

中華民國第 64 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

鐵道的翻轉人生

學校名稱：嘉義縣立竹崎高級中學(附設國中)

作者： 國三 蕭宇欣 國三 蕭宇翎 國三 林哲承	指導老師： 鄭貴中
---	------------------

關鍵詞：力學能、加速度、森林鐵道

摘要

本校位於阿里山之下，鄰近阿里山森林鐵道，我們從小接觸森鐵旅遊，愛上森林鐵道氛圍。從網路新聞中看到有關阿里山小火車翻覆的事件層出不窮。於是利用國中自然課程中學習到有關力學能轉換和數學課程中學習到有關重心的概念。想探討阿里山小火車翻覆情況跟那些變因比較有甚麼特殊關連，因此選用車廂中重心分布情況、坡道的彎曲程度和坡道的高度來做實驗分析探討。

所以我們利用生活科技課程學習到的 3D 列印技術，來製作不同曲率的軌道，將不同重量的砝碼放在不同滑車的位置上，模擬出不同重量的乘客坐在不同位置的森林小火車上，當滑車行經在不同曲度的軌道時觀察記錄滑行距離和出軌的機率，藉此實驗研究探討森林小火車翻覆情況跟乘客乘坐重心分布情況、坡道的彎曲程度和坡道的高度有甚麼影響。

壹、研究動機

因為我們從網路新聞中有關阿里山小火車翻覆的事件層出不窮，尤其是 2003 年阿里山小火車翻覆事故，造成了很大的事故，共造成了 17 人死亡，205 人受傷的悲慘事件。所以我們想知道火車要在什麼情況下容易翻覆，因此在尋找科展題目中，我們決定要探究阿里山小火車翻覆情況跟那些變因比較有甚麼特殊關連。在實驗設計中，我們跟老師討論像是讓火車在不同彎曲程度鐵軌上行駛，由於鐵軌的彎曲程度，會影響火車通行的可行性。加上後來我們在國三自然課本中有學到有關重力加速度與重力位能的內容、有關力學能轉換以及國三數學課本中有學到有關重心的概念。當時我們就想說，如果以不同的重量分布在不同地方去行駛的話，會不會有不同的行駛效果，而我們想知道當重心放在不一樣的地方，會不會影響改變翻覆的機率，就如不同車廂如果乘客重量分布大致平均分散，會不會讓小火車翻覆事故減少，也讓翻車後的人員傷亡變得更輕緩。



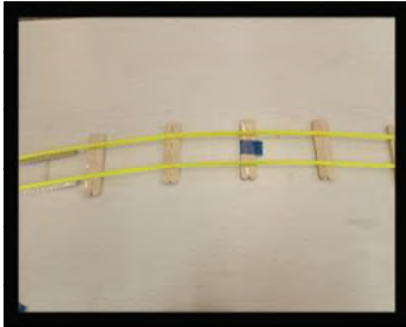
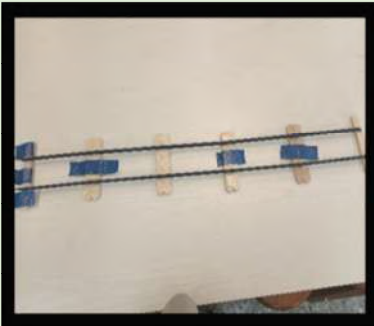
我們從鄉土和地理課程中得知阿里山森林鐵路分為平地與山地兩線段，前者指嘉義至竹崎（14.2 公里），後者為竹崎至阿里山線段（57.2 公里）。當火車以推進方式運轉至獨立山時，為遷就急峻的山形，則須以螺旋型環繞獨立山三周（約五公里長、兩百公尺高）而至山頂。當迴旋上山時，在車上可三度看到忽左忽右的樟腦寮車站仍在山下，然後鐵道再以 8 字型方式離開獨立山。而自屏遮那站到第一分道後，鐵路呈 Z 字型曲折前進，經過三個分道時，火車時而往前拖、時而在後推，終抵阿里山，故有「阿里山火車碰壁」之稱。

最後我們跟老師討論因阿里山鐵道是依螺旋型環繞山勢去建造而成的，所以坡道的彎曲程度和坡道的高度也會影響鐵道的翻覆的機率。以上種種變因就成為我們實驗研究的內容了。

貳、研究目的

- 一、藉由做這個研究，想了解重量和重心分布在不同地方及軌道的彎曲程度和坡道的高度坡度對火車翻覆的影響。
- 二、探討不同重量會不會讓火車的翻車效果發生改變。
- 三、觀察在不同重心分布的情況下，會不會影響火車行駛的穩定性。
- 四、觀察不同軌道曲率火車的滑行距離並觀看其翻覆情形。
- 五、想了解軌道的高度對火車翻覆有何影響。

參、研究設備與器材

		
<p>3 輛滑車(連接形成小火車) 從左到右分別對應前、中、後</p>	<p>滑車軌道 1 墊高後為 20 公分</p>	<p>滑車軌道 2 墊高後為 25 公分</p>
		
<p>滑車鐵軌</p>	<p>曲率 300 軌道</p>	<p>曲率 100 軌道</p>
		
<p>左 100 公克砝碼，右 500 公克砝碼</p>	<p>曲率 0 軌道</p>	<p>曲率 500 軌道</p>
		
<p>此為高度 8 的墊高物</p>	<p>此為 5 公分的墊高物</p>	<p>兩者相加為 13 公分的墊高物</p>

肆、研究方法與過程

一、原理

(一) 1. 曲率: 「彎曲度」, 是描述幾何體彎曲程度的量; 簡單說, 曲率是曲線偏離直線的量 (程度), 或是曲面偏離平面的量 (程度)。最小曲線半徑 (Minimum curve radius), 或稱轉彎半徑, 是陸上運輸工程中常用的技術標準, 其意義等同幾何學中的曲線半徑。這個數字能夠反映曲線的彎曲程度, 其倒數稱為曲率, 亦即 (圓) 曲線半徑越長, 彎道的曲率就越小, 彎度越緩。在工程上提及這個參數時, 一般是指水平面上的彎道, 對於垂直面則使用豎曲線及坡度來衡量。大致而言, 運輸路線的最小曲線半徑, 與運輸工具容許的最大運轉速率呈正相關。

2. 因列車在高速通過彎道時由於慣性有向彎道的外側翻車的危險, 在鐵路的設計和建造時, 對不同速度等級的鐵路規定了車輛可以安全通過的圓曲線的最小半徑, 就是路線的最小曲線半徑。曲線半徑越長, 彎道的曲率就越小, 在同一速度下, 行車受慣性影響也越小; 當曲率一定時, 行車速度越小, 行車受慣性影響也越小。故而高速鐵路和平原地區幹線鐵路一般比較平直, 用較大的曲線半徑, 行車速度可以較快; 山區鐵路、城市地鐵等受地形的制約較大的地段, 只能使用較小的曲線半徑, 列車必須速限通過。

(二) 坡度:

1. 坡度: 「爬升高度(h)和在水平位移(d)的比值的百分率」往往是以三角函數的正切函數數值, 或比 (百分比或千分比), 或分數 (rise over run) 來陳述, 即「爬升高度除以在水平面上的移動距離」。

2. 公式坡度= $\tan a = h/d * 100\%$

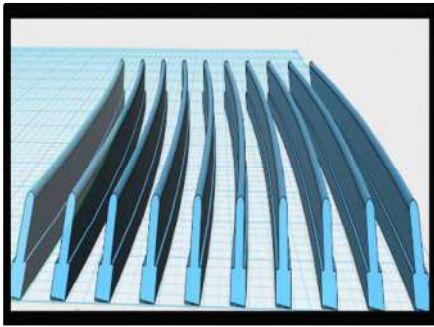
二、方法過程

(一) 曲率計算方式:為了方便製作有彎曲程度的軌道，利用 Autodesk 123D Design 軟體來繪製設計 3D 列印軌道，簡易記錄方式如下:

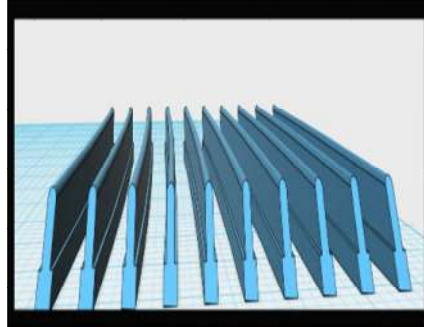
- 1.曲率 100:以直徑 100 公分的圓形成的彎曲程度，形成曲率記錄為曲率 100 的軌道。
- 2.曲率 300:以直徑 300 公分的圓形成的彎曲程度，形成曲率記錄為曲率 300 的軌道。
- 3.曲率 500:以直徑 500 公分的圓形成的彎曲程度，形成曲率記錄為曲率 500 的軌道。

(二) 製作不同曲率的軌道:

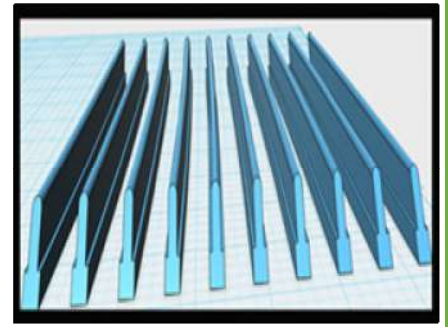
- 1.在電腦上利用 Autodesk 123D Design 軟體繪製圖形。



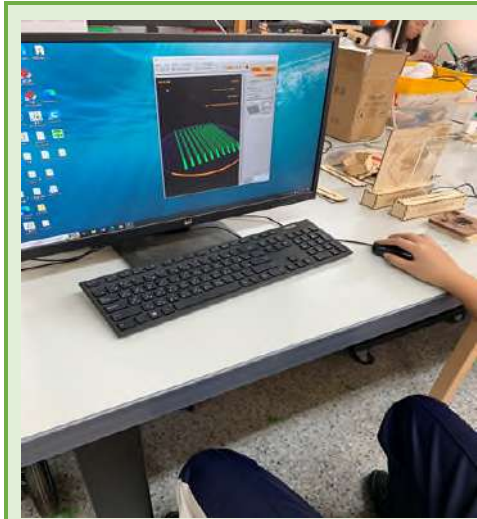
曲率為 100 的軌道



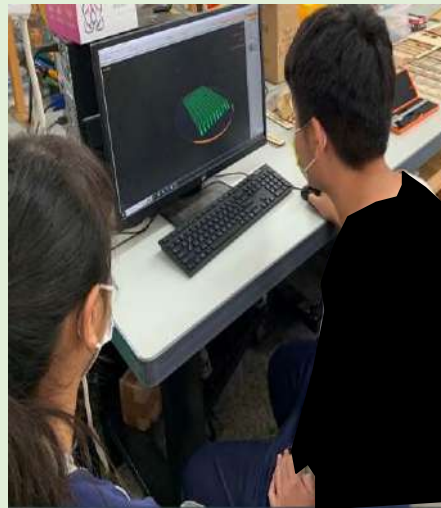
曲率為 300 的軌道



曲率為 500 的軌道



繪製圖形



設計圖形



討論圖形

2.先在 3D 列印機上列印出一個樣本。

3.檢查無誤後，開始製作不同曲率軌道，分別是曲率為 0 (黑色) 、100 (藍色) 、
300 (黃色) 、500 (綠色) 的軌道。

4.接著用木棒堆疊出約為 5 公分的高度，並與 10 個軌道黏在一起，有些因為彎度的
關係連接不了，所以使用熱熔膠條來進行加長連結。

5.每種曲率軌道分別有 4 個曲率為 0 的黑色軌道、4 個曲率為 100 的藍色軌道、
4 個曲率為 300 的黃色軌道 、4 個曲率為的 500 (綠)軌道。

6.選擇三台滑車，並用棉線使三台滑車相連結，模擬森林火車的樣子。

(三)進行實驗前的準備:

- 1.首先使用斜面長度為 124 公分，墊高高度為 20 公分的滑車軌道。
- 2.第 2 次再墊高 5 公分共 25 公分，使滑車軌道的坡度更大，因重力關係產生更大下滑的加速度。
- 3.分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。
- 4.選用分別為 100 公克重與 500 公克重的砝碼放在滑車上。
- 5.測試看看沒裝砝碼的滑車能不能順利行駛滑動。

(四)實驗進行的步驟:

- (1) 滑車軌道墊高高度為 20 公分，模擬森林鐵道彎曲情形，分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。依序連接有 4 個曲率為 0 的黑色軌道、4 個曲率為 100 的藍色軌道、4 個曲率為 300 的黃色軌道、4 個曲率為 500 (綠)軌道。利用滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察其滑行距離。

- 1.每台火車的重量最高限設在 500 公克重。
- 2.每次實驗都有對照組那就是滑車先不放砝碼即 0 克。
- 3.然後分別依序放重量為 100、200、300、400、500 公克重的砝碼在滑車上。

- 4.先在第一台滑車(前車)上分別放 100、200、300、400、500 並測量其滑行距離。
- 5.若有出軌的情形，測量其出軌前滑行距離。
- 6.為了減少誤差增加準確值，每種測量值均測量 10 次，再求取平均值。
- 7.其餘的第二台滑車(中車)與第三台滑車(後車)跟第一台滑車(前車)進行相同實驗，如
步驟 3~6。
- 8.若單一台滑車都測量完成，就開始用三台滑車相連結進行測量。
- 9.首先是第一台(前車)與第二台(中車)第一台(前車)與第二台(中車)各放不同重量: 對照
組放 0 克、前中車各放 100 克、前中車各放 200 克、前中車各放 300 克、前中車各放
400 克、前中車各放 500 克，分別測量其出軌前滑行距離。
- 10.接著是第二台(中車)與第三台(後車)各放不同重量: 對照組放 0 克、中後車各放 100
克、中後車各放 200 克、中後車各放 300 克、中後車各放 400 克、中後車各放 500
克。分別測量其出軌前滑行距離。
- 11.接著是第一台(前車)與第三台(後車)各放不同重量: 對照組放 0 克、前後車各放 100
克、前後車各放 200 克、前後車各放 300 克、前後車各放 400 克、前後車各放 500

克。分別測量其出軌前滑行距離。

(2)滑車軌道墊高高度為 25 公分，模擬森林鐵道彎曲情形，分別調整連接不同曲率軌

道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。依序連接有 4 個曲率為 0 的黑色軌道、4

個曲率為 100 的藍色軌道、4 個曲率為 300 的黃色軌道、4 個曲率為的 500 (綠)軌

道。利用滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察其滑行距離。

重複上述(1)中步驟 1~11 依此類推。

(3)滑車軌道墊高高度為 20 公分，模擬森林鐵道彎曲情形，分別調整連接不同曲率軌

道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。依序連接有 4 個曲率為 0 的黑色軌道、4

個曲率為 100 的藍色軌道、4 個曲率為 300 的黃色軌道、4 個曲率為的 500 (綠)軌

道。利用滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察測量其出軌機率。

1.每次實驗都有對照組那就是滑車先不放砝碼即 0 克。

2.先在第一台滑車(前車)上分別放 100、200、300、400、500 並測量其出軌機率。

3.為了減少誤差增加準確值，每種測量值均測量 10 次，再求取平均值。

4.其餘的第二台滑車(中車)與第三台滑車(後車)跟第一台滑車(前車)進行相同實驗，

如步驟 1~2。

5.若單一台滑車都測量完成，就開始用三台滑車相連結進行測量。

6.首先是第一台(前車)與第二台(中車)各放不同重量: 對照組放 0 克、前中車各放

100 克、前中車各放 200 克、前中車各放 300 克、前中車各放 400 克、前中車各

放 500 克，分別測量其出軌機率。

7.接著是第二台(中車)與第三台(後車)各放不同重量: 對照組放 0 克、中後車各放

100 克、中後車各放 200 克、中後車各放 300 克、中後車各放 400 克、中後車各

放 500 克，分別測量其出軌機率。

8.接著是第一台(前車)與第三台(後車)各放不同重量: 對照組放 0 克、前後車各放

100 克、前後車各放 200 克、前後車各放 300 克、前後車各放 400 克、前後車各

放 500 克，分別測量其出軌機率。

(4) 滑車軌道墊高高度為 25 公分，模擬森林鐵道彎曲情形，分別調整連接不同曲率軌

道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。依序連接有 4 個曲率為 0 的黑色軌道、4






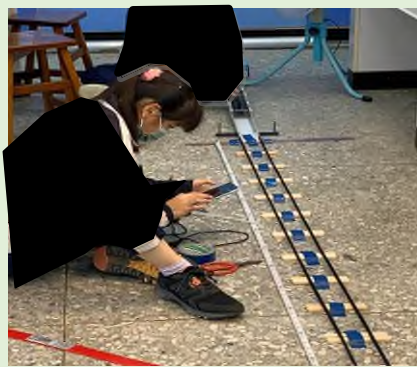
個曲率為 100 的藍色軌道、4 個曲率為 300 的黃色軌道、4 個曲率為的 500 (綠)軌

道。利用滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察測量其出軌機率。

重複上述(3)中步驟 1~8 依此類推。

伍、研究結果

(一)實驗測量照片：

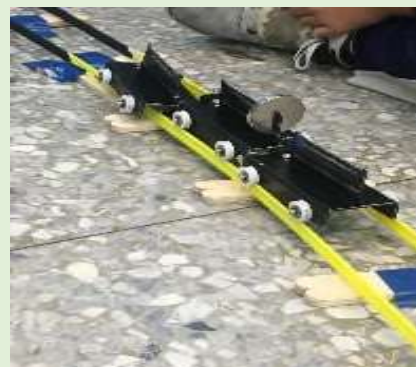
		
曲率記錄為 100 時， 中車放 200 克	製作連接軌道	曲率記錄為 100 時， 後車放 200 克
		
曲率記錄為 100 時， 前中車各放 100 克	曲率記錄為 100 時， 前中車各放 200 克	製作連接軌道
		
曲率記錄為 100 時， 中後車各放 200 克	曲率記錄為 100 時， 中後車各放 300 克	測量滑行距離



曲率記錄為 100 時，
中後車各放 500 克



曲率記錄為 300 時，
前車放 100 克



曲率記錄為 300 時，
中車放 100 克



曲率記錄為 300 時，
前車放 200 克



曲率記錄為 300 時，
中車放 200 克



曲率記錄為 300 時，
後車放 200 克



曲率記錄為 300 時，
中車放 300 克



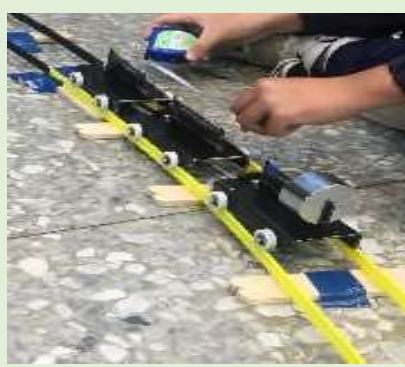
曲率記錄為 300 時，
後車放 300 克



曲率記錄為 300 時，
中車放 400 克



曲率記錄為 300 時，



測量滑行距離



曲率記錄為 300 時，

後車放 500 克		中車放 500 克
		
曲率記錄為 500 時， 中車放 100 克	曲率記錄為 500 時， 中車放 300 克	曲率記錄為 500 時， 後車放 300 克
		
曲率記錄為 500 時， 前車放 400 克	曲率記錄為 500 時， 前車放 500 克	曲率記錄為 500 時， 中車放 500 克
		
製作軌道	曲率記錄為 500 時， 中後車各放 300 克	曲率記錄為 500 時， 中後車各放 500 克

(二)實驗測量結果：

一、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離:(滑車墊高高度為 20 公分)

$$\text{滑車墊高高度 } h \text{ 為 } 20 \text{ 公分，斜面角度 } 3 \text{ 度，滑車滑下初速度 } v_0 = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 3^\circ * 0.2} = 0.456 \text{ m/s}$$

(1)前車放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	275	266	265	271	268	267	265	271	268	266	268.2
前車放 100 克	283	286	290	284	285	282	285	288	284	288	285.5
前車放 200 克	295	291	291	293	292	297	296	297	291	296	293.9
前車放 300 克	302	300	304	305	304	307	308	303	306	302	304.1
前車放 400 克	316	317	312	315	315	316	317	316	312	314	315
前車放 500 克	328	325	327	322	323	324	325	326	327	328	325.5

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	158	147	149	152	156	153	155	153	151	153	152.7	1
前車放 100 克	198	196	197	199	195	198	196	167	195	196	193.7	0.8
前車放 200 克	226	234	227	228	232	228	227	235	229	228	229.4	0.6
前車放 300 克	259	254	260	257	257	261	258	262	258	260	258.6	0.4
前車放 400 克	212	215	220	216	226	225	217	218	223	224	219.6	0.5
前車放 500 克	132	131	135	134	136	134	132	137	134	138	134.3	0.8

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	125	123	126	123	124	128	127	125	123	129	125.3	1
前車放 100 克	139	148	142	146	145	138	147	142	147	143	143.7	0.7
前車放 200 克	115	124	128	117	126	118	117	121	119	129	121.4	0.5

前車放 300 克	135	136	139	138	140	142	136	134	138	140	137.8	0.3
前車放 400 克	253	257	251	253	252	251	256	254	256	253	253.6	0.5
前車放 500 克	110	123	130	126	127	124	123	128	127	122	124	0.7

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	388	385	384	385	386	389	387	386	385	387	386.2	1
前車放 100 克	374	376	379	378	375	376	373	372	371	375	374.9	0.4
前車放 200 克	377	379	381	379	376	375	378	376	375	374	377	0.1
前車放 300 克	380	384	385	383	386	384	386	385	387	383	384.3	0.1
前車放 400 克	229	230	228	227	228	231	229	226	228	227	228.3	0.5
前車放 500 克	385	381	392	386	382	381	391	384	385	382	384.9	0.1

(2)中車放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	275	266	265	271	268	267	265	271	268	266	268.2
中車放 100 克	290	295	303	294	301	291	295	292	298	297	295.6
中車放 200 克	311	320	319	313	315	314	316	317	318	312	315.5
中車放 300 克	335	336	334	337	336	331	337	334	338	332	335
中車放 400 克	321	322	324	320	327	321	323	325	326	328	323.7
中車放 500 克	313	305	317	318	314	318	315	316	317	315	314.8

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	147	148	145	146	148	149	142	142	145	143	145.5	1
中車放 100 克	132	138	137	136	138	137	135	133	132	134	135.2	1
中車放 200 克	113	115	116	112	114	117	115	112	116	114	114.4	1
中車放 300 克	135	136	135	138	137	139	140	142	136	135	137.3	1
中車放 400 克	142	145	142	147	149	143	145	142	146	147	144.8	1
中車放 500 克	132	135	136	138	137	135	136	132	137	135	135.3	1

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-----	------

對照組放 0 克	125	123	127	125	128	126	124	128	126	126	125.8	0.8
中車放 100 克	131	133	135	136	137	134	132	136	134	132	134	1
中車放 200 克	123	136	127	131	128	127	126	132	125	128	128.3	1
中車放 300 克	143	141	146	142	148	146	145	148	149	147	145.5	0.8
中車放 400 克	152	153	155	156	158	157	156	158	159	159	156.3	0.6
中車放 500 克	125	127	123	124	128	127	126	125	124	128	125.7	1

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	388	385	384	387	386	385	387	383	384	385	385.4	0.1
中車放 100 克	394	396	394	397	395	391	395	392	393	394	394.1	0.1
中車放 200 克	413	415	414	417	413	418	416	412	415	414	414.7	0.1
中車放 300 克	442	445	443	446	447	449	442	443	446	445	444.8	0.1
中車放 400 克	326	328	327	326	325	327	324	323	327	326	325.9	0.3
中車放 500 克	385	390	381	387	386	384	382	383	384	385	384.7	0.1

(3)後車放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	275	266	265	271	265	272	262	265	267	263	267.1
後車放 100 克	323	324	325	321	328	327	328	326	324	322	324.8
後車放 200 克	313	312	295	316	314	317	318	317	316	318	313.6
後車放 300 克	337	336	338	335	333	334	332	337	331	332	334.5
後車放 400 克	345	346	347	342	348	342	341	343	346	345	344.5
後車放 500 克	349	350	352	343	356	357	354	357	358	355	353.1

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	158	147	148	152	156	154	153	151	159	160	153.8	1
後車放 100 克	138	139	140	135	132	131	137	134	138	135	135.9	1
後車放 200 克	273	265	275	278	273	277	272	271	268	267	271.9	1
後車放 300 克	139	143	142	144	145	147	149	148	147	145	144.9	1
後車放 400 克	120	127	128	126	119	122	125	121	125	128	124.1	1
後車放 500 克	101	106	102	104	107	105	106	103	102	101	103.7	1

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	115	125	123	117	116	124	127	128	122	117	121.4	1
後車放 100 克	277	275	267	268	265	265	269	261	263	265	267.5	1
後車放 200 克	280	284	288	285	283	282	287	285	282	281	283.7	0.3
後車放 300 克	291	295	286	293	297	292	294	291	295	298	293.2	0.7
後車放 400 克	175	174	173	176	172	178	177	171	173	176	174.5	1
後車放 500 克	107	105	101	106	103	102	105	101	108	109	104.7	0.7

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	388	385	384	383	386	387	389	384	385	386	385.7	1
後車放 100 克	102	105	100	103	105	108	107	106	105	103	104.4	1
後車放 200 克	125	124	127	128	126	123	121	128	127	126	125.5	1
後車放 300 克	252	251	254	256	257	258	253	259	252	251	254.3	0.3
後車放 400 克	202	204	208	207	206	207	203	204	201	209	205.1	1
後車放 500 克	240	243	242	247	246	242	245	247	246	248	244.6	1

(4)前中車各放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	275	266	265	271	264	272	268	267	273	272	269.3
前中車各放 100 克	283	284	280	289	288	289	285	288	289	290	286.5
前中車各放 200 克	320	327	328	326	323	329	325	324	321	325	324.8
前中車各放 300 克	345	342	348	351	347	341	343	349	347	352	346.5
前中車各放 400 克	325	327	328	321	322	323	322	321	322	321	323.2
前中車各放 500 克	337	333	332	334	335	336	339	332	335	338	335.1

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	158	156	159	154	157	152	158	153	152	151	155	1
前中車各放 100 克	236	232	238	235	239	231	233	241	230	242	235.7	0.8
前中車各放 200 克	257	253	255	261	259	263	255	262	253	257	257.5	0.6
前中車各放 300 克	287	289	285	290	285	286	281	293	285	283	286.4	0.4
前中車各放 400 克	264	266	263	268	267	262	271	268	272	269	267	0.8

前中車各放500克	245	247	248	246	241	243	248	252	251	248	246.9	0.8
-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------	-----

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	126	125	123	128	123	129	125	124	127	122	125.2	1
前中車各放 100 克	251	258	254	257	253	251	260	254	258	255	255.1	0.6
前中車各放 200 克	234	238	226	235	232	237	231	238	235	239	234.5	0.5
前中車各放 300 克	275	276	273	278	277	279	272	277	271	275	275.3	0.4
前中車各放 400 克	232	235	228	235	238	237	236	234	232	231	233.8	0.6
前中車各放 500 克	268	272	276	275	273	278	277	273	276	272	274	0.6

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	111	107	112	108	115	109	113	116	113	112	111.6	1
前中車各放 100 克	271	273	272	278	273	278	276	275	274	275	274.5	0.4
前中車各放 200 克	245	247	242	248	243	242	241	247	249	245	244.9	0.3
前中車各放 300 克	288	285	284	287	286	282	281	283	285	289	285	0.2
前中車各放 400 克	217	211	215	218	216	213	217	219	212	216	215.4	0.4
前中車各放 500 克	283	286	288	283	278	285	276	279	285	276	281.9	0.3

(5)中後車各放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	275	266	265	271	265	272	267	268	273	275	269.7
中後車各放 100 克	302	303	306	300	307	301	304	305	308	303	303.9
中後車各放 200 克	345	340	343	346	342	348	341	346	345	341	343.7
中後車各放 300 克	357	353	356	357	352	348	354	352	356	357	354.2
中後車各放 400 克	358	362	364	365	366	367	361	364	369	365	364.1
中後車各放 500 克	372	378	374	375	376	377	371	374	379	375	375.1

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	153	147	148	145	156	154	149	147	155	153	150.7	1
中後車各放 100 克	162	164	169	168	163	162	165	168	163	167	165.1	0.9

中後車各放 200 克	125	126	123	123	128	122	127	121	128	126	124.9	0.7
中後車各放 300 克	136	138	137	135	134	132	131	137	138	132	135	0.5
中後車各放 400 克	223	218	226	228	223	227	216	224	221	222	222.8	0.9
中後車各放 500 克	163	166	161	165	162	163	167	158	162	159	162.6	0.9

3. 曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	115	125	123	127	125	128	121	118	124	125	123.1	1
中後車各放 100 克	261	263	270	262	264	268	263	267	265	262	264.5	0.7
中後車各放 200 克	276	275	269	273	272	278	276	275	274	268	273.6	0.6
中後車各放 300 克	312	306	308	316	315	314	317	318	319	215	304	0.5
中後車各放 400 克	174	183	180	185	182	176	179	181	187	188	181.5	0.6
中後車各放 500 克	145	140	138	147	146	142	149	145	142	141	143.5	0.6

4. 曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	388	385	384	383	382	381	387	383	381	386	384	1
中後車各放 100 克	315	312	316	318	313	317	319	320	316	312	315.8	0.5
中後車各放 200 克	324	325	321	323	321	328	327	329	326	327	325.1	0.5
中後車各放 300 克	335	334	337	336	332	331	339	337	335	332	334.8	0.2
中後車各放 400 克	351	367	356	352	365	361	353	353	365	362	358.5	0.3
中後車各放 500 克	323	326	328	327	325	321	329	322	327	321	324.9	0.3

(6) 前後車各放不同重量:

1. 曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	272	266	265	271	265	268	263	261	269	267	266.7
前後車各放 100 克	292	297	296	294	295	295	293	292	295	297	294.6
前後車各放 200 克	331	332	333	335	337	334	338	331	339	336	334.6
前後車各放 300 克	318	308	316	320	313	316	313	315	317	318	315.4
前後車各放 400 克	327	325	321	326	329	325	327	328	324	329	326.1
前後車各放 500 克	340	337	342	339	350	348	336	332	345	338	340.7

2. 曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	158	147	149	156	153	152	148	157	153	151	152.4	1
前後車各放 100 克	226	238	235	231	227	236	232	229	238	234	232.6	0.7
前後車各放 200 克	136	131	138	140	137	135	134	132	139	133	135.5	0.6
前後車各放 300 克	145	143	146	148	149	147	146	144	147	146	146.1	0.4
前後車各放 400 克	276	275	261	267	269	273	275	262	275	278	271.1	0.5
前後車各放 500 克	168	172	177	175	169	173	178	173	169	172	172.6	0.8

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	115	125	123	128	126	124	123	131	129	130	125.4	1
前後車各放 100 克	265	264	266	262	267	261	265	269	258	259	263.6	0.6
前後車各放 200 克	271	278	280	284	283	279	275	276	281	282	278.9	0.4
前後車各放 300 克	288	293	294	295	292	296	291	297	298	293	293.7	0.4
前後車各放 400 克	206	199	198	202	205	201	203	207	204	207	203.2	0.5
前後車各放 500 克	183	179	177	185	183	184	182	183	188	189	183.3	0.5

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	388	385	384	382	381	383	386	383	385	387	384.4	1
前後車各放 100 克	315	313	312	314	318	316	317	315	319	316	315.5	0.4
前後車各放 200 克	322	327	326	323	328	321	329	323	321	325	324.5	0.4
前後車各放 300 克	308	306	307	309	301	302	304	303	305	302	304.7	0.1
前後車各放 400 克	283	278	281	285	282	281	284	283	285	284	282.6	0.2
前後車各放 500 克	190	194	198	194	197	193	192	191	192	192	193.3	0.2

二、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離: (滑車墊高高度為 25 公分)

滑車墊高高度 h 為 25 公分，斜面角度 5 度，滑車滑下初速度 $v_0 = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 5^\circ * 0.25} = 0.853 \text{ m/s}$

(1)前車放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-----

對照組放 0 克	101	103	102	105	108	103	109	111	102	106	105
前車放 100 克	123	127	129	122	125	128	123	121	127	125	125
前車放 200 克	142	145	146	145	142	147	149	143	149	150	145.8
前車放 300 克	153	151	155	152	157	154	152	159	157	153	154.3
前車放 400 克	164	167	168	165	162	164	168	163	161	169	165.1
前車放 500 克	170	174	175	174	180	176	173	172	178	177	174.9

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	98	95	94	96	93	97	95	92	91	93	94.4	1
前車放 100 克	112	118	116	115	113	114	118	115	113	112	114.6	0.9
前車放 200 克	126	129	125	128	127	126	125	123	122	121	125.2	0.8
前車放 300 克	138	136	132	137	131	137	139	132	131	135	134.8	0.6
前車放 400 克	145	144	142	141	143	148	142	141	143	142	143.1	0.7
前車放 500 克	165	161	171	168	165	163	162	166	162	161	164.4	0.8

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	187	183	185	184	188	182	186	187	189	183	185.4	1
前車放 100 克	208	207	205	208	206	207	206	208	201	202	205.8	0.8
前車放 200 克	216	218	213	218	215	218	217	213	214	216	215.8	0.7
前車放 300 克	237	243	232	238	236	235	231	232	239	238	236.1	0.5
前車放 400 克	245	242	246	245	243	241	242	241	248	247	244	0.7
前車放 500 克	208	213	218	216	217	214	209	213	212	217	213.7	0.7

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	282	288	281	285	288	283	281	284	283	285	284	1
前車放 100 克	314	315	318	315	315	317	312	316	319	314	315.5	0.7
前車放 200 克	321	328	326	325	323	327	326	321	325	322	324.4	0.6
前車放 300 克	332	338	335	337	338	336	339	332	331	337	335.5	0.3
前車放 400 克	326	329	327	325	329	328	326	321	327	329	326.7	0.6
前車放 500 克	274	281	276	273	275	278	276	273	275	278	275.9	0.5

(2)中車放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	126	128	123	125	128	128	129	123	128	125	126.3
中車放 100 克	183	187	185	187	186	182	184	186	188	186	185.4
中車放 200 克	196	195	194	195	192	193	197	195	194	193	194.4
中車放 300 克	223	225	226	225	226	227	226	228	223	225	225.4
中車放 400 克	245	248	246	247	248	245	246	242	245	247	245.9
中車放 500 克	265	268	267	267	266	264	266	264	262	265	265.4

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	113	114	116	117	115	112	113	118	117	118	115.3	1
中車放 100 克	128	125	129	126	125	123	128	124	129	126	126.3	0.7
中車放 200 克	153	156	155	154	156	158	153	157	155	153	155	0.7
中車放 300 克	183	185	186	187	183	186	185	185	187	185	185.2	0.4
中車放 400 克	193	195	196	198	196	197	193	197	196	193	195.4	0.6
中車放 500 克	142	146	140	148	146	146	142	147	143	146	144.6	0.6

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	244	243	245	247	242	248	246	243	242	243	244.3	1
中車放 100 克	258	257	253	253	257	258	252	257	254	255	255.4	0.6
中車放 200 克	267	264	262	268	264	265	263	264	266	262	264.5	0.5
中車放 300 克	278	277	275	276	277	278	273	277	276	273	276	0.4
中車放 400 克	234	237	235	237	232	235	238	233	235	239	235.5	0.5
中車放 500 克	219	218	215	217	218	213	212	219	213	217	216.1	0.4

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	227	229	224	225	223	224	228	222	224	225	225.1	1
中車放 100 克	213	215	213	216	215	217	213	216	212	216	214.6	0.5
中車放 200 克	227	228	227	225	222	222	229	228	225	221	225.4	0.3
中車放 300 克	235	233	235	236	237	235	232	234	235	238	235	0.3
中車放 400 克	238	235	237	232	233	236	234	235	232	231	234.3	0.5
中車放 500 克	220	221	224	225	226	224	221	223	221	222	222.7	0.3

(3)後車放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	113	114	116	117	112	116	118	112	116	117	115.1
後車放 100 克	153	154	153	158	154	152	155	157	153	150	153.9
後車放 200 克	175	179	182	172	175	183	175	179	182	189	179.1
後車放 300 克	203	205	207	202	206	207	205	202	201	208	204.6
後車放 400 克	211	213	216	215	216	213	216	213	217	218	214.8
後車放 500 克	142	145	143	143	147	144	145	147	141	147	144.4

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	103	104	106	107	109	106	104	101	107	109	105.6	1
後車放 100 克	126	124	123	128	125	123	123	124	128	127	125.1	0.9
後車放 200 克	153	152	154	157	153	154	157	152	155	160	154.7	0.8
後車放 300 克	183	185	187	188	184	187	186	182	189	187	185.8	0.6
後車放 400 克	168	163	162	165	168	166	167	161	165	168	165.3	0.5
後車放 500 克	138	133	136	135	137	134	135	135	134	139	135.6	0.5

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	204	205	207	209	203	208	204	202	207	205	205.4	1
後車放 100 克	217	218	215	218	213	215	214	218	216	219	216.3	0.8
後車放 200 克	227	225	224	229	227	223	227	226	223	228	225.9	0.8
後車放 300 克	240	247	245	242	247	246	247	242	245	241	244.2	0.3
後車放 400 克	238	236	232	237	233	232	231	237	232	238	234.6	0.4
後車放 500 克	220	227	225	226	227	223	227	224	225	221	224.5	0.4

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	227	228	224	228	223	227	223	228	224	225	225.7	1
後車放 100 克	241	249	245	248	243	245	246	244	245	247	245.3	0.7
後車放 200 克	253	257	254	258	253	254	256	259	254	252	255	0.6

後車放 300 克	276	277	270	272	273	271	275	278	272	274	273.8	0.3
後車放 400 克	243	248	247	245	248	246	243	247	245	248	246	0.3
後車放 500 克	238	239	237	237	239	232	238	235	237	236	236.8	0.4

(4)前中車各放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	205	203	210	208	206	211	207	204	206	205	206.5
前中車各放 100 克	227	223	226	225	226	222	227	225	223	227	225.1
前中車各放 200 克	246	248	243	248	243	241	246	247	243	244	244.9
前中車各放 300 克	258	262	259	255	260	259	254	256	259	253	257.5
前中車各放 400 克	247	243	246	242	243	247	249	243	245	242	244.7
前中車各放 500 克	112	112	120	117	118	121	115	113	119	115	116.2

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	113	114	116	117	114	113	116	114	118	119	115.4	1
前中車各放 100 克	216	217	218	215	217	219	216	213	214	217	216.2	0.9
前中車各放 200 克	223	226	225	226	223	224	226	227	228	227	225.5	0.8
前中車各放 300 克	237	235	236	238	235	234	237	238	236	235	236.1	0.6
前中車各放 400 克	227	228	229	226	227	229	223	224	229	222	226.4	0.7
前中車各放 500 克	112	114	116	116	114	115	112	113	116	117	114.5	0.8

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	274	275	276	273	275	278	272	275	276	279	275.3	1
前中車各放 100 克	227	225	223	225	223	221	227	226	223	228	224.8	0.8
前中車各放 200 克	235	236	234	237	233	232	235	236	238	237	235.3	0.7
前中車各放 300 克	249	246	247	248	246	245	242	246	247	248	246.4	0.5
前中車各放 400 克	231	233	238	233	235	238	234	233	237	236	234.8	0.6
前中車各放 500 克	217	214	215	218	214	213	217	216	215	218	215.7	0.6

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-----	------

對照組放 0 克	287	288	284	286	283	284	285	283	284	286	285	1
前中車各放 100 克	238	231	235	235	232	236	238	237	235	236	235.3	0.7
前中車各放 200 克	246	248	245	243	247	245	242	248	249	246	245.9	0.6
前中車各放 300 克	258	257	254	252	257	256	258	256	254	258	256	0.4
前中車各放 400 克	245	248	247	246	248	245	242	248	246	243	245.8	0.5
前中車各放 500 克	237	238	235	236	238	237	239	231	235	238	236.4	0.5

(5)中後車各放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	204	203	202	205	203	207	204	206	203	209	204.6
中後車各放 100 克	223	225	228	227	226	224	225	227	228	223	225.6
中後車各放 200 克	235	237	236	237	238	236	233	237	238	234	236.1
中後車各放 300 克	245	247	248	242	246	248	249	248	242	245	246
中後車各放 400 克	236	237	235	232	237	236	238	237	237	238	236.3
中後車各放 500 克	110	112	116	113	112	114	111	112	115	117	113.2

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	112	114	116	118	114	113	117	114	118	113	114.9	1
中後車各放 100 克	183	185	184	186	188	183	187	185	186	182	184.9	0.9
中後車各放 200 克	214	213	217	218	215	211	218	213	216	215	215	0.8
中後車各放 300 克	232	236	235	237	233	235	237	238	235	234	235.2	0.7
中後車各放 400 克	225	227	223	227	223	228	225	226	222	229	225.5	0.8
中後車各放 500 克	108	105	104	102	107	103	108	105	107	106	105.5	0.8

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	204	205	207	203	208	207	202	206	203	209	205.4	1
中後車各放 100 克	211	218	216	217	218	216	215	215	216	219	216.1	0.8
中後車各放 200 克	225	228	226	229	228	227	225	224	222	225	225.9	0.7
中後車各放 300 克	245	249	246	248	249	244	245	247	246	248	246.7	0.6
中後車各放 400 克	234	237	238	238	237	235	233	237	235	238	236.2	0.7
中後車各放 500 克	167	165	161	168	165	164	166	165	163	169	165.3	0.7

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	227	228	224	226	223	224	225	228	222	225	225.2	1
中後車各放 100 克	230	238	231	235	236	233	232	238	236	233	234.2	0.7
中後車各放 200 克	247	245	244	246	243	245	248	245	246	241	245	0.6
中後車各放 300 克	255	257	251	257	256	251	253	258	251	253	254.2	0.5
中後車各放 400 克	246	243	242	248	245	242	246	247	242	248	244.9	0.6
中後車各放 500 克	237	238	235	236	235	235	238	235	236	239	236.4	0.6

(6)前後車各放不同重量:

1.曲率記錄為 0 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值
對照組放 0 克	145	143	142	148	143	146	144	143	147	149	145
前後車各放 100 克	224	226	225	227	223	225	228	224	225	227	225.4
前後車各放 200 克	245	244	247	248	243	247	246	244	247	248	245.9
前後車各放 300 克	256	258	254	257	253	257	256	259	254	255	255.9
前後車各放 400 克	235	237	238	238	237	234	235	236	238	231	235.9
前後車各放 500 克	132	135	137	139	135	136	132	138	137	136	135.7

2.曲率記錄為 100 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	131	134	136	137	133	136	131	134	135	138	134.5	1
前後車各放 100 克	148	142	146	145	146	149	148	145	146	143	145.8	0.8
前後車各放 200 克	155	152	153	156	154	153	155	158	153	155	154.4	0.7
前後車各放 300 克	167	165	162	168	165	163	167	169	162	161	164.9	0.6
前後車各放 400 克	153	157	158	157	154	158	153	159	158	155	156.2	0.7
前後車各放 500 克	136	138	133	138	135	133	137	138	135	132	135.5	0.7

3.曲率記錄為 300 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	214	215	217	217	215	219	213	215	216	218	215.9	1
前後車各放 100 克	233	237	230	235	234	236	233	236	234	238	234.6	0.7
前後車各放 200 克	241	243	247	246	243	245	243	248	247	249	245.2	0.6
前後車各放 300 克	257	256	259	252	254	253	257	256	257	254	255.5	0.5
前後車各放 400 克	245	247	249	247	243	249	246	247	248	242	246.3	0.6

前後車各放500克	224	228	226	222	227	226	225	228	227	225	225.8	0.6
-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------	-----

4.曲率記錄為 500 時，滑行距離(公分 cm)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	平均值	出軌機率
對照組放 0 克	247	248	244	246	243	247	245	248	246	243	245.7	1
前後車各放 100 克	258	254	256	253	254	255	257	254	251	258	255	0.6
前後車各放 200 克	261	262	264	263	266	264	263	261	265	267	263.6	0.5
前後車各放 300 克	285	286	283	283	286	282	285	284	283	286	284.3	0.4
前後車各放 400 克	275	277	272	276	274	272	279	278	272	275	275	0.6
前後車各放 500 克	243	242	247	247	245	243	241	242	248	249	244.7	0.5

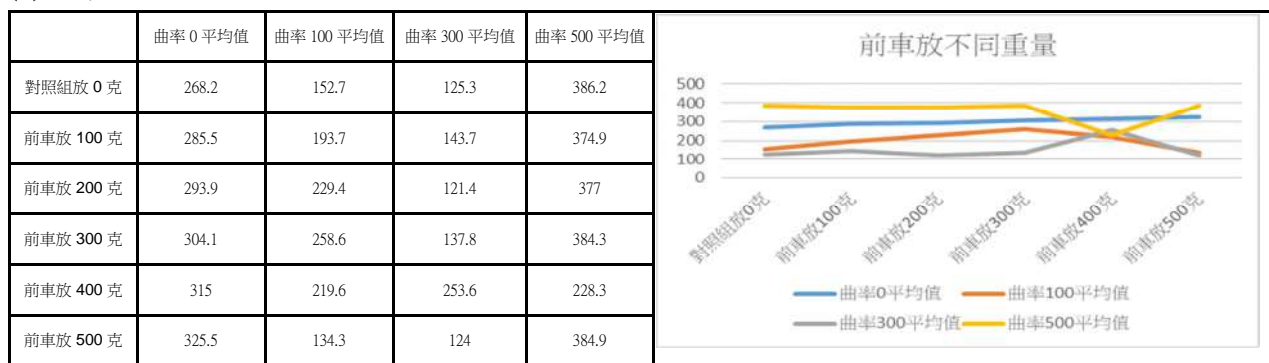
陸、討論

一、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離:(滑車軌道墊高高度為 20 公分)

滑車墊高高度 h 為 20 公分，斜面角度 3 度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 3^\circ}$

$* 0.2 = 0.456 \text{m/s}$

(1)前車放不同重量:



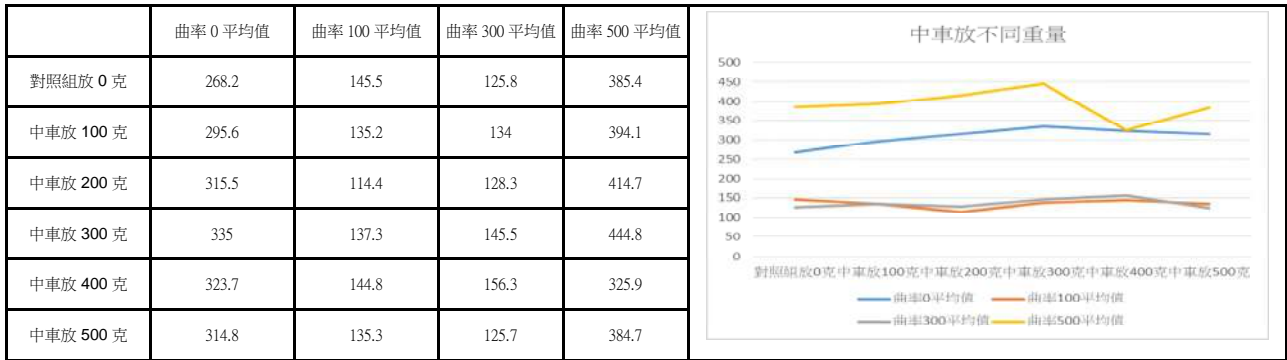
1. 由上述圖表可知在相同重量下，可知曲率越大，則滑行的距離有增長的情況。

我們發現曲率記錄為 500 時，滑行的距離比其他曲率 300 和曲率 100 時要長。可知曲率越大，

滑行的距離會越大。

2. 由上述圖表可知在相同曲度下可知並不是重量越大，滑行長度就會越長。我們發現當曲率記錄為 500 時，前車重量放 400 克時，滑行的距離會變短。

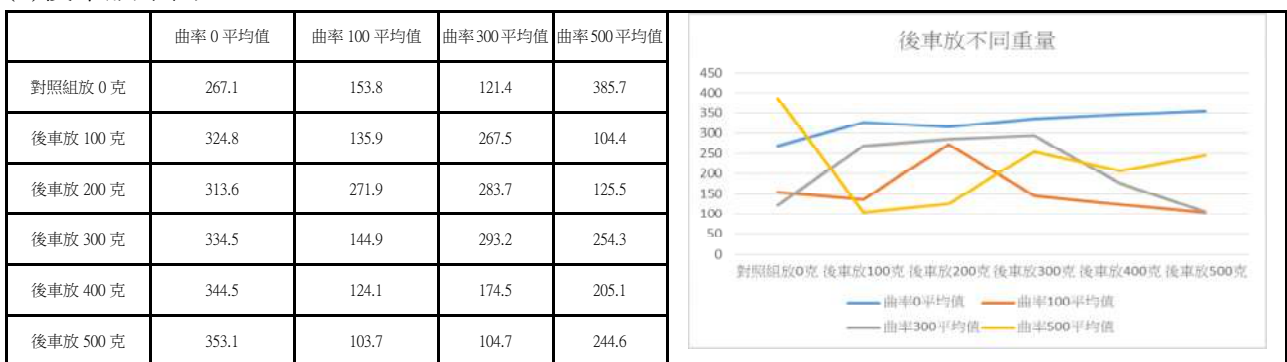
(2)中車放不同重量:



1. 由上述圖表可知在曲率記錄為 500 時，可知中車放不同重量，其滑行的距離較長。

2. 由上述圖表可知在相同曲率記錄下，可知並不是重量越大，滑行長度就會越長。我們發現當中車重量放 300 克或放 400 克時，滑行的距離會變長。

(3)後車放不同重量:



1. 由上述圖表可知在曲率記錄為 300 時，可知後車放不同重量，其滑行的距離較其他曲率長，當後車放 100 克、200 克、300 克其滑行的距離較長，但放 400 克和 500 克其滑行的距離就逐

漸減少。

2. 由上述圖表可知在相同曲率記錄下，可知並不是重量越大，滑行長度就會越長。

我們發現當曲率記錄為 100 或曲率為 300 時，後車重量放 500 克時，滑行的距離會變短。

(4)前中車各放不同重量:



1. 由上述圖表可知在曲率記錄為 300 時，可知前中車各放 300 克時，其滑行的距離較長。

2. 由上述圖表可知在相同重量下，我們發現曲率記錄為 100 時比曲率記錄為 500 和曲率記錄為 300 其滑行距離來的小。可知曲率記錄越小，滑行的距離越短。

(5)中後車各放不同重量:



1. 由上圖表可知在曲率記錄為 100 時，中後車各放 400 克重，滑行的距離最大。可知重量越

重，滑行距離不一定會增長。

- 由上述的圖表可知在相同重量下，可知曲率越小，滑行的長度會有減少的現象。發現曲率記錄為 300 時比曲率記錄為 500 或曲率 100 其滑行距離來的小。可知曲率記錄越小，滑行長度不一定會越小。

(6)前後車各放不同重量:



- 由上圖表可知在曲率記錄為 500 時，重量增加，滑行的長度會有增減。可知重量越重，滑行的長度不一定會增加，會有增有減。
- 由上圖表可知在相同曲率記錄下，當曲率記錄為 0 時，重量越重時，滑行距離越長，而其他的曲率記錄軌道，重量越重反而滑行距離越短。

二、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離: (滑車軌道墊高高度為 25 公分)

滑車墊高高度 h 為 25 公分，斜面角度 5 度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 5^\circ * 0.25} = 0.853 \text{m/s}$

(1)前車放不同重量:



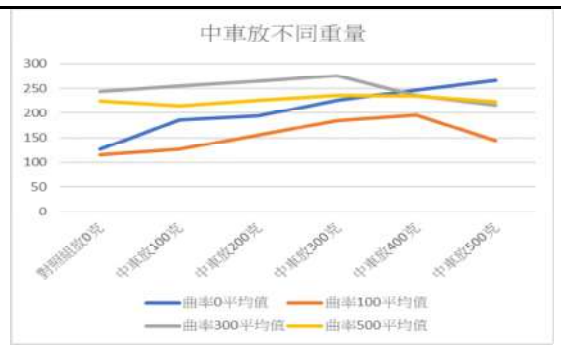
前車放 100 克	125	114.6	205.8	315.5
前車放 200 克	145.8	125.2	215.8	324.4
前車放 300 克	154.3	134.8	236.1	335.5
前車放 400 克	165.1	143.1	244	326.7
前車放 500 克	174.9	164.4	213.7	275.9

1. 由上圖表可知當放不同重量時，我們發現曲率記錄越大，滑行的距離越長，可知曲率記錄越小，滑行的距離會越短。

2. 由上圖表可知當前車重量放 400 克時，在曲率記錄為 300 和曲率記錄為 500，其滑行距離會較長。當前車重量放 500 克時，在曲率記錄為 100 和曲率記錄為 0，其滑行距離會較長。

(2)中車放不同重量:

	曲率 0 平均值	曲率 100 平均值	曲率 300 平均值	曲率 500 平均值
對照組放 0 克	126.3	115.3	244.3	225.1
中車放 100 克	185.4	126.3	255.4	214.6
中車放 200 克	194.4	155	264.5	225.4
中車放 300 克	225.4	185.2	276	235
中車放 400 克	245.9	195.4	235.5	234.3
中車放 500 克	265.4	144.6	216.1	222.7



1. 由上圖表可知相同重量下，可知曲率記錄為 300 時，其滑行距離會較長。

2. 由上圖表可知中車放 400 克時，在不同曲率記錄下，其滑行距離都較長。可見在相同曲率記錄為下，可知並不是重量越大，滑行的長度就會越長。

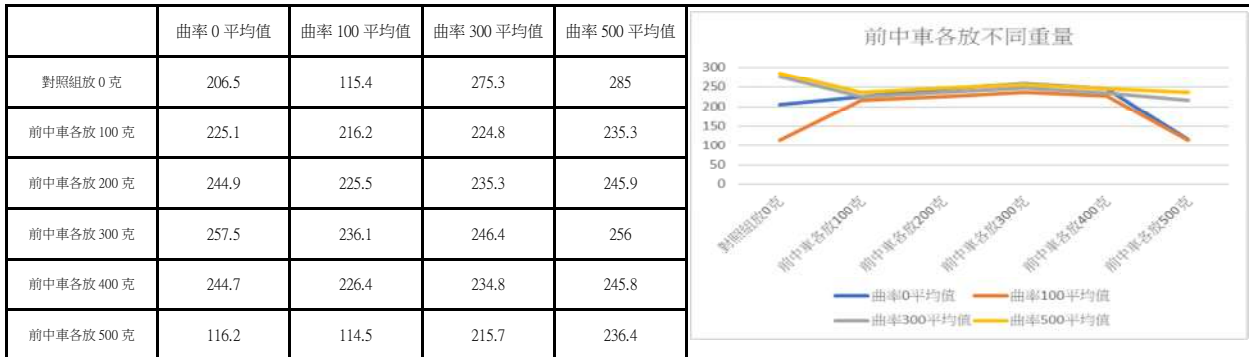
(3)後車放不同重量:

	曲率 0 平均值	曲率 100 平均值	曲率 300 平均值	曲率 500 平均值	後車放不同重量
--	----------	------------	------------	------------	---------

對照組放 0 克	115.1	105.6	205.4	225.7
後車放 100 克	153.9	125.1	216.3	245.3
後車放 200 克	179.1	154.7	225.9	255
後車放 300 克	204.6	185.8	244.2	273.8
後車放 400 克	214.8	165.3	234.6	246
後車放 500 克	144.4	135.6	224.5	236.8

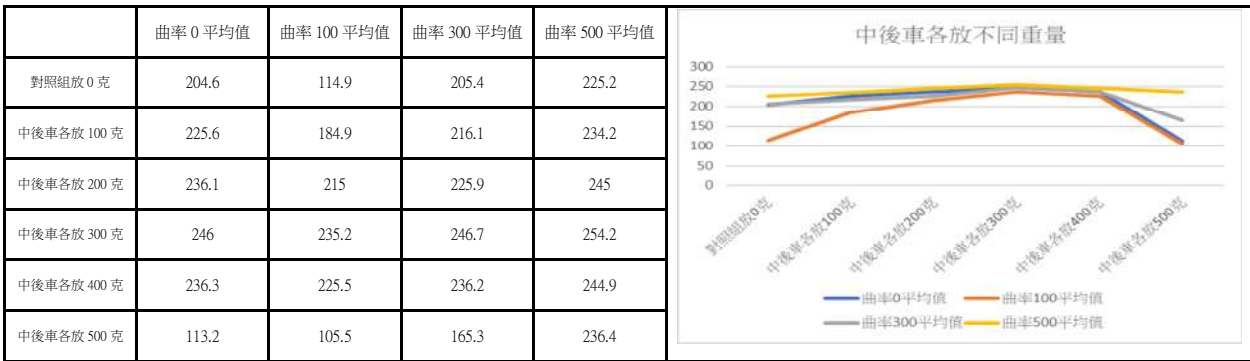
1. 由上圖表可知後車重量放 400 克時，曲率記錄越大滑行距離先減後增，可知相同重量時，曲率記錄越大，滑行距離不一定會一直增加。
2. 由上圖表可知曲率記錄為 100 時，重量越大滑行距離不一定會一直增加。後車放 300 克時，其滑行距離較長。

(4)前中車各放不同重量:



1. 由上圖表可知，前中車各放不同重量時，當曲率增加時其滑行距離增長，可知在相同重量下，曲率記錄越大，滑行距離會較長。
2. 由上圖表可知，曲率記錄為 500 時，重量增加，滑行長度不一定會一直增加。當前中車各放 300 克時，滑行距離較長。

(5)中後車各放不同重量:

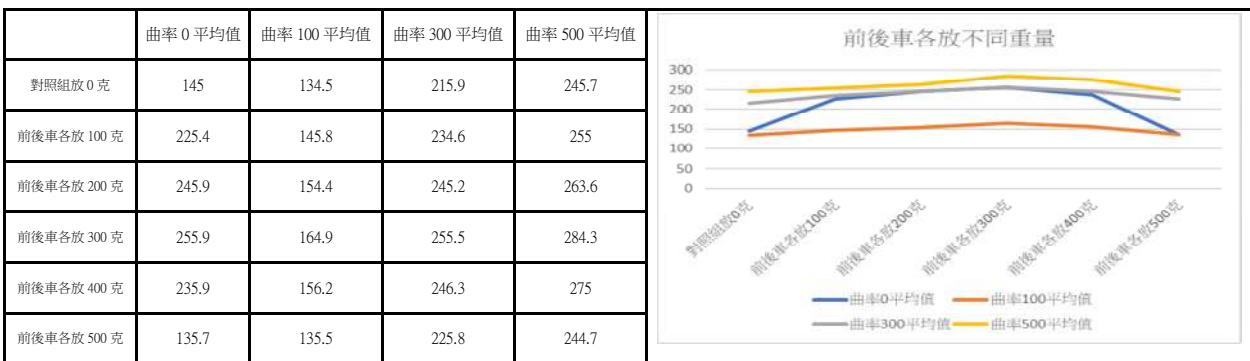


1. 由上圖表可知，曲率記錄為 500 時，重量越重，滑行長度先增後減，可知相同曲率記錄下，

重量越重，滑行距離不一定會增加。

2. 由上圖表可知，重量為 100 公克時，曲率記錄越大時其滑行距離會較長。

(6)前後車各放不同重量:



1. 由上圖表可知，曲率記錄為 300 時，重量越大，滑行距離先減後增，可知相同曲率記錄時，

重量越大，滑行距離不一定會增加。

2. 由上圖表可知，前後車各放不同重量時，我們發現曲率記錄越小，其滑行距離也越短。

三、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察不同曲率時出軌機率：

(滑車軌道墊高高度為 20 公分)

滑車墊高高度 h 為 20 公分，斜面角度 3 度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 3^\circ * 0.2} = 0.456 \text{m/s}$

(1)前車放不同重量：



當曲率記錄為 0 時，不管放的重量與否，出軌機率都為 0，而如果軌道彎曲程度越大時，出軌的機率是遞增的，而曲率記錄為 100 與 300 時，放的重量越重，出軌的機率就越小，但如果重量到達 300 克之後，除了曲率記錄為 0 的軌道外，其他軌道的出軌機率都是有顯著的升高跡象，而反觀曲率記錄為 500 時，出軌機率都是在 10%與 40%之間來回跳動改變。

(2)中車放不同重量：



曲率記錄為 0 的軌道不論放的重量與否出軌機率都為 0，而曲率記錄為 100 的軌道時，不管重量多少，出軌機率都為 100%，而曲率記錄為 300 的軌道時，出軌的機率都接近於 100% 到 80%之間，曲率記錄為 500 時，不論放的重量與否，出軌機率都是在 10%到 30%之間。

(3)後車放不同重量：



曲率 300	1	1	0.3	0.7	1	0.7
曲率 500	1	1	1	0.3	1	1

曲率記錄為 0 的軌道不論放的重量與否出軌機率都為 0，而曲率記錄為 300 時後車重量放 200 克與曲率記錄為 500 時後車重量放 300 克，出軌機率都降至 30%，否則放其他重量與曲率的出軌機率都為 100%，而曲率記錄為 300 時重量放 0、100 與 400 時出軌機率都是 100%，而其他重量的出軌機率落在 70%到 30%之間。

(4)前中車各放不同重量:

	對照組放 0 克 (出軌機率)	前中車放 100 克 (出軌機率)	前中車放 200 克 (出軌機率)	前中車放 300 克 (出軌機率)	前中車放 400 克 (出軌機率)	前中車放 500 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	1	0.8	0.6	0.4	0.8	0.8
曲率 300	1	0.6	0.5	0.4	0.6	0.6
曲率 500	1	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3

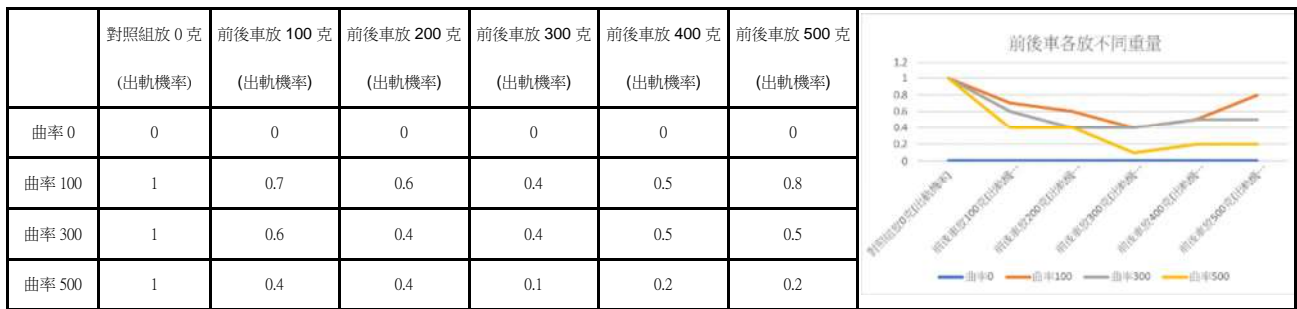
曲率記錄為 0 的軌道不論放的重量與否出軌機率都為 0，當不管曲率多少，前中車放 300 克時，出軌機率最小。當重量放越重時，我們發現出軌機率變小，但在重量放 300 克以後，出軌的機率則逐漸上升。

(5)中後車各放不同重量:

	對照組放 0 克 (出軌機率)	中後車放 100 克 (出軌機率)	中後車放 200 克 (出軌機率)	中後車放 300 克 (出軌機率)	中後車放 400 克 (出軌機率)	中後車放 500 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	1	0.9	0.7	0.5	0.9	0.9
曲率 300	1	0.7	0.6	0.5	0.6	0.6
曲率 500	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.3

曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，而如果曲率記錄越大，出軌的機率越大，而如果重量越重，出軌的機率越低，但曲率記錄為 100 與曲率記錄為 300 的軌道，我們發現放重量 300 公克以後，出軌機率則逐漸上升。

(6)前後車各放不同重量:



曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，但曲率記錄為 100 與曲率記錄為 300 時，放重量 300 公克以後，出軌的機率則逐漸上升，而曲率記錄為 500 時，重量越重時出軌機率則是繼續下降。

四、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察不同曲率時出軌機率:

(滑車軌道墊高高度為 25 公分)

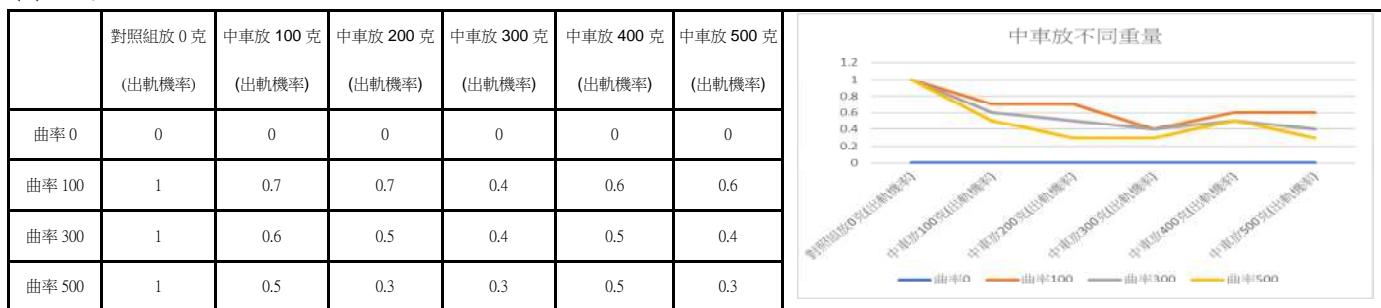
滑車墊高高度 h 為 25 公分，斜面角度 5 度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 5^\circ * 0.25} = 0.853 \text{ m/s}$

(1)前車放不同重量:



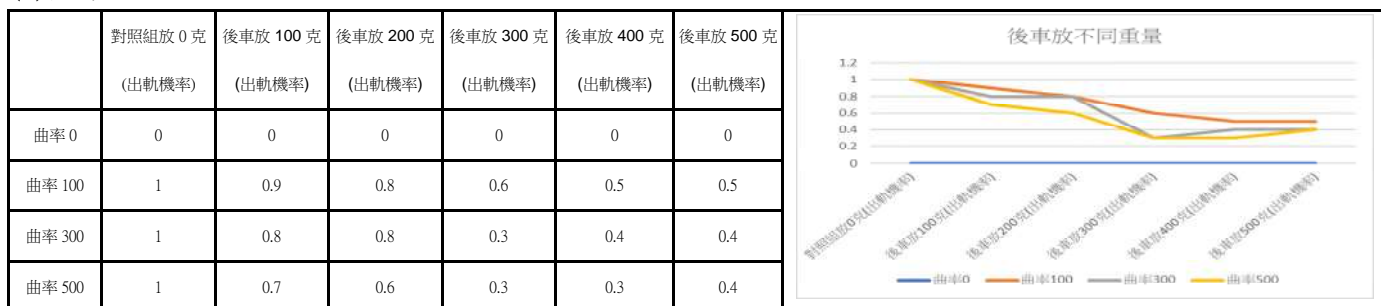
曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，我們發現曲率記錄為 100 時，比其他曲率的出軌機率要來得大。當不同曲率記錄時，我們發現前車放 300 克時，出軌機率會較低。

(2)中車放不同重量:



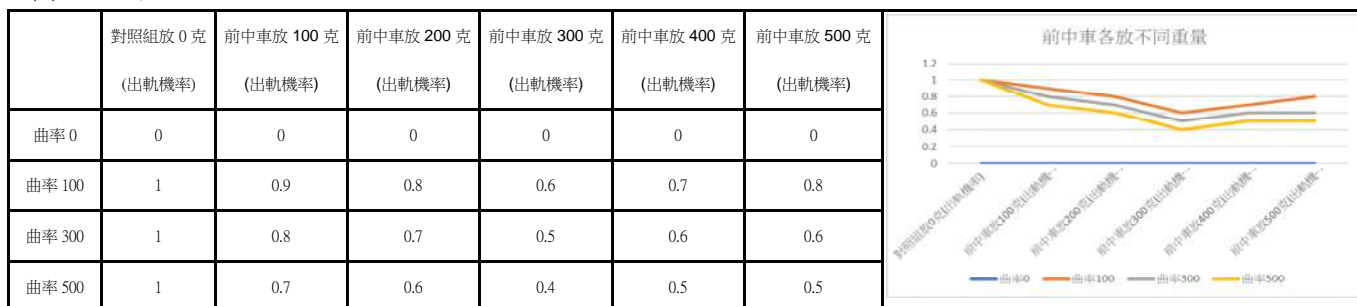
曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，我們發現不同曲率記錄時，中車放重量 300 克時，出軌機率會較低。當中車放重量 400 克時，出軌機率則逐漸上升，但中車放重量 500 克後，出軌機率又會下降。

(3)後車放不同重量:



曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，我們發現不同曲率記錄時，當後車放越重時，出軌機率會逐漸降低。當曲率記錄為 300 時，當後車重量放 300 克比放 100 克時，軌道的出軌機率下降了 50%，在重量放 400 公克後，出軌機率上升約 10%。

(4)前中車各放不同重量:



曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，我們發現曲率記錄為 300 與記錄為 500 時，前中車放 300 克到 400 克的軌道，其出軌機率上升約 10%。

(5)中後車各放不同重量:



曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，我們發現不同曲率時，中後車隨著放重量越重，出軌機率會越小，但放重量 300 克時出軌機率達最小，之後又放重量越重，則出軌機率又再度上升。

(6)前後車各放不同重量:



曲率記錄為 0 的軌道不論重量與否出軌機率都為 0，我們發現曲率記錄為 100 時，出軌機率較大。而我們發現不同曲率記錄為時，前後車重量放 300 克時，出軌的機率最小。

五、我們認為造成實驗數據產生誤差的原因:

(1)我們利用 3D 列印製作的模擬鐵軌在操作實驗時產生一些問題，我們發現模擬鐵軌的間距都有些許的差距，雖然在製作鐵軌時，有時已經確保一台滑車可以行駛過得去，但後面連結

的滑車有時候不一定能行駛過去，還需再調整間距才可以使三台連結滑車通過並要測量好幾次才行。

(2)鐵軌軌道的連接在操作實驗時產生一些問題，因曲率越大時，發現有些無法連接的過短鐵軌，因此我們使用熱熔膠條來加長連接下一個短鐵軌，由於熱熔膠條的不合形狀和材質較柔軟可能造成實驗數據出現誤差的原因。

(3)滑車的連結製作模擬森林火車時，為了更加完美的呈現，我們使用細綿線將三台滑車連接在一起，使滑車連接鬆散而不夠緊密，同時未有可緩衝撞擊的空間，這也可能造成實驗數據出現誤差的原因。

(4)因我們為了降低實驗數據的誤差，所以每一個實驗都做 10 組，因此鐵軌的多次使用後導致鐵軌磨損，這也可能造成實驗數據產生誤差的原因。

總結上述，我們認為最主要的原因是 3D 列印製作的模擬鐵軌的問題影響最大，接著是鐵軌軌道的連接方式次之，再來是鐵軌的多次使用導致鐵軌磨損，接著是滑車的連結製作方式。

柒、結論

本實驗旨在利用 3D 列印技術，來製作不同曲率的軌道，將不同重量的砝碼放在不同滑車的位置上，使用斜面長度為 124 公分，墊高高度為 20 公分和 25 公分的滑車軌道。

利用下滑重力使滑車在軌道產生下滑加速度，因重力位能產生動能使滑車行駛。分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上模擬出不同重量的乘客坐在不同位置的森林小火車上，當滑車行經在不同曲度的軌道時觀察記錄滑行距離和出軌的機率。

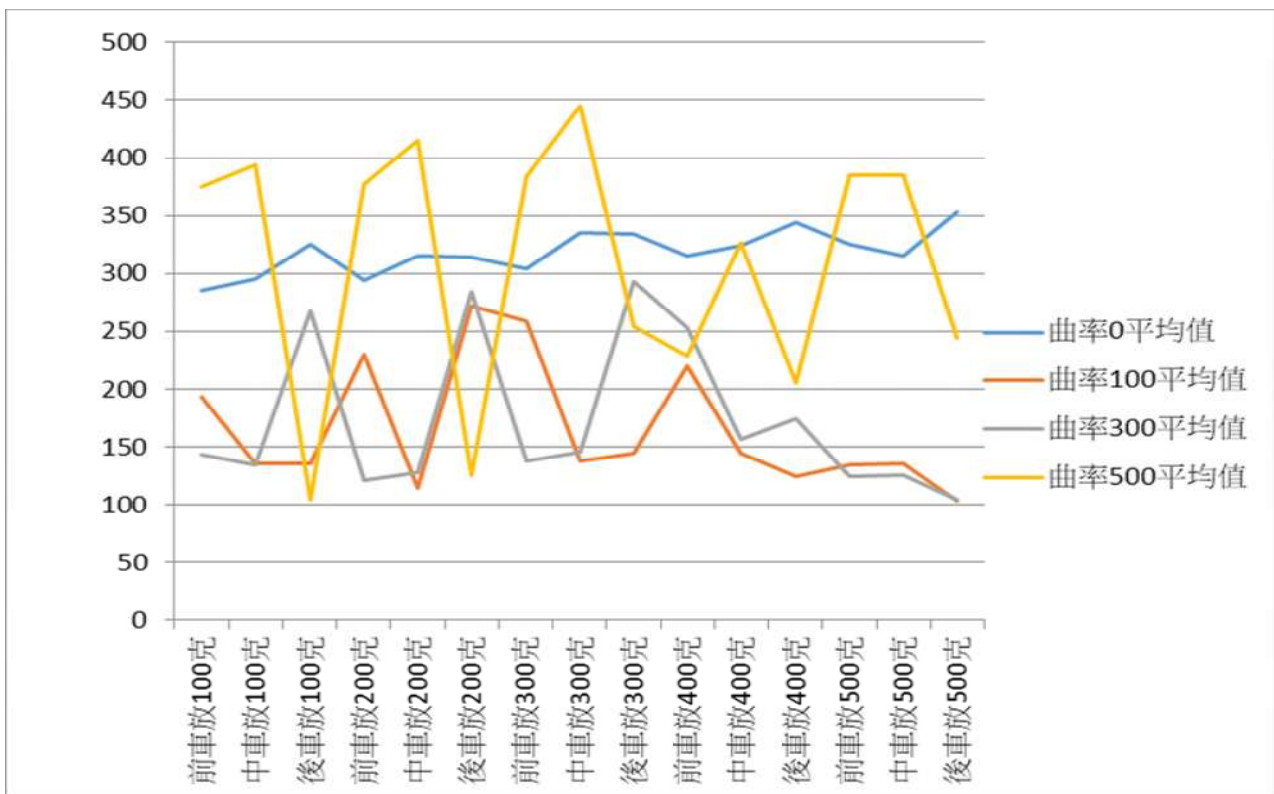
藉此實驗研究探討森林小火車翻覆情況跟乘客乘坐重心分布情況、坡道的彎曲程度和坡道的高度有甚麼影響。我們可以同時了解相關原理、熟練操作、發現問題和並探討、解決問題。

我們根據實驗結果做綜合整體分析如下:

一、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離: (滑車軌道墊高高度為 20 公分)

(1)單車不同位置放不同重量:

	曲率 0 平均值	曲率 100 平均值	曲率 300 平均值	曲率 500 平均值
前車放 100 克	285.5	193.7	143.7	374.9
中車放 100 克	295.6	135.2	134	394.1
後車放 100 克	324.8	135.9	267.5	104.4
前車放 200 克	293.9	229.4	121.4	377
中車放 200 克	315.5	114.4	128.3	414.7
後車放 200 克	313.6	271.9	283.7	125.5
前車放 300 克	304.1	258.6	137.8	384.3
中車放 300 克	335	137.3	145.5	444.8
後車放 300 克	334.5	144.9	293.2	254.3
前車放 400 克	315	219.6	253.6	228.3
中車放 400 克	323.7	144.8	156.3	325.9
後車放 400 克	344.5	124.1	174.5	205.1
前車放 500 克	325.5	134.3	124	384.9
中車放 500 克	314.8	135.3	125.7	384.7
後車放 500 克	353.1	103.7	104.7	244.6

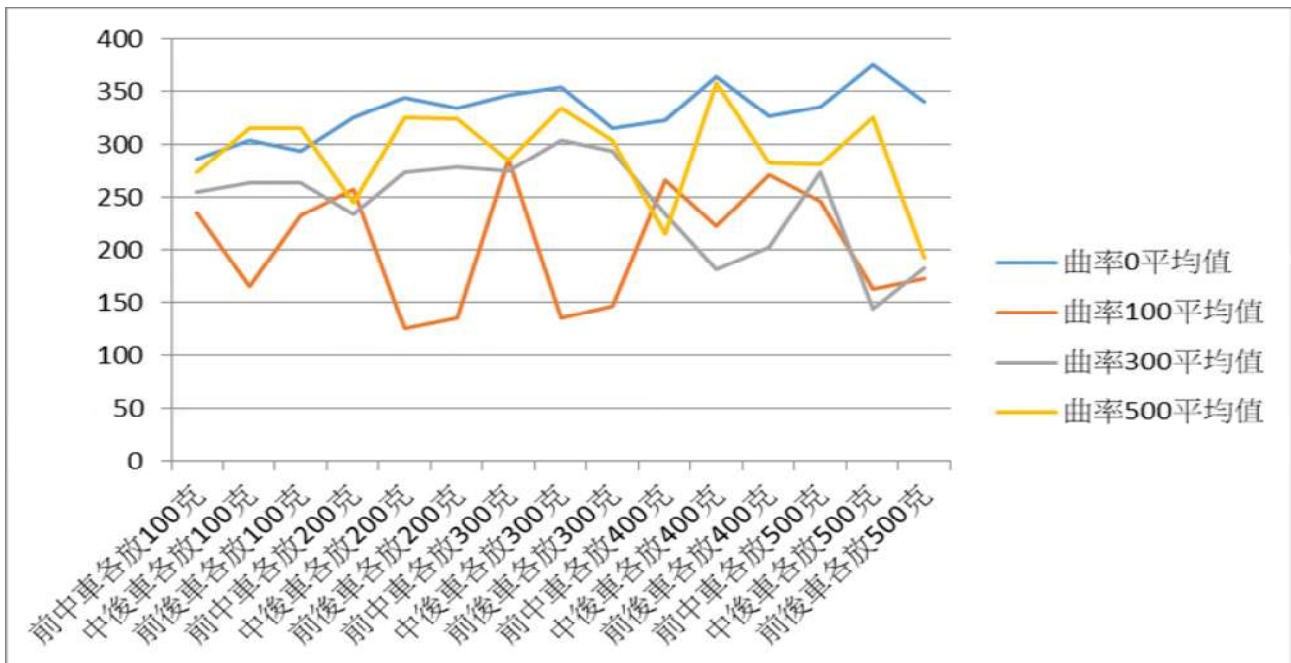


1. 當曲率記錄為 0 的軌道時，重量放置的位置，大致上會影響滑車的滑行距離，如果重心在前，車子的滑行距離就會比放在中間或後面還要短。

2. 曲率記錄為 100 的軌道時，重心如果在前，大部分滑行距離會較長，重心在後次之，反之重心在中則最短。
3. 曲率記錄為 300 的軌道時，放重量 400 克時，重心在前滑行距離最長，放後面次之，中間最短，其餘大部分都是放後面最長，其餘的兩個差不多。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，重心在中間時，滑行距離最長，前面次之，後面最短。
5. 由此可知，當此組:單車不同位置放不同重量時，發現在不同的前、中、後車各放重量為 400 克，滑行距離最長。

(2)雙車不同位置放不同重量:

	曲率 0 平均值	曲率 100 平均值	曲率 300 平均值	
前中車各放 100 克	286.5	235.7	255.1	274.5
中後車各放 100 克	303.9	165.1	264.5	315.8
前後車各放 100 克	294.6	232.6	263.6	315.5
前中車各放 200 克	324.8	257.5	234.5	244.9
中後車各放 200 克	343.7	124.9	273.6	325.1
前後車各放 200 克	334.6	135.5	278.9	324.5
前中車各放 300 克	346.5	286.4	275.3	285
中後車各放 300 克	354.2	135	304	334.8
前後車各放 300 克	315.4	146.1	293.7	304.7
前中車各放 400 克	323.2	267	233.8	215.4
中後車各放 400 克	364.1	222.8	181.5	358.5
前後車各放 400 克	326.1	271.1	203.2	282.6
前中車各放 500 克	335.1	246.9	274	281.9
中後車各放 500 克	375.1	162.6	143.5	324.9
前後車各放 500 克	340.7	172.6	183.3	193.3



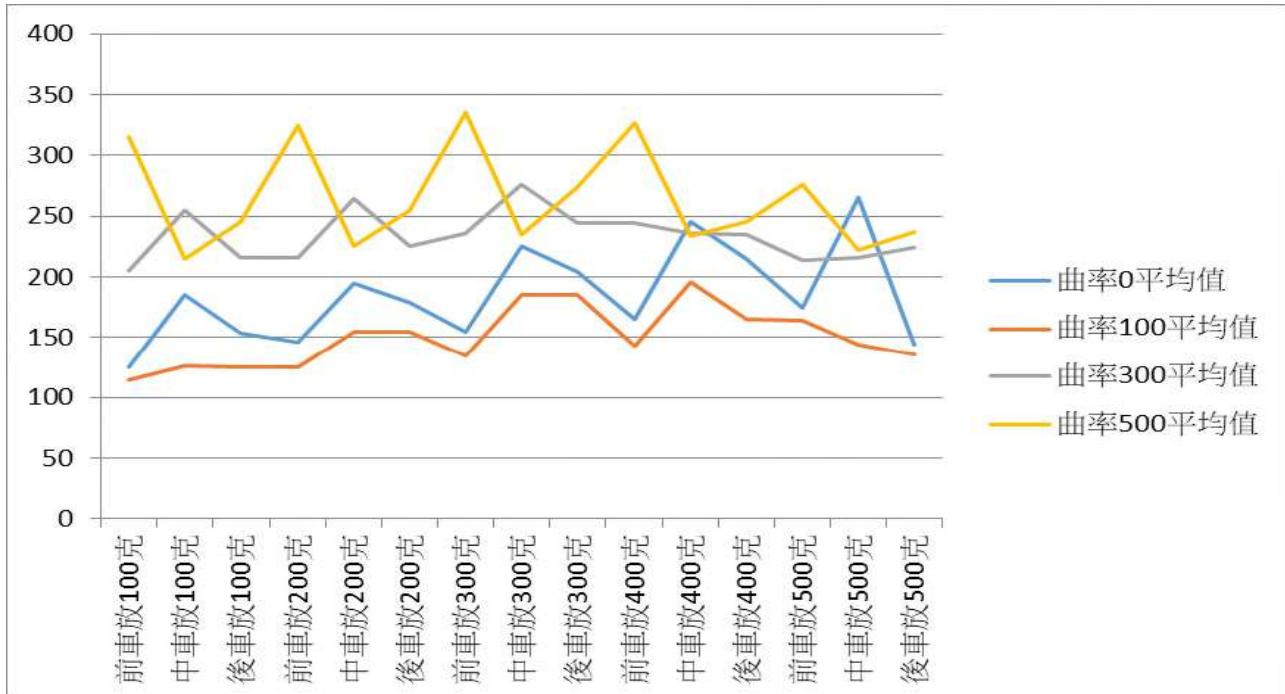
1. 曲率記錄為 0 的軌道時，重心在中後時，滑行距離最長，前後次之，前中最短。
2. 曲率記錄為 100 的軌道時，重心在前中的時候，滑行距離最長，前後次之，前中最短。
3. 曲率記錄為 300 的軌道時，放重量 100 克與 300 克時，重心在中後時滑行距離最長，前後次之，前中最短。放重量 500 克時，重心在前中時，滑行距離最長，前後次之，中後最短其餘重量都是重心在前後時，滑行距離最長，中後次之，前中最短。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，重心在中後時。滑行距離最長，前後次之，前中最短。
5. 由此可知，當此組雙車不同位置放不同重量時，發現在不同的前後車各放 400 克或前中車各放 500 克時，滑行距離最長。

二、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離: (滑車軌道墊高高度為 25 公分)

(1)單車不同位置放不同重量:

	曲率 0 平均值	曲率 100 平均值	曲率 300 平均值	
前車放 100 克	125	114.6	205.8	315.5
中車放 100 克	185.4	126.3	255.4	214.6
後車放 100 克	153.9	125.1	216.3	245.3
前車放 200 克	145.8	125.2	215.8	324.4
中車放 200 克	194.4	155	264.5	225.4
後車放 200 克	179.1	154.7	225.9	255
前車放 300 克	154.3	134.8	236.1	335.5
中車放 300 克	225.4	185.2	276	235
後車放 300 克	204.6	185.8	244.2	273.8
前車放 400 克	165.1	143.1	244	326.7

中車放 400 克	245.9	195.4	235.5	234.3
後車放 400 克	214.8	165.3	234.6	246
前車放 500 克	174.9	164.4	213.7	275.9
中車放 500 克	265.4	144.6	216.1	222.7
後車放 500 克	144.4	135.6	224.5	236.8

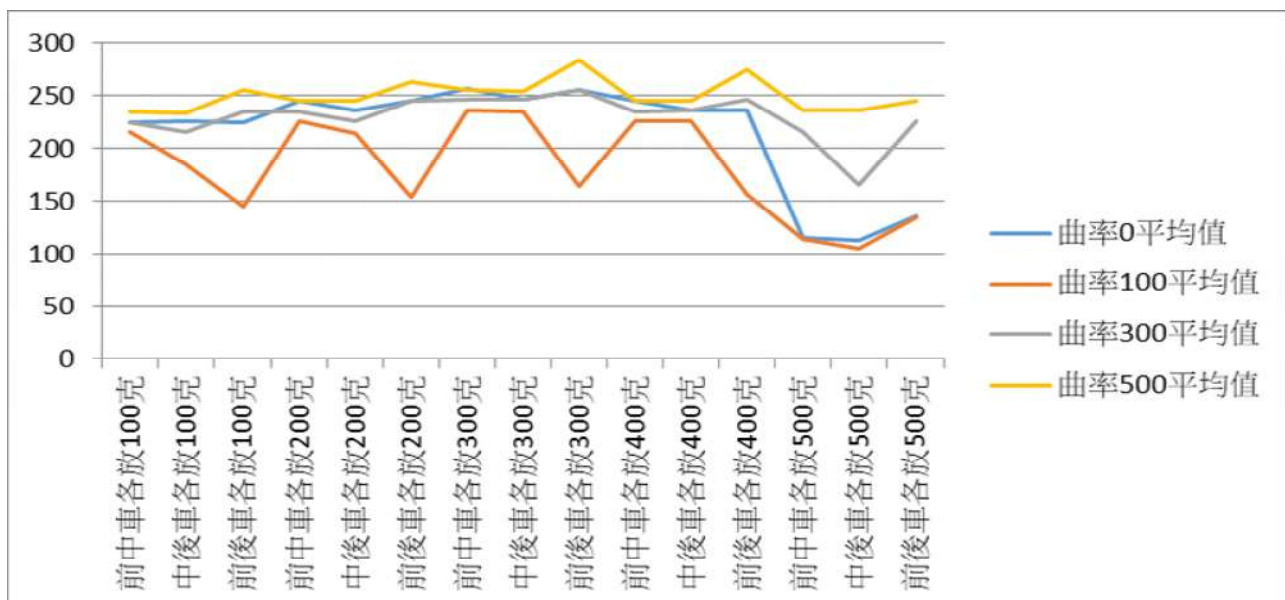


1. 曲率記錄為 0 的軌道時，重心在中間時，滑行距離最長，前次之，中 shortest。
2. 曲率記錄為 100 的軌道時，放重量為 100 克、200 克和 400 克時，當重心在中時，滑行距離最長，前後次之，前 shortest。放重量為 300 克時，重心在後時，滑行距離最長，中次之，前 shortest，放重量為 500 克時，重心在前時，滑行距離最長，中次之，後 shortest。
3. 曲率記錄為 300 的軌道時，重心在中時，滑行距離最長，後次之，前 shortest。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，重心在前時，滑行距離最長，後次之，中 shortest。
5. 由此可知，當此組:單車不同位置放不同重量時，發現在不同的前、中、後車各放重量為 400 克，滑行距離最長。

(2)雙車不同位置放不同重量:

	曲率 0 平均值	曲率 100 平均值	曲率 300 平均值	曲率 500 平均值
前中車各放 100 克	225.1	216.2	224.8	235.3
中後車各放 100 克	225.6	184.9	216.1	234.2
前後車各放 100 克	225.4	145.8	234.6	255

前中車各放 200 克	244.9	225.5	235.3	245.9
中後車各放 200 克	236.1	215	225.9	245
前後車各放 200 克	245.9	154.4	245.2	263.6
前中車各放 300 克	257.5	236.1	246.4	256
中後車各放 300 克	246	235.2	246.7	254.2
前後車各放 300 克	255.9	164.9	255.5	284.3
前中車各放 400 克	244.7	226.4	234.8	245.8
中後車各放 400 克	236.3	225.5	236.2	244.9
前後車各放 400 克	235.9	156.2	246.3	275
前中車各放 500 克	116.2	114.5	215.7	236.4
中後車各放 500 克	113.2	105.5	165.3	236.4
前後車各放 500 克	135.7	135.5	225.8	244.7

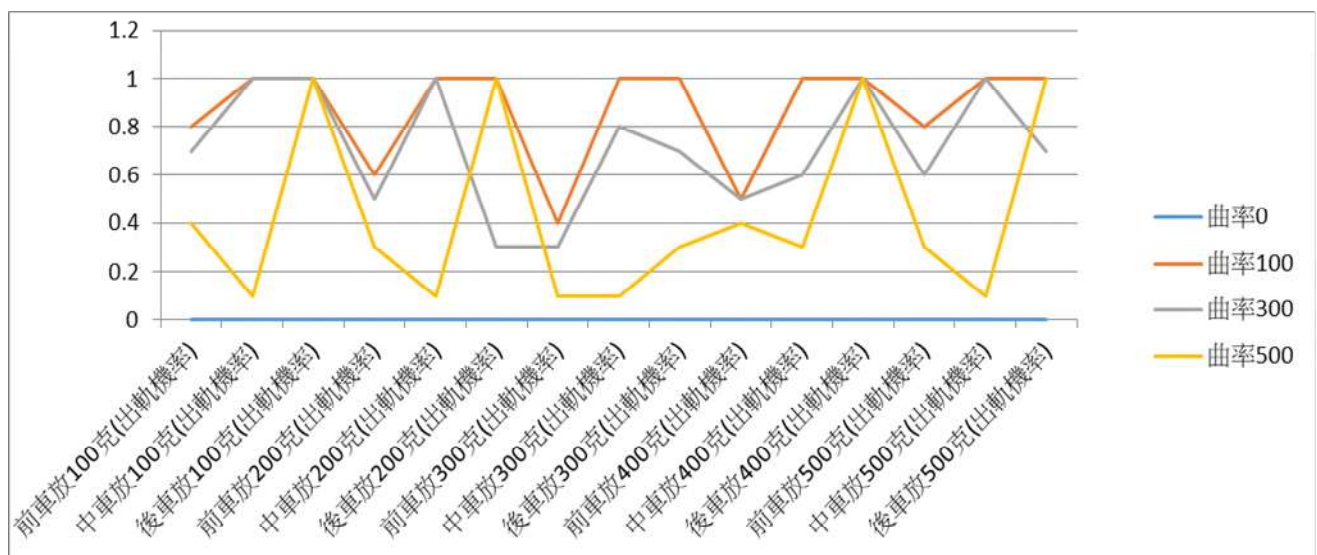


1. 曲率記錄為 0 的軌道時，放重量為 200 克時，重心在前後時，滑行距離最長，前中次之，中後最短，其他重量皆為重心在中後時，滑行距離最長，前後次之，前中最短，但放重量為 500 克時，出軌的滑行距離就會呈現斷崖式的減少。
2. 曲率記錄為 100 的軌道時，重心在前中時，滑行距離最長，中後次之，前後最短，但在重量為 500 克時，出軌的滑行距離就會呈現斷崖式的減少。
3. 曲率記錄為 300 的軌道時，重心在前後時，滑行距離最長，前中次之，中後最短。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，重心在前後時，滑行距離最長，前中次之，中後最短。
5. 由此可知，當此組雙車不同位置放不同重量時，發現在不同的前後車各放 400 克或前中車各放 500 克時，滑行距離最長。

三、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的出軌機率: (滑車軌道墊高高度為 20 公分)

(1)單車不同位置放不同重量出軌機率:

	前車放 100 克 (出軌機率)	中車放 100 克 (出軌機率)	後車放 100 克 (出軌機率)	前車放 200 克 (出軌機率)	中車放 200 克 (出軌機率)	後車放 200 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.8	1	1	0.6	1	1
曲率 300	0.7	1	1	0.5	1	0.3
曲率 500	0.4	0.1	1	0.3	0.1	1
	前車放 300 克 (出軌機率)	中車放 300 克 (出軌機率)	後車放 300 克 (出軌機率)	前車放 400 克 (出軌機率)	中車放 400 克 (出軌機率)	後車放 400 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.4	1	1	0.5	1	1
曲率 300	0.3	0.8	0.7	0.5	0.6	1
曲率 500	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	1
	前車放 500 克 (出軌機率)	中車放 500 克 (出軌機率)	後車放 500 克 (出軌機率)			
曲率 0	0	0	0			
曲率 100	0.8	1	1			
曲率 300	0.6	1	0.7			
曲率 500	0.3	0.1	1			

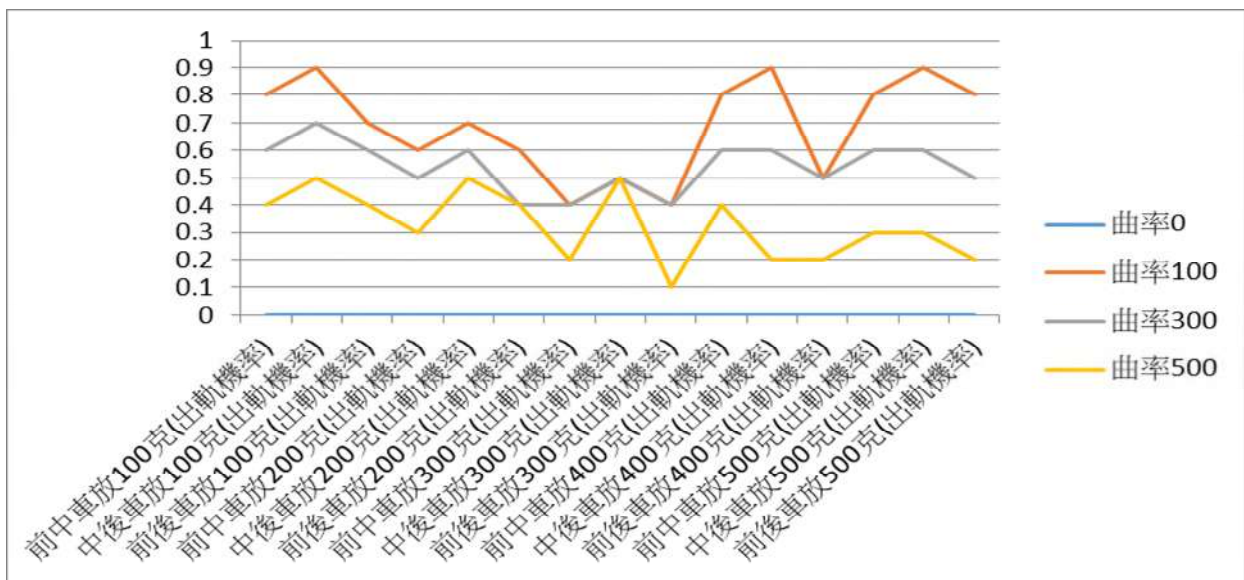


1. 曲率記錄為 0 軌道時，出軌機率皆為 0。
2. 曲率記錄為 100 的軌道時，出軌機率大至遊走在 80%到 100%之間，除了在前車放重量 200 克、300 克、400 克時，出軌機率大致在 40%與 60%之間改變。

3. 曲率記錄為 300 的軌道時，中車、後車放重量 100 克與中車放重量 200 克與後車、中車放重量 500 克時，這些出軌機率皆為 100%，而後車放重量 200 克與前車放重量 300 克時，出軌機率降至 30%，其他的出軌機率大致上在 50%到 70%之間改變。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，後車分別放重量 100、200、400 與 500 克時出軌機率都為 100%，其餘出軌機率都驟降至 30%以下。
5. 由此可知，當此組:單車不同位置放不同重量時，發現在不同的前車和中車各放重量為 400 克，出軌機率較低。所以重心較中間會較穩定。

(2)雙車不同位置放不同重量出軌機率:

	前中車放 100 克 (出軌機率)	中後車放 100 克 (出軌機率)	前後車放 100 克 (出軌機率)	前中車放 200 克 (出軌機率)	中後車放 200 克 (出軌機率)	前後車放 200 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.8	0.9	0.7	0.6	0.7	0.6
曲率 300	0.6	0.7	0.6	0.5	0.6	0.4
曲率 500	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4
	前中車放 300 克 (出軌機率)	中後車放 300 克 (出軌機率)	前後車放 300 克 (出軌機率)	前中車放 400 克 (出軌機率)	中後車放 400 克 (出軌機率)	前後車放 400 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.4	0.5	0.4	0.8	0.9	0.5
曲率 300	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	0.5
曲率 500	0.2	0.5	0.1	0.4	0.2	0.2
	前中車放 500 克 (出軌機率)	中後車放 500 克 (出軌機率)	前後車放 500 克 (出軌機率)			
曲率 0	0	0	0			
曲率 100	0.8	0.9	0.8			
曲率 300	0.6	0.6	0.5			
曲率 500	0.3	0.3	0.2			



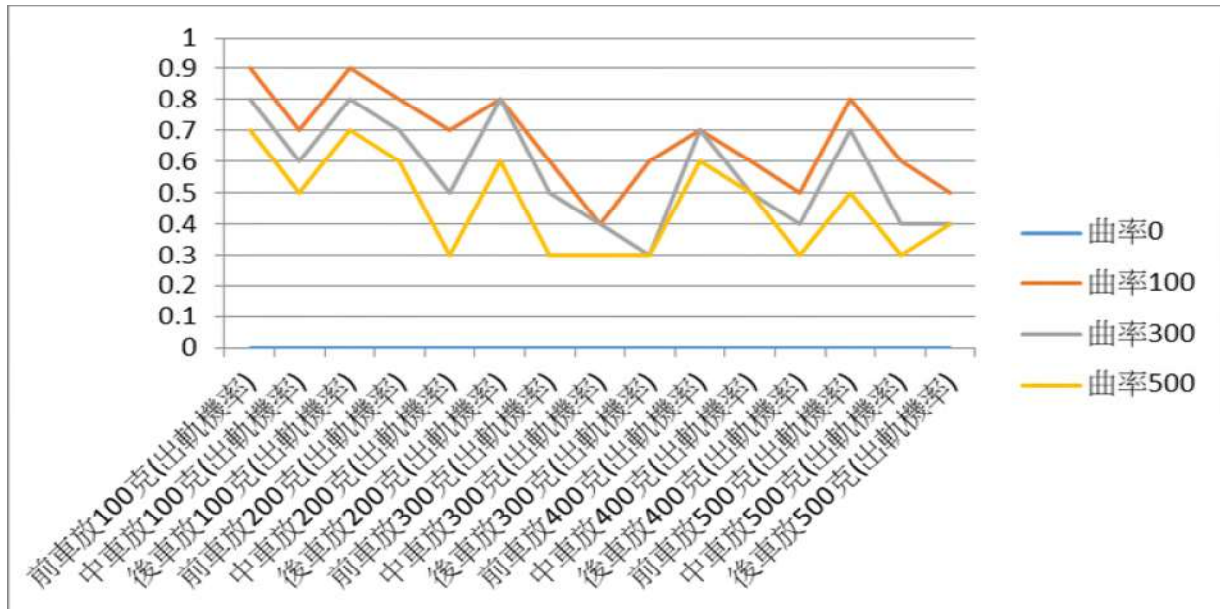
1. 曲率記錄為 0 軌道時，不論重量與否出軌機率皆為 0。
2. 曲率記錄為 100 的鐵軌時，在前中分放置 200 與 300 的鐵軌與在前後放 400 公克時，出軌機率都在 60%到 40%之間，其餘的重量出軌機率都達到 70%到 90%之間改變。
3. 曲率記錄為 300 的軌道時，出軌機率在 40%到 70%之間改變。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，出軌機率都低於 50%，而在前中放 300 公克時，出軌機率只有 10%。
5. 由此可知，當此組:雙車不同位置放不同重量出軌機率，發現在不同的前後車各放 400 克或前後車各放 500 克時，其出軌機率較低。所以重心較中間偏後會較穩定。

四、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離: (滑車軌道墊高高度為 25 公分)

(1)單車不同位置放不同重量出軌機率:

	前車放 100 克 (出軌機率)	中車放 100 克 (出軌機率)	後車放 100 克 (出軌機率)	前車放 200 克 (出軌機率)	中車放 200 克 (出軌機率)	後車放 200 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.9	0.7	0.9	0.8	0.7	0.8
曲率 300	0.8	0.6	0.8	0.7	0.5	0.8
曲率 500	0.7	0.5	0.7	0.6	0.3	0.6
	前車放 300 克 (出軌機率)	中車放 300 克 (出軌機率)	後車放 300 克 (出軌機率)	前車放 400 克 (出軌機率)	中車放 400 克 (出軌機率)	後車放 400 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.6	0.4	0.6	0.7	0.6	0.5
曲率 300	0.5	0.4	0.3	0.7	0.5	0.4

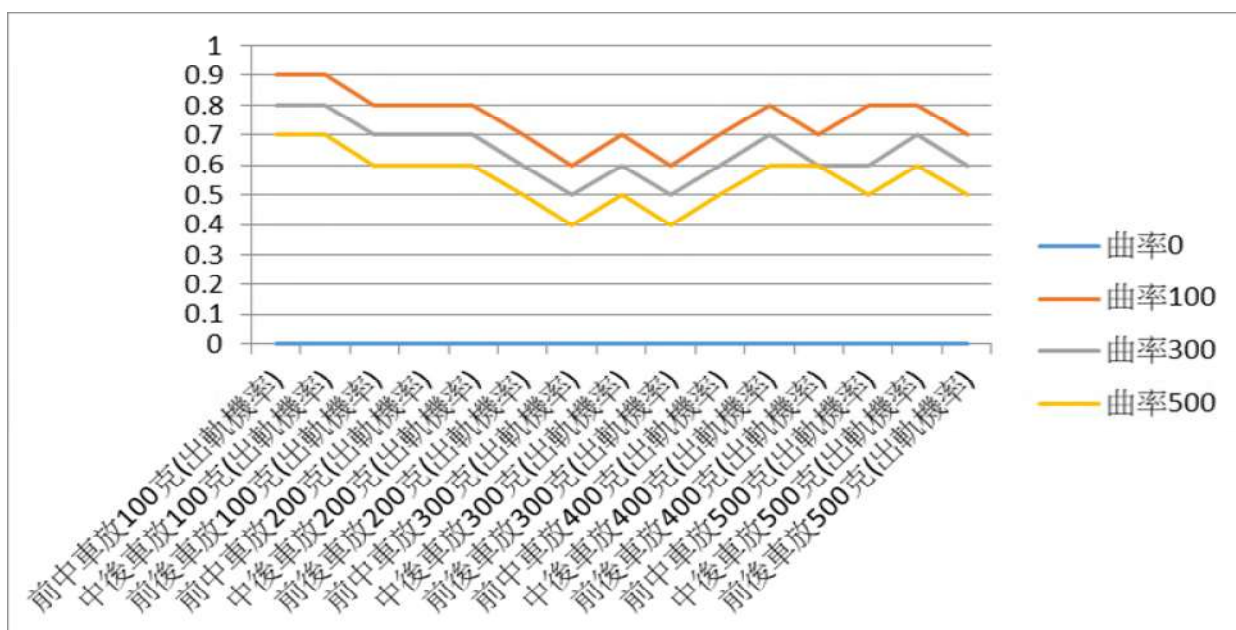
曲率 500	0.3	0.3	0.3	0.6	0.5	0.3
	前車放 500 克 (出軌機率)	中車放 500 克 (出軌機率)	後車放 500 克 (出軌機率)			
曲率 0	0	0	0			
曲率 100	0.8	0.6	0.5			
曲率 300	0.7	0.4	0.4			
曲率 500	0.5	0.3	0.4			



1. 曲率記錄為 0 軌道時，不論重量與否出軌機率皆為 0 。
2. 曲率記錄為 100 的軌道時，放重量 300 克在前中後或者是後車放重量 400 克，或是中、後車放 500 克時，出軌機率在 50%到 60%之間改變，放其他的重量的出軌機率，皆在 70%到 90%之間改變。
3. 曲率記錄為 300 的軌道時，並放 100 克與 200 克的重量在前、後車與放 400 克或 500 公克在前車時，出軌機率皆高達 70%以上，放其他的重量皆在 60%到 40%之間改變。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，在中車放 200 公克或者是在前、中、後放 300 公克或是在後車放 400 克或只是在中或後車放 500 克時，出軌機率在 40%以下，其餘出軌機率在 40 到 %70% 之間。
5. 由此可知，當此組:單車不同位置放不同重量時，發現在不同的後車各放重量為 400 克或 500 克，出軌機率較低。所以重心較中間會較穩定。

(2)雙車不同位置放不同重量出軌機率:

	前中車放 100 克 (出軌機率)	中後車放 100 克 (出軌機率)	前後車放 100 克 (出軌機率)	前中車放 200 克 (出軌機率)	中後車放 200 克 (出軌機率)	前後車放 200 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7
曲率 300	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6
曲率 500	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
	前中車放 300 克 (出軌機率)	中後車放 300 克 (出軌機率)	前後車放 300 克 (出軌機率)	前中車放 400 克 (出軌機率)	中後車放 400 克 (出軌機率)	前後車放 400 克 (出軌機率)
曲率 0	0	0	0	0	0	0
曲率 100	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	0.7
曲率 300	0.5	0.6	0.5	0.6	0.7	0.6
曲率 500	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6
	前中車放 500 克 (出軌機率)	中後車放 500 克 (出軌機率)	前後車放 500 克 (出軌機率)			
曲率 0	0	0	0			
曲率 100	0.8	0.8	0.7			
曲率 300	0.6	0.7	0.6			
曲率 500	0.5	0.6	0.5			



1. 曲率記錄為 0 軌道時，不論重量與否出軌機率為 0。
2. 曲率記錄為 100 的軌道時，出軌機率在 60%到 90%之間改變。

3. 曲率記錄為 300 的軌道時，出軌機率在 50%到 80%之間改變，可發現相比曲率為 100 的軌道，出軌機率大致下降了 10%。
4. 曲率記錄為 500 的軌道時，除了在前中或前後放重量 300 公克，出軌機率為 40%，放其他重量的出軌機率皆在 50%到 70%，出軌機率大致在 60%。
5. 由此可知，當此組:雙車不同位置放不同重量出軌機率，發現在不同的前後車各放 400 克或前後車各放 500 克時，其出軌機率較低。所以重心較中間偏後會較穩定。

我們經過綜合整體分析後可以得到下列結果：

- 一、 發現當前、中、後車放不同重量時，可知曲率越大，則滑行的距離會有增長的情況。曲率記錄愈小和重量愈重愈容易出軌，在相同曲率記錄下可知並不是重量越大，滑行長度就會越長。在同一曲率記錄下，有些反而是愈輕愈容易出軌，這是因為重心的問題，鐵軌因為曲率記錄較小則彎曲較大，所以需要一些重量支撐，而我們發現把重量較輕的砝碼放在前面的車廂，會和放在後面的車廂結果不同，放在前面的會比較容易翻車，反之，放在後面就不太會。因此森林鐵道的曲率設計應該基於諸如列車類型、預期速度、貨物重量等因素進行綜合考慮。對於高速行駛的列車，曲率應該相對緩和，以減小向心力對列車的側向加速度。
- 二、 根據列車的設計和預期運行速度，應該確定合適的曲率半徑。較大的曲率半徑意味著彎道更加緩和，列車在行駛時需要克服的向心力較小，減少了側傾和翻覆的風險。另外在某些情況下，特別是在有限的空間內或需要通過較大的地形起伏時，可能需要設計超高曲線。這種設計可以進一步減少列車的側傾，降低翻覆的風險。在考慮曲率設計時，還應該考慮到路段的平鋪情況。在平鋪路段，列車更容易保持穩定，因此可以容忍較小的曲率半徑；而在非平鋪路段，則需要更大的曲率半徑以確保列車的安全運行。
- 三、 我們發現各個不同曲率記錄的軌道時，中後車隨著放重量越重，出軌機率會越

小，但當放重量 300 克時出軌機率達最小，之後又隨著放重量越重，則出軌機率又再度上升。可見列車的重心分布直接影響列車的穩定性，進而影響鐵道翻覆的風險。以下是我們觀察一些可能的影響結果：

1. 側傾和失穩：如果列車的重心分布不均勻，或者偏離了設計值，可能導致列車在行駛時出現側傾情況。當列車側傾角度超過一定限度時，將增加脫軌或翻覆的風險。
2. 彎道行駛：在彎道行駛時，列車的重心分布尤其重要。如果列車的重心偏離彎道的內側，可能增加側傾和偏離軌道的風險。適當的重心分布可以幫助列車保持在彎道內部，減少翻覆的可能性。
3. 過坡行駛：在過坡區域行駛時，列車的重心分布可能影響到列車的穩定性。特別是在陡坡上升或下降時，不當的重心分布可能導致列車的側傾或偏離軌道，增加翻覆的風險。
4. 負載分佈：貨物的分佈方式和列車的負載情況也會影響列車的重心位置。如果貨物分佈不均勻或者負載過重，可能導致列車的重心偏高或者不穩定，增加翻覆風險。
5. 車輛設計和構造：車輛的設計和構造直接影響列車的重心分布。例如，低地心重心的列車通常更穩定，而高地心重心的列車則可能更容易側傾和翻覆。

四、我們發現影響火車是否翻覆的三大要素是:速度、穩定(重心分布情況)、曲率。

第一重要的是速度，穩定次之，曲率最後。

因為我們發現墊高高度為 25 公分比 20 公分滑車軌道，其滑下的速度較大時，其出軌機率較大，就算是曲率紀錄為 0 的直線，也會發生出軌情形。

而穩定是說，重心分布情況，我們實驗發現把所有的重量放在前車，而在轉彎的時候，會因為前車的重量而去帶動後兩台滑車，進而發生更嚴重的出軌現象，當重量是平均分布在前中後滑車時，則出軌的機率較少。

曲率為這三大因素中最不容易造成出軌的因素，因為如果車子速度越慢，火車的重心分布情況越穩定，就算曲率較大時，也能安穩的行駛過去，出軌的機率較少。

五、我們因時間和內容研究有限，提供以後有興趣的同學可以更加深入研究重心分布對鐵道翻覆的影響，建議通過模擬、實驗、數據分析等方式進行探討。研究結果將有助於更好地了解列車穩定性的關鍵因素，並提出相應的改進措施，以提高鐵路運輸的安全性和穩定性。

另外也要考慮到森林鐵道可能面臨的地形和氣候條件，例如：山區或陡坡地形，以及可能出現的極端天氣情況，這些因素也應該納入曲率設計的考慮範圍內。綜合考慮這些因素，設計森林鐵道的曲率可以通過模擬、計算、現場實驗等方式進行。適當的曲率設計有助於降低列車的翻覆風險，確保鐵道運輸的安全性和效率。

說明:本次科展所有照片出處均來自竹崎高中物理實驗室實驗過程中自行拍攝

捌、參考文獻資料及其它

一、自然科學 國 3 上(民 112)。第一章直線運動基本測量(重力加速度)、第三章 3 功與能(力學能守恆定律)、(斜面與螺旋)：康軒版。

二、曲率公式。維基百科，自由的百科全書。

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%9B%B2%E7%8E%87>

三、2003年阿里山小火車翻覆事故維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/2003%E5%B9%B4%E9%98%BF%E9%87%8C%E5%B1%B1%E5%B0%8F%E7%81%AB%E8%BB%8A%E7%BF%BB%E8%A6%86%E4%BA%8B%E6%95%85>

四、坡度公式 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9D%A1%E5%BA%A6>

五、《阿里山森林鐵路百年史》作者：吳忠良。陳敏夫出版社：行政院文化建設委員會。

出版日期：2008年。

六、《阿里山森林鐵道》作者：劉貴榮。出版社：臺灣鐵道文化基金會。出版日期：2002年。

七、《阿里山森林鐵路》作者：楊智炫。出版社：遠足文化。出版日期：2000年。

其他:(感謝詞)

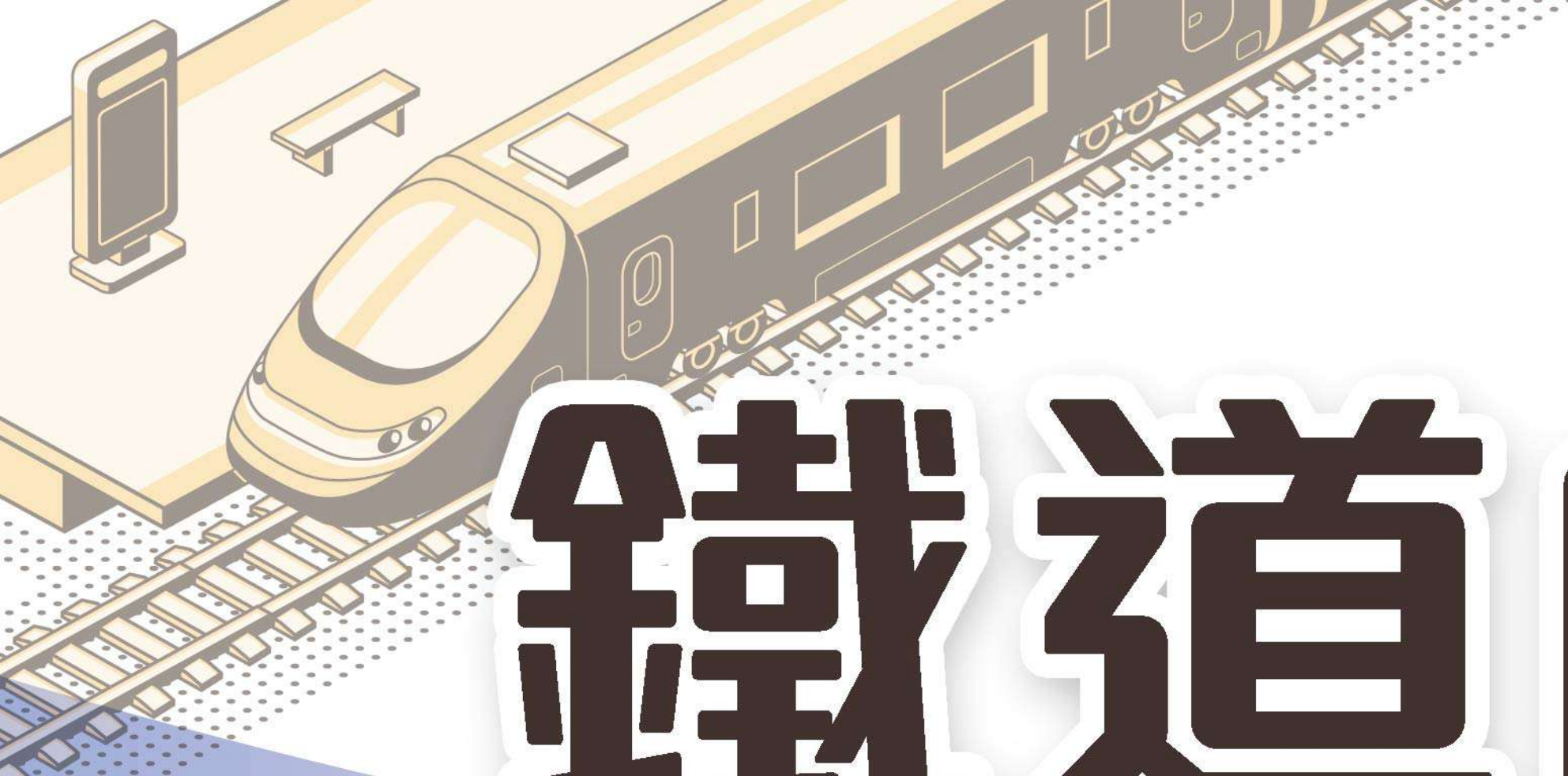
本次科展實驗要特別感謝鄭老師花很多時間跟我們討論指導。還有呂老師和社團學長姊的概念指引說明，最後諮詢王教授，讓我們有更清晰的實驗樣貌，真正做起實驗才有更效率和方向。經由這次實驗讓我們明白了解每次的做實驗必須秉持堅持到底永不放棄的理想，最後才能達到我們要求的目標。

經過這次參加科展比賽，讓我們更加喜歡自然科學的實驗和內容，同時我們也更了解自然科學的研究和實驗中，團隊合作和彼此分工的重要性。更要有紮實的研究步驟和方法，才能讓實驗進行得更順暢，同時要有實驗的理論基礎做後盾，最後才能完成理想的實驗成果。

【評語】 032814

1. 本研究之構想明確，研究過程深入細緻，團隊合作良好，展現優秀的團隊精神。
2. 作品說明書中，某些頁面的排版尚可進一步改進。
3. 除了本作品所提出之因子參數，若再思考其他可能影響火車翻覆的因素，可再提升作品的實用價值。
4. 若能提供阿里山鐵路不同坡度、曲率半徑的分佈情形，可使實驗數據更具說服力。

作品簡報



鐵道的翻轉人生



摘要

本校位於阿里山之下，鄰近阿里山森林鐵道，我們從小接觸森林旅遊，愛上森林鐵道氛圍。從網路新聞中看到有關阿里山小火車翻覆的事件層出不窮。於是利用國中自然課程中學習到有關力學能轉換和數學課程中學習到有關重心的概念。想探討阿里山小火車翻覆情況跟那些變因比較有甚麼特殊關連，因此選用車廂中重心分布情況、坡道的彎曲程度和坡道的高度來做實驗分析探討。

所以我們利用生活科技課程學習到的3D列印技術，來製作不同曲率的軌道，將不同重量的砝碼放在不同滑車的位置上，模擬出不同重量的乘客坐在不同位置的森林小火車上，當滑車行經在不同曲度的軌道時觀察記錄滑行距離和出軌的機率，藉此實驗研究探討森林小火車翻覆情況跟乘客乘坐重心分布情況、坡道的彎曲程度和坡道的高度有甚麼影響。

壹、研究動機

因為我們從網路新聞中有關阿里山小火車翻覆的事件層出不窮，尤其是2003年阿里山小火車翻覆事故，造成了很大的事故，共造成了17人死亡，205人受傷的悲慘事件。所以我們想知道火車要在什麼情況下容易翻覆，因此在尋找科展題目中，我們決定要探究阿里山小火車翻覆情況跟那些變因比較有甚麼特殊關連。在實驗設計中，我們跟老師討論像是讓火車在不同彎曲程度鐵軌上行駛，由於鐵軌的彎曲程度，會影響火車通行的可行性。加上後來我們在國三自然課本中有學到有關重力加速度與重力位能的内容、有關力學能轉換以及國三數學課本中有學到有關重心的概念。當時我們就想說，如果以不同的重量分布在不同地方去行駛的話，會不會有不同的行駛效果，而我們想知道當重心放在不一樣的地方，會不會影響改變翻覆的機率，就如不同車廂如果乘客重量分布大致平均分散，會不會讓小火車翻覆事故減少，也讓翻車後的人員傷亡變得更輕緩。

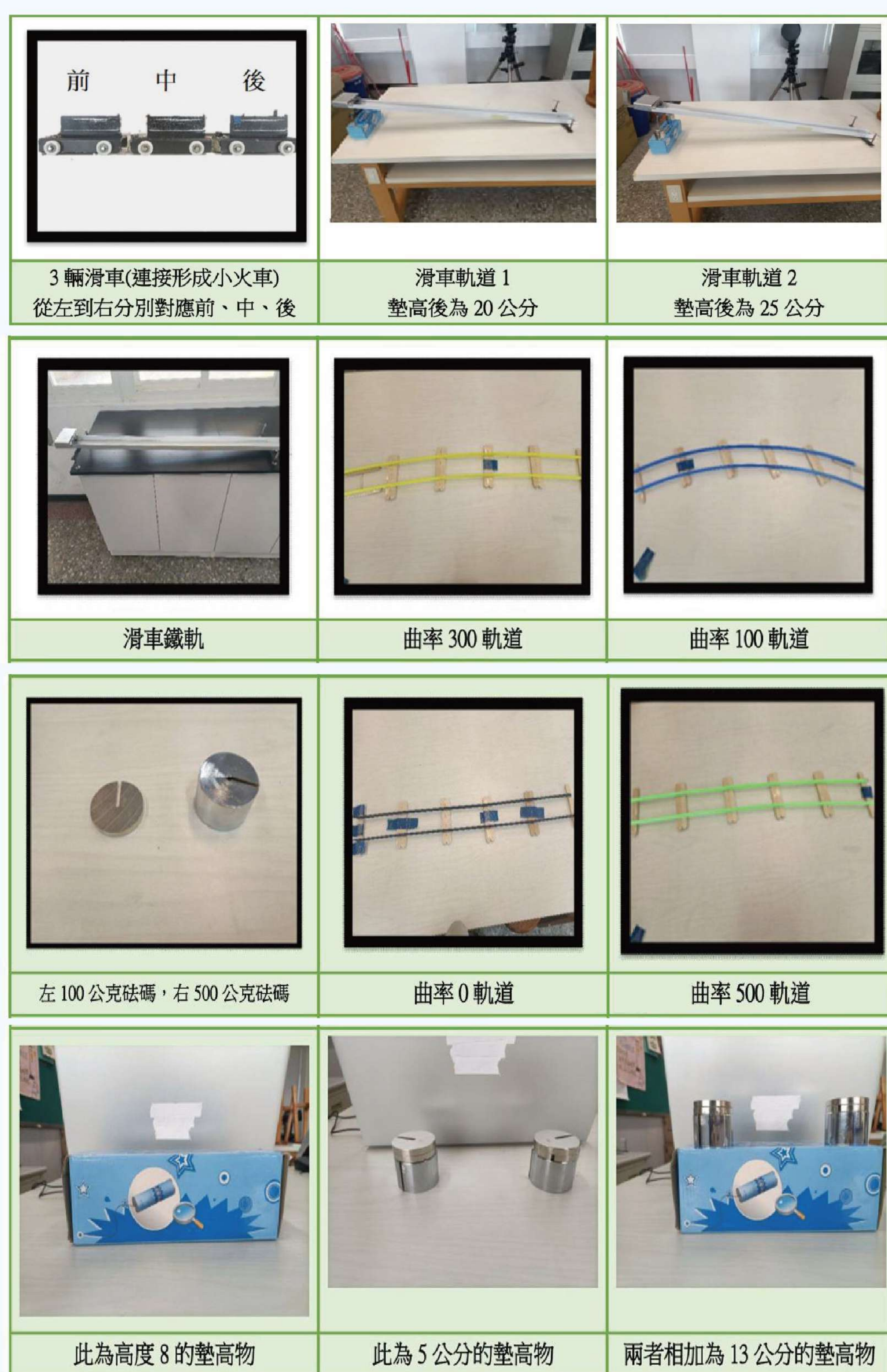
我們從鄉土和地理課程中得知阿里山森林鐵路分為平地與山地兩線段，前者指嘉義至竹崎（14.2公里），後者為竹崎至阿里山線段（57.2公里）。當火車以推進方式運轉至獨立山時，為遷就急峻的山形，則須以螺旋型環繞獨立山三周（約五公里長、兩百公尺高）而至山頂。當迴旋上山時，在車上可三度看到忽左忽右的樟腦寮車站仍在山下，然後鐵道再以8字型方式離開獨立山。而自屏遮那站到第一分道後，鐵路呈Z字型曲折前進，經過三個分道時，火車時而往前拖、時而在後推，終抵阿里山，故有「阿里山火車碰壁」之稱。

最後我們跟老師討論因阿里山鐵道是依螺旋型環繞山勢去建造而成的，所以坡道的彎曲程度和坡道的高度也會影響鐵道的翻覆的機率。以上種種變因就成為我們實驗研究的内容了。

貳、研究目的

- 一、藉由做這個研究，想了解重量和重心分布在不同地方及軌道的彎曲程度和坡道的高度坡度對火車翻覆的影響。
- 二、探討不同重量會不會讓火車的翻車效果發生改變。
- 三、觀察在不同重心分布的情況下，會不會影響火車行駛的穩定性。
- 四、觀察不同軌道曲率火車的滑行距離並觀看其翻覆情形。
- 五、想了解軌道的高度對火車翻覆有何影響。

參、研究設備及器材



肆、研究過程與方法

一、原理：

(一) 曲率：

1. 「彎曲度」，是描述幾何體彎曲程度的量；簡單說，曲率是曲線偏離直線的量（程度），或是曲面偏離平面的量（程度）。最小曲線半徑（Minimum curve radius），或稱轉彎半徑，是陸上運輸工程中常用的技術標準，其意義等同幾何學中的曲線半徑。這個數字能夠反映曲線的彎曲程度，其倒數稱為曲率，亦即（圓）曲線半徑越長，彎道的曲率就越小，彎度越緩。在工程上提及這個參數時，一般是指水平面上的彎道，對於垂直面則使用豎曲線及坡度來衡量。大致而言，運輸路線的最小曲線半徑，與運輸工具容許的最大運轉速率呈正相關。
2. 因列車在高速通過彎道時由於慣性有向彎道的外側翻車的危險，在鐵路的設計和建造時，對不同速度等級的鐵路規定了車輛可以安全通過的圓曲線的最小半徑，就是路線的最小曲線半徑。曲線半徑越長，彎道的曲率就越小，在同一速度下，行車受慣性影響也越小；當曲率一定時，行車速度越小，行車受慣性影響也越小。故而高速鐵路和平原地區幹線鐵路一般比較平直，用較大的曲線半徑，行車速度可以較快；山區鐵路、城市地鐵等受地形的制約較大的地段，只能使用較小的曲線半徑，列車必須限速通過。

(二) 坡度：

1. 坡度：「爬升高度(h)和在水平位移(d)的比值的百分率往往是以三角函數的正切函數數值，或比（百分比或千分比），或分數（rise over run）來陳述，即「爬升高度除以在水平面上的移動距離」。
2. 公式坡度= $\tan a = h/d * 100\%$

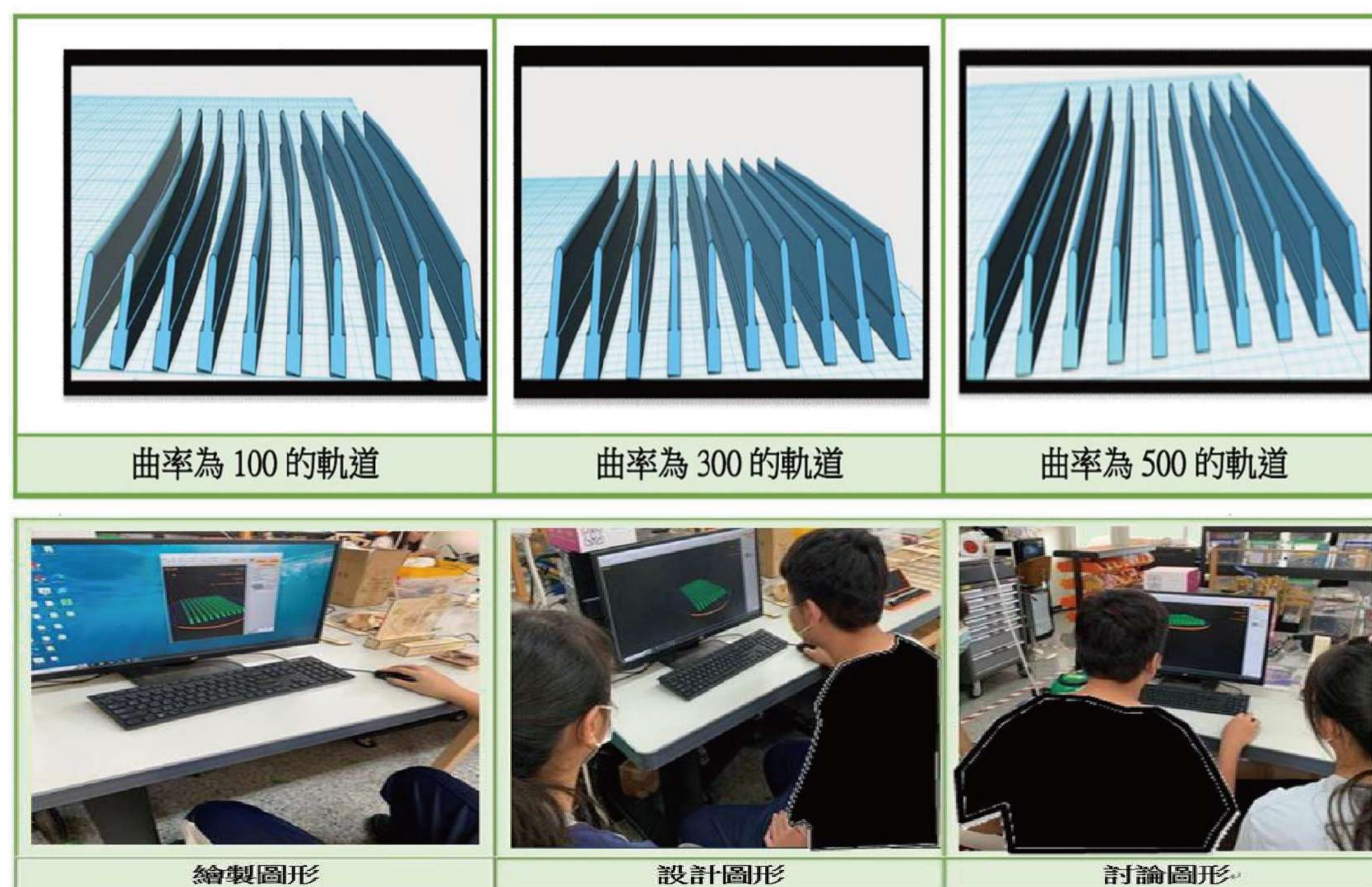
二、方法過程：

(一) 曲率計算方式：為了方便製作有彎曲程度的軌道，利用Autodesk 123D Design軟體來繪製設計3D列印軌道，簡易記錄方式如下：

1. 曲率100:以直徑100公分的圓形成的彎曲程度，形成曲率記錄為曲率100的軌道。
2. 曲率300:以直徑300公分的圓形成的彎曲程度，形成曲率記錄為曲率300的軌道。
3. 曲率500:以直徑500公分的圓形成的彎曲程度，形成曲率記錄為曲率500的軌道。

(二) 製作不同曲率的軌道：

1.在電腦上利用 Autodesk 123D Design 軟體繪製圖形。



(三) 進行實驗前的準備：

1. 首先使用斜面長度為124公分，墊高高度為20公分的滑車軌道。
2. 第2次再墊高5公分共25公分，使滑車軌道的坡度更大，因重力關係產生更大下滑的加速度。
3. 分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。
4. 選用分別為100公克重與500公克重的砝碼放在滑車上。
5. 測試看看沒裝砝碼的滑車能不能順利行駛滑動。

(四) 實驗進行的步驟：

- (1) 滑車軌道墊高高度為20公分，模擬森林鐵道彎曲情形，分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。依序連接有4個曲率為0 的黑色軌道、4個曲率為100的藍色軌道、4個曲率為300的黃色軌道、4個曲率為500（綠）軌道。利用滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察其滑行距離。
 1. 每台火車的重量最高限設在500公克重。
 2. 每次實驗都有對照組那就是滑車先不放砝碼即0克。
 3. 然後分別依序放重量為100、200、300、400、500公克重的砝碼在滑車上。
 4. 先在第一台滑車(前車)上分別放100、200、300、400、500並測量其滑行距離。
 5. 若有出軌的情形，測量其出軌前滑行距離。
 6. 為了減少誤差增加準確值，每種測量值均測量10次，再求取平均值。
 7. 其餘的第二台滑車(中車)與第三台滑車(後車)跟第一台滑車(前車)進行相同實驗，如步驟3~6。
 8. 若單一台滑車都測量完成，就開始用三台滑車相連結進行測量。
 9. 首先是第一台(前車)與第二台(中車)第一台(前車)與第二台(中車)各放不同重量：對照組放0克、前中車各放100克、前中車各放200克、前中車各放300克、前中車各放400克、前中車各放500克，分別測量其出軌前滑行距離。

10. 接著是第二台(中車)與第三台(後車)各放不同重量：對照組放0克、中後車各放100克、中後車各放200克、中後車各放300克、中後車各放400克、中後車各放500克。分別測量其出軌前滑行距離。
11. 接著是第一台(前車)與第三台(後車)各放不同重量：對照組放0克、前後車各放100克、前後車各放200克、前後車各放300克、前後車各放400克、前後車各放500克。分別測量其出軌前滑行距離。
- (2) 滑車軌道墊高高度為25公分，模擬森林鐵道彎曲情形，分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上。依序連接有4個曲率為0的黑色軌道、4個曲率為100的藍色軌道、4個曲率為300的黃色軌道、4個曲率為500的綠色軌道。利用滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察其滑行距離。重複上述(1)中步驟1~11依此類推。
- (3) 操作實驗方式：如步驟(1)和步驟(2)其中觀察其滑行距離改觀察測量其出軌機率。

伍、研究結果

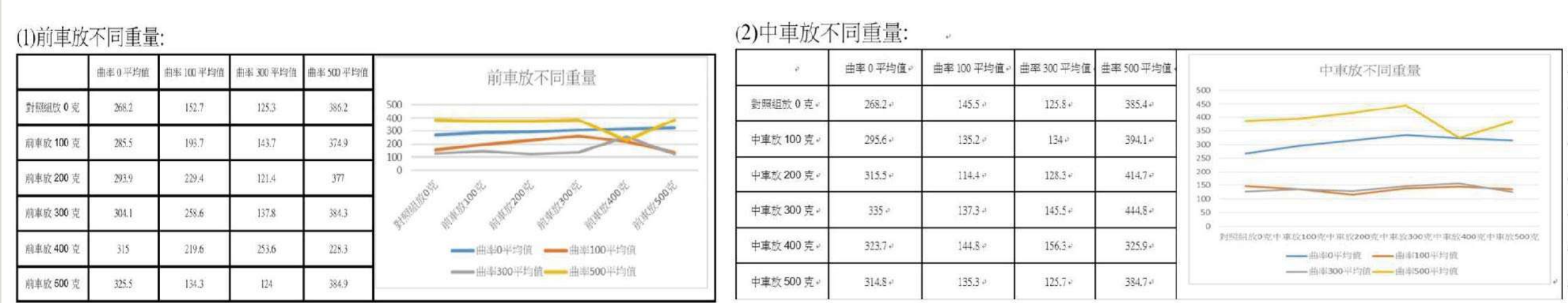
(一)實驗測量照片：

曲率記錄為 100 時， 中車放 200 克	製作連接軌道	曲率記錄為 100 時， 後車放 200 克
曲率記錄為 100 時， 前中車各放 100 克	曲率記錄為 100 時， 前中車各放 200 克	製作連接軌道
曲率記錄為 100 時， 中後車各放 200 克	曲率記錄為 100 時， 中後車各放 300 克	測量滑行距離
曲率記錄為 300 時， 前車放 200 克	曲率記錄為 300 時， 中車放 200 克	曲率記錄為 300 時， 後車放 200 克
曲率記錄為 100 時， 中後車各放 500 克	曲率記錄為 300 時， 前車放 100 克	曲率記錄為 300 時， 中車放 100 克
製作軌道	曲率記錄為 500 時， 中後車各放 300 克	曲率記錄為 500 時， 中後車各放 500 克

陸、討論

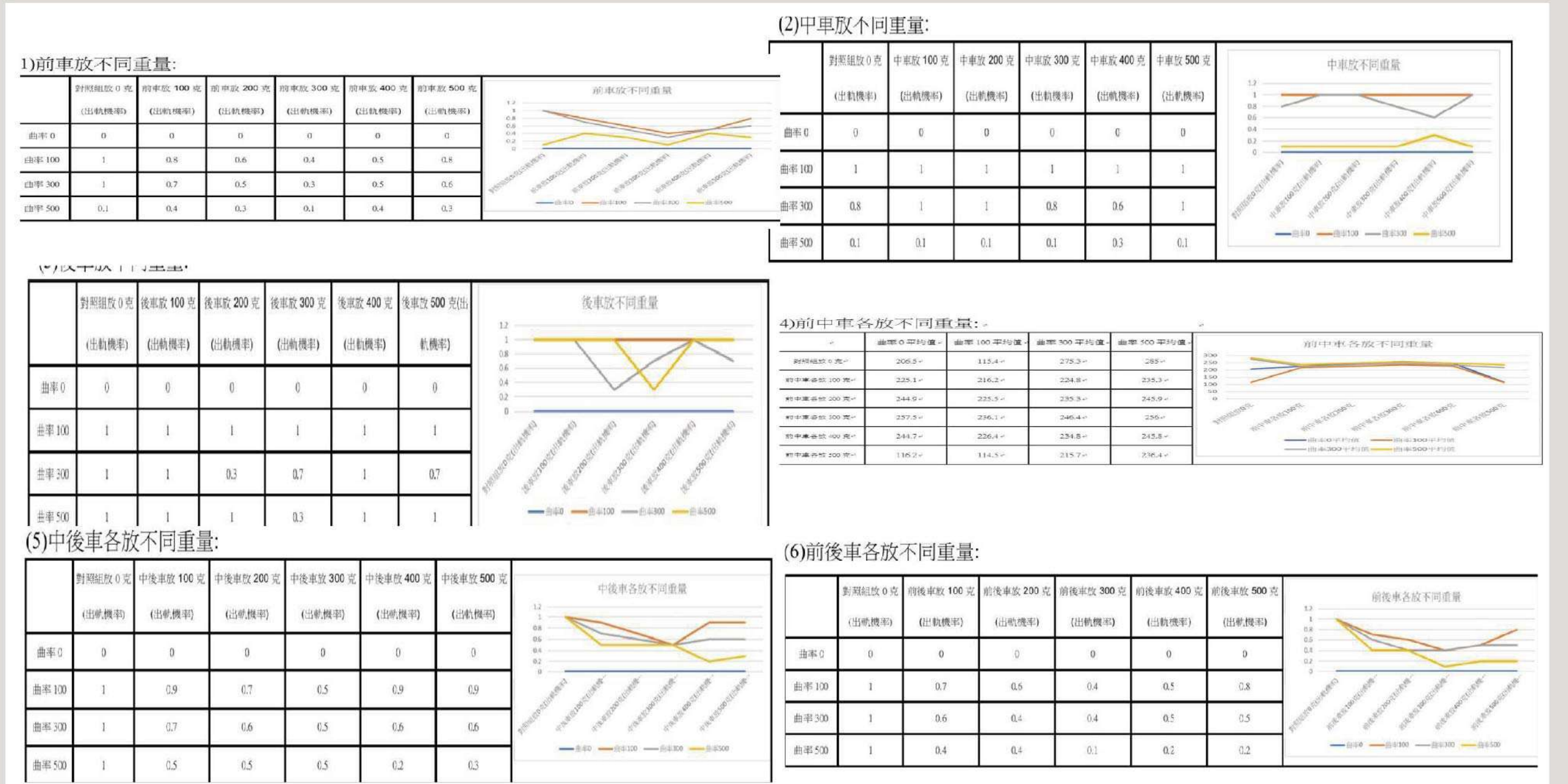
一、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離： (滑車軌道墊高高度為20公分)

滑車墊高高度h為20公分，斜面角度3度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 3 * 0.2} = 0.456 \text{ m/s}$



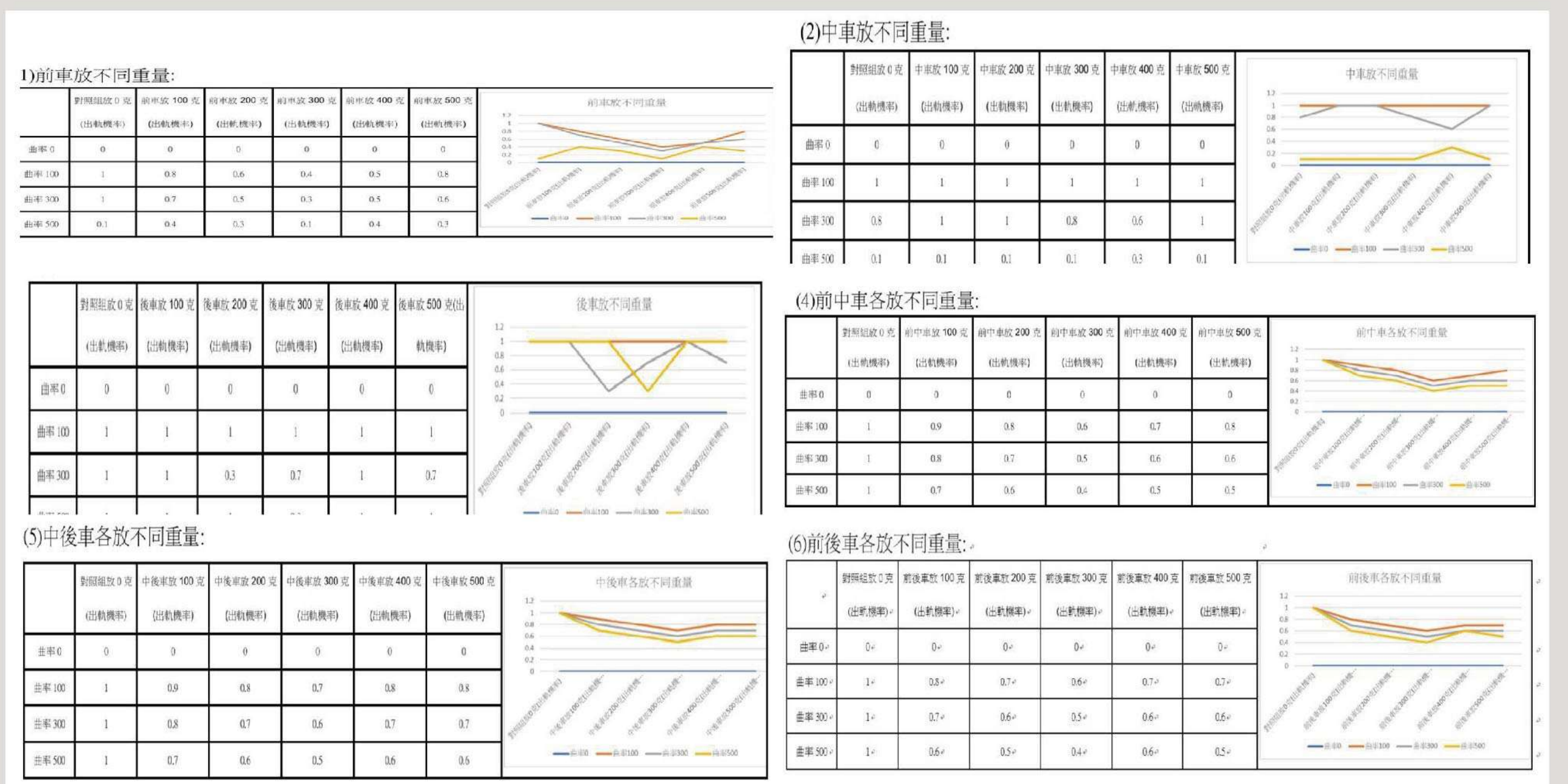
二、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離： (滑車軌道墊高高度為25公分)

滑車墊高高度h為25公分，斜面角度5度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 5 * 0.25} = 0.853 \text{ m/s}$



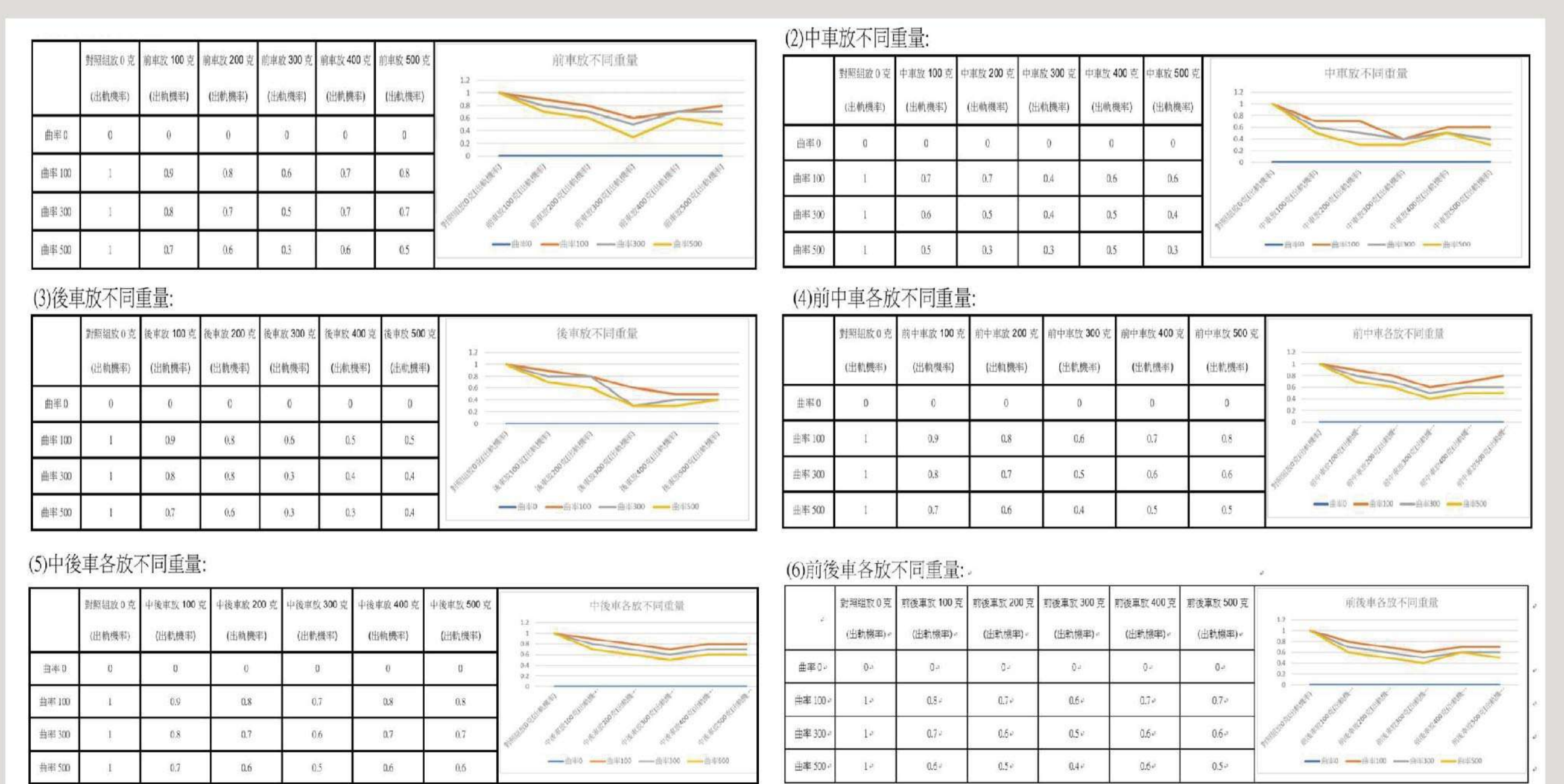
三、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察不同曲率時出軌機率： (滑車軌道墊高高度為20公分)

滑車墊高高度h為20公分，斜面角度3度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 3 * 0.2} = 0.456 \text{ m/s}$



四、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察不同曲率時 出軌機率：(滑車軌道墊高高度為25公分)

滑車墊高高度h為20公分，斜面角度3度，滑車滑下初速度 $v = \sqrt{2 * g * \sin \theta * h} = \sqrt{2 * 9.8 * \sin 3 * 0.2} = 0.456 \text{ m/s}$



我們認為造成實驗數據產生誤差的原因：

- (1) 我們利用3D列印製作的模擬鐵軌在操作實驗時產生一些問題，我們發現模擬鐵軌的間距 都有些許的差距，雖然在製作鐵軌時，有時已經確保一台滑車可以行駛過得去，但後面連結的滑車有時候不一定能行駛過去，還需再調整間距才可以使三台連結滑車通過並要測量好幾次才行。
 - (2) 鐵軌軌道的連接在操作實驗時產生一些問題，因曲率越大時，發現有些無法連接的過短鐵軌，因此我們使用熱熔膠條來加長連接下一個短鐵軌，由於熱熔膠條的不合形狀和材質較柔軟可能造成實驗數據出現誤差的原因。
 - (3) 滑車的連結製作模擬森林火車時，為了更加完美的呈現，我們使用細綿線將三台滑車連接在一起，使滑車連接鬆散而不夠緊密，同時未有可緩衝撞擊的空間，這也可能造成實驗數據出現誤差的原因。
 - (4) 因我們為了降低實驗數據的誤差，所以每一個實驗都做10組，因此鐵軌的多次使用後導致鐵軌磨損，這也可能造成實驗數據產生誤差的原因。
- 總結上述，我們認為最主要的原因是3D列印製作的模擬鐵軌的問題影響最大，接著是鐵軌軌道的連接方式次之，再來是鐵軌的多次使用導致鐵軌磨損，接著是滑車的連結製作方式。

柒、結論

本實驗旨在利用3D列印技術，來製作不同曲率的軌道，將不同重量的砝碼放在不同滑車的位置上，使用斜面長度為124公分，墊高高度為20公分和25公分的滑車軌道。

利用下滑重力使滑車在軌道產生下滑加速度，因重力位能產生動能使滑車行駛。分別調整連接不同曲率軌道的尾部，讓它與軌道在同一個高度上模擬出不同重量的乘客坐在不同位置的森林小火車上，當滑車行經在不同曲度的軌道時觀察記錄滑行距離和出軌的機率。

藉此實驗研究探討森林小火車翻覆情況跟乘客乘坐重心分布情況、坡道的彎曲程度和坡道的高度有甚麼影響。我們可以同時了解相關原理、熟練操作、發現問題和並探討、解決問題。我們根據實驗結果做綜合整體分析如下：

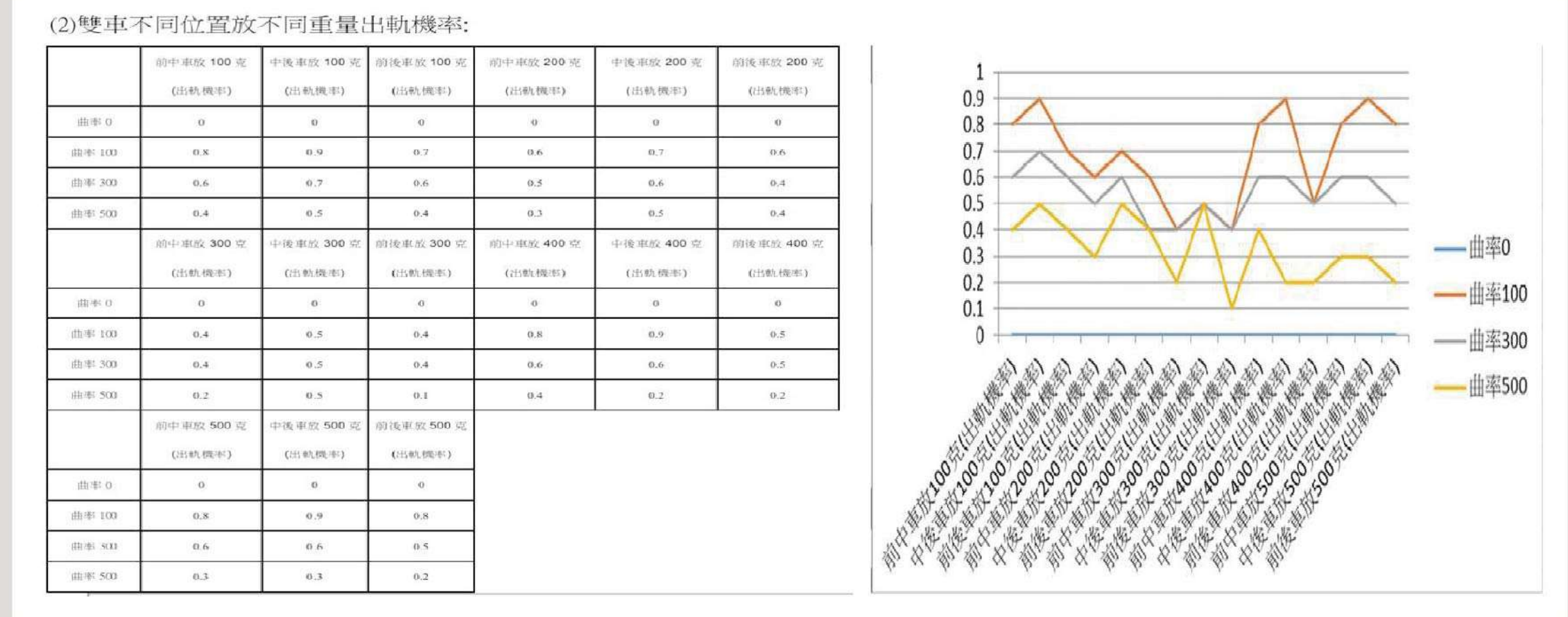
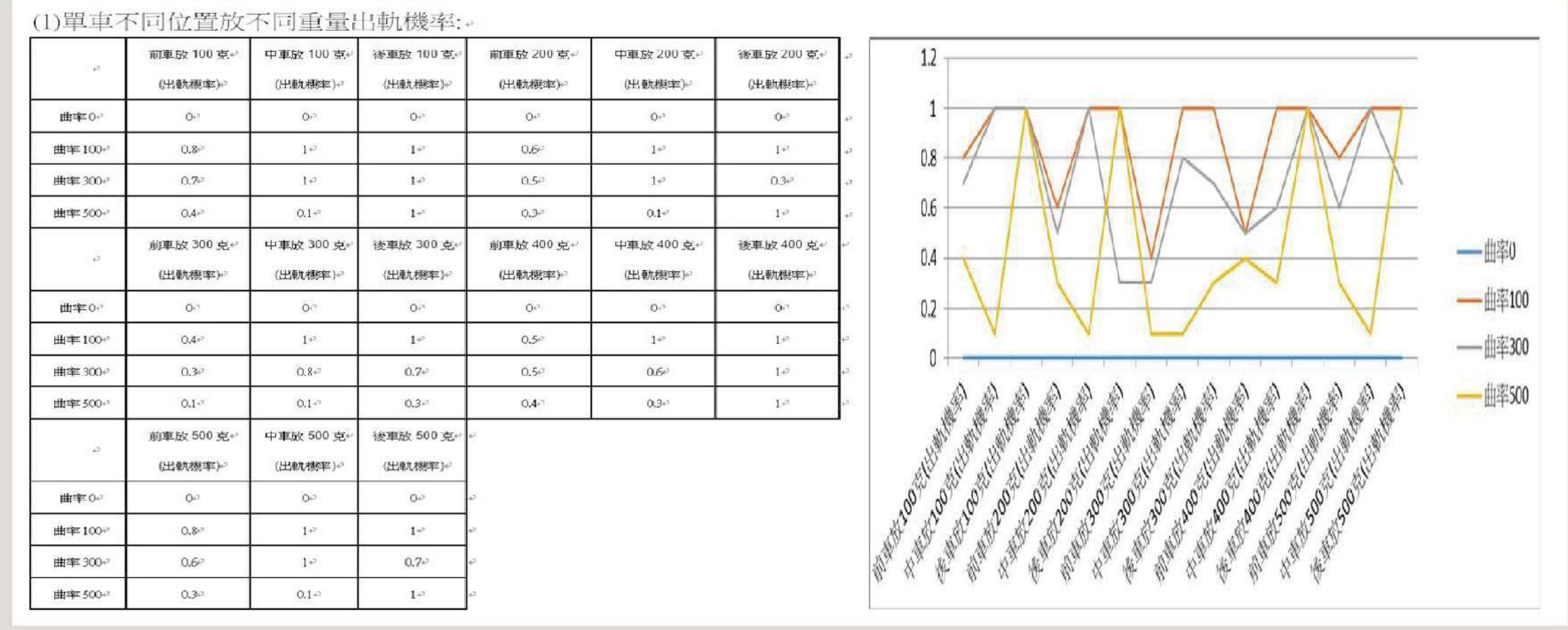
一、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離：(滑車軌道墊高高度為20公分)



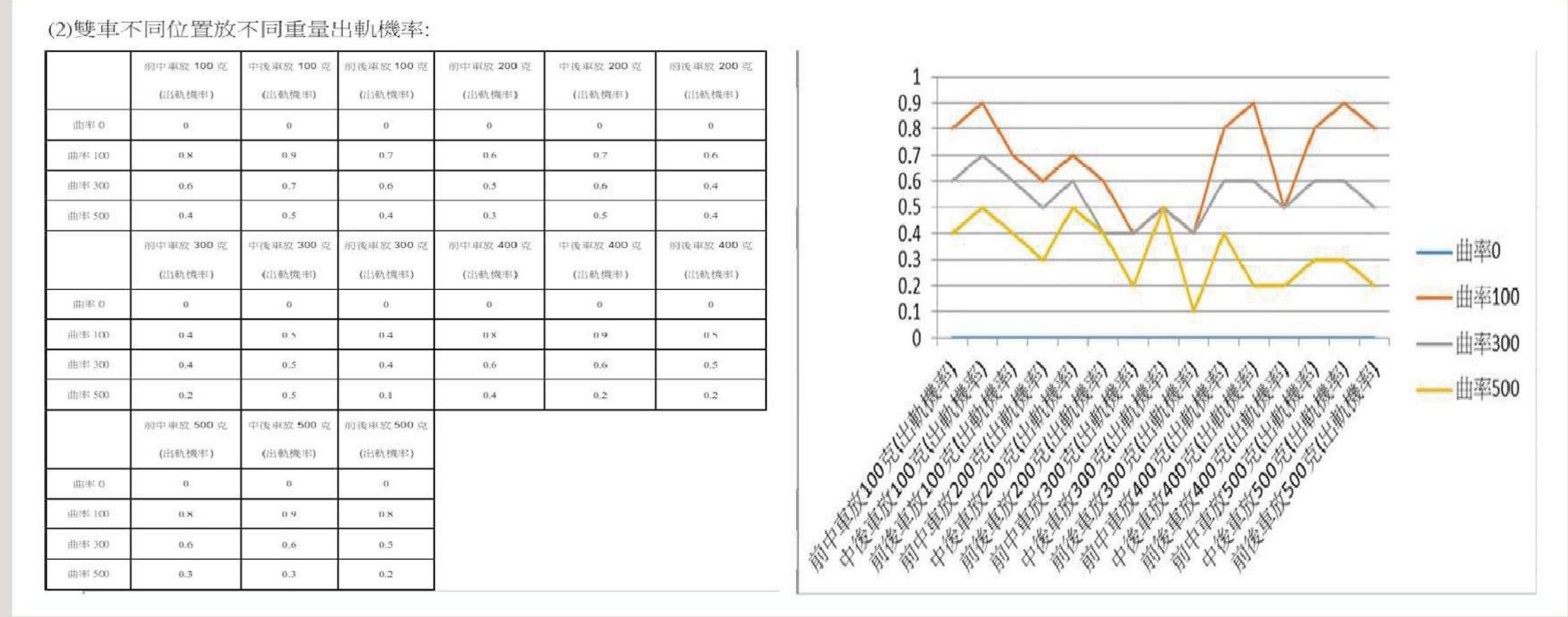
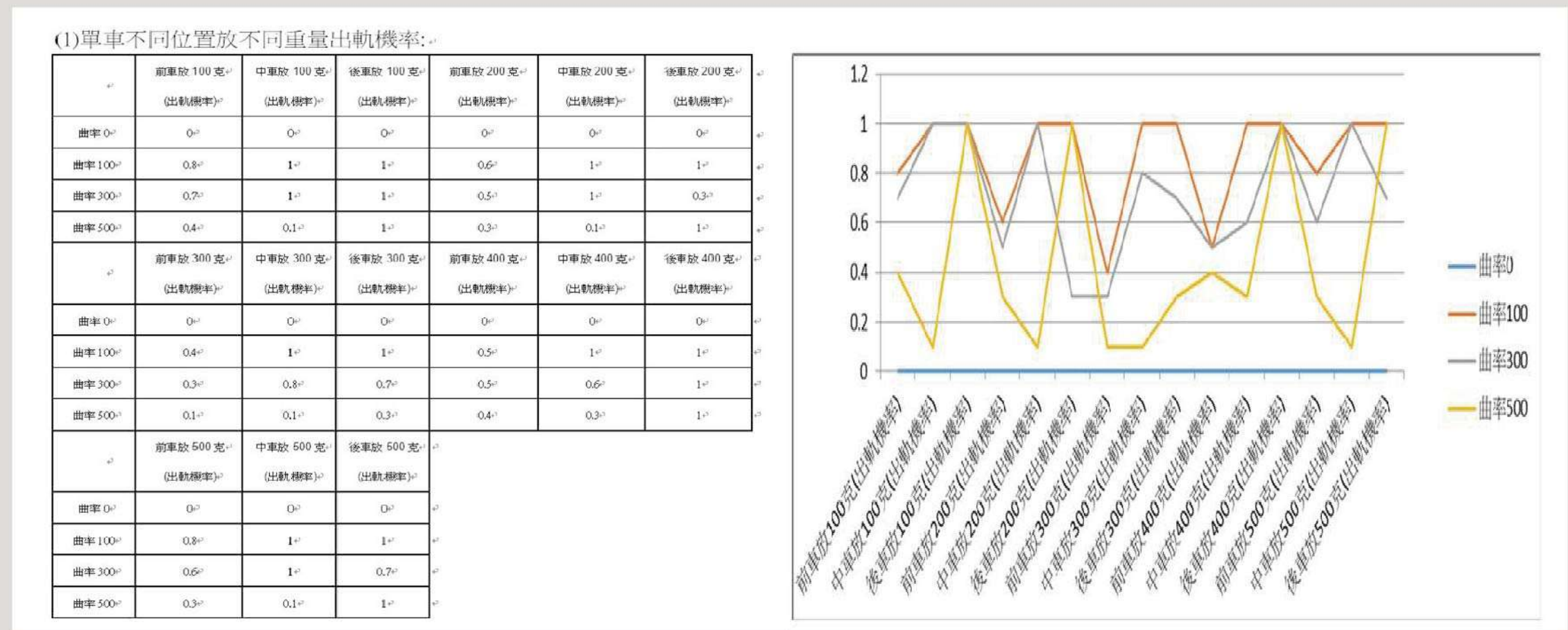
二、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離：(滑車軌道墊高高度為25公分)



三、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的出軌機率：(滑車軌道墊高高度為20公分)



四、滑車在不同位置放置不同質量砝碼，觀察滑車的滑行距離：(滑車軌道墊高高度為25公分)



我們經過綜合整體分析後可以得到下列結果：

一、發現當前、中、後車放不同重量時，可知曲率越大，則滑行的距離會有增長的情況。曲率記錄愈小和重量愈重愈容易出軌，在相同曲率記錄下可知並不是重量越大，滑行長度就會越長。在同一曲率記錄下，有些反而是愈輕愈容易出軌，這是因為重心的問題，鐵軌因為曲率記錄較小則彎曲較大，所以需要一些重量支撐，而我們發現把重量較輕的砝碼放在前面的車廂，會和放在後面的車廂結果不同，放在前面的會比較容易翻車，反之，放在後面就不太會。因此森林鐵道的曲率設計應該基於諸如列車類型、預期速度、貨物重量等因素進行綜合考慮。對於高速行駛的列車，曲率應該相對緩和，以減小向心力對列車的側向加速度。

二、根據列車的設計和預期運行速度，應該確定合適的曲率半徑。較大的曲率半徑意味著彎道更加緩和，列車在行駛時需要克服的向心力較小，減少了側傾和翻覆的風險。另外在某些情況下，特別是在有限的空間內或需要通過較大的地形起伏時，可能需要設計超高曲線。這種設計可以進一步減少列車的側傾，降低翻覆的風險。在考慮曲率設計時，還應該考慮到路段的平鋪情況。在平鋪路段，列車更容易保持穩定，因此可以容忍較小的曲率半徑；而在非平鋪路段，則需要更大的曲率半徑以確保列車的穩定性。

三、我們發現各個不同曲率記錄的軌道時，中後車隨著放重量越重，出軌機率會越小，但當放重量300克時出軌機率達最小，之後又隨著放重量越重，則出軌機率又再度上升。可見列車的重心分布直接影響列車的穩定性，進而影響鐵道翻覆的風險。以下是我們觀察一些可能的影響結果：

1. 側傾和失穩：如果列車的重心分布不均勻，或者偏離了設計值，可能導致列車在行駛時出現側傾情況。當列車側傾角度超過一定限度時，將增加脫軌或翻覆的風險。
2. 彎道行駛：在彎道行駛時，列車的重心分布尤其重要。如果列車的重心偏離彎道的內側，可能增加側傾和偏離軌道的風險。適當的重心分布可以幫助列車保持在彎道內部，減少翻覆的可能性。
3. 過坡行駛：在過坡區域行駛時，列車的重心分布可能影響到列車的穩定性。特別是在陡坡上升或下降時，不當的重心分布可能導致列車的側傾或偏離軌道，增加翻覆的風險。
4. 負載分佈：貨物的分佈方式和列車的負載情況也會影響列車的重心位置。如果貨物分佈不均勻或者負載過重，可能導致列車的重心偏高或者不穩定，增加翻覆風險。
5. 車輛設計和構造：車輛的設計和構造直接影響列車的重心分布。例如，低地心重心的列車通常更穩定，而高地心重心的列車則可能更容易側傾和翻覆。

四、我們發現影響火車是否翻覆的三大要素是：速度、穩定(重心分布情況)、曲率。第一重要的是速度，穩定次之，曲率最後。因為我們發現墊高高度為25公分比20公分滑車軌道，其滑下的速度較大時，其出軌機率較大，就算是曲率紀錄為0的直線，也會發生出軌情形。而穩定是說，重心分布情況，我們實驗發現把所有的重量放在前車，而在轉彎的時候，會因為前車的重量而去帶動後兩台滑車，進而發生更嚴重的出軌現象，當重量是平均分布在前中後滑車時，則出軌的機率較少。曲率為這三大因素中最不容易造成出軌的因素，因為如果車子速度越慢，火車的重心分布情況越穩定，就算曲率較大時，也能安穩的行駛過去，出軌的機率較少。

五、我們因時間和內容研究有限，提供以後有興趣的同學可以更加深入研究重心分布對鐵道翻覆的影響，建議通過模擬、實驗、數據分析等方式進行探討。研究結果將有助於更好地了解列車穩定性的關鍵因素，並提出相應的改進措施，以提高鐵路運輸的安全性和穩定性。

另外也要考慮到森林鐵道可能面臨的地形和氣候條件，例如：山區或陡坡地形，以及可能出現的極端天氣情況，這些因素也應該納入曲率設計的考慮範圍內。綜合考慮這些因素，設計森林鐵道的曲率可以通過模擬、計算、現場實驗等方式進行。適當的曲率設計有助於降低列車的翻覆風險，確保鐵道運輸的安全性和效率。

捌、參考資料及其他

- 一、自然科學 國3上(民112)康軒版。第一章直線運動基本測量(重力加速度)、第三章功與能(力學能守恆定律)、(斜面與螺旋)。
- 二、曲率公式。維基百科，自由的百科全書。
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%9B%B2%E7%8E%87>
- 三、2003年阿里山小火車翻覆事故維基百科，自由的百科全書
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/2003%E5%B9%B4%E9%98%BF%E9%87%8C%E5%B1%B1%E5%B0%8F%E7%81%AB%E8%BB%8A%E7%BF%BB%E8%A6%86%E4%BA%8B%E6%95%85>
- 四、坡度公式<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9D%A1%E5%BA%A6>
- 五、《阿里山森林鐵路百年史》作者：吳忠良。陳敏夫出版社：行政院文化建設委員會。出版日期：2008年。
- 六、《阿里山森林鐵道》作者：劉貴榮。出版社：臺灣鐵道文化基金會。出版日期：2002年。
- 七、《阿里山森林鐵路》作者：楊智炫。出版社：遠足文化。出版日期：2000年。