

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080108

懸浮前進吧！磁浮列車

學校名稱：國立臺南大學附設實驗國民小學

作者： 小四 吳柏儒 小四 王俊翰 小四 張聖哲	指導老師： 林士揚 蔡岱芬
---	-----------------------------

關鍵詞：磁力、綠能、摩擦力

摘要

我們用樂高積木自製磁浮列車，卻發現懸浮平穩沒有想像中容易，於是開始一系列有關單面牆懸浮、摩擦力與綜效磁力的實驗，想找出列車懸浮平穩的秘密。在不同材質的單面牆摩擦力實驗中，利用列車可移動的最小軌道傾斜角度畫圖估算摩擦力，並與掛砝碼最大靜摩擦力的實驗數據比較，得到一致的摩擦力結果：木頭磨光滑 < 木頭 < 壓克力 < 砂紙。

列車的懸浮高度與重量有關，懸浮平穩會有一靠牆的力，須鋪置寬軌道，列車外側磁鐵對齊軌道正上方，靠牆內側磁鐵對齊軌道左側。列車在單面牆（木頭磨光滑）成功懸浮的力平衡狀態為：靜摩擦係數 0.28，重力 59gw，正向力 12.5 gw，列車與軌道的綜效磁力 60 gw，水平夾角 78 度。最後運用電池或太陽能板加裝風扇驅動磁浮列車前進。

壹、研究動機

我們在自然與生活科技課本三上「生活中有趣的力」和四上「運輸工具與能源」中，讀到有關磁力與磁浮列車的知識，磁浮列車是利用磁鐵同極相斥異極相吸的原理讓列車浮起來，少了列車和軌道的接觸，讓摩擦力降到最低，所以車速很快。我們也在新聞媒體看到了日本磁浮列車目前達到 603 公里的驚人時速，成為世界上最先進的磁浮列車，就算有地震也不會翻倒，是一項高科技的交通運輸工具。我們對磁浮列車很好奇，想要探索磁浮列車的實驗和原理，於是三個喜歡磁浮列車的同學決定用家中的樂高玩具，打造一台手作的磁浮列車。

我們試著用樂高玩具組裝磁浮列車，卻發現懸浮沒有想像中容易，磁浮列車無法平穩一下子就掉落，直到裝上兩面牆才能維持平穩，但我們想要挑戰只

用單面牆減少摩擦力，看看如何讓磁浮列車維持懸浮平穩？在探究的過程中我們也對其中的磁力大小和方向感到好奇，所以進行一系列的研究，希望透過測量單面牆的摩擦力結果，進一步推論出看不見且不穩定的靜止瞬間磁浮列車的綜效磁力，最後我們還想試試運用太陽能來推動磁浮列車前進。

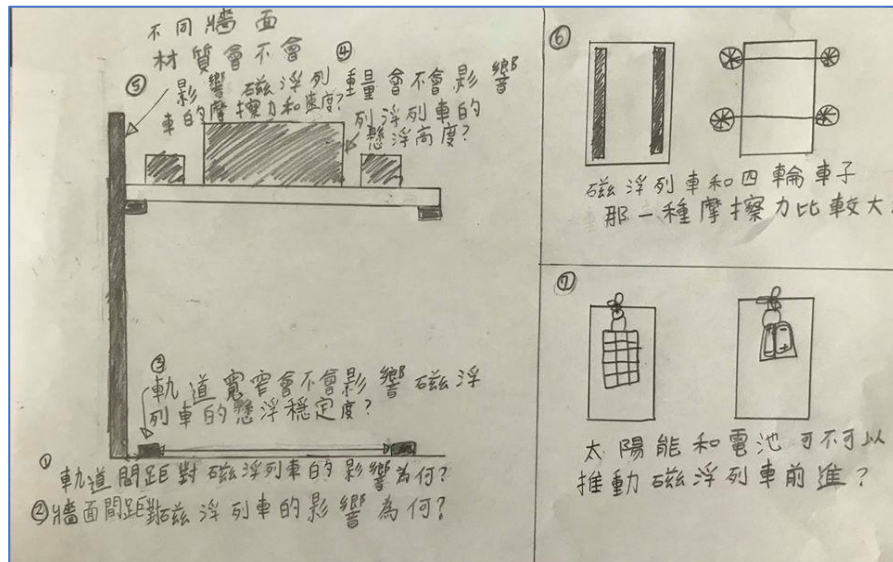


圖 1 研究構想草圖

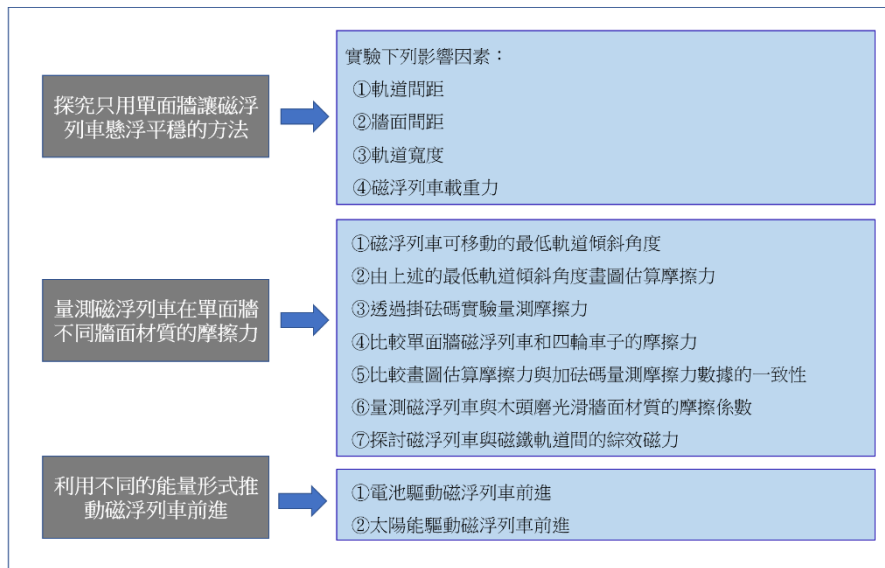




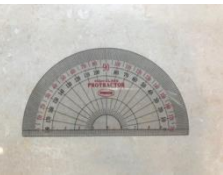

















圖 2 研究架構圖

貳、研究目的

- 一、探究只用單面牆讓磁浮列車懸浮平穩的方法。
- 二、量測磁浮列車在單面牆不同牆面材質的摩擦力。
- 三、利用不同的能量形式推動磁浮列車前進。

參、研究設備及器材

			
木板	木條	磅秤	磁鐵
			
量角器	直尺	三角板	樂高
			
樂高輪子	砂紙	投影片	止滑墊
			
水平儀	手機	泡綿膠	膠帶
			
剪刀	美工刀	槌子	鐵釘



			
定滑輪	棉線	砝碼組	電池
			
馬達	太陽能板	風扇	太陽能馬達

圖 3 研究器材

肆、研究過程或方法

一、文獻探討

- (一) 磁浮列車的懸浮方式：磁浮列車的懸浮方式分為互斥式和吸引式兩種。互斥式磁浮列車車身下方的磁力極性與軌道上的極性相同，因此會產生斥力，軌道上的磁鐵會把車身「向上推」，使車身上浮，懸浮高度可以高達 10-15 公分，日本的磁浮列車就是採用這種懸浮方式；吸引式磁浮列車車身下方的磁力極性與軌道上極性相異，軌道上的磁鐵會把列車車身「吸上來」，因此車身也會上浮，懸浮高度約 1 公分（洪國勳，2003）。

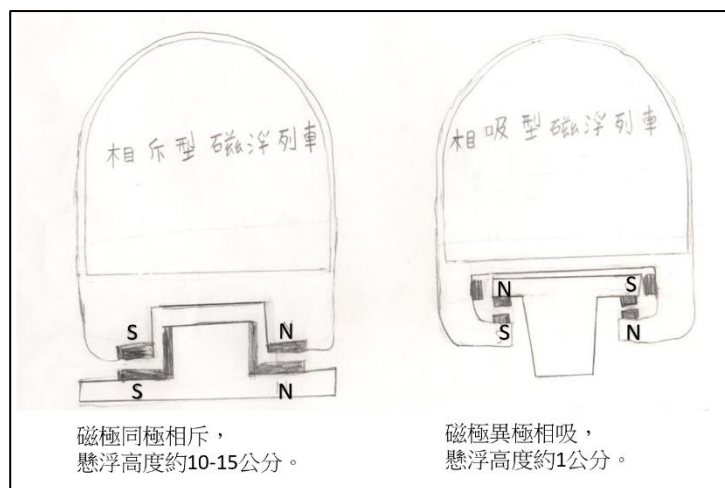


圖 4 磁浮列車的懸浮方式（研究者畫圖）

(二) **磁浮列車的前進方式**：磁浮列車前進的原理是利用磁力異極相吸、同極相斥的特性，軌道上的線圈只要於適當時間反覆地交換線圈的極性，就可以前吸後推的使列車不斷運行。此外，磁浮列車上裝有引導系統，能讓列車車身保持在軌道正上方，列車就不會左右偏離了（洪國勳，2003）。

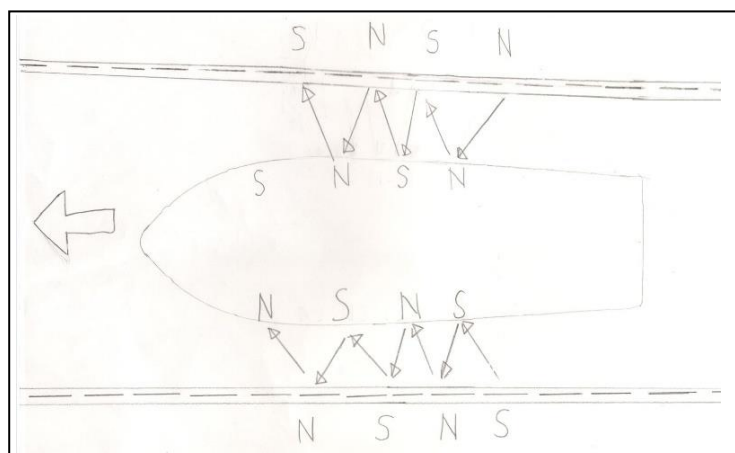


圖 5 磁浮列車的前進方式（研究者畫圖）

(三) **磁浮列車發展現況**：日本的磁浮列車是運用磁力懸浮，讓列車加速到一定程度可以不用車輪，輕輕浮起離開地面，懸浮高度達到 10 公分，具有避震的效果，目前時速最快達 603 公里，呼嘯而過的速度非常

快，從東京到名古屋只需 40 分鐘，預計 2027 年正式營運（山梨縣立磁浮列車展示中心，2020）。



圖 6 日本磁浮列車照片

（四）磁浮列車和普通火車的優缺點

我們比較日本磁浮列車和普通火車的優缺點如下表：

表 1 磁浮列車和普通火車比較表

	磁浮列車	普通火車
優點	<ol style="list-style-type: none">1. 沒有摩擦力，速度較快。2. 安靜，噪音低。3. 懸浮高度 10 公分，可以避免地震造成災害。	<ol style="list-style-type: none">1. 造價比較便宜。
缺點	<ol style="list-style-type: none">1. 使用超導體電磁鐵，必須維持零下 270 度的低溫很困難（山梨縣立磁浮列車展示中心，2020）。2. 造價昂貴。3. 須克服電磁波對乘客的影響。	<ol style="list-style-type: none">1. 使用石油和煤炭，會污染環境。2. 輪子和地板有摩擦力，速度比較慢。

資料來源：研究者整理

二、研究方法

(一) 探究只用單面牆讓磁浮列車懸浮平穩的方法。

1. 進行窄軌道的實驗，記錄不同「軌道間距」與「牆面間距」的磁浮列車懸浮穩定度。
2. 進行寬軌道的實驗，記錄不同「軌道間距」與「牆面間距」的磁浮列車懸浮穩定度。
3. 比較寬軌道與窄軌道的懸浮穩定度。
4. 找出磁浮列車在「軌道寬度」、「牆面間距」與「軌道間距」中，懸浮穩定度最佳的組合。
5. 量測磁浮列車「重量」和「懸浮高度」的關係，推估磁浮列車的載重極限。

(二) 量測磁浮列車在單面牆不同牆面材質的摩擦力。

1. 量測磁浮列車在四種牆面材質可移動的最低軌道傾斜角度。
2. 經由上述的最低軌道傾斜角度畫圖估算四種牆面材質的摩擦力。
3. 用砝碼和定滑輪量測磁浮列車在四種牆面材質的最大靜摩擦力。
4. 用砝碼和定滑輪量測四輪車子的摩擦力，並與單面牆磁浮列車的摩擦力進行比較。
5. 將畫圖估算的摩擦力與用砝碼和定滑輪量測的摩擦力進行比較，檢視數據的一致性。
6. 用砝碼和定滑輪量測磁浮列車與木頭磨光滑牆面材質的摩擦係數。
7. 探討磁浮列車與磁鐵軌道間的綜效磁力。

(三) 利用不同的能量形式推動磁浮列車前進。

1. 利用電池推動磁浮列車前進，量測前進的速度。
2. 利用太陽能推動磁浮列車前進，量測前進的速度。

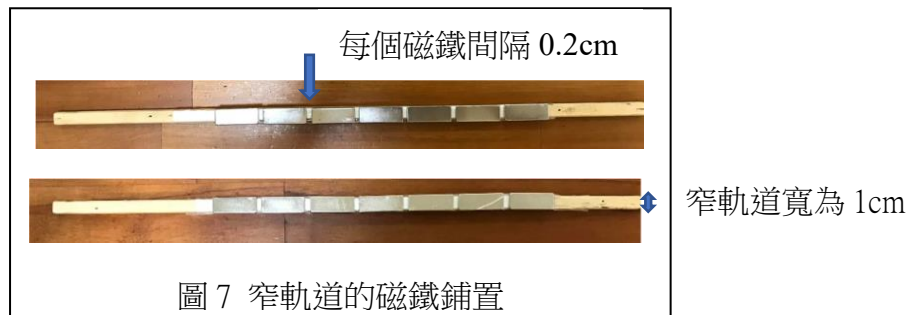
伍、研究結果

實驗 1 探究只用單面牆讓磁浮列車懸浮平穩的方法

實驗 1-1 「窄軌道」的「軌道間距」與「牆面間距」對磁浮列車懸浮穩定度的影響

(一) 實驗裝置

1. 窄軌道的鋪置：在木條上黏貼強力磁鐵（ $3\times 1\times 0.2\text{cm}$ ）成為窄軌道，每個磁鐵間隔 0.2cm ，以避免相鄰的磁鐵因相斥力量過大造成突起，完成後再貼上一層膠帶，確定磁鐵平貼於木條上。



2. 磁浮列車的組裝：用樂高積木組裝磁浮列車，重量是 106g ，背面用強力磁鐵貼上兩條磁鐵，每條貼上四個磁鐵，每個磁鐵間隔 0.2cm ，總共八個磁鐵，總重量為 106.8g 。

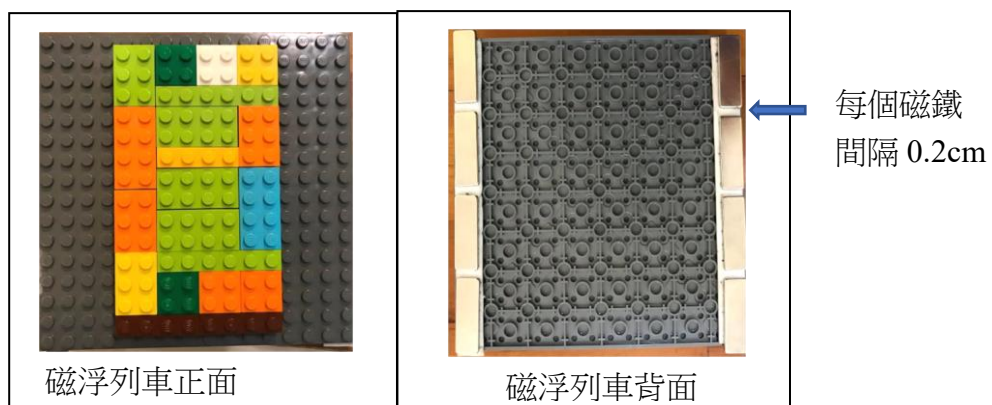


圖 8 磁浮列車的組裝

(二) 實驗步驟

1. 窄軌道間距：設為 10cm、10.5cm、11cm



分別把兩條窄軌道間距設為
10cm、10.5cm、11cm

2. 牆面間距：設為 0cm、0.5cm、1.0cm

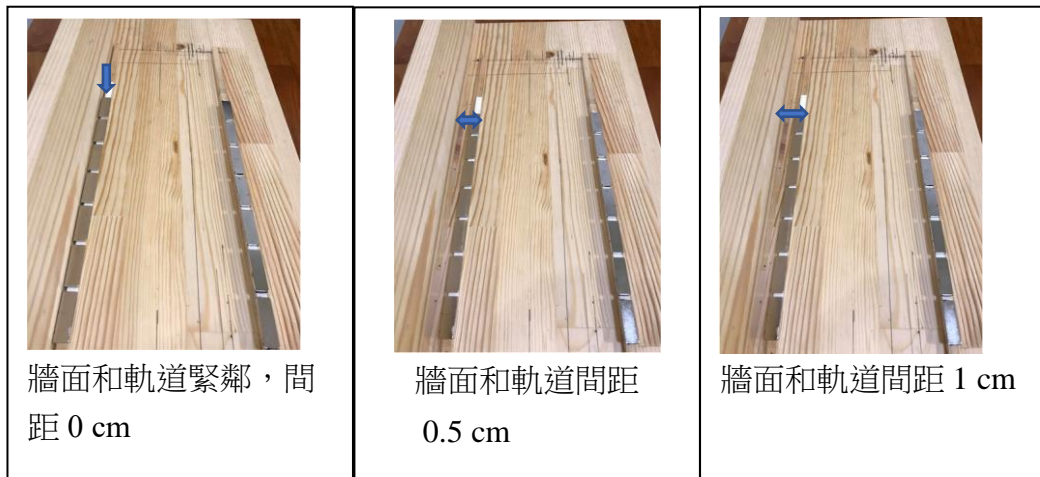


圖 10 牆面間距

3. 將磁浮列車靠牆平放實驗 5 次，看看磁浮列車能不能成功懸浮？其中五次磁浮列車都成功懸浮記為「○」，5 次實驗只有 1-4 次成功懸浮記為「△」，5 次實驗磁浮列車全都無法懸浮記為「×」。

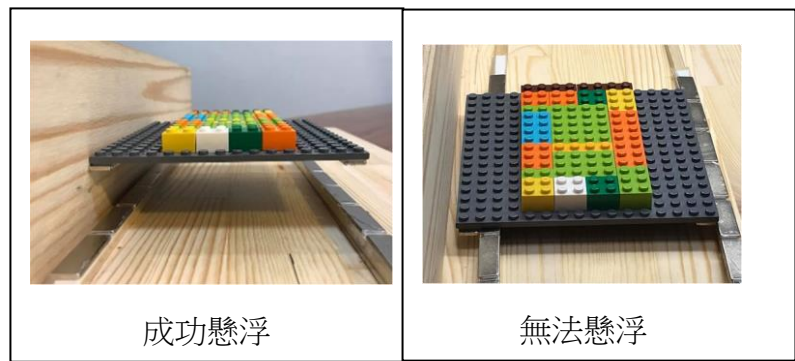


圖 11 懸浮結果判定

(三) 實驗結果

窄軌道時「牆面間距」0.5cm，配合「窄軌道間距」為 10cm 和 10.5cm 懸浮得最穩，也就是牆面與軌道距離 0.5cm，軌道間距稍微小於或等於磁浮列車磁鐵間距懸浮效果最好。

表 2 磁浮列車在「窄軌道間距」與「牆面間距」的「懸浮穩定度」

窄軌道間距	牆面間距		
	0cm	0.5cm	1.0cm
10cm	X	○	△
10.5cm	X	○	X
11cm	△	X	X

- 成功（5 次實驗磁浮列車全都成功懸浮）
- △ 不穩（5 次實驗磁浮列車只有 1-4 次成功懸浮）
- X 失敗（5 次實驗磁浮列車全都無法懸浮）

(四) 困難解決

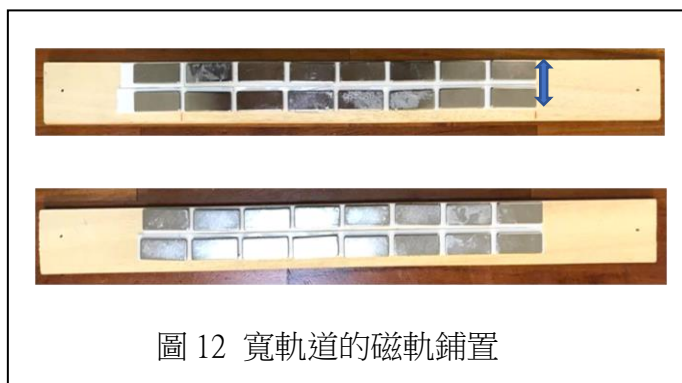
1. 磁鐵的黏貼原本採用緊密相接的方式，但發現磁鐵的同極相斥造成黏貼上的困難，就算勉強緊密黏貼在一起也很快因為相斥造成磁鐵凸起或扭曲，無法成為平整的軌道。於是我們改成每個磁鐵間隔 0.2cm 進行黏貼，才解決軌道鋪置的問題。

2. 兩條窄軌道原本使用魔鬼氈固定兩端，以方便進行各種間距的實驗，但發現魔鬼氈黏性不夠，容易受到強力磁鐵的吸引而移位，實驗中常常無法準確固定間距，於是我們改用黏土膠帶固定兩條軌道，同樣發現軌道會被磁鐵吸引而移位，最後決定改用鐵釘釘住兩條軌道，終於能完全固定軌道，雖然釘釘子和拔釘子都比較麻煩，但卻可以成功解決軌道無法固定的問題，讓我們成功完成實驗。
3. 單面牆並沒有固定在底板上，因為要進行與軌道間距的實驗，例如間距 0cm 時單面牆緊靠鐵軌，而間距 0.5cm 時須與鐵軌間隔 0.5cm 放置，但在實驗中常常發現單面牆不是很穩定，也間接影響了磁浮列車的懸浮穩定度，後來我們在單面牆後方放置長方體物品（例如保鮮膜盒），才成功將單面牆穩定固定於底板上。

實驗 1-2 「寬軌道」的「軌道間距」與「牆面間距」對磁浮列車懸浮穩定度的影響

（一）實驗裝置

1. 寬軌道的鋪置：寬軌道比窄軌道的寬度大，單軌道為一個強力磁鐵的寬度 1cm，寬軌道包括兩個強力磁鐵的寬度，加上每個磁鐵間隔 0.2cm，總共寬達 2.2cm。



寬軌道寬為 2.2cm

圖 12 寬軌道的磁軌鋪置

2. 磁浮列車的組裝；同窄軌道的磁浮列車。

(二) 實驗步驟

1. 分別把兩條寬軌的「軌道間距」排成 7.5-9.5cm，用鐵釘把兩條寬軌道固定在木板上。把「牆面間距」排成 0cm、0.5cm、1.0cm，並在牆面後方用長方體物品固定牆面。
2. 把磁浮列車靠牆放在軌道上實驗 5 次，看看磁浮列車是否能成功懸浮。
5 次實驗磁浮列車都成功懸浮記為「○」，5 次實驗只有 1-4 次成功懸浮記為「△」，5 次實驗全都無法懸浮記為「X」。

(三) 實驗結果

磁浮列車在下列組合時都能成功懸浮。(1)「牆面間距」為 0cm 時，「寬軌道間距」為 8.0cm、8.5cm、9.0cm 能懸浮平穩。(2)「牆面間距」0.5cm 時，「寬軌道間距」為 7.5cm、8.0cm、8.5cm 能懸浮平穩。我們發現寬軌道比窄軌道更容易達到成功懸浮，在許多軌道間距和牆面間距都能成功懸浮，因此本研究之後的實驗都採用「寬軌道」，配合「牆面間距」0cm 和「寬軌道間距」8.5cm，成為之後磁浮列車的軌道裝置模型。

表 3 磁浮列車在「寬軌道間距」與「牆面間距」的「懸浮穩定度」

寬軌道間距	牆面間距		
	0cm	0.5cm	1.0cm
7.5cm	X	○	X
8.0 cm	○	○	X
8.5 cm	○	○	X
9.0cm	○	X	X
9.5cm	X	X	X

○ 成功（5 次實驗磁浮列車全都成功懸浮）

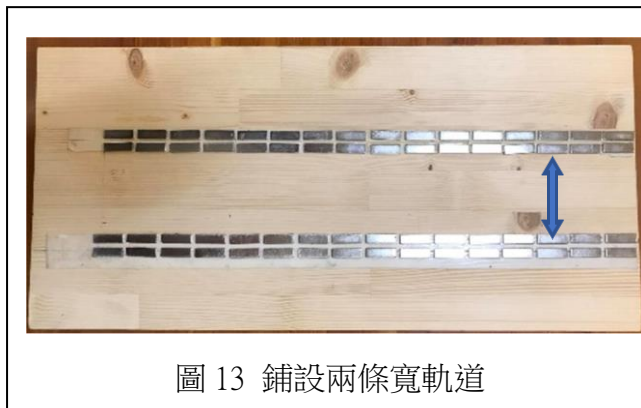
X 失敗（5 次實驗磁浮列車全都無法懸浮）

圈選處為之後實驗採用的寬軌道間距與牆面間距

實驗 1-3 磁浮列車「重量」和「懸浮高度」的關係

(一) 實驗裝置

1. 軌道鋪置：採用寬軌道的磁浮列車能懸浮平穩的實驗結果，在木板上粘貼長方形強力磁鐵（ $3\times 1\times 0.2\text{cm}$ ），成為兩條寬軌道，每個磁鐵間隔 0.2cm ，成為寬 2.2cm 和長 58cm 的兩條寬軌道。
2. 軌道間距：採用寬軌道的磁浮列車能懸浮平穩的實驗結果，軌道間距訂為 8.5cm 。



3. 牆面間距：同樣採用寬軌道的磁浮列車能懸浮平穩的實驗結果，牆面間距訂為 0cm 。



(二) 實驗步驟

在樂高組裝的磁浮列車上，平均的加入樂高積木增加重量，測量懸浮高度的變化。原車是樂高組裝的磁浮車，重量是 106.8g；A 車是原車上加入樂高積木，重量增加到 140.6g；B 車是 A 車上再加入樂高積木，重量增加到 174.2g；C 車是 B 車上再加入樂高積木，重量增加到 214.6g。分別測量四個不同重量磁浮列車的懸浮高度並記錄下來。

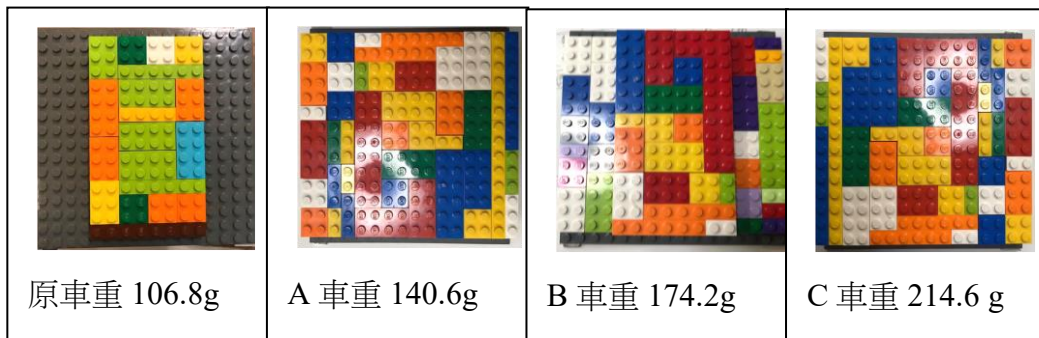


圖 15 四種不同重量的磁浮列車

(三) 實驗結果

磁浮列車的重量越重，懸浮高度越低；磁浮列車的重量越輕，懸浮高度就越高。原車重量 106.8g，懸浮高度為 3.2cm；A 車 140.6 g 懸浮高度降到 2.6 cm；B 車重量 174.2g 懸浮高度降到 2.2 cm；C 車重量 214.6 g 懸浮高度再降到 1.7 cm。

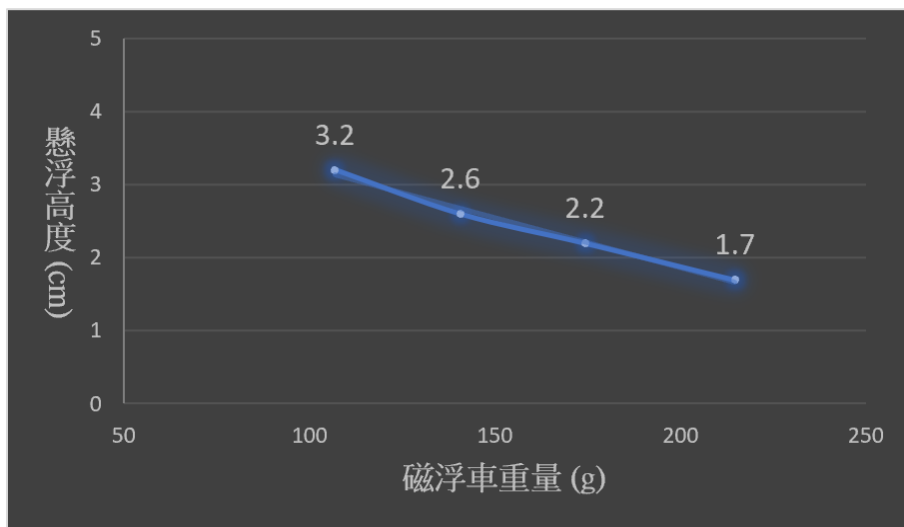


圖 16 磁浮列車「重量」和「懸浮高度」的關係圖

實驗 2 量測磁浮列車在單面牆不同牆面材質的摩擦力

實驗 2-1 不同「牆面材質」磁浮列車可以移動的「最低軌道傾斜角度」

(一) 實驗裝置

1. 軌道鋪設同實驗 1-3。
2. 製作四種牆面材質：木頭、木頭磨光滑、壓克力、砂紙

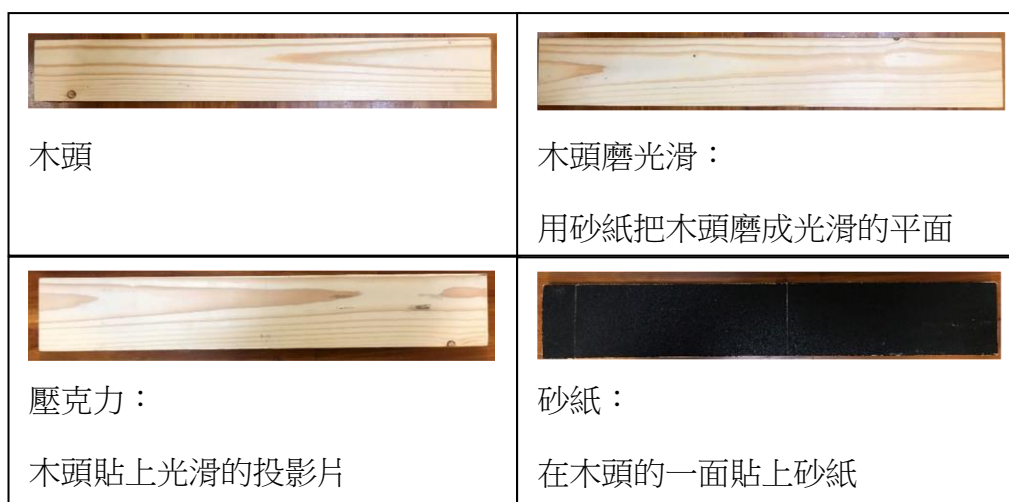


圖 17 四種單面牆的材質

3. 製作磁浮列車：採用較輕薄的樂高底板，加上磁鐵總重量為 59g。
4. 將水平儀固定在軌道底板上。

(二) 實驗步驟





1. 以「木頭」為牆面材質，用水平儀慢慢調整木板角度，測試車子能移動的最小角度為止，看水平儀上面的角度並記錄下來。
2. 依序完成其他牆面材質的記錄。



(三) 實驗結果

磁浮列車搭配「木頭磨光滑」當牆面材質時，最低軌道傾斜角度 3.6 度可以開始前進；「木頭」當牆面材質時，傾斜 5.5 度開始前進；「壓克力」當牆面材質時，傾斜 6.2 度可以前進；「砂紙」當牆面材質時，需要傾斜到 15.3 度才可以前進。

表 4 四種牆面材質磁浮列車可以移動的最低軌道傾斜角度

最低軌道傾斜角度	單面牆的牆面材質			
	木頭	木頭磨光滑	壓克力	砂紙
第 1 次 (度)	6.5	4	6	15
第 2 次 (度)	5.5	4	6	16
第 3 次 (度)	5.5	4	6	15
第 4 次 (度)	5	3	7	15
第 5 次 (度)	5	3	6	15.5
平均 (度)	5.5	3.6	6.2	15.3
實驗照片				

(四) 畫圖估算摩擦力

我們試著把磁浮列車四種牆面材質的最低軌道傾斜角度，運用畫圖的方式估算摩擦力，以牆面材質木頭為例，首先畫一個傾斜角度的直角三角形，傾斜角度畫 5.5 度，在車子下方畫一條垂直地板的重力線 59mm 代表 59gw 的磁浮列車，用直角三角形畫出下滑力，再畫出方向相反的摩擦力，測量摩擦力的長度為 6mm，得到摩擦力是 6gw，其它的牆面材質也用同樣的畫法算出摩擦力，得到牆面材質的摩擦力大小為：木頭磨光滑 (4gw) < 木頭

(6gw) < 壓克力 (7gw) < 砂紙 (15gw)。

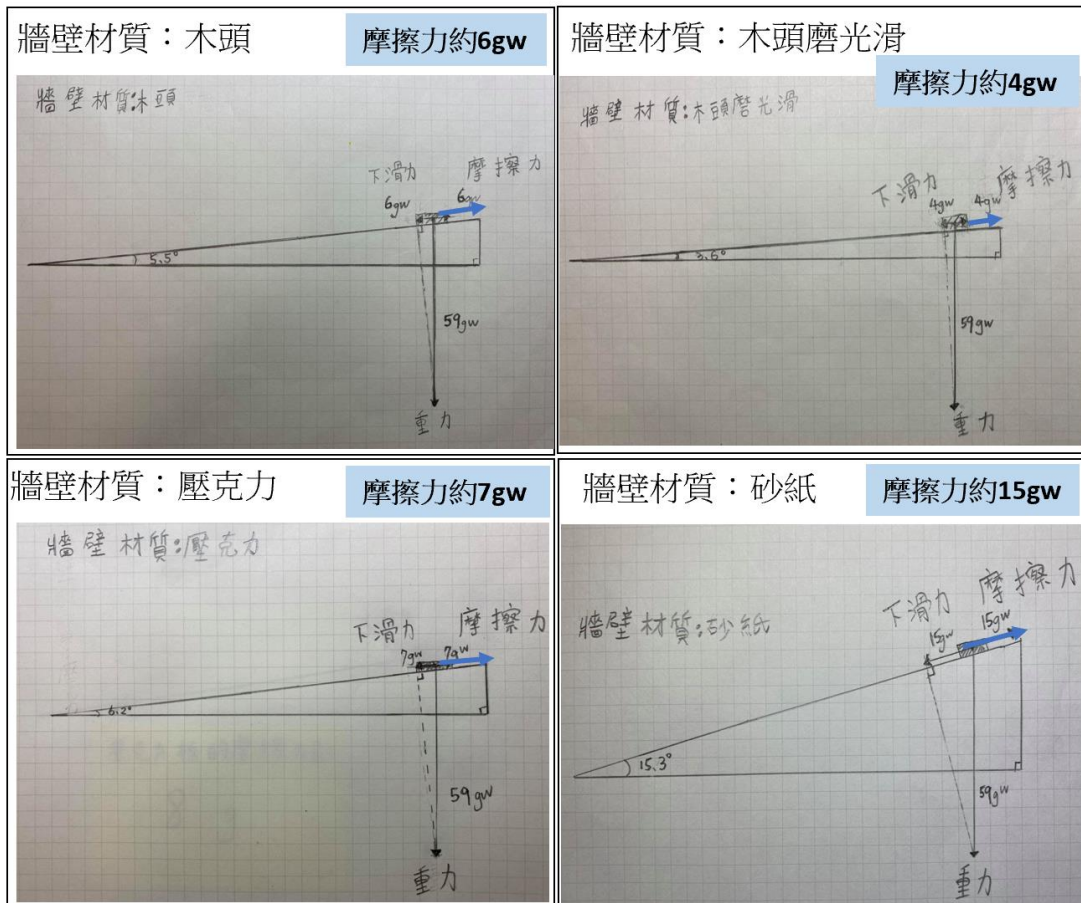


圖 19 從最低軌道傾斜角度畫圖估算摩擦力圖

實驗 2-2 不同「牆面材質」磁浮列車的「最大靜摩擦力」實驗

(一) 實驗裝置

1. 架設摩擦力的實驗裝置：把底座、支架、棉線和定滑輪固定好位置，棉線位置須與磁浮列車水平。



圖 20 最大靜摩擦力的實驗裝置

(二) 實驗步驟

1. 棉線一端黏在磁浮列車上，另一端加砝碼直到磁浮列車剛開始移動為止，記錄砝碼的重量。
2. 依序完成各種牆面材質的實驗。

(三) 實驗結果

四種牆面材質的最大靜摩擦力實驗結果發現「木頭磨光滑」當牆面材質時摩擦力最低，只要平均 3g 的砝碼重量；其次是「木頭」當牆面材質，摩擦力為平均 6g 的砝碼重量；再其次為「壓克力」當牆面材質，摩擦力為平均 7g 的砝碼重量；最後才是「砂紙」當牆面材質，摩擦力為平均 16.2g 的砝碼重量。

表 5 四種牆面材質磁浮列車的最大靜摩擦力實驗結果

最大靜摩擦力實驗的 砝碼重量	磁浮列車牆面材質			
	木頭	木頭磨光滑	壓克力	砂紙
第 1 次 (g)	6	3	7	16
第 2 次 (g)	6	3	7	16
第 3 次 (g)	6	3	7	16
第 4 次 (g)	6	3	7	16
第 5 次 (g)	6	3	7	17
平均 (g)	6	3	7	16.2

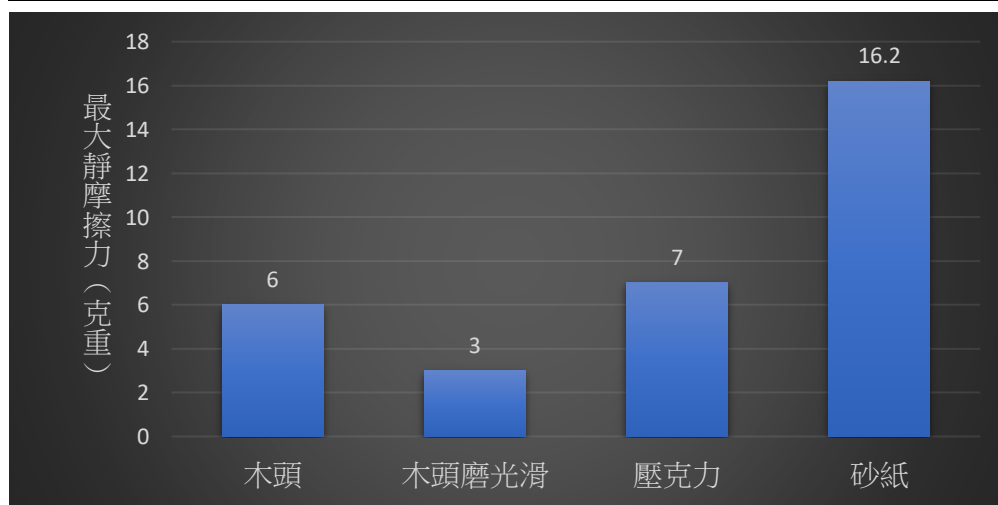


圖 21 四種牆面材質磁浮列車的最大靜摩擦力

實驗 2-3「磁浮列車」與「四輪車子」的最大靜摩擦力實驗

(一) 實驗裝置

1. 架設摩擦力的實驗裝置：同實驗 2-2。
2. 製作四輪車子：把輕薄的樂高底板加上四個輪子製作成為四輪車子，然後加上積木使重量和磁浮列車一樣為 59g。

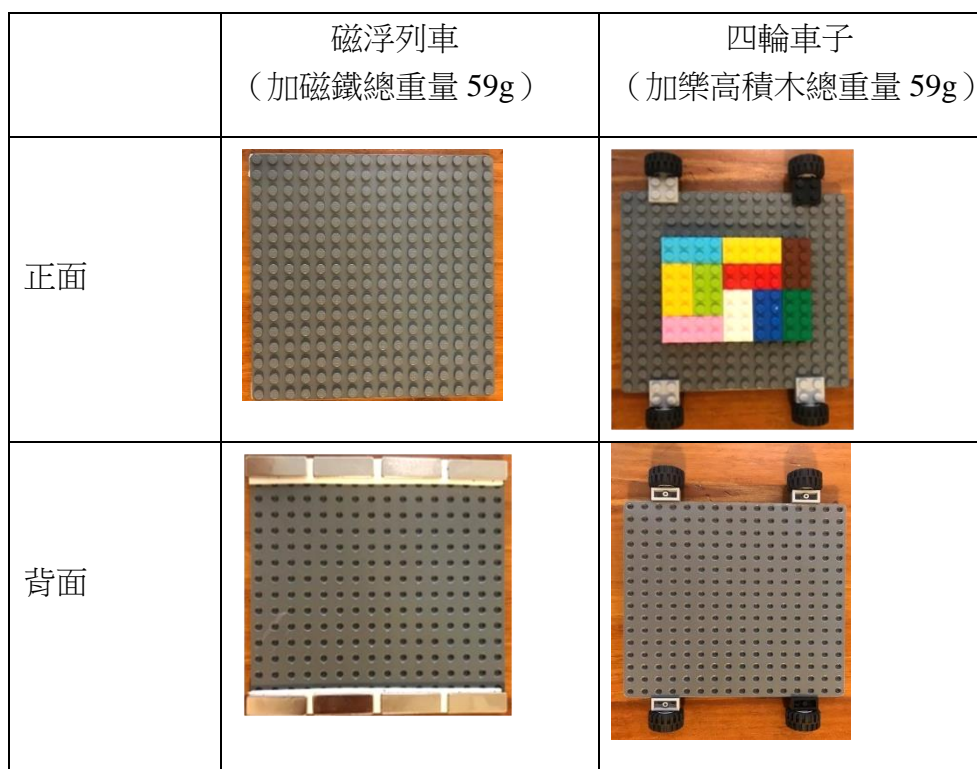


圖 22 磁浮列車和四輪車子的組裝

(二) 實驗步驟

1. 棉線一端黏在四輪車子上，另一端加砝碼直到四輪車子剛開始移動為止，記錄砝碼的重量。

(三) 實驗結果

磁浮列車和四輪車子的最大靜摩擦力實驗結果為：磁浮列車為 3gw，四輪車子為 7.4gw，所以磁浮列車的最大靜摩擦力較小。

表 6 磁浮列車和四輪車子的最大靜摩擦力

最大靜摩擦力	磁浮列車	四輪車子
第 1 次 (gw)	3	7
第 2 次 (gw)	3	8
第 3 次 (gw)	3	8
第 4 次 (gw)	3	7
第 5 次 (gw)	3	7
平均 (gw)	3	7.4

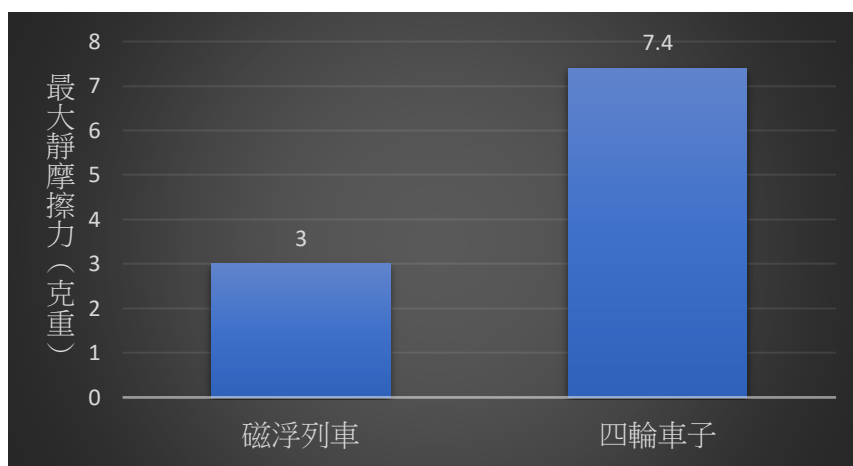


圖 23 磁浮列車和四輪車子的最大靜摩擦力圖

實驗 2-4 「木頭磨光滑」牆面材質的摩擦係數實驗

(一) 實驗裝置

1. 架設摩擦力的實驗裝置：同實驗 2-2。
2. 把磁浮列車底板靠牆面向下，用膠帶將兩片或三片的底板黏貼，使底板的側面能立於木頭磨光滑的牆面上。

(二) 實驗步驟

1. 棉線一端黏在磁浮列車底板，另一端加砝碼直到底板剛開始移動為止，記錄砝碼的重量。



圖 24 摩擦係數實驗

(三) 實驗結果

磁浮列車底板數 2 片重量 50.35g 表示正向力為 50.35gw，五次砝碼重量平均為 13.8g 表示最大靜摩擦力為 13.8gw，帶入摩擦力的公式進行計算

$f_{s,MAX}$ (最大摩擦力) = μ_s (靜摩擦係數) × N (正向力)，得到摩擦係數為 0.274。接著用同樣的方法測量磁浮列車底板數 3 片的摩擦係數，求得摩擦係數為 0.287，兩者的平均值為 0.28，也就是磁浮列車底板與木頭磨光滑牆面的摩擦係數 (μ) 為 0.28。

表 7 磁浮列車底板與「木頭磨光滑」牆面材質的最大靜摩擦力

最大靜摩擦力實驗的 砝碼重量	磁浮列車底板數量 (重量 g)	
	2 片 (50.35g)	3 片 (加磁鐵 103.8g)
第 1 次 (g)	15	30
第 2 次 (g)	14	29
第 3 次 (g)	13	31
第 4 次 (g)	14	30
第 5 次 (g)	13	29
平均 (g)	13.8	29.8
摩擦係數 (μ)	0.274	0.287

實驗 3 利用不同的能量形式推動磁浮列車前進

實驗 3-1 電池驅動磁浮列車

(一) 實驗裝置

1. 使用文具店購買的教學燈泡馬達組 (編號 JD-I-43-1)，把其中附開關電池座電線連接到馬達，再接上黃色風扇，維持平衡固定於磁浮列車上。

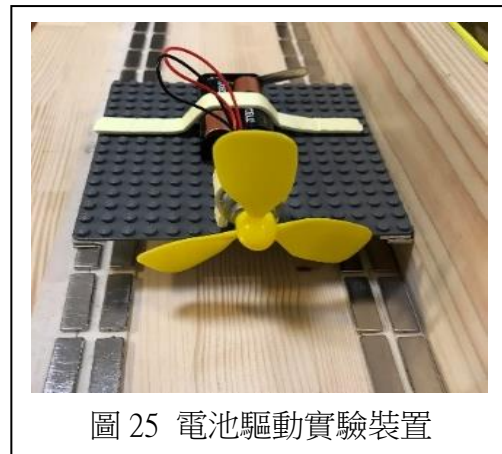


圖 25 電池驅動實驗裝置

2. 軌道板和磁浮列車同實驗二，單面牆材質使用木頭磨光滑。

(二) 實驗步驟

1. 打開電池的開關讓磁浮列車前進，注意要讓磁浮列車保持前後、左右平衡，風扇不可打到車體以及牆壁。
2. 用碼錶計時磁浮列車行進 10 公分距離所需的秒數共 5 次。

(三) 實驗結果

使用電池加風扇驅動磁浮列車（2 顆電池、馬達、風扇、車體底板總重量為 137g），記錄前進 10cm 距離的時間，得到每秒平均前進 1.79cm，換算成每分鐘約可達 107.4cm 的速度，換算成時速約為每小時 64.44m。

表 8 電池加風扇驅動磁浮列車速度

電池 驅動實驗	行進 10 公分距離的時間 (s)	速度 (cm/s)	實驗照片
第 1 次	5.88	1.70	
第 2 次	5.59	1.79	
第 3 次	5.28	1.89	
第 4 次	5.05	1.98	
第 5 次	6.29	1.59	
平均	5.62	1.79	

(四) 困難解決

1. 我們發現風扇轉動不一定能讓磁浮列車前進，因為磁浮列車的重量太重，後來我們試著把磁浮列車的重量減到最輕，並試了不同的風扇組合，最後發現藍色的小風扇無法帶動磁浮列車前進，但改試了黃色風扇的風力較強，終於能帶動磁浮列車前進。
2. 有幾次我們發現磁浮列車不會前進，甚至有一點倒退，試了幾次我們才知道是由於電線接錯方向，風扇轉向為反向自然無法前進，後來我

們都會先在風扇前方用手感受是否有風，有風代表電線裝對方向，磁浮列車可以順利前進。

實驗 3-2 太陽能驅動磁浮列車

(一) 實驗裝置

1. 太陽能板：型號 SP1510，電壓 7.5V，電流 60mA，尺寸寬 145mm/長 95mm/厚 2mm。
2. 太陽能直流馬達：型號 RF2060，電壓 0.5-6V，電流 20-60mA，轉速 1300rpm。

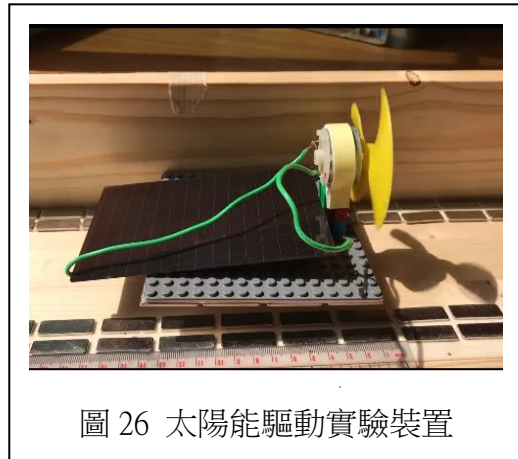


圖 26 太陽能驅動實驗裝置

3. 太陽能板、太陽能直流馬達、風扇和車體底板總重量為 180g。把太陽能板連接到太陽能直流馬達，接上風扇，維持平衡固定於磁浮列車上。
4. 軌道板、牆面和磁浮列車同實驗 3-1。

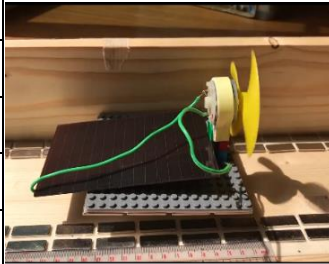
(二) 實驗步驟

1. 挑選中午約 11:30-12:30 太陽光強烈的時間，太陽能板對準太陽光直射方向，帶動風扇轉動。
2. 注意讓磁浮列車保持前後、左右平衡，風扇不可打到車體以及牆壁。
3. 用手機錄影 5 次磁浮列車行進的距離和時間。

(三) 實驗結果

運用太陽能驅動磁浮列車，太陽照度會影響磁浮列車行進的速度。我們計算了 5 次行進的速度，算出磁浮列車平均每秒可走 0.15cm，換算成每分鐘約可跑 9cm，換算成時速約為每小時 5.4m。

表 9 太陽能加風扇驅動磁浮列車速度

太陽能 驅動實驗	行進距離 (cm)	時間 (s)	速度 (cm/s)	實驗照片
第 1 次	2.8	12	0.23	
第 2 次	3	18	0.17	
第 3 次	4	36	0.11	
第 4 次	6	60	0.1	
第 5 次	5	38	0.13	
平均	4.16	32.8	0.15	

(四) 困難解決

1. 我們起先是用一般電扇的馬達，結果完全無法透過太陽能板驅動而失敗，後來我們改用太陽能專用的馬達才能成功讓風扇轉動。
2. 我們也發現早晨或下午常常日照不夠強烈，所以太陽能無法帶動磁浮列車前進，但在日照強烈的中午卻能成功讓磁浮列車前進，雖然速度很慢，但試了好多次終於能成功前進了。

陸、討論

一、磁浮列車懸浮平穩的軌道鋪置

我們用家中的樂高玩具組裝磁浮列車發現懸浮沒有想像中的容易，如何讓磁浮列車穩定懸浮於磁軌上，是我們花最多時間在解決的問題，過去的研究已經發現加裝兩面牆可以維持列車平穩，但我們認為兩面牆的接觸面積過大會增加摩擦力，所以試著拿掉一面牆卻發現困難重重，磁浮列車常會不穩墜落，但某些時候又好像可以懸浮成功，關鍵似乎在於有一點往牆面靠的力，我們發現「軌道寬度」、「牆面間距」與「軌道間距」是控制懸浮平穩的三個因素。

- (一) 軌道寬度：我們發現磁鐵軌道越寬，上方的磁浮列車越容易懸浮平穩，實驗中寬軌道 2.2cm 成功懸浮的組合明顯多於窄軌道 1.0cm，可見寬軌道可以提升磁浮列車的懸浮穩定度。
- (二) 牆面間距：寬軌道實驗中發現牆面間距為 0cm 或者 0.5cm，磁浮列車都可成功懸浮，但由於本實驗的牆面是採用組合的方式，方便實驗更換不同牆面，所以最後決定使用牆面間距 0cm，牆面直接緊鄰軌道，方便實驗的操作，並維持牆面的垂直平穩。
- (三) 軌道間距：在寬軌道牆面間距為 0cm 時，軌道間距為 8.0cm、8.5cm、9.0cm 都可成功懸浮，我們取中間值 8.5cm 作為軌道間距鋪設的依據，以確保磁浮列車即使有 0.5cm 的偏移時，仍可以懸浮平穩。

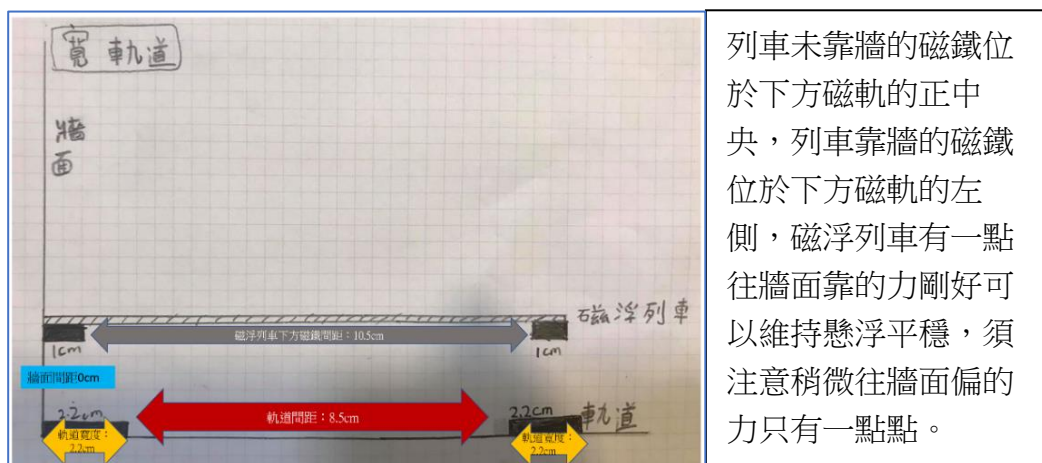


圖 27 列車磁鐵與軌道磁鐵的鋪設圖

二、磁浮列車的載重力

磁浮列車的重量越重，懸浮高度就越低；磁浮列車的重量越輕，懸浮高度越高。磁浮列車必須使磁鐵的斥力大於磁浮列車的重量，才會浮起來；如果磁浮列車的重量大於或等於磁鐵的斥力，就會浮不起來。我們用實驗的數據，以電腦軟體 excel 畫出趨勢線，發現這台磁浮列車的載重極限是 335g，此刻的懸浮高度為零，也就是重量與斥力相等，所以磁浮列車浮不起來，要讓磁浮列車懸浮一定要控制重量小於 335g 才行，之後加裝電扇和太陽能板更須盡量減輕磁

浮列車重量，讓懸浮高度足以容納電扇轉動的空間才行。

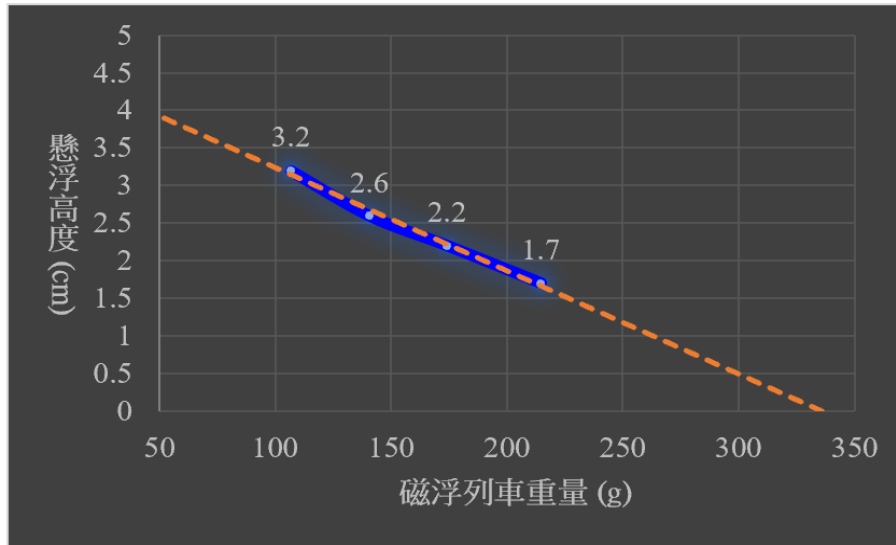


圖 28 磁浮列車重量與懸浮高度的趨勢圖

三、四種牆面材質的摩擦力

我們量測磁浮列車在四種牆面材質可以移動的最低軌道傾斜角度，運用畫圖的方式估算摩擦力，為了確定畫圖估算的摩擦力是否正確，我們又進行了加砝碼的最大靜摩擦力實驗，想驗證畫圖估算的摩擦力數據是否正確，結果發現兩者的實驗結果具有一致性，摩擦力大小的結果都是：木頭磨光滑 < 木頭 < 壓克力 < 砂紙。

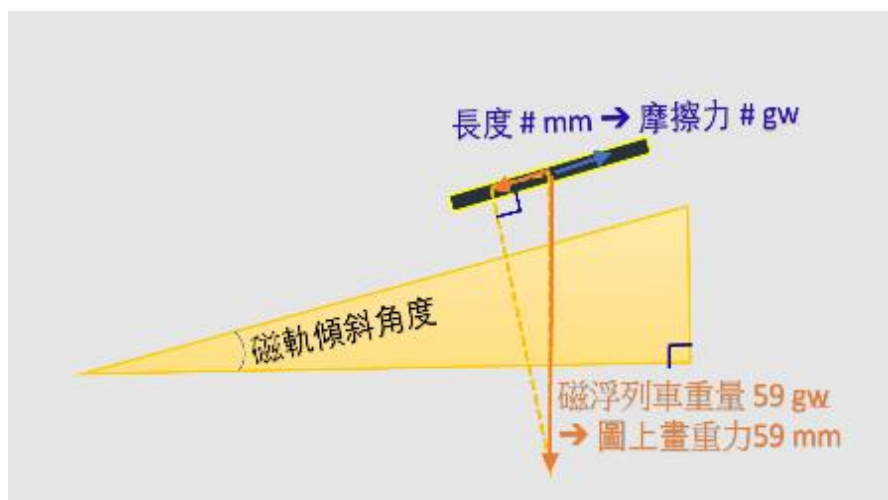


圖 29 畫圖估算摩擦力的方法圖

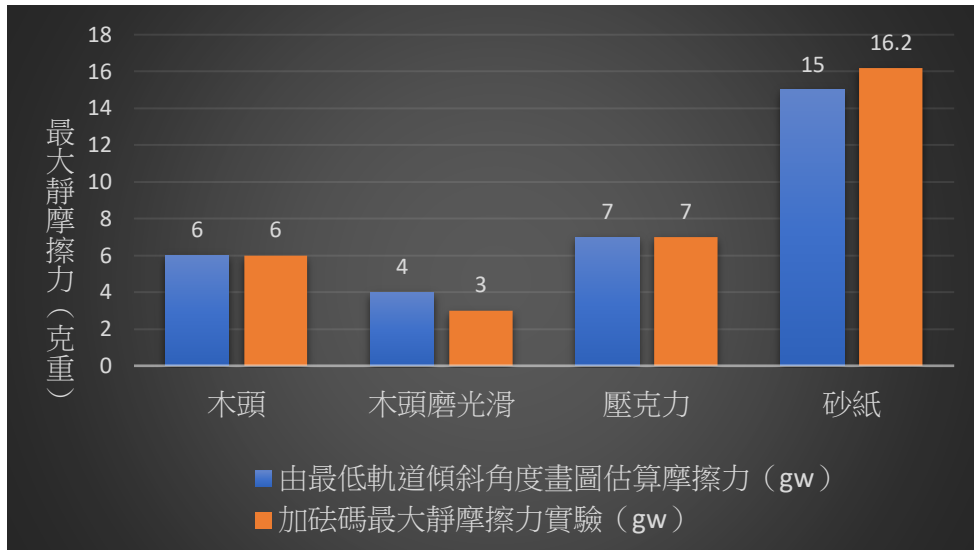


圖 30 兩種最大靜摩擦力實驗結果比對圖

四、摩擦係數與綜效磁力的分析

磁浮列車在木頭磨光滑的摩擦力，我們取最低軌道傾斜角度畫圖估算與掛砝碼最大靜摩擦力 ($f_{s,max}$) 實驗數據的平均值為 3.5 gw，並與靜摩擦係數 (μ_s) 為 0.28 進行計算，可得到正向力 (N) 為 12.5 gw。

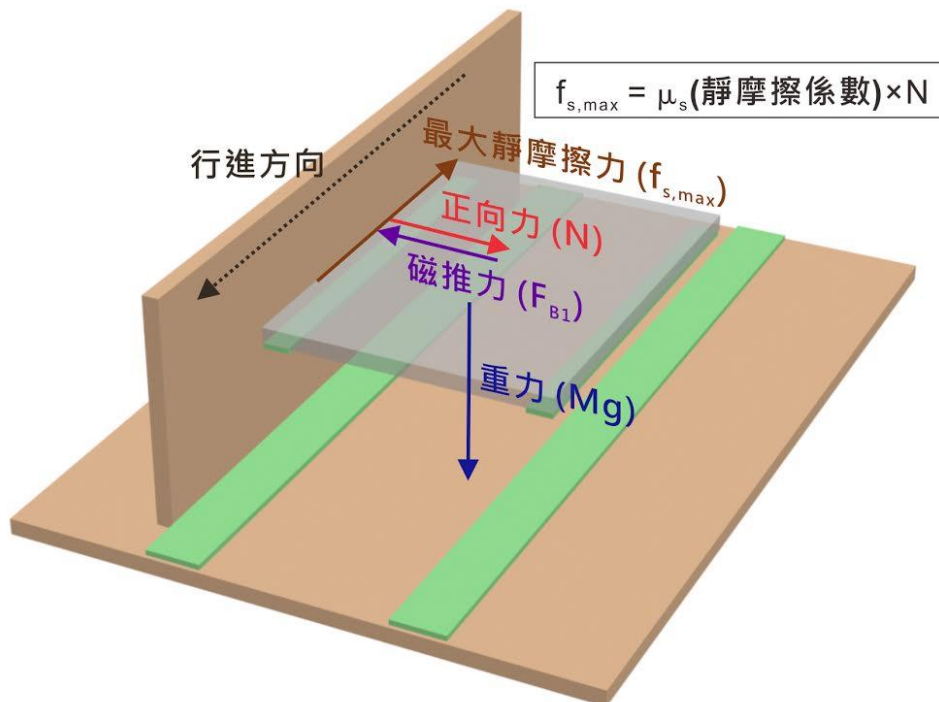


圖 31 單面牆摩擦力的分析圖

接著考慮磁浮列車在單面牆（木頭磨光滑）成功懸浮的力平衡狀態，我們用畫圖估算斜邊長度，算出綜效磁力（ F_B ）約為 60gw，並用量角器測得水平夾角為 78 度。接著我們利用畢氏定理再次檢查驗證畫圖估算的結果，由於 $F_{B1}^2 + F_{B2}^2 = F_B^2$ 可得軌道與列車間綜效磁力的大小約為 60.31 gw，此數據結果也與畫圖結果一致。

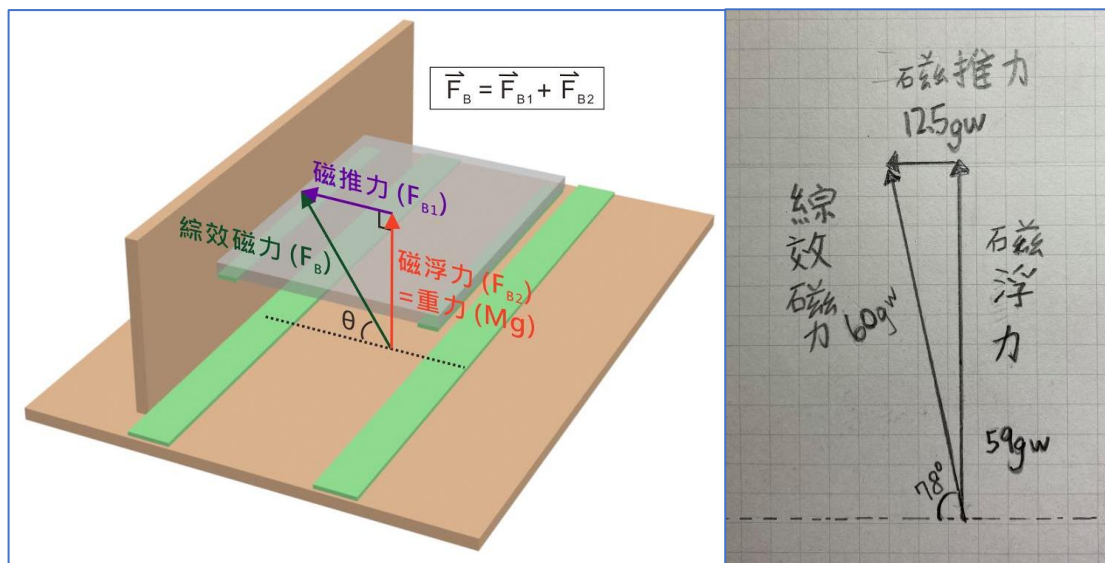


圖 32 綜效磁力示意圖

五、利用不同的能量形式推動磁浮列車前進

太陽能為綠色能源，能有效減少環境的污染，實驗中確定太陽能可以驅動電扇使磁浮列車前進，只是太陽能無法提供穩定的電能，我們在實驗中也發現穩定的電能例如電池可達到時速約 64.44m 的速度。如果未來能將太陽能儲存至太陽能電池做最有效的運用，太陽能磁浮列車就是最佳的環保綠能交通。

柒、結論

- 一、在軌道和牆面的鋪置上，磁浮列車未靠牆的右側必須正對於軌道上方；靠牆的左側位於軌道左側，單面牆必須緊靠軌道或者與軌道間距 0.5 cm，磁浮列車有一點往牆面靠的力剛好可以維持懸浮平穩。
- 二、磁浮列車在寬軌道的懸浮穩定度優於窄軌道。
- 三、磁浮列車的重量越重，懸浮高度越低，由實驗數據推估磁浮列車的載重極限為 335g。
- 四、無論是從磁浮列車最低軌道傾斜角度畫圖估算摩擦力，或是掛砝碼最大靜摩擦力的實驗數據，都可獲得一致的結果為：磁浮列車在四種牆面材質的摩擦力大小為：木頭磨光滑 < 木頭 < 壓克力 < 砂紙，「木頭磨光滑」是最佳的單面牆材質。
- 五、磁浮列車的摩擦力小於四輪車子，雖然還有一面牆的摩擦力，但摩擦力 3gw 還是小於四輪車子在地上行走的摩擦力 7.4gw。
- 六、本研究結果使用磁浮列車能懸浮平穩和最低摩擦力的裝置：寬軌道 2.2cm、牆面間距 0cm、軌道間距 8.5cm，磁浮列車重量必須控制小於 335g，單面牆材質採用木頭磨光滑。

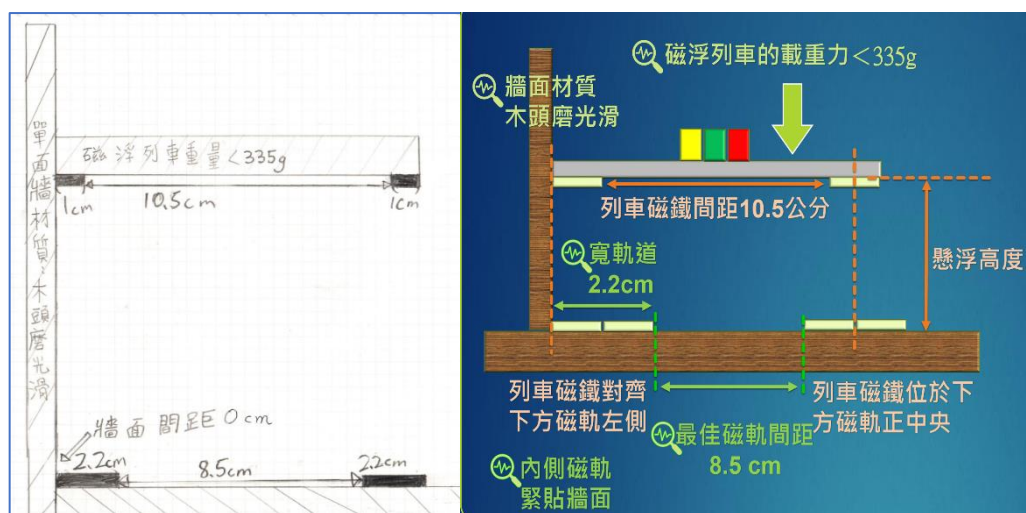


圖 33 磁浮列車平穩懸浮和最低摩擦力的裝置圖

- 七、 磁浮列車在單面牆（木頭磨光滑）成功懸浮的力平衡狀態為：靜摩擦係數（ μ_s ）為 0.28，正向力（N）為 12.5gw，列車與軌道的綜效磁力約為 60 gw，水平夾角 78 度。
- 八、 電池驅動磁浮列車，換算成時速約為每小時 64.44m 的速度；至於運用太陽能驅動磁浮列車，太陽照度會影響磁浮列車行進的速度，換算成時速約為每小時 5.4m。未來只要將太陽能儲存至太陽能電池作最有效的運用，就能成功研發環保的太陽能磁浮列車。

雖然現今磁浮列車的技術已相當成熟，但當我們自己動手製作磁浮列車玩具模型時，卻發現真實的狀況是：「懸浮不是問題，維持左右的平衡穩定才是困難」。但透過本研究卻發現可以利用簡單的方式，真實地推算觀察到磁浮列車成功懸浮的關鍵－綜效磁力，令人期待的是未來可以利用這個模式進一步建立各種路況的綜效磁力變化方式。

捌、參考資料

- 山梨縣立磁浮列車展示中心（2020）。取自
<https://www.linearmuseum.pref.yamanashi.jp/chinese/index.html>
- 洪國勳（2003）。嘩！磁浮列車。科學研習月刊，42（2），10-14。
- 段柏均、羅宥翔、陳柏翰、王謙（2017）。風「磁」電掣~自製 Q 版磁浮小火車。第 57 屆全國中小學科展作品生活與應用科學科。
- 鄭經叡、林雨韻、劉宓羿、繆以欣（2004）。打造一個有趣的磁力樂園。第 44 屆全國中小學科展作品物理科。
- 劉冠廷、高敏修、林子軒、林士軒、林立穎（2005）。無電力磁動車之研究。第 45 屆全國中小學科展作品自然科。

【評語】 080108

磁浮現象是個常見的科研或科展主題，大都只是探究描述自己動手製作磁浮車模型的運動特性；雖然與實際上的磁浮應用頗有差距，也是一個有趣的探究活動。實際的磁浮列車完全只靠磁力懸浮平衡，而本作品以強力磁鐵和樂高積木自製的磁浮車模型，必需要依賴一片鉛直牆面予以支持，才能保持平衡。因此研究重心也就移轉為車與牆面的摩擦現象。本作品在變因的控制與定量的觀測方面之嚴謹性與完整性，相較於其他作品仍有增進與改良的空間。

摘要

我們用樂高積木自製磁浮列車，卻發現懸浮平穩沒有想像中容易，於是開始一系列有關單面牆懸浮、摩擦力、與綜效磁力的實驗，想找出列車靠單面牆懸浮平穩的秘密。我們發現列車的懸浮高度與重量有關，懸浮平穩會有一靠牆的力，須鋪置寬軌道，列車外側磁鐵對齊軌道正上方，靠牆內側磁鐵對齊軌道左側。在不同材質的單面牆摩擦力實驗中，利用列車可移動的最小軌道傾斜角度畫圖估算摩擦力，並與掛砝碼最大靜摩擦力的實驗數據比較，得到一致的摩擦力結果，發現磨光滑木頭的表面摩擦力最小，我們更進一步利用作用力分析的方式，找出列車在磨光滑木頭表面的靜摩擦係數0.28，並計算出磁軌道對列車(59 gw)的綜效磁力為一與水平夾角78 度且大小為60 gw的磁力。最後運用電池或太陽能板加裝風扇驅動磁浮列車前進。



01 我們的夢想：JR東日本磁浮列車

我們在自然與生活科技課本三上「生活中有趣的力」和四上「運輸工具與能源」中，讀到磁力與磁浮列車的知識，磁浮列車利用磁鐵同極相斥異極相吸的原理浮起來，少了列車和軌道的接觸，讓摩擦力降到最低，日本磁浮列車目前達到603公里的驚人時速，成為世界上先進的交通運輸工具。我們對磁浮列車很好奇，想要探索磁浮列車的實驗和原理，於是三個喜歡磁浮列車的同學決定用家中的樂高玩具，打造一台手作磁浮列車。



02 我們的嘗試：樂高積木 + 磁鐵

嘗試一：什麼樣的磁鐵最適合？

白板磁鐵

一般磁鐵

一般磁鐵

強力釹鐵硼磁鐵
30x10x2

優點：長方形易排列軌道懸浮高度高可以載重

缺點：磁力強要小心傷手

嘗試二：怎麼樣才可以懸浮平穩？

沒有牆

兩面牆

單面牆

磁浮列車可以只靠單面牆懸浮平穩嗎？

03 我們的構想：研究架構

探究只用單面牆讓磁浮列車懸浮平穩的方法

找出影響因素：
①軌道間距 ②牆面間距 ③軌道寬度 ④列車載重力

量測磁鐵軌道對磁浮列車在平穩懸浮時的綜效磁力

分析所有作用力：
①透過列車可移動的最低軌道傾斜角度估算摩擦力
②透過掛砝碼方式驗證傾斜角度估算的摩擦力
③量測列車與木頭磨光滑牆面材質的摩擦係數
④探討列車與磁鐵軌道間的綜效磁力

利用不同的電能形式風扇推動磁浮列車前進

①電池風扇驅動列車前進
②太陽能風扇驅動列車前進

使用的器材



04 實驗一：如何只用單面牆讓磁浮列車懸浮平穩

怎麼樣的磁鐵軌道最適合？



窄軌道
窄軌道時「牆面間距」為0.5cm，配合「軌道間距」為10cm和10.5cm懸浮得最穩，也就是牆面與軌道不要緊靠而是距離0.5cm，軌道間距稍小於或等於列車磁軌間距懸浮效果最好。



寬軌道
寬軌道「牆面間距」為0cm時，「軌道間距」為8.0cm、8.5cm、9.0cm能懸浮平穩。「牆面間距」為0.5cm時，「軌道間距」為7.5cm、8.0cm、8.5cm能懸浮平穩。



寬軌道的懸浮穩定度優於窄軌道。

窄軌道間距	牆面間距		
	0 cm	0.5 cm	1.0 cm
10 cm	X	○	△
10.5 cm	X	○	X
11 cm	△	X	X

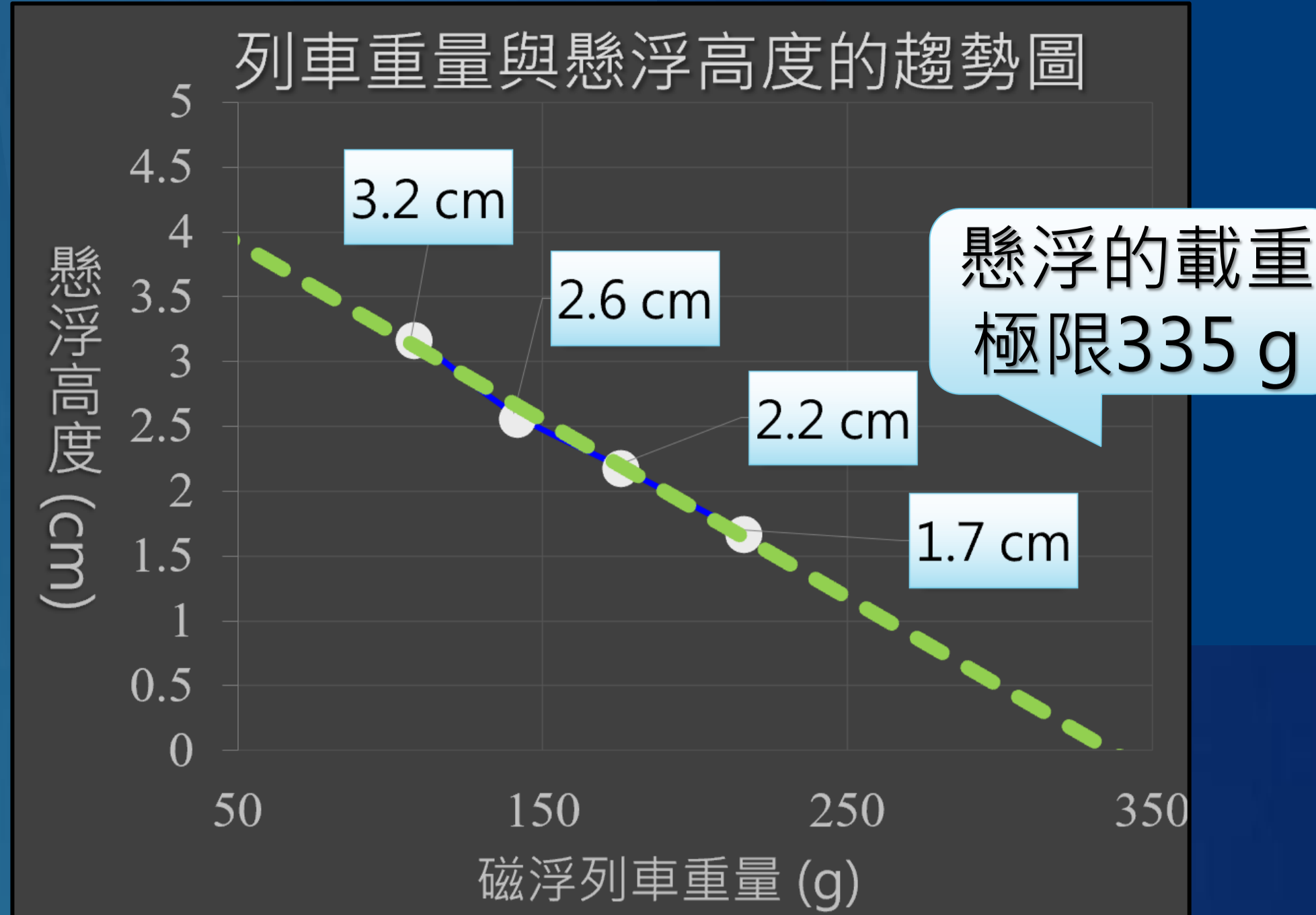
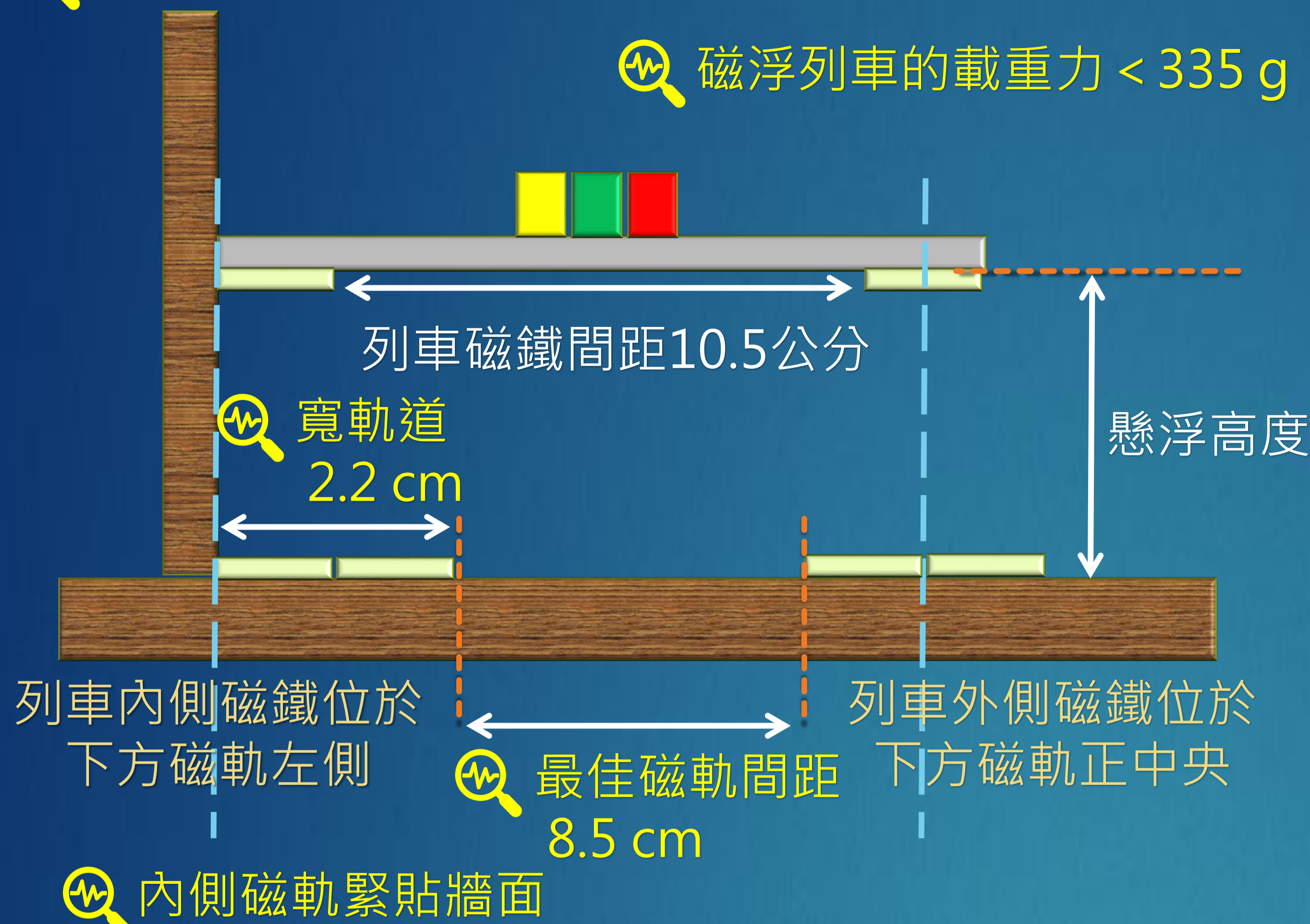
寬軌道間距	牆面間距		
	0 cm	0.5 cm	1.0 cm
7.5 cm	X	○	X
8.0 cm	○	○	X
8.5 cm	○	○	△
9.0 cm	○	X	X
9.5 cm	X	X	X

本研究採用其中的「牆面間距」0 cm和「寬軌道間距」8.5 cm，成為之後實驗採用的軌道間距。

我們的發現：單牆磁浮列車平穩的條件

牆面材質木頭磨光滑

磁浮列車的載重力 < 335 g



- ✓ 磁浮列車的重量越重，懸浮高度越低。
- ✓ 由線性趨勢線得知磁浮列車懸浮時的載重極限是 335 g。
- ✓ 加裝電扇和太陽能板須減輕列車重量，讓懸浮高度足以容納電扇轉動才行。

05

實驗二：單牆磁浮列車的摩擦力

2-1 改變不同的牆面材質 + 傾斜磁軌列車

量測不同「牆面材質」磁浮列車可以移動的「最低軌道傾斜角度」

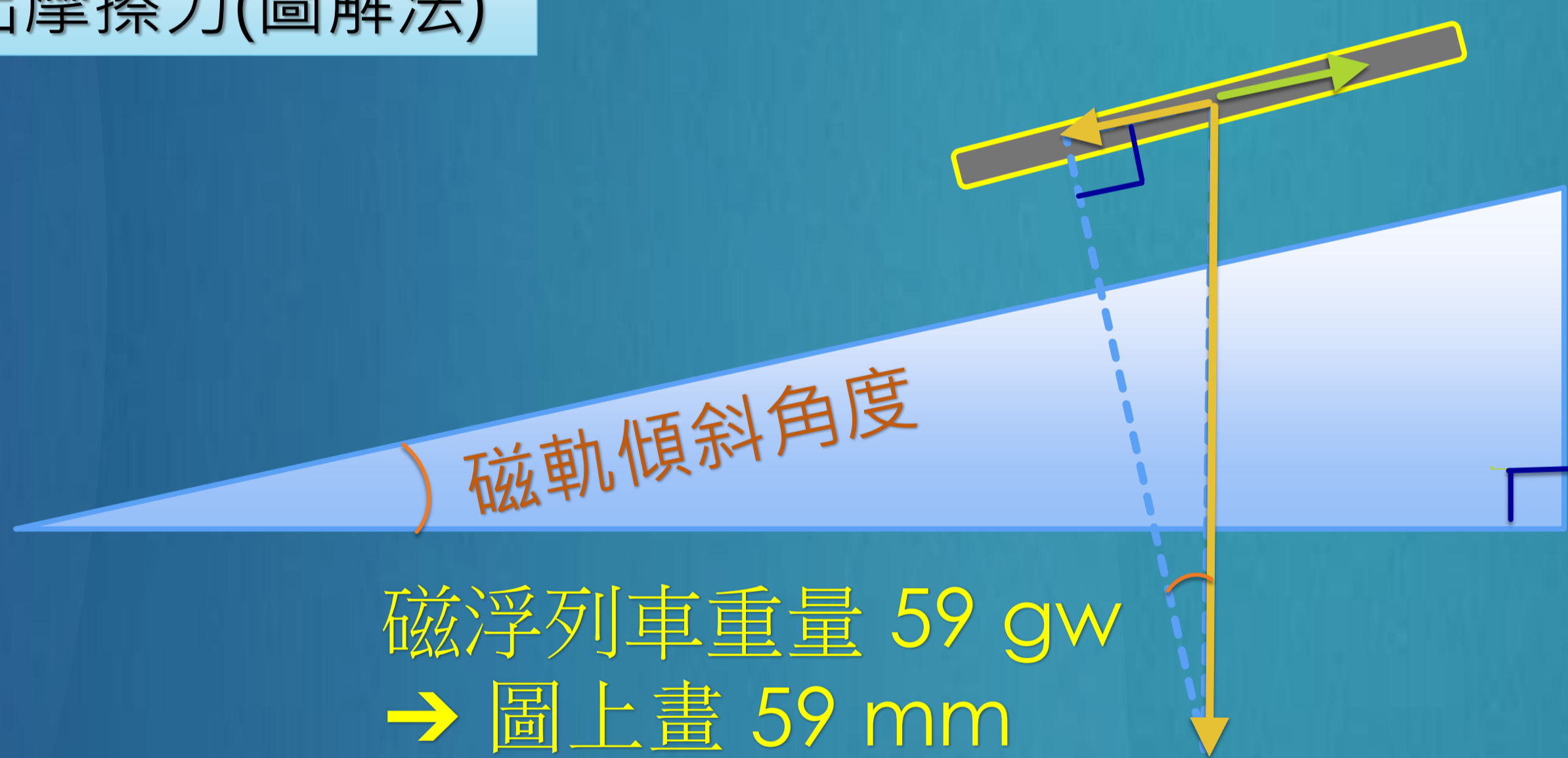


木頭	木頭磨光滑： 用砂紙把木頭磨成光滑的平面
壓克力： 木頭貼上光滑的投影片	砂紙： 在木頭的一面貼上砂紙

最低軌道傾斜角度	單面牆的牆面材質			
	木頭	木頭磨光滑	壓克力	砂紙
第1次 (度)	6.5	4	6	15
第2次 (度)	5.5	4	6	16
第3次 (度)	5.5	4	6	15
第4次 (度)	5	3	7	15
第5次 (度)	5	3	6	15.5
平均 (度)	5.5	3.6	6.2	15.3

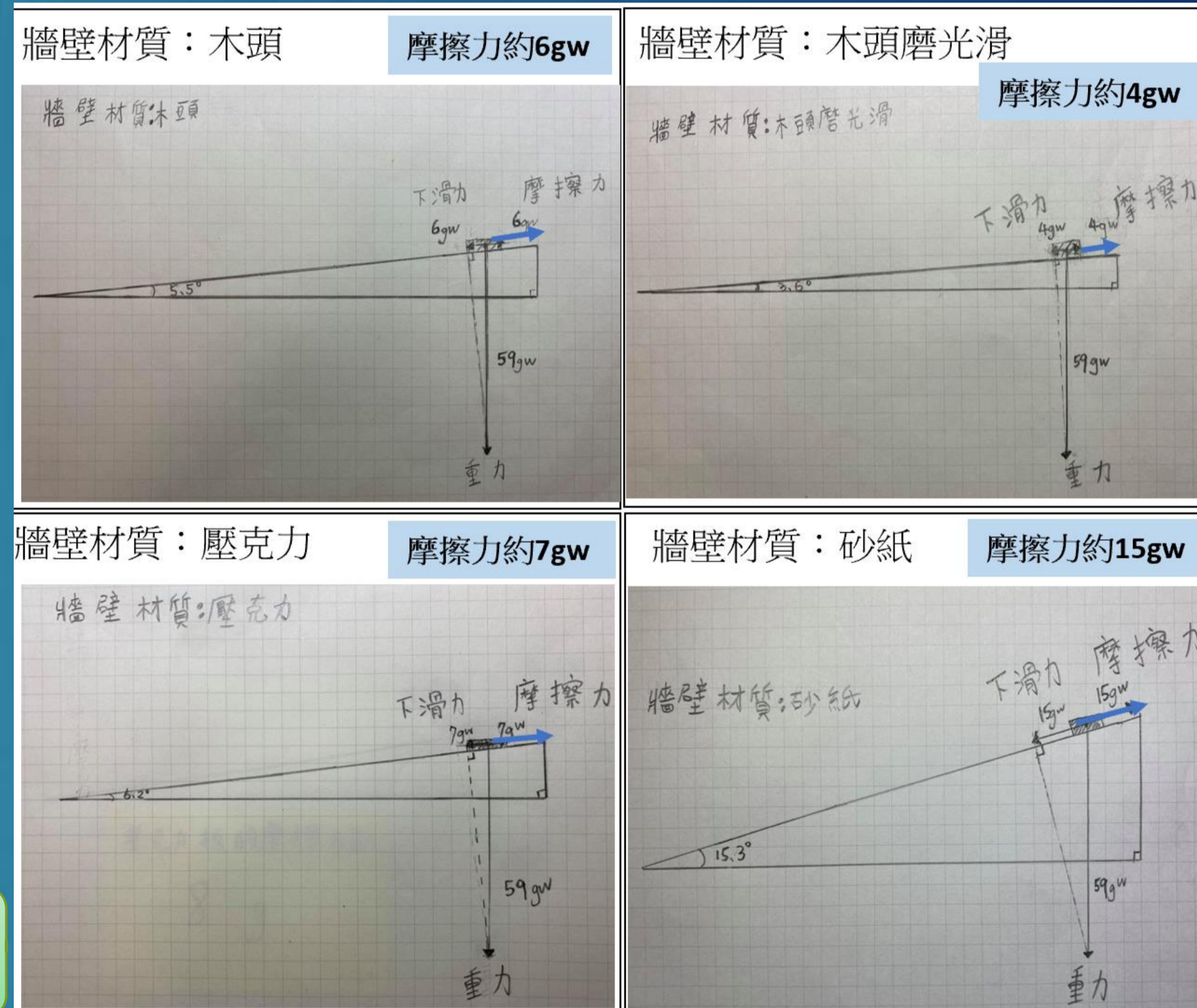
利用分析磁軌傾斜面上列車的重力找出摩擦力(圖解法)

長度 ## mm → 摩擦力 ## gw



牆面材質的摩擦力大小為：木頭磨光滑 < 木頭 < 壓克力 < 砂紙。

- ✓ 重複5次實驗，「木頭磨光滑」牆面材質最低軌道傾斜角度平均3.6度可以開始前進；「木頭」平均5.5度；「壓克力」平均6.2度；「砂紙」平均15.3度。
- ✓ 從最低軌道傾斜角度畫圖估算摩擦力，以牆面材質木頭為例，首先畫一個傾斜角度的直角三角形，傾斜角度畫5.5度，在車子下方畫一條垂直地板的重力線59 mm代表59 gw的磁浮列車，用直角三角形畫出下滑力，再畫出方向相反的摩擦力，測量長度為6 mm，得到摩擦力是6 gw，其它的牆面材質也用同樣的畫法算出摩擦力。



2-2 改變不同的牆面材質 + 吊掛砝碼



最大靜摩擦力 實驗的砝碼重量	磁浮列車牆面材質			
	木頭	木頭磨光滑	壓克力	砂紙
第1次 (g)	6	3	7	16
第2次 (g)	6	3	7	16
第3次 (g)	6	3	7	16
第4次 (g)	6	3	7	16
第5次 (g)	6	3	7	17
平均 (g)	6	3	7	16.2

- ✓ 磁浮列車在四種牆面材質的最大靜摩擦力大小為：木頭磨光滑 < 木頭 < 壓克力 < 砂紙。
- ✓ 「木頭磨光滑」是最佳的單面牆材質。



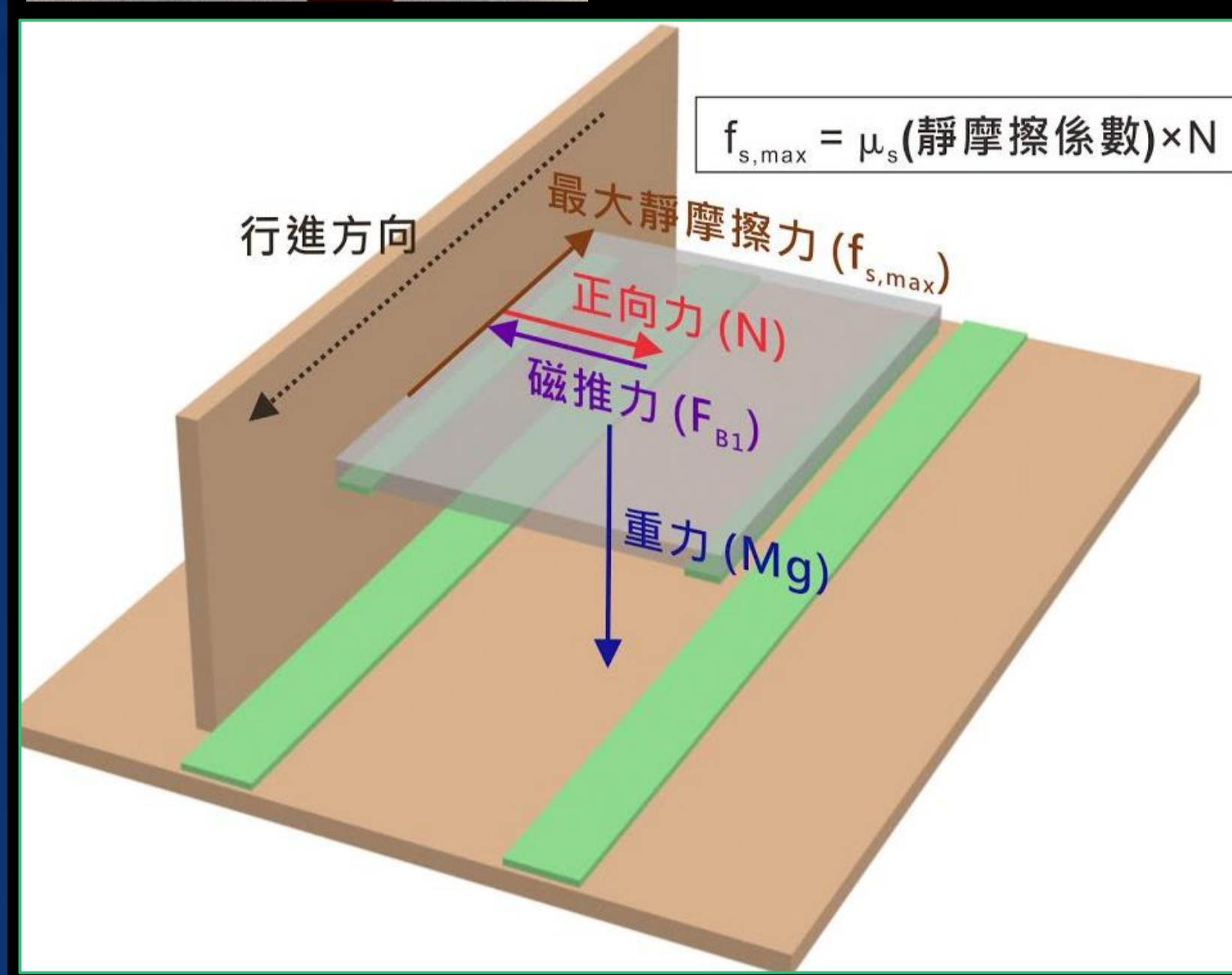
無論是從磁浮列車最低軌道傾斜角度畫圖估算摩擦力，或是最大靜摩擦力的實驗數據，都可獲得一致的摩擦力結果：木頭磨光滑 < 木頭 < 壓克力 < 砂紙。

2-3 量測牆面材質的摩擦係數 + 找出綜效磁力

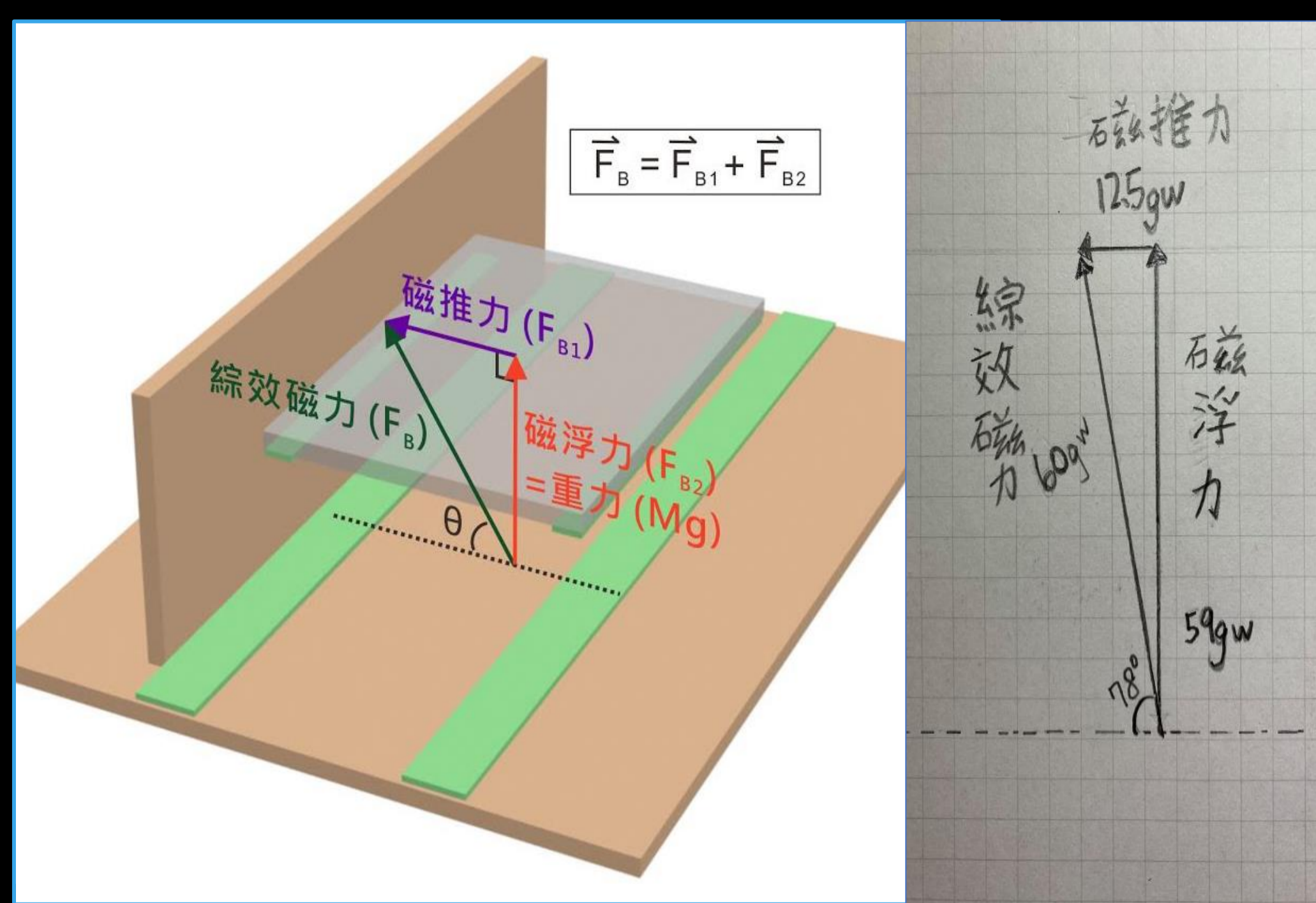
利用**磁推力**與**磁浮力**的方向與大小相加得到**綜效磁力**



最大靜摩擦力 實驗的砝碼重量	磁浮列車底板數量 (重量g)	
	2片 (50.35 g)	3片 (加磁鐵103.8 g)
第1次 (g)	15	30
第2次 (g)	14	29
第3次 (g)	13	31
第4次 (g)	14	30
第5次 (g)	13	29
平均 (g)	13.8	29.8
摩擦係數 (μ_s)	0.274	0.287



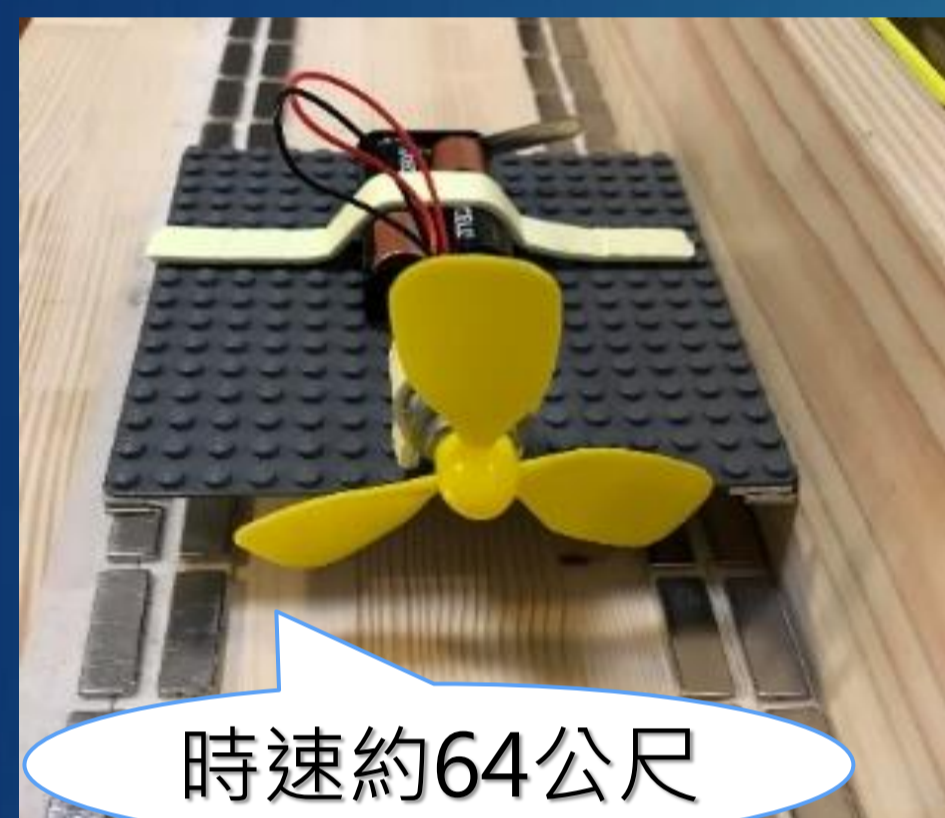
- 關鍵 1:**
利用已知的靜摩擦係數(只與接觸面的材質有關)
- 關鍵 2:**
利用摩擦力公式
- 關鍵 3:**
利用正向力 = 磁推力



- 結論 1:** 重量為 59 g 的列車，所需的綜效磁力大小為 60 gw，方向為與水平夾角(θ)78度。
- 結論 2:** 從力的分析得知，重量越重的列車，所需的綜效磁力越大，但方向不變。
- 結論 3:** 因為綜效磁力方向不變(磁浮力與綜效磁力的比例不變)，因此可得到任何重量列車所需的綜效磁力。

06 實驗三：利用風力推動磁浮列車前進

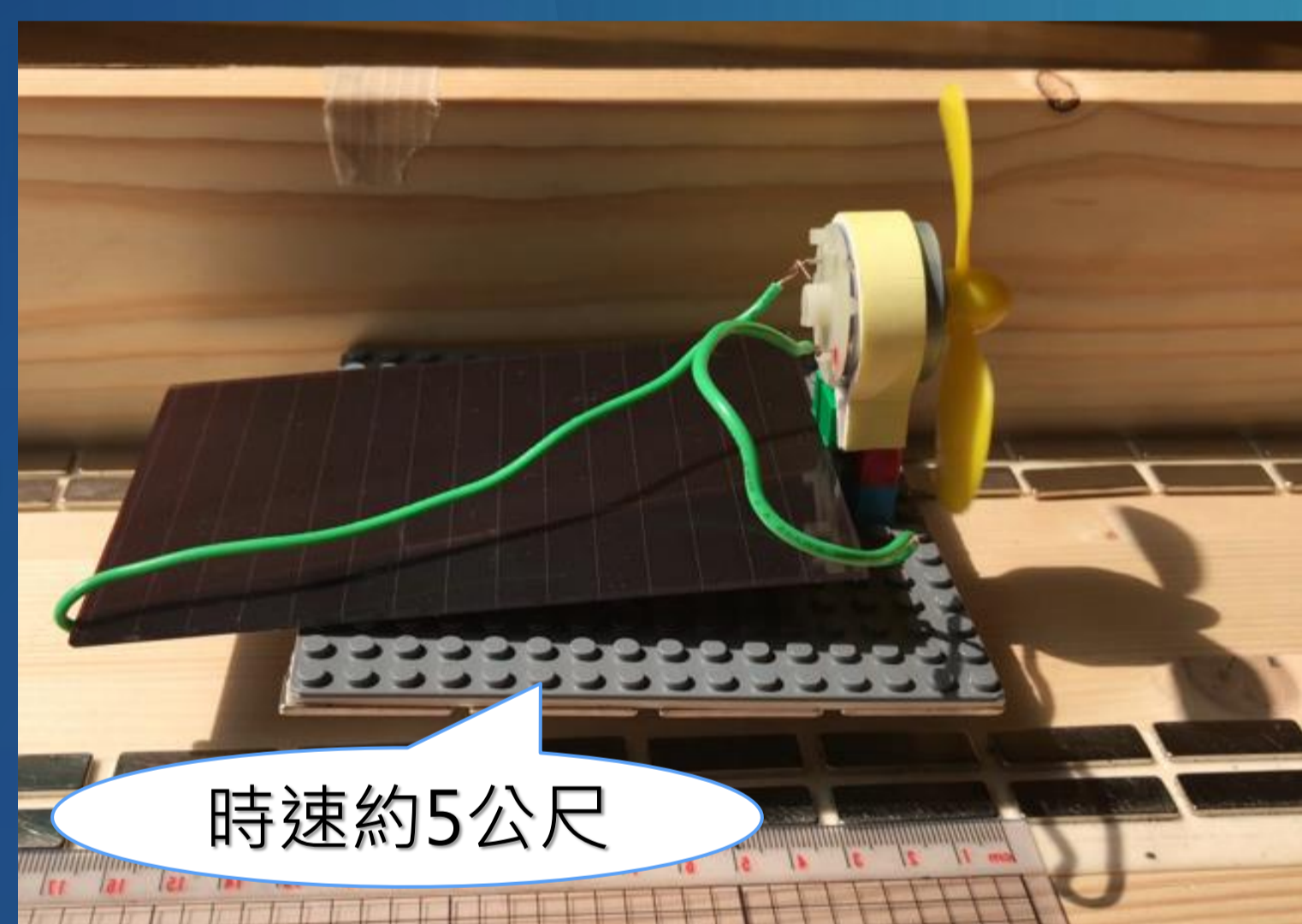
電池加風扇推動磁浮列車的行進速度



風力驅動 實驗	行進10公分距離的時間 (s)	速度 (cm/s)
第1次	5.88	1.70
第2次	5.59	1.79
第3次	5.28	1.89
第4次	5.05	1.98
第5次	6.29	1.59
平均	5.62	1.79

- 黃色電扇、車體、馬達、2顆電池總重137 g，記錄前進10 cm 距離的時間。
- 列車保持前後、左右平衡，風扇不可打到車體以及牆壁。
- 風扇轉動不一定能讓列車前進，因為列車的重量太重，把列車的重量減到最輕，試不同的風扇組合，發現藍色小風扇無法前進，但黃色風扇的風力較強，能帶動列車前進。
- 電極接錯時，風扇轉向為反向自然無法前進。
- 每秒平均可前進1.79 cm，換算成每分鐘約可達107.4 cm的速度，換算成時速約為每小時64.44 m。

我們的創意：太陽能磁浮列車



太陽能驅動實驗	行進距離 (cm)	時間 (s)	速度 (cm/s)
第1次	2.8	12	0.23
第2次	3	18	0.17
第3次	4	36	0.11
第4次	6	60	0.1
第5次	5	38	0.13
平均	4.16	32.8	0.15

- 太陽能板、太陽能直流馬達、風扇和車體底板總重量為180 g。
- 挑選中午太陽光強烈的時間，太陽能板對準太陽光直射方向，帶動風扇轉動。
- 用一般電扇的馬達，無法帶動風扇轉動，改用太陽能板專用的馬達才成功讓風扇轉動。
- 太陽照度會影響磁浮列車行進的速度，計算5次行進的速度，算出列車平均每秒可走0.15 cm，換算成每分鐘約可跑9 cm，換算成時速僅約為每小時5.4 m。



我們找出磁浮列車只靠單面牆成功懸浮的關鍵

利用長條形鐵強力釹鐵硼磁鐵鋪設寬軌道，磁浮列車未靠牆的右側磁鐵必須正對於磁鐵軌道上方，靠牆的左側位於軌道左側，由實驗數據推估磁浮列車的載重極限為 335 g。

結論

我們利用測量牆的**摩擦力與摩擦係數**，找出能讓磁浮列車成功懸浮的**綜效磁力**

「木頭磨光滑」是摩擦力最小的牆面材質，它的靜摩擦係數(μ_s)為0.28，並利用重量59 gw的磁浮列車得到磁推力 F_B (=正向力 N)為12.5 gw，並推得列車與軌道的綜效磁力約為60 gw，與水平夾角78度。

我們利用太陽能板做出完全**不需外接電源**的綠能風力磁浮列車

現今磁浮列車的技術已相當成熟，但當我們自己動手製作磁浮列車玩具模型時，卻發現真實的狀況是：「**懸浮不是問題，如何維持左右的平衡穩定才是關鍵**」。透過本研究發現可以先利用單面牆控制左右平穩，並利用簡單的方式，推算磁浮列車可成功懸浮的關鍵作用力 - 綜效磁力，令人期待的是未來可以利用我們的實驗結果進一步找出適用各種列車懸浮情況的綜效磁力。

參考資料

- 山梨縣立磁浮列車展示中心 (2020)。取自<https://www.linearmuseum.pref.yamanashi.jp/chinese/index.html>
- 洪國勳 (2003)。嘩！磁浮列車。科學研習月刊，42 (2)，10-14。
- 段柏均、羅宥翔、陳柏翰、王謙 (2017)。風「磁」電掣~自製Q版磁浮小火車。第57屆全國中小學科展作品生活與應用科學科。
- 鄭經叡、林雨頡、劉宥羿、繆以欣 (2004)。打造一個有趣的磁力樂園。第44屆全國中小學科展作品物理科。
- 劉冠廷、高敏修、林子軒、林士軒、林立穎 (2005)。無電力磁動車之研究。第45屆全國中小學科展作品自然科。

