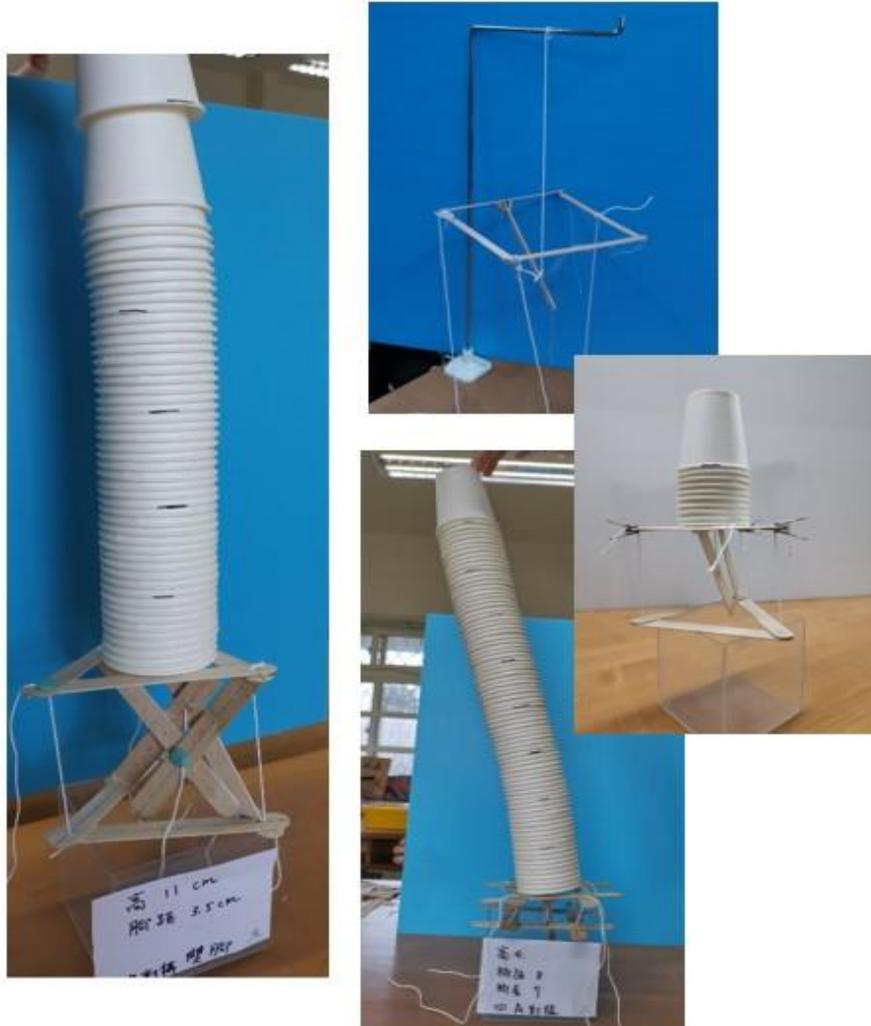


# 新竹市第三十九屆中小學科學展覽會

## 作品說明書



科 別：物理科

組 別：國小甲組

作品名稱：一「臂」之力有「懸」技

關 鍵 詞：反重力懸浮、靜力平衡、張拉整體

編 號：H02

# 一「臂」之力有「懸」技

## 摘要

**反重力懸浮裝置**，一個吸引人們目光的炫酷結構，想要完成它，「懸吊」的技巧是**關鍵**。我們研究的裝置以日常生活中容易取得的冰棒棍製成，上下對稱的主題結構會相互延伸出懸臂（我們稱之為烏龜腳），再藉由數條繩線彼此互相拉張，達到靜力平衡。而其中延伸懸臂懸吊短繩的位置，均需座落在**重心的垂直線**上，這也是整個結構載重的最佳位置。我們改變了結構的高度、冰棒棍的長度，發現這些因素並不會影響載重大小。**主體結構呈現越多邊形、懸臂數量增加、懸臂與主體結構的夾角較大，拉張結構越穩定，載重量也大幅提升**；然而上下主體結構若由完全對稱改成星型對稱，則不利於載重。臂吊短繩位置和重心偏移的程度越大，拉張結構明顯不穩定，載重量降低，拉張長繩所受的張力變異性增加。懸臂間吊繩的材質越粗，剛性越強，載重量越大。我們藉由此一裝置的研討，大幅改變載重的能力，若能將此應用，例如：將懸吊系統改為剛性金屬彈簧，未來可應用在避震的建築結構中。

## 壹、研究動機

我們在網路上看到很多拍攝「反重力懸浮裝置」的影片，也有很多 youtuber 在解說這個結構的原理，於是對於這個懸浮結構感到很好奇，產生極大的興趣想要深入研究看看。在四年級時，我們學過力的作用、大小與方向，老師說六年級自然第一單元「力與運動」還會學到力的測量與力矩概念，而這個裝置應用了巧妙的力學結構在裏頭，很值得我們去探討。我們就在想到底要如何製作出這樣的懸浮裝置，有沒有什麼技巧？可以做到很高嗎？我們也好奇這個反重力懸浮裝置能放一些物品在上頭，那到底能放多重？載重能力如何？載重跟高度、形狀或角度有沒有關係呢？

## 貳、研究目的

- 一、如何做出反重力懸浮結構，達到靜力平衡的關鍵點是什麼？
- 二、反重力懸浮結構，能不能載重？最佳的載重點在哪裡？
- 三、改變結構的高度，對於反重力懸浮結構的載重量會不會有影響？
- 四、反重力懸浮結構的形狀設計不同，對於載重量有何影響？
- 五、不同數量的懸臂結構，對於載重量有何影響？
- 六、不同角度的懸臂結構，對於載重量有何影響？
- 七、檢測懸臂吊繩位置偏移重心不同距離，是否影響整體的靜力平衡？
- 八、懸臂之間不同材質的吊繩，對於結構的載重量有何影響？
- 九、反重力懸浮結構在載重時，四周長線的張力變化如何？
- 十、反重力懸浮結構在生活中的應用。

## 參、研究設備及器材

實驗器材	用途	實驗器材	用途
量角器	測量角度	冰棒棍	用來製作反重力懸浮的構件
尺	測量高度、畫重心	棉線	支撐結構、傳遞力量
美工刀	切割支架角度	長尾夾	固定繩子、線
剪刀	剪線長、支架等	隨意貼黏土	固定棉線、調整高度用
切割墊	切割物品、保護桌面	杯子	當承重物品，計算承受重量
熱熔膠	黏冰棒棍、固定支架	置物架	放置作品，張拉結構有時底部無法呈現同一平面時使用
鑽孔器、鑽洞工具	鑽洞以利穿線	電子秤	測量載重物重量
砝碼	測量繩子張力的工具		

## 肆、研究過程或方法

### 一、原理探討

反重力懸浮這個結構設計，利用的原理叫作「張拉整體」，是由美國建築師富勒 Richard Buckminster Fuller (July 12, 1895 – July 1, 1983) 創建的，主要用於描述「由繩索、電纜等剛性構件組合而成的結構系統，該系統具有張力與拉力」。張拉整體這種技術被用在建築上，可以做成斜張橋、桌子、椅子等。而這種反重力懸浮裝置，它為什麼可以懸浮起來呢？張拉整體最少要用到 3 根線，分別是兩條長線和一條短線，這條短線所受到的力(向上)等於兩條長線所受到的力加上支架重力的總合(向下)。這就是為什麼它可以懸浮起來的原因，關鍵在於中間那條繩子！

由於中間繫繩無法壓縮只能提供緊繃的拉力，如果缺少中間那條繫線，上方的平台就會垮下來。所以只要拉緊中間那條繫繩，就會將上方的平台向上抬升，從而拉緊四周的繩子(可以是 2 條、3 條或 4 條)，對於上方的平台而言，中央的繫繩給予它向上的拉力，四周的繩子則給予它向下的拉力，平台重量加上這些向下的拉力總和等於向上的拉力。但只有合力為零未必能撐起上方的平台，還必須符合「向下的合力作用點恰位於中央繫繩的正上方」。這個「向下的合力作用點」就是以此點當支點時，重力與四周繩拉力對此點的合力矩為零，如此才能符合合力為零（不移動）且合力矩為零（不轉動）的靜力平衡。因此必須細心調整四周各繩的拉力，這也是這個實驗能否成功的關鍵。

## 二、 研究過程或方法

### (一)、如何做出反重力懸浮結構，達到靜力平衡的關鍵點是什麼？

1. **材料選擇**：我們選擇了幾種材料，例如硬紙板、杯子、筷子、吸管、冰棒棍等材料試做，發現「冰棒棍」可以標準化設計，比較符合我們接下來的實驗探討。所以我們選擇「冰棒棍」做反重力懸浮結構的主要支架。(圖表 1)

不同材料製作的反重力懸浮			
「紙板」懸浮結構		「吸管」懸浮結構	
	可以懸浮， 承重不佳， 結構不穩固。		可以懸浮， 承重不佳， 結構不穩固。
「紙杯」懸浮結構		「冰棒棍」懸浮結構	
	可以懸浮， 承重不佳， 結構不穩固。		能懸浮， 可改尺寸、 可以承重。

圖表 1

### 2. 三角形「冰棒棍」反重力懸浮結構的製作步驟：

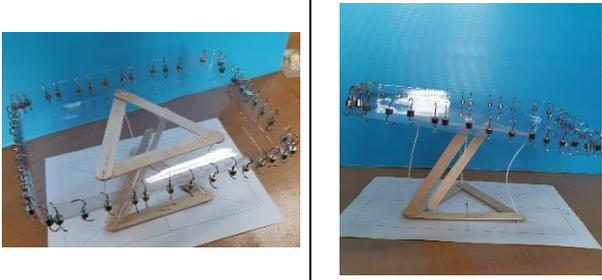
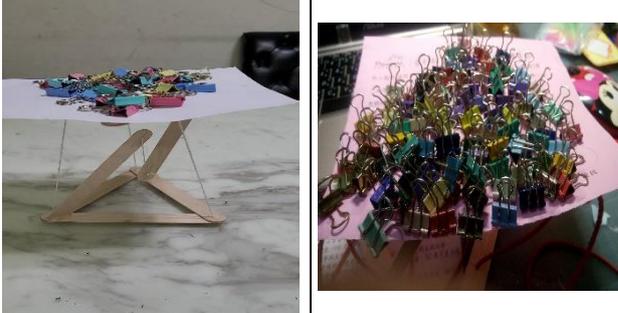
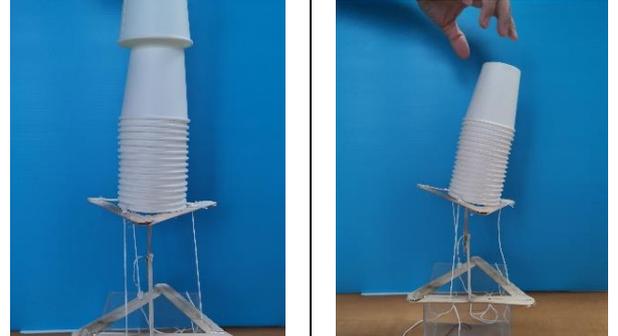


- (1) 冰棒棍量出需要的角度(60 度)、長度和數量。
- (2) 選 6 支等長的冰棒棍做出兩個三角形的底座，並在三個角的位置打洞。
- (3) 再做出兩支角度 60 度的懸臂並打洞。
- (4) 將兩支懸臂各黏在一個底座上（一個黏在角上、一個黏在邊上）
- (5) 用線將上下兩支懸臂連接，用長尾夾先固定棉線。
- (6) 用線將上下兩個三角形支架的三個角連接，用長尾夾先固定棉線。
- (7) 調整中間和角上的棉線，讓它能懸浮，固定好棉線。
- (8) 在上下三角形支架連接好棉線，確定好長度並拉緊，點膠固定後，它就能呈現出一個站立平穩的懸浮狀態喔！(圖 1)

圖 1

(二)、反重力懸浮結構，能不能載重？最佳的載重點在哪裡？

觀賞網路影片及幾次測試後，我們都知道反重力懸浮結構能載重，但到底能載重多少？於是我們找了幾種物品來測試反重力懸浮結構的載重能力(圖表 2)。

砝碼(1 公克)		每包固定重量的米(10 公克)	
			
原本將砝碼放在中間位置但會滑動，於是換懸吊在四邊。每一個砝碼會因為產生一個新的力矩影響平衡，而擺放的順序及位置對載重的測量並無規律性。		米包必須平整且堆疊時非常容易滑落。相同的，換成米包之後，擺放的順序及位置仍會產生新的力矩影響平衡，仍舊無法出現可測量的規律性。	
迴紋針		長尾夾	
			
可集中擺放的位置，但單位重量輕小，一旦數量增加，擺放順序和位置亦會產生新的力矩影響測量。		形狀不規則，單位重量比迴紋針大，但數量一多，出現和迴紋針一樣的情形。	
水		紙杯(每個 4.1 公克)	
			
會產生左右水平晃動力量且容易打翻，實驗進行十分狼狽。但我們發現若能將承載物放置於重心垂直線上，一旦乘載超過負荷時，系統才會傾斜。		將第一個紙杯擺在重心垂直線上，杯子即可輕易依序堆疊，容易量化和取得。	

圖表 2

(三)、改變結構的高度，對於反重力懸浮結構的載重量會不會有影響？

在製作懸浮結構時發現，冰棒棍的長度和兩懸臂間的距離會影響整個結構的高度，而這個結構的高度會不會影響載重量呢？大部分的我們都認為會。於是設計了實驗變因探討。高度是操縱變因；兩懸臂間距、乘載最大杯數是應變變因；同一組冰棒棍結構、角度、承重物品-紙杯(每一個 4.1 公克)等是控制變因，並定義當結構放置物品時，無法承重而傾倒時的前一個數據，為最大載重量。

第一組：三角對稱型，邊長 10 公分，角度 60 度 (表 3-1)

結構高度 \ 實驗次數	第一次	第二次	第三次	平均承重量(g)
5 公分	25	24	25	101.1
7.5 公分	23	25	25	99.76
11 公分	25	25	25	102.5

表 3-1

第二組：三角對稱型，邊長 12 公分，角度 60 度 (表 3-2)

結構高度 \ 實驗次數	第一次	第二次	第三次	平均承重量(g)
5 公分	24	25	25	101.1
7.5 公分	25	25	23	99.76
11 公分	25	25	25	102.5

		
--	--	--

表 3-2

第三組：三角形對稱型，邊長 14 公分，角度 60 度(表 3-3)

結構高度 \ 實驗次數	第一次	第二次	第三次	平均承重量(g)
7.5 公分	25	25	25	102.5
11 公分	25	25	24	101.1
13 公分	25	25	25	102.5

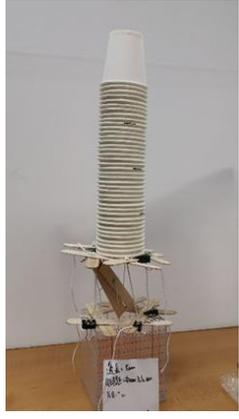
		
---	---	---

表 3-3

(四)、反重力懸浮結構的形狀設計不同，對於載重量有何影響？

我們設計了三角形、四邊形、五邊形、六邊形不同形狀的反重力懸浮結構來比較。

第一組：三角對稱形、四邊對稱形、五邊對稱形、六邊對稱形載重實驗(在不改變冰棒棍長度下，多邊形邊長配合杯子內接圓半徑 3.5 公分調整)(圖表 4-1)

形狀 承重量	三角對稱型	四邊對稱型	五邊對稱型	六邊對稱型
三次實驗 平均杯數	25	34	39	49
平均 承重量(g)	102.5	139.4	159.9	200.9
				

圖表 4-1

第二組：三角星型對稱、完全對稱形；四邊星型對稱、完全對稱的載重結果(圖表 4-2)

承重量	三角形對稱		四邊對稱	
	星型	完全	星型	完全
三次實驗平均杯數	19	25	24	34
平均承重量(g)	77.9	102.5	98.4	139.4
	三角對稱		四邊對稱	
	星型	完全	星型	完全
				

圖表 4-2

(五)、不同數量的懸臂結構，對於載重量有何影響？

結構中的懸臂由單隻變成一雙，是否能增加載重量？以三角和四邊對稱來比較單臂與雙臂的載重能力，實驗結果如下(圖表 5)：

承重量	形狀	三角形對稱		四邊對稱	
		單臂	雙臂	單臂	雙臂
三次實驗平均杯數		25	59	34	79
平均承重量(g)		102.5	241.9	143.5	323.9
三角對稱			四邊對稱		
	單臂	雙臂	單臂	雙臂	
 <p>三角對稱 高 5 cm 懸吊長 11.5 cm 邊長 12 cm</p>		 <p>高 11 cm 懸吊長 11 cm 邊長 12 cm</p>	 <p>高 9 cm 腳距 1.7 cm</p>	 <p>高 11 cm 懸吊長 11 cm 邊長 12 cm</p>	

圖表 5

(六)、不同角度的懸臂結構，對載重量有何影響？

思量懸臂角度，承重端的平面看起來是受到由上往下的重力，但這個力應該會隨著中間懸臂的角度不同，在懸臂上造成不同的分力，進而影響載重。但是懸臂角度小於 45 度時就會壓縮中間懸吊繩的懸浮空間，且懸臂會重疊一起，無法進行結構製作。於是我們選擇 50 度、60 度、70 度的懸臂結構來做比較。實驗結果如圖表 6。

角度	50 度	60 度	70 度
承重量			
三次實驗平均杯數	15	25	34
平均承重量(g)	61.5	102.5	139.4
	 <p>三角對稱 高 11 cm 懸吊長 10 cm 腳距 1.2 cm</p>	 <p>高 11 cm 懸吊長 11 cm 腳距 1.7 cm</p>	 <p>高 11 cm 懸吊長 11 cm 腳距 1.7 cm</p>

圖表 6

(七)、檢測懸臂吊繩位置偏移重心不同距離時，是否影響整體的靜力平衡？

當懸臂(烏龜腳)懸吊短繩的位置偏離重心時，外加的重物可能會對整體結構產生新的破壞力。因此我們在懸臂上設計短繩的不同吊掛位置，測量載重量是否受到影響。另外也加做了在固定承重杯數(10 杯)下，三角對稱型的三個角的繩子張力是否因為短繩懸吊位置的改變而受到影響?實驗結果如圖表 7。

承重量 三角對稱型	三次實驗 平均杯數	角一繩子 張力大小	角二繩子 張力大小	角三繩子 張力大小	張力變異性 標準差(SD)
在重心上	25	5	2	1	2.0817
偏移重心 1 公分	17	22	7	10	7.9373
偏移重心 2 公分	12	30	0	9	15.395
偏移重心 3 公分	3	52	4	12	25.716
偏移重心 4 公分	1	90	7	23	44.034

在重心上	偏移重心 1 公分	偏移重心 2 公分	偏移重心 3 公分	偏移重心 4 公分

圖表 7

(八)、懸臂之間不同材質的繩子鋼性結構，對於結構的載重量有何影響？

我們以三角對稱型為模組，懸臂(烏龜腳)的吊繩以縫衣線、細綿線、粗棉線、鐵絲等不同材質替換，檢測懸臂懸吊系統改變材質後，對於整體結構的載重能力是否有影響？

實驗結果如圖表 8：

承重量 \ 材質	縫衣線	細綿線	粗棉線	鐵絲
三次實驗平均杯數	17	25	28	45
平均承重量(g)	69.7	102.5	114.8	184.5
縫衣線	細綿繩		粗棉繩	鐵絲
				

圖表 8

(九)、反重力懸浮結構在載重時，四周長線的張力變化如何？

張拉整體的原理，最少要用到 3 根線，分別是兩條長線和一條短線，這條短線所受到的力(向上)等於兩條長線所受到的力加上支架重力的總合(向下)。(圖 2)



圖 2

我們想知道中央的短繩(給予結構向上的拉力)以及四周的長繩(給予結構向下的拉力)在載重過程中發生的變化如何？於是，我們將四周的每條長繩下方裝設可懸掛砝碼的位置，將結構從沒有負重到逐漸增加負重量，並吊掛對應砝碼，直到結構維持周圍等高的平衡狀態，然後再測量各對應角的長繩張力大小，實驗結果如下：圖表 9

各角(g) \ 負重	負重 0 杯	負重 10 杯	負重 20 杯	負重 25 杯
角一繩子張力	80	70	50	40
角二繩子張力	60	50	40	28
角三繩子張力	70	50	40	40
負重 0	負重 10 杯		負重 20 杯	負重 25 杯
				

圖表 9

## 伍、研究結果

### 一、如何做出反重力懸浮結構，達到靜力平衡的關鍵點是什麼？

製作冰棒棍反重力懸浮結構的過程中，我們一開始只是憑感覺抓出平衡，找出懸臂要打洞的位置，但是這樣的做法，每個人做出的結構都不一致而且容易歪斜。經過老師指導及測試後，我們發現將做好成對的主體結構分別懸吊起來，而連結兩成對懸臂的吊繩，必須穿過「重心」的鉛垂線上。如此一來，便能做出一致性佳且容易達到靜力平衡的懸浮結構。(圖 3~圖 6)



圖 3



圖 4

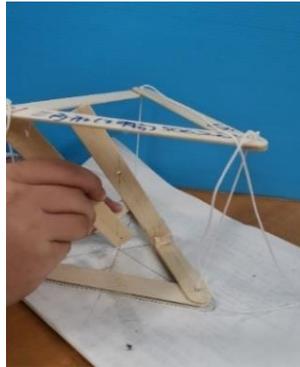


圖 5

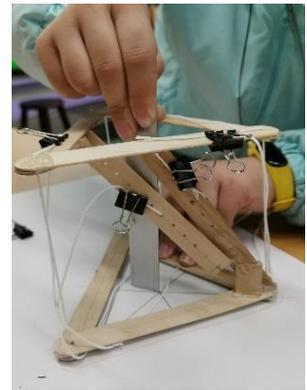


圖 6

利用懸吊支架，找出平衡的位置，發現平衡的關鍵點在「重心」鉛垂線

### 二、反重力懸浮結構，能不能載重?最佳的載重點在哪裡？

看似懸浮又似容易傾倒的反重力懸浮結構究竟能否載重？我們找到了達到平衡的關鍵，發現最佳載重點是在重心之上。我們實驗了幾種比較適合來測試載重的物品，例如米包、砝碼、迴紋針、長尾夾、水及紙杯等，分析各個物品的優缺點，最後選擇「紙杯」當作我們後續實驗測量的承重單位。另外，考量紙杯疊越高，會有重心偏移情況，因此我們將紙杯擺放在穩定的水平桌面上，計量出可堆疊之最高杯數 140 杯(圖 7)為極限合理範圍。也就是說只要承重在 140 杯以內的範圍，紙杯都可以作為我們載重實驗的有效單位(圖 8、圖 9)，並利用每個紙杯是 4.1 公克，來換算結構的最大載重量是多少公克。



圖 7



圖 8

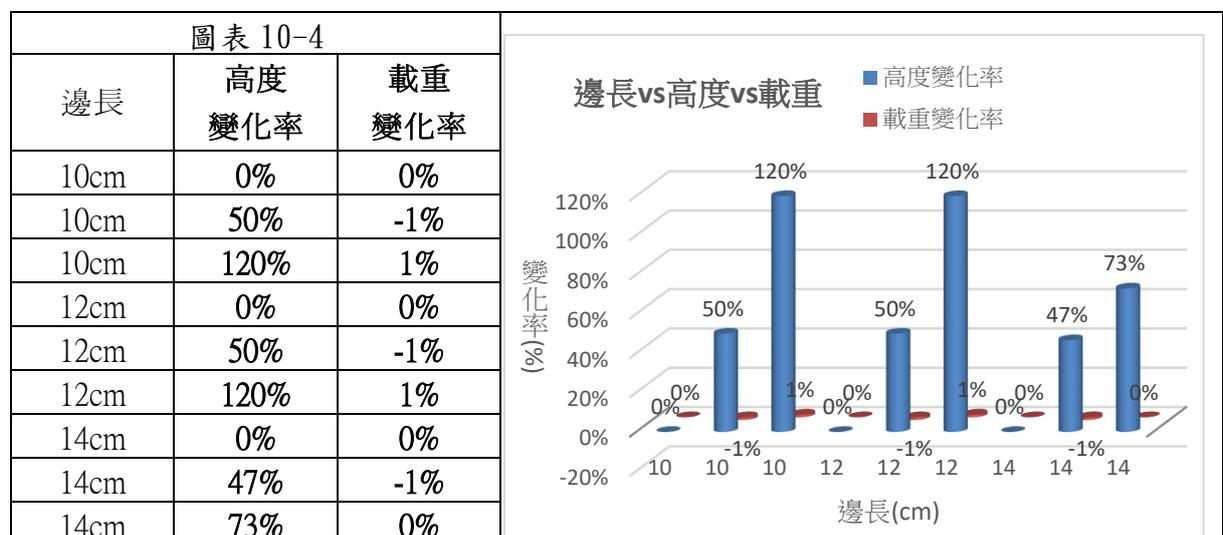
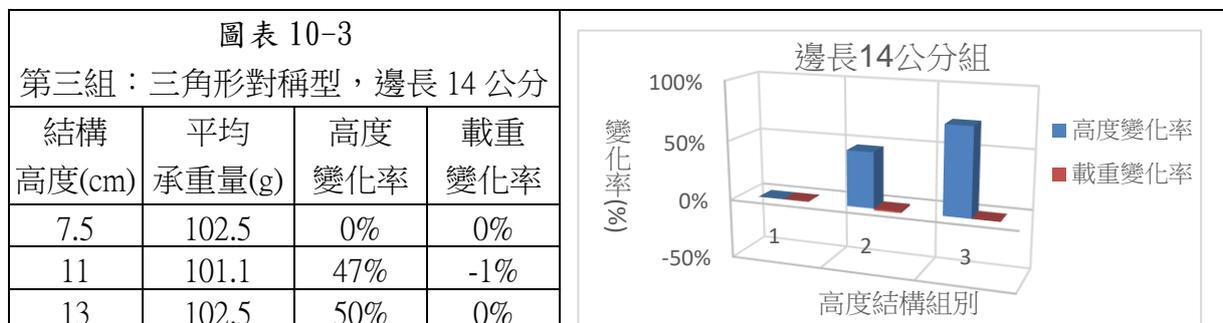
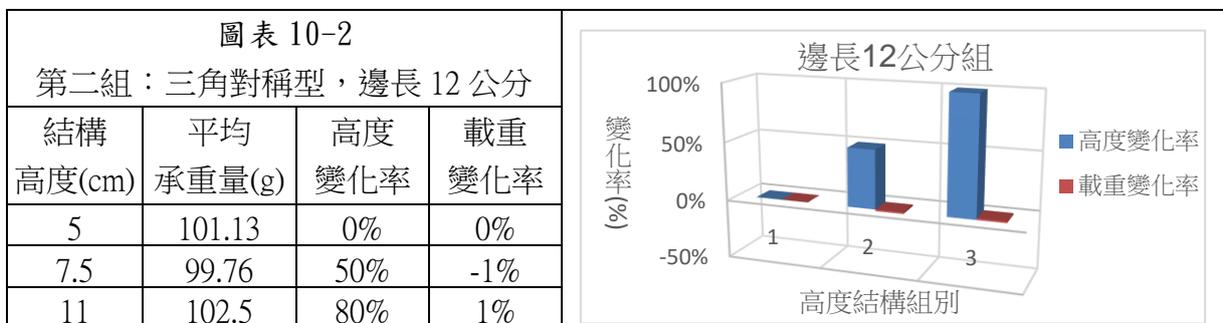
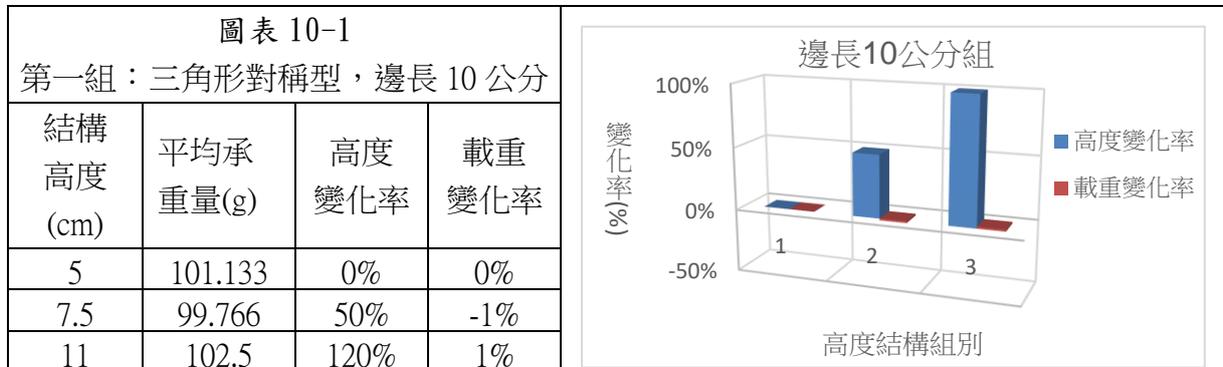


圖 9

### 三、改變結構的高度，對於反重力懸浮結構的載重量會不會有影響？

我們發現懸浮結構中的短線和整體結構的高度彼此間有應變關係，而邊長的改變也會影響懸臂的長度，我們歸納出這兩個因素對載重量的影響均沒有超過一個百分點，也就是說改變了結構高度或者構件邊長，對載重量的影響很小。

整理如圖表 10-1、圖表 10-2、圖表 10-3、圖表 10-4。



#### 四、反重力懸浮結構的形狀設計不同，對於載重量有何影響？

我們設計了不同形狀的對稱多邊形做載重量比較，發現六邊形的載重量勝過其他，相對於三角形而言，載重量可達兩倍之多，實驗結果見圖 10-1。針對完全對稱型與星型對稱型的比較，完全對稱型的載重量也都超越星型對稱型，實驗結果見圖 10-2。

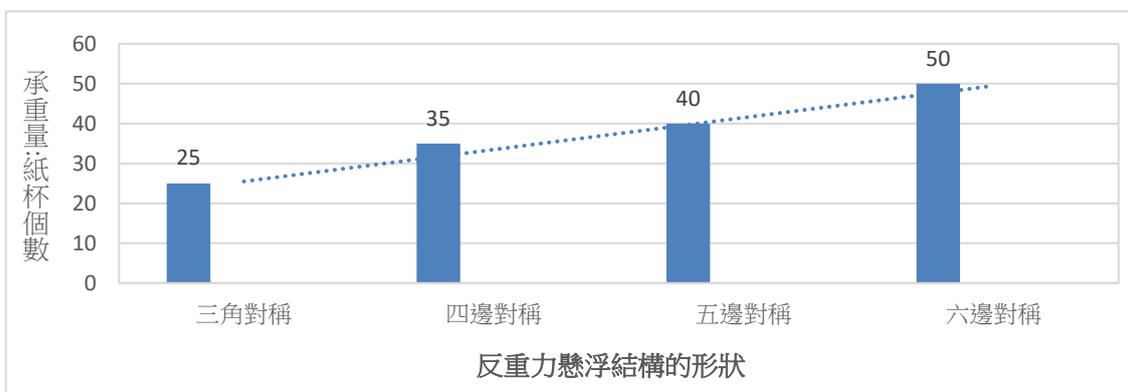


圖 10-1

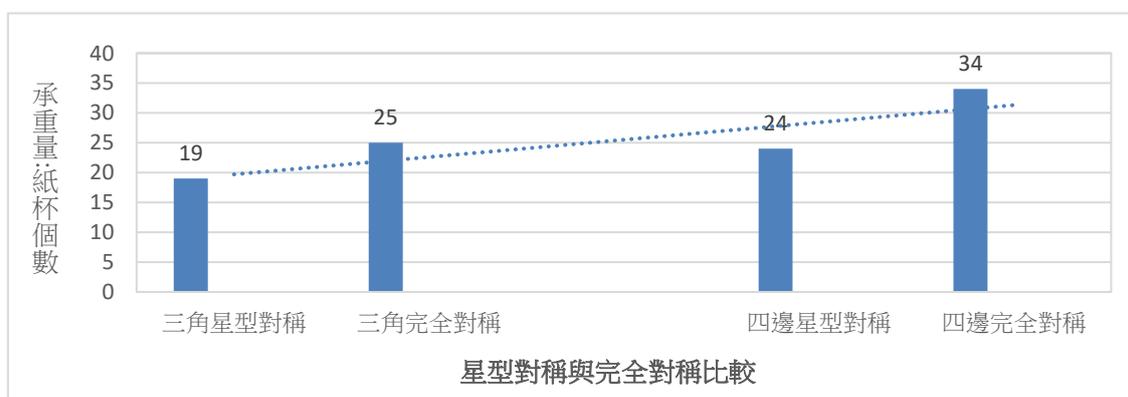


圖 10-2

#### 五、不同數量的懸臂結構，對於載重量有何影響？

我們針對三角形和四邊形來比較懸浮結構在單臂與雙臂下載重量的表現，實驗結果發現如圖 11，不論三角形或四邊形，雙臂的載重量都比單臂來得多，載重計量均達兩倍之多。

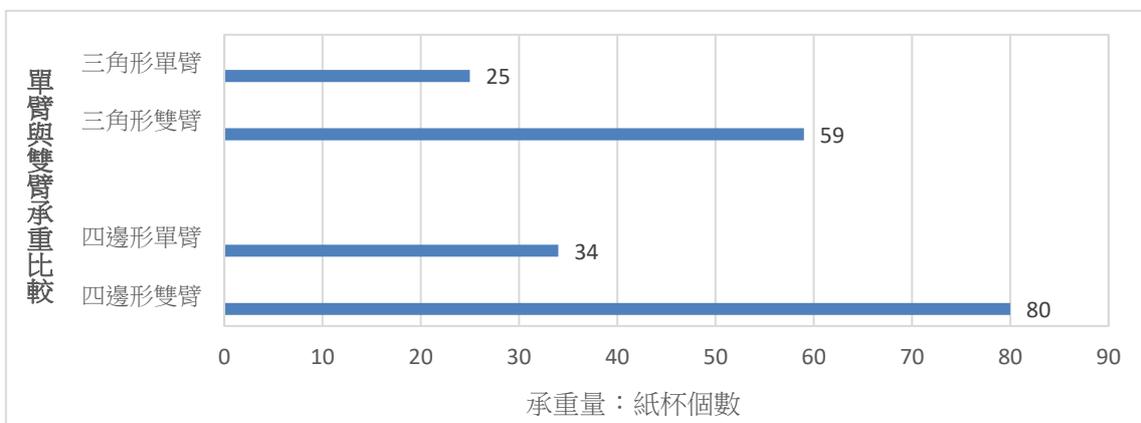


圖 11

## 六、不同角度的懸臂結構，對於載重量有何影響？

外加的載重，透過懸臂與主體結構的夾角變大，也就是越接近鉛錘線，那麼影響結構不穩定的水平分力則相對變小，進而提升結構承載重量的能力，結果見圖 12。懸臂角度與主體結構夾角越大，也就是越接近鉛錘線，載重量越大。

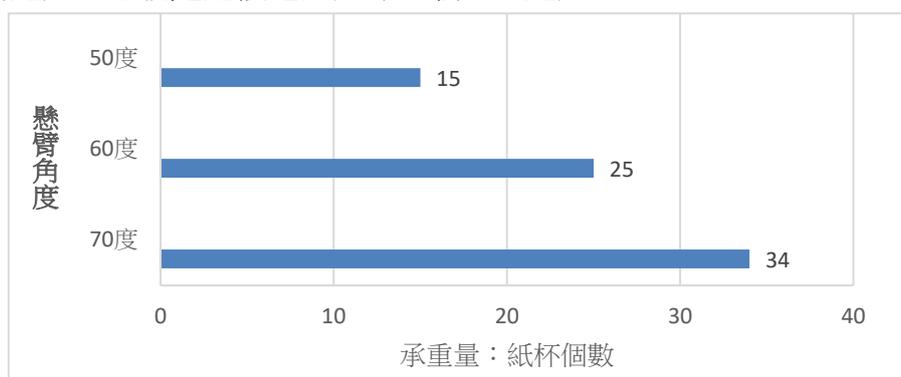
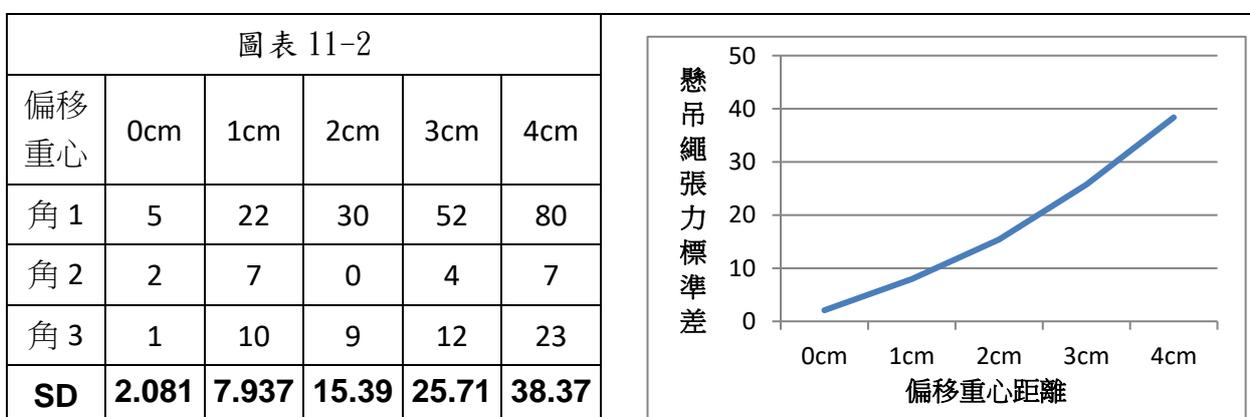
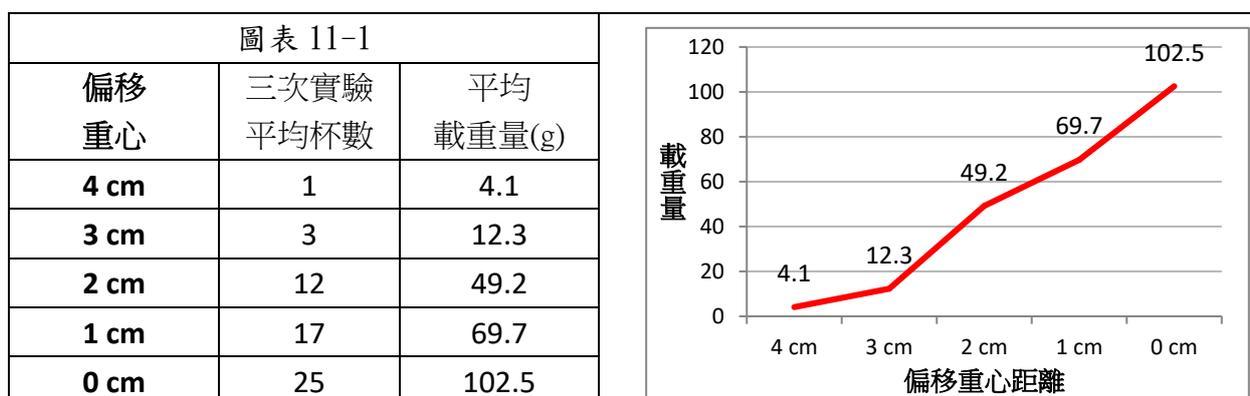


圖 12

## 七、檢測懸吊繩偏移重心不同距離的承重量，是否影響整體的靜力平衡？

在懸臂上改變了短繩懸吊位置後發現：當懸臂(烏龜腳)吊繩懸吊位置距離結構重心越近，拉張結構明顯越穩定，載重量增加，實驗結果見圖表 11-1。當懸臂吊繩懸吊位置和重心偏移的程度越大時，拉張繩所受的張力變異性也相對增加，見圖表 11-2。



## 八、懸臂之間不同材質的繩子鋼性結構，對於結構的載重量有何影響？

在發現整個結構載重關鍵在懸臂上的短線後，我們更換了懸臂間吊繩的材質，結果如圖 13。線材越粗，剛性越強，載重量越大。

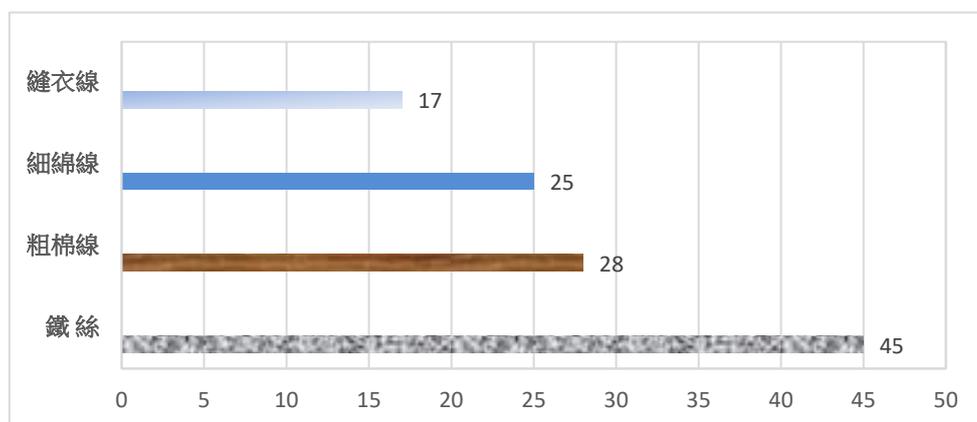


圖 13

## 九、反重力懸浮結構在載重時，四周長線的張力變化如何？

測量反重力懸浮結構的載重時，我們發現四周長線的張力，會隨著載重做調整與變化，使得力量的總和有著恆定的常數，結果如表 12、圖 14。當負載物增加，向下的力就是載重和結構支架的總重相加，此時，長繩的張力減小，維持在一個幾乎不變的常數值，這表示載重帶給整體張拉結構最重要的核心部位就是懸吊短繩。如此一來，因應載重量的大小，就可以計算出短繩所需要的拉力大小。向下的力會是懸浮結構支架重加上載重以及四周繩子張力的總和，如此可以得知短繩至少需要具備多少的拉張力。

各角 \ 載重杯數	負重 0	負重 10 杯	負重 20 杯	負重 25 杯
杯子重量(g)	0	41	82	102.5
角一繩子張力	80	70	50	40
角二繩子張力	60	50	40	28
角三繩子張力	70	50	40	40
杯子重量+長繩張力總和	210	211	212	210.5

表 12

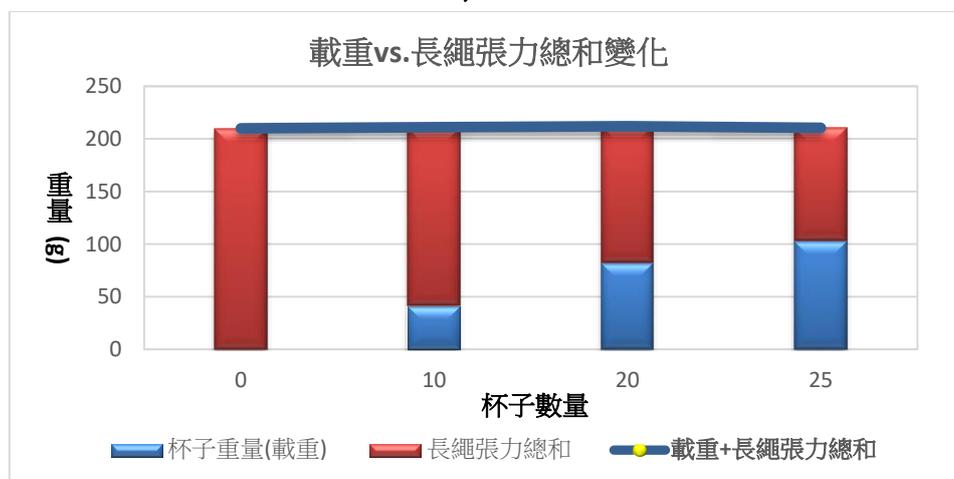


圖 14

## 陸、討論

- 一、在盲試了許多載重測量中，我們發現擺放重物的位置極容易產生出新的力矩，導致於結構歪斜，讓載重測量出現不穩定性，陷入無止盡的追逐平衡遊戲中。那是因為擺放的重物，是在懸浮結構達到靜力平衡後才加入，只要載重物放置的位置與結構重心的垂直線出現偏移距離，那麼新的力矩就會產生，結構會因此無法平衡而傾倒。
- 二、一般我們理解，認為結構高度改變，重心也跟著變高，因此結構容易傾倒。這件事和我們的結果：「高度不影響載重」，兩者之間並沒有互相矛盾。因為我們的載重是從結構上方擺放重物，而結構的傾倒是因為來自側面的外力，若是外力與重心之間並不存在垂直距離，那麼就不會有傾倒的新力矩出現。因此，只要將載重放置於重心之上，載重的重量大小就不是受到懸浮構件的高度來決定，而是其他更重要的因素。
- 三、反重力懸浮結構的形狀設計成不同數量的正等多邊形，從三角正多邊形、四角到六角形，意味著結構平面越來越接近於圓形，相對於三角形而言更穩定，因此載重量增加。
- 四、結構中彼此成對的懸臂由單隻變成一雙，雙臂可以抵消單臂所造成的結構上些微不對稱的弱點，因此有利於載重量的大幅提升。
- 五、透過懸臂(烏龜腳)吊繩懸吊的不同位置中發現，這個因素和結構穩定性有著絕對的關連性，一旦這個位置和結構重心重疊在同一條垂直線時，載重便成為可能。再透過剛性較佳的材質，那麼載更大的重，便是下一步可以精進探討的方向。模組化此反重力懸浮結構，可以應用在例如：交通工具避震系統、橋梁基座、防震大樓鋼筋基座等，在地震頻繁的台灣，未嘗不是一種新的嘗試。

## 柒、結論

- 一、我們發現「反重力懸浮結構」，一點也不反重力，相反的還十分巧妙的彼此拉張，一條懸吊短線向上和四周結構長線向下拉張，必須讓兩邊造成的合力及合力矩為零，才能達到靜力平衡。看似對稱的立體結構中，有兩個像蹺蹺板一樣的主體結構彼此拮抗著。上下方的結構透過一根懸吊繩連結，結構的對稱性和懸臂的位置必須讓力矩抵消，方能穩定。
- 二、一「臂」之力果然有「懸」技！原本我們認為結構的高度、冰棒棍的長度會影響反重力懸浮的載重能力，但實驗結果發現這些因素並不會影響載重大小。除了外形的多邊形、對稱性與懸臂角度對載重有影響外，最重要的關鍵便是短繩的懸吊位置以及載重物品的放置位置。
- 三、只要把重物放置在懸臂的重心垂直線上，懸臂的向上拉力就能穩穩地承載住重物與結構本身的重力和四周繩子的張力。此時，決定載重能力大小的關鍵因素就變成懸吊短線的位置和材質的剛性了。
- 四、懸吊短繩的位置若能越接近結構整體的重心，懸浮結構便能在測量載重能力時表現穩定，載重能力較佳；懸吊短繩的位置偏離重心越大時，結構本身越趨向不穩定，載重能力變差；四周圍長繩的拉張力量在相同的載重物放置時，出現較大的變化。如此可以證明結構不穩定的原因和短繩懸吊位置有決定性的關係。

五、懸吊繩的剛性由材質來決定，我們可以透過更換剛性更好的線材來決定懸浮結構的載重能力。同時透過實驗九可以發現，當載重力量變大時(在限度範圍內)，四周繩子的張拉力量會變小，張拉力量總和加上載重量一直維持一個常數。如此一來，只要算出四周繩子張力再加上結構整體重量，便可推算出短繩能夠負荷的拉力大小範圍，在未來應用上更安全精確。

## 捌、結語

### 一、結語

「反重力懸浮」結構由於穩定性不佳，過去多用在生活美學或藝術生活品味，偶爾創造出獨一無二的家具設計作品，但讓人驚艷之餘，生活實際運用的例子不多見！透過這次的科展研究，我們更清楚的掌握結構載重的關鍵因素，只要能精算出結構重心的位置和需要承載的重量大小，就能因應需求找出適合的材料，未來可應用在更多建造工程上。

### 二、心得

我們在這次科展學到了關於重心、靜力平衡和力矩的概念與知識，也學會怎麼製作反重力懸浮裝置，怎麼設計實驗，怎麼標準化實驗的流程，每一個步驟都要仔細不能大意。反重力懸浮結構看似容易製作，實際做起來，才發現處處是學問，光是一開始的手工打洞穿繩就要費一番工夫，還有怎麼使用熱溶膠組合裝置，對我們來說都是第一次經驗，但隨著製作的經驗越來越多，我們已經能精準根據實驗需求作出裝置；使用電動鑽孔器、熱溶膠等實驗器具也越來越上手，越做越有心得呢！我們還比賽誰做的裝置結構最穩定，載重能力最好。

從一開始還不太瞭解「反重力懸浮結構」到後來可以動手做實驗，在討論與實驗的過程中，我們發現了可能會影響實驗結果的因素，於是我們做了修改與補正。實驗過程中，原本我們認為高度、長度.....等會影響結構的載重，但透過變因的控制，實驗的結果竟然和我們想像不一樣，這真是有趣呢！科展的研究雖然漫長，但每一次實驗操作都有新的發現，和同學們討論鬥嘴，失敗再修正，互相打氣，最後看到成果，大家都蠻有成就感的！

同學們一起合作、一起實驗，看到每個人厲害的地方不一樣，真的學到很多，也了解到做實驗應該要有的態度與精神，是不能隨便的！我們也要感謝指導老師們，老師教我們正確的實驗方法，有時候卡關做不出來，但老師總能發現我們的問題，給我們很棒的引導，讓我們靈機一動。雖然一路上遇到了許多困難與挫折，但我們科展團隊的老師和同學們都會互相幫助、互相給予建議。不管這次參加科展的成果如何，大家都是盡心努力去完成的，也藉此讓我們對科學實驗及思考邏輯更上一層樓，真是難得的經驗！

## 玖、參考文獻資料

### 參考資料：

1. 翰林版 109 學年度四下教師手冊。
2. 翰林版 109 學年度六下教師手冊。
3. 【Fun 科學】反重力懸浮術(不靠超距力的誇張飄浮效果)  
<https://www.youtube.com/watch?v=xUC6a67mxLw>
4. 科學遊戲實驗室-趣味力學玩具  
<https://www.facebook.com/280057878830077/videos/2580630468852812>
5. 風靡全球的物理學「TENSEGRITY SCULPTURE」張拉整體結構  
<http://blog.s2u4o.com/youtube/tensegrity-sculpture/>
6. 小蝸撩創意「為什麼僅靠 3 根細線，就讓木頭懸浮起來?這不是魔術，這是科學」  
<https://www.youtube.com/watch?v=eQuKOV6lBP0>
7. 均一教育平台:力矩與轉動 <https://www.youtube.com/watch?v=MDRxeYa0hRA4>