

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

探究精神獎

080111

魔法懸浮-若隱若「線」

學校名稱： 國立臺中教育大學附設實驗國民小學

作者： 小五 林思妤 小五 劉妍希 小五 蘇筠芸	指導老師： 蔡慶達
---	------------------

關鍵詞： 張拉整體、彈簧、電磁鐵

摘要

張拉整體結構是透過繩索等提供張力，讓堅固的結構在看似無支撐的狀態下維持懸浮與平衡，實驗中透過在尼龍繩上裝設彈簧，觀察平衡時張力大小，以及外力或移動中心支撐繩位置對於平衡和張力的影響，並嘗試將中心繩換成電磁吸盤，觀察維持平衡所需的電壓範圍。由實驗結果得知：1.平衡時每條繩子的張力大小，會受到結構重量以及質心位置影響；2.從側邊額外施力時結構會傾斜，以曲柄所在的側邊施力影響最小，平衡最穩定；3.移動中心繩會使支點改變，使中心繩靠近的繩子張力變大，整體結構傾斜；4.以電磁吸盤當中心繩時，提供足夠電壓(6V 以上)可維持平衡；以上實驗結果可以做為張拉結構的繩索材質、結構設計以及可承受外力的參考。

壹、前言

一、研究動機

「張拉整體結構(Tensegrity)」是指透過繩線間的「張力」，使兩個獨立物體，結合形成一個維持穩定且平衡的「整體結構」。張拉整體結構即使沒有堅固的支撐結構，也不會受重力影響而導致翻轉或垂墜，甚至部份結構能看似懸浮於半空中。網路上有許多不同種類張拉整體結構的作品，也有很多應用類似原理於生活常用物品的實例，例如桌面看似懸浮空中的神奇浮力桌，桌面可以放重物，或可直接讓人坐在上面，令人覺得很神奇，進而想要多瞭解張拉整體結構。為了瞭解其中的力學原理與奧秘，希望經由研究與實驗，嘗試改造張拉整體結構的力學元件，進而應用到日常生活的其他層面，使科學原理融入生活中。

二、研究目的

- (一) 了解張拉結構平衡狀態下繩子拉力與力矩平衡的關係。
- (二) 探究側邊外力對張拉整體結構的影響。
- (三) 探究中心繩的位置對張拉整體結構的影響。
- (四) 探究電磁鐵改造張拉結構整體的可能性。

三、文獻回顧

(一) 張拉結構

張拉結構(或張拉整體結構)為 1960 年代由建築師巴克敏斯特·富勒發明，是透過繩子或鎖鏈與較為堅固的部件組合而成的結構，透過繩索張力的支撐，使部件之間雖然沒有接觸與支撐，還是可以維持懸浮的平衡狀態，並且擁有一定的知成能力。可能被用於在一些藝術品、生活用品或是建築物中。

(二) 張力

張力為當繩索、線或是彈簧等較有延展性或彈性的物體，受到外力拉扯時所產生的力，可以代表這條繩子等物體所受到的施力，而隨著外加的拉力越大，張力也會跟著上升，直到該物體因為無法支撐而斷裂為止。

(三) 彈性係數

拉伸彈簧在受到外力拉扯時，會使得伸長量增加，彈簧長度變長，而這個外力大小與伸長量的關係，就時彈性係數；在沒有超過彈簧負荷導致彈性疲乏的情況下，可以透過彈性係數，來計算不同伸長量所代表的拉力大小。

(四) 電磁鐵

電磁鐵主要是將導線以線圈的方式，纏繞在鐵等磁性物質上的裝置，當導線通電時，會由於電流的磁效應而產生磁場，進而產生磁力，在結構不變的情況下，電磁鐵的磁場與磁力大小會受到電壓大小、電流大小、吸引物質的性質以及距離等影響，電壓與電流越大，物質表面越平滑以及距離越進時，磁力越強，反之則磁力越弱。

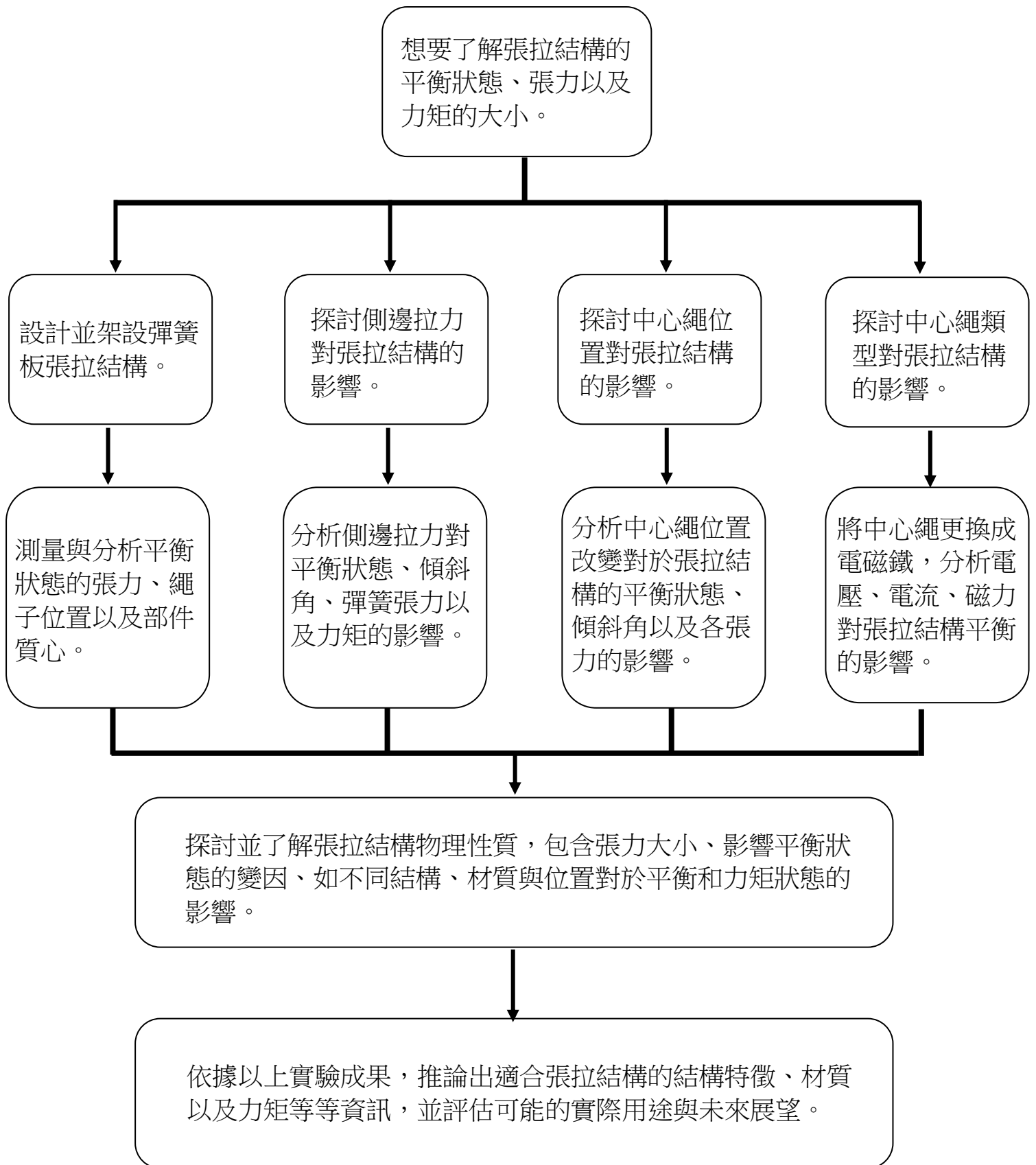
貳、研究設備與器材

(皆由指導老師拍攝)

			
1. 木製張拉結構	2. 彈簧	3. 尼龍繩	4. 黏著劑
			
5. 滑輪用機器人積木	6. 游標尺	7. 直尺	8. 量角器
			
9. 角度測量板	10. 螺帽	11. 電子秤	12. 彈簧秤
			
13. 水平儀	14. SH-ET2015-12 電磁吸盤	15. 直流電源供應器	

參、研究過程與方法

一、研究架構



二、實驗過程與方法

實驗一：製作彈簧版張拉結構與計算各繩拉力

(一) 實驗發想：將能測量拉力的彈簧裝設在張拉結構的繩子上，以測量張力。

(二) 實驗器材

張拉整體結構木條組件一組、黏著劑一條，彈簧數條、尼龍繩數條、直尺數把、彈簧秤一個。

(三) 實驗步驟

1. 製作張拉結構部件。

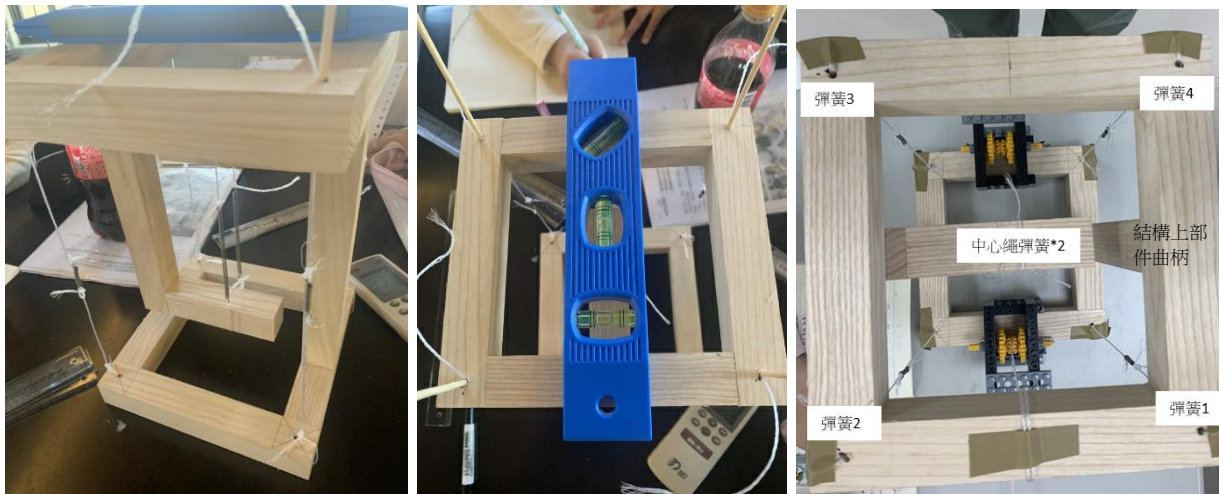
訂製粗細為 2.7cm*2.7cm 的木條 12 根，其中包含長度 18 公分 4 根、13.5 公分 4 根、20 公分 2 根以及 10 公分 2 根，以木工膠黏貼組裝成上下兩部件，並於方框 4 個角落距離邊緣 1.5 公分處鑽孔，作為繩子固定用；將上下部件分別秤重。

2. 測量彈簧受拉力與伸長量，推導出彈性係數公式。

將彈簧分別裁切為 3.57 公分 2 條以及 1.5 公分 4 條，並以尼龍繩固定一端，另一端綁在彈簧秤上，並以水平的方式拉動彈簧秤，紀錄拉力 200 克、400 克、600 克的伸長量，並透過 Excel 分析彈性係數。

3. 測量與分析張拉結構平衡時各彈簧張力。

將彈簧以尼龍繩綁好後，把張拉結構架設起來，並以水平儀測量確認水平，而後測量並記錄各彈簧的張力；架設完成的張拉結構如圖一與圖二，給予各彈簧編號如圖三。



圖一至圖三、拉張結構架設圖與彈簧編號 (由指導老師拍攝與後製)

4. 分析張拉結構上部件的質心位置。

使用四角彈簧與彈簧秤材測量上部件的質心位置，分別測量質心於水平面與垂直面的位置，並將結果組合起來繪製包含質心位置的張拉結構 3D 模型。

質心水平面位置測量：將張拉結構水平倒置使上部件懸空，保持下部件水平，觀察四個彈簧的伸長量並計算四個角質量分別的支撐力大小，並於紙上依照支撐力的比例繪圖，分析可能的質心位置。

質心垂直面位置測量：將兩條尼龍繩分別固定在上部件方框頂部以及曲柄的底部，並掛上彈簧秤將其拉起，紀錄彈簧秤讀數並計算垂直面上質心的位置。

實驗二：外加施力對於張拉結構與繩子拉力的影響

(一) 實驗發想：對張拉結構單邊施加外力，觀察拉力與傾斜角度的變化。

(二) 實驗器材

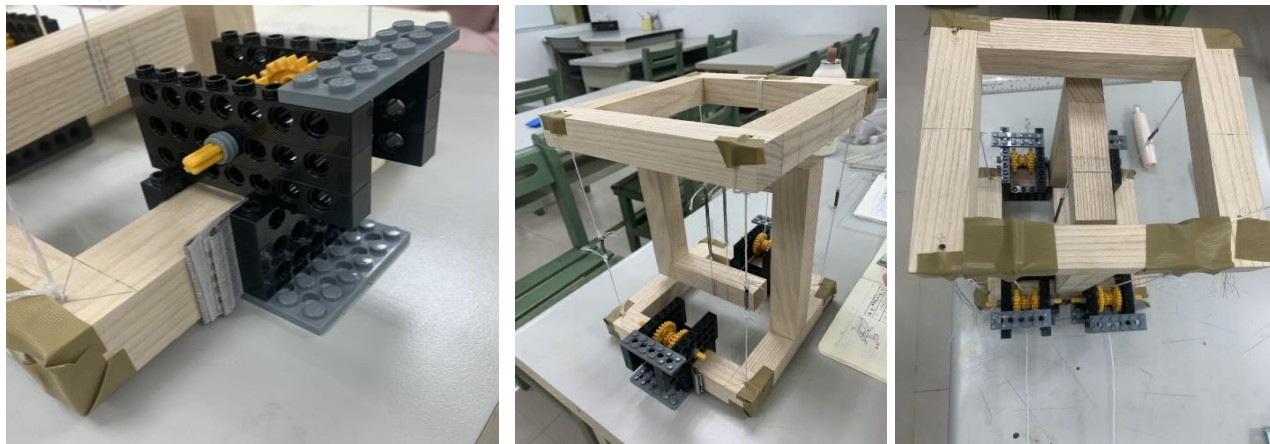
彈簧版張拉結構一組、彈簧秤二個、尼龍繩一捲、滑輪用機器人積木四組、角度測量紙

數張、測量用直立板一塊、直尺數把。

(三) 實驗步驟

1. 在張拉結構上部件的方框各邊，於長度二分之一或長度四分之一、四分之三處標記記號，作為側邊拉力的繫繩處。(如該邊不會受到曲柄影響，則繫繩於長度二分之一處，如會受到曲柄影響，則分別繫繩於長度四分之一與四分之三處)

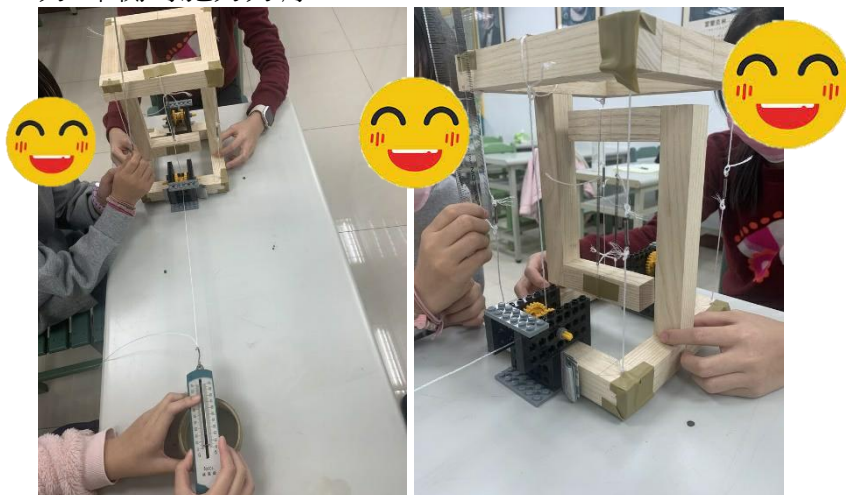
2. 以機器人積木零件組成滑輪結構，將施力方向改變為橫向拉力，比較能穩定進行實驗，滑輪結構與架設方式如圖四至六。



圖四至圖六、滑輪裝置與架設方式。(由指導老師拍攝)

3. 將張拉結構架設至水平平衡，之後將尼龍繩繫在標記處，另一端套上彈簧秤，每次測量一邊，重複三次；用手拉動彈簧秤至總讀數 25g、50g、75g、100g 的拉力，測量每個彈簧的伸長量與結構傾斜角，並以錄影輔助紀錄實驗結果，分析各靜力與力矩變化；測量方式如圖七、圖八，而力矩分析以中心繩所在的位置為支點，並考慮傾斜角度，計算總張力、張力變化與平衡時的淨力矩變化。

總力矩變化計算方式為： $\text{非拉力端總張力} \times \text{非拉力端力臂} - \text{拉力端總張力} \times \text{拉力端力臂} - \text{額外施力} \times \text{平衡時施力力臂}$ 。



圖七至圖八、單側拉力施作與張力測量方式。(由指導老師拍攝)



圖九、以角度測量紙與直立測量板紀錄傾斜角。(由指導老師拍攝)

實驗三：中心繩位置對張拉結構平衡的影響。

(一) 實驗發想：向兩側移動中心繩的位置，來觀察對於平衡與張力的影響。

(二) 實驗器材

彈簧版張拉結構一組、角度測量紙數張、測量用直立板一塊、直尺數把、鉛筆。

(三) 實驗步驟

1. 以木製結構安裝中心繩的位置為中心，向兩側每隔一公分做一個記號，做為中心繩調整的測試點。
2. 將拉張結構以帶有彈簧的尼龍繩架設為水平平衡的狀態。
3. 將平衡後的拉張結構的中心繩自原本安裝的位置，改變至步驟一中所標記的測試點，觀察並記錄各條繩子彈簧拉力與結構傾斜狀態的變化。

實驗四：以電磁吸盤作為張拉結構中心繩的可行性

(一) 實驗發想：將可吸附金屬的電磁吸盤架設在中心繩的位置，試著將張拉結構架設起來，並觀察電壓變化的影響。

(二) 實驗器材

張拉結構一組、尼龍繩一卷、直流電源供應器一台、高斯計一台、SH-ET2015-12 電磁吸盤一顆、螺帽一顆，尺數把。

(三) 實驗步驟

1. 將電磁吸盤連接直流電源供應器，啟動後慢慢調降電壓，使用高斯計記錄磁力變化。
2. 將螺帽秤重後與尼龍繩相連，並掛在彈簧秤掛鉤上，並電磁吸盤接上電源，打開調整至電壓 12 伏特，並將螺帽吸在電磁吸盤上，調整電壓同時緩慢拉動彈簧秤，測試各電壓下吸盤的磁吸力變化。
3. 將中心繩卸下，改以束帶安裝 12V 電磁吸盤(1kg)於下部件的曲柄上。
4. 將螺帽以尼龍繩綁住，並綁在上部件的曲柄上，作為新中心繩使用。
5. 將直流電電源連結電磁鐵並啟動，先將電壓調整至 12V，並將螺帽吸附在電磁吸盤上，並觀察張拉結構是否能維持平衡。
6. 透過改變電流或電壓，觀察電磁鐵吸力的變化，對於拉張結構的平衡狀態以及其他繩子上的彈簧拉力的影響，並將其記錄下來。

肆、研究結果

一、實驗一結果與分析：製作彈簧版張拉結構與計算各繩拉力 (一)製作張拉結構部件



圖十至圖十三、透過測量、標記連結的位置與利用黏著劑，將裁切好的木條組裝成新的拉張結構兩個部件。(由指導老師拍攝)

表一、拉張結構各部件重量測量結果(由第一作者製作)

	張拉結構部件(1)	張拉結構部件(2)
重量	466 g	469 g
備註	因部件(1)重量較輕，故選用(1)作為張拉結構的上部件，(2)作為下部件。	

(二)測量彈簧受拉力與伸長量，推導出彈性係數公式。

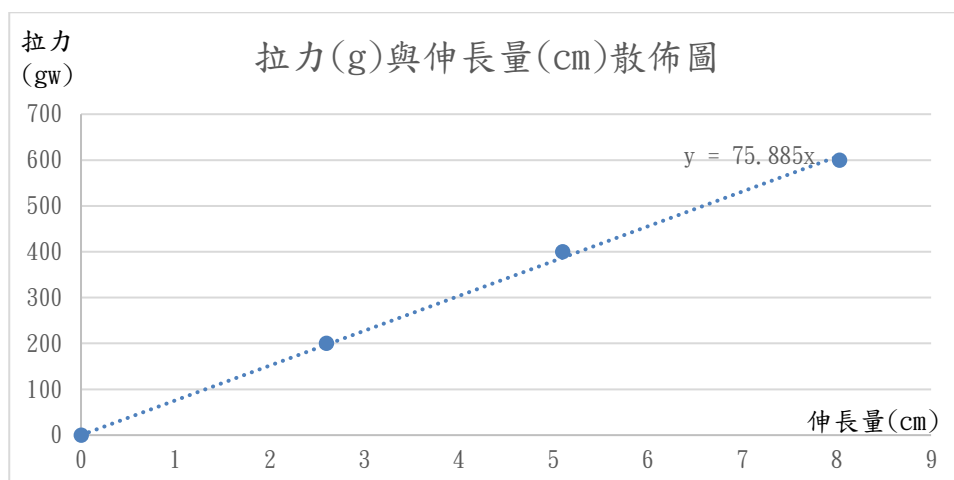
1.中心繩彈簧 (3.57 公分)

表二、不同拉力下彈簧的長度。(由第一作者製作)

	200 g	400 g	600 g
第一次長度 (cm)	6.1	8.7	11.7
第二次長度 (cm)	6.2	8.6	11.5
第三次長度 (cm)	6.2	8.7	11.6

表三、不同拉力下彈簧的伸長量。(由第一作者製作)

	200 g	400 g	600 g
第一次伸長量 (cm)	2.53	5.13	8.13
第二次伸長量 (cm)	2.63	5.03	7.93
第三次伸長量 (cm)	2.63	5.13	8.03
平均伸長量 (cm)	2.60	5.10	8.03



圖十四、中心繩用彈簧拉力與伸長量的散佈圖與彈性係數。(由指導老師繪製)
透過分析可得知，中心繩彈簧的彈性係數為 75.885 g/cm。

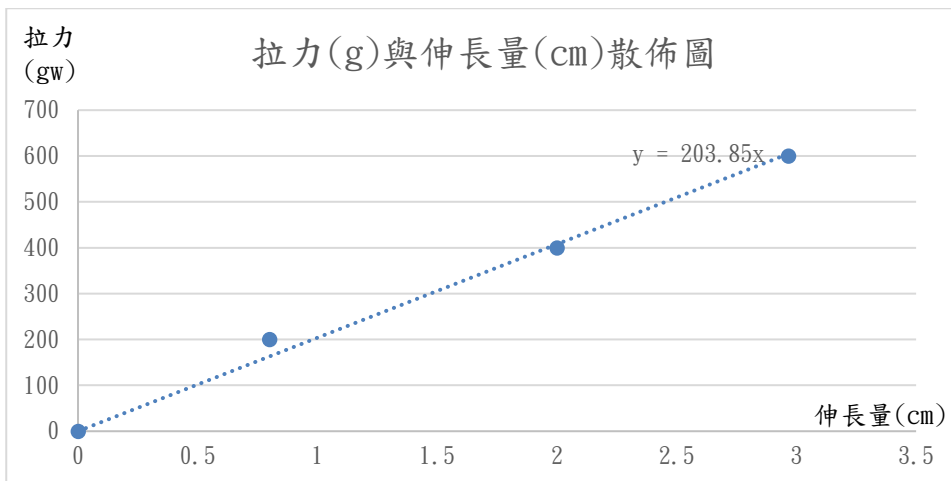
2.四角彈簧 (1.5 公分)

表四、不同拉力下彈簧的長度。(由第二作者製作)

	200 g	400 g	600 g
第一次長度 (cm)	2.3	3.6	4.4
第二次長度 (cm)	2.3	3.4	4.6
第三次長度 (cm)	2.3	3.5	4.4

表五、不同拉力下彈簧的伸長量。(由第二作者製作)

	200 g	400 g	600 g
第一次伸長量 (cm)	0.8	2.1	2.9
第二次伸長量 (cm)	0.8	1.9	3.1
第三次伸長量 (cm)	0.8	2	2.9
平均伸長量 (cm)	0.8	2	2.97



圖十五、四角繩用彈簧拉力與伸長量的散佈圖與彈性係數。(由指導老師繪製)
透過分析可得知，四角彈簧的彈性係數為 203.85 g/cm。

(三)測量與分析張拉結構平衡時各彈簧張力。

- 1.張拉結構架設狀態：將張拉結構架設完成，並使用水平儀確認裝置是水平平衡，經確認得知中心繩彈簧位於結構的正中央。
- 2.張拉結構水平平衡後各彈簧伸長量與張力。

表六、張拉結構各彈簧長度、伸長量與張力。(由第二作者製作)

	中心繩(3.57cm)	中心繩(3.57cm)	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)
長度(cm)	7.80	7.80	1.70	1.80	1.90	1.60
伸長量 (cm)	4.23	4.23	0.20	0.30	0.40	0.10
張力 (g)	320.99	320.99	40.77	61.16	81.54	20.39

四角的彈簧的張力略有不同，可能是由於木頭部件質量不平均的影響，但位於曲柄兩側的兩組彈簧張力總和(彈簧 1+2、彈簧 3+4)皆為 101.93，代表置景時以中心繩為中心的支點，兩邊的總張力與總力矩應該相同。

(四)分析可能影響平衡或彈簧張力的因素。

- 1.張拉結構測量上部件質心。

表七、四角彈簧伸長量與個別張力(由第三作者製作)

	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)
長度(cm)	2.10	2.00	2.20	2.40
伸長量 (cm)	0.60	0.50	0.70	0.90
張力 (gw)	122.31	101.93	142.73	183.47

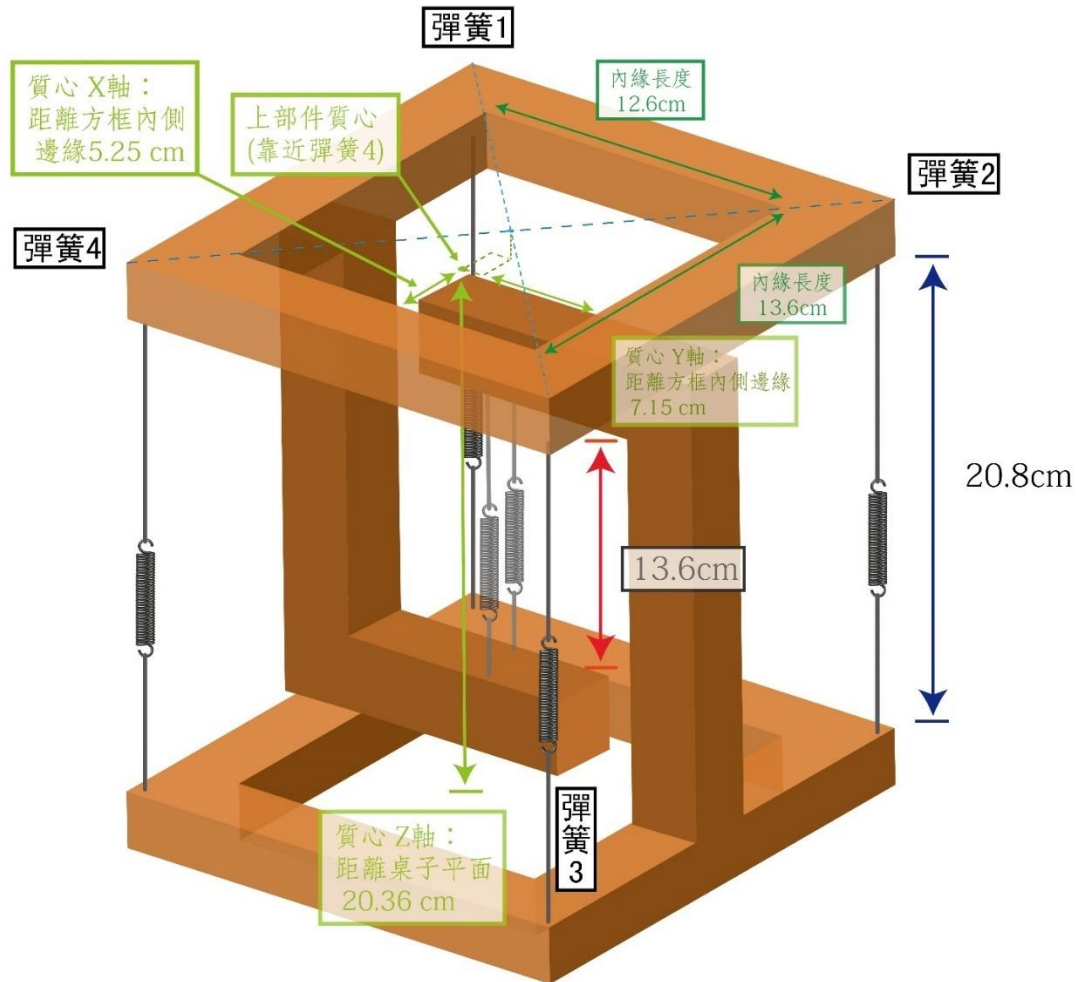
可以看出彈簧 4 伸長量與張力皆為最大，顯示質心較為接近彈簧 4。

表八、縱向質心彈簧秤測量數值(由第三作者製作)

	方框頂部彈簧秤	曲柄底部彈簧秤
重量 (gw)	358	108

可以看方框頂部彈簧秤所承受重量較曲柄底部大，顯示質心較為接近頂部方框。

2.上半部部件質心所在位置。



圖十六、張拉結構 3D 模型與上半部質心的可能位置。(由指導老師繪製)

依照分析結果可得知，上半部質心略靠近彈簧四，所以在正常架設時彈簧四的伸長量與拉力為最少。

二、實驗二結果與分析：外加施力對於張拉結構與繩子拉力的影響

(一)拉力於彈簧 1 與彈簧 2 之間。

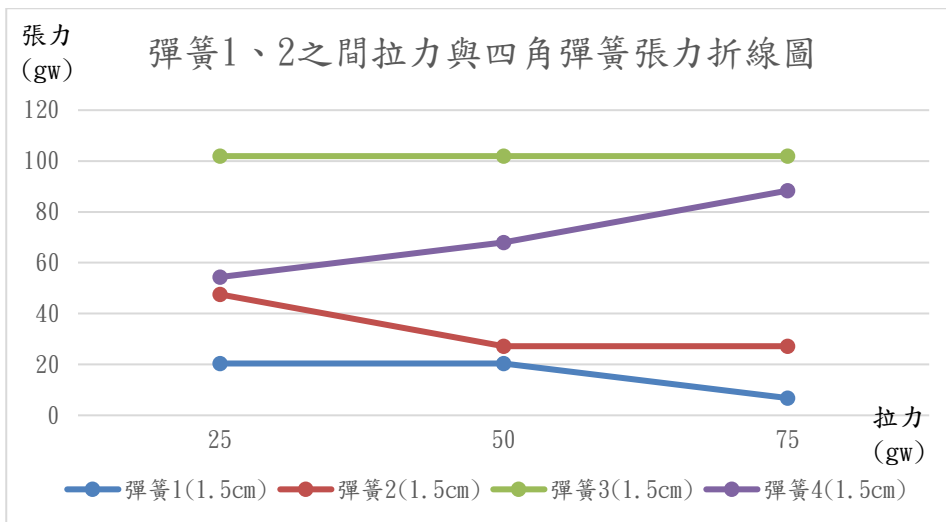
表九、不同拉力時各彈簧長度與傾斜角(長度單位：公分)。(由第三作者製作)

拉力	中心繩 (3.57cm)		中心繩 (3.57cm)		彈簧 1 (1.5cm)		彈簧 2 (1.5cm)		彈簧 3 (1.5cm)		彈簧 4 (1.5cm)		角度
	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	
25g	7.60	4.03	8.10	4.53	1.60	0.10	1.70	0.20	2.00	0.50	1.70	0.20	3.8°
25g	7.70	4.13	8.00	4.43	1.60	0.10	1.80	0.30	2.00	0.50	1.80	0.30	
25g	7.60	4.03	7.90	4.33	1.60	0.10	1.70	0.20	2.00	0.50	1.80	0.30	
50g	7.20	3.63	8.00	4.43	1.60	0.10	1.70	0.20	2.00	0.50	1.80	0.30	4.0°
50g	7.50	3.93	8.00	4.43	1.60	0.10	1.60	0.10	2.00	0.50	1.90	0.40	
50g	7.80	4.23	8.00	4.43	1.60	0.10	1.60	0.10	2.00	0.50	1.80	0.30	
75g	8.00	4.43	8.00	4.43	1.60	0.10	1.70	0.20	2.00	0.50	1.80	0.30	4.2°
75g	8.10	4.53	8.00	4.43	1.50	0.00	1.60	0.10	2.00	0.50	1.90	0.40	
75g	8.00	4.43	7.90	4.33	1.50	0.00	1.60	0.10	2.00	0.50	2.10	0.60	
100g													8°

由於拉至 100 克後十分容易翻覆，無法用穩定測量彈簧伸長量、傾斜角及計算力矩，只能透過 ImageJ 協助協助測量實驗影片，估測傾斜角大約是 8 度。

表十、不同拉力各彈簧張力(單位：g)。(由第一作者製作)

拉力	中心繩 (3.57cm)	中心繩 (3.57cm)	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)
25g	305.82	343.76	20.39	40.77	101.93	40.77
25g	313.41	336.17	20.39	61.16	101.93	61.16
25g	305.82	328.58	20.39	40.77	101.93	61.16
25g 平均	308.35	336.17	20.39	47.57	101.93	54.36
50g	275.46	336.17	20.39	40.77	101.93	61.16
50g	298.23	336.17	20.39	20.39	101.93	81.54
50g	320.99	336.17	20.39	20.39	101.93	61.16
50g 平均	298.23	336.17	20.39	27.18	101.93	67.95
75g	336.17	336.17	20.39	40.77	101.93	61.16
75g	343.76	336.17	0.00	20.39	101.93	81.54
75g	336.17	328.58	0.00	20.39	101.93	122.31
75g 平均	338.70	333.64	6.80	27.18	101.93	88.34



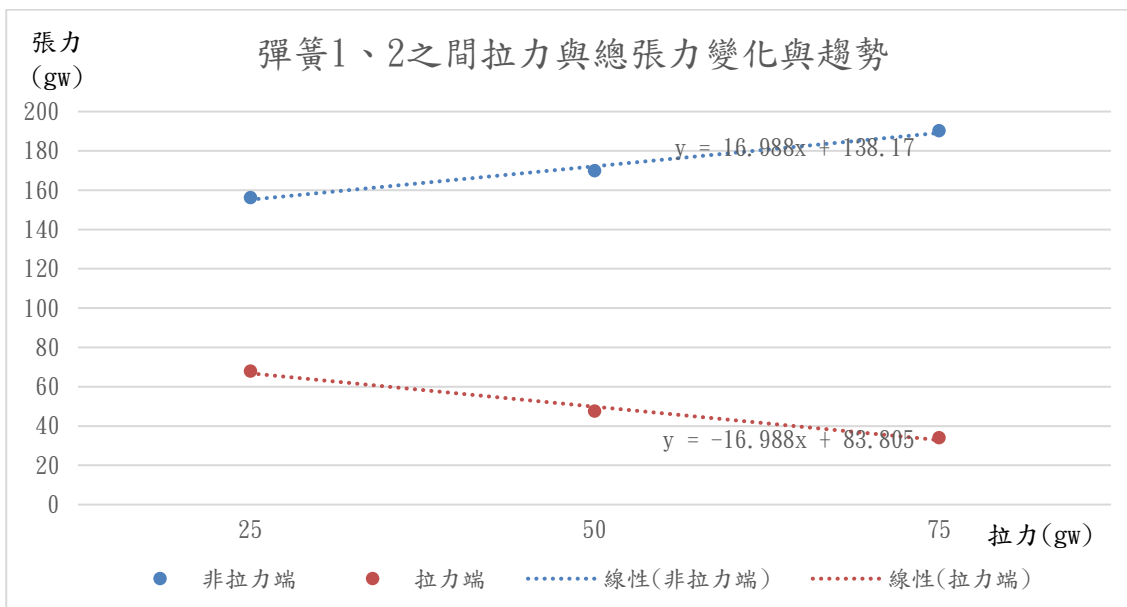
圖十七、拉力與四角彈簧張力變化(由指導老師繪製)

由圖十七可以看出，彈簧 1 與 2 的張力隨額外拉力增加而減少，彈簧 3 的張力雖比水平平衡時大，但額外拉力增加時沒有變化，而彈簧 4 變化幅度最大。

表十一、四角彈簧的拉力與靜力矩變化量(由第一作者製作)

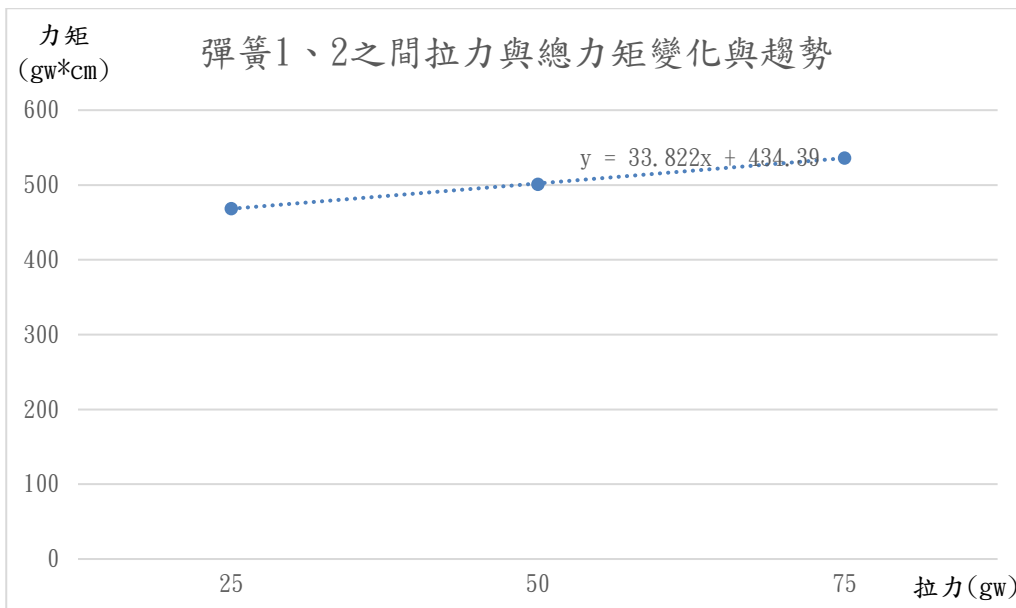
拉力	非拉力端總張力	拉力端總張力	非拉力端總張力變化	拉力端總張力變化	總力矩變化
25g 平均	156.29	67.95	54.36	-33.98	468.65
50g 平均	169.88	47.57	67.95	-54.36	501.15
75g 平均	190.26	33.98	88.34	-67.95	536.29

總力矩的變化遠大於 0，代表以總力矩的方式分析，非拉力端的張力產生的力矩會大於拉力端張力和拉力產生的總力矩。



圖十八、彈簧 1、2 之間拉力與總張力變化與趨勢(由指導老師繪製)

由圖十八可以看出非拉力端(彈簧 3、4)的張力總和隨著拉力增加逐漸上升，拉力端(彈簧 1、2)則是逐漸下降，且兩者的趨勢線的斜率絕對值相同，皆為 16.988，代表隨著拉力增加，非拉力端與拉力端彈簧總張力的變化程度是相近的。



圖十九、彈簧 1、2 之間拉力與總力矩變化與趨勢。(由指導老師繪製)

隨著拉力的增加，如果只考慮彈簧張力提供的總力矩，會發現雖然維持平衡，但以中心繩為支點的總力矩並不為 0，而且逐漸增加。

(二)拉力於彈簧 3 與彈簧 4 之間。

表十二、不同拉力時各彈簧長度與傾斜角(長度單位：公分)。(由第一作者製作)

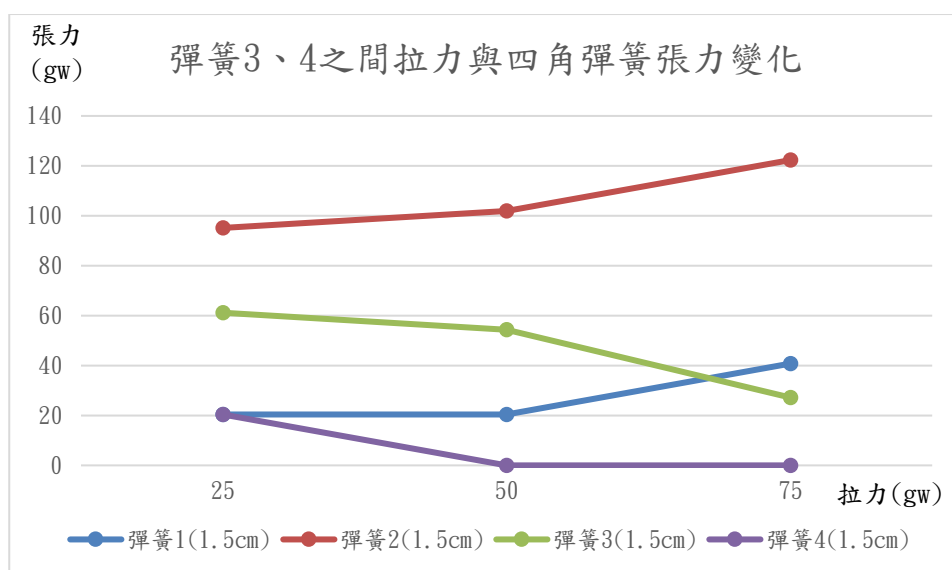
拉力	中心繩(3.57cm)		中心繩(3.57cm)		彈簧 1(1.5cm)		彈簧 2(1.5cm)		彈簧 3(1.5cm)		彈簧 4(1.5cm)		角度
	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	
25g	7.90	4.33	7.50	3.93	1.60	0.10	2.00	0.50	1.80	0.30	1.60	0.10	0.0°
25g	8.00	4.43	7.70	4.13	1.60	0.10	1.90	0.40	1.80	0.30	1.60	0.10	
25g	7.90	4.33	7.60	4.03	1.60	0.10	2.00	0.50	1.80	0.30	1.60	0.10	
50g	8.00	4.43	8.00	4.43	1.60	0.10	2.00	0.50	1.70	0.20	1.50	0.00	1.5°
50g	8.10	4.53	7.90	4.33	1.60	0.10	2.00	0.50	1.80	0.30	1.50	0.00	
50g	8.10	4.53	8.00	4.43	1.60	0.10	2.00	0.50	1.80	0.30	1.50	0.00	
75g	8.20	4.63	8.10	4.53	1.70	0.20	2.10	0.60	1.70	0.20	1.50	0.00	4.0°
75g	8.00	4.43	8.10	4.53	1.70	0.20	2.10	0.60	1.60	0.10	1.50	0.00	
75g	8.10	4.53	8.00	4.43	1.70	0.20	2.10	0.60	1.60	0.10	1.50	0.00	
100g													9.5°

由於拉至 100 克後十分容易翻覆，無法用穩定測量彈簧伸長量、傾斜角及計算力矩，只能透過 ImageJ 協助協助測量實驗影片，估測傾斜角大約是 9.5 度。

表十三、不同拉力各彈簧張力(單位：g)。(由第一作者製作)

拉力	中心繩(3.57cm)	中心繩(3.57cm)	彈簧 1(1.5cm)	彈簧 2(1.5cm)	彈簧 3(1.5cm)	彈簧 4(1.5cm)
25g	328.58	298.23	20.39	101.93	61.16	20.39

25g	336.17	313.41	20.39	81.54	61.16	20.39
25g	328.58	305.82	20.39	101.93	61.16	20.39
25g 平均	331.11	305.82	20.39	95.13	61.16	20.39
50g	336.17	336.17	20.39	101.93	40.77	0.00
50g	343.76	328.58	20.39	101.93	61.16	0.00
50g	343.76	336.17	20.39	101.93	61.16	0.00
50g 平均	341.23	333.64	20.39	101.93	54.36	0.00
75g	351.35	343.76	40.77	122.31	40.77	0.00
75g	336.17	343.76	40.77	122.31	20.39	0.00
75g	343.76	336.17	40.77	122.31	20.39	0.00
75g 平均	343.76	341.23	40.77	122.31	27.18	0.00



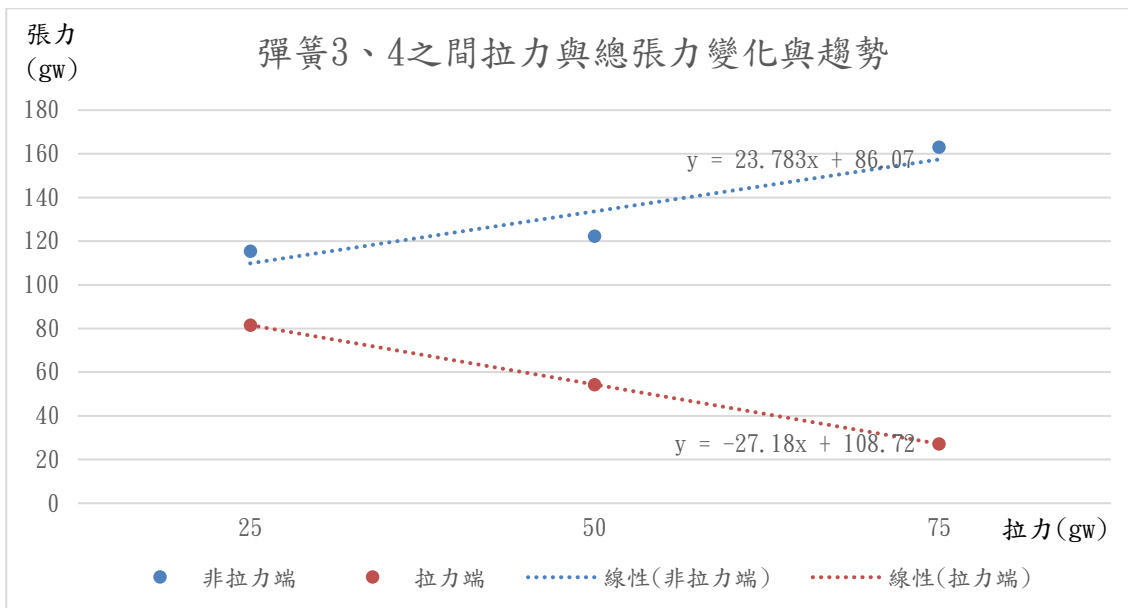
圖二十、拉力與四角彈簧張力變化(由指導老師繪製)

由圖二十可以看出，隨額外拉力增加，彈簧3與4的張力會減少，彈簧1與2的張力都是上升，且上升的幅度相似。

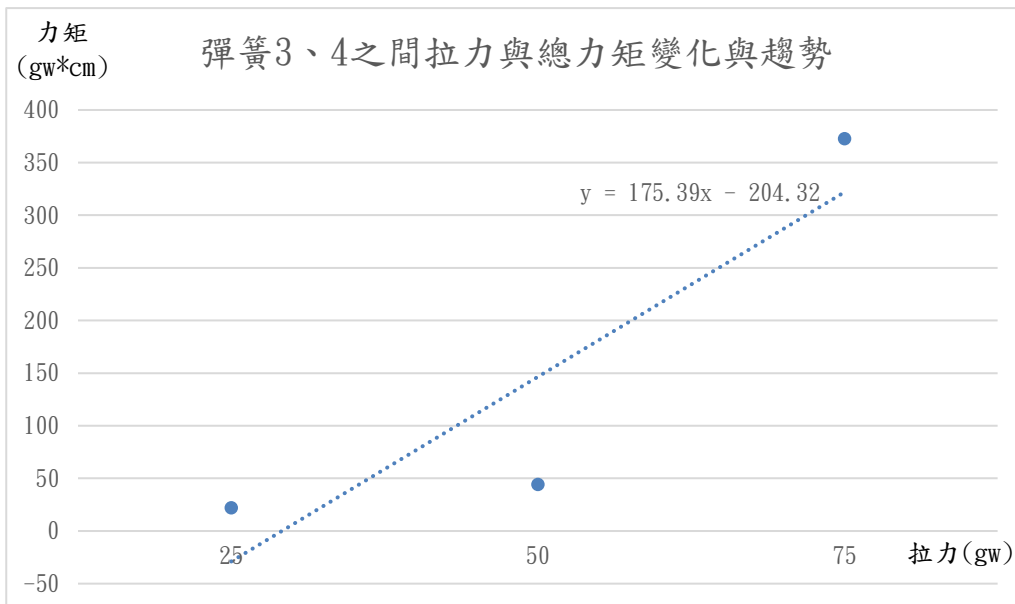
表十四、四角彈簧的拉力與靜力矩變化量(由第二作者製作)

拉力	非拉力端總張力	拉力端總張力	非拉力端總張力變化	拉力端總張力變化	總力矩變化
25g 平均	115.52	81.54	13.59	-20.39	22.18
50g 平均	122.31	54.36	20.39	-47.57	44.23
75g 平均	163.08	27.18	61.16	-74.75	372.96

拉力在彈簧3-4之間時，總力矩的變化也是大於0且逐間增加，其中75g的增加幅度是最明顯的。



圖二十一、彈簧 3、4 之間拉力與總張力變化與趨勢(由指導老師繪製)
隨著拉力的增加，拉力端的張力下降幅度，比非拉力端的張力上升幅度還要明顯一些。



圖二十二、彈簧 3、4 之間拉力與總力矩變化與趨勢。(由指導老師繪製)
隨著拉力的增加，以中心繩為支點的彈簧張力提供的總力矩並不為 0，但仍可以保持平衡沒有垮掉，不過比起拉力在彈簧 1、2 之間，張力的變化以及總力矩的變化更為明顯。

(三)拉力於彈簧 1 與彈簧 4 之間。

表十五、不同拉力時各彈簧長度與傾斜角(長度單位：公分)。(由第二作者製作)

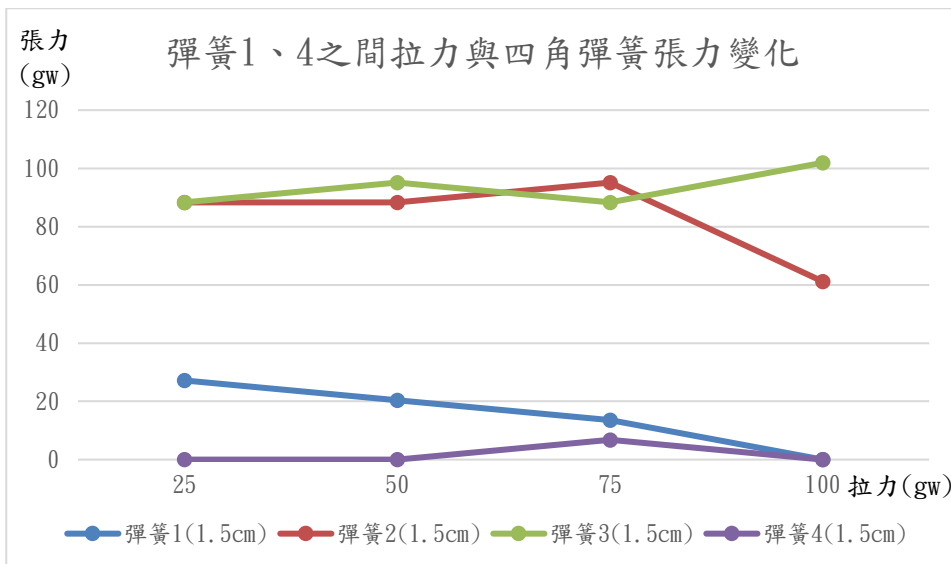
拉力	中心繩(3.57cm)		中心繩(3.57cm)		彈簧 1(1.5cm)		彈簧 2(1.5cm)		彈簧 3(1.5cm)		彈簧 4(1.5cm)		角度
	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	
25g	7.90	4.33	7.70	4.13	1.60	0.10	1.90	0.40	1.90	0.40	1.50	0.00	1.0°
25g	8.00	4.43	7.70	4.13	1.70	0.20	1.90	0.40	1.90	0.40	1.50	0.00	
25g	8.00	4.43	7.80	4.23	1.60	0.10	2.00	0.50	2.00	0.50	1.50	0.00	

50g	7.90	4.33	8.00	4.43	1.60	0.10	1.90	0.40	2.00	0.50	1.50	0.00	0.0°
50g	8.10	4.53	8.00	4.43	1.60	0.10	2.00	0.50	2.00	0.50	1.50	0.00	
50g	8.00	4.43	7.80	4.23	1.60	0.10	1.90	0.40	1.90	0.40	1.50	0.00	
													0.0°
75g	8.10	4.53	7.80	4.23	1.60	0.10	2.00	0.50	1.90	0.40	1.50	0.00	
75g	8.00	4.43	7.70	4.13	1.60	0.10	2.00	0.50	2.00	0.50	1.60	0.10	
75g	8.10	4.53	7.90	4.33	1.50	0.00	1.90	0.40	1.90	0.40	1.50	0.00	
													0.0°
100g	8.10	4.53	7.90	4.33	1.50	0.00	1.80	0.30	2.00	0.50	1.50	0.00	
100g	8.20	4.63	8.00	4.43	1.50	0.00	1.80	0.30	2.10	0.60	1.50	0.00	
100g	8.00	4.43	8.10	4.53	1.50	0.00	1.80	0.30	1.90	0.40	1.50	0.00	

拉力位於彈簧 1 與彈簧 4 之間時，張拉結構上部件的傾斜角很小，幾乎沒有傾斜。

表十六、不同拉力各彈簧張力(單位：g)。(由第三作者製作)

拉力	中心繩 (3.57cm)	中心繩 (3.57cm)	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)
25g	328.58	313.41	20.39	81.54	81.54	0.00
25g	336.17	313.41	40.77	81.54	81.54	0.00
25g	336.17	320.99	20.39	101.93	101.93	0.00
25g 平均	333.64	315.93	27.18	88.34	88.34	0.00
50g	328.58	336.17	20.39	81.54	101.93	0.00
50g	343.76	336.17	20.39	101.93	101.93	0.00
50g	336.17	320.99	20.39	81.54	81.54	0.00
50g 平均	336.17	331.11	20.39	88.34	95.13	0.00
75g	343.76	320.99	20.39	101.93	81.54	0.00
75g	336.17	313.41	20.39	101.93	101.93	20.39
75g	343.76	328.58	0.00	81.54	81.54	0.00
75g 平均	341.23	320.99	13.59	95.13	88.34	6.80
100g	343.76	328.58	0.00	61.16	101.93	0.00
100g	351.35	336.17	0.00	61.16	122.31	0.00
100g	336.17	343.76	0.00	61.16	81.54	0.00
100g 平均	343.76	336.17	0.00	61.16	101.93	0.00



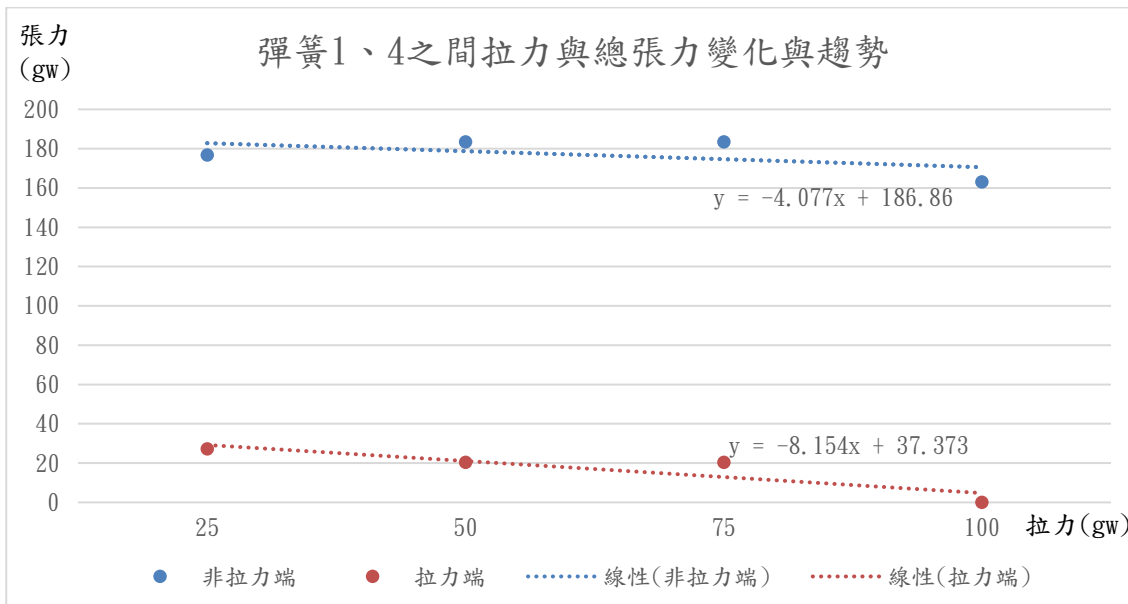
圖二十三、拉力與四角彈簧張力變化(由指導老師繪製)

由圖二十三可以看出，隨著額外拉力增加，各彈簧的變化幅度較小。

表十七、四角彈簧的拉力與靜力矩變化量(由第三作者製作)

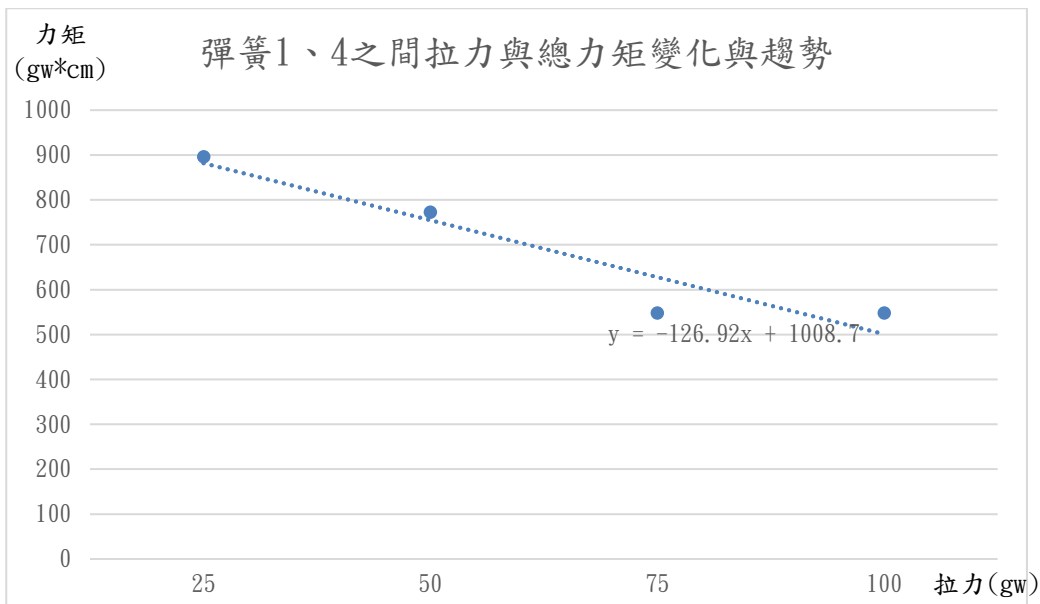
拉力	非拉力端總張力	拉力端總張力	非拉力端總張力變化	拉力端總張力變化	總力矩變化
25g 平均	176.67	27.18	33.98	-33.98	896.17
50g 平均	183.47	20.39	40.77	-40.77	773.10
75g 平均	183.47	20.39	40.77	-40.77	548.10
100g 平均	163.08	0.00	20.39	-61.16	548.10

以總力矩的方式分析總力矩的變化遠大於 0，代表非拉力端的張力產生的力矩會大於拉力端張力和拉力產生的力矩，不過與其他組不同的是，總力矩會隨著拉力增加而減少。



圖二十四、彈簧 1、4 之間拉力與總張力變化與趨勢。(由指導老師繪製)

由趨勢線可以得知，隨著拉力的增加，拉力端的張力與非拉力端的張力變化幅度大致相同。



圖二十五、彈簧 1、4 之間拉力與總力矩變化折線圖以及斜率。(由指導老師繪製)
由圖二十五可以看出，隨著拉力的增加，彈簧張力提供的總力矩會逐漸下降。

(四)拉力於彈簧 2 與彈簧 3 之間。

表十八、不同拉力時各彈簧長度與傾斜角(長度單位：公分)。(由第一作者製作)

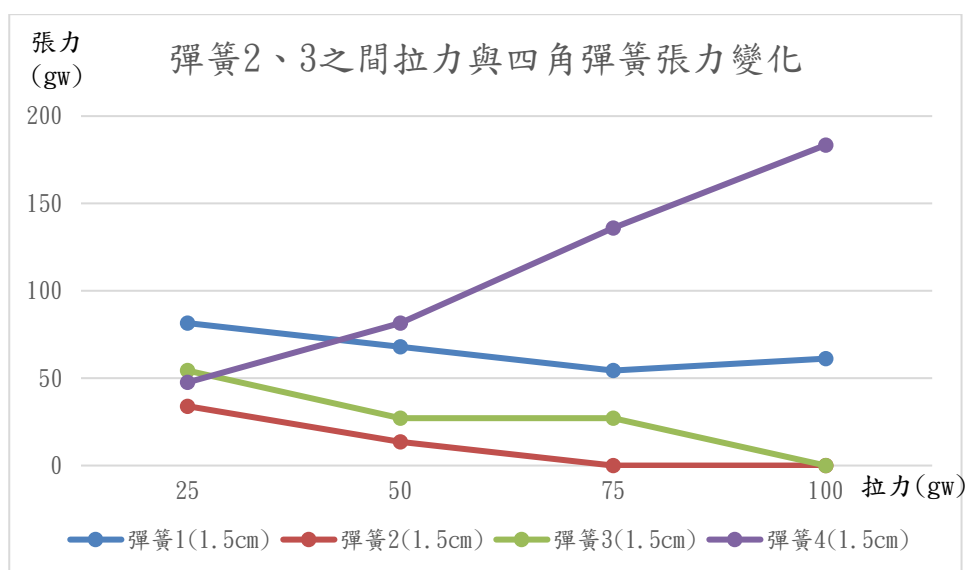
拉力	中心繩(3.57cm)		中心繩(3.57cm)		彈簧 1 (1.5cm)		彈簧 2 (1.5cm)		彈簧 3 (1.5cm)		彈簧 4 (1.5cm)		角度
	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	
25g	7.90	4.33	7.60	4.03	1.90	0.40	1.50	0.00	1.80	0.30	1.70	0.20	7.3°
25g	7.90	4.33	7.60	4.03	2.00	0.50	1.80	0.30	1.80	0.30	1.90	0.40	
25g	7.90	4.33	7.80	4.23	1.80	0.30	1.70	0.20	1.70	0.20	1.60	0.10	
50g	7.90	4.33	7.70	4.13	1.90	0.40	1.50	0.00	1.60	0.10	1.90	0.40	6.3°
50g	7.80	4.23	7.80	4.23	1.80	0.30	1.60	0.10	1.70	0.20	2.00	0.50	
50g	7.90	4.33	7.80	4.23	1.80	0.30	1.60	0.10	1.60	0.10	1.80	0.30	
75g	7.80	4.23	7.70	4.13	1.80	0.30	1.50	0.00	1.50	0.00	2.20	0.70	7.0°
75g	7.90	4.33	8.00	4.43	1.80	0.30	1.50	0.00	1.70	0.20	2.10	0.60	
75g	8.00	4.43	8.10	4.53	1.70	0.20	1.50	0.00	1.70	0.20	2.20	0.70	
100g	7.90	4.33	8.00	4.43	1.70	0.20	1.50	0.00	1.50	0.00	2.30	0.80	7.3°
100g	8.10	4.53	8.00	4.43	1.80	0.30	1.50	0.00	1.50	0.00	2.60	1.10	
100g	8.00	4.43	8.00	4.43	1.90	0.40	1.50	0.00	1.50	0.00	2.30	0.80	

由表十八中可以得知，雖然傾斜角與其他三組實驗方向的結果相比較大，但隨著拉力增加，傾斜角的變化比拉力在彈簧 1-2 之間與 3-4 之間還要穩定。

表十九、不同拉力各彈簧張力(單位：gw)。(由第一作者製作)

拉力	中心繩	中心繩	彈簧 1	彈簧 2	彈簧 3	彈簧 4
----	-----	-----	------	------	------	------

	(3.57cm)	(3.57cm)	(1.5cm)	(1.5cm)	(1.5cm)	(1.5cm)
25g	328.58	305.82	81.54	0.00	61.16	40.77
25g	328.58	305.82	101.93	61.16	61.16	81.54
25g	328.58	320.99	61.16	40.77	40.77	20.39
25g 平均	328.58	310.88	81.54	33.98	54.36	47.57
50g	328.58	313.41	81.54	0.00	20.39	81.54
50g	320.99	320.99	61.16	20.39	40.77	101.93
50g	328.58	320.99	61.16	20.39	20.39	61.16
50g 平均	326.05	318.46	67.95	13.59	27.18	81.54
75g	320.99	313.41	61.16	0.00	0.00	142.70
75g	328.58	336.17	61.16	0.00	40.77	122.31
75g	336.17	343.76	40.77	0.00	40.77	142.70
75g 平均	328.58	331.11	54.36	0.00	27.18	135.90
100g	328.58	336.17	40.77	0.00	0.00	163.08
100g	343.76	336.17	61.16	0.00	0.00	224.24
100g	336.17	336.17	81.54	0.00	0.00	163.08
100g 平均	336.17	336.17	61.16	0.00	0.00	183.47



圖二十六、拉力與四角彈簧張力變化(由指導老師繪製)

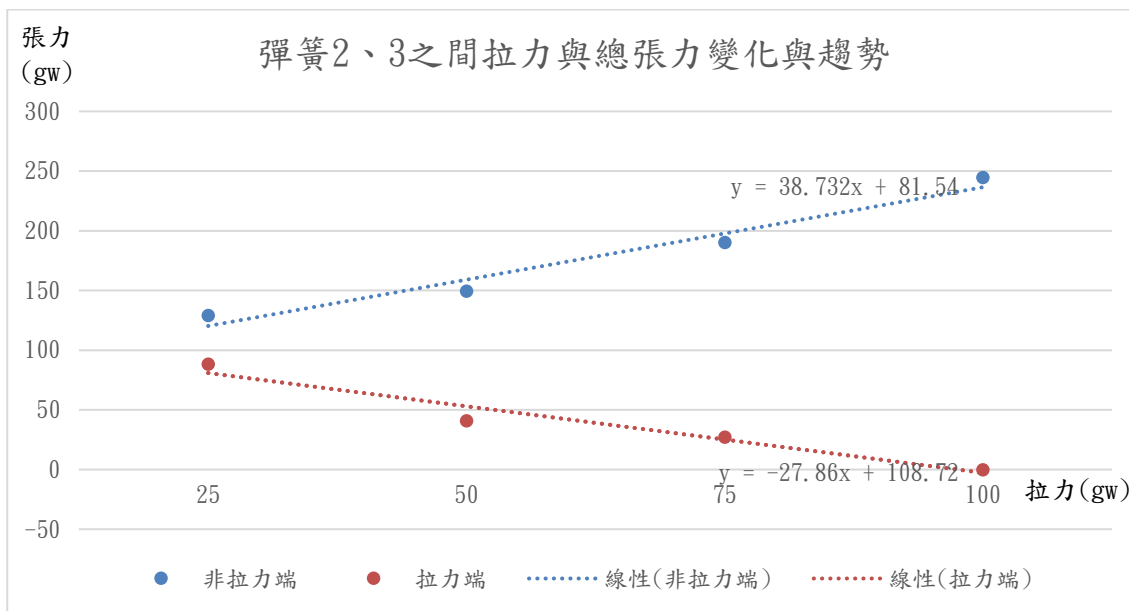
由圖二十六時可以得知，個別彈簧的張力只有彈簧四是增加的，其餘三個彈簧都是下降，可能跟質心位置比較靠近彈簧四有關係。

表二十、四角彈簧的拉力與靜力矩變化量(由第二作者製作)

拉力	非拉力端總張力	拉力端總張力	非拉力端總張力變化	拉力端總張力變化	總力矩變化
25g 平均	129.11	88.34	67.95	-54.36	80.77
50g 平均	149.49	40.77	88.34	-101.93	365.40
75g 平均	190.26	27.18	129.11	-115.52	548.10
100g 平均	244.62	0.00	183.47	-142.70	1159.65

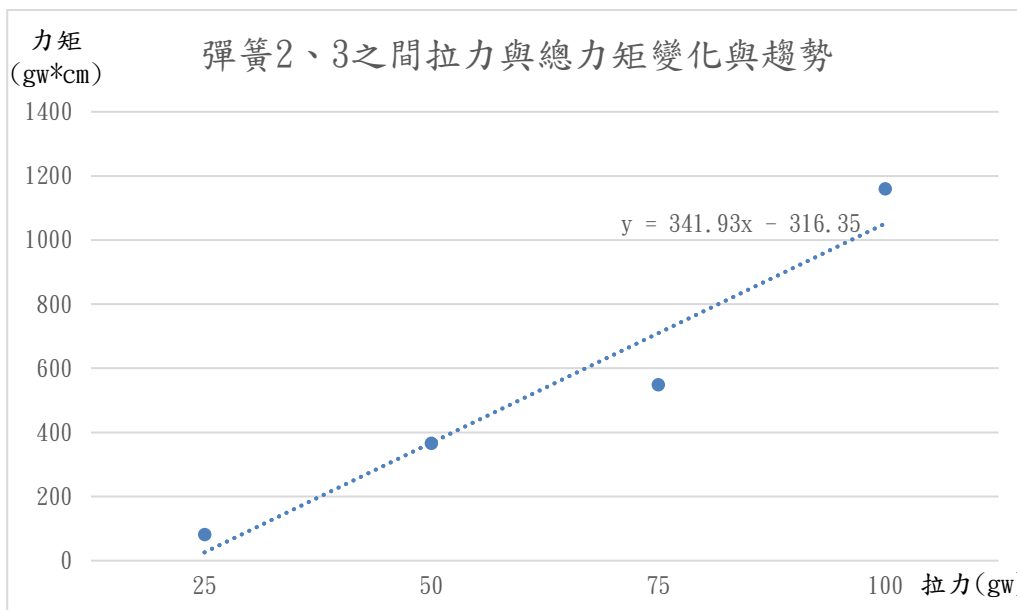
總力矩的變化遠大於0，代表以總力矩的方式分析，非拉力端的張力產生的力矩會大於拉力

端張力和拉力產生的總力矩。



圖二十七、彈簧 2、3 之間拉力與總張力變化與趨勢。(由指導老師繪製)

由趨勢線可以得知，隨著拉力的增加，拉力端的張力下降幅度，比非拉力端的張力上升幅度大致相同。



圖二十八、彈簧 2、3 之間拉力與總力矩變化與趨勢。(由指導老師繪製)

以總力矩變化可以得知隨著拉力的增加，以中心繩為支點的彈簧張力提供的總力矩也不為 0，且隨著額外壓力增加而逐漸上升，同時也是四組實驗中上升最明顯的一組。

三、實驗三結果與分析：中心繩位置對張拉結構平衡的影響。

由於中心繩彈簧無論移向或遠離上部件 3 公分開始，張拉結構已經很難維持平衡，中心繩也經常會滑動無法測量，所以以下最多記錄移動到兩公分的實驗結果。

表二十一、中心繩向上部件曲柄移動時傾斜角與彈簧變化。(由第三作者製作)

	中心繩 (3.57cm)	中心繩 (3.57cm)	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)

向曲柄移動	傾斜角	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量
1cm	小於 0.5°	7.80	4.23	7.80	4.23	1.90	0.40	1.60	0.10	1.60	0.10	1.90	0.40
1cm	1.5°	7.80	4.23	7.80	4.23	1.90	0.40	1.60	0.10	1.80	0.30	2.00	0.50
1cm	1.2°	8.10	4.53	8.00	4.43	1.90	0.40	1.60	0.10	1.80	0.30	2.00	0.50
平均量	小於 1.07°		4.33		4.30		0.40		0.10		0.23		0.47
2cm	13.80°	7.80	4.23	7.90	4.33	2.40	0.90	1.50	0.00	1.50	0.00	2.40	0.90
2cm	15.00°	7.90	4.33	8.10	4.53	2.00	0.50	1.50	0.00	1.50	0.00	1.90	0.40
2cm	17.00°	8.00	4.43	7.70	4.13	2.00	0.50	1.50	0.00	1.50	0.00	2.40	0.90
平均量	15.27°		4.33		4.33		0.63		0.00		0.00		0.73

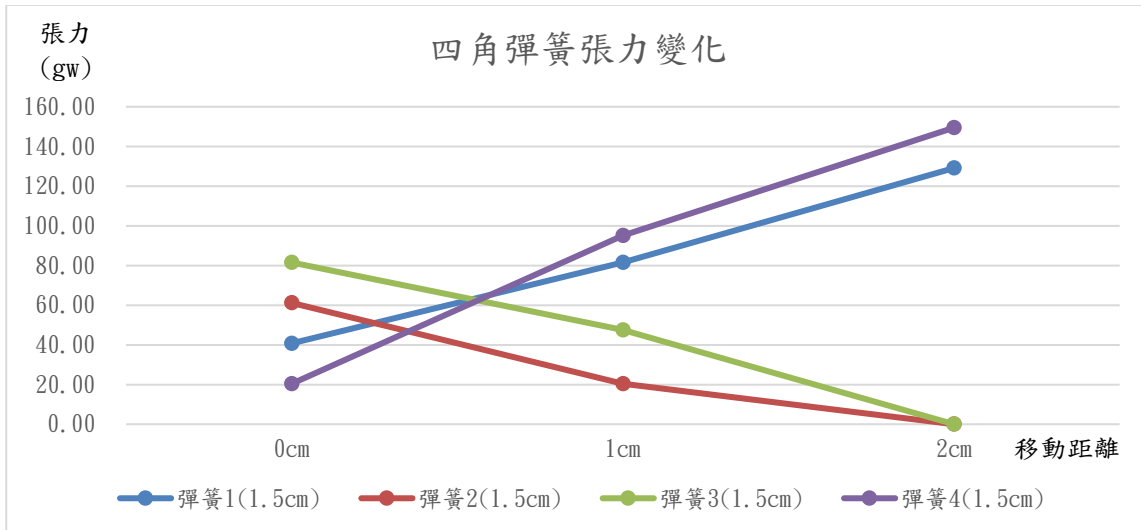
當中心繩向上部件曲柄移動時 1 公分，傾斜角較不明顯，但當移動兩公分則有非常明顯的傾斜角，且此時上部件的曲柄經常已經碰到下部件的曲柄，如圖三十一。



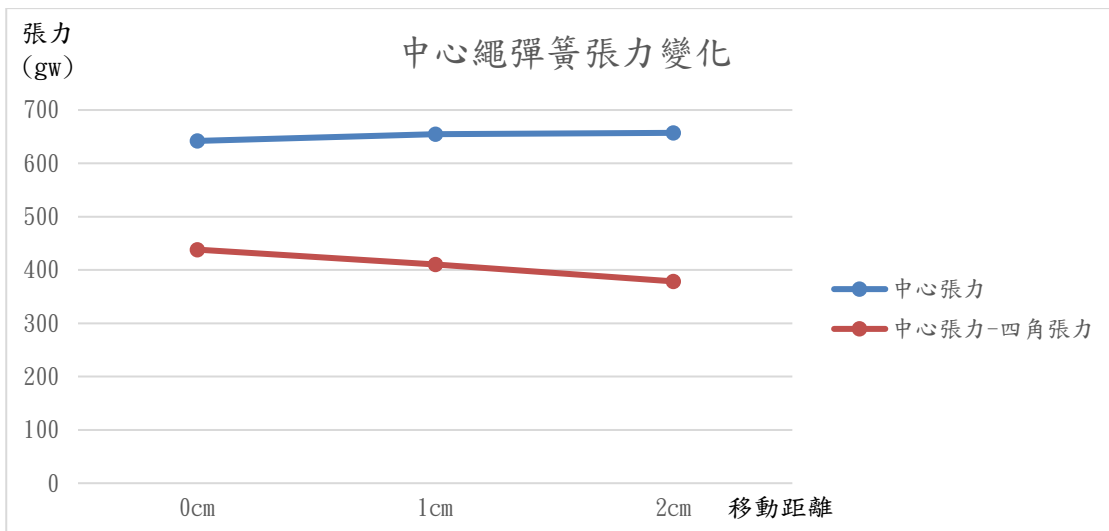
圖二十九、向曲柄移兩公分時的傾斜狀態。(由指導老師拍攝)

表二十二、中心繩向上部件曲柄移動時中心繩張力變化。(由第一作者製作)

向曲柄移動	中心繩 (3.57cm)	中心繩 (3.57cm)	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)
平均拉力 (0cm)	320.99	320.99	40.77	61.16	81.54	20.39
中心繩平均張力	641.98					
中心繩-四角彈簧	438.14					
平均拉力 (1cm)	328.58	326.05	81.54	20.39	47.57	95.13
中心繩平均張力	654.63					
中心繩-四角彈簧	410.01					
平均拉力 (2cm)	328.58	328.58	129.11	0.00	0.00	149.49
中心繩平均張力	657.16					
中心繩-四角彈簧	378.57					



圖三十、中心繩向上部件曲柄移動時各彈簧張力變化折線圖。(由指導老師繪製)



圖三十一、中心繩向上部件曲柄移動時中心彈簧張力變化折線圖。(由指導老師繪製)

由表三十至三十一可以得知，隨著往曲柄移動的距離越長，曲柄兩側的彈簧(彈簧一、四)張力越大，傾斜角也越大，而中心繩彈簧的總張力(表三十七的藍色折線)些微上升，但扣除掉四角彈簧後(圖三十七紅色折線)明顯下降，代表上部件有較多重量是由四角的彈簧來分擔。

表二十三、中心繩遠離上部件曲柄移動時傾斜角與彈簧變化。(由第一作者製作)

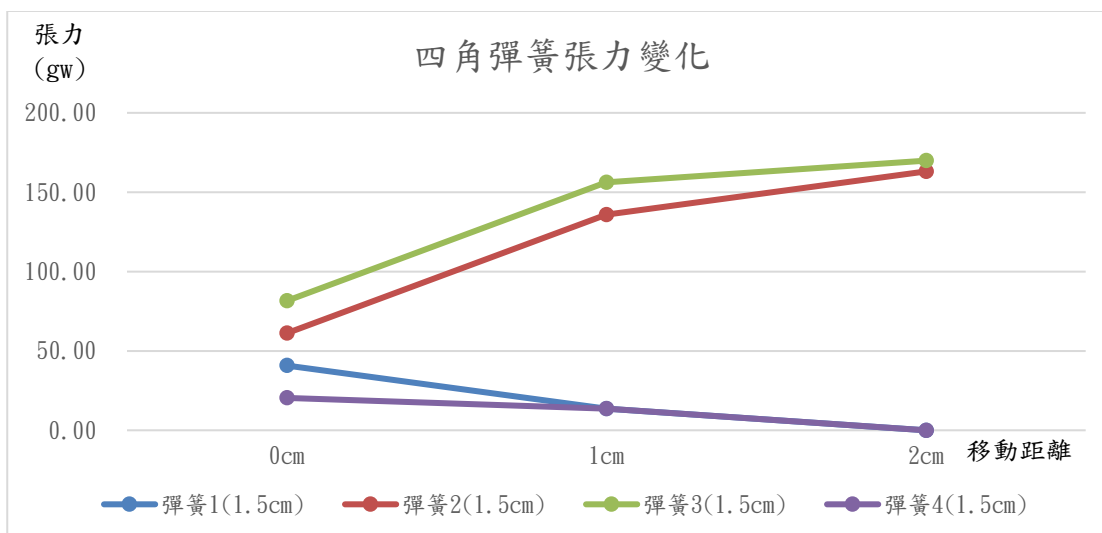
離曲柄移動	傾斜角	中心繩 (3.57cm)		中心繩 (3.57cm)		彈簧 1 (1.5cm)		彈簧 2 (1.5cm)		彈簧 3 (1.5cm)		彈簧 4 (1.5cm)	
		長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量	長度	伸長量
1cm	5.50°	7.90	4.33	8.40	4.83	1.50	0.00	2.10	0.60	2.20	0.70	1.60	0.10
1cm	7.80°	8.00	4.43	8.40	4.83	1.60	0.10	2.00	0.50	2.20	0.70	1.50	0.00
1cm	5.90°	7.90	4.33	8.40	4.83	1.60	0.10	2.40	0.90	2.40	0.90	1.60	0.10
平均量	6.40°		4.36		4.83		0.07		0.67		0.77		0.07
2cm	9.50°	7.70	4.13	8.40	4.83	1.50	0.00	2.30	0.80	2.30	0.80	1.50	0.00

2cm	6.70°	7.90	4.33	7.90	4.33	1.50	0.00	2.40	0.90	2.40	0.90	1.50	0.00
2cm	7.00°	7.70	4.13	8.00	4.43	1.50	0.00	2.20	0.70	2.30	0.80	1.50	0.00
平均量	7.73°		4.20		4.53		0.00		0.80		0.83		0.00

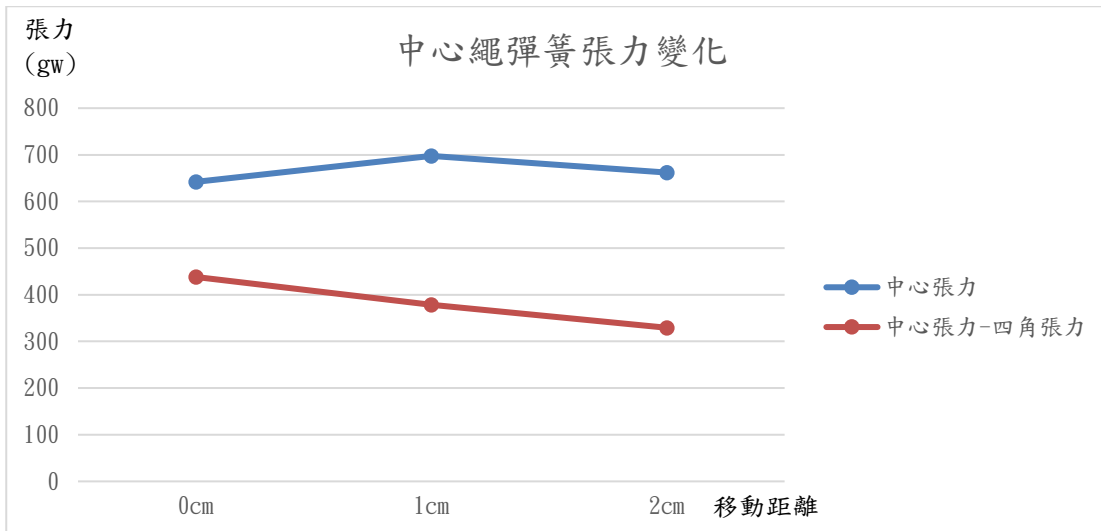
傾斜角隨著中心繩遠離曲柄的距離變大而增加，但移動 2 公分的變化的幅度較靠近曲柄時還要少。

表二十四、中心繩遠離上部件曲柄移動時中心繩張力變化。(由第二作者製作)

離曲柄移動	中心繩 (3.57cm)	中心繩 (3.57cm)	彈簧 1 (1.5cm)	彈簧 2 (1.5cm)	彈簧 3 (1.5cm)	彈簧 4 (1.5cm)
平均拉力 (0cm)	320.99	320.99	40.77	61.16	81.54	20.39
中心繩平均 張力	641.98					
中心繩-四角 彈簧	438.14					
平均拉力 (1cm)	331.11	366.52	13.59	135.90	156.29	13.59
中心繩平均 張力	697.63					
中心繩-四角 彈簧	378.27					
平均拉力 (2cm)	318.46	343.76	0.00	163.08	169.88	0.00
中心繩平均 張力	662.22					
中心繩-四角 彈簧	329.27					



圖三十二、中心繩遠離上部件曲柄移動時各彈簧張力變化折線圖。(由指導老師繪製)



圖三十三、中心繩遠離上部件曲柄移動時中心彈簧張力變化折線圖。(由指導老師繪製)
 由表三十二至三十三可以得知，隨著遠離曲柄移動的距離越長，彈簧二、三的張力越大，傾斜角也越大，而中心繩彈簧的總張力(表四十一的藍色折線)略有上升，但扣除掉四角彈簧後(圖四十二紅色折線)依然是明顯下降，代表上部件同樣有較多重量是由四角的彈簧來分擔。

四、實驗四結果與分析：以電磁吸盤作為張拉結構中心繩的可行性

(一)不同電壓下磁力大小與與能承受的最大拉力

表二十五、磁力大小與螺帽脫離電磁吸盤時的最大讀數範圍(由第三作者製作)

電壓	磁力大小(高斯)	螺帽脫離瞬間的拉力範圍(gw)
12V	350	900.00-980.00
11V	320	800.00-950.00
10V	290	700.00-900.00
9V	260	700.00-850.00
8V	230	650.00-800.00
7V	200	600.00-700.00
6V	180	550.00-700.00
5V	160	500.00-600.00

由於在使用彈簧秤測量時，發現螺帽脫離電磁吸盤的讀數變化有點大，所以以測試五次中最小與最大值，作為電磁吸盤能承受的張力代表數值；由數值可以得知，隨著電壓降低，電磁吸盤能承受的最大拉力也逐漸下降。

表二十六 電壓變化與四角彈簧張力變化(由第一作者製作)

電壓	彈簧 1 (1.5cm)			彈簧 2 (1.5cm)			彈簧 3 (1.5cm)			彈簧 4 (1.5cm)		
	長度	伸長量	張力	長度	伸長量	張力	長度	伸長量	張力	長度	伸長量	張力
12V	1.60	0.10	20.39	1.70	0.20	40.77	2.00	0.50	101.93	1.60	0.10	20.39
11V	1.60	0.10	20.39	1.70	0.20	40.77	2.00	0.50	101.93	1.70	0.20	40.77
9V	1.60	0.10	20.39	1.60	0.10	20.39	2.00	0.50	101.93	1.60	0.10	20.39
8V	1.60	0.10	20.39	1.70	0.20	40.77	2.00	0.50	101.93	1.70	0.20	40.77
7V	1.60	0.10	20.39	1.60	0.10	20.39	1.90	0.40	81.54	1.60	0.10	20.39

6V	1.60	0.10	20.39	1.60	0.10	20.39	1.90	0.40	81.54	1.70	0.20	40.77
5V	於 5.7V 時螺帽脫落											

表二十七 電壓變化與四角彈簧總張力的相關性(由第一作者製作)

電壓	四角張力	皮爾森相關性係數
12	183.47	0.54
11	203.85	
10	163.08	
9	203.85	
8	142.70	
7	163.08	
6	163.08	

由電壓變化與四角彈簧張力的皮爾森相關係數可以得知，兩者之間的關係屬於中度正相關(相關係數界在 0.3-0.6 之間)，代表電壓變化跟四角的彈簧張力變化可能有一點相關性，但同時也可能有受到其他因素的影響。

表二十八、電壓變化與中心繩可能張力比較。(由第二作者製作)

電壓	可能張力 (gw)
12	632.37
11	652.75
10	611.98
9	652.75
8	591.60
7	611.98
6	611.98

由實驗二水平平衡時中心繩彈簧的張力，減掉四角彈簧的張力，得到上部件可能施加在中心繩的張力，約為 438 克；表四十五將四角拉力總和，加上 438 克，即可能是中心繩的張力大小，由表四十二可以得知，已超過電壓 5V 與 6V 能支撐的張力大小，故螺帽很容易鬆脫。

伍、討論

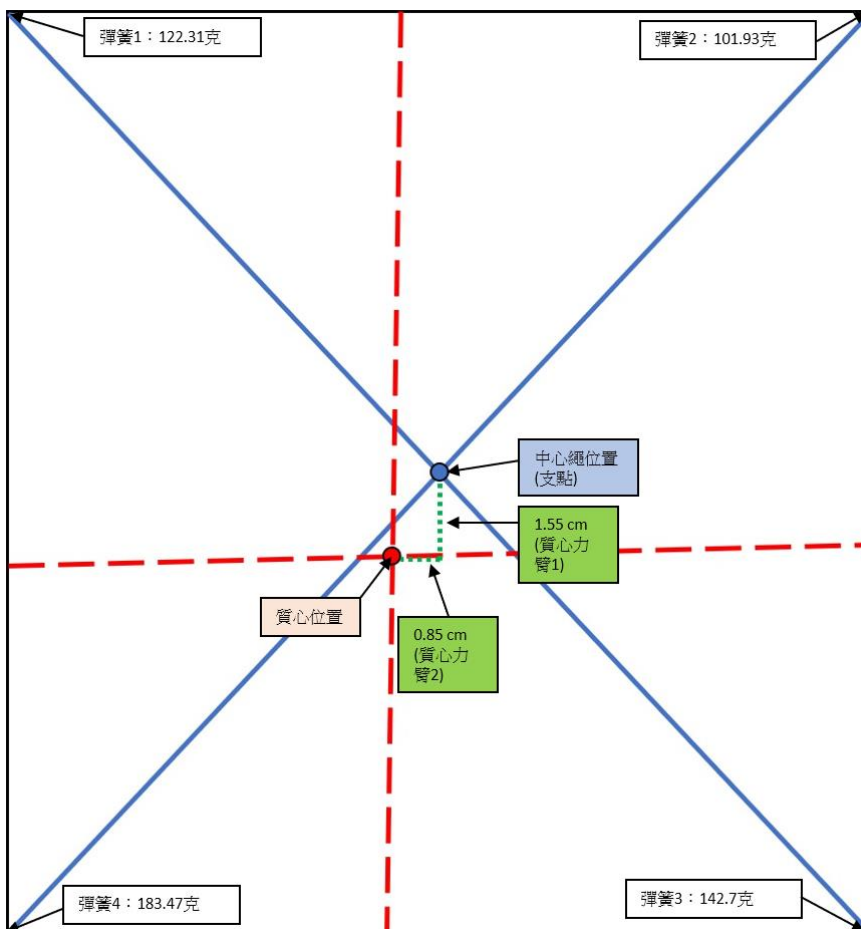
一、實驗一的發現與討論

(一)改裝彈簧之後的張拉結構可以穩定地水平平衡，且各彈簧長度可代表該繩子的拉力。

(二)可能由於上部件的質心並不在中央，而是比較靠近彈簧 4，所以各個彈簧的張力並不相同，但是可以觀察到正常架設時仍可以維持水平，以及曲柄兩側的拉力總和相同，可能是因為彈簧比繩子有更好的伸縮能力，所以能夠取得平衡。

二、實驗二的發現與討論

透過實驗與分析，可以得知我們所組合的張拉結構，在四側邊施加的額外拉力，雖然可以讓張拉結構仍然維持平衡，但對於傾斜程度以及各個彈簧張力的影響都有所不同，可能跟上半部部件的質心位置有關，如圖三十四。



圖三十四、張拉結構上部件質心位置與力臂圖。(由指導老師繪製)

由於質心的力臂是與支點的垂直距離，從彈簧 1、2 之間以及彈簧 3、4 之間的額外拉力，其力臂會是較長的質心力臂 1 (1.55 公分)，而從彈簧 2、3 之間與彈簧 1、4 之間額外的拉力，其質心力臂會是較短的質心力臂 2 (0.85 公分)，實際質心力臂長短與力矩大小，也可能會受傾斜角而有所影響，比如傾斜使質心抬高時，可能會更接近支點，而使質心下降時，可能更遠離支點。

如果比較拉力端以及非拉力端的總張力來，四組的拉力端彈簧總張力的變化都是下降，而非拉力端的總張力都是上升，而其中以在上部件曲柄兩側(彈簧 1、4 之間)這組的總張力變化最小。

由傾斜角度來比較的話，拉力在彈簧 1、4 之間以及彈簧 2、3 之間的角度變化都比較穩定，可能與質心力臂較短有關係，而拉力在彈簧 1、2 之間或彈簧 3、4 之間時，由於質心力

臂比較長，對於平衡的影響也比較大，不過以總力矩來分析實驗二的數據時，會發現雖然張拉結構維持平衡，但支點兩側的力矩卻無法直接抵銷，可能是因為張力的性質與常見的接觸力有些不同，每一條張力除了會跟外在施力有影響外，與其他條彈簧的張力也會互相影響，甚至考慮到不同張力的方向時，彈簧本身張力的方向也會改變，所以難以透過力矩來直接分析。

雖然無法直接分析詳細的力矩，但還是可以看到總力矩與穩定平衡的相關性，我們有觀察到額外拉力位於彈簧 1、4 之間的結果，總力矩會隨著額外施力上升而下降，同時也是唯一傾斜角最小且最穩定的一組。

三、實驗三的發現與討論

隨著中心繩的位置移動，中心繩與四角的彈簧張力會有所改變，當距離中心之點越遠，中心繩的張力會下降，而靠近移動方向的四角彈簧張力會上升，遠離移動方向的張力會下降，在移動兩公分以內雖然會傾斜，但都還可以維持不倒塌的平衡狀態，而如果移動到三公分以上，則難以維持平衡狀態。

四、實驗四的發現與討論

- (一)電磁吸盤的磁吸力會隨著電壓下降、距離拉長等因素而變小；且受電磁吸盤吸引的物體如螺帽，如果慢慢拉它，則比較不容易脫離彈簧秤，但如果是快速拉動它，則可能會導致螺帽提早就脫離電磁吸盤。
- (二)透過皮爾森相關係數可以得知，中心繩磁力的影響，對於四角的彈性變化，並沒有特別高的相關性(中度正向相關)。
- (三)由表二十八可以得知，螺帽於 5.7V 的時候從吸盤上掉落，而四角彈簧張力總和加上上部件給予繩的張力的總和為 611 上下，略超過電壓 6V 與 5V 之間電磁吸盤的吸力，所以很容易掉下去。
- (四)電磁吸盤可以作為中心繩的替代品，但須注意提供足夠的電壓，才能使張拉結構維持平衡。

陸、結論

首先，實驗一將彈簧裝設在張拉結構的尼龍繩上，可以測量平衡時尼龍繩張力，由於上部件的質心略靠近彈簧 4，使得彈簧 2 與彈簧 3 的張力比彈簧 1 與彈簧 4 大，但位於曲柄兩側的張力總和(彈簧 1+彈簧 2、彈簧 3+彈簧 4)是相等的，顯示應該是以中心繩為支點，曲柄兩側有達到力矩平衡；透過實驗也發現，由於彈簧擁有比較好的延展性、彈性以及比較大的質量，在另外施力在張拉結構上時，很容易受到橫向的剪力的影響，反而更容易傾斜或翻覆，所以適合用於張力的測量，但並不適合應用。

其次，關於實驗二，如果從側邊對張拉結構額外施力，會發現由於質心位置的關係，從彈簧 1、2 之間以及 3、4 之間的施力很容易使結構傾斜甚至失去平衡，而由彈簧 2、3 之間與 1、4 之間施力則穩定很多，顯示張拉結構在曲柄所在的側邊以及對面邊的支撐力會比較好，可以做為結構應用上的參考，但由於張力的特殊性，沒辦法只靠分析力矩的方式來完全解釋平衡的狀態，不過仍可以觀察到其中可能的相關性。

接著，有關實驗三的部分，另外中心繩的位置在最水平平衡時應該是位於結構的正中央，一旦向特定方向移動，可能還是可以維持平衡，但不會是水平的，隨著離正中央距離越遠，靠近移動方向的側邊張力就會增加，且高度也會越高，但距離中央太遠則無法維持平衡；除了了解不同設計各繩索需要承受的張力外，也可以做為非水平平衡等特殊形式的張拉結構的參考。

而後，實驗四在電磁吸盤在電壓穩定的情況下，可以用於做為中心繩來支撐張拉結構，但由於電磁吸盤的磁力很容易受瞬間張力變化的影響，導致磁力的改變使結構失去平衡，所以比較適合作為裝飾用途，或是利用電磁鐵受力過大會脫落的性質，避免張拉結構支撐重物時承受太大的重力，作為對木製結構的保護機制。

最後，綜合以上實驗結果，除了可以得知張拉結構的張力大小，也了解張拉結構所需的結構以及可能平衡的變因，可能做為張拉結構的設計與材料挑選等的參考。未來，也可挑選更適合的彈簧，使其可以在比較不受剪力破壞平衡的影響下測量張力，使其可以測量更大的施力範圍，以及能設計更多不同形式的實驗；亦可深入了解張力的測量方式與規劃更精細的實驗，進而更詳細分析張拉結構在不同狀態下的張力變化與對平衡的影響程度。

柒、參考文獻資料

一、張拉整體結構的發展史與其應用。網路科教館。取自：

<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6844&p=1&lid=19217&print=1>

二、陳奕穎、陳奕帆(2022)。防震未來式—懸浮技術的抗震(科展作品)。取自：

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/62/pdf/NPHSF2022-032807.pdf?0.6935225315392017>

三、邱彩瑄、余青諄、詹志凡、高嘉郎、戴明鳳(2022)。張拉整體結構實作套件設計與操作——在科學教育推廣上的應用設計。取自：

<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6844&p=1&lid=19219>

四、Home Science (2020)。How to Make Amazing Tensegrity Structure - Anti-Gravity Structure.(YouTube 影片)。取自：

<https://www.youtube.com/watch?v=ROnxjj5jPDs>

五、莊銘淵、鄭竹恩、陳苡玄、張文澤 (2021)。一「臂」之力有「懸」技(科展作品)。取自：

<https://science.hc.edu.tw/fileUpload/winningEntries/110%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E5%9C%8B%E5%B0%8F%E7%B5%84%E7%89%A9%E7%90%86%E7%AC%AC%E4%BA%8C%E5%90%8D0811-01424120.pdf>

六、高中物理—張力。翰林雲端學院。取自：

<https://www.ehanlin.com.tw/app/keyword/%E9%AB%98%E4%B8%AD/%E7%89%A9%E7%90%86/%E5%BC%B5%E5%8A%9B.html>

七、李冠廷、戴采薰、陳宥家、楊竣喆、吳曼綸 (2021)。「形」之互動，隱「力」再「線」。取自：

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-080101.pdf?0.9193419306538999>

八、高中物理 - 電磁鐵。翰林雲端學院。取自：

<https://www.ehanlin.com.tw/app/keyword/%E9%AB%98%E4%B8%AD/%E7%89%A9%E7%90%86/%E9%9B%BB%E7%A3%81%E9%90%B5.html>

九、元鑫磁性材料有限公司。2020。永久磁鐵電磁鐵？取自：

<https://www.washup.com.tw/archives/1232>

十、虎克定律影片—虎克如何觀察彈簧並提出虎克定律？LIS 情境科學教材。取自：

<https://lis.org.tw/posts/110>

【評語】 080111

本研究探討張拉結構體的穩定性，以彈簧與木結構組裝而成的張拉結構，藉著虎克定律的線性關係，探討結構體質心位置，不同方位拉力，與總拉力之間的關係，並嘗試以電磁吸盤穩定裝置，探討作為拉張結構中心繩的可行性。本研究有量化裝置測量平衡時的受力狀態，從設計到執行面皆循序漸進，逐步理出拉張結構應該如何才可穩定平衡，惟研究發現較缺新意，但此研究方法可成為日後工程科學探究範例。

作品簡報

魔法懸浮 若隱若線

壹、研究動機

「張拉整體結構(Tensegrity)」是指透過纜線間的「張力」，使兩個獨立物體，結合形成一個維持穩定且平衡的「整體結構」。即使沒有堅固的支撐結構，也不會受重力影響而導致翻轉或垂墜，甚至部份結構能看似懸浮於半空中，令人覺得很神奇，進而想要多瞭解張拉整體結構。為了瞭解其中的力學原理與奧秘，希望經由研究與實驗，嘗試改造張拉整體結構的力學元件，進而應用到日常生活的其他層面，使科學原理融入生活中。

貳、研究目的

- (一) 了解張拉結構平衡狀態下繩子拉力與力矩平衡的關係。
 (二) 探究側邊外力對張拉整體結構的影響。
 (三) 探究中心繩的位置對張拉整體結構的影響。
 (四) 探究電磁鐵改造張拉結構整體的可能性。

參、研究方法

想要了解張拉結構的平衡狀態、張力以及力矩的大小。

- 設計彈簧版張拉結構，測量平衡狀態時的張力、繩子位置以及部件質心。
- 測量側邊拉力對平衡狀態、傾斜角、彈簧張力以及力矩的影響。
- 分析中心繩位置改變對於張拉結構的平衡狀態、傾斜角度以及各張力的影響。
- 將中心繩更換成電磁鐵，分析電壓、電流、磁力對張拉結構平衡的影響。

探討並了解張拉結構的性質，包含張力大小、影響平衡狀態的變因的影響；並依據實驗成果，推論適合張拉結構的結構特徵、材質以及力矩等資訊，並評估可能的實際用途與未來展望。

肆、研究結果與討論

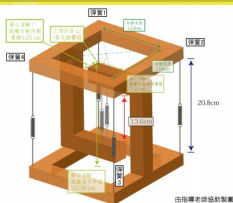
實驗一：製作彈簧版張拉結構與計算各繩拉力

實驗步驟：

1. 利用木條與木工膠製作張拉結構。
2. 利用彈簧秤施加拉力，測量彈簧的伸長量，推導出彈性係數公式。
3. 組裝結構，測量與分析張拉結構平衡時各彈簧張力。
4. 測量上部件的質心位置：
 - (1) 將張拉結構水平倒置，計算四角彈簧支撐上部件的張力，得知水平面質心位置。
 - (2) 利用兩組彈簧秤分別綁在上部件頂部以及曲柄底部後懸空，觀察彈簧秤拉力，得知垂直面質心位置。
 - (3) 將水平與垂直質心位置資訊結合，並以3D模型呈現上部件質心位置。

圖一 張拉結構模型：

表一 各繩彈性係數與張力：

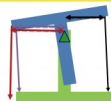


	中心繩 (3.57cm)	中心繩 (3.57cm)	彈簧1 (1.5cm)	彈簧2 (1.5cm)	彈簧3 (1.5cm)	彈簧4 (1.5cm)
長度(cm)	7.8	7.8	1.7	1.8	1.9	1.6
伸長量 (cm)	4.23	4.23	0.2	0.3	0.4	0.1
彈性係數 (g/cm)	75.9	75.9	203.9	203.9	203.9	203.9
張力 (gw)	321.0	321.0	40.8	61.2	81.6	20.4
張力和 (gw)			102		102	

由自行製作

實驗二：外加施力對於張拉結構與繩子拉力的影響

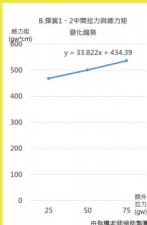
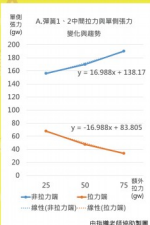
1. 利用積木製作改變施力方向的滑輪裝置，並安裝於下部件，之後將尼龍繩穿過滑輪裝置，兩端分別綁在上部件單邊上與彈簧秤上。
2. 透過尼龍繩分別施加上部件單邊25、50、75、100克的拉力，錄影紀錄實驗的過程，並於紀錄紙上標記拉動後的傾斜角以及用直尺測量彈簧伸長量，換算成張力後，依照右邊力圖與下方算式計算總力矩。
3. 如果拉動後結構不穩定容易倒塌，難以測量張力與總力矩，則會使用ImageJ程式協助測量影片中的傾斜角。



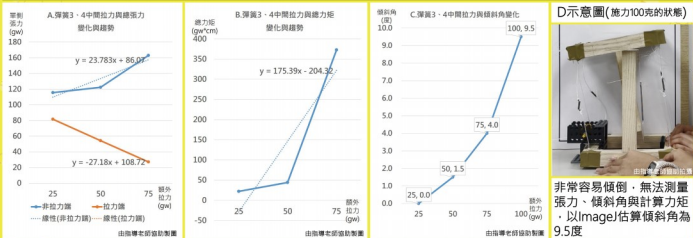
圖示說明一
 三角形：旋轉支點
 紅色實線：額外拉力
 紫色實線：同側張力
 黑色實線：異側張力
 雙箭頭虛線：各力的力矩 (對應顏色)

*總力矩 = 異側張力 X 力臂 - (額外拉力 X 拉力臂 + 同側張力 X 力臂)

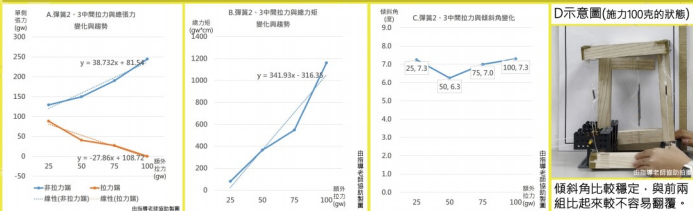
圖二 由彈簧1、2之間拉動，總力矩與傾斜角都隨拉力增加而上升，容易倒塌。



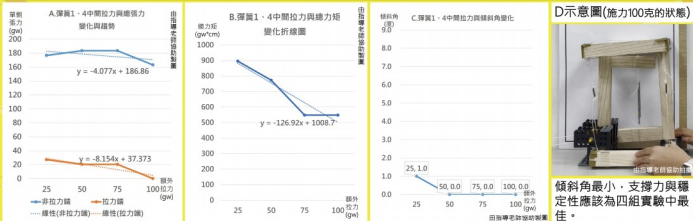
圖三由彈簧3、4之間拉動，總力矩與傾斜角都隨拉力增加而上升，容易倒塌。



圖四由彈簧2、3之間拉動，總力矩隨拉力增加而上升，但傾斜角穩定，不易倒塌。



圖五由彈簧1、4之間拉動，總力矩隨拉力增加而下降，幾乎不傾斜，最為穩定。



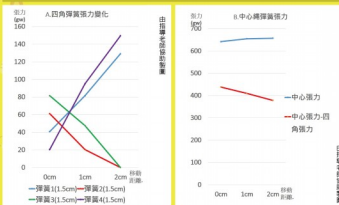
實驗三：中心繩位置對張拉結構平衡的影響

- (一) 實驗步驟：1. 以水平平衡時中心繩的位置為中心，於上下曲柄向左右每一公分做一次標記。
2. 將中心繩與曲柄上依據步驟一的標記，向著彈簧1、4或彈簧2、3的方向進行橫向移動，每次調整一公分。
3. 調整完後確認結構是否穩定，觀察傾斜程度以及測量中心繩與四角各彈簧的伸長量，以計算張力的變化。

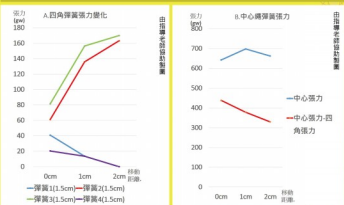
(二) 實驗結果：

1. 無論是向哪個方向移動，中心繩最多只能移動2公分，如果移動超過則張拉結構會失去平衡倒塌。
2. 靠近中心繩移動方向的四角彈簧，其張力會增加，遠離方向的四角彈簧張力則會減少，甚至歸零。
3. 移動後中心繩張力減掉四角彈簧張力會逐漸減小，代表可能有更多上部件的重量是由四角的彈簧支撐。

圖六中心繩往上曲柄(彈簧1、4)方向移動



圖七中心繩往下曲柄(彈簧2、3)方向移動



實驗四：以電磁吸盤作為張拉結構中心繩的可行性。

(一) 實驗步驟：

1. 將電磁吸盤與直流電供應器連接，由電壓12伏特慢慢調降，並透過高斯計測量各電壓的磁力大小。
2. 將螺帽以尼龍繩與彈簧秤連接，拉動彈簧秤，測量不同電壓下電磁吸盤的吸力範圍。
3. 將電磁吸盤取代中心繩，並調降電壓，觀察不同電壓下四角彈簧的張力以及中心繩是否脫落。

(二) 實驗結果：

1. 在電壓5.7伏特的時候，中心繩會鬆脫。
2. 經過估算，6伏特的中心繩張力大概是611克，有些超過5V與6V能夠承受的張力範圍。

表二 不同電壓下電磁吸盤的平均磁力與承受拉力範圍； 表三 不同電壓下四角彈簧張力總和與相關性：

電壓	平均磁力(Gs)	螺帽脫離瞬間的 拉力範圍(gw)
12V	350	900.00-980.00
11V	320	800.00-950.00
10V	290	700.00-900.00
9V	260	700.00-850.00
8V	230	650.00-800.00
7V	200	600.00-700.00
6V	180	550.00-700.00
5V	160	500.00-600.00

由第三作者製作

電壓	四角張力總和(gw)	皮爾森相關性係數
12V	183.47	0.54 (中度正相關)
11V	203.85	
10V	163.08	
9V	203.85	
8V	142.70	
7V	163.08	
6V	163.08	

由第一作者製作

表四 不同電壓下中心繩的估計張力大小：

由實驗二的數據分析，估計中心繩的張力為四角彈簧張力總和+438.9克。

電壓	中心繩估計可能張力 (gw)
12V	632.37
11V	652.75
10V	611.98
9V	652.75
8V	591.60
7V	611.98
6V	611.98

由第二作者製作

伍、結論

- 一、在張拉結構中裝設彈簧可以用來測量各繩張力，但因為彈簧容易受到剪力影響，使結構更容易倒塌而不適合應用，但可以用來了解張拉結構的性質。
 - 二、張拉結構中上曲柄側（彈簧1、4之間）與下曲柄間（彈簧2、3之間）最為穩定，剩餘兩側則相對容易傾倒，可以了解張拉結構哪邊的支撐力最好，做為應用與改造張拉結構時的參考。
 - 三、中心繩位置移動時，靠近的四角彈簧張力會上升，另一側則會下降，而使得結構傾斜，可用於作為張拉結構設計與四角繩子材料需求的參考。
 - 四、在電壓充足的情況下，電磁吸盤可以做為中心繩，以本次實驗的結果而言，至少需要6-7伏特以上才會比較穩定，也可以透過電磁吸盤過重會脫落的性質，作為避免支撐超過木製結構支撐程度的安全裝置。
- 綜合以上實驗結果，除了可以得知張拉結構的張力大小，也了解張拉結構所需的結構以及可能平衡的變因，可能做為張拉結構的設計與材料挑選等的參考；而由於張拉結構是由連續張力維持平衡的系統，以總力矩的方式雖然不能完全解釋施加外力後的平衡狀態，但仍然可以看出與穩定程度的部分相關性。

陸、參考資料

1. 蘇薇晨 (2013)。基於張拉整體結構探討動態性結構。國立交通大學建築研究所碩士論文。
取自：<https://ir.lib.nycu.edu.tw/bitstream/11536/72882/1/951001.pdf>
2. 陳奕穎、陳奕帆(2022)。防震未來式—懸浮技術的抗震(科展作品)。
取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/62/pdf/NPHSF2022-032807.pdf>
3. 邱彩瑄、余青諄、詹志凡、高嘉鄺、戴明鳳(2022)。
張拉整體結構實作套件設計與操作——在科學教育推廣上的應用設計。
取自：<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6844&p=1&lid=19219>
4. Home Science (2020)。How to Make Amazing Tensegrity Structure - Anti-Gravity Structure.(YouTube影片)
取自：<https://www.youtube.com/watch?v=R0Nxi5jPDs>
5. 莊銘淵、鄭竹恩、陳茂玄、張文澤 (2021)。「懸」之力有「懸」技(科展作品)。
取自：<https://science.hc.edu.tw/fileUpload/winningEntries/110年度國小組物理第二名0811-01424120.pdf>
6. 翰林雲端學院。高中物理—張力。
取自：<https://www.ehanlin.com.tw/app/keyword/高中/物理/張力.html>
7. 李冠廷、戴采薰、陳宥家、楊竣詒、吳曼倫 (2021)。「形」之互動、隱「力」再「線」。
取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-080101.pdf>
8. 元鑫磁性材料有限公司。2020。永久磁鐵電磁鐵？取自：<https://www.washup.com.tw/archives/1232>