

工程設計專題－學習歷程

巫玟瑾

民國113年2月4日

Abstract

本文首先介紹了工程製圖的學習過程，包括使用Autodesk Inventor軟體繪製草圖和製作模型。接著，文中敘述了基礎電學的學習內容，涵蓋了N型與P型半導體的差異、電晶體原理、達靈頓電路等知識。

而後則是無刷馬達的專題製作，此專案的主要目標是設計並製作一個在25W轉速達10000rpm的馬達，並且深入了解各種影響轉速的參數以及電子元件的原理。文中詳細地記錄了專案的分工、進度表、資料搜集、零件清單（BOM表）等詳細信息。在製作過程中，作者參與了馬達的3D建模、控制電路設計與製作，並進行了調校分析，以優化馬達的性能。最終，團隊通過實際測試證明其效能，成功製作出25W轉速高達15000rpm的馬達。

最後，作者反思了整個學習過程，表示透過這次專題，不僅對無刷馬達的設計和製作有了深入的了解，也對電子、電路學等領域產生了更多興趣。文章同時也提及作者利用這次機會學習了 \LaTeX 排版技巧，為未來的學術研究打下基礎。

Contents

| | | |
|----------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 工程製圖- Autodesk Inventor | 1 |
| 2 | 基礎電學 | 2 |
| 2.1 | 半導體 | 2 |
| 2.2 | 電晶體 | 2 |
| 2.3 | 達靈頓電路 | 3 |
| 3 | 無刷馬達專題 | 4 |
| 3.1 | 專案目標 | 4 |
| 3.2 | 分工 | 4 |
| 3.3 | 資料搜集 | 5 |
| 3.4 | BOM表 | 7 |
| 3.5 | 製作過程 | 8 |
| 3.5.1 | 3D建模 | 8 |
| 3.5.2 | 控制電路 | 9 |
| 3.6 | 調校分析 | 10 |
| 3.7 | 成果展示 | 11 |
| 4 | 心得與反思 | 12 |
| | References | 13 |
| | References | 13 |

2 基礎電學

在這個部分老師除了告訴我們之後製作無刷馬達所需知識外，也向我們科普了許多相關知識，例如N型與P型半導體的差異、電晶體原理、達靈頓電路，以下便一一列舉。

2.1 半導體

1. N型半導體：在半導體材料中，摻雜了能提供自由電子的雜質，這些自由電子可以自由移動，因此N型半導體的導電性較純淨的半導體高，而其電子濃度亦較高。
2. P型半導體：在半導體材料中，摻雜了能提供正電洞的雜質，這些正電洞可以自由移動，因此P型半導體的導電性較純淨的半導體高，而其電洞濃度亦較高。

2.2 電晶體

1. 二極體：一種基本的半導體元件，主要由P型和N型半導體材料構成。其工作原理是當二極體正向偏壓時，即P型半導體連接正極，N型半導體連接負極時，電流可以流過二極體；反向偏壓則阻止電流流過。
2. BJT（雙極性接面電晶體）：由兩個PN接面組成，分為NPN和PNP兩種類型。以NPN型為例，當基極（Base）接收小電流，它會控制從發射極（Emitter）到集極（Collector）的大電流。基極至發射極接面正向偏壓，而集極至基極接面反向偏壓。這使得發射極的電子被吸引到基極，進而流向正向偏壓的集極，從而產生放大效果。
3. FET（場效應電晶體）：主要通過電壓來控制電流，其結構包括源極（Source）、閘極（Gate）和汲極（Drain）。當閘極施加正電壓時，會在源極和汲極之間形成一個導電通道。電子從源極流向汲極，通過閘極電壓的控制來調節這個通道的導電性，從而控制電流流動。

2.3 達靈頓電路

1. 介紹：達靈頓電路是一種由兩個電晶體組成的放大電路，能夠將輸入的微弱電流放大成較大的電流。
2. 原理：當輸入電流通過第一個電晶體時，會使得第一個電晶體開啓，並且將電流放大，進而使得第二個電晶體開啓，並且將電流再次放大，最後輸出的電流會是輸入電流的數倍，因此若手指觸碰到輸入端，人體的微弱電流便能夠使得達靈頓電路輸出較大的電流，進而點亮燈泡。
3. 電路圖如Figure 3

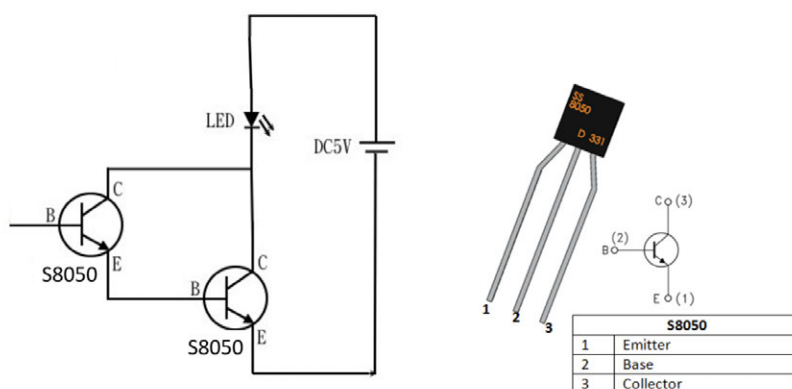


Figure 3: 達靈頓電路圖

4. 實作如Figure 4

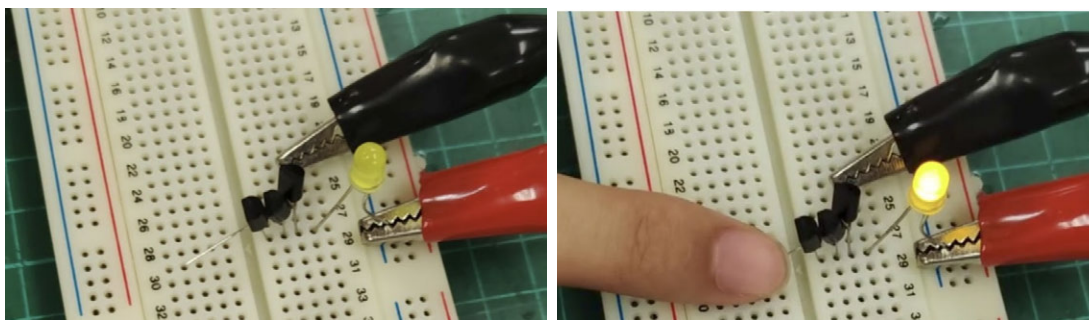


Figure 4: 達靈頓電路實作

3 無刷馬達專題

3.1 專案目標

1. 設計與製作轉速超過10000rpm效能的馬達(25W以內)
2. 認識各參數對轉速的影響
3. 認識電子元件的動作原理
4. 熟練建模軟體協助專題製作
5. 活用加工工具協助專題製作
6. 設計測速工具協助觀察馬達運作
7. 體驗專題製作歷程並編寫完整報告

3.2 分工

經過前段時期的建模與電路實習課程之後，老師讓我們自行依據個人專長，設定六個工作部門，期待我們集結不同屬性的人設，共同完成這一項工程專題活動。

1. PM(Project Manager)：管理與支援工作，並匯整製作專題報告
2. ME(Mechanical Engineer)：科學探索與機械參數設計、主導構想
3. QT(Quality Testing Engineer)：科學探索與機械參數設計、優化設計
4. EE(Electric & Electronic Engineer)：電機研究與電路配線
5. ID(Industrial Designer)：馬達(轉子、定子、感測、測速)設計與建模
6. PE(Process Engineer)：各部件(底座、轉子、定子、支架)加工與組裝

由於我們這組人數比較少，因此我有兼任多個部門，而我主要負責的是QT、EE、PE以及ID。以下是我們專案進度表。

| 主責 | 支援 | 主題工作 | 11/6 | 11/13 | 11/20 | 11/27 | 12/4 | 12/11 | 12/18 | 12/25 |
|----|-----|---------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| PM | All | 專題分工討論 | V | | | | | | | |
| PM | All | 雲端資料分享 | V | | | | | | | |
| PM | All | 確認專題條件 | V | | | | | | | |
| PE | All | 確認可用資源 | | V | | | | | | |
| PM | All | 搜尋與整理資料 | | V | | | | | | |
| ME | All | 閱讀與分析資料 | | | V | | | | | |
| ME | EE | 瞭解科學原理 | | | V | | | | | |
| ME | QT | 分析馬達原理 | | | V | | | | | |
| ME | All | 提出設計方案 | | | V | | | | | |
| PE | PM | 擬定BOM表 | | | V | | | | | |
| PM | All | 採購與取得零件 | | | V | | | | | |
| ID | ME | 轉子、定子建模 | | | | V | V | | | |
| ID | PE | 底座、支架建模 | | | | V | V | | | |
| PE | ID | 線圈加工組裝 | | | | V | V | V | | |
| PE | ID | 底座支架組裝 | | | | | | V | V | |
| EE | QT | 電路實驗與繪圖 | | | V | | | | | |
| EE | PE | 電路配線與測試 | | | | V | | | | |
| QT | All | 成品調校修正 | | | | | | | V | |
| PM | All | 完成專題與報告 | V | | | | | V | V | V |

Table 1: 專案進度表

3.3 資料搜集

1. 電磁科學(ME)

爲了瞭解那些參數對轉子的轉速有影響，我們決定引入高二物理學過的轉動公式，可以知道在功率固定的情形下，必須使轉動慣量減小，而藉由微調半徑與質量等參數，能夠有效使轉速提升。再者，磁力也是決定轉速的一大參數，由高三所學過的必歐-沙伐定律可以知道磁力與電流一次方正比且與半徑一次方反比。綜上所述，藉由參數的調整，能夠使馬達狀態最佳化。

2. 馬達工程(QT)：

- (a) 有刷馬達與無刷馬達的差異：無刷馬達使用電子元件驅動，無需維護，提供穩定轉速。有刷馬達則因碳刷與整流子接觸磨損需維護。無刷馬達優勢有維護低、速度穩定、轉矩平穩、功率大。(Taiwan Oriental Motor Co., Ltd, n.d.)
- (b) 直流無刷馬達原理：直流無刷馬達（BLDC）的原理主要涉及馬達的基礎構造與運轉原理。這類馬達通常由定子（Stator）和轉子（Rotor）組成，並在定子和轉子間留有一定的空氣間隙。BLDC不使用電刷進行電流換相，轉速由繞組線圈的電壓決定。這類馬達需要透過驅動電路將直流電轉換成三相電流來運作。此外，BLDC的驅動方式，包括使用橋式電路與功率開關進行三相的電流換相，並透過霍爾元件偵測馬達永磁轉子的角度。(DMP Electronics Inc, 2014; 國立成功大學馬達科技研究中心, n.d.)

3. 電子元件(EE)：

- (a) 霍爾IC：一種能準確監測磁場變化的裝置，適合用於感測物件位置與移動。其核心是霍爾元件，能將磁場轉換為電壓，並透過處理電路如運算放大器來強化信號。這種感測器可以分為數位輸出的霍爾效應開關、鎖存IC，以及類比輸出的線性霍爾效應感測器，各自有不同的應用範圍。該技術廣泛應用於各種設備，如筆記型電腦、冰箱門，以及馬達位置監測等。(Soltero, 2021)
- (b) MOSFET：一種四端子的高輸入阻抗半導體元件，包括汲極（D）、源極（S）、閘極（G）和基體（B）。它們有增強型和耗盡型兩大類型，並根據導體材料進一步分為N通道和P通道。MOSFET在電子電路中通常用作開關或放大器，並且具有不同的封裝類型，以適應不同的應用需求。(Components101, 2020)

4. 自製馬達範例(ID、EE)：

- (a) 指尖陀螺轉化為電動馬達的方法，解說設計，並運用元件如電磁鐵、霍爾感測器和光學感應器，同時也提供相關電路和測速方式(Bodnar, 2018)
- (b) 在前文電磁科學的相關資料搜集後，應該要讓磁鐵與電磁鐵在同一平面上才能使馬達轉得更快，因此我們參考了一些自製馬達的範例，並且在此基礎上進行改良(Creative Think, 2023)

3.4 BOM表

| 品項 | 規格 | 數量 | 單位 | 來源 |
|----------|---------------------------|----|----|----|
| 強力磁鐵 | 10mm x 10mm x 4mm厚 | 10 | 顆 | 老師 |
| 滾珠軸承 | 3(內徑)x 10(外徑) x 4mm(厚) | 2 | 顆 | 蝦皮 |
| 漆包線 | SWG28# , 0.35mm(線徑)x m(長) | 1 | 捲 | 露天 |
| MOSFET | P80NF10 | 1 | 顆 | 露天 |
| 霍爾IC | A3144 | 1 | 顆 | 露天 |
| 二極體 | 1N4007 | 2 | 顆 | 老師 |
| 電阻 | 1M Ω | 1 | 顆 | 老師 |
| 電阻 | 1k Ω | 1 | 顆 | 老師 |
| 單芯線 | AWG 22# | 1 | 捲 | 老師 |
| PCB洞洞板 | 6 x 28 孔 | 1 | 片 | 露天 |
| 木板 | 90 x 200 x 11mm | 1 | 片 | 老師 |
| 樺木合板 | 3/3.6mm/5.6mm厚 | 1 | 片 | 老師 |
| 直流電源供應器1 | 學校提供 | 1 | 台 | 老師 |
| 直流電源供應器2 | 學校提供 | 1 | 台 | 老師 |
| 帶鋸機 | 學校提供 | 1 | 台 | 老師 |
| 雷切機 | 100W , 900x600mm | 1 | 台 | 老師 |
| 鑽床 | 1/2HP | 1 | 台 | 老師 |
| 手提電鑽 | 10.8V | 1 | 隻 | 老師 |
| 金工虎鉗 | 學校提供 | 2 | 隻 | 老師 |
| F型夾 | 學校提供 | 1 | 隻 | 老師 |
| 耐熱膠帶 | 10mm | 1 | 捲 | 老師 |
| 熱縮套 | Ø5 | 1 | 條 | 老師 |
| 機械螺絲 | 圓頭 , M3L55 | 11 | 根 | 老師 |
| 彈簧墊片 | 4mm | 1 | 片 | 老師 |
| 六角螺帽 | M3 | 11 | 顆 | 老師 |
| 棉線 | 白色 | 1 | 捲 | 老師 |

Table 2: BOM表

3.5 製作過程

3.5.1 3D建模

1. 零件圖

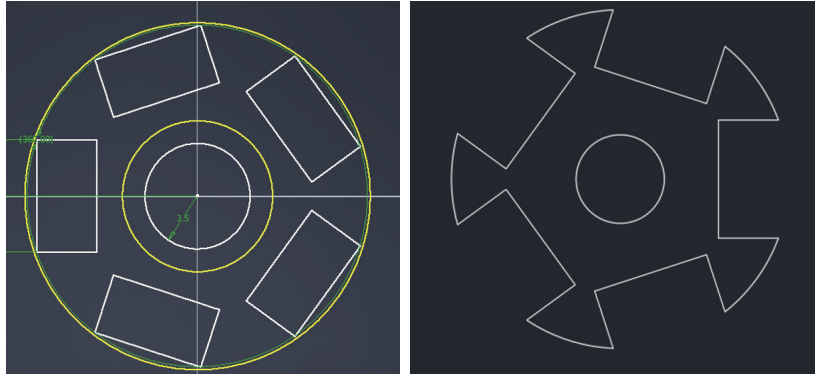


Figure 5: 轉子架草圖

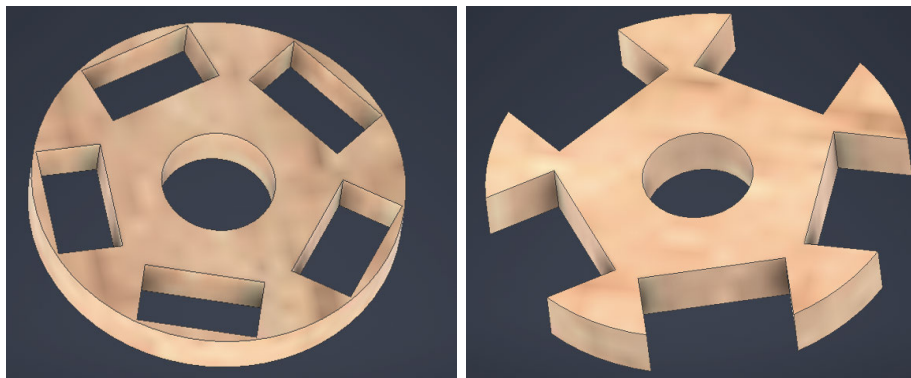


Figure 6: 轉子架草圖(總共三層，上圖為上下兩層(cookie)，下圖為中間層(filling))

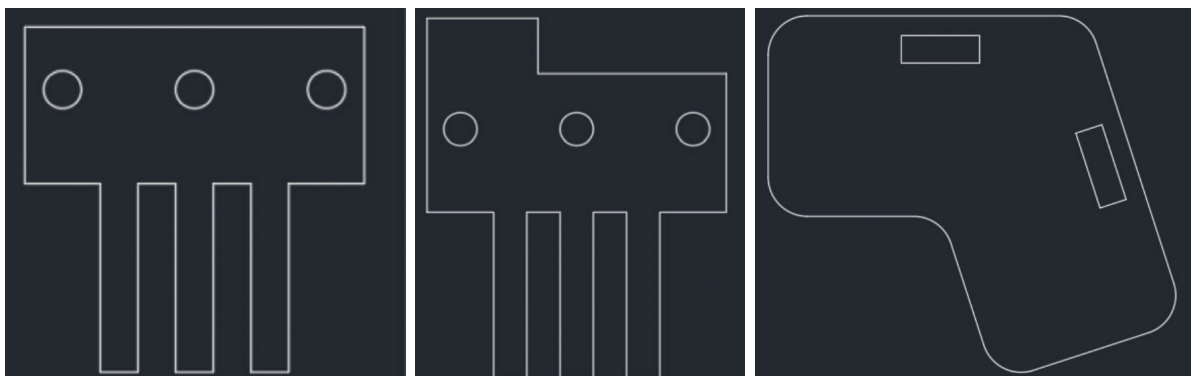


Figure 7: 定子架(前兩個)與霍爾感知架草圖(第二個定子架突出處是為接合霍爾感知架)

2. 組裝圖

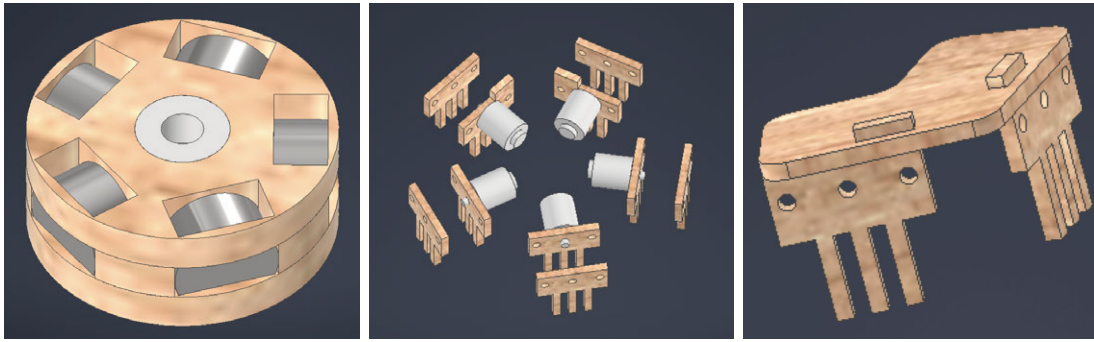


Figure 8: 轉子、定子、霍爾感知支架3D組裝圖

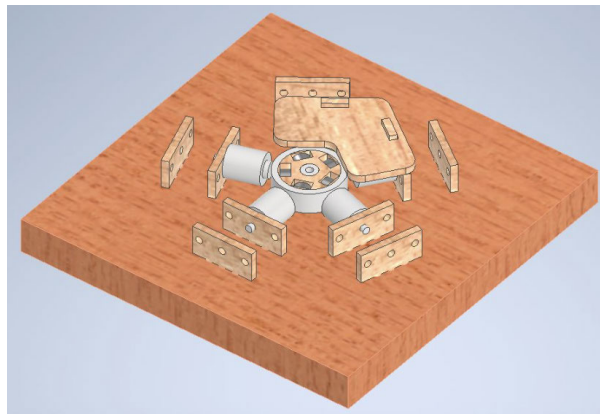


Figure 9: 整組馬達模型3D組裝圖

3.5.2 控制電路

1. 手繪電路圖

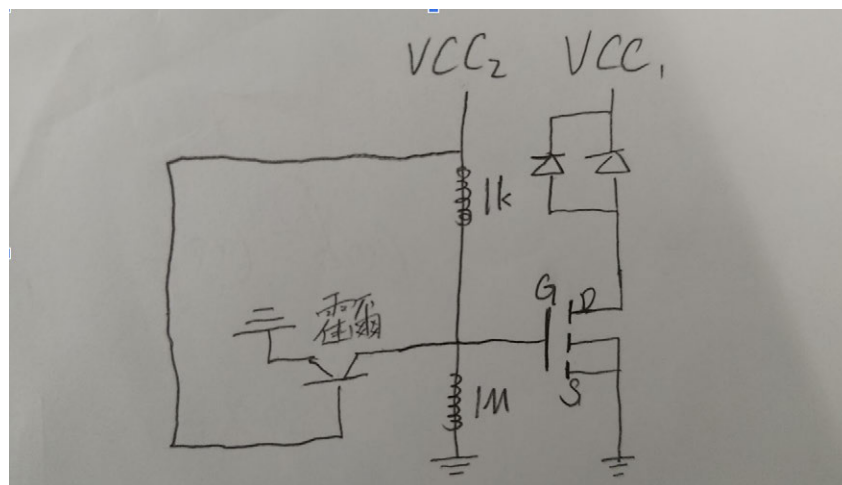


Figure 10: 馬達控制電路手繪圖

2. Tinkercad 電繪電路圖與實體電路

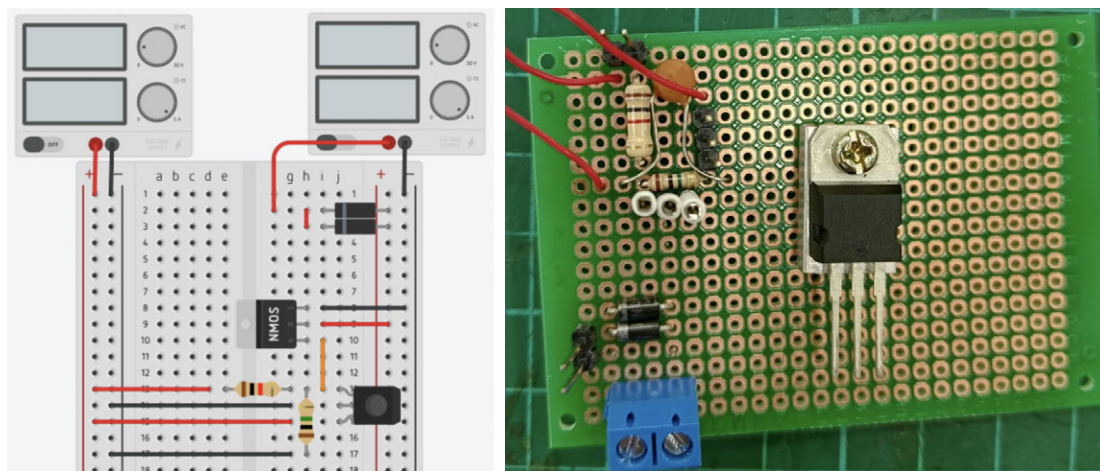


Figure 11: Tinkercad 電繪電路圖與實體電路

3.6 調校分析

| 問題描述 | 轉速(rpm) | 擬修正說明 |
|--|---------|--|
| 從轉子側邊放置霍爾感知器，霍爾接近與遠離磁鐵時，電流有產生改變，但嘗試許久仍無法作動 | 0 | 可感測區域太小，試著將霍爾感知器移到轉子上方 |
| 成功轉動，但因仍是使用手持霍爾感知器因此無法穩定加速 | 13000 | 先找到測試時能使轉子最快的大致位置，再利用膠帶將霍爾感知器固定在設計的固定架上，試圖不斷微調找到最佳位置 |
| 轉速略趨穩定，但在加速過程中發現電流與電壓非恆定，似乎會隨轉速加速而不斷變化，因此很容易超過規定25W之規範，且發現在超過20W後轉速的變化就越來越小。 | 15000 | 可能設計出自動的電壓調節器恆定瓦數，並利用視波器觀察反向電動式等會降低轉速之因素。 |

Table 3: 測試過程

3.7 成果展示

各角度的照片與實測過程如Figure 12，實測影片於[此連結](#)。重新回顧本專案目標(見3.1)，我們成功地設計與製作了一個在25W轉速高達15000rpm效能的馬達，並且在製作過程中，我們也學習到了各種電子元件的動作原理，熟練建模軟體，活用加工工具，並且編寫了完整報告，其中美中不足的是原先想利用Arduino讀取霍爾IC訊號，並在LCD上呈現轉速，但因時間不足而未能完成，只能改用手持測速器量測，但在人手不足的情況下，能夠達成如此成果，我們仍然感到非常滿意。

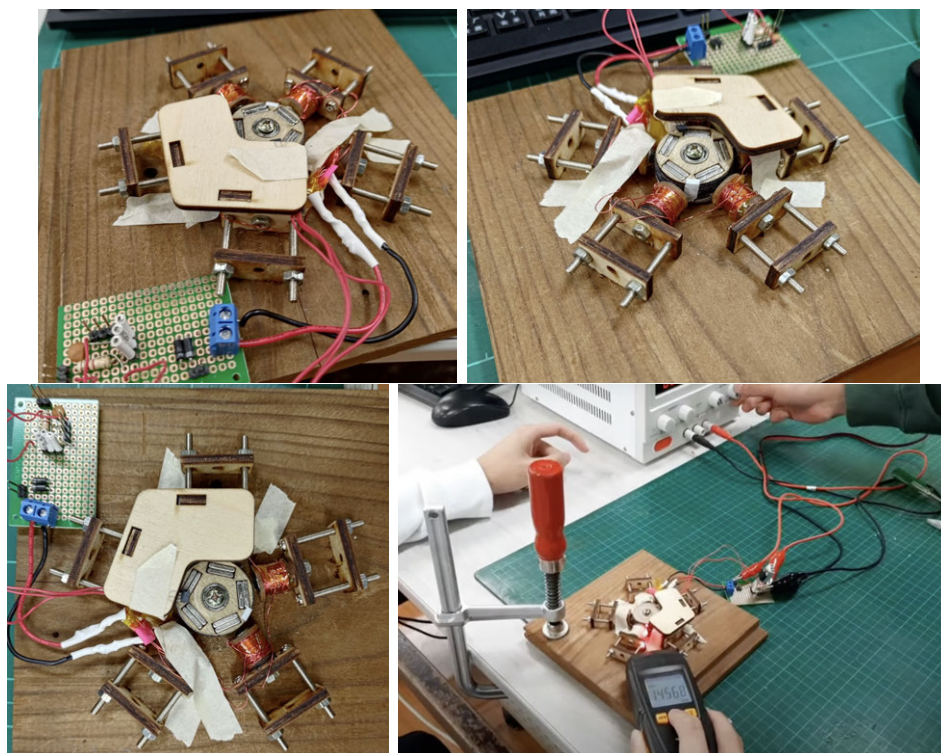


Figure 12: 實體照片，實測影片於[此連結](#)

| 目標 | 成果 |
|-------------------------------|------|
| 設計與製作轉速超過10000rpm效能的馬達(25W以內) | 完成 |
| 認識各參數對轉速的影響 | 完成 |
| 認識電子元件的動作原理 | 完成 |
| 熟練建模軟體協助專題製作 | 完成 |
| 活用加工工具協助專題製作 | 完成 |
| 設計測速工具協助觀察馬達運作 | 部分完成 |
| 體驗專題製作歷程並編寫完整報告 | 完成 |

Table 4: 專案目標成果

4 心得與反思

在課程中，我學習到一個無刷馬達是從無到有建構出來的，與以往製作專案不同，並非直接使用現成的套件拼湊，工程設計這堂課老師帶我們從半導體的原理，告訴我們何為N型、P型半導體，又是如何將排列組合作出二極體、電晶體，做出控制電流方向，甚至在達靈頓電路中更是直接感受到其能讓微弱電流增強的效果。

在進行無刷馬達的專題時，起初只對有刷馬達的原理、安培定律、螺線管和力矩等在物理課上學過的概念有所了解，但對應該如何實作，卻是毫無頭緒，不過在我們開始逐步確定各種參數，如葉片數量、半徑和形狀，並以最大化轉子速率為目標，我們發現轉子的質量（越小越好）、半徑（越小越好）對轉速的影響最大。另一方面，為了減小氣隙，我們將線圈和轉子平行擺放，如此不僅能減小氣隙，還可以最大化磁鐵接收的磁力線。最後，還有自己焊接的電路板，從了解各個零組件的工作原理、電路作動過程、焊接技巧，運用所學從零開始製作一塊電路板，然後通電並進行測試，當一切準備就緒，馬達最終真的開始轉動時，所感到的成就感遠非控制現成馬達所能相提並論的。

我很感謝在我探索電機的道路上有這段旅程，比起先前只是知道不同無刷馬達可能會因為不同廠牌的調校，在扭力、轉速上會有不同的表現，我更了解各種影響馬達的因素，氣隙、磁鐵、轉子、定子.....各種要素互相影響，讓我能在未來挑選馬達時，有了更多切入的觀點，也在這段時間的學習中，讓我逐漸想在未來更深入了解電子、電路學的相關知識。

此外，在這次的專題製作過程中，我不僅深入了解了工程設計的各個方面，在書寫本文時，因為考量到未來寫文章可能會頻繁使用 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 這一強大的文檔排版系統，所以藉這此機會使用它（本文 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 原始檔案）。不過學習他的過程是困難重重，光是為了在本地端架設環境在VSCode上運行就耗費數個小時，而它的語法和排版規則也與我過去使用的文字處理軟體不同，他就像是簡化版的HTML，不過隨著我逐步深入學習，理解 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 的基本結構、命令語法、管理文獻參考和引用，最後產出此文。總的來說，學習 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 雖然起初感到困難，但隨著練習和時間的積累，我體會到 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 在學術寫作和專業文檔排版中的強大功能和靈活性，也相信其對我未來撰寫論文等學術研究中會有很大的幫助。

References

- Bodnar, D. (2018). *Fidget spinner motors*. <http://trainelectronics.com/FidgetSpinner/>.
- Components101. (2020). *Fundamentals of mosfets and their working*. <https://components101.com/articles/mosfet-symbol-working-operation-types-and-applications>.
- Creative Think. (2023). *Making 6 core permanent magnetic motor*. <https://youtu.be/4tTS13WZG2A>.
- DMP Electronics Inc. (2014). *Roboard 研習營馬達基本認識與bldc 驅動實驗*. <https://www.slideserve.com/billy/roboard-bldc>.
- Soltero, M. (2021). 什麼是霍爾效應感測器?. https://e2e.ti.com/blogs_/taiwan/b/taiwan1/posts/what-is-a-hall-effect-sensor.
- Taiwan Oriental Motor Co., Ltd. (n.d.). 第28回「何謂dc無刷馬達?」. https://www.orientalmotor.com.tw/teruyo_det/teruyo_28/.
- 國立成功大學馬達科技研究中心. (n.d.). 直流無刷馬達. http://km.emotors.ncku.edu.tw/emotor/worklog/EMTRC/motor_learn/elearning/motor/1/lecture_1.4.pdf.