

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第三名

040102

消失的地心引力

臺北縣私立辭修高級中學

作者姓名：

高二 李尚謙 高二 高洪斌 高二 林詠哲

高二 陳婉瑜

指導老師：

郭福壽

第四十五屆中小學科學展覽會

作品說明書

科別：物理科

組別：高中組

作品名稱：消失的地心引力

關鍵字：消失的地心引力

暫時性停留

終端速度

編號：

摘要

本實驗在探討彈力常數較小的彈簧（即彈簧鉛直懸掛時，受重力影響即可伸長的彈簧）鉛直懸掛，待其靜止後使其落下，**彈簧底部的暫時性靜止的現象猶如地心引力消失一般**。利用攝影技術，將彈簧落下過程合成為一張合成圖以利觀察。

我們由合成圖中發現：

- (1)**彈簧鉛直落下過程中彈簧底部有暫時性靜止的現象；**
- (2)**彈簧頂端落下過程為近似等速度運動的現象；**
- (3)**當底部開始運動之後，整體彈簧質心受重力作用作等加速度運動，但彈簧頂端部分瞬間速度有減緩（相較(2)之速度）現象。**

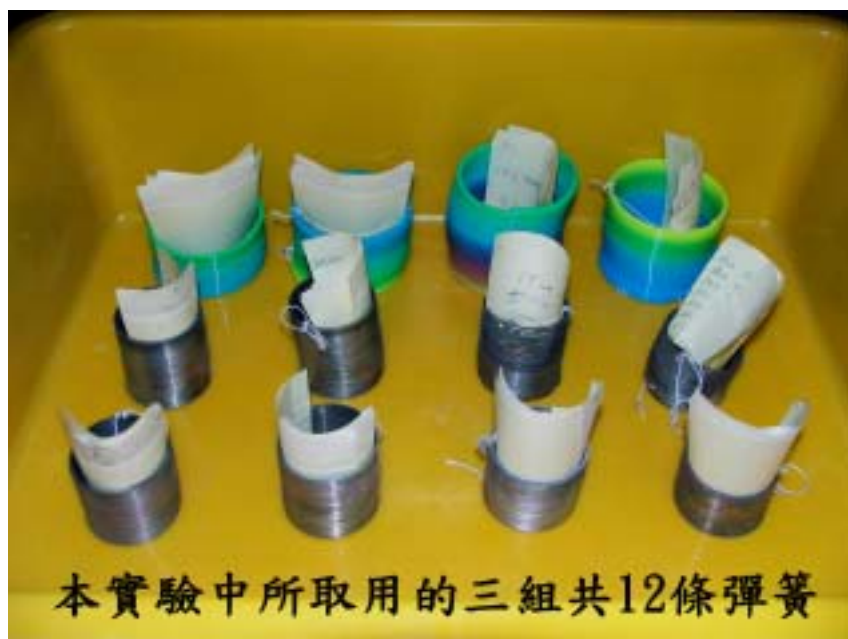
因此我們進一步設計一連串的實驗，研究彈簧基本物理量與此現象間的關係，但其關係並不明顯，最後將彈簧落下過程的運動模式加以模擬、討論。

壹、實驗動機

在基礎物理討論彈簧問題時，買了玩具彈簧來觀察力平衡現象，發現彈簧垂直懸吊，在上端釋放後落下的過程中，底部似乎有暫時性靜止的現象，於是我們請教物理老師，老師鼓勵我們做深入研究，因此展開我們的實驗。

貳、實驗目的

- 一、彈簧鉛直落下過程彈簧底部是否靜止的觀察
- 二、彈簧基本測量
- 三、鉛直彈簧縱波波速的測量
- 四、彈簧鉛直落下過程彈簧底部停留時間與彈簧性質間的關係探討
- 五、彈簧落下過程的運動模式探討



參、【實驗一】彈簧鉛直落下過程彈簧底部是否靜止的觀察

一、實驗原理

以**攝影**的方式證明彈簧頂端開始運動後彈簧底部暫時性靜止的現象。

利用運動的物體在**長時間曝光後產生殘影**的現象證明之。

即只要彈簧底部在某影格內沒有殘影出現，即證明彈簧底部在該影格為靜止的。

二、實驗器材

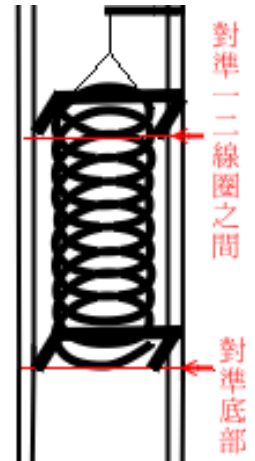
- (一)彈簧三小組每組四條共 12 條
- (二)自由落體實驗組儀器之鐵架
- (三)棉線
- (四)數位相機 (錄影每秒 30 格相當於單位：1/30 秒)
- (五)相機腳架
- (六)打火機
- (七)ACDsee 秀圖軟體
- (八)PhotoImpact10 影像處理軟體
- (九)光電計時器 (單位：0.001 秒)
- (十)投影機

三、實驗過程與方法

此一實驗我們以**數位相機與光電計時器同步紀錄**，以數位相機拍攝彈簧落下的完整過程，以光電計時器測量彈簧底部開始運動的時間 (即頂端開始運動至底部開始運動之時間差)。

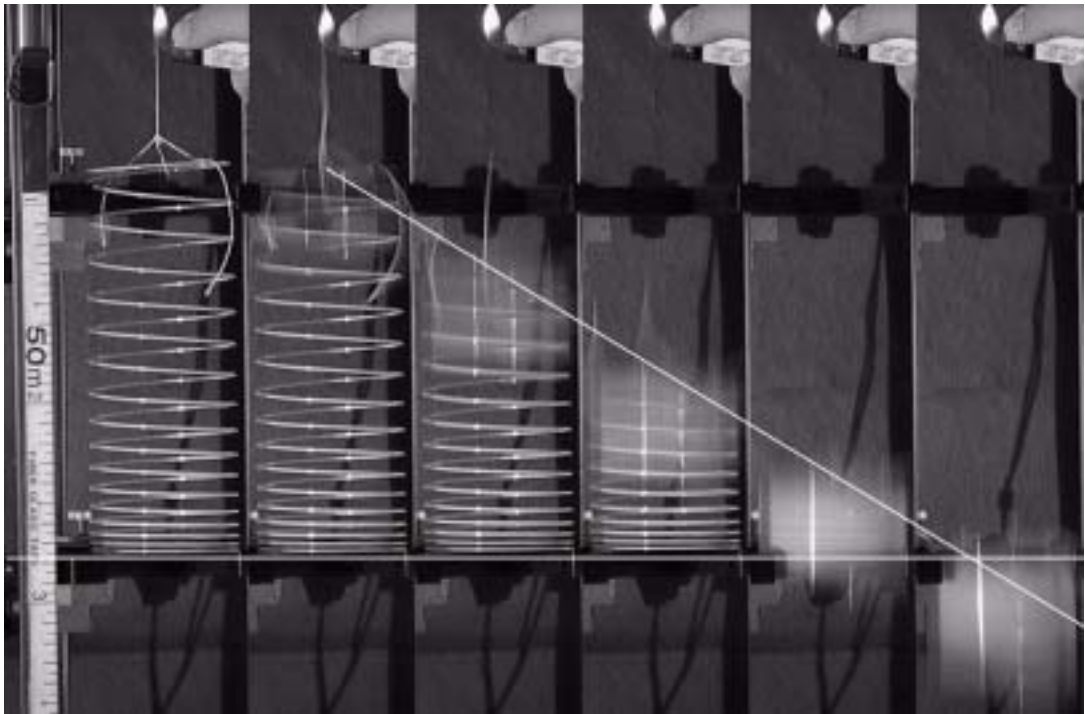
(一)彈簧完整運動過程之紀錄

1. 以棉線將彈簧鉛直懸掛於鐵架上 (如右圖)。
2. 將皮尺掛於鐵架上，並將皮尺盡量靠近彈簧，以避免因彈簧到數位相機與皮尺到數位相機的距離不同而產生誤差。
3. 以一投影機對彈簧打光，使彈簧線圈產生反光，以便圖像的觀察。
4. 將數位相機架於腳架上，並將腳架高度調至與彈簧中心懸掛長度一半處等高。
5. 待彈簧靜止後，啟動相機，並以打火機燒斷棉線，使彈簧自由落下。
6. 將所得之影片以 ACDsee 秀圖軟體擷取為影像 (每秒 30 張)。
7. 以 PhotoImpact10 影像處理軟體將所得之影像合成為一張圖片以利觀察，合成方法如下：
 - (1) 將以 ACDsee 秀圖軟體轉換後之影像依序開啟。
 - (2) 開啟一新空白影像。
 - (3) 將未運動的那一張影像連同皮尺一起剪下，貼至新空白影像中。
 - (4) 依序貼上其他影像，每一張的影像大小必須相等，選取位置也必須相同。
 - (5) 自頂端開始運動的彈簧，頂端拉一直線到底部開始運動的前一張彈簧頂端，並將直線延伸。



(6) 自第一格彈簧底部拉一直線到底部開始運動的前一張彈簧底部，並將直線延伸。

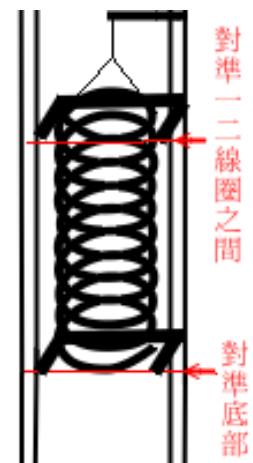
8.重複 1.至 7.每個彈簧做五次。(以 I 彈簧為例，如下頁圖)



(該圖是經等比例合成，故雖是合成圖，仍相當精準。)

(二)彈簧底部開始運動的時間(頂端開始運動至底部開始運動之時間差)之測量

- 1.將光電計時器功能調至 A 組(彈簧頂端)光束被阻斷則啟動，B 組(彈簧底部)光束被阻斷即停止。
- 2.以棉線將彈簧掛於鐵架上，上下各放一光感應器，待其靜止後，將頂端之光感應器對準於第一線圈下方，底部光感應器則貼近彈簧底端(如右圖)。
- 3.以打火機燒斷棉線使彈簧自由落下，彈簧頂端的第一線圈落下瞬間啟動頂端之光感應器，彈簧底部運動啟動底部之光感應器。



- 4.光電計時器所記錄之時間即為彈簧頂端運動後底部之停留時間。
- 5.重複 1.至 4.共五次，將數據列表(以 A 彈簧為例，如下頁表格)。

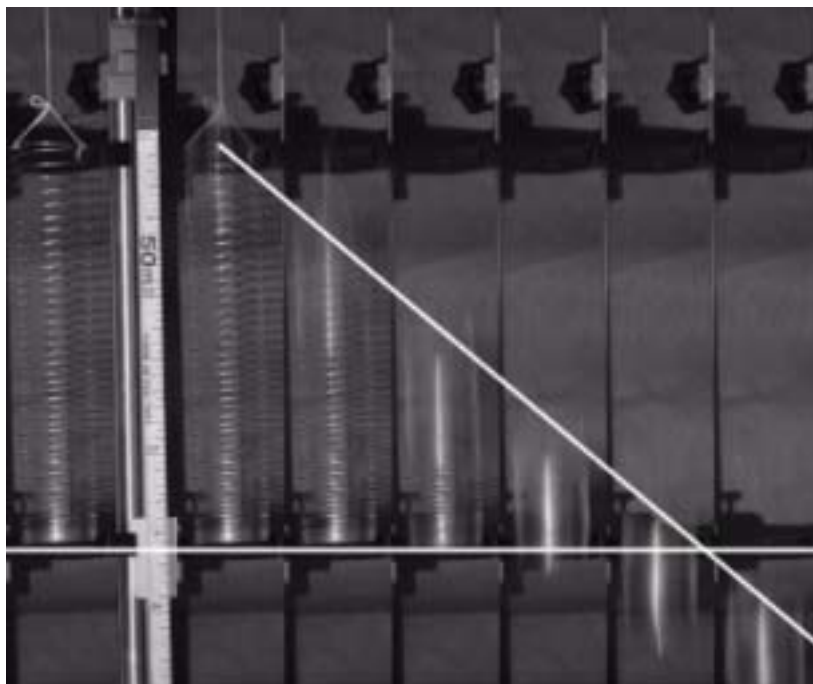
彈簧代號	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均秒數
A	0.070s	0.062s	0.060s	0.058s	0.063s	0.063s

四、實驗數據與數據分析

(一)彈簧運動過程之影像

(因版面限制，故只將每個彈簧五次實驗中的第一次放上。)

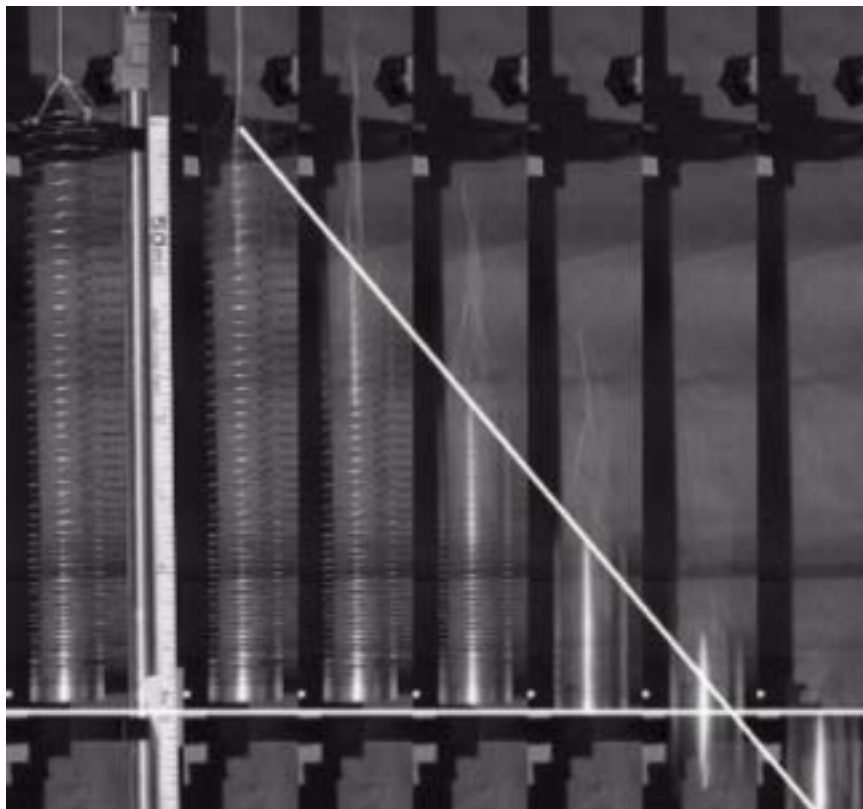
1. A 彈簧(由圖中可發現彈簧頂端 A 為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



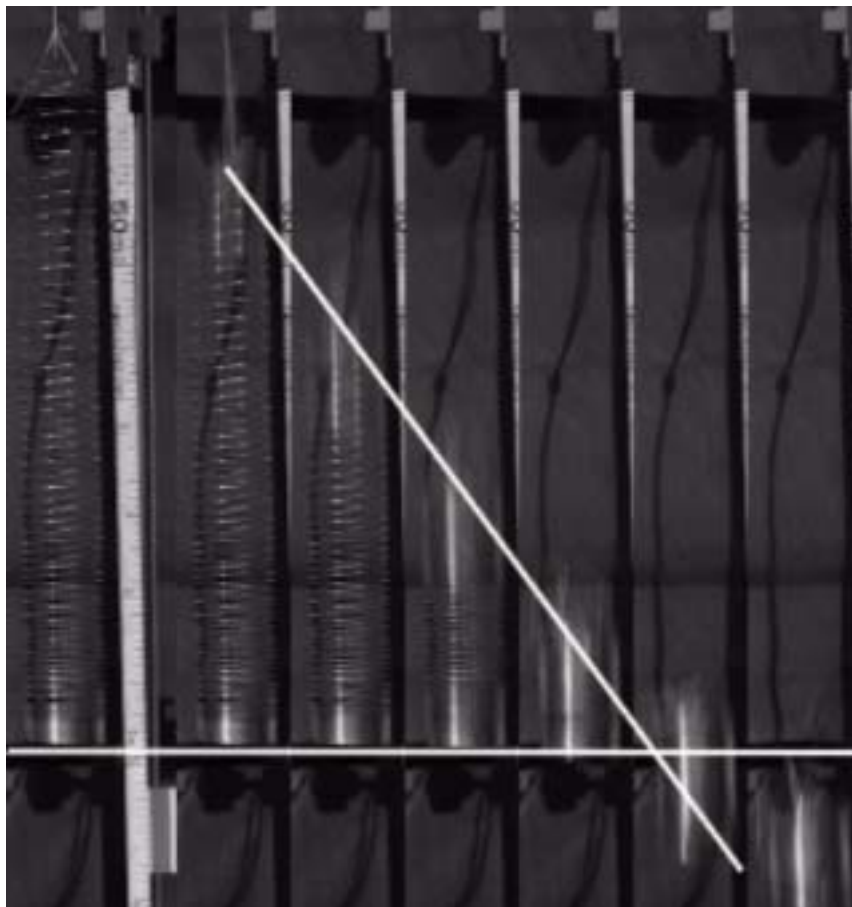
2. B 彈簧(由圖中可發現 B 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



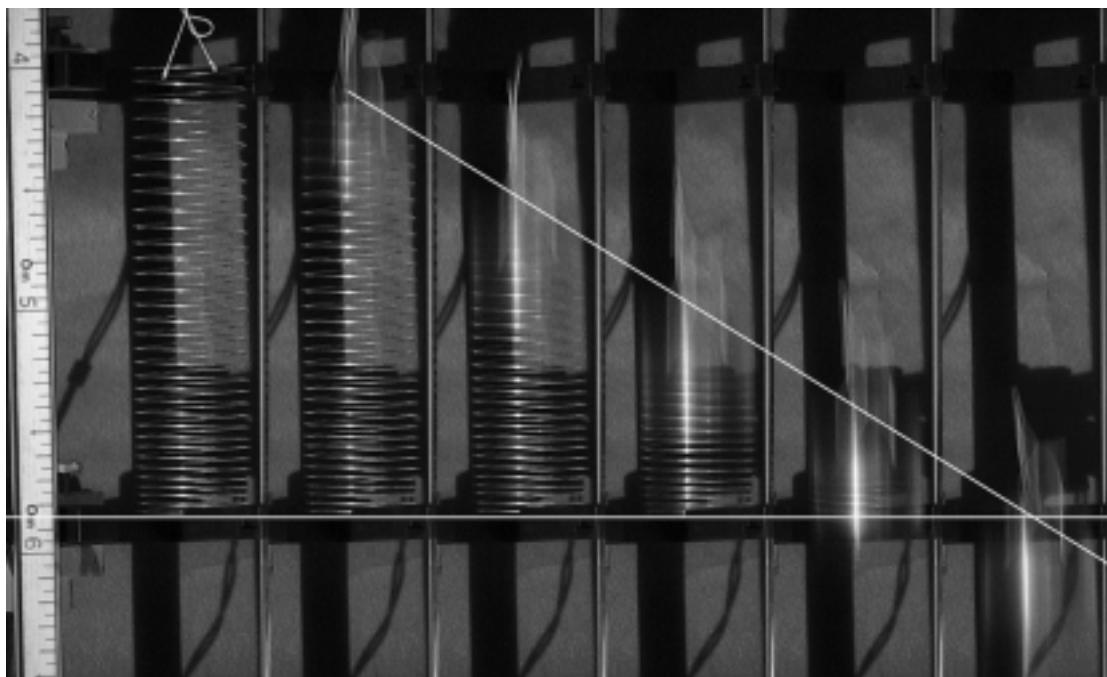
3. C 彈簧(由圖中可發現彈簧 C 頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



4. D 彈簧(由圖中可發現彈簧 D 頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



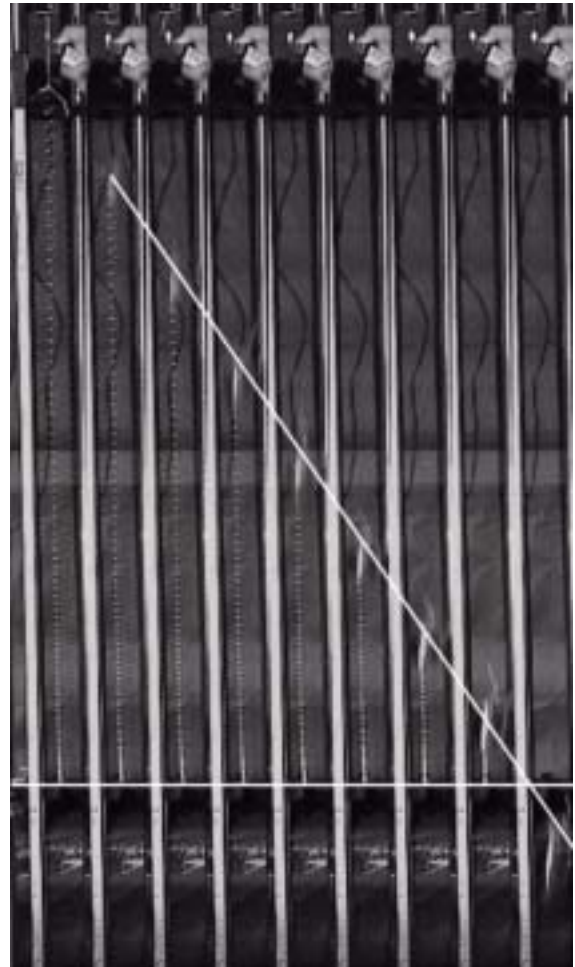
5. E 彈簧(由圖中可發現 E 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



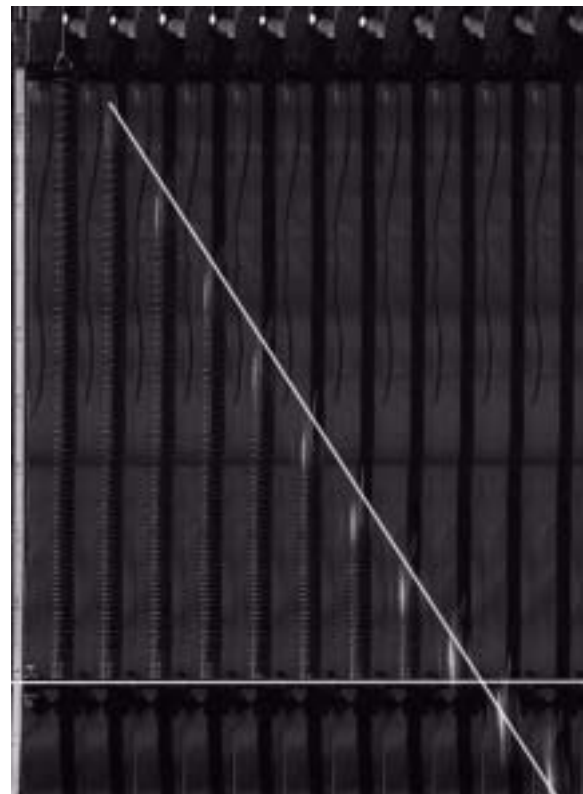
6. F 彈簧(由圖中可發現 F 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



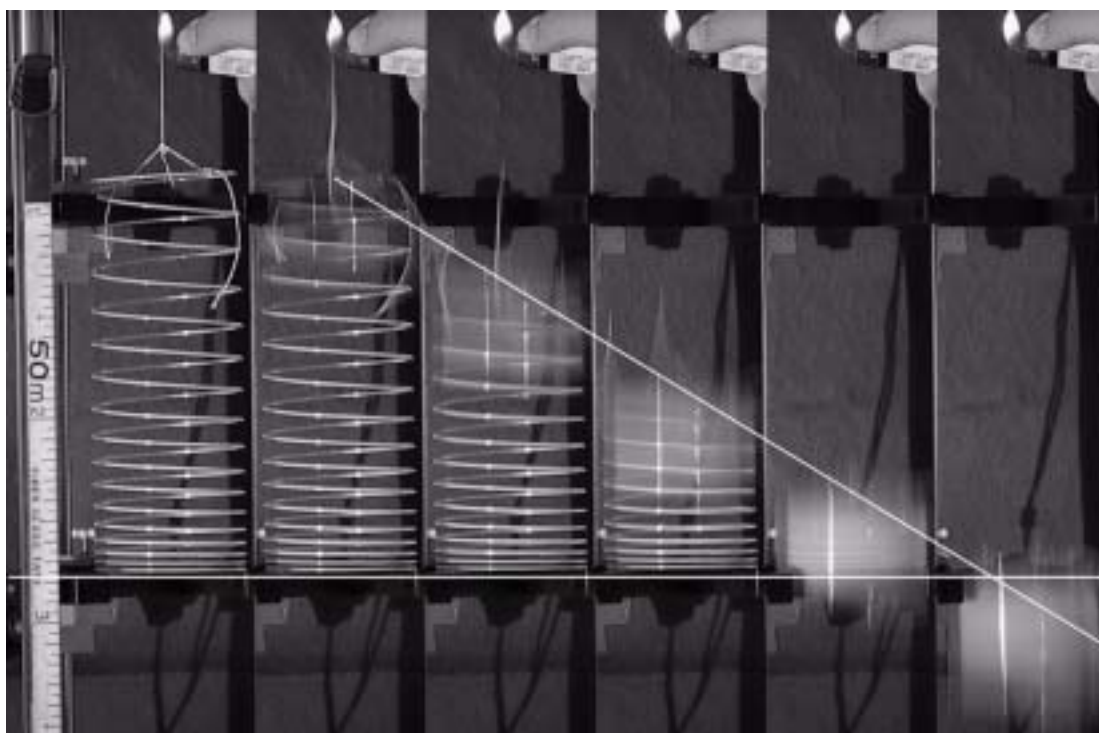
7. G 彈簧(由圖中可發現 G 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



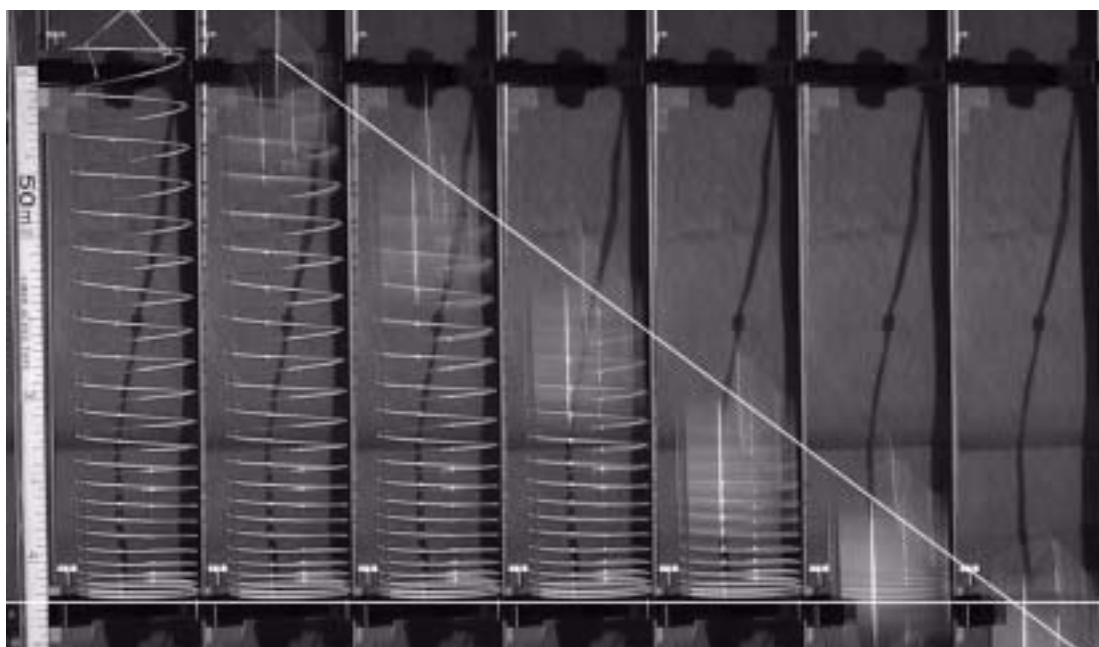
8. H 彈簧(由圖中可發現 H 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



9. I 彈簧(由圖中可發現彈簧 I 頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



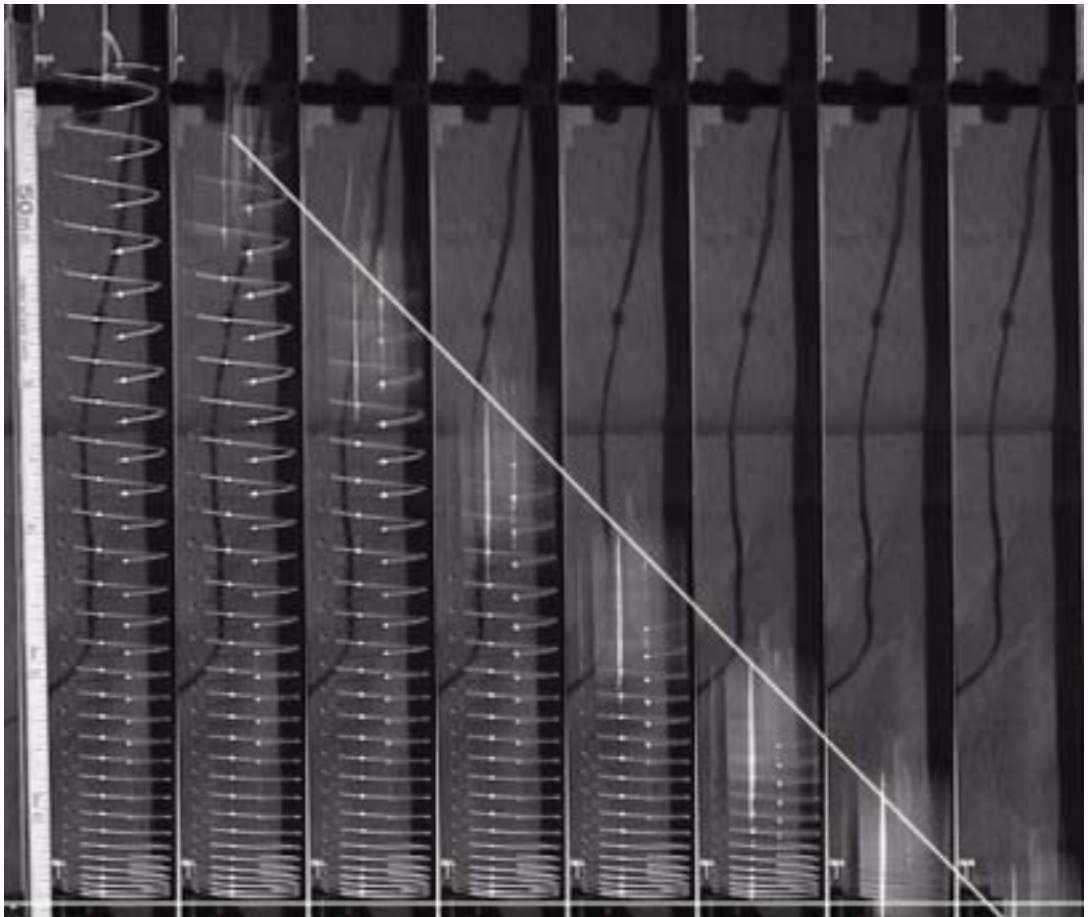
10. J 彈簧(由圖中可發現 J 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



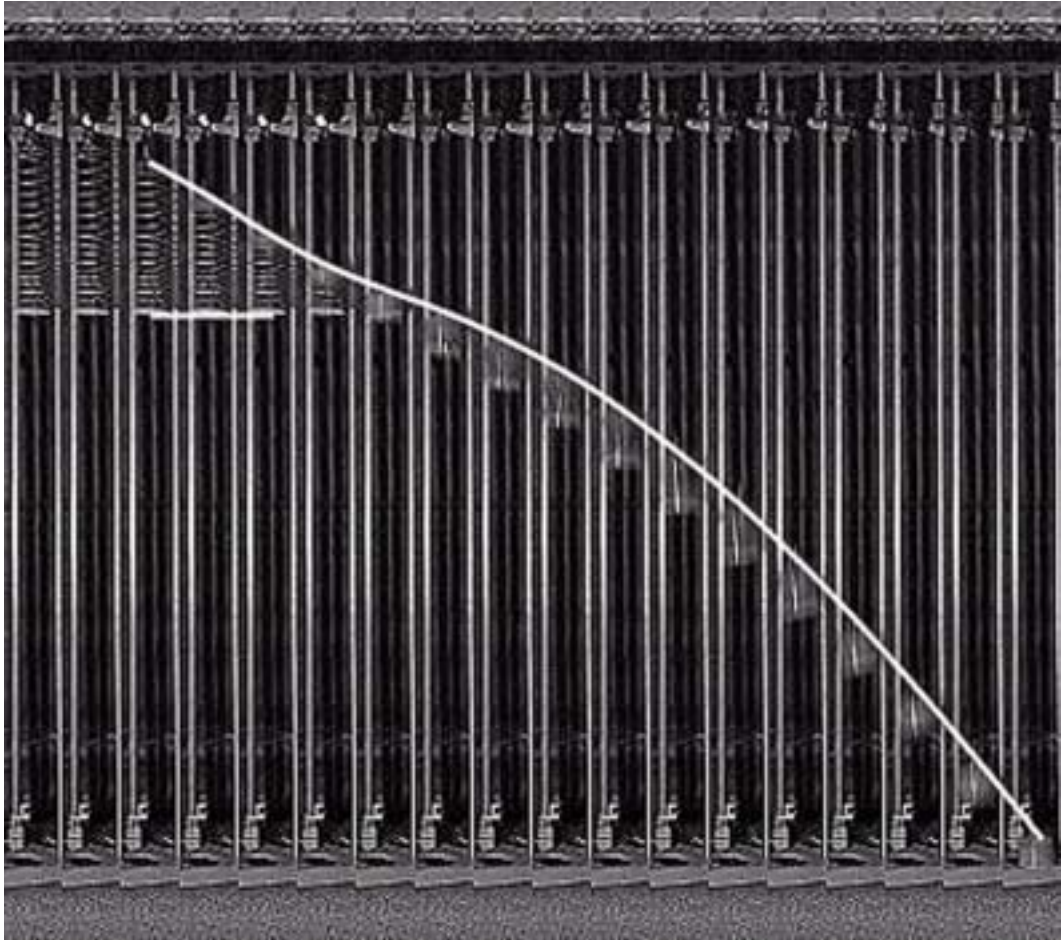
11. K 彈簧(由圖中可發現 K 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



12. L 彈簧(由圖中可發現 L 彈簧頂端為近似等速度落下，且底部暫時性靜止)



13.以 I 彈簧做一落下距離較長的觀察



(二)彈簧底部開始運動的時間 (頂端開始運動至底部開始運動之時間差)

彈簧代號	第一次 (s)	第二次 (s)	第三次 (s)	第四次 (s)	第五次 (s)	平均秒數 (s)	平均秒數 標準差(s)
A	0.070	0.062	0.060	0.058	0.063	0.063	±0.0020
B	0.058	0.044	0.045	0.044	0.066	0.051	±0.0032
C	0.081	0.072	0.076	0.068	0.067	0.073	±0.0024
D	0.106	0.101	0.110	0.100	0.111	0.106	±0.0023
E	0.100	0.108	0.106	0.104	0.108	0.105	±0.0015
F	0.166	0.161	0.162	0.155	0.165	0.162	±0.0019
G	0.247	0.245	0.247	0.248	0.245	0.246	±0.0006
H	0.253	0.255	0.254	0.251	0.250	0.253	±0.0010
I	0.101	0.094	0.104	0.102	0.099	0.100	±0.0018
J	0.131	0.130	0.129	0.130	0.129	0.130	±0.0002
K	0.157	0.159	0.157	0.157	0.157	0.157	±0.0004
L	0.172	0.174	0.172	0.173	0.173	0.173	±0.0002

五、實驗方法與影像處理之討論

(一)光電計時器

1.光電計時器測不到彈簧通過

(1) 發現：

彈簧落下過程中彈簧頂端未通過上端的光電計時器。

(2) 討論：

我們將上端的光電計時器對準彈簧頂端第一個線圈與第二個線圈之間，此問題順利解決。

(二)數位相機

1.影像中之長度不準確

(1) 發現：

因彈簧到數位相機與皮尺到數位相機的距離不同，加上相機本身的視角而產生影像中彈簧長度的誤差。

(2) 討論：

我們將皮尺盡量貼近彈簧，且使皮尺、彈簧、數位相機三者之夾角成 90 度，並將相機與彈簧的距離加大，以避免其誤差。

2.攝影所產生的殘影

(1) 發現：

將影片轉成影像後發現因相機攝影是將每個影格曝光 1/30 秒，無法凍結住運動非常快的彈簧，而產生殘影。

(2) 討論：

因殘影出現，我們必須替彈簧定一觀測點，比較後我們決定以彈簧反光之最高點為觀測點，此觀測點具有明顯易觀察的特性。另一方面，殘影出現，正可幫助我們觀察彈簧底部是否出現暫時性靜止的現象，只要彈簧上某一質點沒有殘影出現即可證明在該影格（1/30 秒）內某質點為靜止不動的。

3.影像合成的可信度

(1) 發現：

因利用數位相機所拍攝之影片，最後輸出的方式為合成的圖片，有可能出現可信度的問題。

(2) 討論：

為避免合成圖可能產生的可信度問題，我們在切割影像（同一次實驗）時皆從同一位置切割，且（除第一張包含皮尺之影像外）其餘影像皆切割成相同大小，做等尺寸合成。

六、實驗發現與討論

(一)彈簧鉛直落下過程中彈簧**頂端近似等速度落下之現象**

1.說明：

由合成圖中發現彈簧鉛直落下過程中彈簧頂端成近似等速度落下，直至彈簧底部開始運動後，彈簧頂端才作加速度運動。

2.假設：

我們推測彈簧頂端等速度落下的過程為**縱波的傳遞**。（將於後面深入討論）

(二)彈簧鉛直落下過程中彈簧底部出現暫時性靜止之現象

1.說明：

由合成圖中我們發現彈簧鉛直落下過程中彈簧底部暫時性靜止，直至彈簧恢復原長後才開始運動。

2.假設：

我們推測，這是因為彈簧落下所產生之**縱波未傳至彈簧底部，而產生之現象**，而彈簧在恢復原長後波速增快，因此彈簧底部在彈簧恢復原長後不久開始運動。

(三)彈簧鉛直落下過程中彈簧在**頂端未到達處皆為靜止**

1.說明：

由合成圖中我們發現彈簧鉛直落下過程中彈簧在頂端未到達處皆為靜止，直至彈簧頂端到達後開始運動。

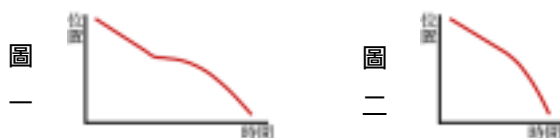
2.假設：

我們推測這種現象就如同彈簧的縱波，縱波未傳達到之質點皆為靜止的。

(四)彈簧底部開始運動瞬間，**彈簧頂端出現減速的現象**

說明：

由合成圖中可發現彈簧頂端落下過程如下【圖一】，而非下【圖二】，故在彈簧底部開始運動瞬間，彈簧頂端出現減速的現象。（將會在後面深入討論）



(五)彈簧頂端減速的現象結束後，**彈簧整體有伸長的現象**

說明：

由合成圖中可發現彈簧頂端減速的現象結束後，彈簧整體有伸長的現象，且先伸長後縮短。（將會在後面深入討論）

七、後續實驗設計

(一)設計依據：

為了將各條彈簧加以比較，我們需透過實驗測量出彈簧的幾個基本物理量，如：長度、重量、彈力常數 等，又因我們推測彈簧頂端約等速度落下的部分運動為縱波的傳遞，因此必須對彈簧縱波加以測量。

(二)設計實驗：

1.實驗二

在【實驗二】中我們針對彈簧的基本物理量加以測量，測量項目有：彈簧水平放置時之長度、彈簧鉛直懸掛（受重力影響）時之長度、彈簧之重量、彈簧之彈力常數，共四個項目。

2.實驗三

在【實驗三】中則針對我們推測彈簧頂端約等速度落下的部分運動為縱波的傳遞，對彈簧之縱波波速加以測量。

【實驗二】彈簧基本測量

一、實驗原理

虎克定律：一彈簧在彈力限度內，其形變量（伸長量或壓縮量）與外力大小成正比，稱為虎克定律。

$$\text{即 } F = K \cdot l$$

F：外力大小。SI 單位：牛頓（nt）

K：彈簧之彈力常數。SI 單位：牛頓 / 公尺（nt/m）

l：彈簧形變量。SI 單位：公尺（m）

二、實驗器材

(一)彈簧三小組每組四條共 12 條

(二)皮尺（單位：0.001 公尺）

(三)電子秤（單位：0.1 克）

(四)自由落體實驗組儀器之鐵架

(五)力感應器（單位：0.0001 牛頓或 0.001 牛頓因使用方法而異）

(六)力感應器附屬軟體 DataStudio

三、實驗過程與方法

我們將彈簧分為**鐵彈簧（甲）**、**鐵彈簧（乙）**和**塑膠彈簧**三大類，再將每一類分為四條不同長度的彈簧，每一類彈簧依**水平放置時之原長由短到長的順序編上 A 至 L**（如下表）。

鐵彈簧(甲)	水平放置長度	鐵彈簧(乙)	水平放置長度	塑膠彈簧	水平放置長度
A	0.0300m	E	0.1000m	I	0.0300m
B	0.0350m	F	0.1500m	J	0.0400m
C	0.0400m	G	0.2000m	K	0.0500m
D	0.0450m	H	0.2500m	L	0.0600m

(一)彈簧水平放置時之長度的測量

將彈簧放置於較光滑之桌面上，輕微晃動彈簧使摩擦力對彈簧的影響**盡量減小**，再以皮尺測量其長度。

(二)彈簧鉛直懸掛時（受重力影響）之長度的測量

將彈簧以棉線懸吊於架子上，待其靜止後測量其長度。

(三)彈簧之重量的測量

以電子秤測其重量。

(四)彈簧之彈力常數的測量

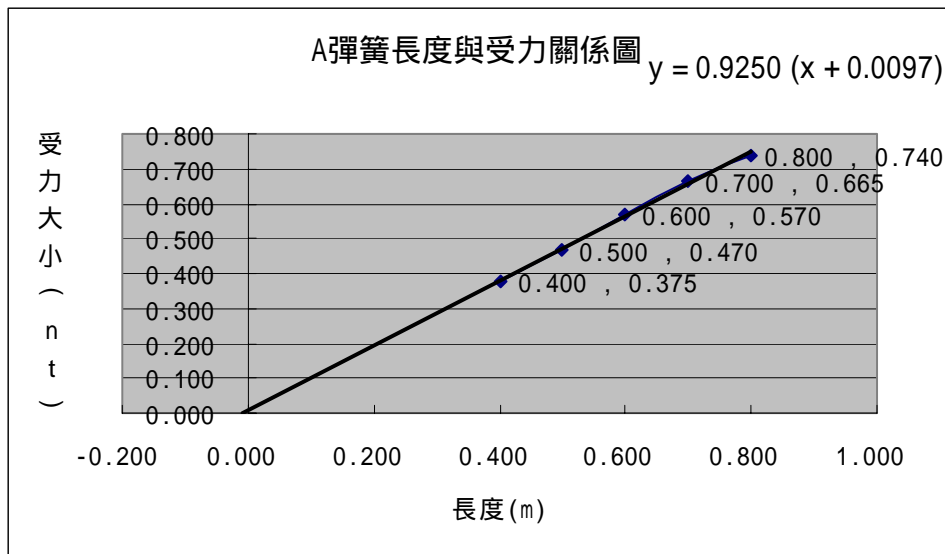
1.將力感應器水平置於桌面上，並將彈簧以棉繩勾於力感應器上（如右圖）。



2.將力感應器接於彈簧兩端，拉至預定距離後，記錄此時彈簧長度及受力大小。

3.重複步驟 2.將感應端拉至為五種不同長度，並記錄。

4.作其長度與受力的關係圖，並求其關係式（以A彈簧為例，如下圖表）。



（此圖表橫軸為彈簧受力後長度，縱軸為彈簧受力大小）

5.所求出來的關係式為： $y = kx - b$

矯正後為： $y = k(x - b/k)$

（其中 y 為彈簧受力； x 為彈簧受力後長度； k 為彈力常數； b/k 為彈簧原長 x_0 ）

故其完整關係式為： $y = k(x - x_0)$

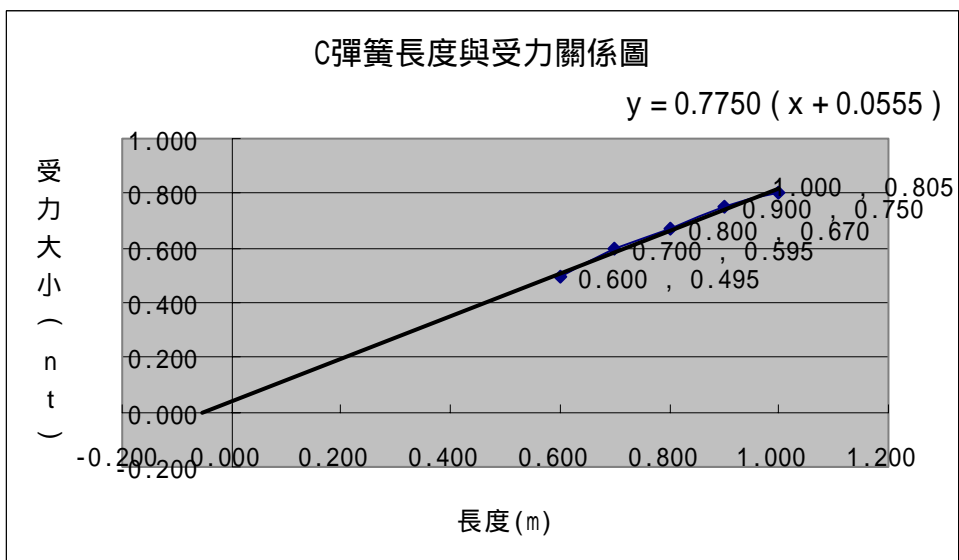
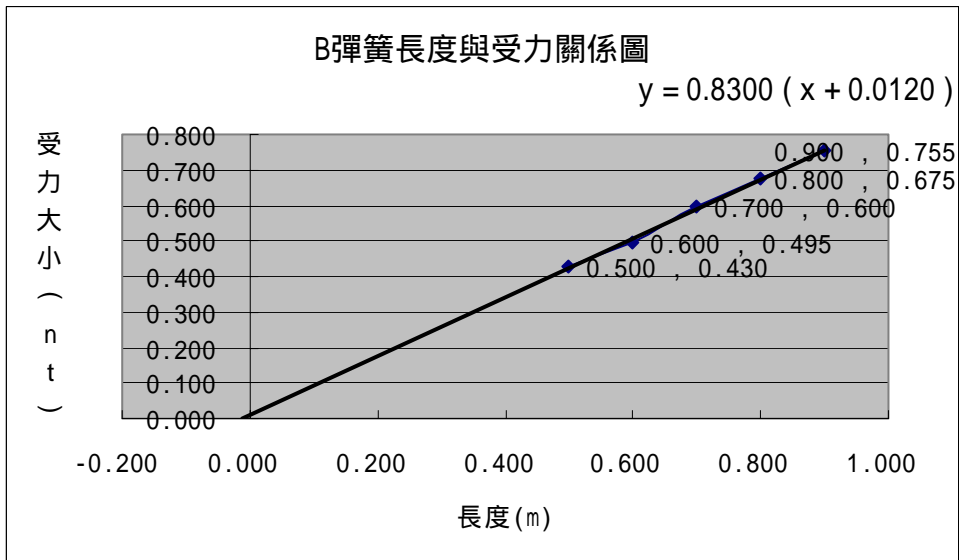
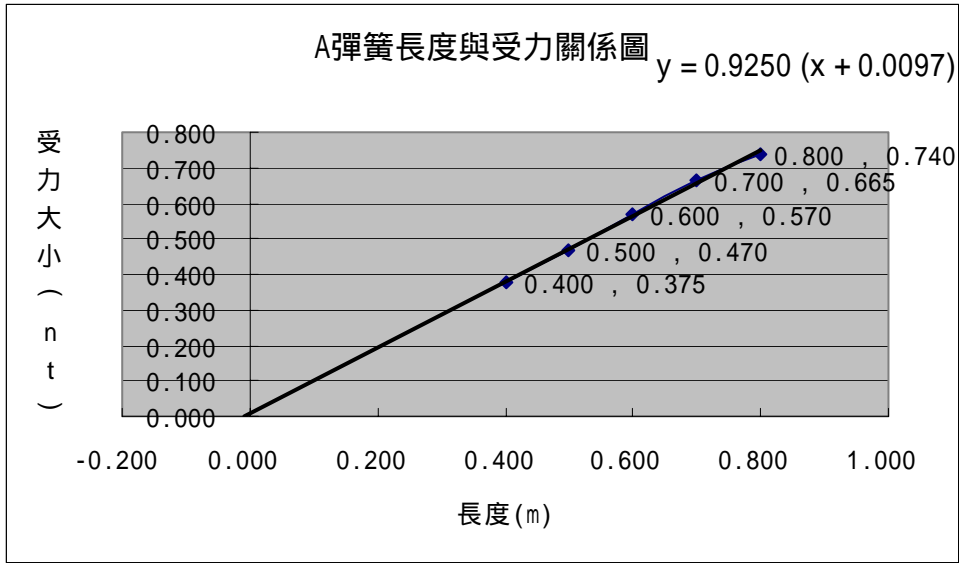
與虎克定律相符

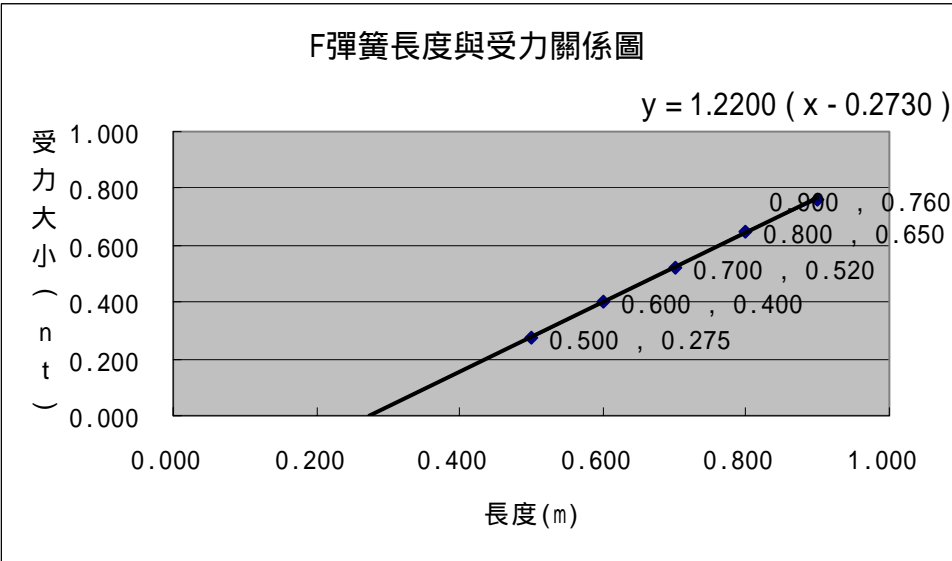
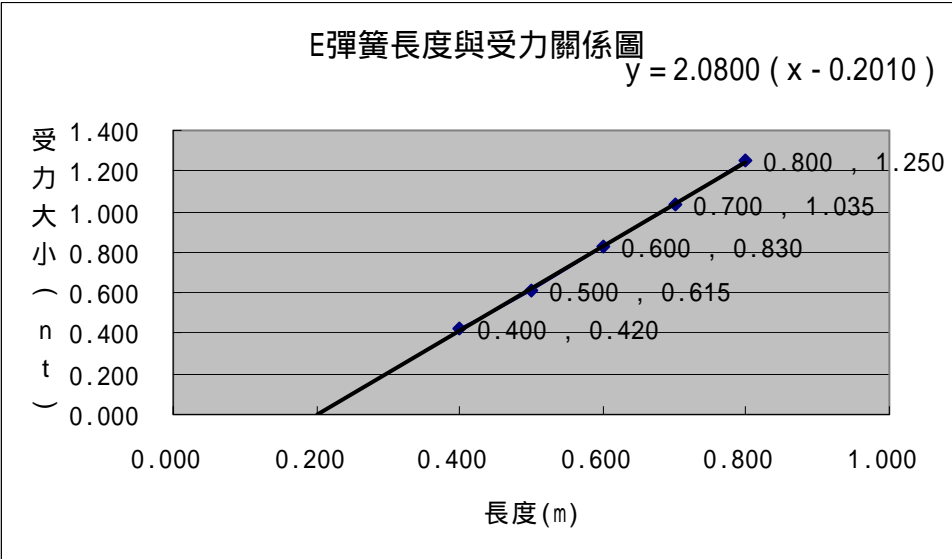
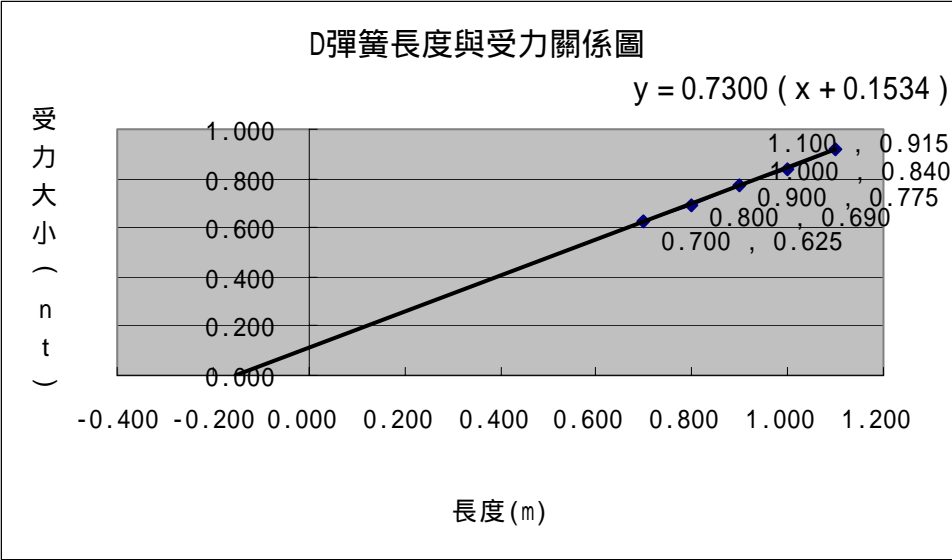
四、實驗數據與數據分析

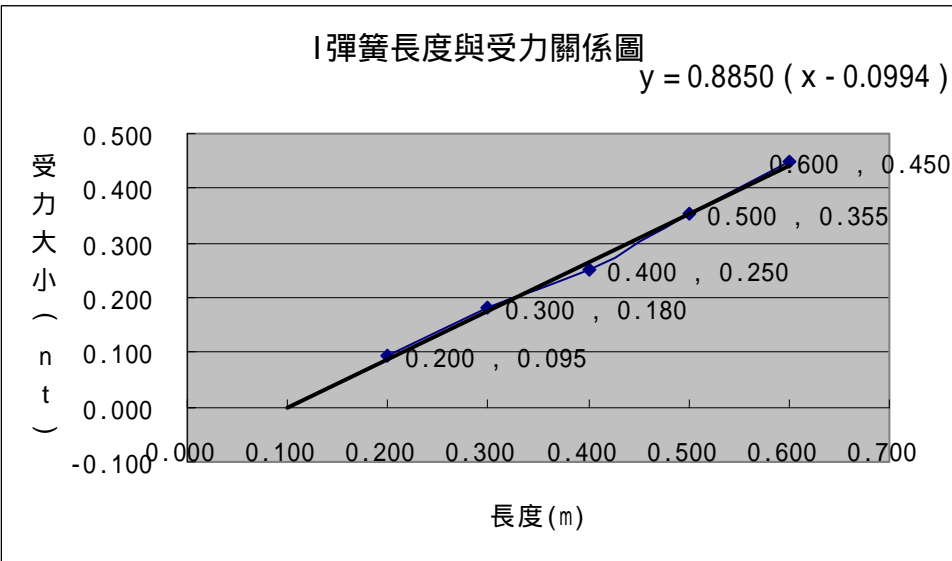
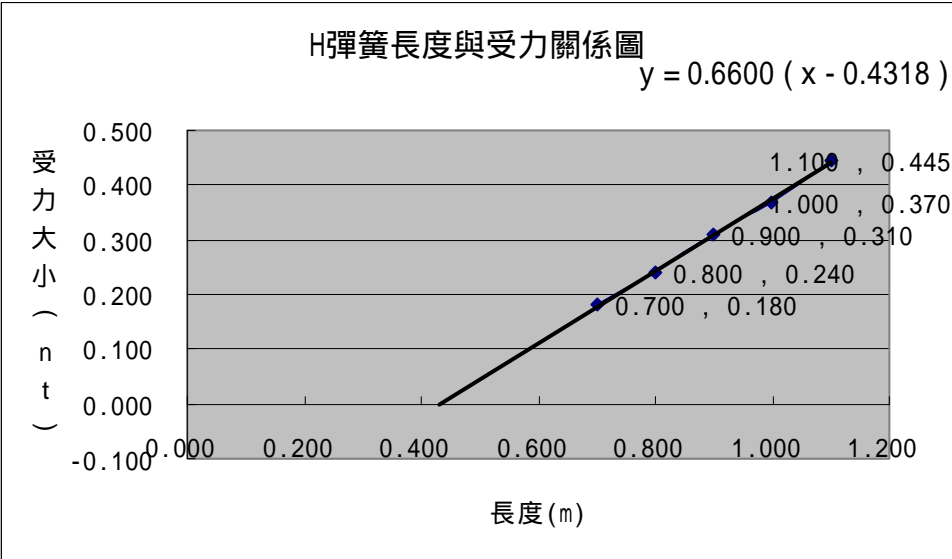
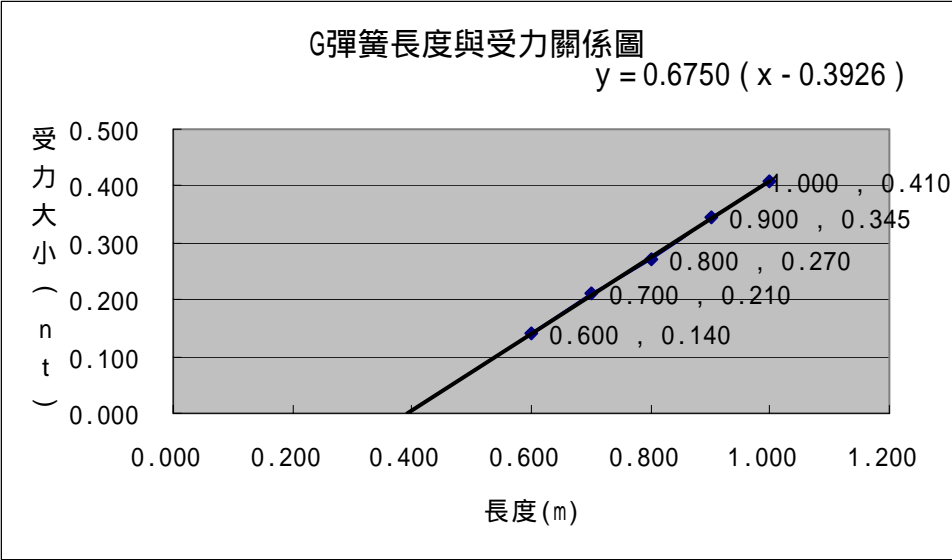
（一）彈簧長度與重量

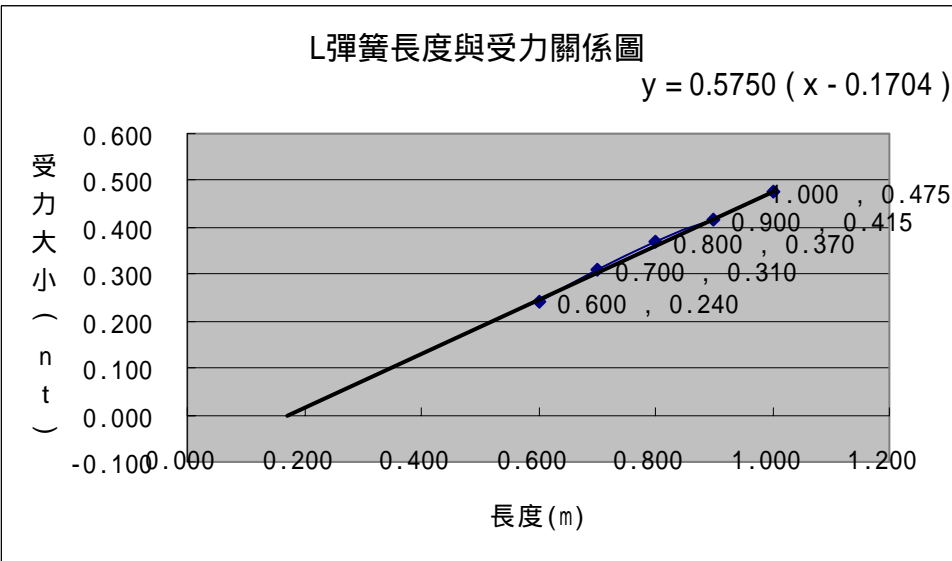
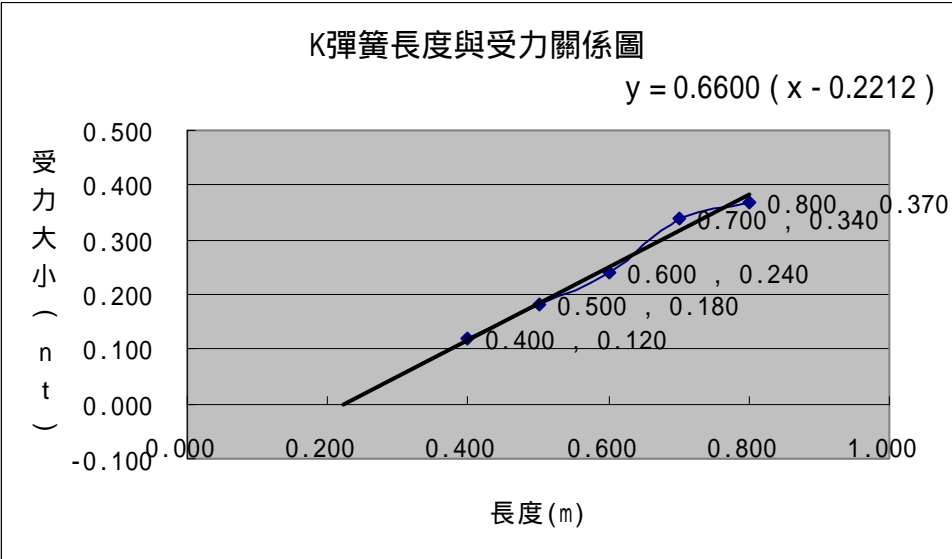
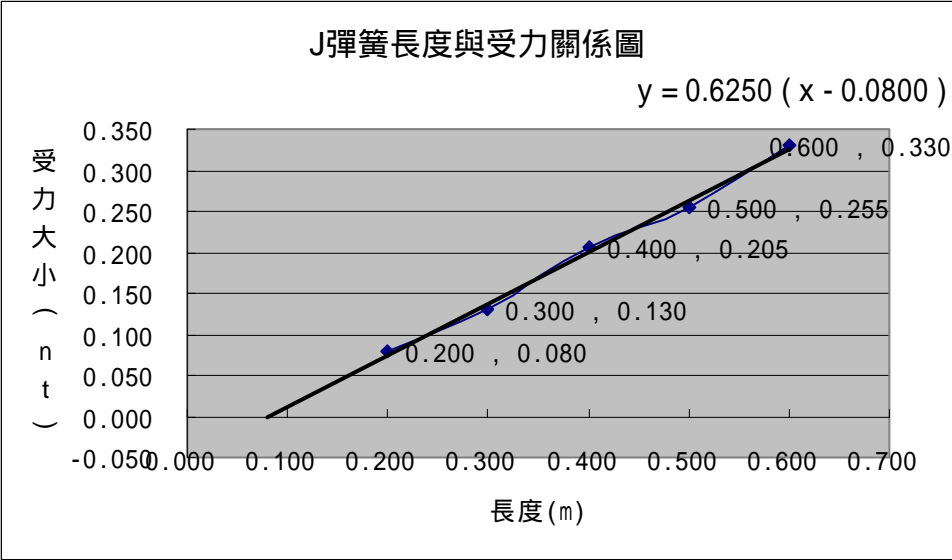
彈簧代號	水平放置時之原長(m)	鉛直放置時之原長(m)	重量(g)
A	0.0300	0.252	67.0
B	0.0350	0.323	77.6
C	0.0400	0.395	86.5
D	0.0450	0.390	93.1
E	0.1000	0.190	32.7
F	0.1500	0.520	70.5
G	0.2000	0.857	94.0
H	0.2500	0.923	90.6
I	0.0300	0.185	27.6
J	0.0400	0.328	37.9
K	0.0500	0.455	47.4
L	0.0600	0.540	51.0

(二)彈力常數的測量









彈力常數總表					
彈簧代號	彈力常數 (nt/m)	彈簧代號	彈力常數 (nt/m)	彈簧代號	彈力常數 (nt/m)
A	0.9250	E	2.0800	I	0.8850
B	0.8300	F	1.2200	J	0.6250
C	0.7750	G	0.6750	K	0.6600
D	0.7300	H	0.6600	L	0.5750

五、實驗討論

同組彈簧重量與原長不成正比關係

(一)發現：

理論上同材質彈簧之重量應與彈簧水平放置時之長度成正比關係，但從數據中我們發現該正比關係並不明顯，甚至有些差距。

(二)討論：

測量其它未列入實驗的彈簧（同一類且同長度之彈簧）後，我們認為這是因彈簧品質不良所致；故改將 12 條彈簧分開比較。

【實驗三】鉛直彈簧縱波波速的測量

一、實驗原理

(一)將彈簧鉛直懸掛，使其頂端產生一縱波向下，利用力感應器測量出縱波傳至底部的時間（T）。

(二)將彈簧鉛直懸掛時之長度除以 T 即為縱波波速。

二、實驗器材

- (一)彈簧三小組每組四條共 12 條
- (二)棉線一捆
- (三)自由落體實驗組儀器之鐵架一組
- (四)力感應器（單位：0.0001 牛頓）
- (五)力感應器附屬軟體 DataStudio
- (六)小卡片一張

三、實驗過程與方法

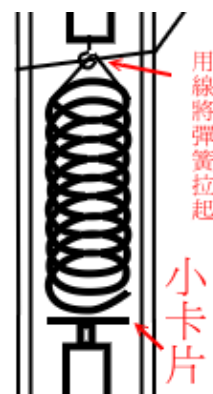
(一)將彈簧鉛直懸掛，上下兩端各放置一力感應器，彈簧頂端以棉線懸掛於頂端的力感應器上，底部的力感應器上**放置一張小卡片（以增加碰撞機會）**，並使其貼近於彈簧底端下方約 2mm 的距離（如右上圖）。

(二)頂端以一繩子穿過彈簧頂端之棉線圈，將其略微拉起，一端綁於架子上，另一端則拉住固定（如右上圖）。

(三)力感應器啟動後將手放開，彈簧頂端落下撞擊頂端之力感應器，**產生一縱波向下**。

(四)縱波傳至底端，撞擊到底端的小卡片（底端力感應器受力）。

(五)取兩感應器之受力時間差（ t ），除以彈簧懸掛之原長得其波速。



(六)重複步驟(四)(五)五次，並取其平均值，將所得之平均秒數除以垂直放置時之原長即為彈簧縱波波速。

四、實驗數據與數據分析

彈簧代號	鉛直懸掛時長度(m)	第一次(s)	第二次(s)	第三次(s)	第四次(s)	第五次(s)	平均秒數(s)	縱波波速(m/s)	平均秒數標準差(s)
A	0.252	0.2112	0.2205	0.2152	0.2193	0.2142	0.2161	1.1662	±0.002
B	0.323	0.2486	0.2328	0.2419	0.2561	0.2455	0.2450	1.3185	±0.003
C	0.395	0.3000	0.2750	0.2630	0.2526	0.2467	0.2675	1.4769	±0.009
D	0.390	0.2907	0.2750	0.2927	0.2830	0.2760	0.2835	1.3758	±0.004
E	0.190	0.1337	0.1211	0.1220	0.1249	0.1238	0.1251	1.5188	±0.002
F	0.520	0.2267	0.2015	0.2050	0.1920	0.2044	0.2059	2.5253	±0.006
G	0.857	0.3727	0.3889	0.3770	0.3710	0.3763	0.3772	2.2721	±0.003
H	0.923	0.3875	0.3890	0.3838	0.3905	0.3899	0.3881	2.3780	±0.001
I	0.185	0.1586	0.1627	0.1585	0.1571	0.1581	0.1590	1.1635	±0.001
J	0.328	0.2433	0.2371	0.2339	0.2246	0.2325	0.2343	1.4000	±0.003
K	0.455	0.2679	0.2629	0.2590	0.2560	0.2614	0.2614	1.7404	±0.002
L	0.540	0.2977	0.2916	0.2771	0.2820	0.2778	0.2852	1.8931	±0.003

五、實驗討論

(一)因彈力常數過小以致縱波無法由彈簧頂端傳至彈簧底端。

1.發現：

原先採由彈簧頂端敲擊，以產生一縱波，但因彈力常數過小而導致縱波未傳至彈簧底端即消失。

2.討論：

我們改採將**彈簧略從力感應器上吊起**，彈簧放掉後因彈簧上之棉線勾住力感應器，而產生一**縱波向下**，且此縱波可以抵達彈簧底部使彈簧底部之力感應器受力。

(二)彈簧基本物理量與彈簧縱波波速之間的關係

1.討論：

將彈簧水平放置時之長度、彈簧鉛直懸掛時之長度、彈簧之重量、彈簧彈力常數與彈簧縱波波速列表比較。

彈簧代號	水平放置時之長度(m)	鉛直懸掛時之長度(m)	重量(g)	彈力係數(nt/m)	鉛直懸掛時之縱波波速(m/s)
A	0.0300	0.252	67.0	0.9250	1.1662
B	0.0350	0.323	77.6	0.8300	1.3185
C	0.0400	0.395	86.5	0.7750	1.4769
D	0.0450	0.390	93.1	0.7300	1.3758
E	0.1000	0.190	32.7	2.0800	1.5188
F	0.1500	0.520	70.5	1.2200	2.5253
G	0.2000	0.857	94.0	0.6750	2.2721
H	0.2500	0.923	90.6	0.6600	2.3780
I	0.0300	0.185	27.6	0.8850	1.1635
J	0.0400	0.328	37.9	0.6250	1.4000
K	0.0500	0.455	47.4	0.6600	1.7404
L	0.0600	0.540	51.0	0.5750	1.8931

2. 結論：

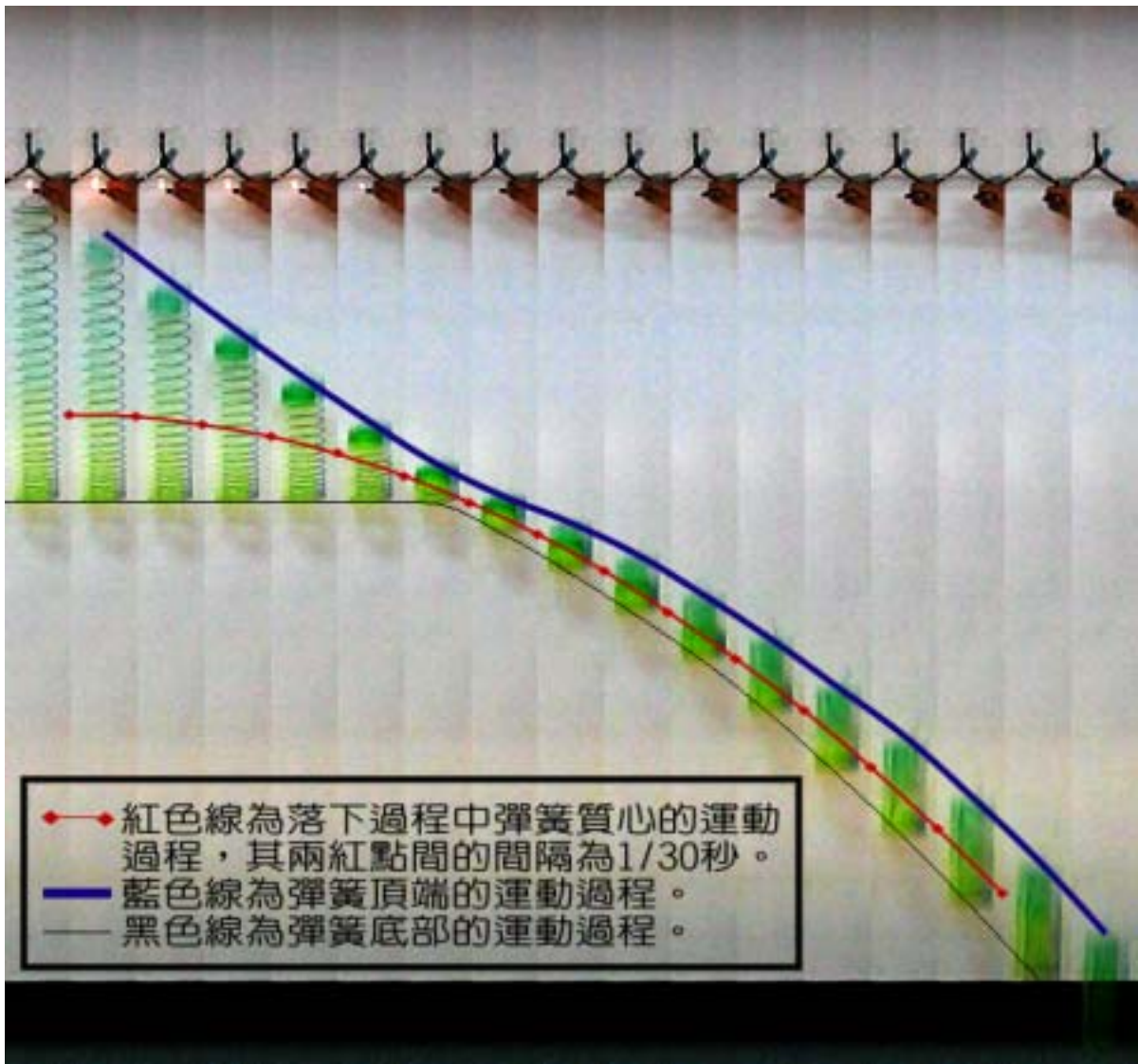
從數據中無法找出彈簧本質與縱波波速的關係，我們認為這是因為購買到的彈簧的材質、線徑 等不均勻所致。

肆、彈簧垂直落下過程彈簧底部停留時間與彈簧性質間的關係探討

彈簧代號	水平放置時之長度(m)	鉛直懸掛時之長度(m)	彈簧之重量(g)	彈力係數(nt/m)	彈簧鉛直懸掛時之縱波波速(m/s)	鉛直懸掛時之長度/縱波波速(s)	彈簧頂端運動後彈簧底部停留時間(s)
A	0.0300	0.252	67.0	0.9250	1.1662	0.2161	0.063
B	0.0350	0.323	77.6	0.8300	1.3185	0.2450	0.051
C	0.0400	0.395	86.5	0.7750	1.4769	0.2675	0.073
D	0.0450	0.390	93.1	0.7300	1.3758	0.2835	0.106
E	0.1000	0.190	32.7	2.0800	1.5188	0.1251	0.105
F	0.1500	0.520	70.5	1.2200	2.5253	0.2059	0.162
G	0.2000	0.857	94.0	0.6750	2.2721	0.3772	0.246
H	0.2500	0.923	90.6	0.6600	2.3780	0.3881	0.253
I	0.0300	0.185	27.6	0.8850	1.1635	0.1590	0.100
J	0.0400	0.328	37.9	0.6250	1.4000	0.2343	0.130
K	0.0500	0.455	47.4	0.6600	1.7404	0.2614	0.157
L	0.0600	0.540	51.0	0.5750	1.8931	0.2852	0.173

- 一、所測量出的彈簧基本物理量與底部停留時間比較後，並沒有明顯的關係。
- 二、若以縱波的形式傳至底部所需時間遠大於彈簧底部停留時間，因此：彈簧頂端落下的過程不為縱波的傳遞。

伍、彈簧落下過程的運動模式探討



一、彈簧底部暫時性停留探討

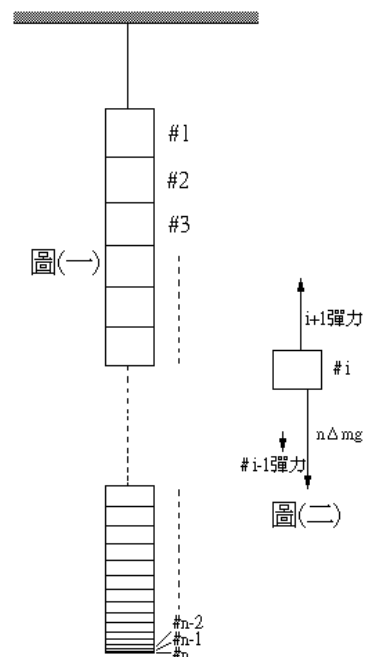
(一)將彈簧**水平放置時的原長**，分成 n 等分，每一等

分質量均為 $m = \frac{M}{n}$ ，當彈簧鉛直懸掛時，每一等分受本身即下方彈簧重量影響而伸長，因下方彈簧重量由上而下遞減，因此每一段彈簧總長也遞減。如右之模擬圖(一)所示。

(二)每一等分彈簧由上而下按順序編號#1、#2、#3...#n-2、#n-1、#n。

(三)每一等分彈簧受到**上方彈簧的彈力（或繩之張力）**、**下方彈簧的彈力**、**本身重量及下方彈簧的重量均呈靜力平衡狀態**，如圖(二)所示。

(四)當上方繩燒斷瞬間，#1 失去平衡而有一向下的合力 = #2 彈力 + $n \text{ mg}$ 。



(五)由實驗合成圖可發現，上方部分的彈簧未開始運動前，其下方部分的彈簧仍處於靜力平衡，按牛頓第一定律，靜止恆靜止。

(六)對底端部分#n 而言，這種暫時性的靜力平衡狀態持續到#n-1 開始運動才會被破壞，這說明何以底部會有暫時性的停留現象。

二、彈簧頂端開始落下至底部開始運動前，彈簧頂端落下的運動模式探討

彈簧頂端近似等速度落下的現象在實驗一的合成圖中是非常明顯的，但原先推測其為縱波的傳遞卻被推翻，因此我們重新模擬其運動機制，如下：

(一)如上頁圖(一)，當上方繩燒斷瞬間，#1 失去平衡而有一向下的合力 = #2 彈力 + (n - 1) mg = ma，使得#1 獲得一個向下的加速度 $a = \frac{\#2\text{彈力}}{m} + (n-1)g > g$ 。

(二)這向下的加速度 a，使得#1 在短時間獲得一極大的速度，#1 彈簧被壓縮形成一向上的彈力，同時#2 彈簧伸長量減小，#2 向下的彈力亦減少。

(三)如 2.之分析，對#1 而言，在短時間內各力會達到平衡狀態，#1 所受合力等於 0，#1 會以終端速度落下。

(四)對#2 而言，當#1 開始運動的時候，#1 的彈力減少，#2 緊跟著亦失去平衡而開始運動，當#1 以類似終端速度落下的同時，#2 也會達平衡狀態亦以類似終端速度落下。

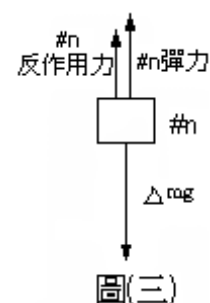
(五)依此運動模式，直到#n-1 開始運動，而底端仍為運動前，彈簧頂端落下過程為近似以終端速度作等速度運動。

(六)由 1.及 2.的分析亦可說明此終端速度大於頂端若作自由落體的平均速度，此終端速度亦大於彈簧縱波的速度。

三、底部開始運動之後，彈簧頂端部分瞬間速度有減緩現象的探討

(一)如二 - (三)、(四)之分析，當某段彈簧達平衡時，應有本身的反作用力、彈力(均向上)及其下方全部彈簧的重力、下方彈簧的彈力(均向下)。

(二)但對#n 而言，如圖(三)所示，其下方已無彈簧之彈力，同時整條彈簧因壓縮而造成彈簧本身每一圈的圓圈互相碰撞，形成一向上的反作用力，此力亦瞬間造成#n 的合力向上，瞬間有一向上的加速度，此加速度可以解釋，頂端部分瞬間速度會減慢的原因。



四、彈簧頂端減速的現象結束後，彈簧整體有伸長的現象探討

(一)彈簧頂端減速的現象結束後，彈簧長度小於原長，因此彈簧整體出現伸長的現象，當伸長之端點後又因彈簧長度大於原長而縮短，如同在做簡諧運動。

(二)彈簧整體又受重力作用而做自由落體運動。

(三)因此在彈簧頂端減速的現象結束後，彈簧整體除自由落下外，彈簧本身亦做簡諧運動。

陸、結論

- 一、彈簧頂端落下的過程中，彈簧底部出現暫時性靜止的現象。
- 二、彈簧頂端開始落下至彈簧底部開始運動前，彈簧頂端做等速度運動。
- 三、彈簧頂端落下之速度大於彈簧縱波波速，亦大於底部停留時間內彈簧頂端若做自由落體的平均速度。
- 四、彈簧頂端落下的運動非自由落體運動，亦非鉛直彈簧縱波的傳遞。
- 五、由實驗合成圖可發現，當上方部分的彈簧未開始運動前，下方部分的彈簧所受各力均未改變，下方部分的彈簧仍處於靜力平衡，按牛頓第一定律知，靜止恆靜止。
- 六、將彈簧水平原長分為 n 等分，當彈簧頂端開始落下後，各等分之彈簧將以近似終端速度，作等速度落下。
- 七、當頂端部分彈簧落至底端前，整條彈簧因壓縮而造成彈簧本身每一圈的圓圈互相碰撞，形成一向上的反作用力，瞬間有一向上的加速度，此加速度可以解釋，頂端部分瞬間速度會減慢的原因。

柒、實驗心得與未來展望

實驗剛開始時，我們只抱著試試看的心態，但漸漸的我們有了些許的發現，感覺似乎可以做出點什麼，尤其在合成圖出現後，從合成圖中觀察彈簧落下的運動過程，發現底部確實是靜止的，還發現頂端為近似等速度落下，便開始推測彈簧落下過程與彈簧本質間的關係，還大膽假設頂端落下為縱波的傳遞；雖然結果不如預期順利，彈簧頂端落下過程並非縱波的傳遞，底部停留時間與彈簧本質間的關係也因彈簧品質問題而找不出明顯關係。若有機會得到符合我們需求且品質不錯的彈簧，很希望可以再針對彈簧底部停留時間與彈簧本質間的關係再作一次實驗。

捌、參考資料及其他

參考書籍							
編號	作者	書名	版次	出版地	出版社	頁數	出版年
1	韋裕霖、方壯剛 等	階梯高二物質科學物理篇上	第二版	台南市	明霖文教出版社	74~75 128~135	九十三年
2	韋裕霖、方壯剛 等	階梯高二物質科學物理篇下	第二版	台南市	明霖文教出版社	24~32	九十三年
3	連坤德 等	高級中學基礎物理(全)	第四版	台南市	翰林出版社	104~109	九十一年
4	張桐生(譯者)	大學物理(上冊)	第五版	台北市	台灣中華書局	242~256 491~497	六十五年
5	鄭振華(校訂)	物理學概論	初版	台北市	正中書局	235~237	六十四年

參考網站		
編號	網站名稱	網址
6	物理問題 討論區	http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/index.php

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 物理科

第三名

040102

消失的地心引力

臺北縣私立辭修高級中學

評語：

從教材生活中尋找題材在實驗中細心觀察實屬可貴，實驗結果因質心參考點的設定並沒有良好的規畫導致無法作有效的推論十分可惜。使用 DV 拍攝影片時需清楚拍攝時的快門(並非 1/30 秒)。