確立研究方向之可行性。職於加入實驗室期間，每週皆會參加組內會議，由博士生、碩士生及大學生輪流報告研究進展或文獻探討，雖然部分主題與自身研究領域關聯性不大，但透過討論能開拓視野，達到知識共享與教學相長之目的。此外，每週五下午會與指導教授單獨面談，報告當週研究進度與窒礙，且因職所參與的研究為產學合作計畫，每兩週亦會與公司舉行一次研究會議，討論樣本失效原因、實驗設計與驗證方法等，透過以上之會議交流與簡報討論，不僅提升了英文口說與邏輯表達能力，也是此次進修過程中最重要的收穫之一。

三、社交活動

匹茲堡大學位處賓州匹茲堡，與鄰校卡內基梅隆大學共同組成美國東岸最大臺灣學生會（TSS），經常舉辦各類活動，例如迎新活動、中秋節烤肉以及春節圍爐等，職也曾參與全美臺灣同鄉會舉辦之棒球聯誼賽。校內社團也相當多元，如攀岩社及滑雪社等，學校也不定期提供運動賽事門票，如大聯盟海盜隊或曲棍球鋼鐵人優惠入場門票，讓學生可親身體驗當地熱愛運動賽事之氛圍；另國際學生社團亦定期舉辦各項活動，提供學生間進行文化交流，結交來自世界各地的留學生，培養多元國際觀。

四、生活文化

初到美國留學，心境難免會感到不安，因此可事先與當地學長姐聯繫或蒐集網路上已有資訊，提前瞭解注意事項及開學前須完成的準備工作，例如銀行開戶、汽車駕照申請、醫療保險辦理，以及熟悉當地消費與生活習慣等。此外，由於美國行政效率相對較慢，許多文件申請可能需要等待數週，或須親自前往不同辦公室完成繁瑣程序，因此提前準備可以避免因缺少文件而浪費更多時間與精力。

在日常生活方面，美國留學生的生活文化較為自主且多元。學生需學會獨立管理時間，有效安排課堂、作業、複習、小組討論及執行研究時間，同時重視體能管理，妥善規劃每週運動與社交活動。美國人普遍重視個人隱私與尊重差異，在進行 small talk 時，如何在交流中保持友善又不過度探究個人隱私，透過這些經驗，留學生能逐步培養獨立生活能力與跨文化社交技巧。

五、研究運用

本次碩士論文題目為「電黏附離合器之研究」，此元件屬於近年新興之致動與傳動技術，其特徵在於以鐵電材料與陶瓷材料混合製成之介電層，可透過網版印刷方式製備，此製程具備加工快速、成本低廉以及大規模量產之優勢，使元件可於供應鏈體系中快速複製與替換，滿足現代作戰及大規模行動中對零件高頻補給需求，尤其適合於須大量部署且消耗頻繁之裝備系統，藉由該系統良好介電性能及穩定性，使其在黏附強度及耐久性皆可獲得提升，並能在嚴苛環境下維持良好穩定性。

在應用層面，從烏俄戰爭中可見大量無人機被改裝投入軍事用途，突顯輕量化及快速部署已成為新型態戰場之必然趨勢，電黏附離合器可作為無人機關鍵控制元件之應用，其結構有別於傳統機械結構，省去複雜的齒輪、彈簧或摩擦傳動機構，可大幅降低重量與體積，藉由導入固定與釋放載荷系統或應用於輕型投放模組中，其可重複啟閉且快速致動之特性，能有效支援多次任務週期或運用拋棄式模組設計，提升戰爭持續性及靈活運用性，其中靜音與低震動特性，亦可大幅減去運作時產生之震動及噪音，在執行偵查或精準投放任務中更具戰術運用價值。

本廠主要負責國軍 40 公厘（含）以上口徑各型火炮、彈藥、軍用電池及核生化防護裝備等之生產與研究發展任務，此技術可檢討運用於機電控制設備，如輕量化機械臂或遙控武器滑環等應用，其低耗能、低噪音及高致動性能，可於極短時間內完成啟動與關閉動作，輕薄及模組化設計，使其在有限空間下提供穩定之操作效能。因此，若能藉由網版印刷技術實現批量化生產，將能於短時間內獲得結構一致且品質穩定之元件，不僅可縮短後勤維保週期，亦可降低零件磨耗及減少傳統機械式結構所需之複雜加工，提升系統整體運作效率；另配合本廠持續推展無人機研產能量，本技術可簡化無人機部分結構設計，結合控制、感測及電源系統，建立標準化模組及快速更換介面，有效實現輕量化並達到縮

短生產週期目標。本次研究成果可於結構設計與系統整合層面提供更靈活與創新選項，對於推動國防自主研發、提供裝備系統多任務化應用以及深化多元戰術構想，均具有奠基性與戰略性之重要意義。

肆、參考資料

- 1、 University of Pittsburgh, <https://www.brand.pitt.edu/brand-elements/institutional-mark>
- 2、 Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Pittsburgh
- 3、 J. Li, J. Claude, L. E. Norena-Franco, S. I. Seok, and Q. Wang, "Electrical energy storage in ferroelectric polymer nanocomposites containing surface-functionalized batio₃ nanoparticles," *Chemistry of Materials*, vol. 20, no. 20, pp. 6304–6306, 2008, accessed: 2025-06-03. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/cm8021648>
- 4、 P. Barber, S. Balasubramanian, Y. Anguchamy, S. Gong, A. Wibowo, H. Gao, H. J. Ploehn, and H.-C. Z. Loye, "Polymer composite and nanocomposite dielectric materials for pulse power energy storage," *Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 1697–1733, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma2041697>
- 5、 S.-H. Lee, Y.-S. Lee, J. Kim, J.-H. Seo, M. Cho, H. Kwak, R.-S. Cheon, S. Cho, Y. Kim, K.-S. Moon, and M. Choi, "Controlling composite tio powder characteristics in the solid-state synthesis of batio powders for improved sintering and permittivity: A comparative study," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, p. 9720, 2023, doi: 10.3390/appl13179720.
- 6、 C. Choi, S. Gardner, S. Chatterjee, A. Kuchibhotla, G. Wan, and M. C. Hipwell, "High-performance and high bandwidth electroadhesive clutch enabled by fracture mechanics and a dielectric nanoparticle-based high-k composite," *Advanced*

- Materials Technologies, vol. 9, no. 14, p. 2301949, 2024,
accessed: 2025-06-03. [Online]. Available:
<https://doi.org/10.1002/admt.202301949>
- 7、eStat Tech, "Rotary electrostatic clutch,"
<https://www.estat.tech/rotary-clutch/>, accessed: 2025-06-16.
- 8、A. S. Chen and S. Bergbreiter, "A comparison of critical shear
force in low-voltage, all-polymer electroadhesives to a basic
friction model," Smart Materials and Structures, vol. 26, no.
2, p. 025028, Jan. 2017. [Online]. Available:
<https://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aa5484>
- 9、I. Penskiy, A. P. Gerratt, and S. Bergbreiter, "Friction,
adhesion, and wear properties of pdms coatings in mems
devices," in 2011 IEEE 24th International Conference on Micro
Electro Mechanical Systems, Cancun, Mexico, 2011, pp. 440 - 444.
- 10、E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa,
and H. H. Soliman, "Roughness parameters," Journal of
Materials Processing Technology, vol. 123, no. 1, pp. 133 - 145,
2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
- 11、R. Leach, Fundamental Principles of Engineering Nanometrology.
Elsevier, 2014.
- 12、匹茲堡生存手冊, <https://surviverse.org/>