

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(一)科

團隊合作獎

032814

向前衝~自動化磁浮運輸系統之研究

學校名稱：新北市立永和國民中學

作者： 國二 黃冠瑜 國二 林羿帆	指導老師： 高靖岳 陳敏華
-------------------------	---------------------

關鍵詞：電磁鐵、磁浮、磁力牽引

摘要

本實驗分成電磁鐵特性研究和自動化磁浮運輸工具的探討，在電磁鐵特性的實驗中研究影響電磁鐵磁力大小的因素。當電磁鐵的矽鋼片數、漆包線纏繞匝數和電磁鐵的通電電流愈大皆使電磁鐵的磁力愈強。磁浮運輸工具實驗中目的為發展能使車體平順運行的磁浮軌道，並探討負重對車體懸浮高度的影響，再利用做出的磁浮運輸工具探討列車移動時的順暢度、穩定度和振動情形。在製作磁浮運輸系統的實驗中發現：電磁鐵磁極轉換的頻率、電磁鐵的間隔、磁浮車體的初速度和車體寬度會影響磁浮車體運行順暢度，其中吸引時間介於 0.290 秒和 0.300 秒時，可以使列車移動最順暢；吸引 0.310 秒時為等速運行；振動幅度在 0.275 秒到 0.340 秒時較穩定。

壹、 研究動機

理化課程時，老師將鐵釘纏上漆包線並通電，桌上的矽鋼片立刻被電磁鐵吸引，我們拿起桌上的磁鐵測試，發現一般磁鐵的磁力並沒有這麼大，只有強力磁鐵能與之抗衡。我們詢問老師後，老師拿起抽屜中裡的電磁鐵要我們測試，我們通電後發現此電磁鐵的磁力比強力磁鐵還大，老師要我們把今天的實驗結果做紀錄，並表示交給我們探討影響電磁鐵磁力到小的因素。我們在下課後詢問生科老師是否有適合電磁鐵實驗的器材，老師說使用 3 D 列印會比較適合，並且要我們上網查詢更深入的資料。我們在網路上找到資料，電磁鐵能用於磁浮列車，但是網路上並沒有太多關於使用電磁鐵製做磁浮列車的實驗，因此我們便想要藉由這次機會，探討使用電磁鐵製做磁浮列車的可行性，並且試著改善其中潛在的問題。

貳、 研究目的

磁浮列車模型由常導性電磁鐵及永久性磁鐵組成，因此需先探討**影響電磁鐵磁力的因素**，接著研究如何實現**自動化磁浮運輸**，以下為本實驗的實驗目的。

一、電磁鐵磁力實驗

- 探討電磁鐵矽鋼片數對電磁鐵磁力強弱的影響。
- 探討漆包線纏繞於電磁鐵的匝數對電磁鐵磁力強弱的影響。
- 探討電磁鐵通電電流對電磁鐵磁力大小的影響。

二、磁浮運輸實驗

- 使用永久性磁鐵製做出磁浮裝置模型。
- 不同負重對車體懸浮高度的影響。
- 磁浮裝置搭配電磁鐵、電子電路元件及 Arduino 板製做出磁浮運輸工具模型。
- 改變電磁鐵的吸引時間觀察其對車體運行的順暢度之影響。
- 改變電磁鐵的吸引時間觀察其對車體運行的穩定度之影響。
- 改變電磁鐵的吸引時間觀察其對車體運行振動狀況的影響。

參、 研究設備與器材





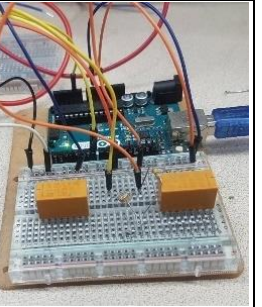

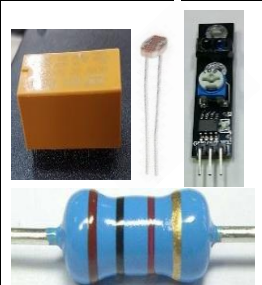



				
電源供應器	單芯線一捲	0.5mm 漆包線	自製磁浮裝置	Arduino 板
				
自製電磁鐵	各式電子零件	高斯計	矽鋼片	強力磁鐵

表 3-1 研究設備與器材

肆、 研究過程與方法

本實驗流程圖如下圖 4-1 所示，研究過程與方法分成四部分，分別為**實驗原理**、**發展實驗裝置**、**電磁鐵磁力實驗**及**磁浮運輸實驗**。

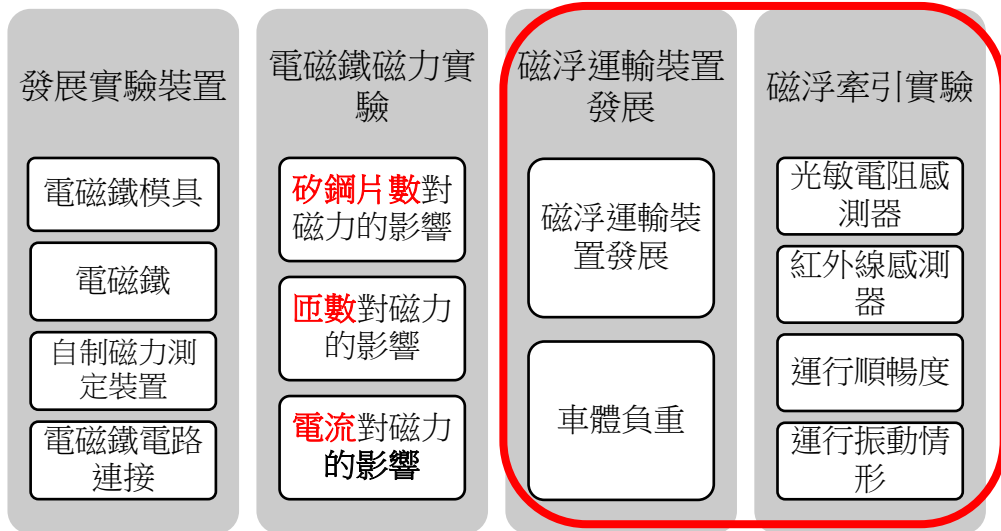


圖 4-1 實驗流程圖

一、 實驗原理

● 電流磁效應

一條直導線通電後會產生磁場，若將直導線纏繞於棒狀金屬物質製成電磁鐵，則此導線通電後會也產生磁場，並將金屬物質磁化，增加電磁鐵的磁力，且磁極依照安培右手定則而定。若存在一 P 點，以 a 為金屬棒上直導線圈的纏繞半徑、 L 為金屬棒上直導線圈的纏繞寬度、 N 為金屬棒上直導線圈的纏繞匝數、 I 為直導線圈的電流、 X 為金屬物質的磁導率、 D 為 P 點距電磁鐵端面的距離，則 P 點上電磁鐵的磁場強度為 B ，可列式 (4-1) 如下。

$$B = (1 + 4\pi X) \cdot \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{NI}{2L} \cdot \left[\frac{D}{\sqrt{D^2+a^2}} + \frac{L-D}{\sqrt{(L-D)^2+a^2}} \right] \quad (4-1)$$

由式 (4-1) 可得出:直導線圈的纏繞半徑愈小、纏繞寬度愈大、纏繞匝數愈多、通電電流愈大，以及金屬材質的磁導率愈好，電磁鐵的磁場強度愈大。

- 磁鐵的磁力強度與距離的關係

磁鐵所形成磁力的強度會依與磁鐵的距離磁場而變小。磁鐵的形狀會使其形成的磁場難以計算。若將永久性磁鐵的尺寸縮小至無限小，可以將磁鐵理想化是為一磁偶極子。若存在一 P 點， r 為 P 點與此粒子的距離， μ 為此粒子磁矩， μ_0 為磁常數， \hat{r} 為單位向量，則對在此粒子所形成的磁場範圍內所測得的磁場強度為 B ，可列式 (4-2) 如下。

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\mu\hat{r})\hat{r} - \mu] \quad (4-2)$$

因為磁偶極子地磁矩小至可忽略，若將式 (4-2) 中的磁矩 (μ) 視為零，則可得到式 (4-3) 如下。

$$B \propto \frac{1}{r^3} \hat{r}^2 \quad (4-3)$$

由式 (4-3) 可得出磁力的大小和與磁鐵距離的三次成反比，因此若一鐵磁性物質與磁鐵的距離超過一定值，磁鐵對該物質的磁場影響會大幅減小。因為電磁鐵在通電時的磁性狀態與磁鐵的磁性狀態相似，磁力線分布最密集處皆在兩端，所以若一鐵磁性物質與電磁鐵的距離超過一定值，電磁鐵對該物質的磁場影響也會大幅減小。

- 電磁鐵通電與磁極控制

我們使用光敏電阻以及 Arduino 控制電磁鐵的通電以及磁極，其電路圖如下圖 4-2 所示。

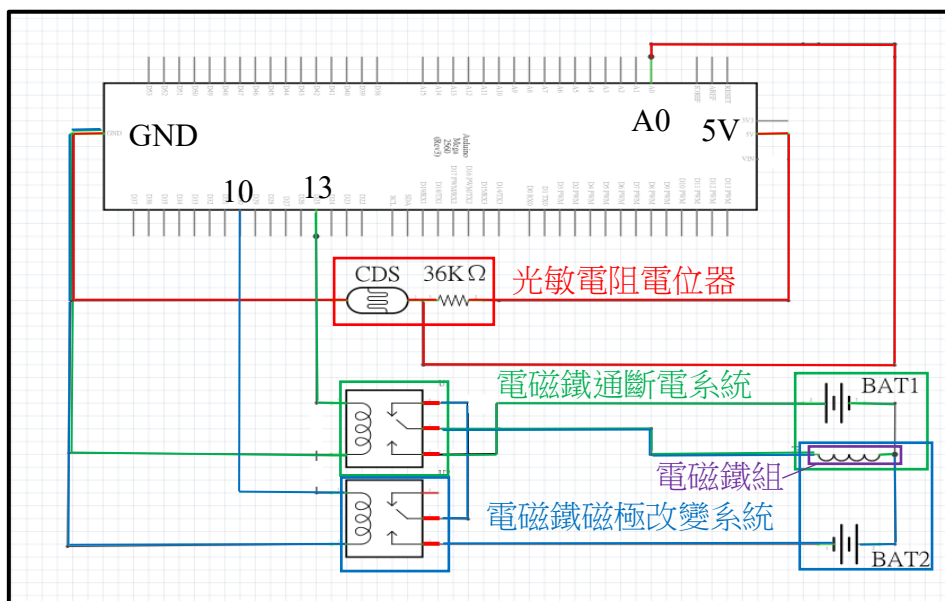


圖 4-2 電磁鐵控制系統電路圖

圖 4-2 分為四部分，第一部分為由一個光敏電阻及一個 $36K\Omega$ 的電阻組合成的光敏電阻電位器，第二部分為由兩個電磁鐵組成的電磁鐵組，第三部分為控制電磁鐵通電與斷電的系統，第四部分為控制電磁鐵改變磁極的系統。

- 光敏電阻電位器

亮度可改變光敏電阻電位器上下兩部分的電阻比值，從而改變輸入 Arduino 類比訊號的電壓。光敏電阻作為車體感測器使用。

- 紅外線偵測器

紅外發射二極體持續發射紅外線，當發射出的紅外線被反射且被接收時，輸出訊號控制電磁鐵啟動。因為紅外線偵測器與光敏電阻功能相同，所以紅外線偵測器亦可作為車體感測器使用。

- 電磁鐵組

Arduino 需要一次控制一組電磁鐵（軌道兩邊各一個），而電磁鐵的通電電流會影響電磁鐵的磁力，且將電磁鐵以並聯方式會使電磁鐵的通電電流減小，故將電磁鐵以串連方式連接以提高電磁鐵的通電電流。

- 電磁鐵通斷電系統

當光敏電阻電位器輸入的類比訊號電壓大於一定值時，Arduino 會開起第一個繼電器，使電磁鐵由斷電轉為通電產生磁力吸引車體，並持續一段時間。

- 電磁鐵磁極改變系統

當電磁鐵吸引車體制電磁鐵中心後，Arduino 會開啟第二個繼電器，使電磁鐵改變磁極排斥車體，並再持續一段時間。最後一起關掉兩個繼電器，使電磁鐵斷電消磁，完成一次電磁鐵運作。

- 小結論

當感測器感應到車體時會使電磁鐵吸引車體往前一段時間，當車體的中心經過電磁鐵時，電磁鐵會改變磁極一段時間排斥車體，車體會順著運動慣行及電磁鐵的推進力向前移動，待車體前進至電磁鐵的磁場範圍外時，此電磁鐵就會斷電，而車體會順著本身的運動慣性被下一組感測器感應並啟動下一組電磁鐵。

二、 發展實驗裝置

● 電磁鐵:

電磁鐵用於牽引磁浮運輸工具前進，由矽鋼片及漆包線組成，使用尺寸為 76mm×12.8mm×0.5mm 的矽鋼片共 20 片，將漆包線纏繞於外共 300 匝(如圖 4-4)，漆包線通電後電磁鐵即產生磁性。

使用漆包線纏繞電磁鐵後，我們發現漆包線和矽鋼片的固定都十分困難，因此我們決定製作電磁鐵模具改善此問題。

● 電磁鐵模具:

電磁鐵模具作為置放矽鋼片的容器，利用線上軟體 Onshape 繪製電磁鐵模具，並使用 3D 列印印出(如圖 4-3)，模具內部尺寸要符合 26 片矽鋼片的長、寬和高，尺寸為 14.5mm×16mm× 77mm。

電磁鐵製作方法如下:

將印製完成的電磁鐵模具固定於電鑽上，漆包線的一端用絕緣膠帶黏貼於模具的一邊，啟動電鑽，將漆包線順著轉動的模具繞上，當漆包線不重疊且無縫隙的沿著模具繞完一整層時，用絕緣膠帶無縫隙的將漆包線包住，接著再用漆包線繞在絕緣膠帶上完成第二層，再纏上絕緣膠帶。依此方法纏繞漆包線及紙膠帶直到指定的漆包線圈數為止(如圖 4-4、圖 4-5)，最後將纏繞完的模具放入 26 片矽鋼片即完成。

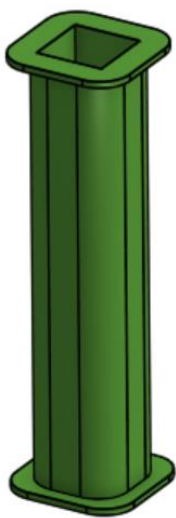


圖 4-3 電磁鐵模具



圖 4-4 電磁鐵



圖 4-5 電磁鐵製作

- 磁力測定裝置

磁力測定裝置用於實驗初期時測定電磁鐵的磁力大小及磁極，由粗吸管、細吸管及強力磁鐵所組成，在粗吸管一端塞入四根細吸管，接著利用紙膠帶將其封住，最後在粗吸管内放入兩顆強力磁鐵（如圖 4-6）。

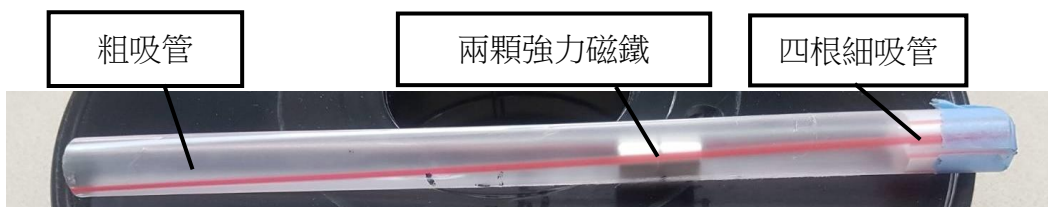


圖 4-6 磁力測定裝置

粗吸管前端的細吸管是為了將強力磁鐵置於可被電磁鐵吸引或排斥，但不會主動吸引電磁鐵中的矽鋼片的位置（如示意圖 4-7）。

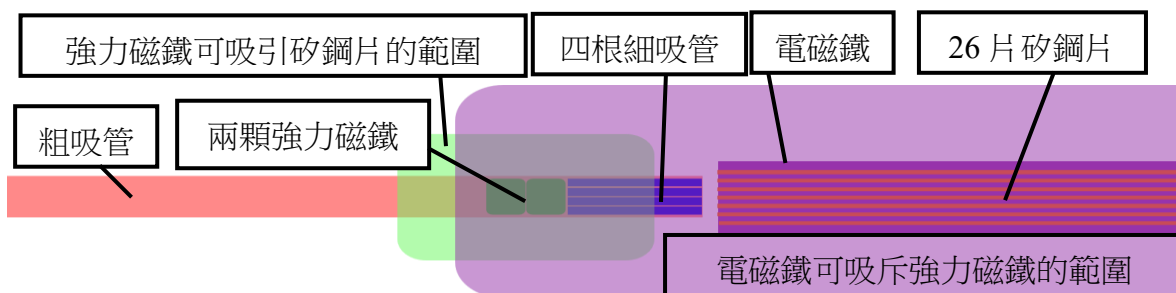


圖 4-7 矽鋼片置放位置示意圖

測定電磁鐵的磁性強弱時，將磁力測定裝置中的強力磁鐵的磁極調整至與待測電磁鐵其中一端的磁極相同，如此可使磁力測定裝置中的強力磁鐵被排斥，當電磁鐵的磁性愈強，磁力測定裝置中的強力磁鐵會被排斥得愈遠（如圖 4-8）。

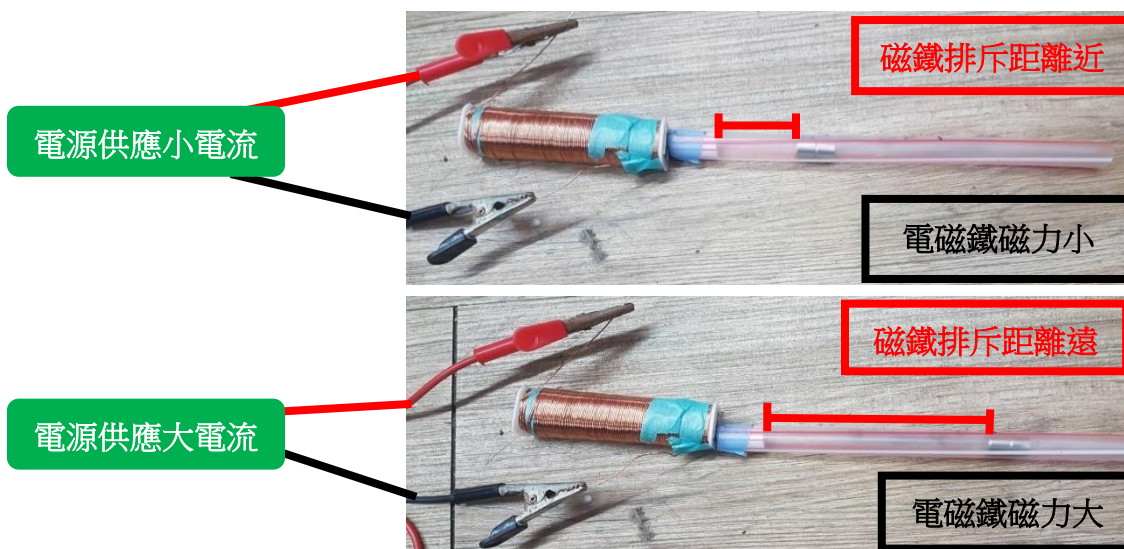


圖 4-8 電磁鐵磁力愈強，強力磁鐵被排斥距離愈遠

測定電磁鐵的磁極時，將磁力測定裝置靠近電磁鐵，磁力測定裝置中的強力磁鐵會被感應（被吸引或是排斥）。當兩個電磁鐵測試磁極時強力磁鐵被感應的狀態相同，則代表兩個電磁鐵的磁極方向相同（如圖 4-9）。



圖 4-9 當兩個電磁鐵測試磁極時強力磁鐵吸斥狀態相同，其磁極方向相同。

- **Arduino 控制板與程式碼:**

使用光敏電阻與電位器偵測車體的光線，藉由 Arduino 啟動繼電器吸磁，控制電磁鐵線圈的通電，與改變磁極方向，其程式碼按照圖 4-10 編寫。

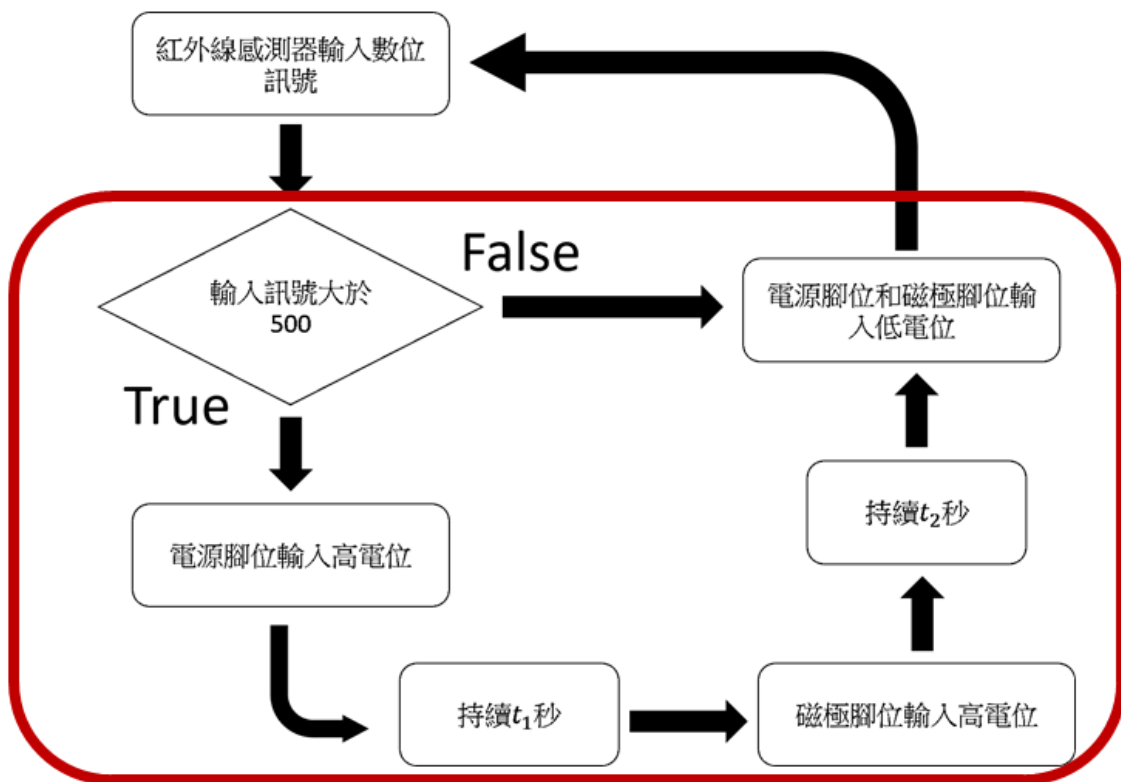


圖 4-10 Arduino 程式流程圖

以下就紅色框部分列出程式碼

```
if (sensorValue > 500){           //如果輸入訊號大於 500
digitalWrite(powerPin, HIGH);     //設定控制電磁鐵通電的腳位為高電位(電磁鐵通電)
delay(t1);                       //持續t1秒
digitalWrite(polePin, HIGH);      //設定改變電磁鐵磁極的腳位為高電位(電磁鐵改變磁極)
delay(t2);                       //持續t2秒
digitalWrite(powerPin, LOW);      //設定控制電磁鐵通電的腳位為低電位
digitalWrite(polePin, LOW);       //設定改變電磁鐵磁極的腳位為低電位 } (電磁鐵斷電)
} else {                          //否則
digitalWrite(powerPin, LOW);      //設定控制電磁鐵通電的腳位為低電位(電磁鐵斷電)
}
```

圖 4-11 Arduino 程式碼

三、 電磁鐵磁力實驗

本實驗分別探討矽鋼片數、漆包線匝數和通電電流對電磁鐵磁力的影響。

- 研究目的一：探討矽鋼片數對電磁鐵磁力強弱的影響。

實驗步驟如下：

1. 製作以 14 片矽鋼片作金屬物質，漆包線纏繞匝數為 300 匝的電磁鐵。
2. 將電磁鐵接上電源供應器，以 2.5A 電流的電源通電。
3. 使用高斯計測定電磁鐵的磁力大小 15 次，將測得數值取平均值。
4. 將步驟 1 的矽鋼片片數改成 17 片、20 片、23 片、26 片，並分別重複步驟 2~3。

- 研究目的二：探討漆包線纏繞於電磁鐵的匝數對電磁鐵磁力強弱的影響。

實驗步驟如下：

1. 製作以 26 片矽鋼片作為金屬物質，漆包線纏繞匝數為 100 匝的電磁鐵。
2. 將電磁鐵接上電源供應器，以 2.5A 電流的電源通電。
3. 使用高斯計測定電磁鐵的磁力大小 15 次，將測得數值取平均值。
4. 將步驟 1 的漆包線纏繞匝數改成 150 匝、200 匝、250 匝、300 匝，並分別重複步驟 2~3。

- 研究目的三：探討電磁鐵通電電流對電磁鐵磁力強弱的影響。

實驗步驟如下：

1. 製作以 26 片矽鋼片為金屬物質，漆包線纏繞匝數為 300 匝的電磁鐵。
2. 將電磁鐵接上電源供應器，以 0.5A 電流的電源通電。
3. 使用高斯計測定電磁鐵的磁力大小 15 次，將測得數值取平均值。
4. 將步驟 2 的電流改成 1A、1.5A、2A、2.5A，並分別重複步驟 3。

四、 磁浮運輸實驗

磁浮運輸實驗分成磁浮運輸裝置發展及磁浮牽引實驗兩部分。

(一)、 磁浮運輸裝置發展

此實驗分為使用永久性磁鐵製作出磁浮運輸裝置及車體負重實驗兩部分。

- 實驗一：使用永久性磁鐵製做出磁浮運輸裝置。

磁浮運輸裝置分為四代如下。

- 第一代磁浮軌道模型

由軌道及車體組成。軌道為兩條貼上 15 個圓形強力磁鐵的 30cm 木條（如下圖 4-12）。車體為兩側貼上 5 個圓形強力磁鐵的瓦楞板（如下圖 4-13）。最後使用木工夾固定軌道於桌上並放上車體（如下圖 4-14）。

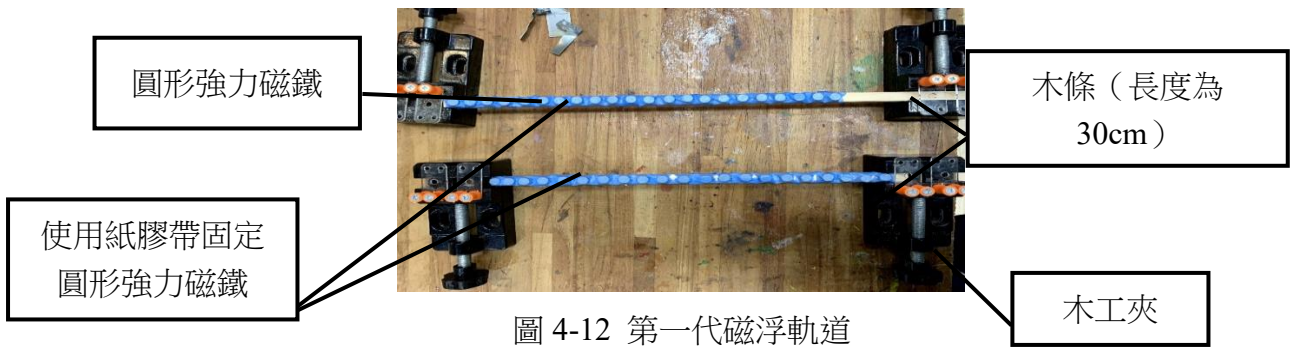
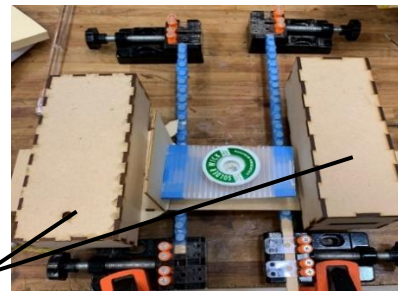


圖 4-12 第一代磁浮軌道



圖 4-13 第一代磁浮車體



4-14 第一代磁浮模型組合

- **第二代磁浮軌道模型**

由壓克力材質的底板、側板及車體組合而成（如下圖 4-15），底板兩側上方有間距 20mm 的強力磁鐵置放孔，側板可使車體不易偏移。車體由長方形的壓克力板加上兩側上方的強力磁鐵置放孔製成（如下圖 4-16）。

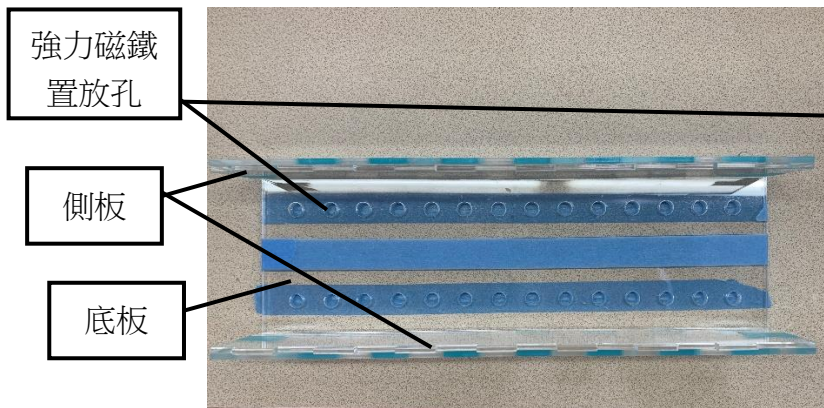


圖 4-15 第二代磁浮軌道

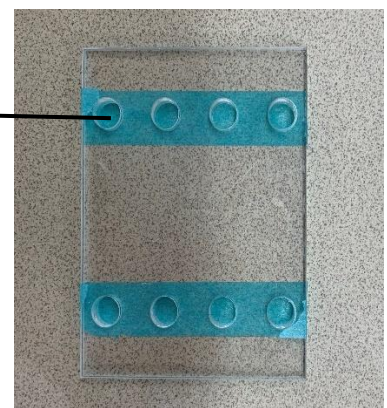


圖 4-16 第二代磁浮車體

- **第三代磁浮軌道模型**

由壓克力材質的雙層底板、側板及車體組合而成（如圖 4-17）。雙層底板可使側板不容易傾倒，更加穩固。底板及車體上的強力磁鐵置放孔間距調小可使車體前進得更加平順。

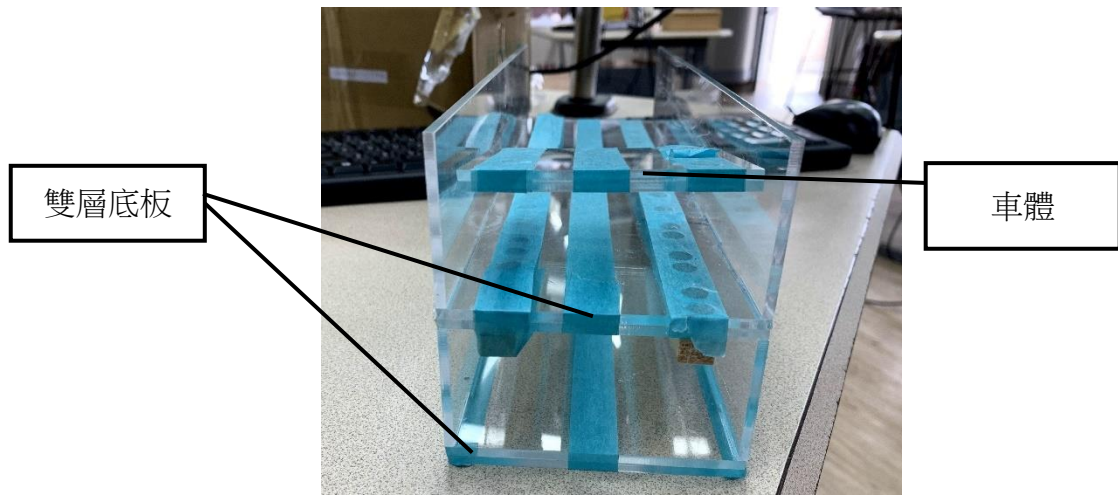


圖 4-17 第三代磁浮軌道模型

- 第四代磁浮軌道模型

由木質加上壓克力材質的雙層底板、側板、電磁鐵盒及車體組合而成（如圖 4-18）。雙層底板上層由三片木板及一片壓克力板組成。中間的兩片木板部分挖空形成可置放方形強力磁鐵的強力磁鐵槽（如示意圖 4-19）。車體改成箱型使車體不容易往前後傾倒，並分成三種，分別為圓形強力磁鐵型（如圖 4-20）、方形強力磁鐵型（如圖 4-21）及圓形一般磁鐵型（如圖 4-22），三種車體經過測試後發現圓形一般磁鐵型的車體運行得最順暢。因為此代磁浮軌道模型之車體運行順暢度已足夠使用電磁牽引引導前進，所以另外在磁浮軌道旁裝上電磁鐵。

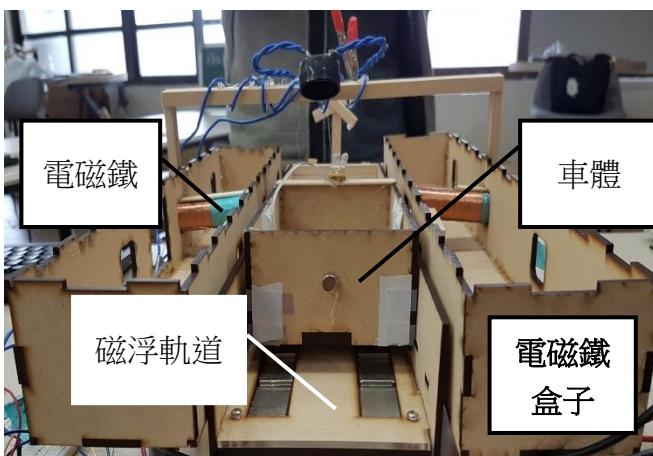


圖 4-18 第四代磁浮軌道模型

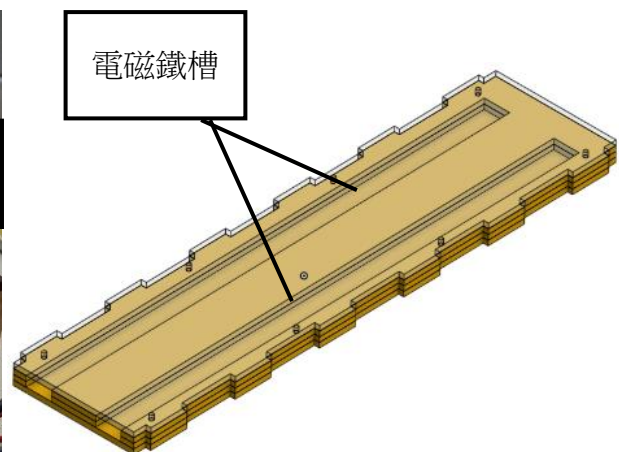


圖 4-19 磁浮軌道的電磁鐵槽

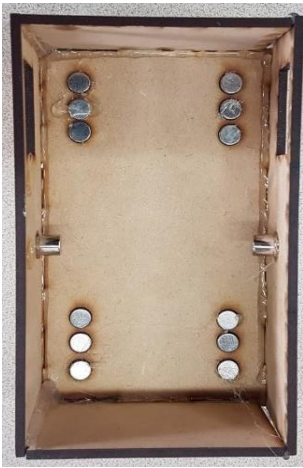


圖 4-20 圓形強力磁鐵型車體

圖 4-21 方形強力磁鐵型車體

圖 4-22 圓形一般磁鐵型車體

● 實驗二：車體負重實驗

由於運輸工具需考量載重問題，因此我們想要探討負重對車體懸浮高度的影響，實驗步驟如下。

1. 固定車體在軌道上懸浮位置。
2. 在軌道上加上 10 gw 負重（如圖 4-23）。
3. 記錄車體左右側懸浮高度並平均。
4. 將步驟 2 的負重 10 gw 逐次加上 10 gw 直到 160 gw 並重複步驟 3。

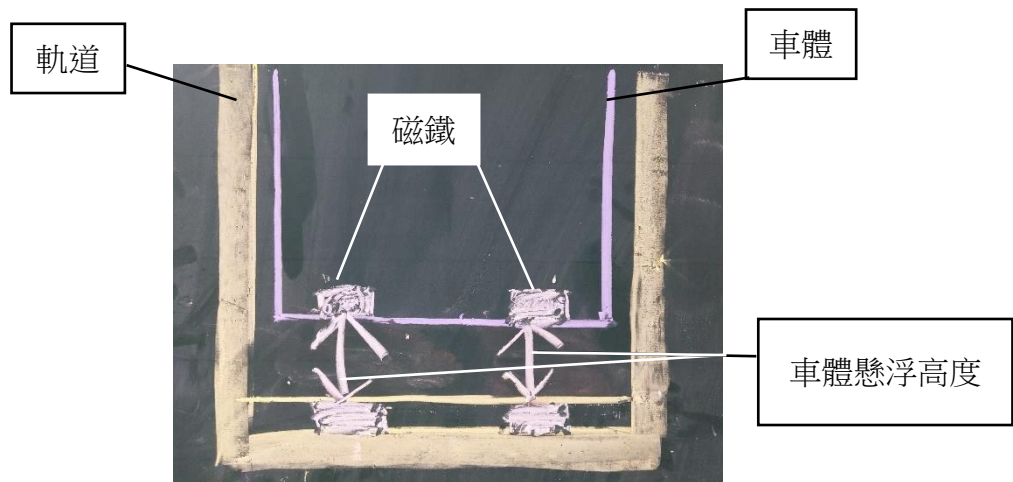


圖 4-23 車體負重實驗

(二)、磁浮牽引實驗

此實驗分成使用光敏電阻作為感測器、使用紅外線偵測器作為感測器、車體運行順暢度、穩定度研究及車體運行振動研究四部分。

- 使用光敏電阻作為感測器

為了使磁浮列車自動前進，我們使用電磁鐵牽引車體。我們先運用繼電器和光敏電阻製作電磁鐵控制系統的簡易模型：當光敏電阻照到光時，電磁鐵會產生一段時間的吸引力，再產生一段時間秒的排斥力，最後將電磁鐵斷電使其沒有磁力。這樣的效果可使列車前進。我們最後在車體上加裝 4 顆 LED 燈，因此當光敏電阻偵測到光線時，就會產生吸斥效果以牽引列車（如下圖 4-24）。

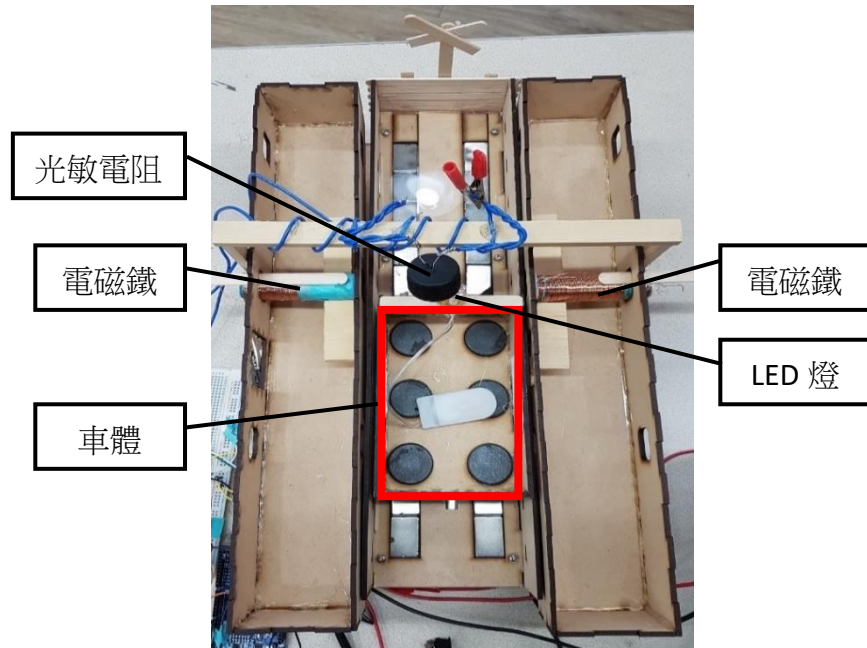


圖 4-24 軌道示意圖

- 使用紅外線作為感測器

由於光敏電阻容易受環境亮度影響，因此常常需要調整光敏電阻啟動電磁鐵的判斷數值。為解決此問題，我們嘗試使用紅外線偵測器作為感應裝置（如圖 4-25）。

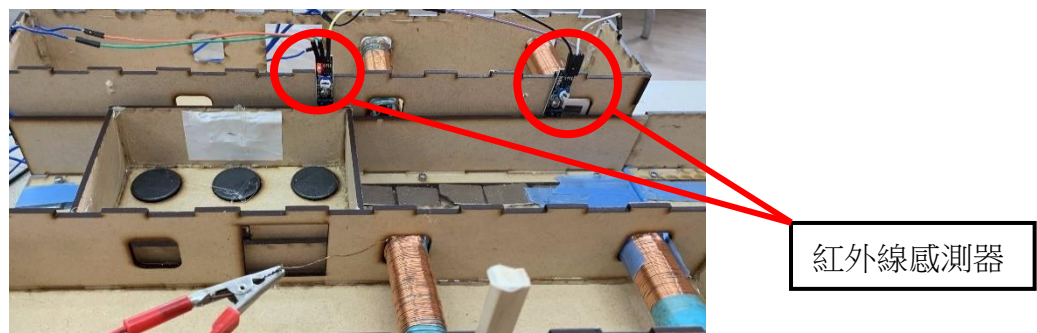


圖 4-25 以紅外線偵測器感應車體

● 車體運行順暢度、穩定度研究

嘗試在固定初速度、電磁鐵吸斥磁力大小的條件下，改變吸引時間對車體移動順暢度的影響。

1. 設定吸引時間為由 0.280 秒逐次加 0.010 秒直到 0.390 秒；排斥時間 = 0.400 秒。
2. 分別錄下車體在移動時的狀況，並使用 tracker 分析其水平（x 座標）運動軌跡（如圖 4-26）。

● 車體運行振動研究

嘗試在固定初速度、電磁鐵吸斥磁力大小的條件下，改變吸引時間對車體上下振動的影響。

1. 設定吸引時間為由 0.280 秒逐次加 0.010 秒直到 0.390 秒；排斥時間 = 0.400 秒。
2. 分別錄下車體在移動時的狀況，並使用 tracker 分析車體上標示的質點 A 和質點 B，紀錄 A、B 兩點垂直（y 座標）運動軌跡（如圖 4-26）。

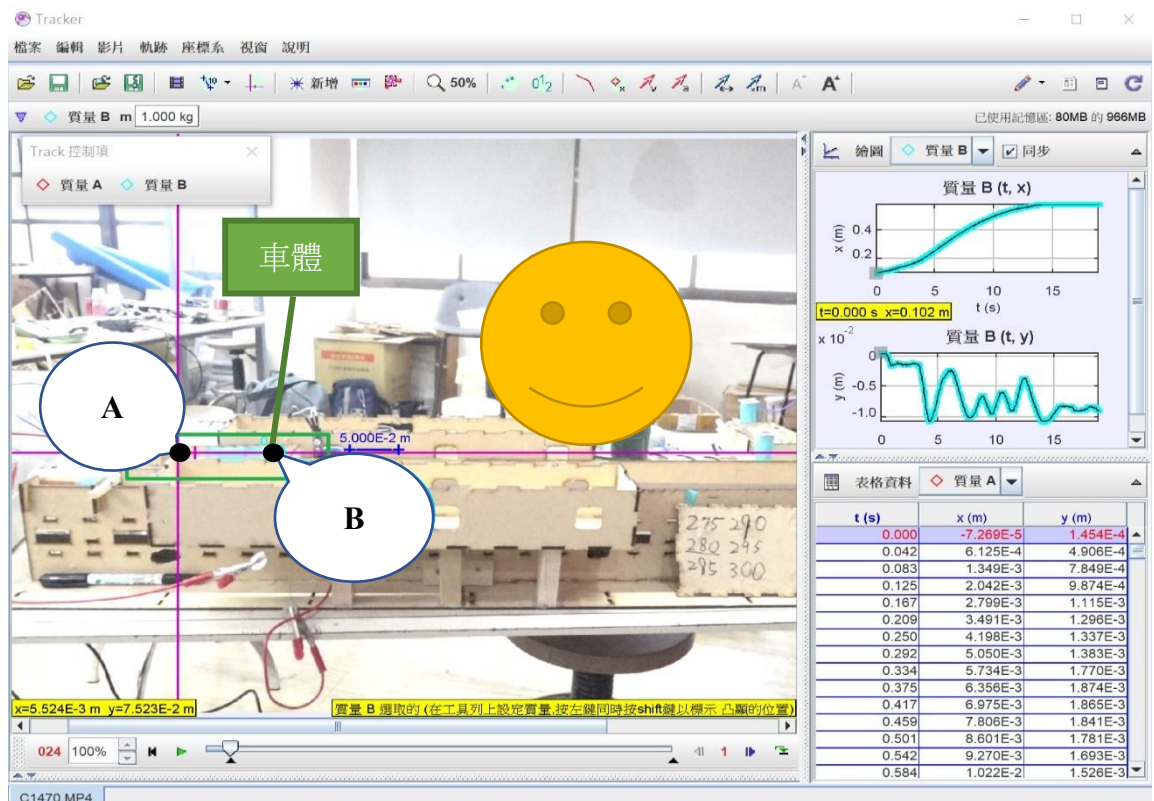


圖 4-26 振動幅度實驗示意圖

伍、 研究結果

本實驗之結果分成兩部分，分別為**電磁鐵磁力實驗**和**磁浮運輸實驗**兩部分。

一、 電磁鐵磁力實驗結果

電磁鐵磁力實驗結果分為**改變矽鋼片數**、**漆包線匝數**和**通電電流**三部分。

● 電磁鐵矽鋼片數對電磁鐵磁力強弱的影響實驗結果

改變矽鋼片數，固定漆包線匝數 300 匝，通電電流 2.5A，使用高斯計測量磁力強弱，分別重複 15 次實驗後將實驗結果取平均值，實驗數據如表 5-1 所示。

表 5-1 電磁鐵矽鋼片數對電磁鐵磁力強弱的影響

矽鋼片數 (片)	14	17	20	23	26
平均磁場強度 (mT)	10.48	10.55	11.08	11.26	11.86

● 漆包線纏繞於電磁鐵的匝數對電磁鐵磁力強弱的影響實驗結果

改變纏繞於電磁鐵漆包線匝數，固定電磁鐵金屬物質為矽鋼片 26 片，通電電流為 2.5A，使用高斯計測定磁力強弱，分別重複 15 次實驗，並將實驗結果取平均值，實驗數據如表 5-2 所示。

表 5-2 漆包線纏繞於電磁鐵的匝數對電磁鐵磁力強弱的影響

線圈匝數 (匝)	100	150	200	250	300
平均磁場強度 (mT)	2.98	4.97	7.68	9.33	9.82

● 電磁鐵通電電流對電磁鐵磁力大小的影響實驗結果

改變電磁鐵的通電電流，固定電磁鐵截面積為矽鋼片 26 片，漆包線纏繞匝數 300 匝，使用高斯計測量磁力強弱，分別重複 15 次實驗，並將實驗結果取平均值，實驗數據如表 5-3 所示。

表 5-3 電磁鐵通電電流對電磁鐵磁力強弱的影響

電流 (A)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
平均磁場強度 (mT)	2.15	4.38	6.57	8.78	10.94

二、 磁浮運輸實驗結果

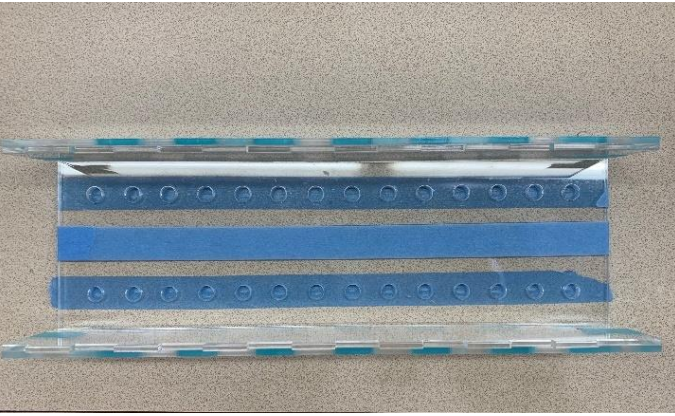
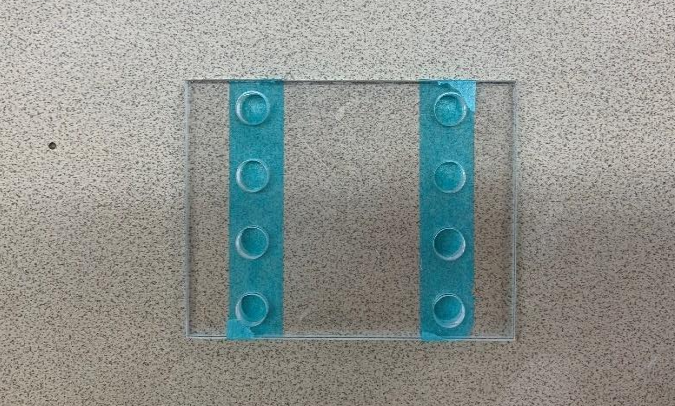

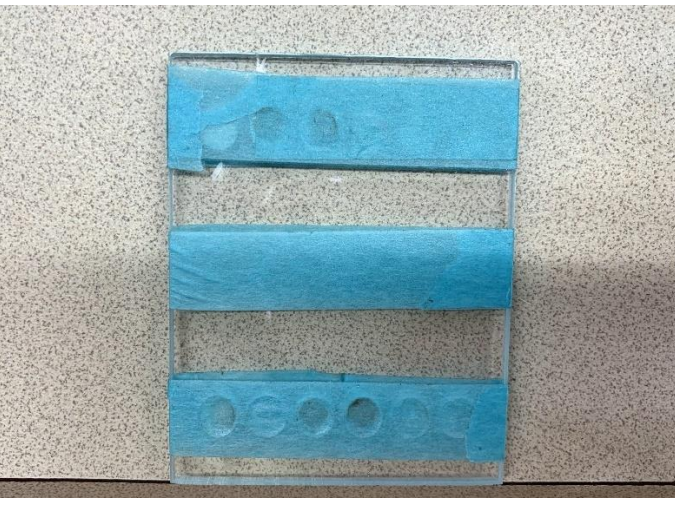
磁浮運輸實驗分成磁浮裝置製作結果、車體負重實驗結果、車體運行順暢度、穩定度、實驗結果和車體運行振動幅度實驗結果四部分。

● 磁浮裝置製作結果

我們將歷代的磁浮裝置的優缺點統整成下表 5-4。

表 5-4 歷代磁浮列車軌道模型及優缺點比較

<p>第一代實驗裝置</p>	<p>軌道模型</p> 	<p>優點:軌道寬度可自行控制。 缺點:製作、固定困難，較耗費時間。</p>
<p>車體</p>		<p>優點: 1. 磁鐵數量可自行調整。 缺點: 1. 製作困難。 2. 列車兩側配重不平均。</p>

<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">第二代實驗裝置</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">軌道模型</p>		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 強力磁鐵固定容易 2. 有圍牆輔助，使列車更穩定。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 圍牆易傾倒。
	<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">車體</p>		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 重量較輕，移動時速度快。 2. 強力磁鐵固定容易。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 移動時易翻倒。
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">第三代實驗裝置</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">軌道模型</p>		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 軌道為雙層，使整體結構穩定。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 磁鐵易從軌道中脫落。
	<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">車體</p>		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 強力磁鐵排列較密集，可產生更大的斥力。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 移動時易顛頗。

<p>軌道模型</p>		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 軌道整體結構穩固。 2. 強力磁鐵為矩形，斥力較大。 3. 磁鐵不易脫落。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 組裝不易且耗費時間。
	<p>第四代實驗裝置</p> <p>車體</p>	
		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 列車重量大，移動穩定。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 磁力過強。 2. 兩側摩擦力大。
		<p>優點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 磁鐵磁力弱，可使列車移動時更穩定。 2. 列車兩側貼上鐵氟龍膠帶可減少摩擦力。 <p>缺點:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 無法載運過重的物體。

- **車體負重實驗結果**

我們將車體懸浮高度用 Tracker 分析，其數據如下表 6-5 所示：

表 5-5 不同負重對車體懸浮高度的影響

重量 (gw)	0	10	20	30	40	50	60	70
懸浮高度 (cm)	0.94	0.89	0.83	0.76	0.71	0.65	0.61	0.60
重量 (gw)	80	90	100	110	120	130	140	150
懸浮高度 (cm)	0.54	0.51	0.46	0.50	0.49	0.48	0.44	0.38

- **車體運行順暢度實驗結果**

我們分別測試十二種不同的電磁鐵吸引時間，並將排斥時間固定為 0.4 秒。使用 Tracker 分析車體在不同吸引時間下移動的情形，其移動情形如下圖 5-1 所示。

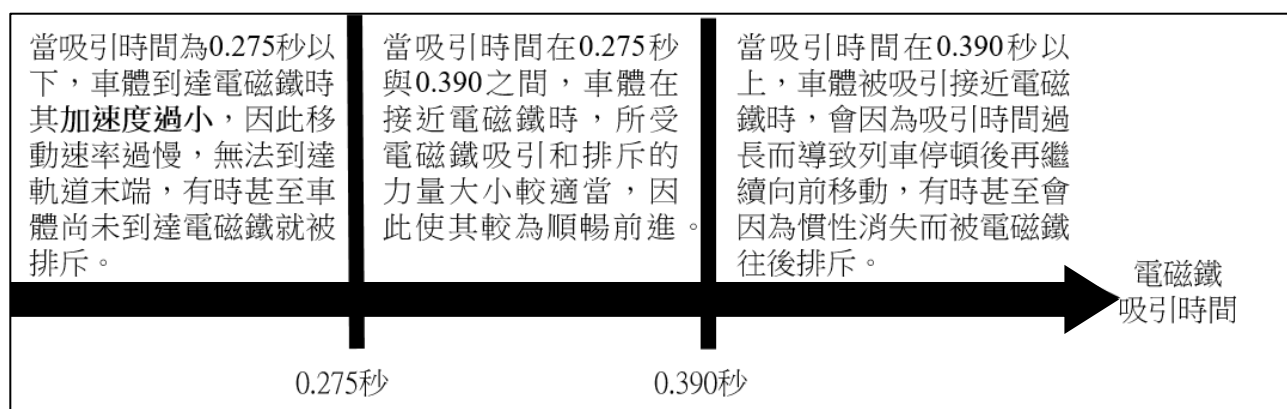


圖 5-1 電磁鐵吸引時間對車體運行順暢度的影響

我們在實驗中發現列車的初速度和電磁鐵排斥時間也會影響列車移動狀況。

- **初速度的影響**

相同排斥時間下，若初速度較慢，則吸引時間應較大，才可使車體移動較順暢。

- **排斥時間的影響**

相同初速度及吸引時間下，且若車體運行平順時，若排斥時間越大，則列車可被排斥較遠。但當排斥時間增加到一定值以上，再增加排斥時間也無法增加車體被排斥距離。

- **車體運行穩定度實驗結果**

使用軟體分析十二種不同的吸引時間，並將車體移動軌跡繪製成圖表，觀察哪一組數據中，圖表的 R^2 能最接近 1，若越接近 1 就代表能使列車在移動時最等速，其實驗結果紀錄於下表 5-6

表 5-6 電磁鐵吸引時間對車體運行穩定度的影響

吸引時間 (s)	0.275	0.280	0.290	0.300	0.310	0.320	0.330
R^2	0.9832	0.9832	0.9843	0.9839	0.9857	0.9834	0.9812
吸引時間 (s)	0.340	0.350	0.360	0.370	0.380	0.390	
R^2	0.9586	0.9753	0.9741	0.932	0.9649	0.9626	

● 車體運行振動實驗結果

下表為質點 A 和質點 B 之 y_{max} 數據，如下表 5-7

表 5-7 質點 A、B 之 y_{max} 數據

吸引時間 (s)	0.275	0.280	0.290	0.300	0.310	0.320	0.330
質點 A 之 y_{max} (m)	0.0046	0.0029	0.0027	0.0018	0.0027	0.0029	0.0021
質點 B 之 y_{max} (m)	0.0004	0.0029	0.0036	0.0004	0.0019	0.0009	0.0036
吸引時間 (s)	0.340	0.350	0.360	0.370	0.380	0.390	
質點 A 之 y_{max} (m)	0.0017	0.0101	0.0098	0.0144	0.0133	0.0104	
質點 B 之 y_{max} (m)	-0.0001	0.0068	0.0080	0.0106	0.0110	0.0096	

陸、 討論

本實驗的討論分為電磁鐵磁力實驗和磁浮運輸實驗兩部分。

一、 電磁鐵磁力實驗

電磁鐵磁力實驗討論分為改變矽鋼片數、漆包線匝數、通電電流三部分。

● 電磁鐵矽鋼片數對電磁鐵磁力強弱的影響討論

將電磁鐵磁力實驗研究目的的一的實驗數據（表 5-1 電磁鐵矽鋼片數對電磁鐵磁力強弱的影響），作下圖 6-1。

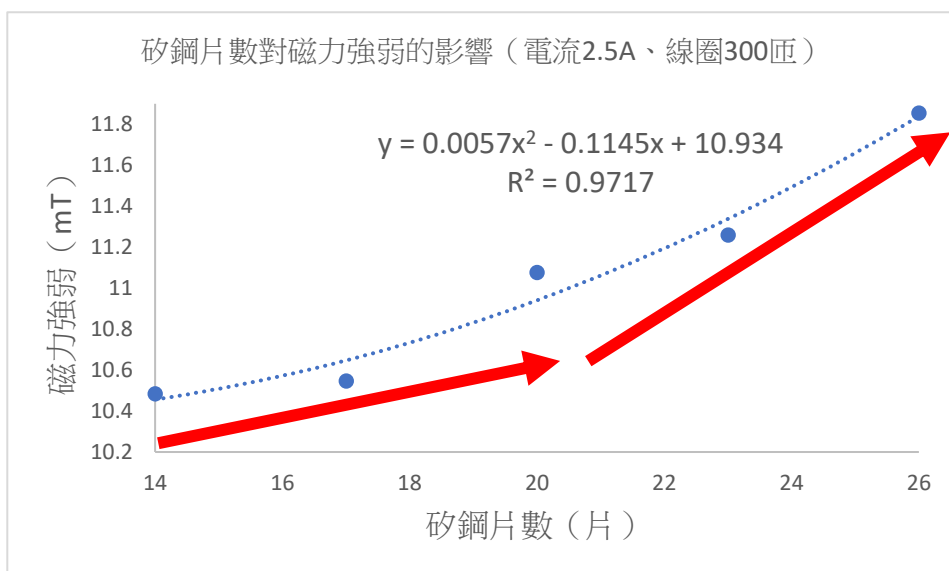


圖 6-1 不同矽鋼片數對磁力強弱的影響

從圖 6-1 可得出，電磁鐵矽鋼片數愈大，電磁鐵的磁力愈強。

由上圖中的數據我們比較了使用線性擬合和二次擬合兩種方式，發現電磁鐵的矽鋼片數和磁力強度呈二次函數關係 ($R^2 = 0.9717$)，且矽鋼片數量增加會使磁力增加量逐次增加（矽鋼片數由 14 片增加至 17 片使得電磁鐵僅增加約 0.06mT 磁力，由 23 片增加至 26 片卻使得電磁鐵增加約 0.6mT 磁力）。由於矽鋼片增加相當於金屬物質磁導率增加，此與式 (4-1) 比較符合趨勢，但是當矽鋼片數持續增加時，會使電磁鐵的截面積由正方形變為長方形，影響周圍磁場的均勻度，因此我們不會不斷增加矽鋼片來增加磁場。

● 電磁鐵的匝數對電磁鐵磁力強弱的影響討論

將電磁鐵磁力實驗研究目的二的實驗數據（表 5-2 漆包線纏繞於電磁鐵的匝數對電磁鐵磁力強弱的影響）做下圖 6-2。

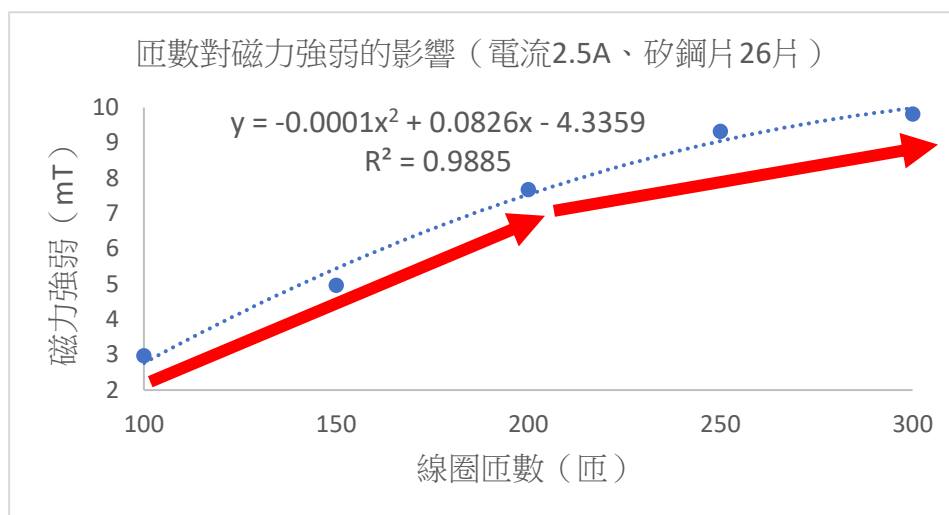


圖 6-2 漆包線匝數對磁力強弱的影響

由以上作圖中我們發現電磁鐵的線圈纏繞匝數和磁力強度呈二次函數關係 ($R^2 = 0.9885$)，但匝數愈增加會使磁力增加量逐次減少（匝數從 100 匝增加至 150 匝使得電磁鐵約增加 2.00mT 磁力，匝數從 250 匝增加到 300 匝卻使得電磁鐵僅增加約 0.48mT 磁力）。此與式 (4-1) 比較符合趨勢，但是線圈匝數愈多，造成電磁鐵電阻愈大、電流熱效應溫度過高造成危險，因此也不適合做為增加磁力的主要變因。

- 電磁鐵通電電流對電磁鐵磁力大小的影響討論

將電磁鐵磁力實驗研究目的三的實驗數據（表 5-3 電磁鐵通電電流對電磁鐵磁力強弱的影響）做下圖 6-3。

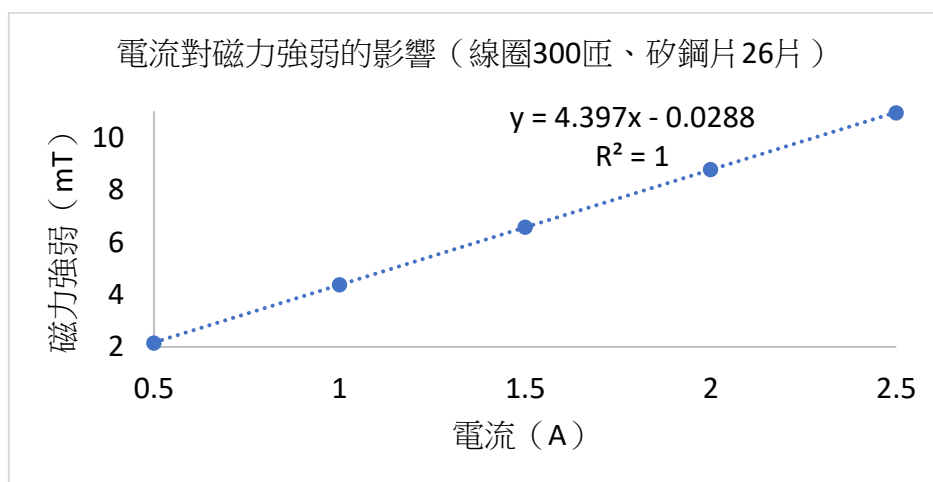


圖 6-3 電流大小對電磁鐵磁力強度的影響

由以上作圖中我們發現電磁鐵的通電功率和磁力強度呈線性關係 ($R^2 = 1$)。此與式 (4-1) 比較符合趨勢

● 電磁鐵磁力實驗小結論

1. 電磁鐵矽鋼片數愈多、纏繞匝數愈多、通電電流愈大，電磁鐵的磁力愈強。
2. 電磁鐵的矽鋼片數過多會使電磁鐵偏離理想電磁鐵（理想電磁鐵的截面為圓形），漆包線纏繞匝數過多會影響到電磁鐵表面的平整度且電磁鐵過熱，電流過大會導致電磁鐵過熱導致消磁且使電磁鐵外殼變形，過大電流也會使電子零件無法負荷。
3. 從圖 6-1~圖 6-3 可得，若須讓電磁鐵增加 1(mT)的磁力，約需要增加 9 片矽鋼片、25 圈線圈，或是 0.25 A 電流。

因為磁浮軌道實驗模型所使用的電磁鐵的磁力愈強愈適合使用，我們儘量將各種能使電磁鐵磁力增加的因素調整制最好，就以上的問題以及增加各因素對電磁鐵磁力影響的效益綜合評估後，我們決定**使用 26 片矽鋼片作為電磁鐵的截面積、300 圈漆包線匝數、2.5A 通電電流供以後的實驗使用。**

二、磁浮運輸實驗討論

磁浮運輸實驗討論分為**磁浮軌道製作討論、靜磁浮負重討論、車體運行順暢度實驗討論、車體運行振動實驗討論**四部分。

● 磁浮裝置製作討論

1. 雙層軌道可使軌道結構較穩。
2. 列車寬度需略小於軌道寬度，因為列車寬度過大會導致其與軌道摩擦過大以致無法運行。
3. 列車磁鐵需選用磁力較弱的一般磁鐵，因為磁力過強的磁鐵會使則列車懸浮的高度過高而不穩定，也使車體與軌道的摩擦增加。

● 靜磁浮負重實驗討論

將靜磁浮負重的實驗數據（表 5-5 不同負重對車體懸浮高度的影響）繪製成圖表如下圖 6-4。

已知車體在無負重時懸浮高度為 0.94cm，我們有以下假設：

G：車體負重

H：懸浮高度減少量(0.94-懸浮高度)

$$\text{關係式 } H=aG^b(a,b \neq 0) \quad (6-1)$$

式(6-1)取 log 可推得式(6-2)如下。作圖 6-5

$$\log(H) = \log(aG^b) = \log(a) + \log G^b = \log(a) + b \cdot \log(G) \quad (6-2)$$

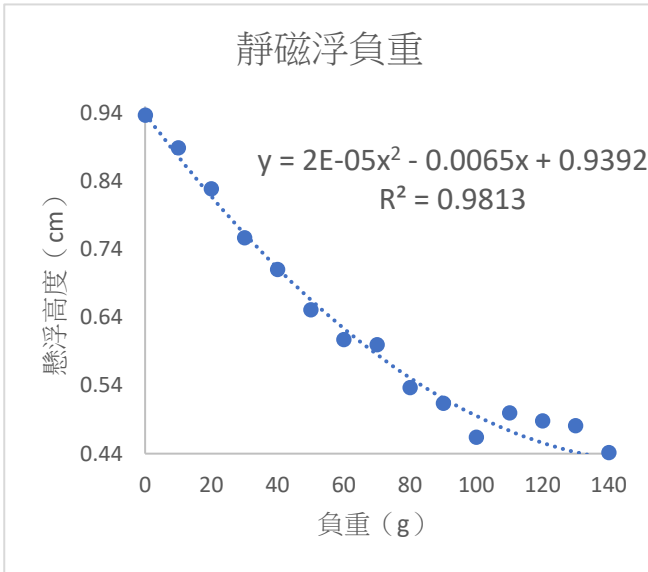


圖 6-4 靜磁浮負重

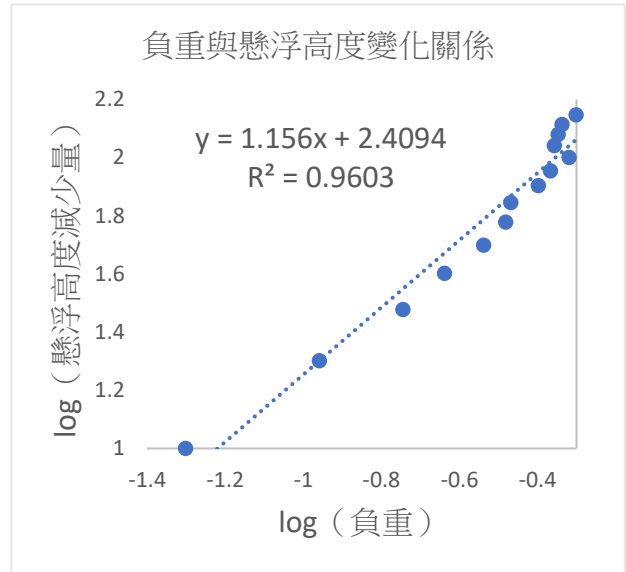


圖 6-5 車體懸浮高度與負重的關係

從圖 6-4 中可以發現懸浮高度和其負重呈二次函數關係擬合($R^2 = 0.9813$)，隨著負重的逐次增加，車體懸浮高度減少量逐次減少(負重由 10gw 增加到 20gw 使車體下降約 0.6cm，負重由 120gw 增加到 130gw 卻使得車體僅下降約 0.1cm)。

將圖 6-5 畫上一次線性趨勢線後得方程式 $H=1.156G+2.4096$ (6-3)

即式(6-1)中的其中 $\log a = 2.4096$; $b = 1.156$ ，代表懸浮高度減少量與負重的 1.156 次方成正比關係。

● 車體運行順暢度實驗討論

車體運行順暢度實驗討論分成吸引時間討論、初速度的影響、排斥時間的影響和電磁鐵間距討論四部分。

1. 電磁鐵吸引時間討論：

由下表可以發現車體在不同吸引時間下會有不同的運動情形，如下圖 6-5 所示。

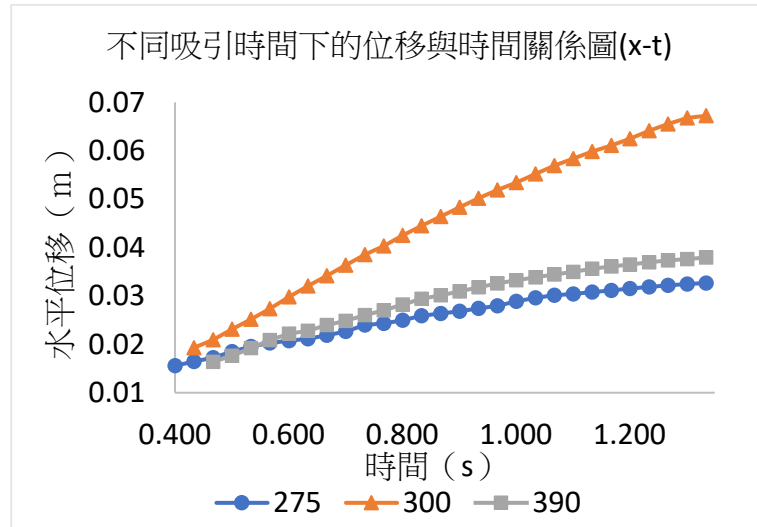


圖 6-6 不同吸引時間對車體移動的情形

圖 6-6 表中可以發現當吸引時間為 0.300 s 時，車體移動的速率最大，我們推測其原因為當車體到達電磁鐵時，電磁鐵瞬間切換磁極使其受力最大；其中，當吸引時間為 0.275 s 時，車體的速率最小，我們推測原因為列車尚未完全到達電磁鐵時，就受到排斥的力量，因此其向前的力量最小，速率最慢。

當車體開始運行時，車體會先被軌道前端的電磁鐵排斥向前產生初速度，再被軌道兩旁的電磁鐵吸斥而加速。我們將所有實驗數據中，車體運行初速度的 x-t 圖分析斜率，並計算其平均，結果為 0.0170，另外我們定義「車體運行順暢度」為初速度與加速後車速的接近程度最大者最順暢（即圖 6-7 中 0.290 和 0.300 s 之間）。

其中，由圖 6-7 可發現，吸引時間為 0.275 秒時的位移變化數據點斜率最小。

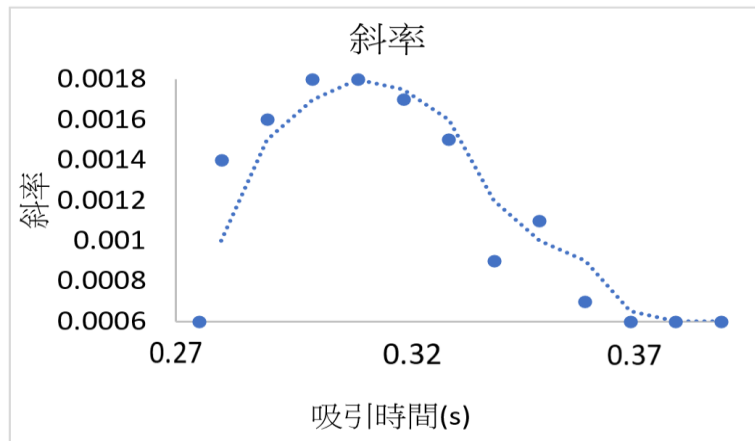


圖 6-7 不同吸引時間加速後斜率差異情形

2. 初速度大小對吸引時間影響之討論

初速度越慢代表列車到達電磁鐵中心的時間會越長，因此吸引的時間也需較長，才可使車體移動較平順。

3. 排斥時間對車體移動距離之討論

當電磁鐵吸引車體後，車體會被電磁鐵的吸引力而向前運行，而當吸引力消耗完畢，車體到達電磁鐵中心時，車體因電磁鐵的排斥力和自體慣性前進，則車體此時移動的距離由排斥時間決定，故排斥時間越長，車體移動越遠。若車體被排斥到其能被電磁鐵再排斥的範圍以外，電磁鐵排斥的時間再長也無法對車體作用，故當排斥時間增加到一定長度以上，就無法再增加車體移動距離。

4. 電磁鐵磁場與電磁鐵間距討論：

由（式 4-2）中可得出，磁力的強度會與距離的三次方成反比。

- (1) 若磁浮車體被磁場範圍較大的電磁鐵所吸引，車體的運行容易因為距離造成磁力在軌道各處分布的不同而造成不恆速的情況發生，如果要改善此問題就需要把電磁鐵的間距拉近。
- (2) 若磁浮車體被磁場範圍較小的電磁鐵吸引就較不會有此問題，但是磁場範圍較小的電磁鐵磁力也較小，容易造成車體運行過慢或無法牽引車體，所以需要再磁力大與磁力小的電磁鐵中再加以斟酌。

● 車體運行穩定度實驗討論

下圖 6-8 為不同吸引時間對車體穩定度的影響

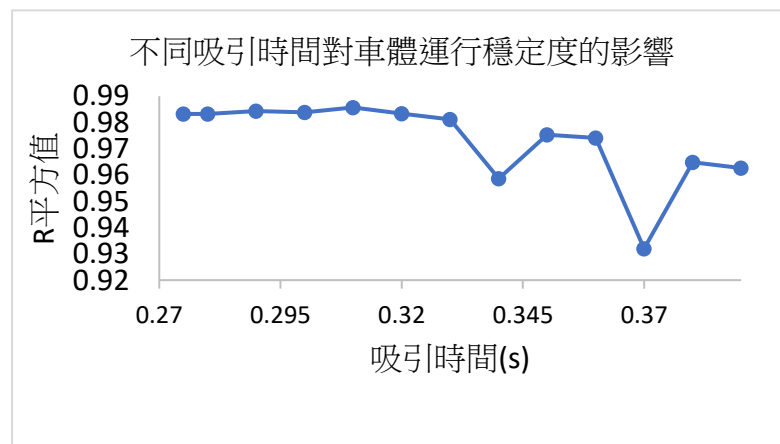


圖 6-8 不同吸引時間對車體穩定度的影響

- 我們定義「車體運行穩定度為 R^2 越接近 1 者代表車體在運行時越穩定，經過電磁鐵前和經過電磁鐵後的移動速率改變最小。由上表可以發現:當吸引時間為 0.310 秒時， R^2 最接近 1($R^2 = 0.9857$)，代表吸引時間為 0.310 秒時，車體運行最穩定、最等速。

● 車體運行振動實驗討論

下圖 6-9、6-10 為不同吸引時間下，對質點 A 和質點 B 振動幅度的影響

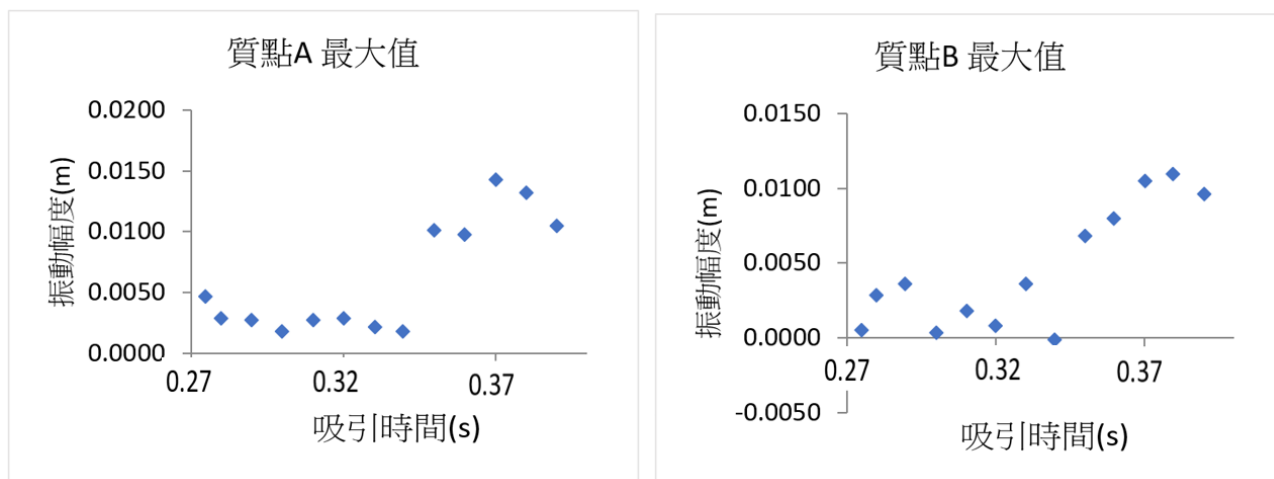


圖 6-9 不同吸引時間對質點 A 振動的影響 圖 6-10 不同吸引時間對質點 A 振動的影響

由圖 6-9 和圖 6-10 中可以發現吸引時間介於 0.275 秒和 0.340 秒時，可以使動幅度較小，其中質點 A 的振動幅度又小於質點 B，我們推測原因為質點 B 在車體的較前側，因此較質點 A 先受到磁力的影響，所以呈現質點 B 振動幅度大於質點 A。

柒、 結論

本實驗之結論分為電磁鐵磁力實驗結論、磁浮運輸裝置製作結論、車體負重實驗結論、車體運行順暢度實驗結論和車體運行振動實驗結論。

一、 電磁鐵磁力實驗

- 當電磁鐵的矽鋼片數愈多、纏繞於外的漆包線匝數愈大、通電電流與大多、越大時，電磁鐵磁力愈強。
- 隨著矽鋼片數逐次增加，電磁鐵磁力增加逐次顯著；隨著匝數逐次增加，電磁鐵磁力增加逐次趨緩。

二、 磁浮列車模型實驗

- 軌道若要穩定，則須採用雙層結構。
- 列車的部分我們則發現，其寬度須略小於軌道圍牆之間的距離約 2mm，才能使列車在移動擁有最小的摩擦力，移動時最順暢。
- 列車磁鐵的部分則須採用磁力較弱的一般磁鐵，可以避免因磁力過強而造成列車移動時翻覆且摩擦過大的狀況。

三、 車體負重實驗

當磁浮車體的負重愈大時，車體懸浮高度愈低，負重愈小時，懸浮高度愈高，但是隨著負重逐次增加，車體懸浮高度減少輛逐次趨緩。且懸浮高度減少量與負重的 1.156 次方成正比。

四、 車體運行順暢度實驗

- 電磁鐵間距不可過大。
- 第一組電磁鐵吸引時間應配合初速度。
- 電磁鐵的排斥時間決定車體的運行距離。
- 第二組以後電磁鐵吸引時間應配合前一組電磁鐵的排斥時間。
- 吸引時間介於 0.290 秒和 0.300 秒時，車體移動最為順暢。

五、 車體運行穩定度實驗

- 吸引時間為 0.310 秒時，車體運行最穩定、最等速。
- 吸引時間為 0.370 秒時，車體運行最不穩定、速率變化最大。

六、 車體運行振動實驗

- 當吸引時間介於 0.275 和 0.340 秒之間時，車體振動會較小。
- 車體後側的振動比車體前側的振動小。

捌、 未來展望

本實驗未來可持續研究或探討方向說明如下。

- 增加更多組的電磁鐵並延長軌道使列車能夠連續移動置更遠的距離。
- 探討不同感測器對實驗影響，如將紅外線偵測器改為超音波距離感測器。
- 增加多組的電磁鐵，並改變其運作頻率及磁力強度，製作可控制列車速度及加速度的軌道，並運用 Tracker 分析其移動速率。
- 因在實驗過程中發現電磁鐵在通電後會過熱以致消磁，所以希望可在電磁鐵盒中加上製冷片使電磁鐵冷卻，使電磁鐵磁力不受溫度影響。

玖、 參考資料

孫宏亮, & 王群 (2005)。特高頻高磁損耗材料的製備及其磁特性研究. **電子元件與材料**, 24(12), 14-16.

張博欽、李慧菁 (2019)。自然與生活科技九年級下學期。台南市：翰林出版

高浩鈞 (2018)。無線充電遠又多。第 58 屆中小學展覽會

紀佳茗、楊爵嘉、吳惠惠。磁力與距離之關係。全國高級中等學校小論文寫作。取自

<https://www.shs.edu.tw/works/essay/2009/11/2009111412135868.pdf>

磁力相關原理。取自 https://en.m.wikipedia.org/wiki/Force_between_magnets#Magnetic_dipole-dipole_interaction

林正雄。線圈上磁場強度的計算方法。取自

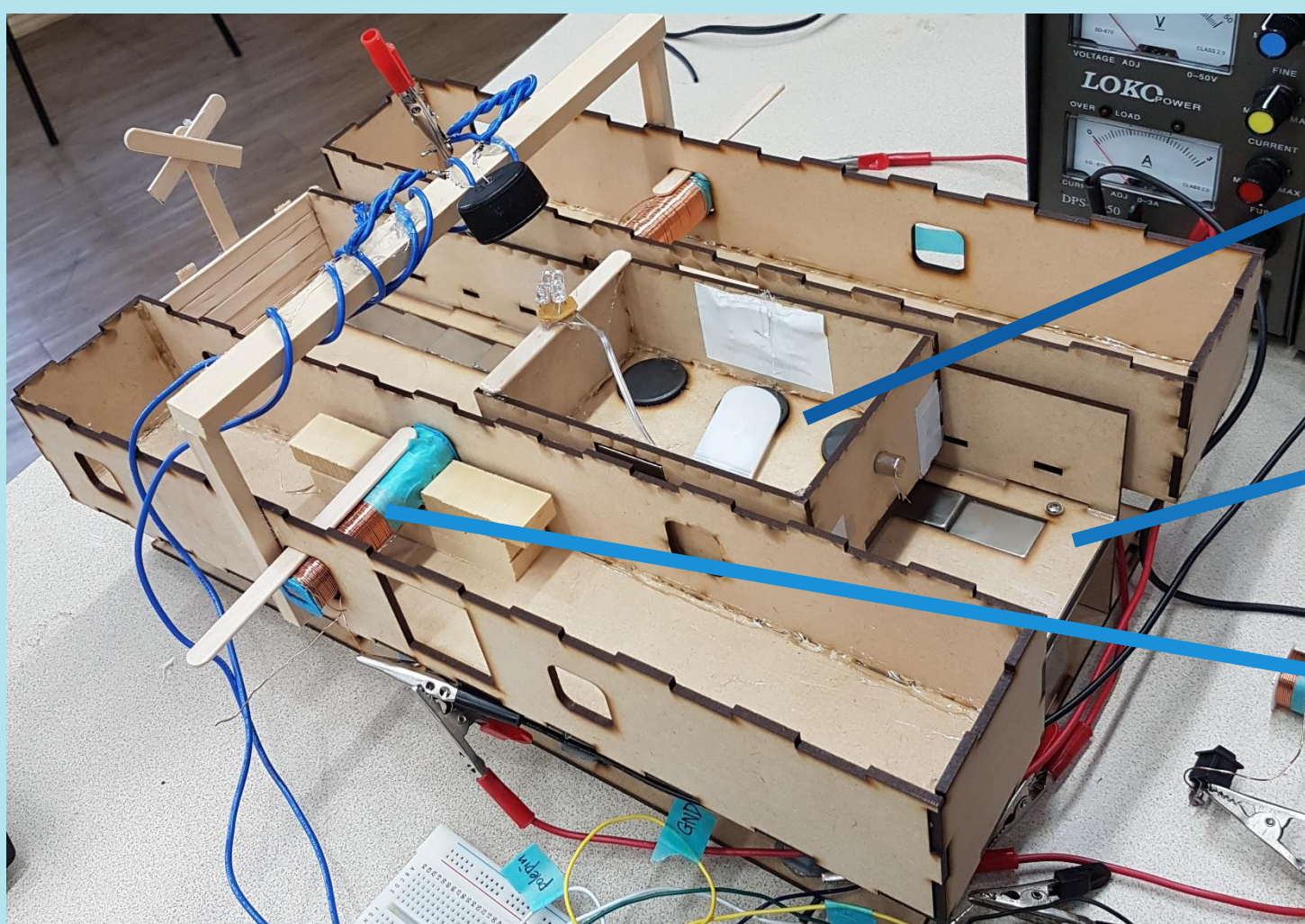
<https://www.tiri.narl.org.tw/Files/Doc/Publication/InstTdy/124/01240780.pdf>

【評語】 032814

該作品利用電磁原理模擬磁浮列車運作，由實驗結果反覆設計發展出系列軌道及車體原型，並討論其優缺點，具實驗精神，團隊合作表現良好。但是，所得結論侷限於模擬設置，且軌道及運行模擬長度較為不足，在與實際列車尺度縮放後可能須考量的修正因素方面仍有改善空間。建議作者可再接再厲，持續改善研究內容，讓作品更完整。

摘要

本實驗分成電磁鐵特性研究和自動化磁浮運輸工具的探討，在電磁鐵特性的實驗中發現當電磁鐵的矽鋼片數、漆包線纏繞匝數和電磁鐵的通電電流愈大皆使電磁鐵的磁力愈強。磁浮運輸工具由車體、軌道和取裝置組成，軌道上的電磁鐵控制車體運行。磁浮運輸工具實驗中發現電磁鐵吸引時間和磁力大小會影響車體運行速度；吸引時間和磁力大小的配合會影響車體運行的順暢度；吸引時間也會影響車體的震動幅度。



▲圖1 磁浮運輸裝置

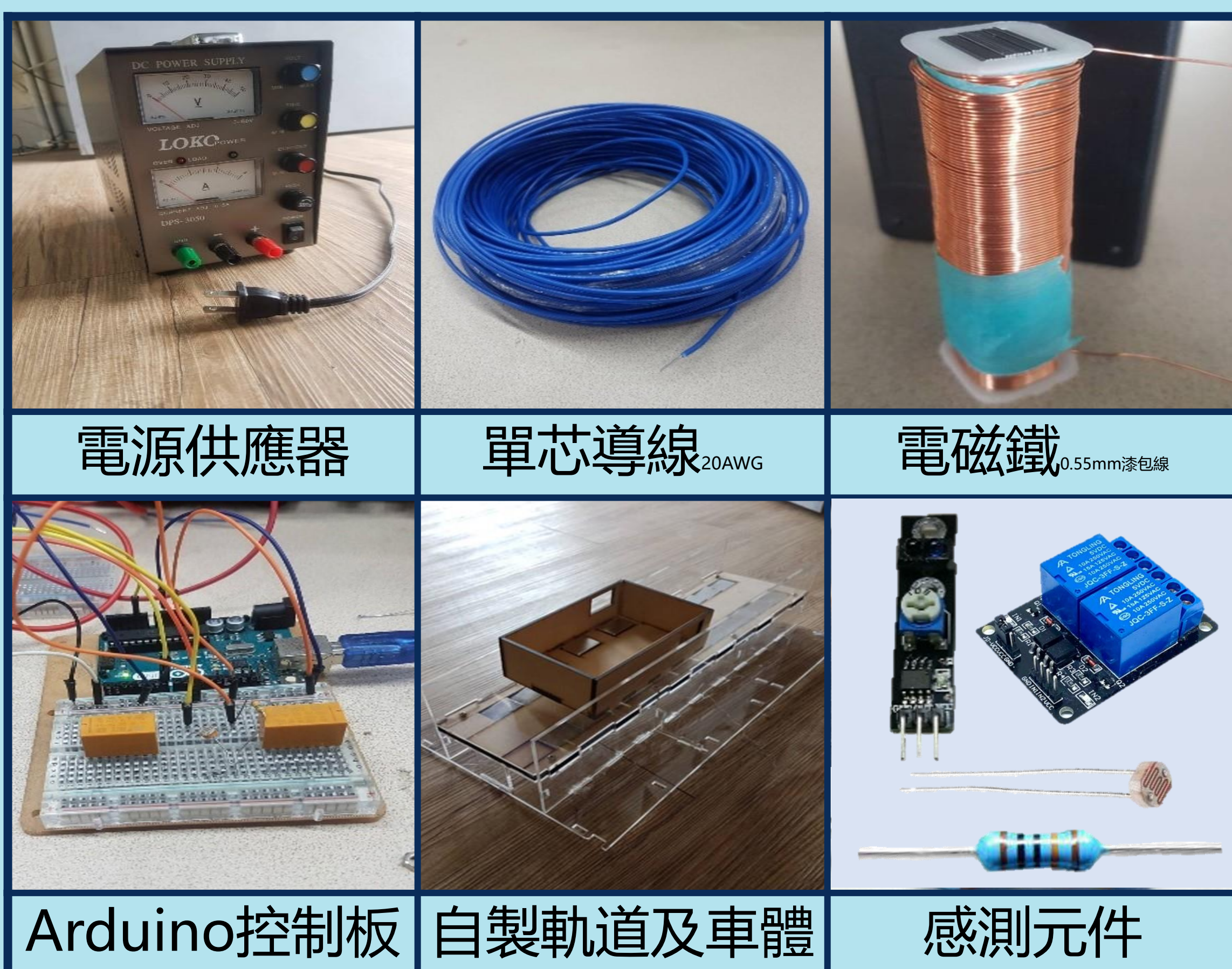
實驗目的

電磁鐵實驗

發展
磁浮裝置

車體運行
實驗

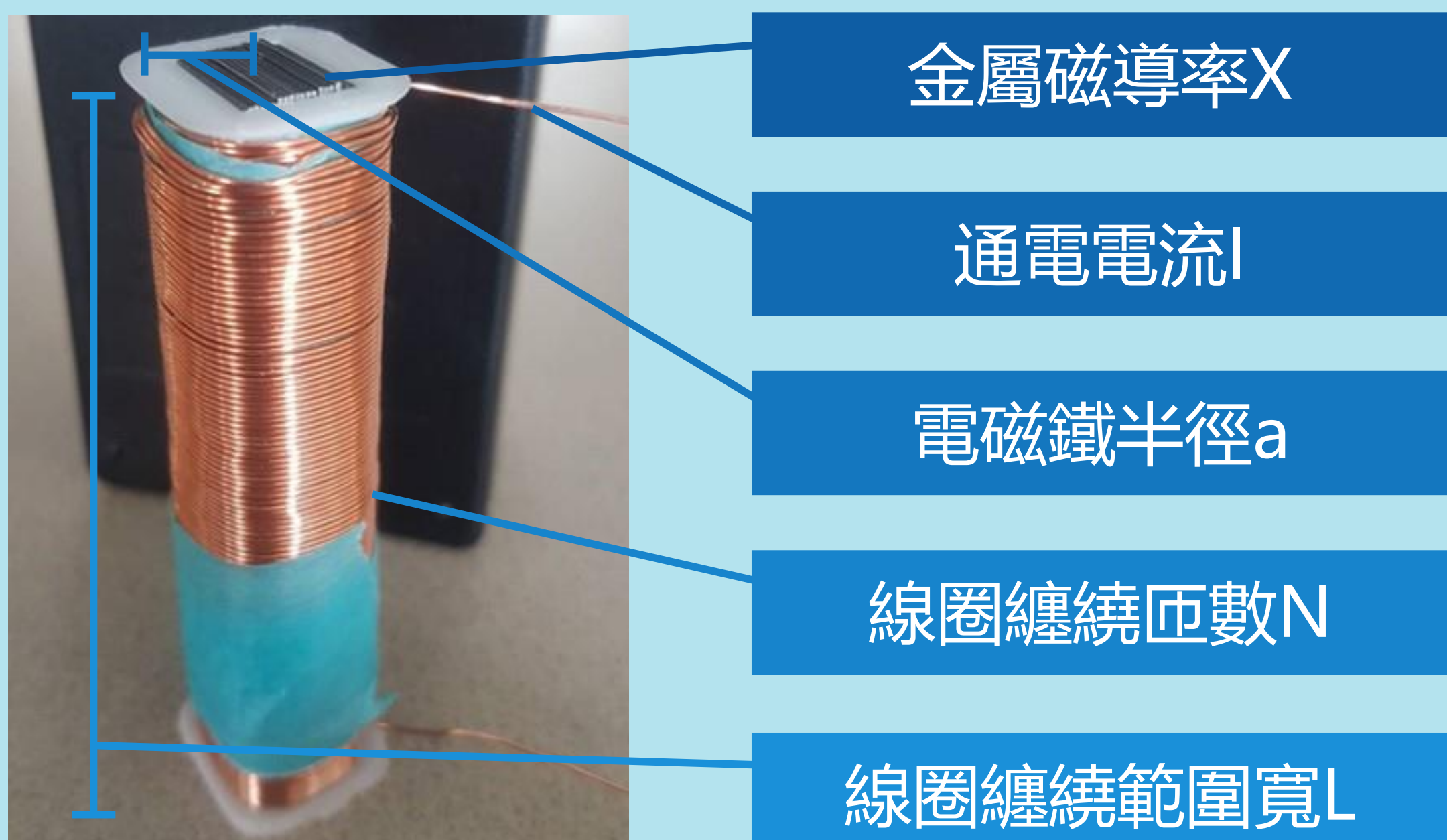
實驗器材與裝置



實驗方法、結果與討論

一、電磁鐵實驗

(一)、實驗原理——電流磁效應



▲圖2 影響電磁鐵磁場的變因

若存在一點P，與電磁鐵距離D，則電磁鐵供給P點的磁場強度為：

$$B = (1 + 4\pi X) \cdot \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{NI}{2L} \cdot \left[\frac{D}{\sqrt{D^2 + a^2}} + \frac{L - D}{\sqrt{(L - D)^2 + a^2}} \right]$$

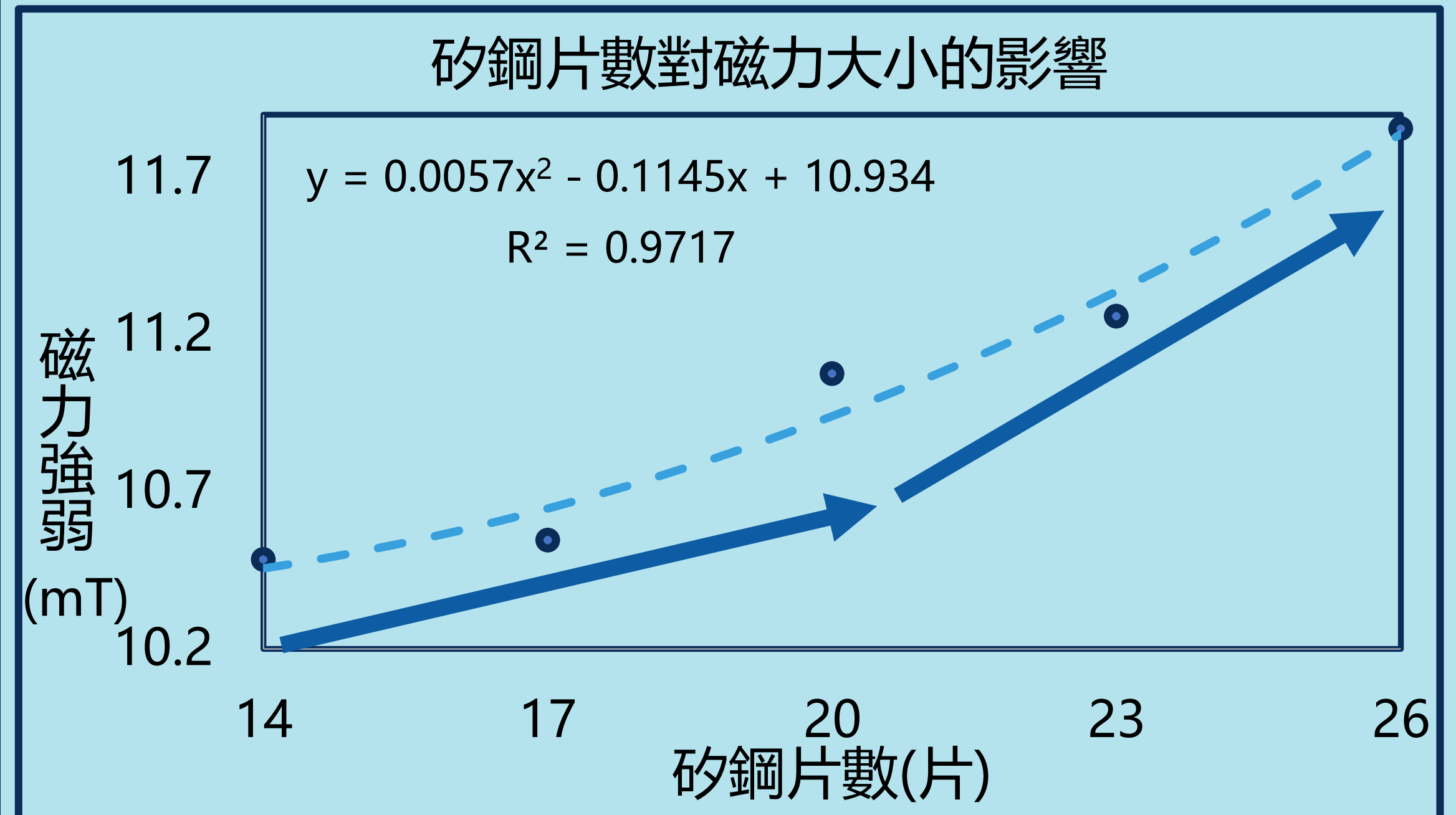
由此可得：if $N \uparrow, X \uparrow, I \uparrow \Rightarrow B \uparrow$

(二)、實驗步驟

▼表1 電磁鐵實驗的變因調整

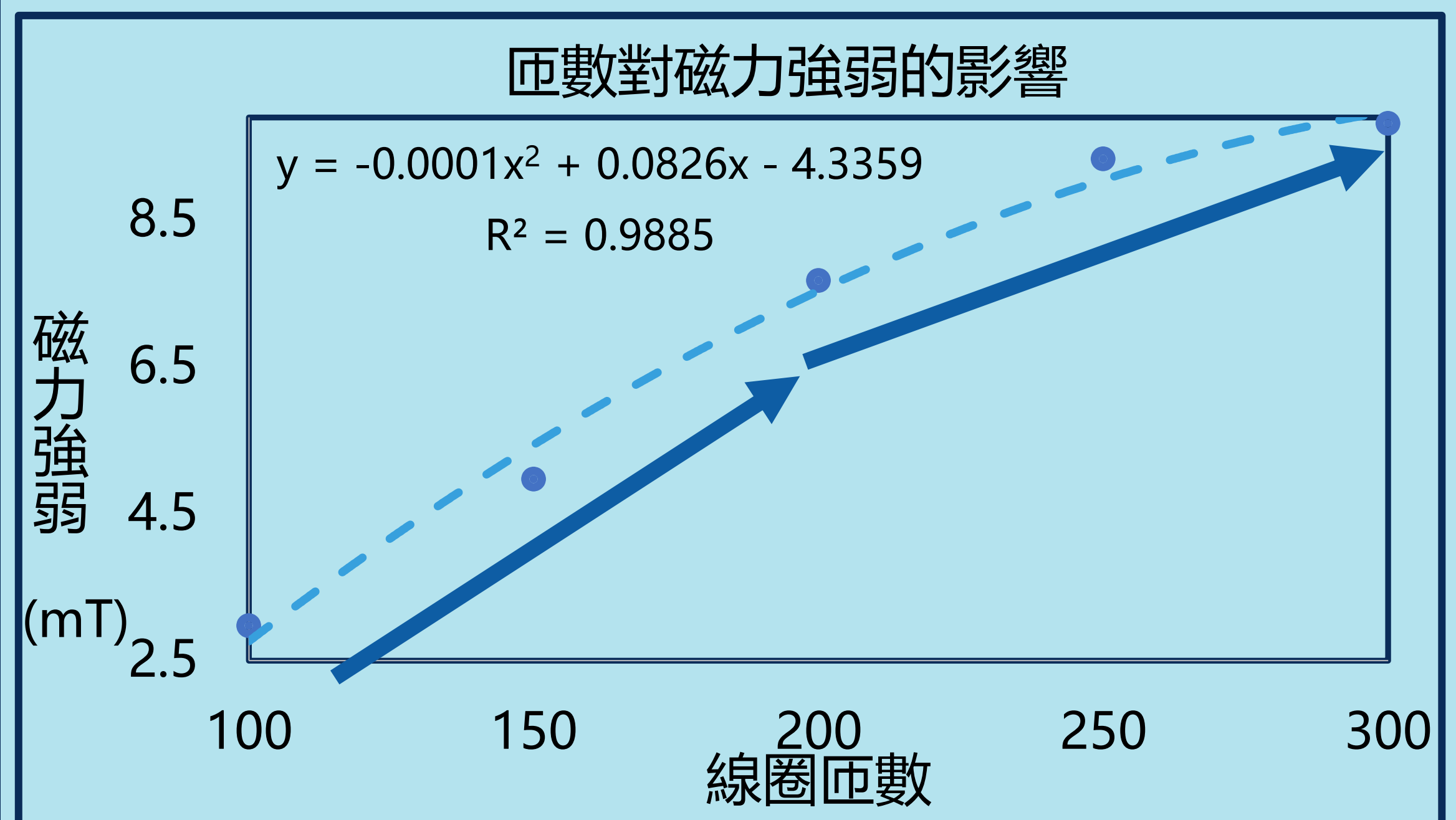
變因	實驗對象	矽鋼片數	線圈匝數	通電電流
矽鋼片數(片)		14、17、20、23、26	300	2.5
線圈匝數(匝)		26	100、150、200、250、300	2.5
通電電流(A)		26	300	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5

(三)、實驗結果與討論



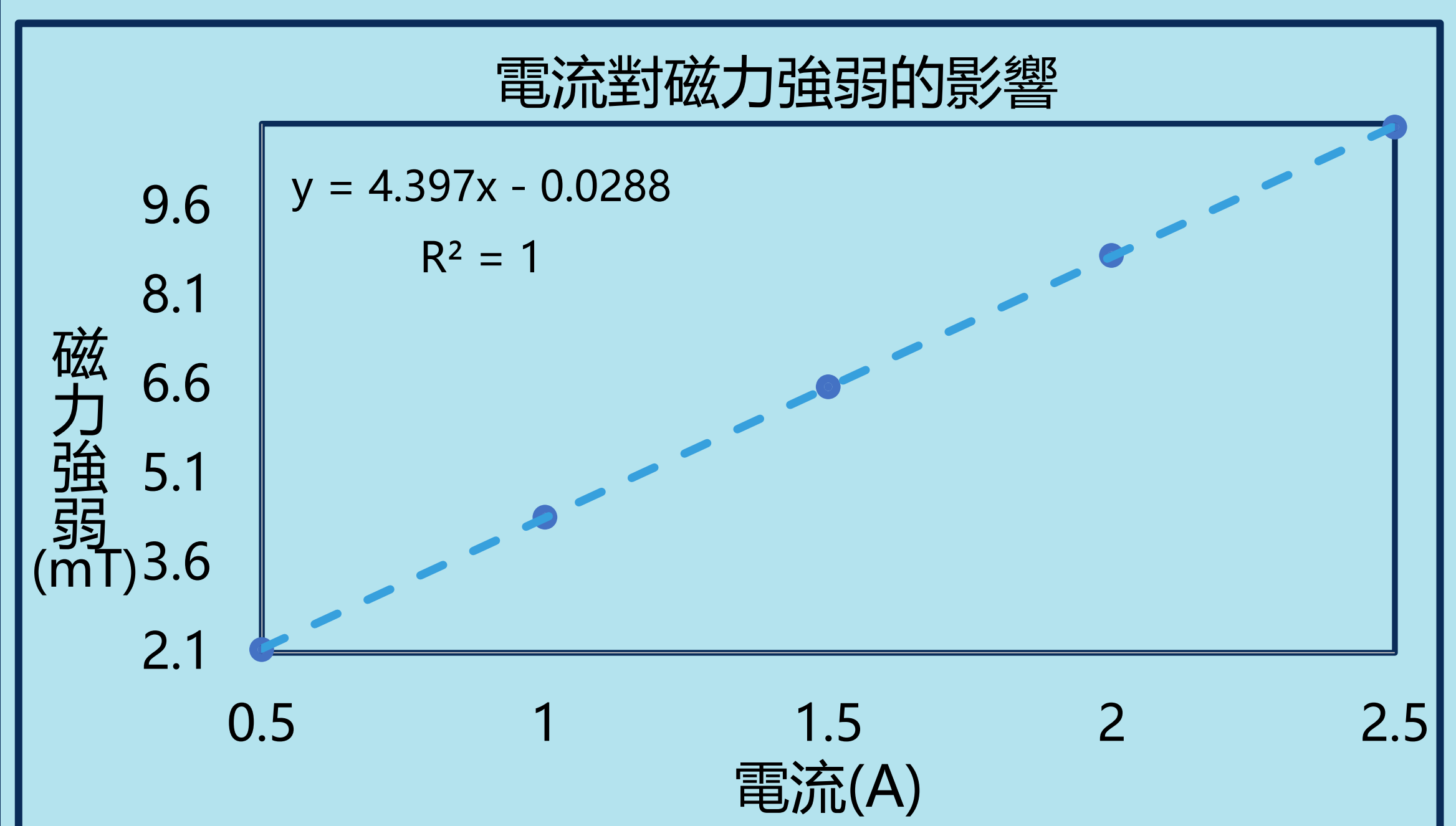
▲圖3 矽鋼片數對電磁鐵磁場的影響

- 矽鋼片數 $\uparrow \Rightarrow X \uparrow \Rightarrow B \uparrow$
- 矽鋼片數 $\uparrow \Rightarrow \Delta B \uparrow$



▲圖4 線圈匝數對電磁鐵磁場的影響

- $N \uparrow \Rightarrow B \uparrow$
- $N \uparrow \Rightarrow \Delta B \downarrow$



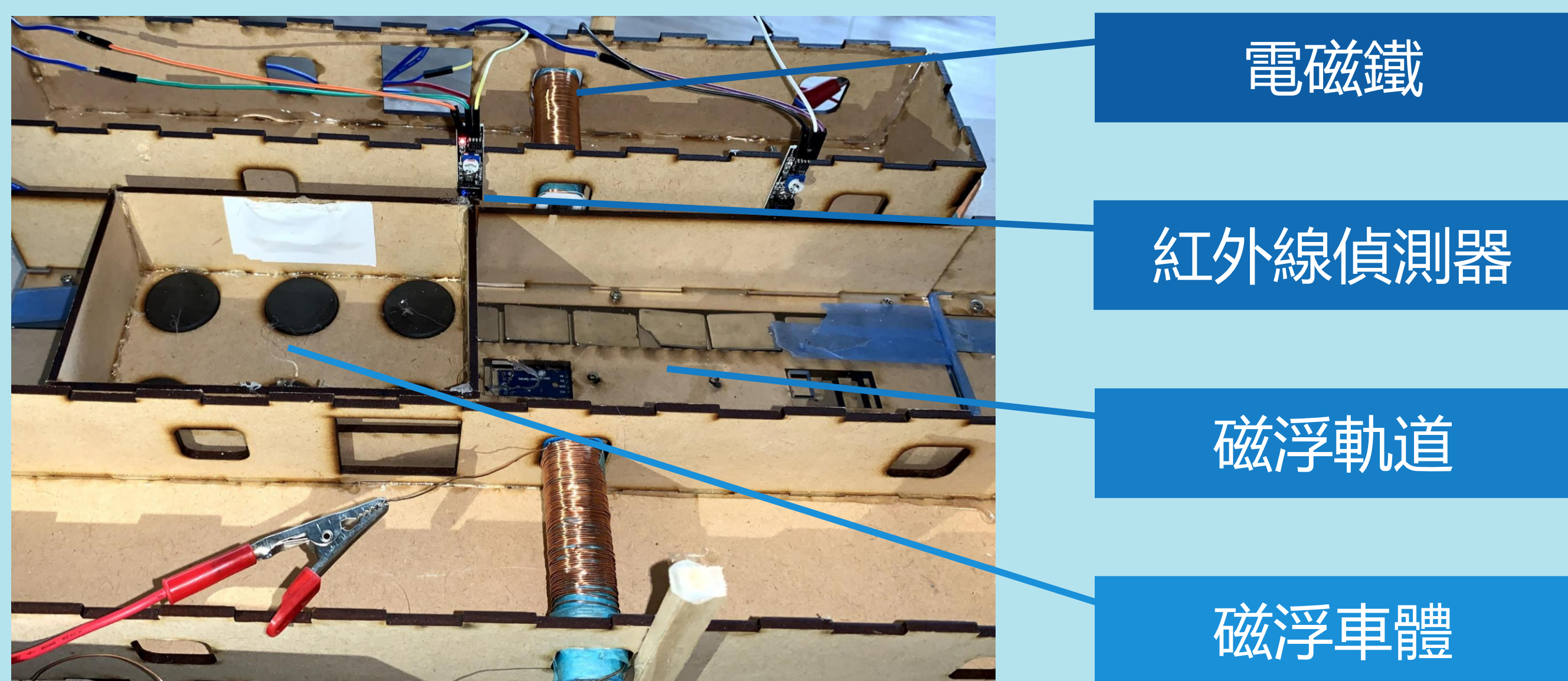
▲圖5 通電電流對電磁鐵磁場的影響

- $B \propto I$

(四)、電磁鐵實驗結論

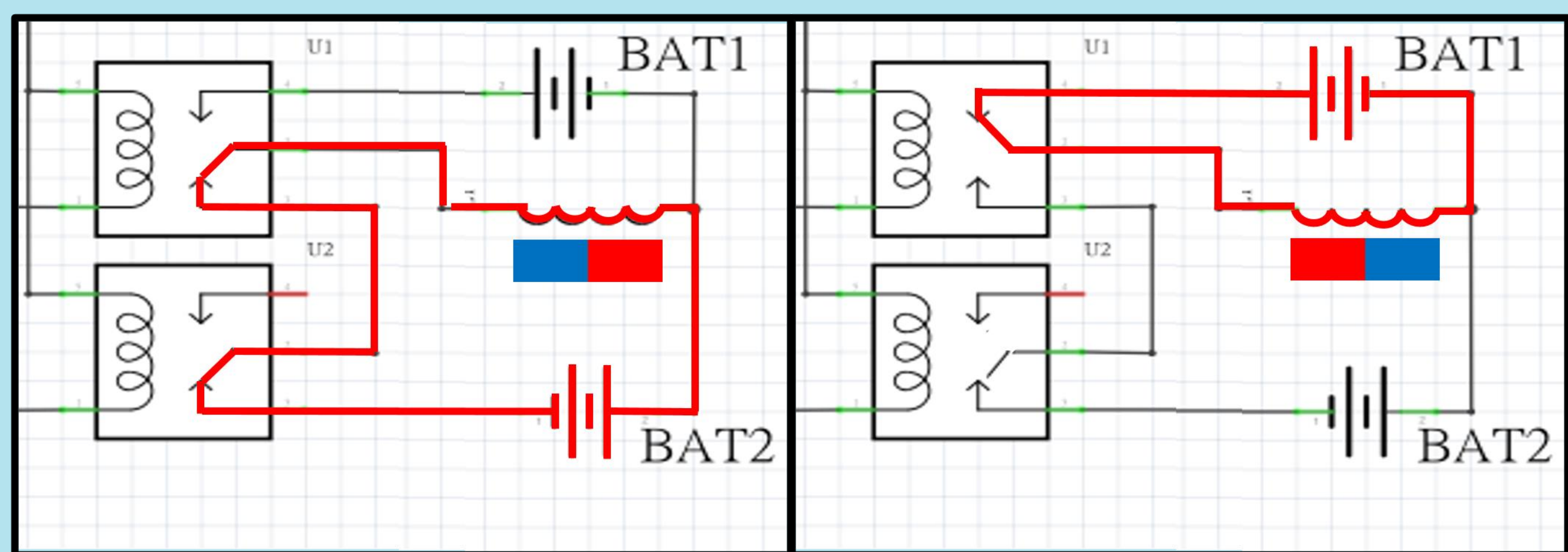
- 在上述的條件下，若須讓電磁鐵增加1mT的磁力，約需增加9片矽鋼片、25圈線圈，或是0.25A電流。
- 線圈匝數過多或電流過大容易導致線圈過熱。
- 評估後，選用**矽鋼片26片**、**線圈匝數300匝**、**通電電流2.5A**的電磁鐵做以後實驗。
- 長時間通電下的電磁鐵過熱現象不容易控制，因此使用電磁鐵作為牽引車體的機制，而使用永磁鐵作為軌道的磁浮裝置。

三、發展磁浮裝置

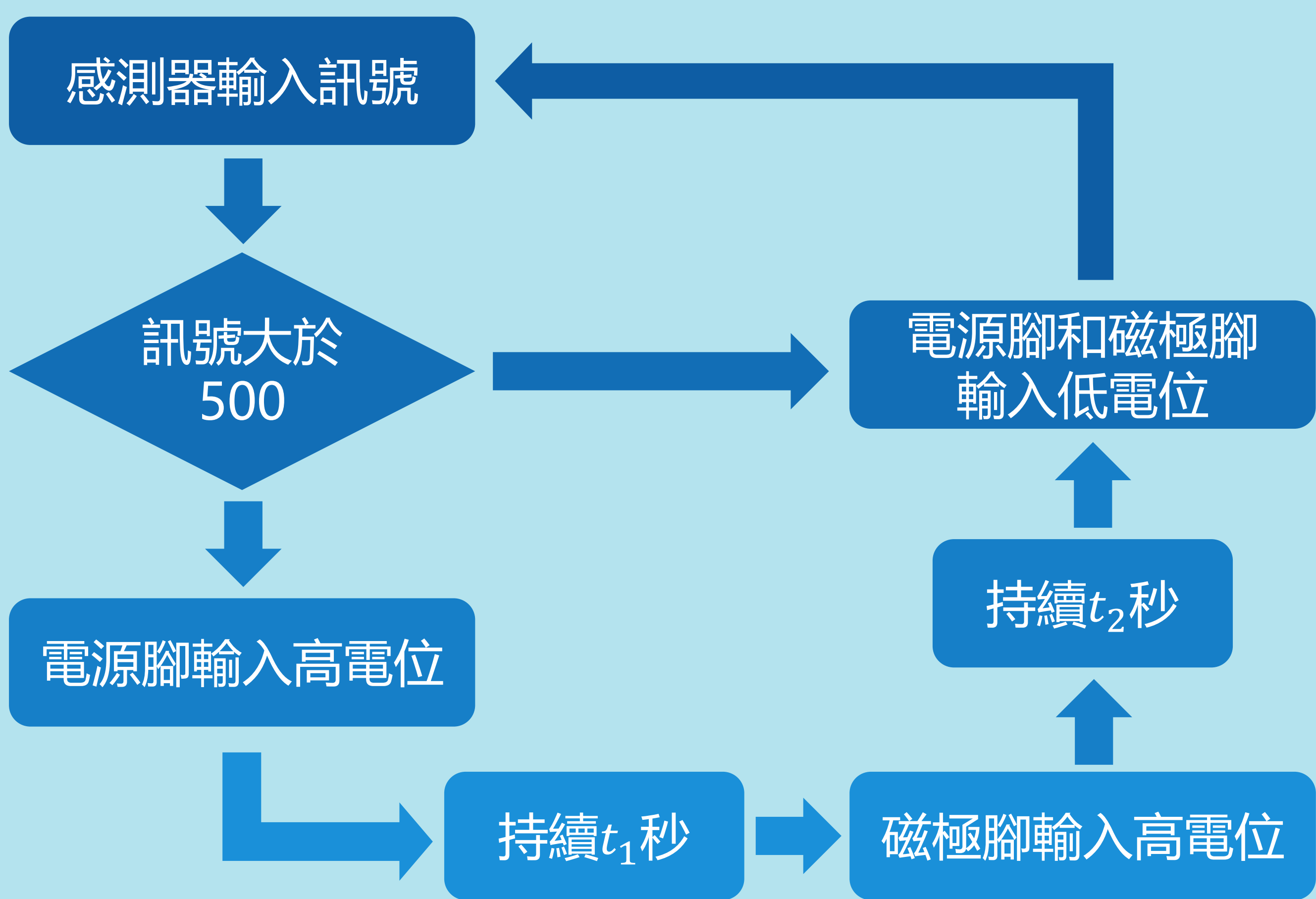


▲圖6 磁浮裝置

電磁鐵吸引車體 t_1 秒，排斥車體 t_2 秒。



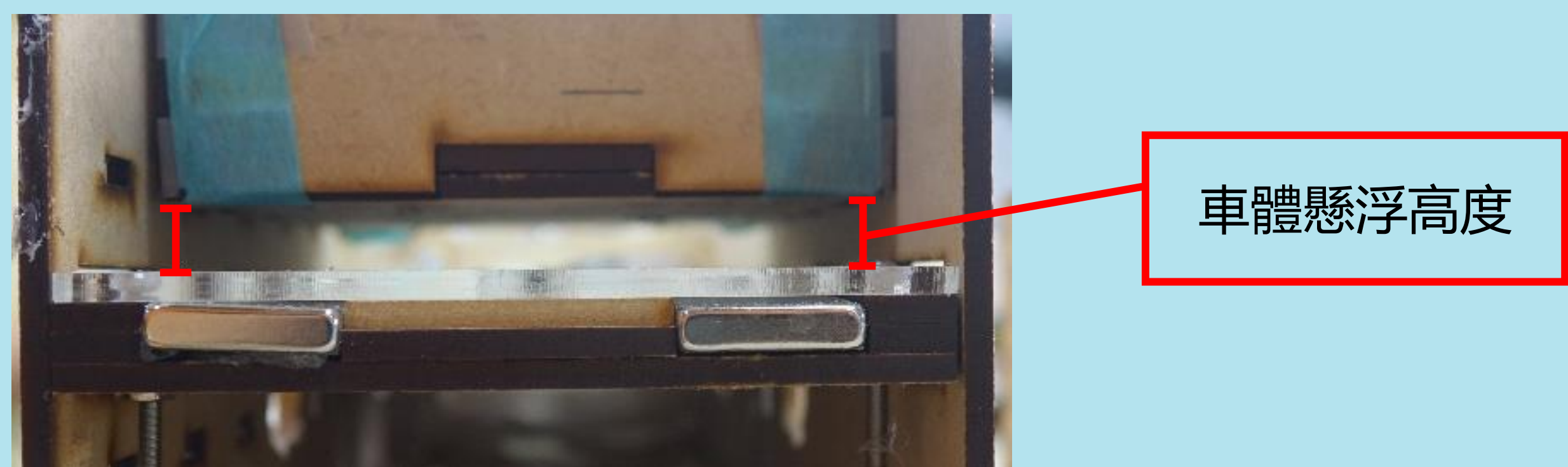
▲圖7 電磁鐵磁極轉換電路



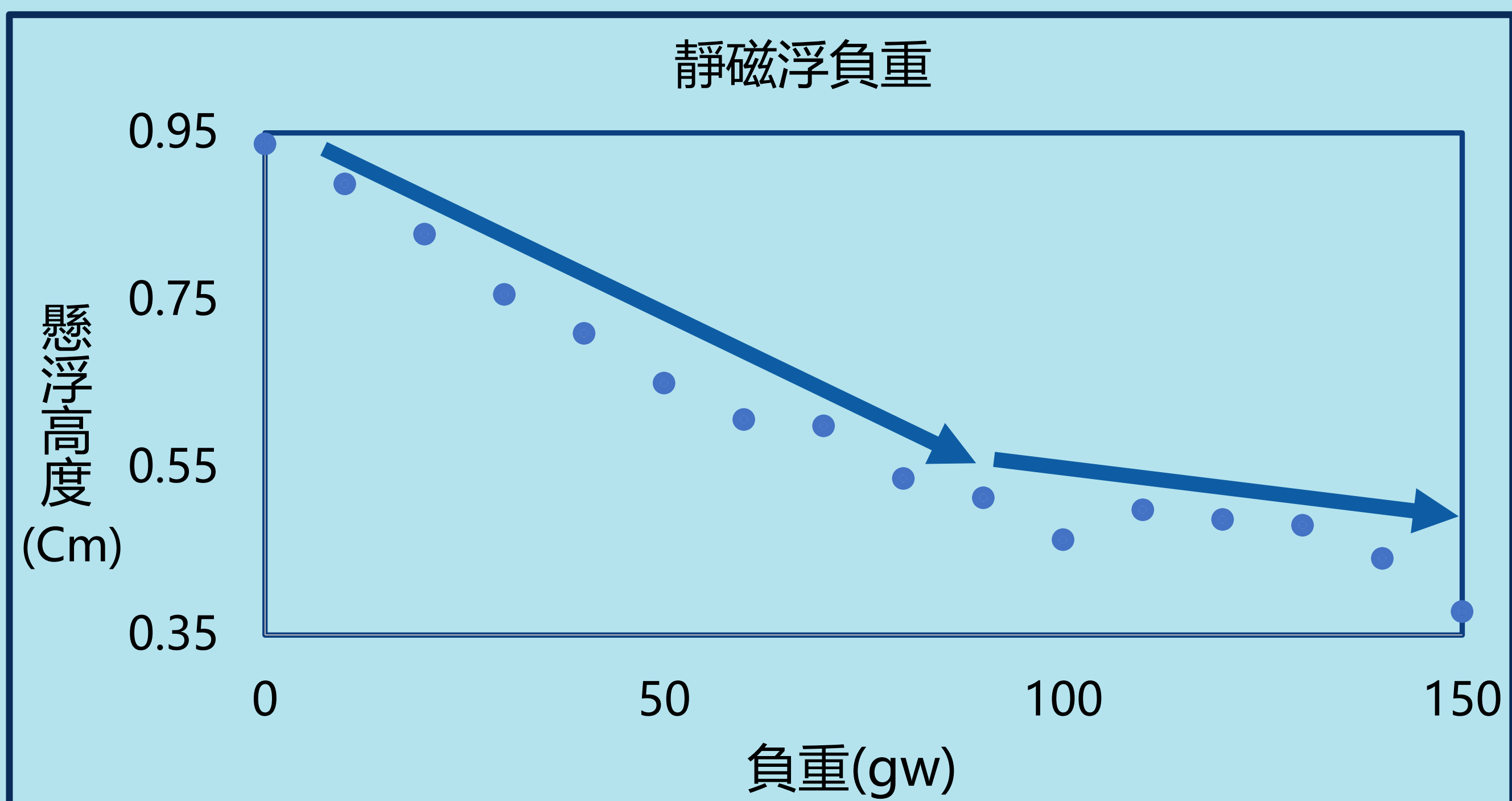
▲圖8 Arduino控制程式碼

車體負重實驗

在車體中央加上負重，量測車體左右懸浮高度並取平均(如圖9)。負重量由0gw逐次增加10gw直到150gw，實驗數據由圖表呈現於圖10。



▲圖9 車體懸浮高度



▲圖10 負重對車體懸浮高度的影響

- 負重愈重，懸浮高度愈小
- 假設 G: 車體負重

H: 懸浮高度減少量(0.94-懸浮高度)

關係式 $H = aG^b$ ($a, b \neq 0$)

$$\log(H) = \log(aG^b) = \log(a) + b \cdot \log(G) \Rightarrow b = 1.156$$

及 $\Delta(\text{懸浮高度}) \propto 1.156 \cdot (\text{負重})$

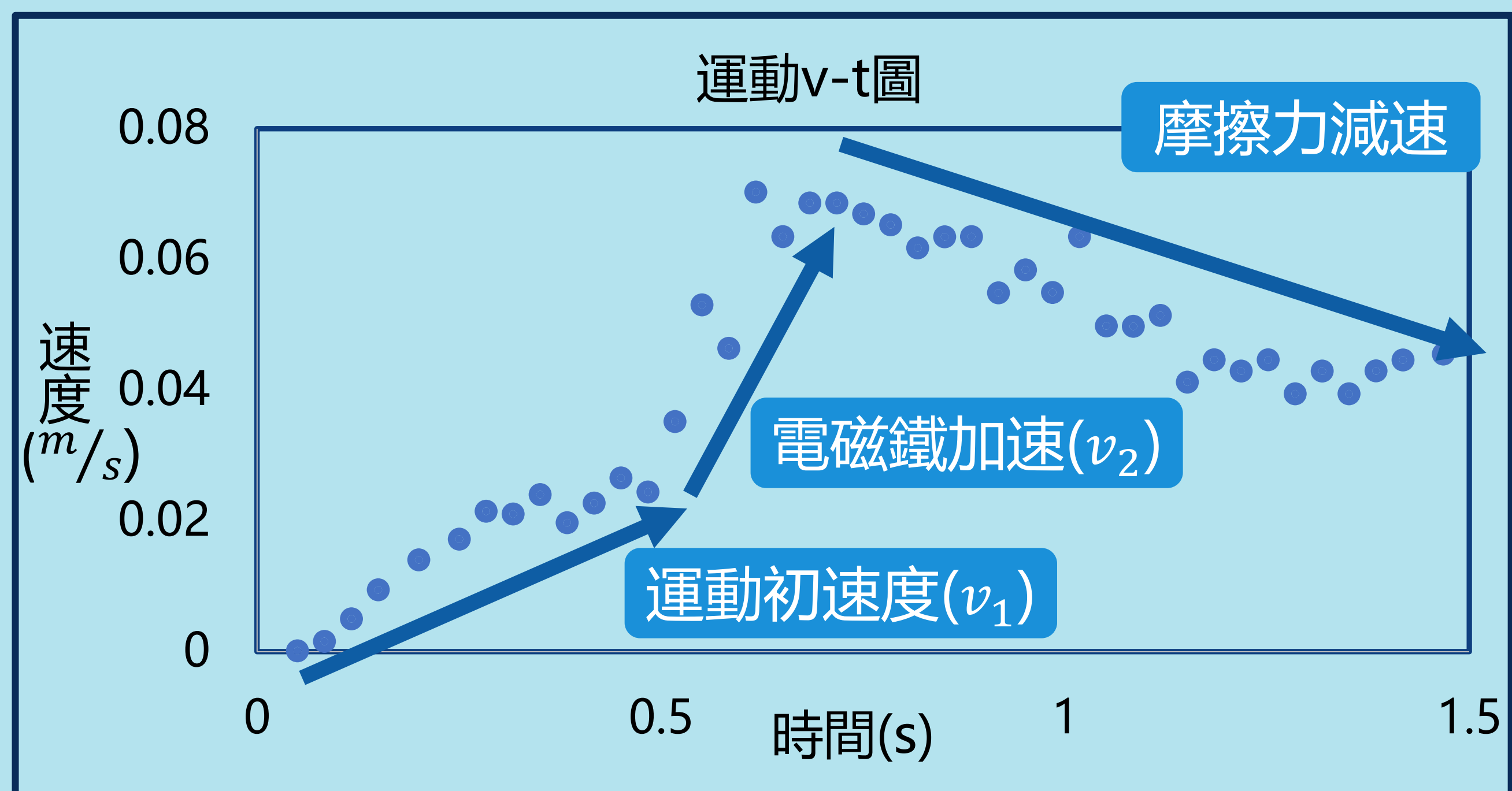
四、車體運行實驗

(一)、加速程度及加速穩定度實驗

在車體取一質點A(如圖11)，計算質點A的水平運動速度，如圖12所示。



▲圖11 磁浮運輸俯視圖

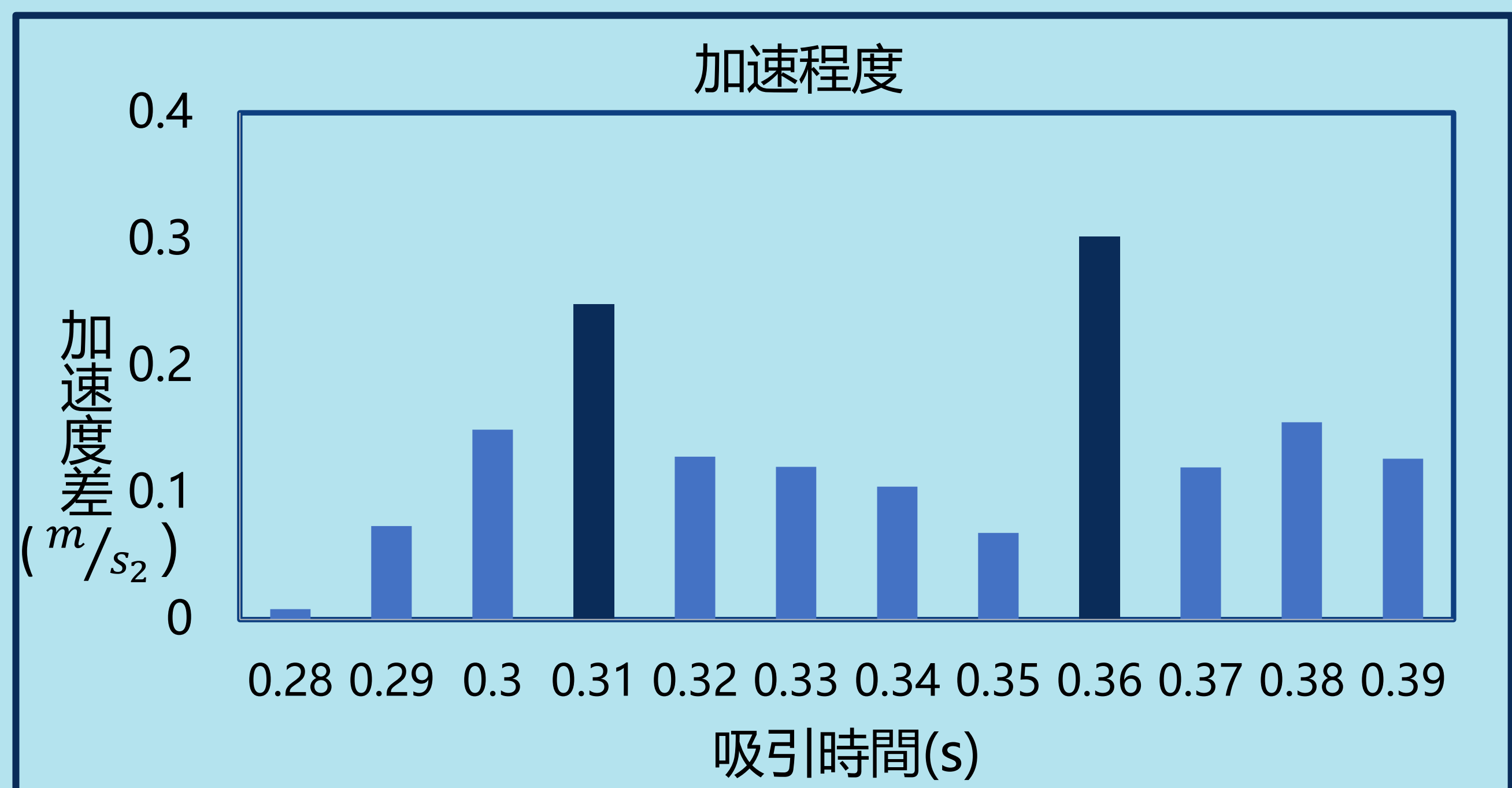


▲圖12 質點A運動v-t圖

加速程度： v_1 和 v_2 的平均斜率差

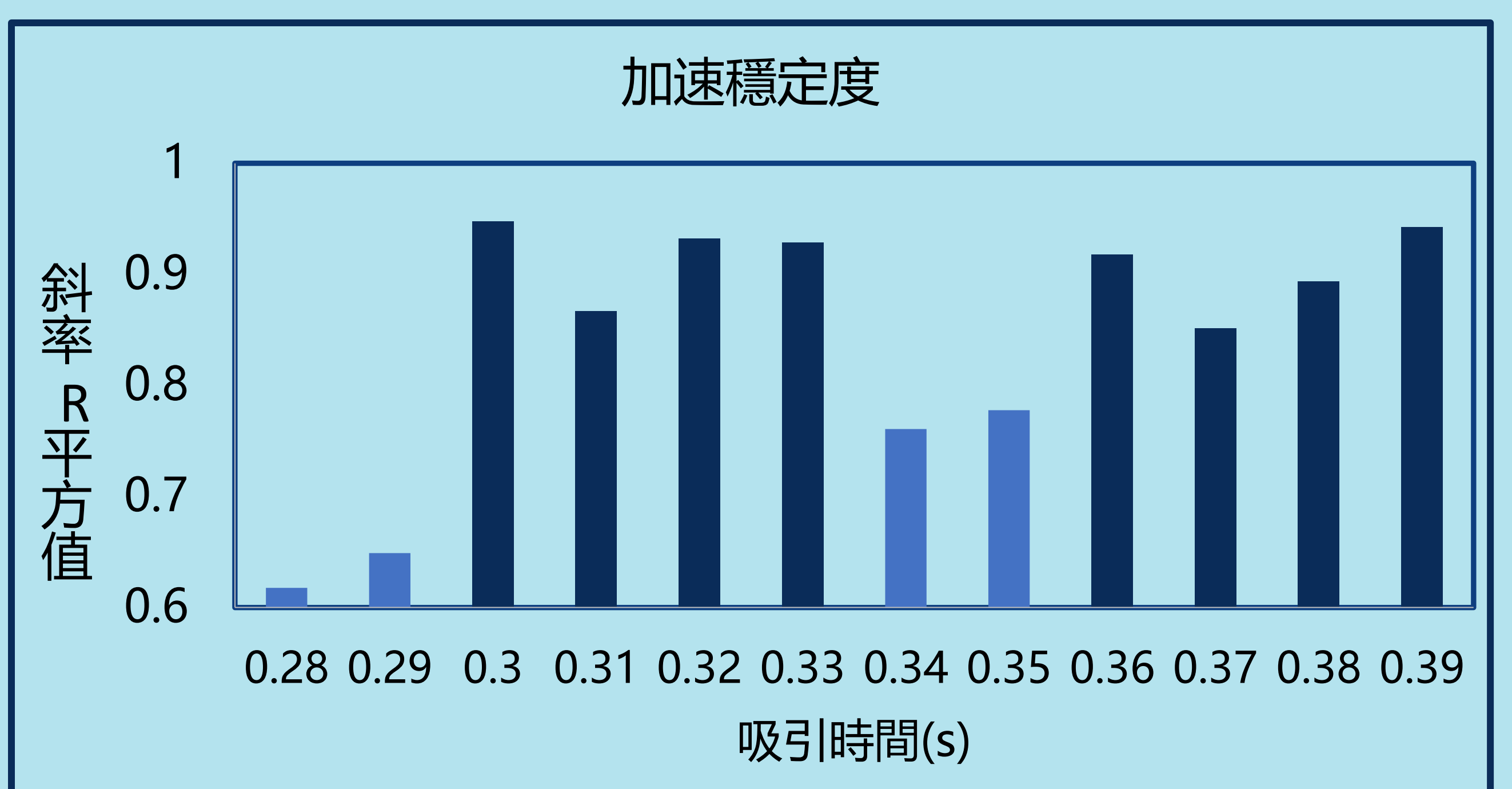
加速穩定度： v_2 的速度穩定度(線性R平方值)。

分析各吸引時間下質點A的v-t圖後，作下圖13、圖14。



▲圖13 各吸引時間下的加速程度

圖中可發現，當吸引時間為0.31秒和0.36秒時，電磁鐵加速程度較大，當吸引時間為0.28秒時則較小。



▲圖14 各吸引時間下的加速穩定度

圖中可發現，當吸引時間為0.30秒到0.33秒時，以及0.36秒到0.39秒時，運行加速穩定度較大。

(二)、加速程度及加速穩定度結論

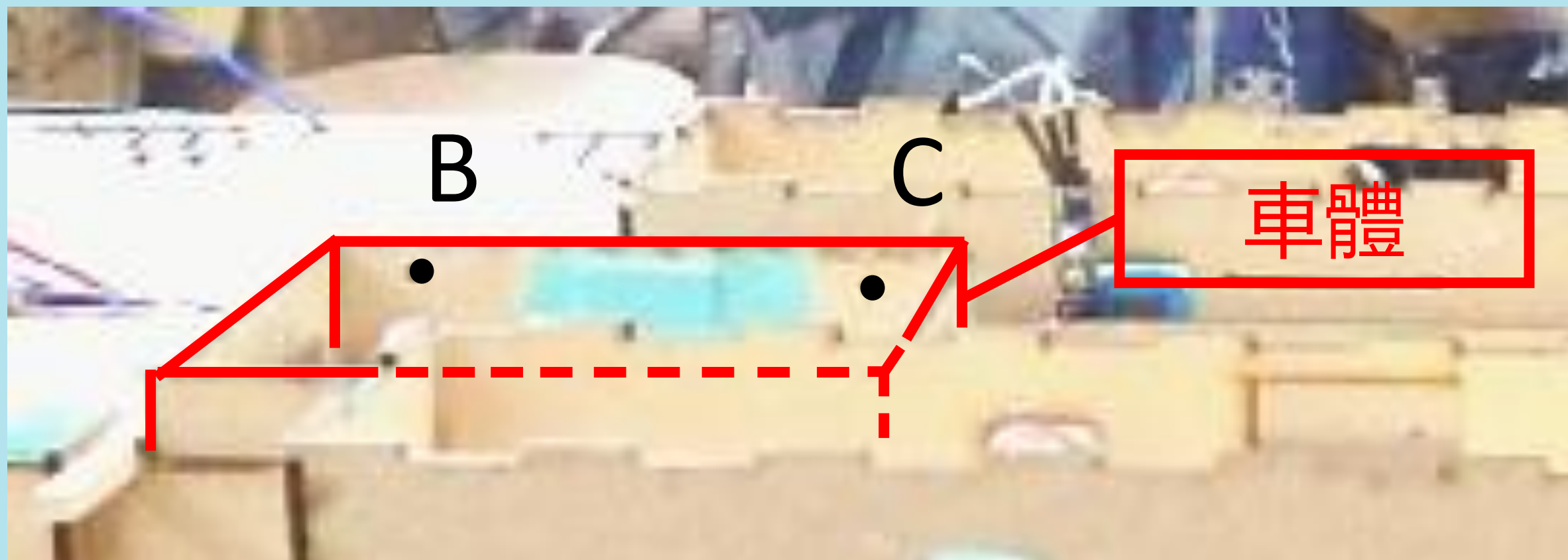
吸引時間可改變加速程度及加速穩定度，當吸引時間為0.31秒和0.36秒時，加速程度以及加速穩定度皆較大。

另外，在實驗中我們還發現一些現象

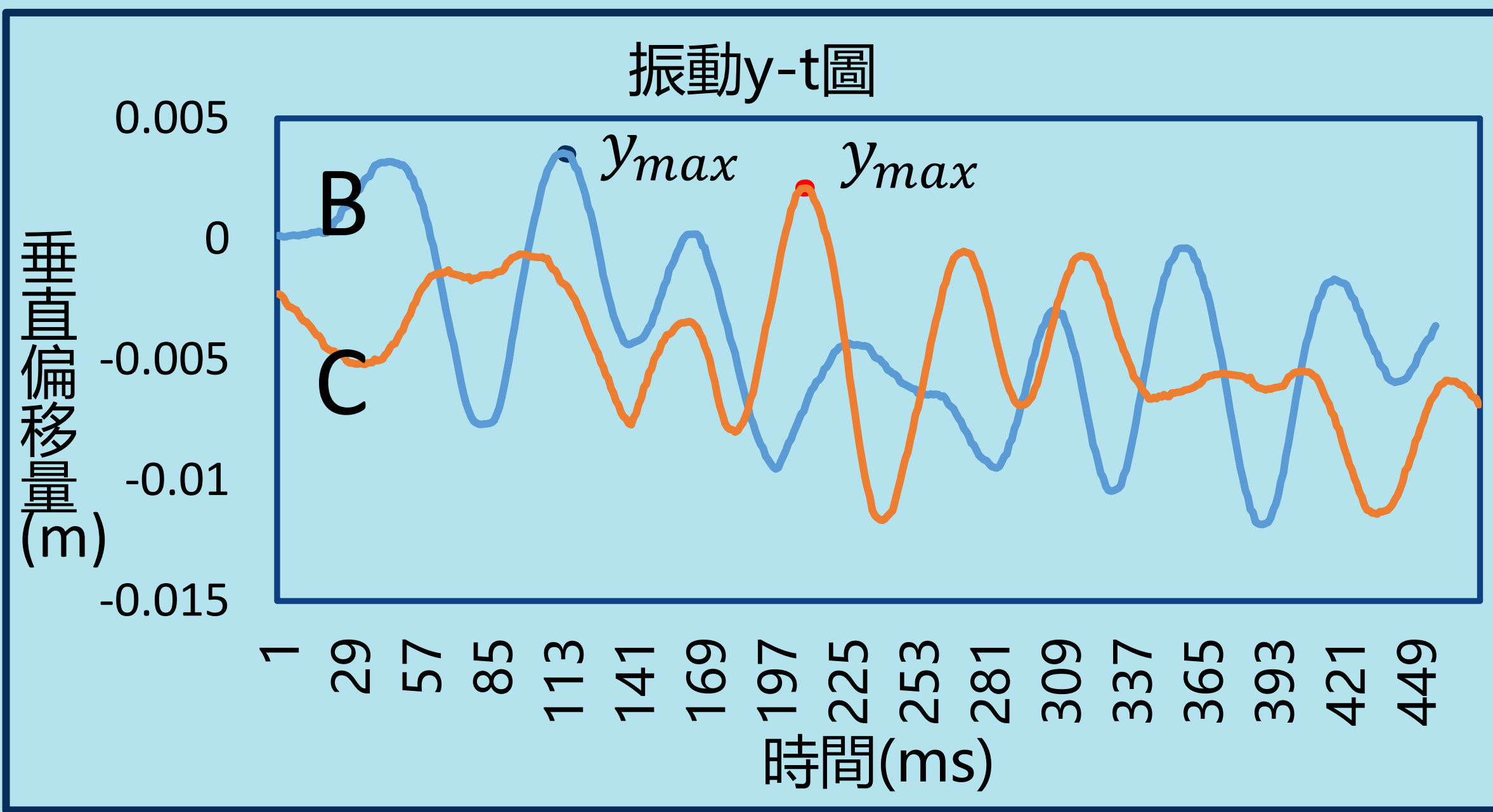
- 當吸引時間在0.32秒以上時，在電磁鐵的磁極改變的期間，車體會因為吸引時間過長而停頓在電磁鐵中心，待磁極轉換後才繼續運行。
- 電磁鐵的排斥時間會影響車體被排斥的距離
- 初速度愈大，電磁鐵的吸引時間就需愈短才不會導致車體運行期間停頓。

(三)、車體振動實驗

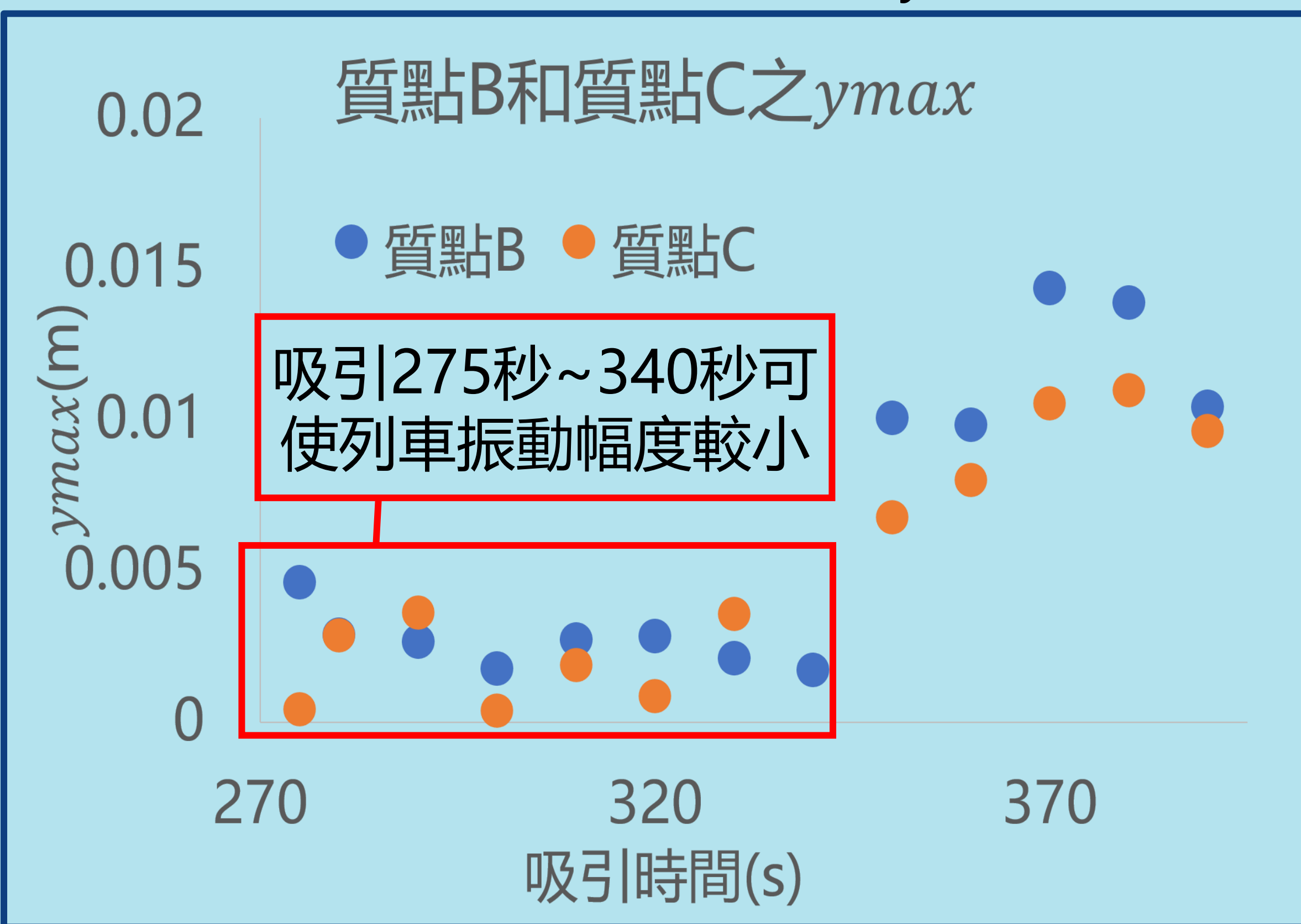
在車體上取質點B和質點C(如圖15), 分析其垂直振動幅度(如圖16)。



▲圖15 磁浮運輸側視圖



▲圖16 質點B、C垂直振動y-t圖



▲圖17 各吸引時間下的振動幅度

(四)、車體振動實驗小結論

1. 從表中可以發現質點C振動幅度的變化較大。
2. 吸引275秒~340秒可使列車振動幅度較小。
3. 質點C的 y_{max} 較質點B的 y_{max} 小。

結論

- ① 矽鋼片數越多
 - ② 線圈匝數越多
 - ③ 通電功率愈大
- } 磁力越大

- 懸浮高度和負重呈1.156次函數關係

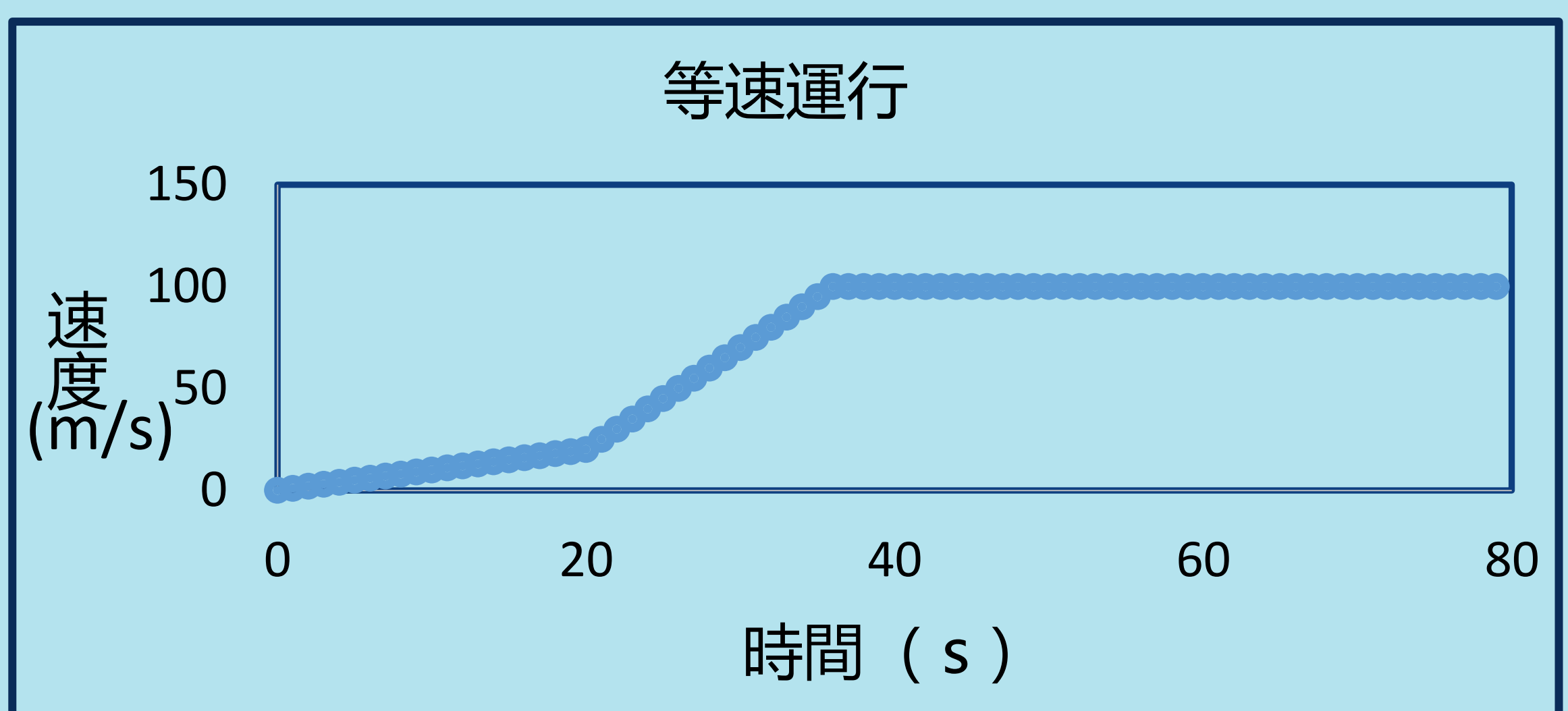
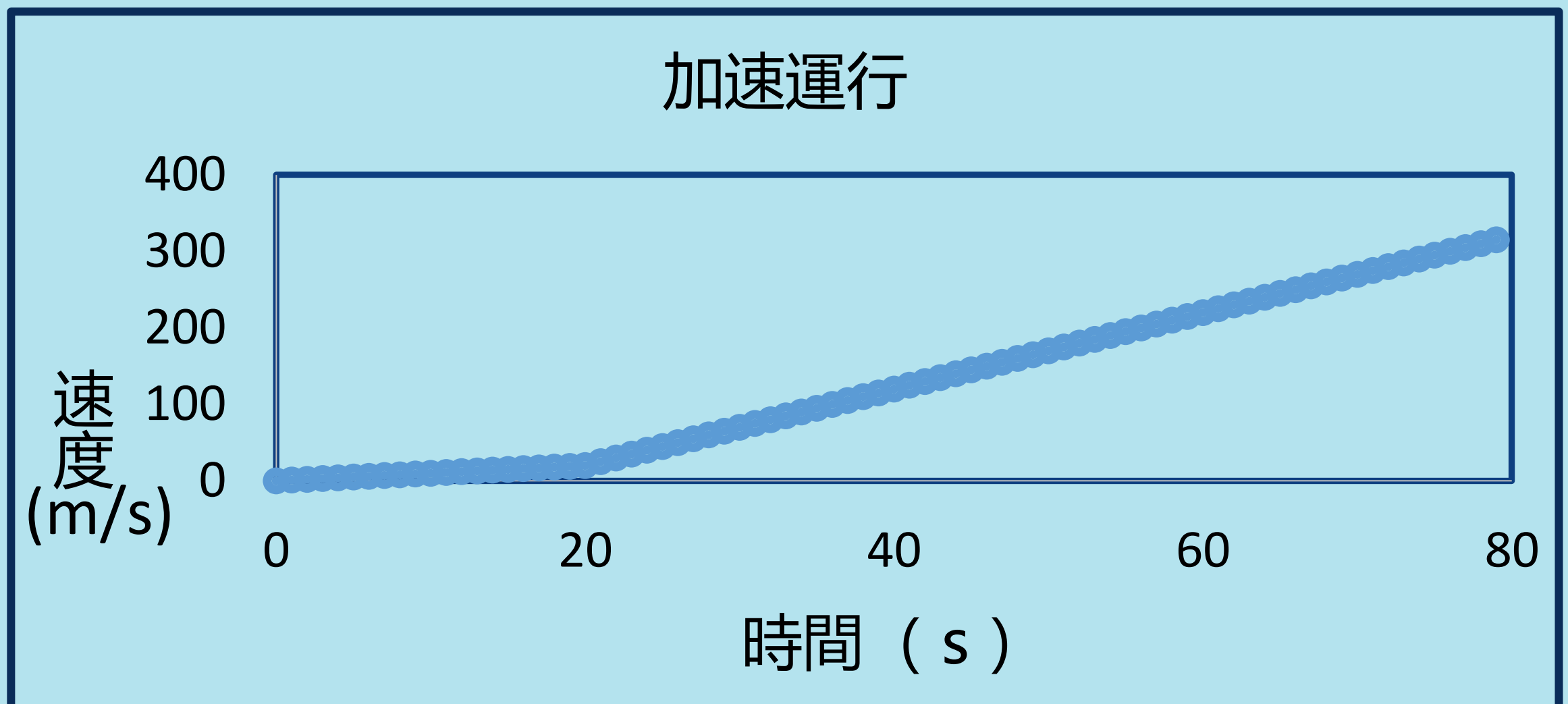
- 第一組電磁鐵：吸引時間配合初速。
- 其後電磁鐵：吸引時間配合前一組電磁鐵。
- 電磁鐵的排斥時間決定車體的運行速度
- 車體前側振動幅度變化較後側大。

運行速度實驗

- 實驗中發現改變電磁鐵吸引時間及磁力大小可控制車體的運行速度
- 電磁鐵吸引時間需與電磁鐵磁力及車體初速度配合方可使之運行不停頓。

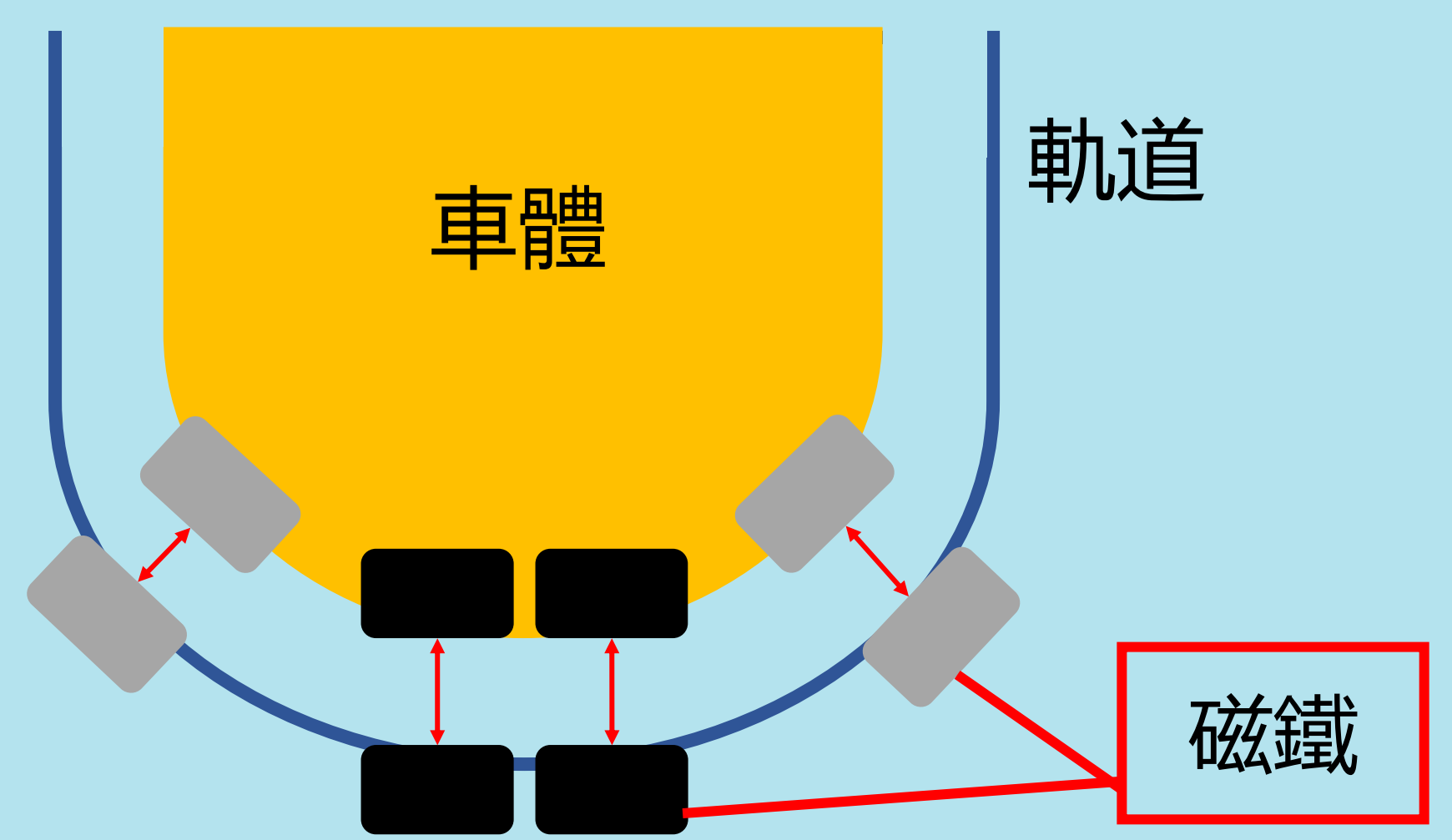
未來展望

- 控制車體運行速度



▲圖18 理想車體運行v-t圖

- 車體運動時載重
- 改變軌道形狀(彎道)
- 減少車體摩擦



▲圖19 U形軌道、車體示意圖

參考資料

- 一. 孫宏亮 & 王群. (2005). 特高頻高磁損耗材料的製備及其磁特性研究. 電子元件與材料, 24(12), 14-16.
- 二. 自然與生活科技九年級下學期. 南一書局
- 三. 高浩鈞《無線充電遠又多》。第58屆中小學科展
- 四. 紀佳茗.楊爵嘉&吳惠惠《磁力與距離之關係》。小論文
- 五. 柯若霖、蘇庭慧《奇妙的磁力現象》。第43屆中小學科展
- 六. 磁力相關原理
線圈上磁場強度的計算方法 林正雄
<https://www.tiri.narl.org.tw/Files/Doc/Publication/InstTdy/124/01240780.pdf>
維基百科 Force between magnets
https://en.m.wikipedia.org/wiki/Force_between_magnets#Magnetic_dipole-dipole_interaction

電磁鐵實驗

車體負重實驗

車體運行實驗