

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(一)

探究精神獎

052314

應用接近感應器與 3D 模型設計降低磁浮列車之
供電延遲並使其自主傾斜

學校名稱： 花蓮縣私立海星高級中學

作者： 高二 徐來慶 高二 羅允謙	指導老師： 簡汎佐
---------------------------------	------------------

關鍵詞： WPT 無線供電、EDS 磁浮、Arduino

摘要

本研究旨在設計一套中長程列車可使用的磁浮系統。目前，成功的磁浮列車無線供電系統都是於大範圍內進行供電，這會導致許多電力的浪費，縮小範圍必須要感測是否需要供電，目前能做到的，主要是手機的無線充電器。然而，其從接觸負載到真正開始供電，過程大約需要 1.2 秒。所以本次實驗的首要目標就是製作一套能在 5 ms 內進行供電的距離感應式供電系統。

中長程列車多數包含不同車種，而這些車種的行駛速度各不相同，導致列車需要在過彎時調整不同的傾斜角度，以確保乘客受到最小的離心力影響。因此，本研究的第二個目標是製作一套能自主傾斜的磁浮系統，並設計一款 App，使我們能透過 Esp32 調整列車四角的磁力，進而控制傾斜。

壹、前言

一、研究動機

暑假之時，學校舉辦了國際參訪活動，地點位於日本的仙台市。經過幾日的活動，我們發現，當地人每日通勤的主要交通工具，為仙台市地鐵。經當地人介紹，仙台市地鐵是採用「線性馬達(Linear motor)」(圖 1-1)，在一番搜索後，發現它也就是驅動磁浮列車的動力來源。這讓我對磁浮列車起了興趣，開始在網路上探索磁浮科技。其中，上海的機場接送線讓我開始思考列車傾斜的問題；日本的 SCMAGLEV 讓我想起曾經看過一部關於無線充電器的影片。影片中提到了手機無線充電器的各種利弊。在節省能源方面，影片指出閒置時的線圈耗電量相當高，而現行的無線充電器是透過每秒檢測線圈的電感值，判斷是否有負載進而決定是否供電。這時就不禁想到，如果能兼顧節省能源與快速供電，那不就非常適合放在磁浮列車上嗎？

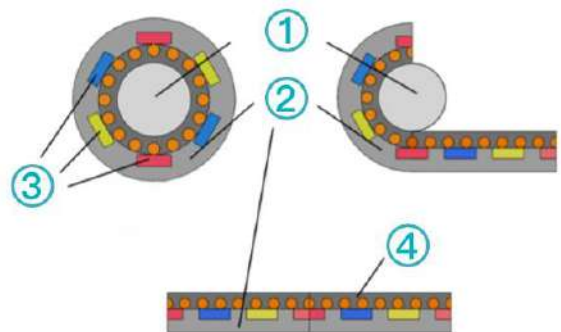


圖 1-1 線性馬達示意圖

(1.轉子 ,2.定子 ,3.線圈 ,4.動子)

(羅文典. (2017). 具強制空氣冷卻之無鐵心式線性馬達設計與製作.)

二、研究目的

- (一) 設計能在 5ms 內立即供電的距離感應式磁耦和共振供電系統
- (二) 設計能傾斜的低速磁浮系統
- (三) 製作一套能控制列車四角伺服馬達的 App

三、文獻探討

(一) 無線電力傳輸(WPT)原理

無線電力傳輸（Wireless Power Transfer, WPT）是一種能夠在不使用任何接觸式連接的情況下，將能量於兩個裝置間傳輸技術。這項技術的應用範圍廣泛，從智慧型手機的無線充電、電動車的非接觸式充電，到醫療植入設備的無線供電，皆有使用此技術。

本次實驗採用磁共振耦合（Magnetic Resonant Coupling）作為無線電力傳輸的方式（圖 1-2）。磁共振耦合的原理是利用兩個具有相同共振頻率的諧振電路，使能量在發射端與接收端之間透過磁場耦合進行高效傳輸。磁共振耦合也能夠在較遠的距離維持較高的傳輸效率。

在磁共振耦合技術中，在發射端與接收端的距離 10 公分的情況下，仍可保持有效的能量傳輸。這使得它非常適合應用於磁浮列車的電力傳輸。

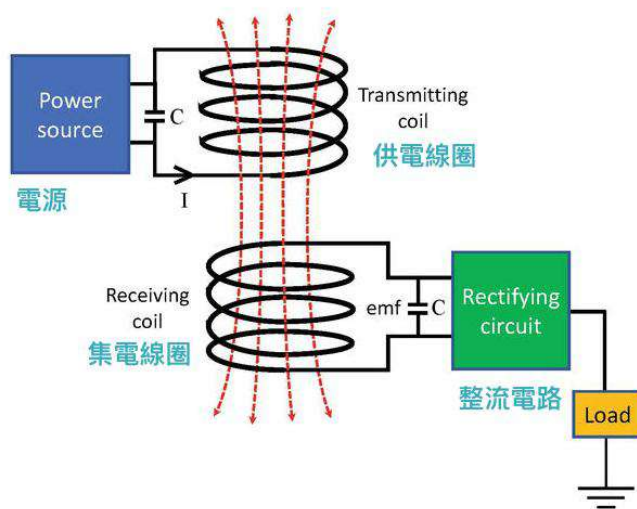


圖 1-2 磁共振耦合示意圖

(Mohamed Aboualalaa, Hala Elsadek and Ramesh K. Pokharel. (2020). WPT, Recent Techniques for Improving System Efficiency.)

1. 諧振頻率 (Resonant Frequency)

在電路中，電場能量儲存在電容內，而磁場能量則儲存在電感中。當電容和電感串聯或並聯形成 LC 電路時，能量會在電場與磁場之間來回交換，導致電路內部產生振盪，這種現象稱為**諧振**。在無電阻影響的情況下，LC 電路的諧振頻率 f 可由以下公式計算：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

其中 L 為電感（單位：亨利 H），表示電感元件儲存磁場能量的能力。 C 為電容（單位：法拉 F），表示電容器儲存電場能量的能力。透過調整電感 L 或電容 C 的數值，可以改變電路的諧振頻率 f 以適應不同應用。

2. 非穩態 555 計時器

在非穩態模式（Astable Mode）下，555 計時器會持續在高電平與低電平之間交替變化，不斷地產生方波訊號，因此可以用來作為訊號產生器。此電路的特點是計時器不需要外部觸發訊號，就會自動運行。在這種運作模式下，輸出信號的頻率 f 由電阻 $R1$ 、 $R2$ 和電容 $C1$ 共同決定，其計算公式如下：

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2R2)C1}$$

其中 $R1$ 和 $R2$ 是電阻（單位：歐姆 Ω ）， $C1$ 是電容。這三個元件的組合決定了計時器輸出的振盪頻率 f 。透過變更 $R1$ 、 $R2$ 、 $C1$ 的值，可以精確調整輸出信號，三個數值增加時皆會降低頻率，反之亦然。

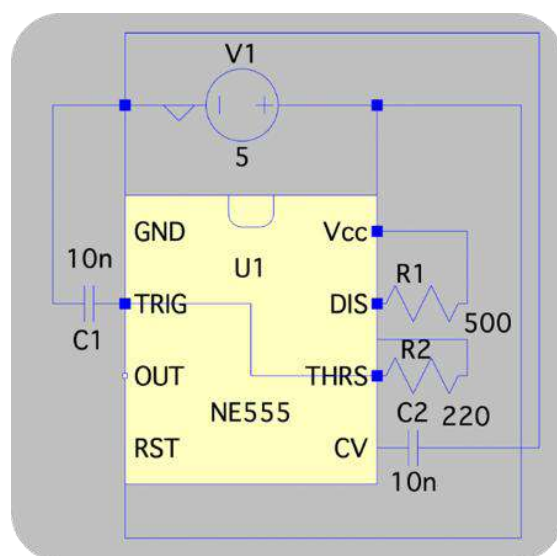


圖 1-3 非穩態 555 計時器電路圖
(研究者自行繪製)

（二） 磁浮列車的原理

目前磁浮列車主要應用的技術有兩種：電磁力懸浮技術（Electromagnetic Suspension, EMS）以及電動力懸浮技術（Electrodynamic Suspension, EDS）。以下為兩種技術的簡介。

1. 電磁力懸浮（EMS）

EMS 懸浮系統依靠磁鐵之間的「吸引力」懸浮，具體達成方法是在車體下方製作 C 型臂（圖 1-4），安裝電磁鐵來吸引 T 型軌道下方的金屬。

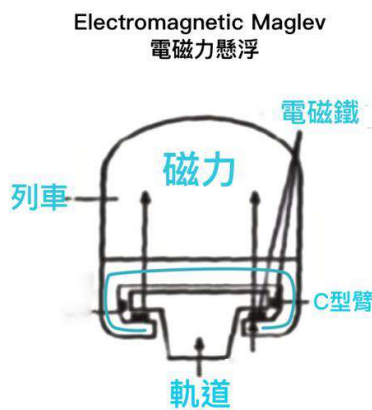


圖 1-4 電磁懸浮（EMS）示意圖

(Chris Rose. (2014). Implementation of cargo Maglev in the United States.)

2. 電動力懸浮（EDS）

EDS 懸浮系統主要依靠磁鐵之間的「排斥力」。實際使用的方法有很多，圖 1-5 為一張基本的示意圖，圖中使用車體下方的超導磁鐵排斥軌道上的同極磁場。

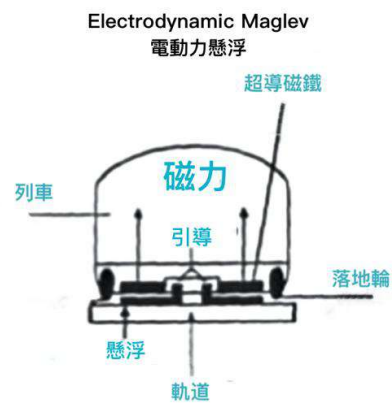


圖 1-5 電動動力懸浮（EDS）示意圖

(Chris Rose. (2014). Implementation of cargo Maglev in the United States.)

（三） 各式感測器與電子元件

1. TCRT5000

TCRT5000 是一種光電反射式紅外線感測器，主要用於偵測物體的存在與距離。它內部包含一組紅外線發射二極體 (IR LED) 和一個光電晶體管，兩者排列在同一個封裝內，並以反射方式運作。當紅外線 LED 發射光線時，若前方有物體，光線會被反射回來並被光電晶體管接收，從而判斷物體的存在與距離。

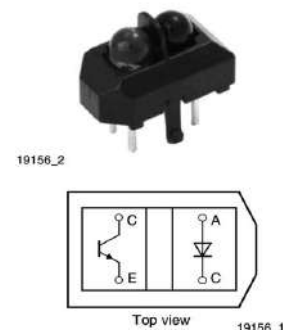


圖 1-6 TCRT5000 Datasheet 節錄

(Vishay Semiconductors. (2009). TCRT5000 Reflective Optical Sensor with Transistor Output.)

2. LM7805 / 7812

LM7805 和 LM7812 為線性穩壓器，主要用於將較高的輸入電壓穩定調整為固定的直流輸出電壓，LM7805 提供 5V 的穩定輸出，而 LM7812 提供 12V 的穩定輸出。這些穩壓器會將多餘的電壓以熱能的方式排出，有效穩定輸出電壓，並抑制輸入電壓波動與負載變化帶來的影響。

LM7805/I/R/RI ELECTRICAL CHARACTERISTICS									
(Refer to test circuit, $T_{MIN} < T_J < T_{MAX}$, $I_O = 500mA$, $V_I = 10V$, $C_I = 0.33\mu F$, $C_O = 0.1\mu F$, unless otherwise specified)									
Characteristic	Symbol	Test Conditions	LM7805I			LM7805			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	4.8	5.0	5.2	4.8	5.0	5.2	V
		$5.0mA \leq I_O \leq 1.0A$, $P_O \leq 15W$				4.75	5.0	5.25	
		$V_I = 7V$ to $20V$ $V_I = 8V$ to $20V$	4.75	5.0	5.25				

LM7812/I/R/RI ELECTRICAL CHARACTERISTICS									
(Refer to test circuit, $T_{MIN} < T_J < T_{MAX}$, $I_O = 500mA$, $V_I = 19V$, $C_I = 0.33\mu F$, $C_O = 0.1\mu F$, unless otherwise specified)									
Characteristic	Symbol	Test Conditions	LM7812I			LM7812			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	11.5	12	12.5	11.5	12	12.5	V
		$5.0mA \leq I_O \leq 1.0A$, $P_O \leq 15W$				11.4	12	12.6	
		$V_I = 14.5V$ to $27V$ $V_I = 15.5V$ to $27V$	11.4	12	12.6				

圖 1-7 LM7805/LM7812 Datasheet 節錄

(Fairchild Semiconductors. (1999). LM78XX (KA78XX, MC78XX) FIXED VOLTAGE REGULATOR (POSITIVE).)

3. BC547

BC547 是一款常見的 NPN 型晶體管，廣泛應用於小功率開關電路和信號放大電路中。由於其低成本、體積較小，它非常適合用於簡單開關控制等場合。BC547 的主要優點是其良好的增益特性，能夠提供穩定的放大效果，並且廣泛應用於各類低功率電子系統中。



圖 1-8 BC547 Datasheet 節錄

(Motorola Inc. (1996). Amplifier Transistors NPN Silicon BC546, B、BC547, A, B, C、BC548, A, B, C.)

4. MOSFET

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，金屬氧化物半導體場效應電晶體) 主要用於電子開關和放大電路。相較於傳統的雙極性接面電晶體 (BJT)，MOSFET 具有高開關速度、低功耗、高輸入阻抗等優點。MOSFET 有分邏輯級與非邏輯級。

非邏輯級 MOSFET（如：IRF 系列）需要較高的閘極電壓（8V 以上的 V_{GS} ）才能完全導通，通常需要額外的驅動電路；而邏輯級 MOSFET（IRL 系列）是設計用於低（3.3V 或 5V）閘極電壓，適合直接由微控制器驅動（如 Esp32）。

5. IR2113-2PBF 閘極驅動器

當切換 MOSFET 的頻率高過一個定值時，電子流入 GATE 角位的速度會開始影響到整體效能，當電流太低，MOSFET 再開關時，無法將 Drain 與 Source 兩腳之間完全接通或截斷。這就是閘極驅動器主要解決的問題，閘極驅動器會以高電流把電子灌入或抽出 MOSFET，使電阻值會立刻降低或立刻升高，以增加效能。

6. KBP310 橋式整流器

橋式整流器是一種能將交流電轉為直流電的電子元件。橋式整流器透過二極體的導通與截止特性，使電流在交流電壓的正半週和負半週都能朝同一方向流動(圖 1-9)，達成交流轉直流的整流效果。整流過程如下：當交流電壓處於正半週時(圖 1-10)，D1 和 D3 導通，電流從交流電源的 A 端經過 D1，流向負載，最後經 D3 回到交流電源的 B 端。D2 和 D4 截止，不影響電流流動；當交流電壓處於負半週時(圖 1-11)，D2 和 D4 導通，電流從交流電源的 B 端經過 D4，流向負載，最後經 D2 回到交流電源的 A 端。D1 和 D3 截止，不影響電流流動。不論交流電處於正半週或負半週，負載上的電流方向始終一致，將交流轉換為直流。

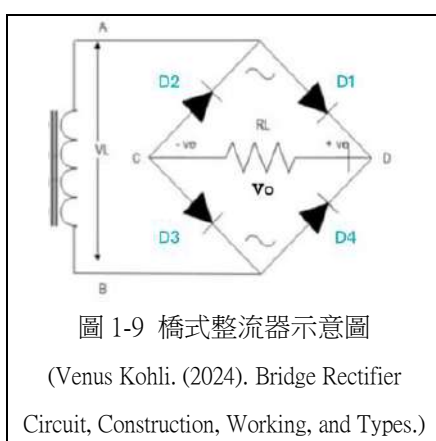


圖 1-9 橋式整流器示意圖

(Venus Kohli. (2024). Bridge Rectifier

Circuit, Construction, Working, and Types.)

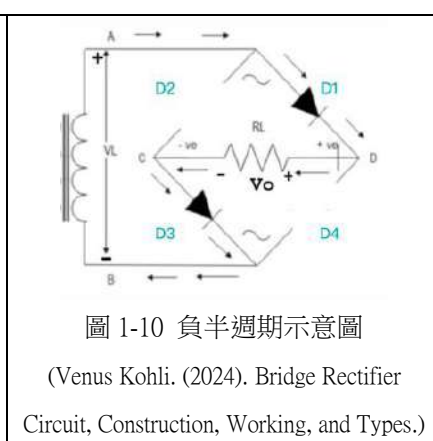


圖 1-10 負半週期示意圖

(Venus Kohli. (2024). Bridge Rectifier

Circuit, Construction, Working, and Types.)

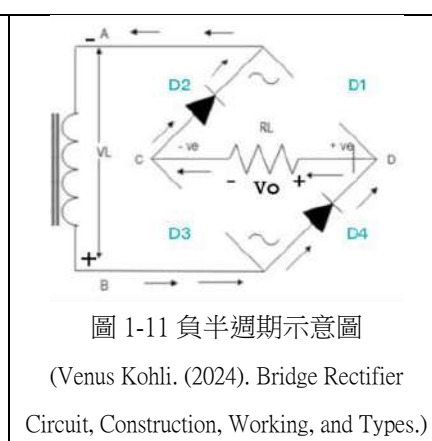


圖 1-11 正半週期示意圖

(Venus Kohli. (2024). Bridge Rectifier

Circuit, Construction, Working, and Types.)

7. TC74HC4049AP 緩衝器及線驅動器

此晶片是一個反向器晶片，它會在輸入電壓高時將輸出轉為低電壓，並在輸入低電壓時將輸出轉為高電壓。

貳、研究設備及器材

表 2-A 實驗設備、器材
(研究者自行拍攝、繪製)

				
3D 列印機	電焊筆	CNC 中心加工機	一般陶瓷電容 104(100 nF)、 103(10 nF)、102(1 nF)	555 計時器
				
LM7805/7812 穩壓器	高壓陶瓷電容 104(100 nF)	薄膜電容 220 nF、 10 μ F	IR2113 閘極驅動器	TC74HC4049AP 緩衝器及線驅動器
				
橋式整流器	BC547	TCRT5000 紅外線測距儀	IRLZ44N	電源供應器

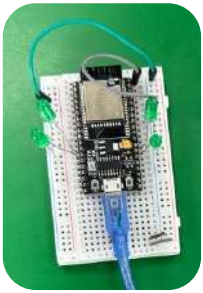
				
ESP32	A11 線圈	無線供電接收器	單面/雙面焊接版	絕緣跳線
				
臥碳式電阻(220/1K)	漆包線 0.5/0.25 mm	示波器	繼電器	鍍錫銅線

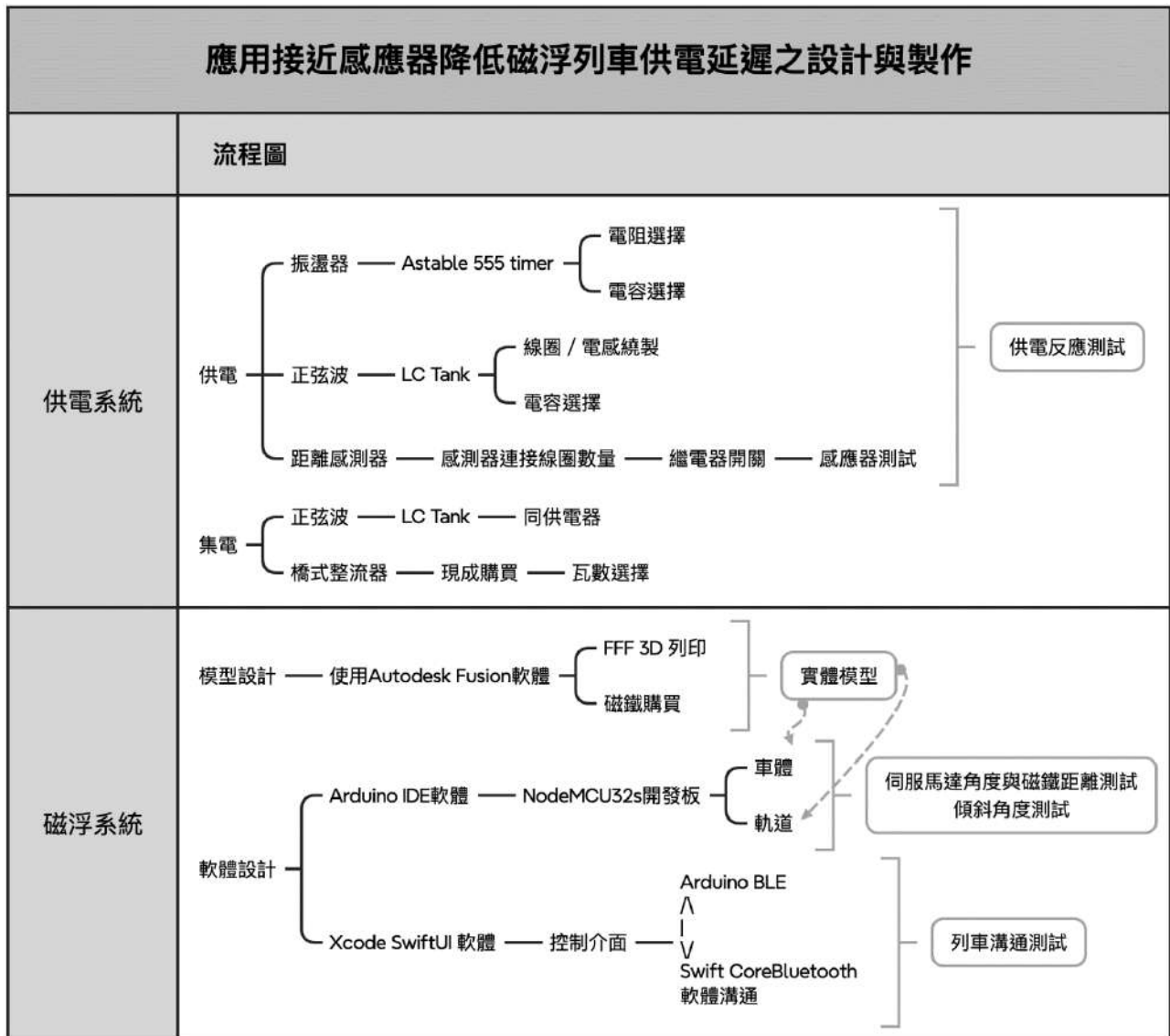
表 2-B 實驗使用軟體
(研究者自行擷取、繪製)

Autodesk Fusion 模型設計		Arduino IDE Esp32 程式編寫	
			
Xcode 手機程式編寫	Scidavis 圖表繪製	Tracker 圖像分析	
			

參、研究過程或方法

表 3-A：研究流程圖

(研究者自行繪製)



一、距離感應式無線供電系統：

（一） 設計理念

本次實驗要設計的是距離感應式無線供電系統。無線供電線圈在沒有負載通電也會消耗電力，一般的手機無線充電器會使用電感值負載感應來解決閒置耗電的問題。電感值負載感應是無線供電器在閒置時，每隔 1 秒向線圈通入交流電流，以檢測是否有負載靠近。當負載線圈接近時，電感值會發生變化，電路中的晶片感測到此變化後，便會啟動供電。

而這次設計的距離感應式無線供電系統，使用的是距離感測器來啟動供電，藉此降低供電啟動的延遲。整個供電系統分為 3 個部分：頻率產生器、距離感測開關、LC 電路（包含供電線圈）。其中，頻率產生器使用非穩態 555 計時器製成，距離感測開關則由 TCRT5000 模組板與繼電器組成，LC 電路則採用現成的電容與線圈。

由於我們購買的 TCRT5000 模組板的數位輸出為常開型，因此在繼電器上，我們要將供電線圈接在 NO（Normally Open，繼電器未通電時接通），才能達到接近開啟，遠離關閉的效果（圖 3-1）。

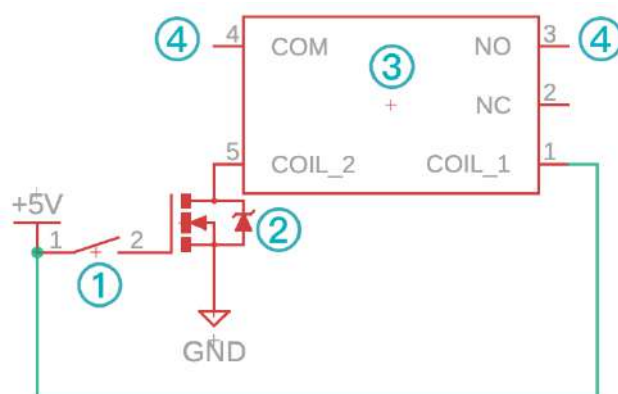


圖 3-1 距離感應式開關示意圖

（1. 距離感測器, 2. IRLZ44N, 3. 繼電器, 4. 線圈接點）

（研究者自行繪製）

（二） 實體設計

1. 電路

我們原本使用麵包版進行製造，但後來發現在高頻率的電路中，接觸不良往往導致電路出現不明問題，空間上也會佔用太多的體積，因此我們選擇使用焊接版。雖然失去了即時調整的插拔功能，但電路穩定了許多。

(1) 供電

供電电路板的频率来源为非稳态 555 计时器。从右边的公式可以知道，非稳态 555 计时器的频率由电阻和电容决定。我们参考国际无线充电 Qi 标准的频率：140Khz。而依靠我们手边拥有的常见电阻与电容，我们组出了 $R1=500\Omega$ （并连两个 1k）， $R2=220\Omega$ ， $C1=10\text{ nF}$ 的电路（图 3-4、图 3-5），经计算， $f\approx 153.2\text{ kHz}$ （图 3-2）。在实际测量后，在 5V 时大约是 151kHz（图 3-6），数据相当准确。

频率产生器之外的电路，我们选择参考图 3-3 的电路，透过 IR2113 与 TC74HC4049AP 所组成的 H-Bridge 来增加供电线圈的电流。

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2R2)C1}$$

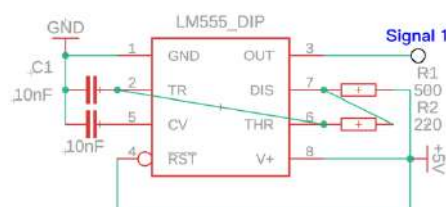


圖 3-2 频率产生器电路规划图
(研究者自行繪製)

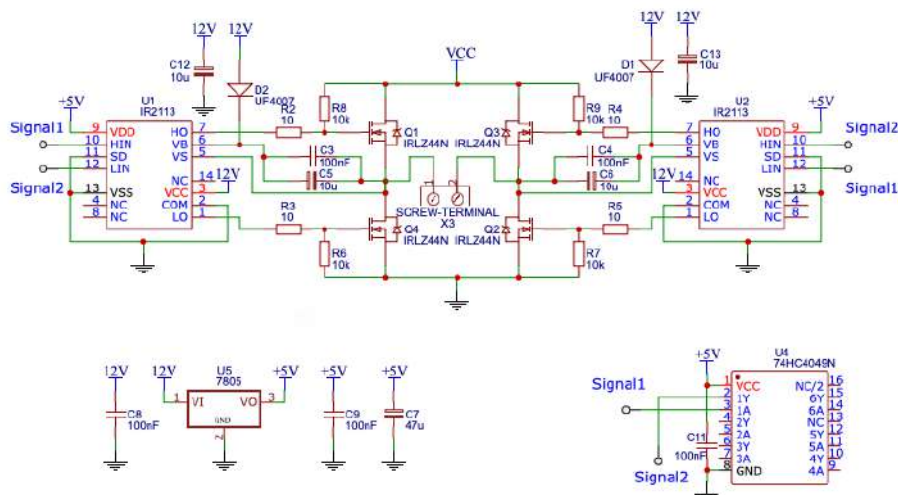


圖 3-3 H-Bridge 电路图 (Signal 1 来自图 3-31)
(Great Scott. (2021). IR2113 H-Bridge.)

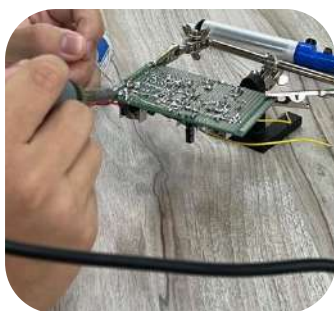


圖 3-4 正在焊接的电路板
(研究者自行拍攝)

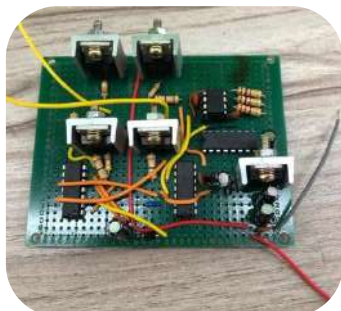


圖 3-5 完成的电路板
(研究者自行拍攝)

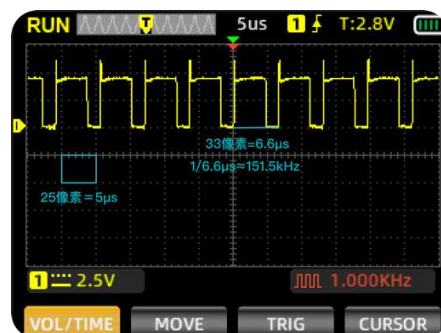


圖 3-6 示波器的截图画面
(研究者自行拍攝)

(2) 集電

集電電路就相對簡單許多，將集取到的電流整流後一部份通往車上的 esp32 控制板中去進行藍芽溝通、運算與輸出；另一部分通往伺服馬達去進行磁鐵高度的調整（圖 3-7）。

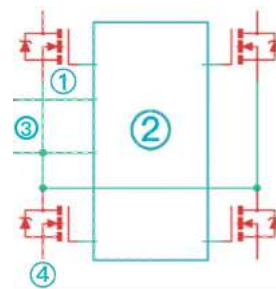


圖 3-7 集電電路圖（1.以 MOSFET 圖示代表伺服

馬達，2.Esp32，3.電源輸入，4.輸出）

（研究者自行繪製）

2. 線圈

LC 電路的構成，需要兩樣部件：電感與電容。電容的尋找不是問題，最重要的是的線圈（電感）。此供電線圈的圈數除了要產生磁場外，還要與電容組合，使其諧振頻率與我們的非穩時 555 計時器的頻率相同。這需要用到右邊的公式，我們需要 151kHz。透過現成線圈與電容的組合，經計算， $L \cdot C \approx 1.11 \times 10^{-12}$ 。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(1) 供電

供電線圈我們採用直徑 45 mm 的 A11 QI 標準供電線圈（圖 3-8），透過 LCR Meter 測量，我們得到 6.3 μH ，帶入公式計算，我們需要 176.3 nF 的電容。



圖 3-8 供電線圈
（研究者自行拍攝）

(2) 集電

集電裝置我們完全採用現成電路（圖 3-9），因為線圈的輸入電壓為 24V 左右，我們目前降壓的唯一方法是使用 LM7805，其將壓法是將多餘電壓轉為熱能，如此一來，我們會失去約 80% 的能量，效率極低。



圖 3-9 集電裝置
（研究者自行拍攝）

3. 組合

我們首先將繼電器、距離感測器、MOSFET 焊在一起（圖 3-10），再來與線圈接在一起（圖 3-11），達成在感應器未偵測到物體時將線圈關閉，物體靠近時打開接通線圈。

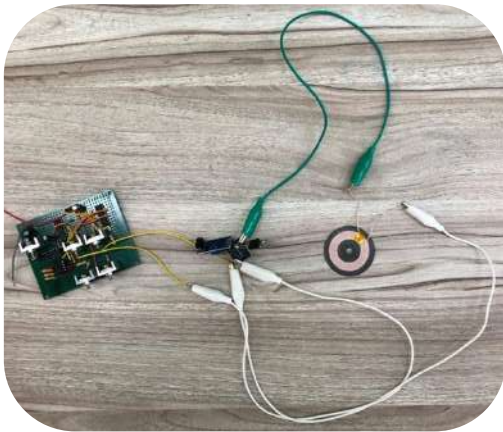


圖 3-10 供電電路板、感應開關與線圈組合

（研究者自行拍攝）



圖 3-11 距離感應開關組合

（研究者自行拍攝）

二、傾斜式磁浮系統：

（一）設計

本次實驗要設計的低速磁浮系統，是一套能夠使列車在靜止時懸浮，並且能夠任意傾斜的磁浮系統。這項系統考量到以下兩件事：

1. EDS 高速列車（如日本 SCMaglev）只在高於 155km/h 的時候才收起輪子，達到完全磁浮。目前在營運的中長程列車，有許多車站需要停靠，如果要不斷收放輪子，那這成本效益相當不切實際
2. EMS 低速列車（如上海機場線）使用的是 C 型臂夾在軌道上，當不同列車過彎速度相異時，鎖死的傾斜也會降低效率。

我們設計的軌道為 U 型與 V 型的結合（圖 3-12）斜面放上磁鐵，並在相對應的列車位置上放上以伺服馬達控制的永磁，以互相排斥的方法達到磁浮。將此裝載在列車的四個角落，便能達成傾斜。

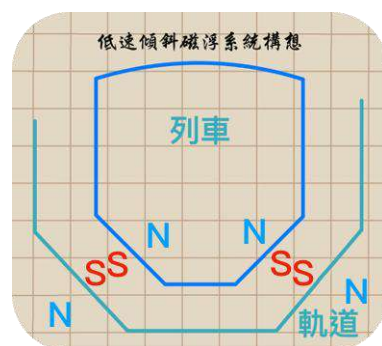


圖 3-12 低速懸浮系統示意圖
（研究者自行繪製）

（二）實體製造

1. 列車

我們使用 Autodesk Fusion 進行列車模型設計，並使用 FFF 3D 列印技術進行模型製造。在不斷的實體製造與問題發現中，我們進行了多代測試，最後選擇了最後第五代的設計（表 3-B）。而在第二階段的磁力測試中（表 3-C），選擇伺服馬達控制永磁高度來作為列車的磁力來源。

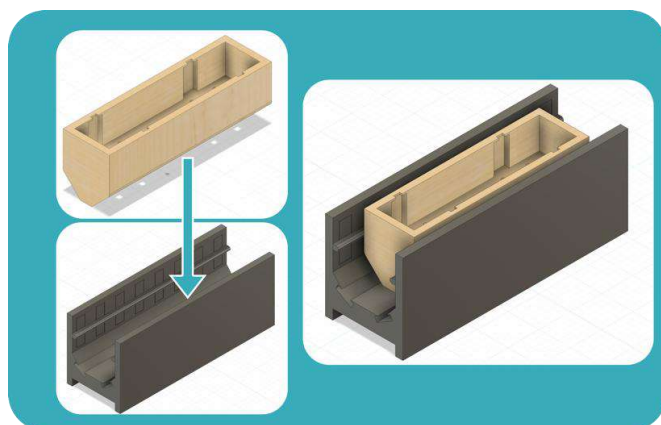


圖 3-13 第五代列車與第四代軌道組裝示意圖
（研究者自行繪製）

表 3-B：列車版本更替
(研究者自行繪製)

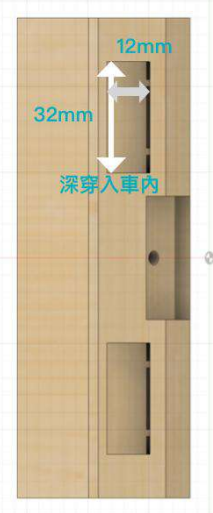
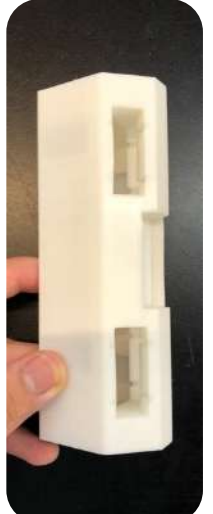
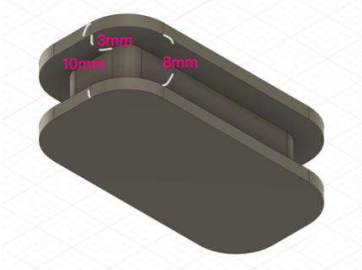
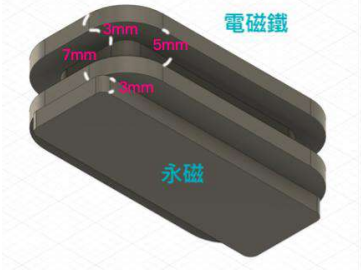
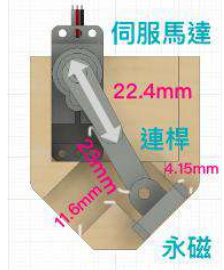
版本	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代
模型圖	 圖 3-14 第一代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-15 第二代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-16 第三代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-17 第四代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-18 第五代模型圖 (研究者自行繪製)
實體圖	 圖 3-19 第一代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-20 第二代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-21 第三代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-22 第四代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-23 第五代實體圖 (研究者自行拍攝)
改進		將線圈放置處挖深至 10 mm。	為了增加洞的寬度，將底部的洞錯位，寬度來到 16 mm。	借到了 CNC 中心加工機，以鋼料製作了電磁鐵的核心。	將電磁鐵改用伺服馬達控制的磁鐵，並在車體內增加伺服馬達的空間。
缺點	線圈放置處深度僅有 3 mm，無法放入，更不能固定。薄線圈圈數少，沒有磁力。	線圈洞寬度僅有 6.75 mm，會導致線圈無法放入。	發現如果以空氣作為電磁鐵核心，供電效果微乎其微。	鋼材的重量不輕，並且在測試後，發現電磁鐵磁力微乎其微。	伺服馬達的擺放左右不對稱，重心小有偏移。此缺點的影響微小到可以忽略。

表 3-C：磁力來源比較
(研究者自行繪製)

樣式	純電磁鐵	電磁鐵輔助永磁	伺服馬達控制永磁
模型圖	 圖 3-24 純電磁鐵模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-25 電磁鐵輔助永磁模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-26 伺服馬達控制永磁剖面圖 (研究者自行繪製)
優點	有 8 mm 的線圈纏繞空間，能纏繞較多線圈，可以依靠線圈方向改變磁場。	有一個基本的磁場，再加上一個電磁鐵，就能對這個磁場有所控制。	運用連桿控制永磁在列車底部移動，達成對磁場的控制
缺點	一般電流下磁場非常弱，就算提高電流，磁場仍然較弱，而且還會產生高溫。	只剩 5 mm 的線圈纏繞空間，改變線圈方向只能減弱磁場，經測試，當電磁鐵消耗 17.4W 時，磁場密度只有永磁的 6%，無法造成可見的變化。	伺服馬達的體積不小，馬達旋轉角度與永磁位移不成正比。

2. 軌道

軌道一樣是使用 Autodesk Fusion 進行設計，再使用雷射切割與 FFF 3D 列印進行製造。

最早期使用的是雷射切割。原先使用的是直徑 18 mm 圓柱型磁鐵，在精細度上要求較低

(圖 3-27)。但是後來軌道的長度增加，

需要購買新的方型磁鐵，而因為在購買時只注意到磁鐵長度，未顧慮到所需的

精度，設計磁鐵槽時只給了 2 mm 的框架

(圖 3-28)，切割後只剩不到 1 mm (圖

3-29)，稍有施力便會斷裂。



圖 3-27 原本精度要求低的圓柱型磁鐵軌道

(研究者自行繪製)



圖 3-28 後來精度要求較高的方型磁鐵框架
(研究者自行繪製)



圖 3-29 方型磁鐵框架實體
(研究者自行拍攝)



圖 3-30 圓柱型磁鐵大小
(研究者自行拍攝)

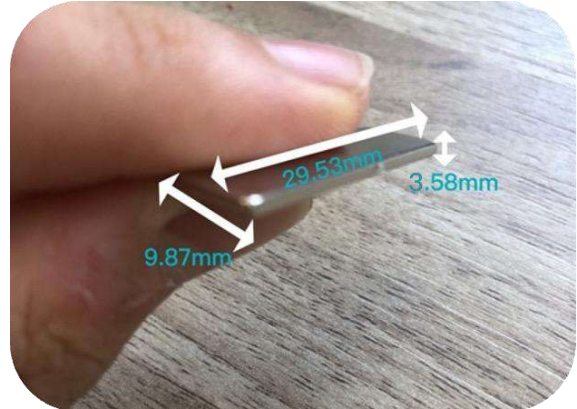


圖 3-31 長方形型磁鐵大小
(研究者自行拍攝)

因此，我們第二代之後的軌道磁鐵槽使用 FFF 3D 列印技術，並將磁鐵嵌入 3D 列印件中（圖 3-21）。這不但顧及了模型的精細度，更提升了磁鐵在軌道中的穩定度。

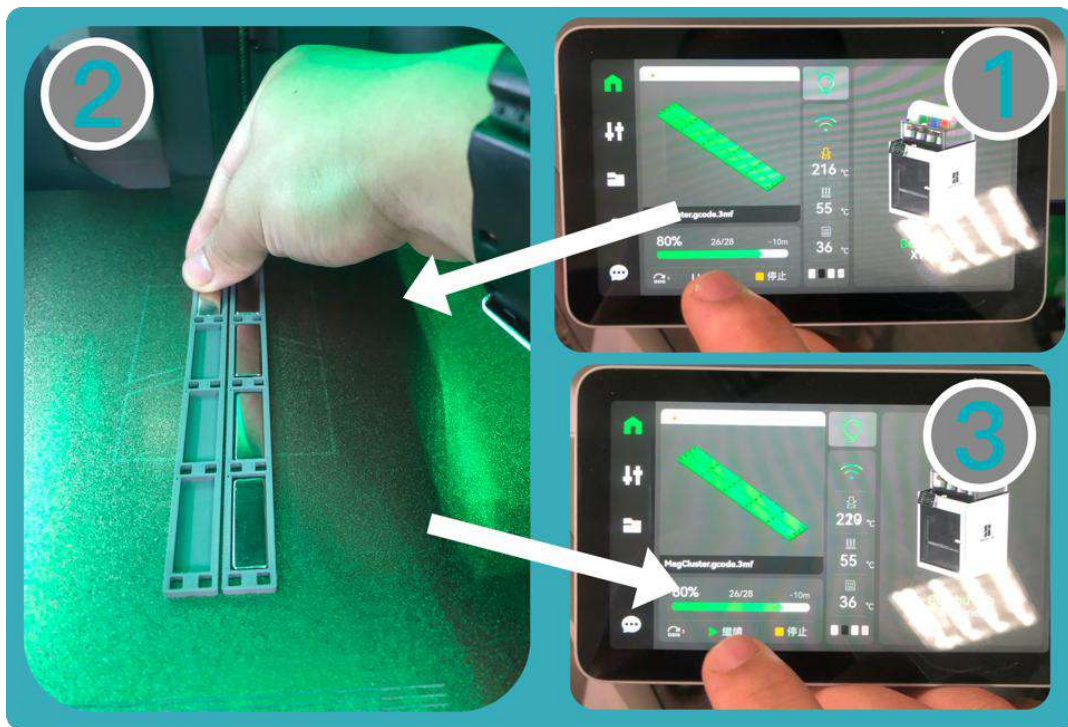
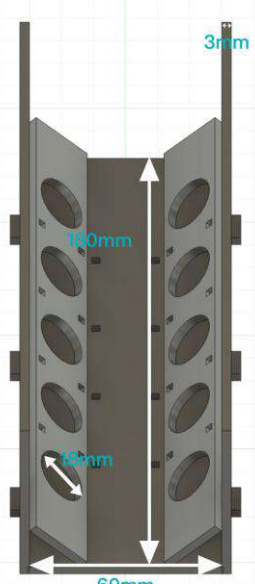
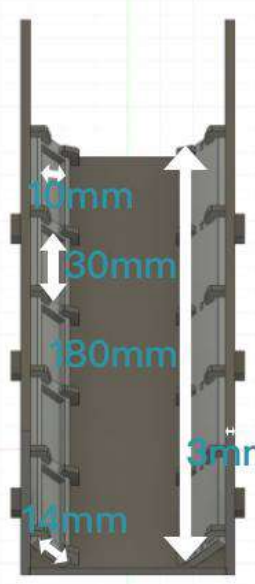
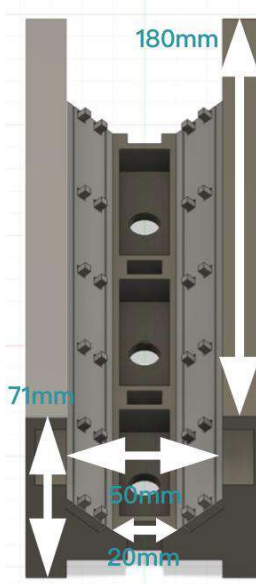
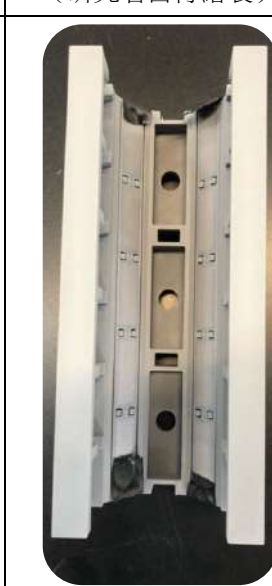
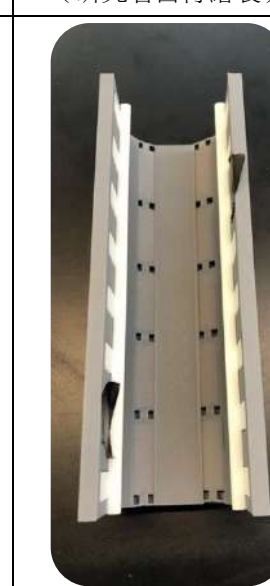


圖 3-32 磁鐵放入 3D 列印部件流程（1.暫停, 2.放入磁鐵, 3.繼續列印）
(研究者自行拍攝、繪製)

做出實體的軌道共有 4 個版本：其中第一版本全是利用雷射切割技術製造，第三、四版本純粹使用 FFF 3D 列印技術，第二版本是同時使用雷射切割與 FFF 3D 列印技術。

表 3-D：軌道版本更替
(研究者自行繪製)

版本	第一代	第二代	第三代	第四代
模型圖	 圖 3-33 第一代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-34 第二代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-35 第三代模型圖 (研究者自行繪製)	 圖 3-36 第四代模型圖 (研究者自行繪製)
實體圖	 圖 3-37 第一代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-38 第二代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-39 第三代實體圖 (研究者自行拍攝)	 圖 3-40 第四代實體圖 (研究者自行拍攝)
改進		將模型改成使用方形磁鐵	完全使用 FFF 3D 列印	加入兩邊 4.5 mm 的側柱
缺點	圓柱型的磁場上均勻度較方型磁鐵低，需要更換磁鐵	由於框架剩餘邊緣 2 mm，雷射切割後就相當易斷。	體積大，重量中，製造時間長，仍存在著列車平衡的問題。	側柱雖然解決了平衡問題，卻還是有摩擦力的影響。

三、軟體：

在軟體上，我們使用藍芽作為溝通的媒介，在程式編寫上分成兩個部分：列車端與手機端。列車端的使用的是 Arduino IDE 開發軟體，而手機端使用的是 Xcode 開發軟體。在寫程式的過程中，有部分是使用 AI 輔助撰寫而成，多數是使用人工編輯。

（一） 列車端

開啟藍牙連線的第一要點就是服務識別代碼、特性識別碼與裝置名稱。在 Arduino IDE 裡面，我們將列車的藍芽識別碼與名稱創造出來（圖 3-41），以便連接。再來我們需要在成功連接後開啟收發訊息功能（圖 3-43），與手機端進行溝通。在收取訊息後，我們要進行解碼（圖 3-45），我們所傳輸的訊息分為四個數值（圖 3-42），在程式分離出四個數值後，會將數值使用在四個腳位上（圖 3-44）。

```
#define SERVICE_UUID      "3939acbb-1139-abcd-3939-39390e012345"  
#define CHARACTERISTIC_UUID "0e0390e0-39ea-5678-1010-0e0390e03930"
```

```
BLEDevice::init("MagLev_004");
```

圖 3-41 服務、特性 UUID 與裝置名稱

（研究者自行截取）

VALUE1,VALUE2,VALUE3,VALUE4

圖 3-42 訊息示意圖

（研究者自行截取）

```
BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);  
pCharacteristic = pService->createCharacteristic(  
    CHARACTERISTIC_UUID,  
    BLECharacteristic::PROPERTY_READ |  
    BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE |  
    BLECharacteristic::PROPERTY_NOTIFY
```

圖 3-43 開啟讀寫功能

（研究者自行截取）

```
servoLB.write(LBValue);  
servoLT.write(LTValue);  
servoRB.write(RBValue);  
servoRT.write(RTValue);
```

圖 3-44 數值寫入

（研究者自行截取）

```
int LBValue = 0, LTValue = 0, RBValue = 0, RTValue = 0, callValue = 1;  
  
int firstComma = value.find(",");  
int secondComma = value.find(",", firstComma + 1);  
int thirdComma = value.find(",", secondComma + 1);  
  
if (firstComma != std::string::npos && secondComma != std::string::npos) {  
    LBValue = atoi(value.substr(0, firstComma).c_str());  
    LTValue = atoi(value.substr(firstComma + 1, secondComma - firstComma - 1).c_str());  
    RBValue = atoi(value.substr(secondComma + 1, thirdComma - secondComma - 1).c_str());  
    RTValue = atoi(value.substr(thirdComma + 1).c_str());
```

圖 3-45 訊息解碼

（研究者自行截取）

（二） 手機端

1. 開啟畫面

在打開軟體時，會看到一個滾動式選單（圖 3-46），這個選單會顯示所有有裝置名稱的可用藍牙裝置，在依據裝置名稱辨別後，我們選擇我們的磁浮列車。此時 App 會去查看裝置的服務與特性 UUID（圖 3-47），如果兩者皆符合，就能進入控制畫面（圖 3-48）。



圖 3-46 滾動式選單
（研究者自行截取）

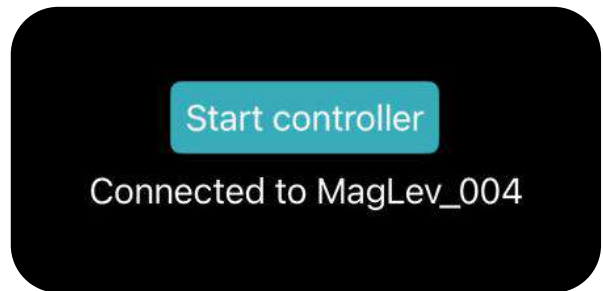


圖 3-47 「進入控制畫面」按鈕
（研究者自行截取）

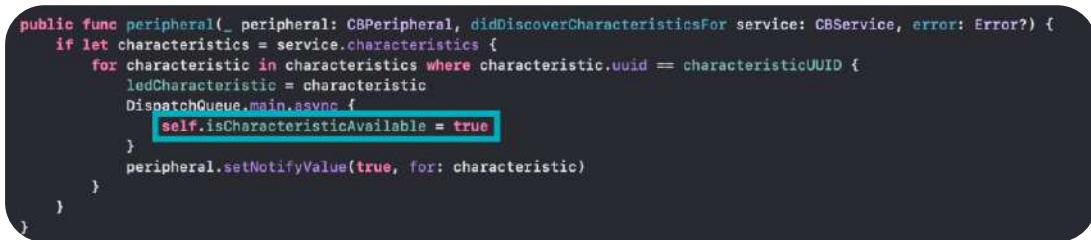


圖 3-48 UUID 辨識
（研究者自行截取）

2. 控制畫面

此畫面擁有四條拉桿（圖 3-49），分別對應磁浮列車的四個角，不論改變哪一個腳位的數值，App 皆會把所有四個數值全部傳一遍。藍牙的傳輸頻寬是相當有限的，如果一次發送太多組訊息，會導致頻道塞車與嚴重的延遲，因此我們限制藍芽信號發送頻率為 15 次/秒（圖 3-50），並在兩次相同訊息輸入後，停止訊息的發送，節省資源。

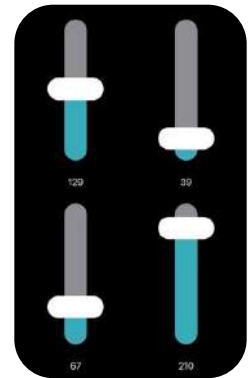


圖 3-49 控制 UI 介面
（研究者自行截取）

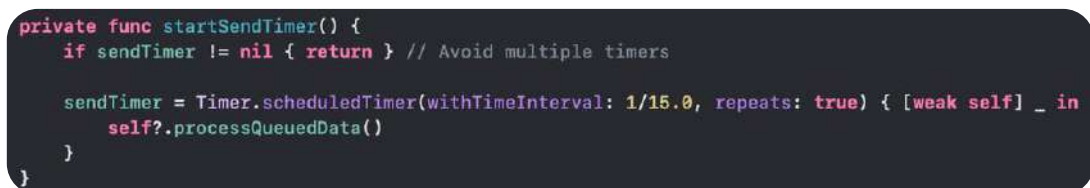


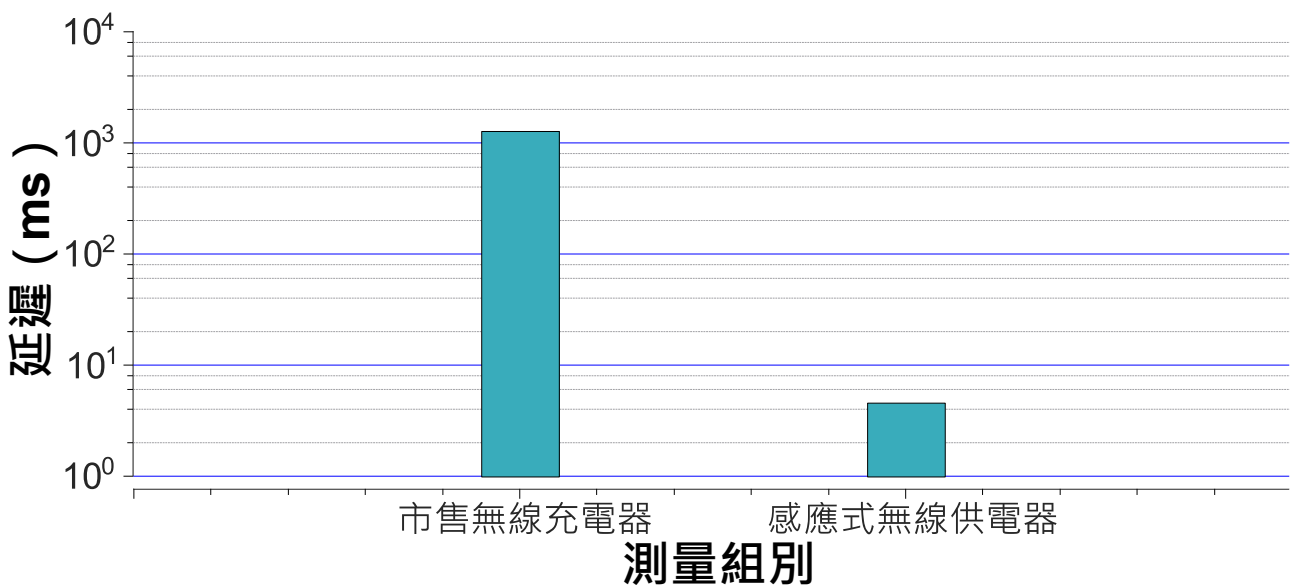
圖 3-50 限制傳輸頻率
（研究者自行截取）

肆、研究結果

一、供電反應測試

我們將供電線圈的繼電器接在 esp32 的輸出角位，並將集電電路的輸出接在 esp32 的輸入角位，使用 esp32 內的計時器計算輸出與輸入的延遲。作為對照組，我們將市售之無線充電器的輸入也接上一個繼電器，以同樣的方式測量供電延遲。表 4-A 為兩組測量的對照，縱軸為對數尺度。

表 4-A 市售無線充電器與感應式無線供電器供電延遲比較
(研究者自行測量與繪製)



從上表可知，透過距離感應式無線供電技術，我們將無線供電的延遲降低了 99.63%（市售： 1.2×10^3 ms，感應式：4.5 ms），並且成功地在挪動車輛時同時供電。這不僅解決列車移動時的供電問題，還免去了線圈閒置時浪費的能源。

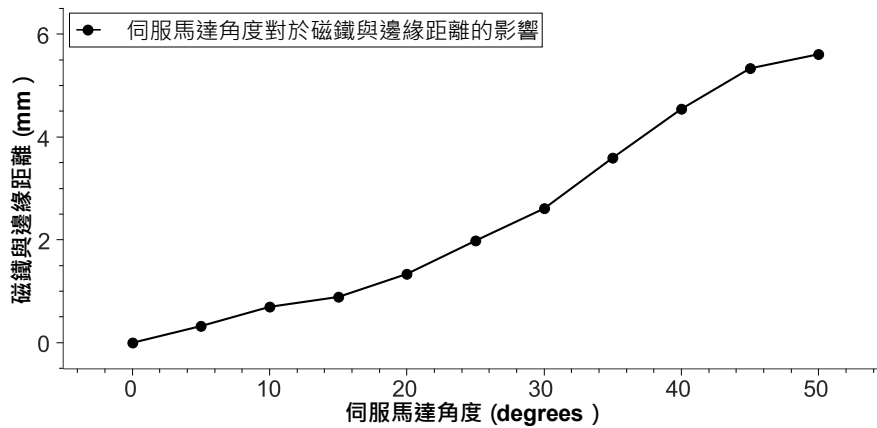
二、懸浮與傾斜

（一） 伺服馬達角度與磁鐵距離測試

透過 App 的使用，我們可以將伺服馬達的角度控制在 0~180 度之間，透過馬達上的連桿，我們可以對列車斜邊處的磁鐵進行調整。經過測試，當伺服馬達角度轉到 50 度時，磁鐵就會到達下緣的末端。因此，我們最後對伺服馬達與磁鐵距離的測量範圍在 0~50 度之間。表 4-B 為伺服馬達角度對於磁鐵與邊緣距離的影響。

表 4-B 伺服馬達角度對於磁鐵與邊緣距離的影響

(研究者自行測量與繪製)



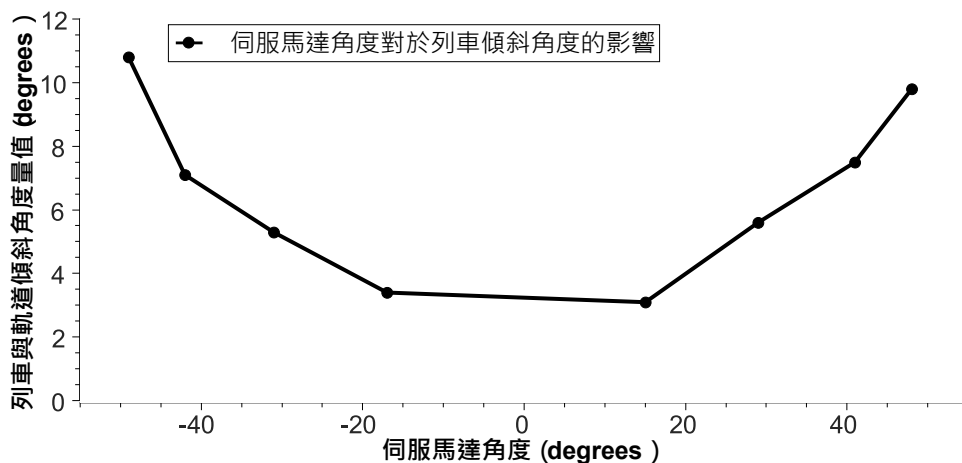
由表 4-B 可以看到，在伺服馬達的角度對於磁鐵與邊緣距離的影響有隨著角度增加的趨勢。我們推測是因為這個距離與馬達角度的 $\cos$ 量值有相關。這個現象造成的影響在下一個測量中可以明顯看到。

(二) 傾斜角度測試

由於列車獨立平衡仍是一個待解決的問題，我們先以增加兩邊側柱的方式穩定。這造成列車在傾斜時，會受到摩擦的影響，使得傾斜角度量值是一個非連續性的變化。表 4-C 為伺服馬達角度對於列車傾斜度的影響。本實驗是對於磁鐵距離與傾斜角度的簡略探討。因此我們只探討單邊角度的變化，而不討論同時變化雙邊角度。表中橫軸的表示方法如下：50 代表列車左邊馬達角度為 0，右邊為 50，-50 代表列車左邊馬達角度為 50，右邊為 0；傾斜角度的測量是使用手機拍照後，將照片丟入 Tracker 應用程式進行分析，

表 4-C 伺服馬達角度對於列車傾斜角度的影響

(研究者自行測量與繪製)



從表中可以看出，雖然列車進不了水平狀態，卻能再 ± 10 度之間做傾斜，這代表著如果解決了自主平衡的問題，列車就能在不同的過彎速度下及車重下，依據要求達成傾斜。



圖 4-1 左傾的列車
(研究者自行測量與繪製)

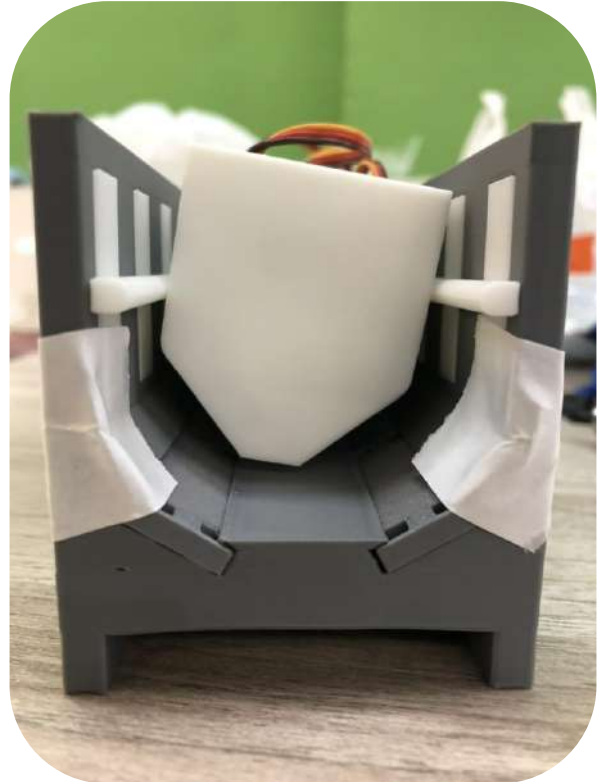


圖 4-2 右傾的列車
(研究者自行測量與繪製)

三、軟體

以上研究結果中所有對伺服馬達的控制，皆是由手機 APP 所控制，再使用過程中，連接及及傳輸的果城中，皆沒有訊號塞車的問題。

伍、討論

項目	問題	探討	解決方法
供電系統	單一 MOSFET 在無控制晶片的情況下供電電流不足。	開關頻率太高導致無 MOSFET 無法完全開啟或關閉。	1. 使用 IR2113 控制器。 2. 以四個 MOSFET 製作 H-Bridge
	集電電路的短路電流過低，無法驅動 Esp32。	使用 LM7805 將 24V 降壓為 5V 會損失近 80% 的能量。	1. 使用現成集電電路 2. 尋找合適的降壓器。
磁浮系統	電磁鐵即使通到 17.4W (5.8V, 3A) 都無法造成傾斜改變。	測量發現通 17.4W 後的電磁鐵只有 33mT 的磁場密度變化量，比 542mT 的永磁低許多。	將列車的傾斜系統改為使用伺服馬達控制的永磁。

陸、結論

一、磁浮列車系統研究結果

本次研究使用接近式紅外線感測器，構建相較市售的無線充電系統延遲更低的距離感應式無線供電系統，並使用 FFF 3D 列印技術製作列車及軌道模型，編寫控制程式來調整列車傾斜角度，最終獲得以下成果：

(一) 感應式無線供電

透過由接近式紅外線感測器、非穩態 555 計時器、集電電路以及 LC 電路等結合而來的感應式無線供電系統。我們將供電的延遲降低到 4.5 ms，比市售的延遲低 99.63%。

(二) 列車的傾斜系統

本次實驗嘗試以電磁鐵改變永磁磁力大小均無法造成磁力變化，最後使用伺服馬達控制永磁距離，達到了 ± 10 度的傾斜。平衡問題最後由側柱解決，雖然還是有摩擦力的存在，但已能懸空。

(三) 不會訊號塞車的藍牙控制 App

透果 Arduino IDE 與 Xcode 之間來回的不斷調整，我們透過專屬識別碼與名稱，在沒有訊號塞車的情況下達成藍芽溝通，成功對列車四角伺服馬達進行控制。

二、未來展望

（一） 軌道製作

目前軌道系統中，列車仍然無法自行平衡，目前強制扶正的解決方法還是會有摩擦力的影響，我們正透過調整軌道上懸浮磁鐵的位置與角度來做改善。

在傾斜磁力控制上，可動件的損壞率相當高，伺服馬達還會造成重心偏移。如果有辦法讓電磁鐵的耗能降低且磁力增加，那麼使用電磁鐵的維護成本會降低許多。

（二） 供電

雖然我們把延遲降低了 99.63%，我們的供電系統電路本生的耗電量仍然相當高，如果我們有辦法結合市售供電系統的電路以及感應式供電系統，能量損耗會再降低許多。

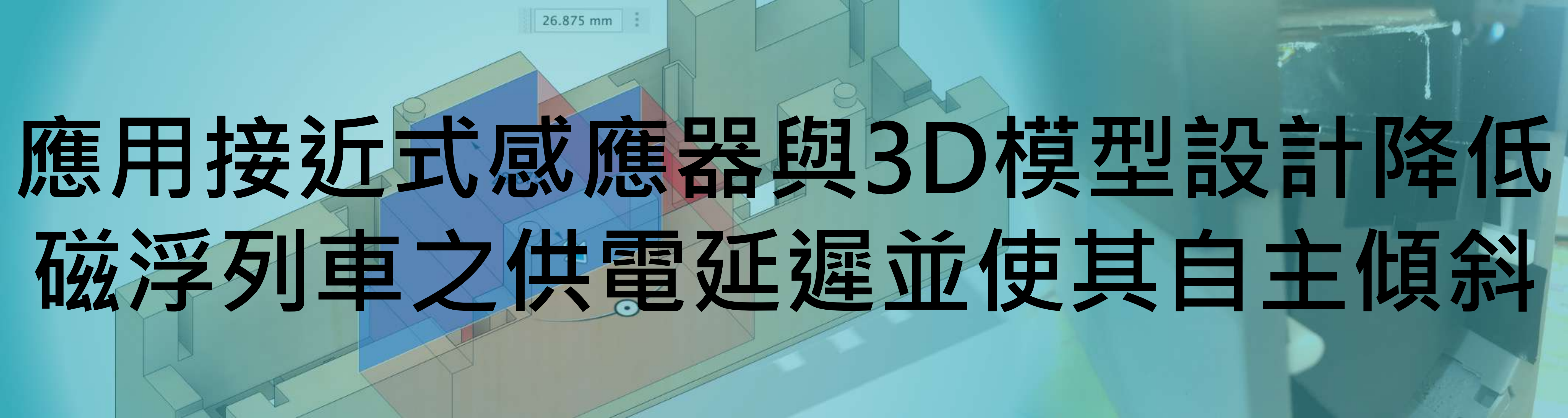
柒、參考文獻及其他

- 一、羅文典.(2017). 具強制空氣冷卻之無鐵心式線性馬達設計與製作.<https://hdl.handle.net/11296/57gd5e>
- 二、Chris Rose. (2014). Implementation of cargo Maglev in the United States. https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-EMS-and-EDS-magnetic-levitation-systems_fig1_228994479
- 三、Mohamed Aboualalaa, Hala Elsadek and Ramesh K. Pokharel. (2020). WPT, Recent Techniques for Improving System Efficiency. <https://www.intechopen.com/chapters/75096>
- 四、徐書逸. (2016). 磁共振耦合之無線電力傳輸研究. <https://hdl.handle.net/11296/zm5v4v>
- 五、Texas Instruments. (2018). Exploring the evolution and optimization of wireless power transfer. <https://www.ti.com/lit/wp/sway018/sway018.pdf>
- 六、Md Moyeed Abrar. (2017). Design and Implementation of Astable Multivibrator using 555 Timer, https://www.researchgate.net/publication/313317312_Design_and_Implementation_of_Astable_Multivibrator_using_555_Timer
- 七、Vishay Semiconductors. (2009). TCRT5000 Reflective Optical Sensor with Transistor Output. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1462843/VISHAY/TCRT5000.html>
- 八、Fairchild Semiconductors. (1999). LM78XX (KA78XX, MC78XX) FIXED VOLTAGE REGULATOR (POSITIVE). <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/105702/FAIRCHILD/LM7805.html>
- 九、Motorola Inc. (1996). Amplifier Transistors NPN Silicon BC546, B、BC547, A, B, C、BC548, A, B, C. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/11551/ONSEMI/BC547.html>
- 十、Philips Semiconductors. (1999). N-channel enhancement mode IRFZ44 TrenchMOS transistor. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17808/PHILIPS/IRFZ44.html>
- 十一、International Rectifier. (1997). IRL3303 HEXFET Power MOSFET. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/88240/IRF/IRL3303.html>
- 十二、Venus Kohli. (2024). Bridge Rectifier Circuit, Construction, Working, and Types.<https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/bridge-rectifier-circuit-construction-working-types>
- 十三、Great Scott. (2021). IR2113 H-Bridge. https://oshwlab.com/GreatScott/IR2113_H_Bridge-09ef385286f74867988316035c669a17

【評語】 052314

1. 作品透過距離感應式無線供電技術，將無線供電的延遲降低了 99.63%，具未來應用的潛力。
2. 磁浮列車過彎時需調整傾斜角度，以確保乘客受到最小的離心力影響，目前所設計系統仍然無法自行平衡，此部分仍須持續努力。
3. 作品可加強收集國外磁浮列車運行之供電技術及傾斜角度的規範，說明所開發技術未來如何應用實際問題。
4. 作品可加強長時間運作下的穩定性與能耗效率評估，例如使用不同功率進行測試或熱耗分析。

作品海報



應用接近式感應器與3D模型設計降低
磁浮列車之供電延遲並使其自主傾斜

摘要

本研究製作了一套能在5 ms內進行供電的距離感應式供電系統，和一套能自主傾斜的磁浮系統，並設計一個App，並透過Esp32調整列車四角的磁力來控制傾斜。

研究動機

我們對磁浮列車產生了興趣，在研究磁浮科技時，我們思考了磁浮列車無法主動傾斜的問題，同時嘗試將無線供電運用在磁浮列車上，並降低無線供電的延遲。

研究過程及方法

一、距離感應式無線供電系統：

（一）設計理念

希望以距離感測器降低延遲。供電系統分為三部分：

- 1.頻率產生器（使用 555 計時器與 IR2113 H-Bridge）
- 2.距離感測開關（使用TCRT5000 模組板與繼電器）
- 3.LC 電路（使用現成電容線圈）。

（二）實體設計

1.頻率產生器

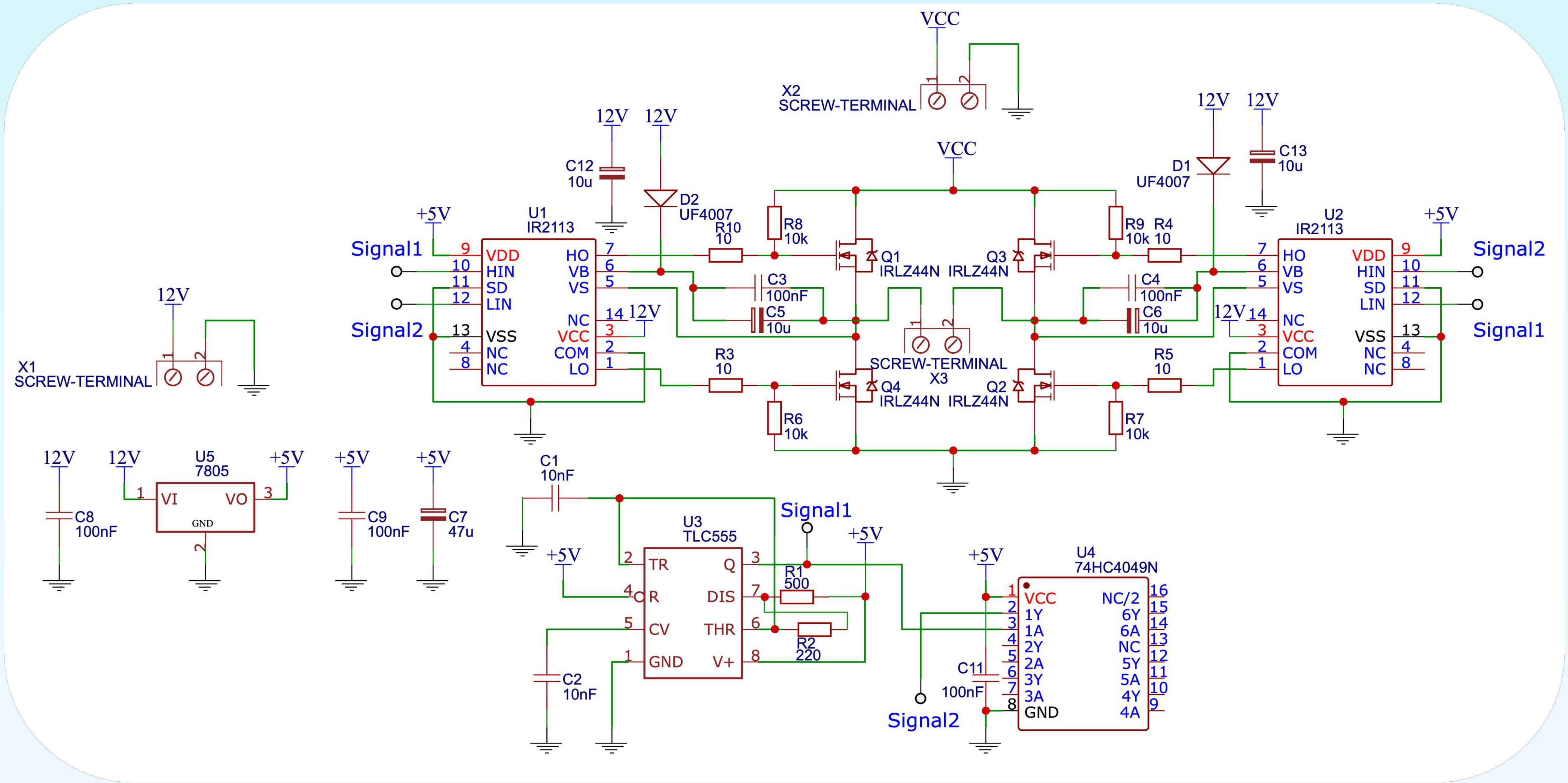
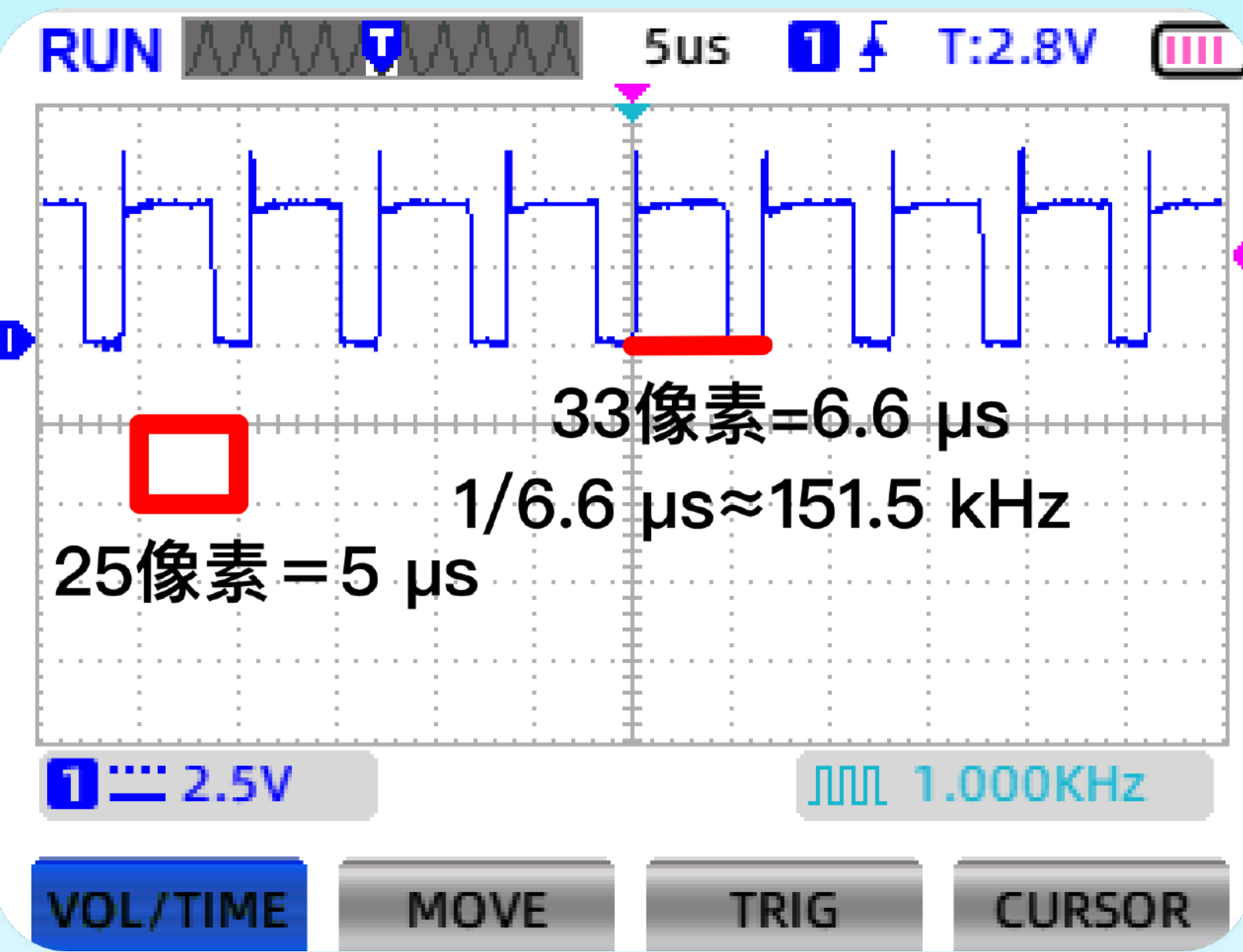
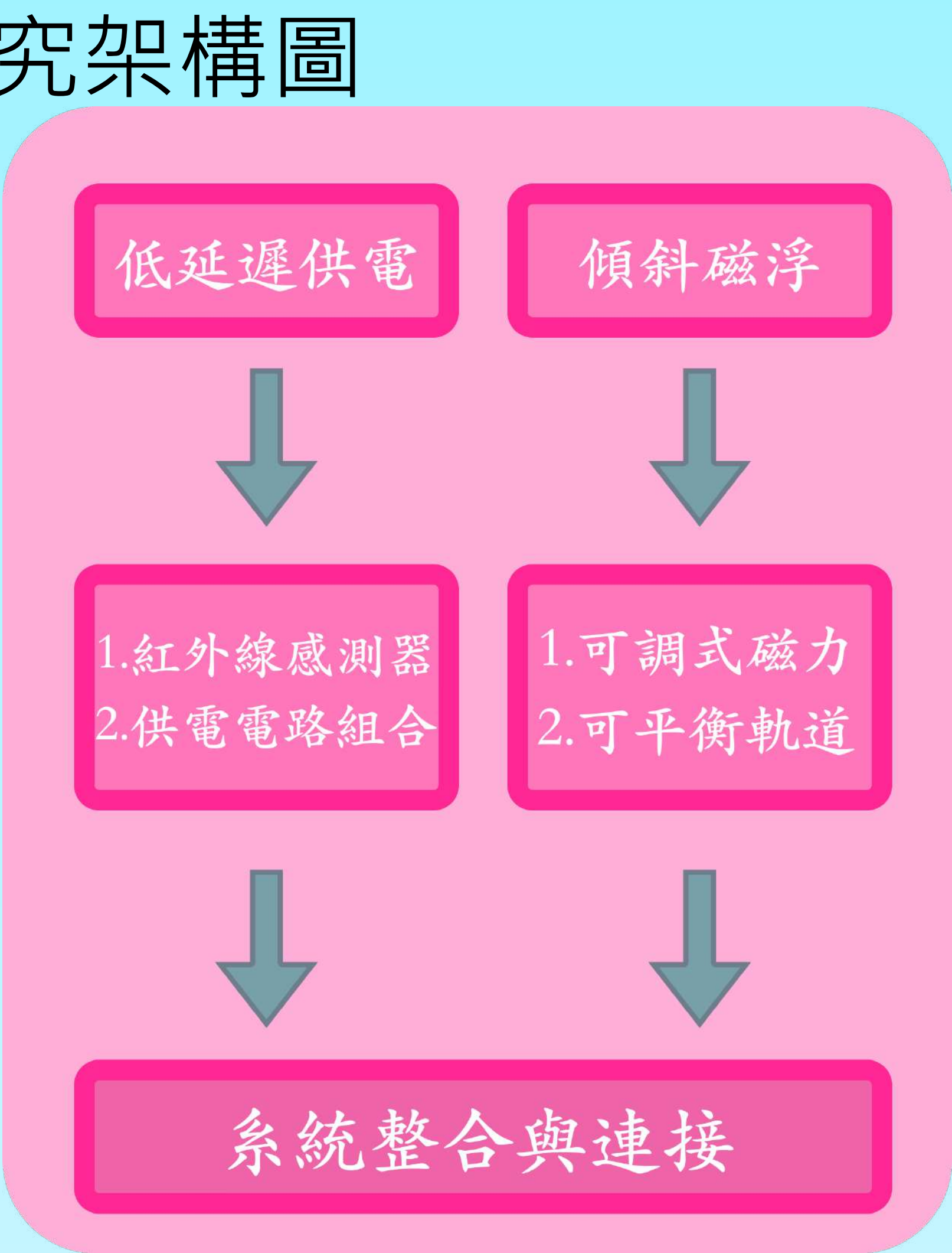
(1)非穩態555計時器。

(2)元件：R1=500 Ω，R2=220 Ω，C1=10 nF

由上方的公式計算實際測量值為151 kHz。

(3)IR2113 H-Bridge。下圖為電路，右圖為示波圖。

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2R2)C1}$$

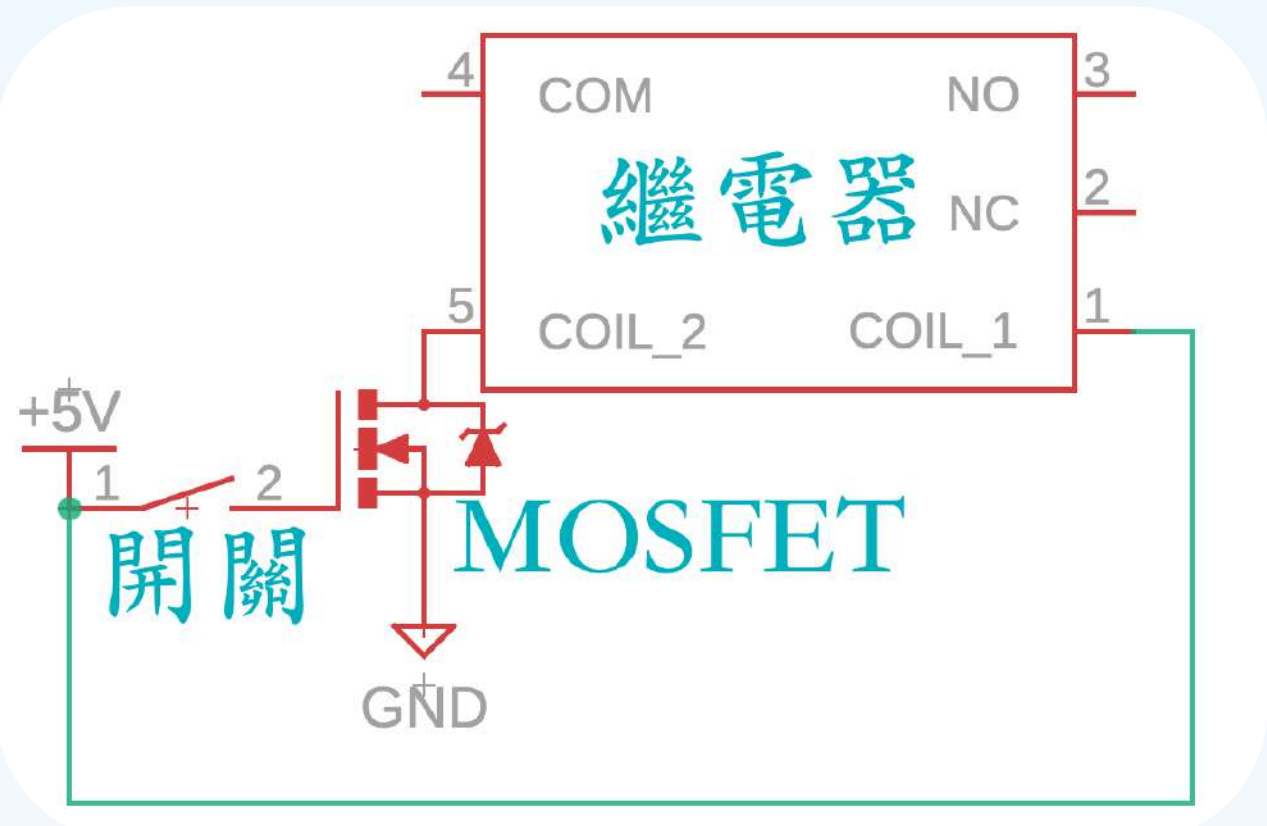


2.距離感測開關

(1)常開型TCRT5000模組板

(2) 將供電線圈接在繼電器NO

右圖為電路設計圖，下圖為焊接組合的電路。

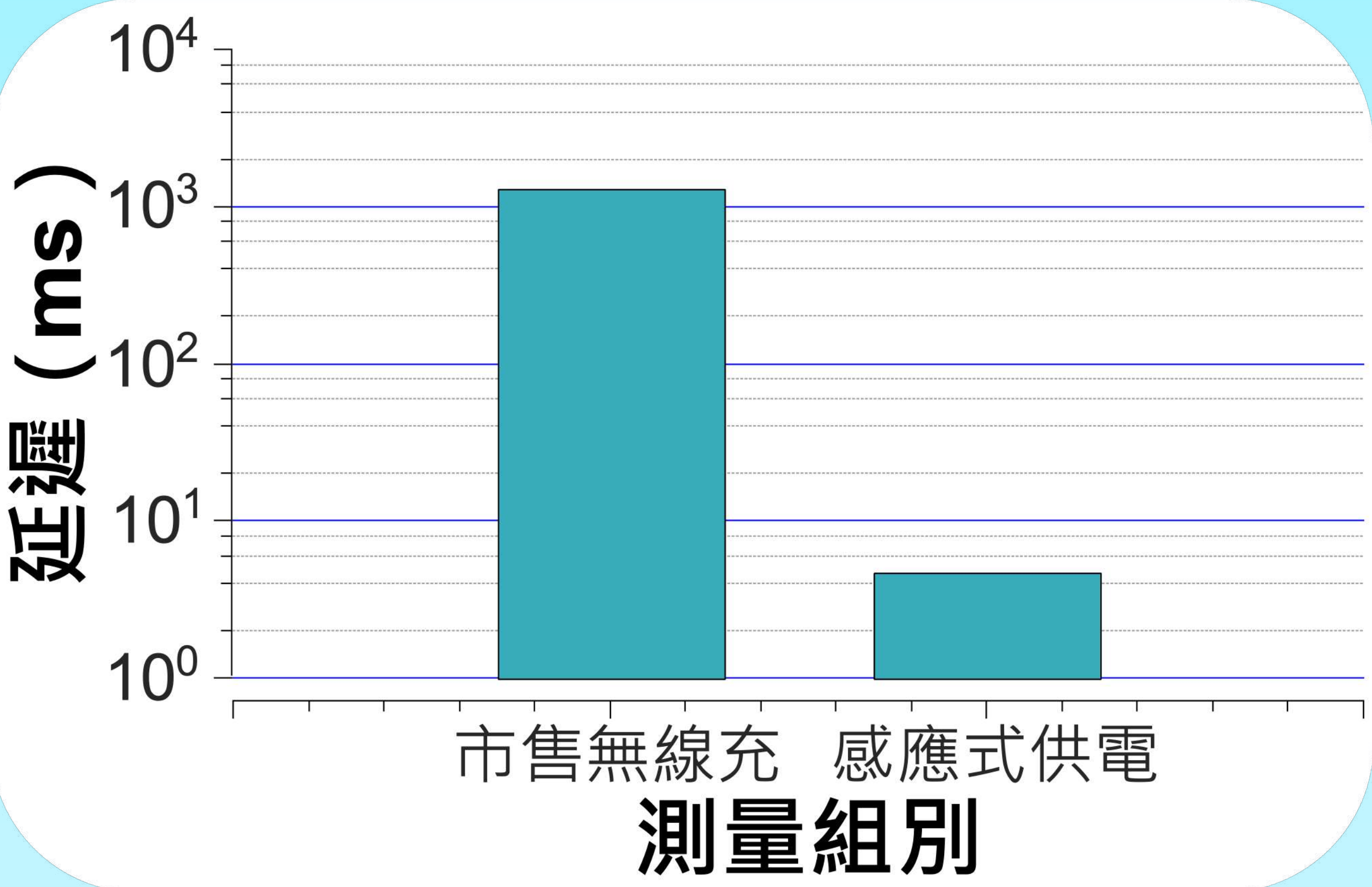


UI界面

研究結果

一、供電反應延遲測試

以Esp32內的毫秒計時器測量開啟電路到獲得電源之間的延遲。右圖為量測裝置，下圖為測量結果，縱軸為對數尺度。



二、懸浮與傾斜

透過對伺服馬達的控制，當伺服馬達轉至40度時，電磁鐵移至極限（8.4 mm）處（下兩圖）。我們在單邊伺服馬達40度的情況下，列車達到了10度的傾斜（右兩圖）。



討論

項目	問題	探討	解決方法
供電系統	供電電流不足。	無控制器使MOSFET無法完全開啟或關閉。	使用IR2113 H-Bridge，電流從5 mA到150 mA
	集電電路無法驅動Esp32。	使用LM7805將20 V降壓為5 V會損失75%的能量。	使用現成降壓器，5 V電流從150 mA到600 mA
磁浮系統	電磁鐵通到17.4W（5.8V, 3A）也無法造成傾斜改變。	通17.4W的電磁鐵只有33 μT的磁場，為永磁（1050 μT）的6%。	將列車的傾斜系統改為使用伺服馬達控制的永磁達成傾斜。

結論

一、磁浮列車系統研究結果

- 1.感應式無線供電系統將供電的延遲降低到4.5 ms，較市售低99.63%。
- 2.使用伺服馬達控制永磁，達到了±10度的傾斜。
- 3.透過不斷調整，在沒有訊號塞車的情況下達成藍牙溝通，成功對列車進行控制。

二、未來展望

- 1.軌道系統中，若能調整軌道上懸浮磁鐵的位置與角度，可使列車平衡更加穩定。
- 2.在傾斜磁力控制上若能讓電磁鐵的效率增加，那麼傾斜系統將耐用許多。
- 3.如果結合市售供電系統的電路以及感應式供電的4.5 ms延遲，能更降低能耗。

參考資料與其他

Chris Rose. (2014). Implementation of cargo Maglev in the United States.
reurl.cc/3Kxo2V

Mohamed Aboualalaa, Hala Elsadek and Ramesh K. Pokharel. (2020). WPT, Recent Techniques for Improving System Efficiency.
reurl.cc/LaAmEx

徐書逸. (2016). 磁共振耦合之無線電力傳輸研究.
hdl.handle.net/11296/zm5v4v

Texas Instruments. (2018). Exploring the evolution and optimization of wireless power transfer.
ti.com/lit/wp/sway018/sway018.pdf