

花蓮縣第 64屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

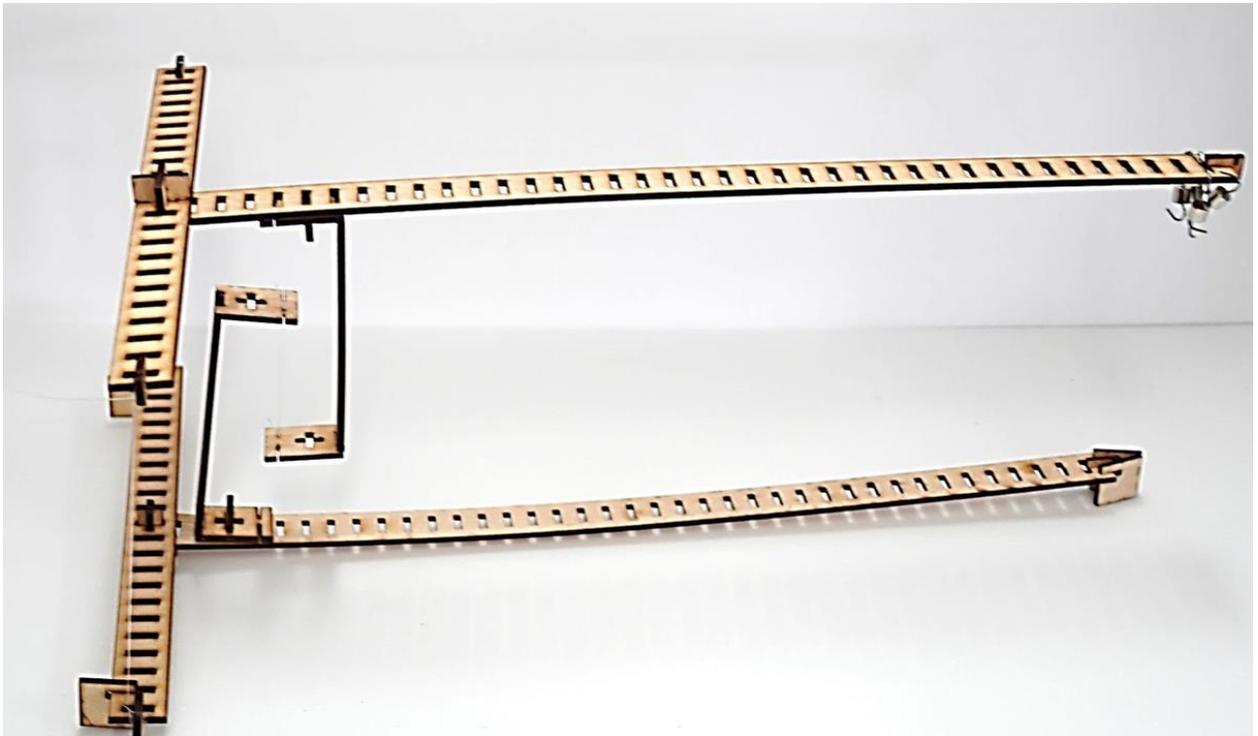
科別：物理科

組別：國小B組

作品名稱：三線式張拉共構體穩定性研究

關鍵詞：張拉共構體、三線式張拉共構體、槓桿原理（最多三個）

編號：



作品名稱：三線式張拉共構體穩定性研究

摘要

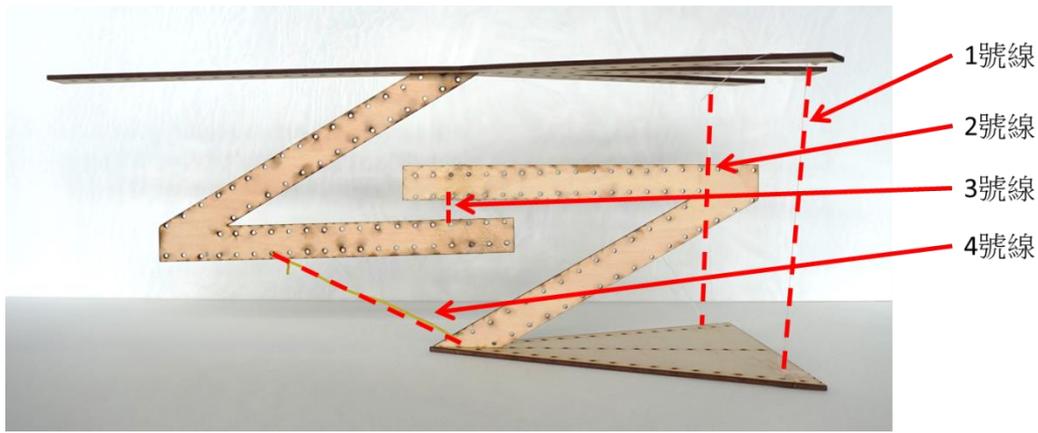
在網路上看到張拉共構體以常見的細繩使一個結構漂浮在半空中，想了解張拉共構體當中的原理。有一篇科展研究提到三條線的張拉共構體做不出來，想挑戰看看。經過很多嘗試與失敗，發現製作穩固的三線式張拉共構體方法及注意事項。在實驗中探討張拉共構體的懸浮特性：1.三線式的張拉共構體需要在上結構追加重物才能讓它穩定不翻倒。2.三線式張拉共構體的上結構有槓桿原理的特性。3.三線式張拉共構體的懸掛重物越重，越能夠承受一定程度的橫移晃動(因為只有三條線垂直於上、下結構，導致上結構可以左右晃動)。4.第3號線的位置越接近第1、2號線使上結構可以承受比較大幅度的晃動。重新設計張拉共構體三次，發現上結構懸浮隱藏非常多的物理原理。

壹、前言

一、研究動機與目的

因為在網路上看到類似的作品，它用日常生活中常見的細繩上下連接兩個物體，上面的物體竟然能懸浮在半空中，讓我產生強烈的衝擊。平常看到的都是繩子由下往上拉著讓物體懸空，但是我們看到的它是由上往下，所以看起來十分有趣，因此定了張拉共構體這個題目。

我們要透過此裝置的張拉力去研究作品的平衡。我們看了一些關於此題目的文章，當中桃園縣快樂國民小學寫的破解反重力懸浮術-運用力的平衡對抗重力(高滕悅等人，2021)，這一篇寫得最好，其中裡面提到裝置有四條線最穩固(圖一)，三條線無法平衡的說法，最令我感興趣的點是這篇科展研究中沒有提到只有三條線的裝置為甚麼不能平衡。在課餘時間我們用泡棉板、釣魚線，實驗了非常多次，採用了很多比例，才在無意間做出了只有三條線的張拉共構體，並且達到平衡。



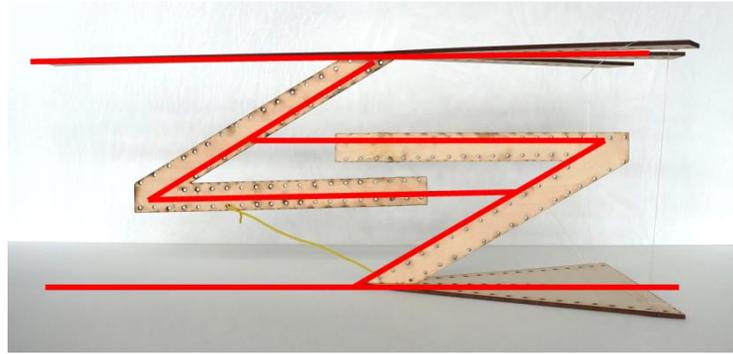
圖一、張拉共構體四條線之編號。

因此我們在這次的科展研究中，要更進一步了解如何製作出穩定的三條線之張拉共構體。

二、文獻回顧

張拉共構體又稱張拉整體，在 20 世紀中期被美國理查·巴克敏斯特·富勒創造出來的一個特殊力學結構，是透過繩線之間的「張力」所形成的「拉力」。上下兩個獨立結構透過數條繩子連結構成一個看起來懸浮在半空中的共構體(戴明鳳，2022 年)。

以富勒的說法，「以自然的機構，能運用最少的元素，行成堅固的結構。」。像桃園市快樂國民小學的科展研究-破解反重力懸浮術-運用力的平衡對抗重力，這篇就有作出四條細線的張拉共構體，且使它平衡，也提到這樣的結構非常穩定。他們一開始先試作各種不同形狀的張拉共構體，發現所有的張拉共構體結構都一定會有「互」字形的結構在中間(圖二)，這樣才能平衡，第二實驗他們試了張拉共構體需要多少線才能達到平衡，最終發現要四條以上的線才能達到平衡，但這點已在本研究的研究動機與目的驗證過，發現三條線其實也能做出張拉共構體。接著實驗 3、4、5 就只有測試裝置更平衡的方式，最終他們在結論中說明了互字形的張拉共構體更穩固。



圖二、張拉共構體的互字。

在康軒文教事業出的自然科學第六冊的第一單元就有教到與我們研究的三條線的張拉共構體有關的知識，像是我們把張拉共構體的第四條線改成使用額外重量就對應到地心引力的教學內容，用來取代第四條線的向下拉力。在力的平衡這一課中，也有提到「當在一條線中，兩端的拉力大小相同、方向相反時，物體就會不動，並達到平衡。」像在張拉共構體中上、下結構以數條繩子結合，透過繩子張力，使兩個結構出現懸空，但是結構穩定的張拉共構體，此時這些張力彼此達到平衡(如圖一)。

彈力是指物體被受力要回復狀態時所產生的力，但如果超過彈力限數就沒有辦法產生彈力，彈力發生時，應被彈力改變形狀的物體稱為施力物體，則受力的物體為受力物體，在本實驗中會以彈簧取代繩子，我們將用虎克定律來量測繩子的張力(康軒文教事業，2022；維基百科)。「虎克定律」是指彈簧受力後，其伸長長度具有規律性的變化，拉力越大彈簧長度就越長。彈簧的形狀、受力會符合虎克定律，及形成正比。也會有受力越大，改變形狀越大，的規律，且無論怎麼受力，一定會有再現性，除非超過彈力限數。彈簧的形狀、重量會形成正比，這種關係也叫做虎克定律，這中關係能用彈力係數 $F=k \times D$ ， F 是力， k 式彈力係數， D 則是形狀改變的程度(維基百科)。

在我們的研究中將會運用到槓桿原理，被物體給施力的點稱為施力點，抵抗整個槓桿的力是抗力點，抗力點到支點的距離是抗力臂，施力點到支點的距離則是施力臂，抗力矩是指抗力的大小乘以抗力臂，施力矩就是指施力的大小乘以施力臂，因此當施力矩=抗力矩時，就會平衡。

貳、研究設備及器材

設備：電子秤、電腦、簽字筆、照相機、雷射切割機、直尺、剪刀、砝碼(20g)、砝碼(2g)、小刀

材料：、3D 列印材料 PETG 1.75mm、電線、、熱熔膠條、彈簧(10X80mm)、釣魚線、快乾 CA-260、快乾加速劑、KT 板(5mm)、椴木板(3mm)、電線、吸管

參、研究過程

一、實驗過程

我們一開始依據「破解反重力懸浮術-運用力的平衡對抗重力」，實驗一先試著做只有三條線的張拉共構體，就像這篇科展題目所說的三條線的張拉共構體是做不出來的(高滕悅等人，2021)。會一直倒掉。在失敗過程中我們發現張拉共構體的上結構會一直往後倒，為了避免他一直往後倒，所以我們就試著拿重物放在前端增加重量，後來竟然被我們做出來了，但是仍然不穩定。於是我們根據四條線的張拉共構體和三條線的張拉共構體，拿去比較，發現三條線的張拉共構體是把四條線的張拉共構體的第四條線去除，原本第四條線的往下拉的功能，改成前端使用重量去取代第四條線的拉力。

接著我們先在 Tinkercad 中做了一個模擬的張拉共構體，再用雷射切割作出我們設計的張拉共構體，我們的設計是在上結構上在正中間加了一根有大量小洞的桿子並且盡量往前延伸，當作前端的重物。後來發現前端的木頭重量不夠，仍然需要加重物在前端，讓張拉共構體不至於倒下。實驗二中，我們又想用彈簧代替所有的釣魚線來測出線的拉力，但發現張拉共構體中的彈簧一直會晃，沒辦法立起來。在實驗三，我們根據第一個實驗的張拉共構體重新設計了它的結構。為了方便重物的懸掛，把原本上結構中的小圓孔改成了長方形孔。為了方便釣魚線能固定在上下結構之間，我們設計了可以固定釣魚線的插梢，以及 L 形的孔。試著找出平衡下的張拉共構體之施力點(重物)與支點的距離、重物的重量之間的關係是否符合槓桿原

理。

在進行這些實驗的過程中，我們問了以下的問題：

實驗一、三條線的張拉共體真的做不出來嗎？

實驗二、使用彈簧去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力。

實驗三、張拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

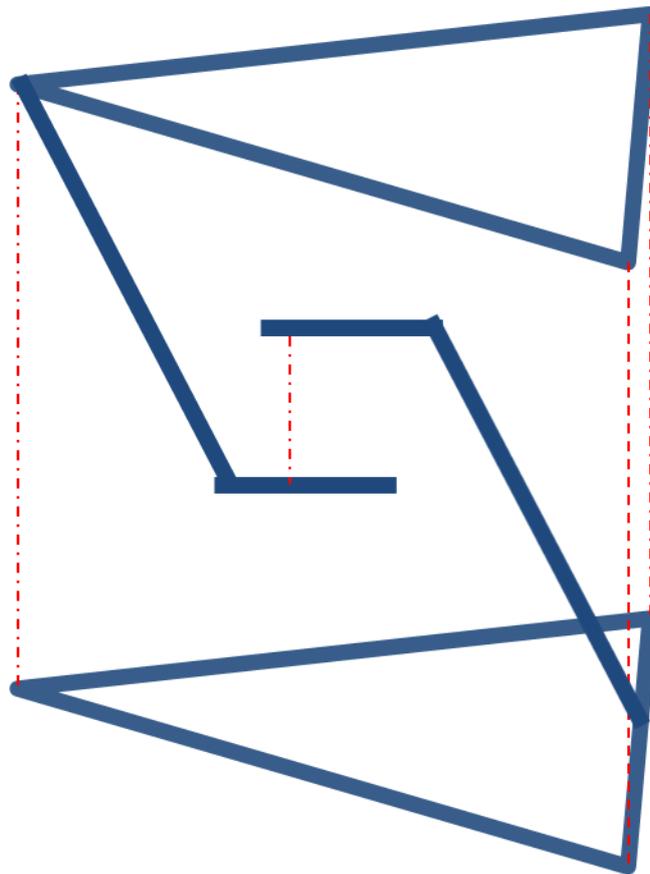
二、實驗一：三條線的張拉共體真的做不出來嗎？

(一) 目的：

依據前人的研究中(高滕悅等人，2021)，三條線的張拉共構體無法做不出來，於是在本實驗中試著做出三條線的張拉共構體。

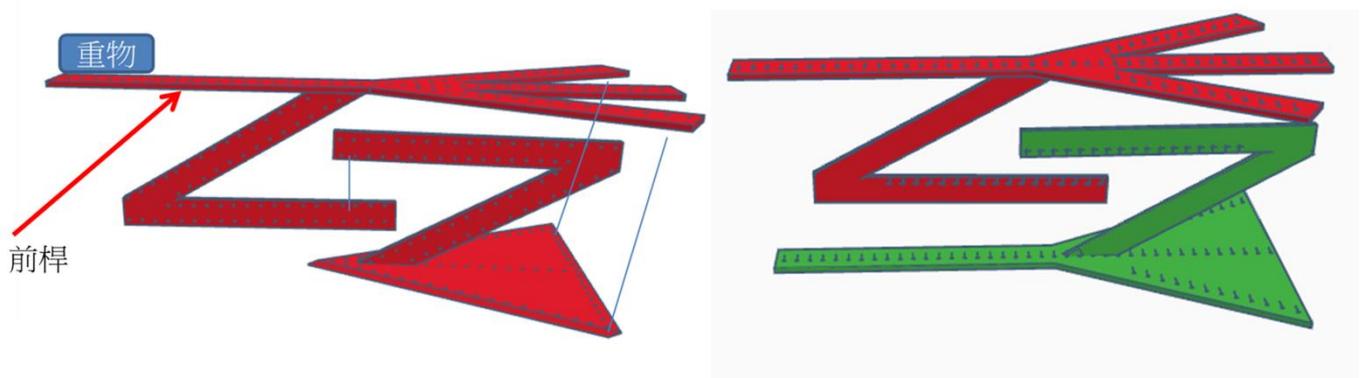
(二) 實驗操作方式：

1. 依據前人的科展內容，做出內容中四條線的張拉共構體(圖三)。



圖三、前人科展內容中的四條線張拉共構體。

2. 先做出平衡的四條線張拉共構體，拿出剪刀把第四條線剪斷。
3. 觀察剪斷的瞬間張拉共構體的變化。
4. 在此，我們的假設是三條線張拉共構體會往後倒下的原因是因為前端失去一個往下的拉力，以至於往後倒。在張拉共構體前端加重物品，來替代第四條線的拉力，直到它的上結構不再往後倒為止。
5. 依據實驗設計的需求，在 Tinkercad 網站上設計出新的張拉共構體，在張拉共構體上設計大量的小圓孔，以方便釣魚線固定在結構上(圖四左)。
6. 用快乾將上、下結構組合。先用釣魚線將上下結構中的第三條線以上、下結構懸浮時不互相接觸到的狀態下進行黏合。
7. 第一號線用快乾與釣魚線黏合。第一號線的長度要確保上結構在懸浮時會保持水平的狀態。再黏第二號，第二號線的長度要和第一號線一樣長，並確保上結構懸浮時會保持水平狀態。
8. 此時的張拉共構體仍然會往後倒，觀察張拉共構體往後倒的反應，適當的追加重物，觀察隨著重物的重物增加是否可以讓上結構達到穩定。



圖四、左為第一代張拉共構體，右為第二代張拉共構體含方孔。

三、實驗二、使用彈簧去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力。

(一) 目的：運用虎克定律，用彈簧替代釣魚線來測出拉力。

(二) 假設：

假設把釣魚線改成彈簧，在張拉共構體穩定的情況下，藉由彈簧長度改變的程度，透過虎克定律來回推出釣魚線當時的拉力。

(三) 步驟：

1. 先繪製出三個彈簧的重量-彈簧拉升長度折線圖。
2. 把釣魚線全部改成彈簧，調整至張拉共構體平衡為止。
3. 量測每個彈簧的長度，藉由彈簧伸長長度，推算釣魚線的拉力。

四、 實驗三、張拉共構體的上結構外加了重物是否每一個位置所需的重量都一樣重？

(一) 目的：

為了瞭解張拉共構體上結構懸浮所需的力大小，在這個實驗我們將在前桿的每個地方，是否重量都一樣。

(二) 觀察方法：

1. 假設：在初步觀察的前提下，若重物懸掛在前桿的最前方時。會比懸掛在靠近第三條線位置所需的重量還要輕。若將該重物往第三條線位置靠近，上結構會倒下來。

五、 實驗四、張拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

(一) 目的：

在製作過程中，我們發現前端加重量，只要很輕的物品例如：橡皮擦，就能保持平衡，但是當橡皮擦越靠近張拉共構體上結構的第三條位置時，就需要改用更重的物品，才能讓上結構保持懸浮。於是我們得出了一個結論，越靠近第三條位置就需要越多的重量，離第三條位置越遠只需要較輕的重量就能平衡，這現象很像槓桿原理。

因此本實驗要確認，物體與距離和重量平衡的關係，是否與槓桿原理有關。

(二) 觀察方法：

1. 假設：若重物與距離關係與槓桿原理有關，則重物的重量乘以重物到第三條

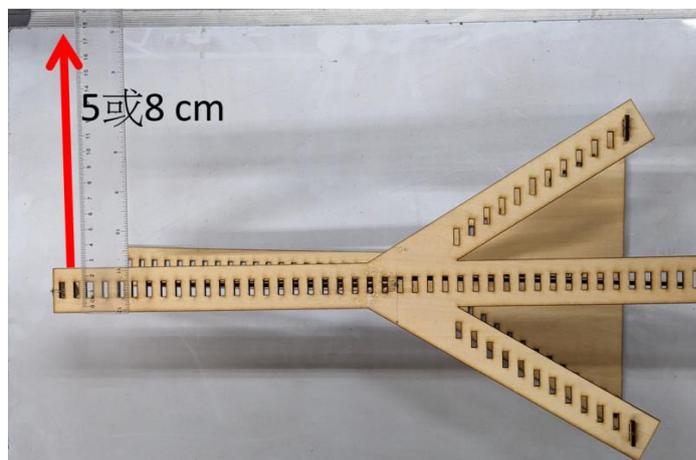
線的距離，會有一個最小定值。

2. 操縱變因：重物到第三條線的距離。
3. 應變變因：保持上結構懸浮的穩定重量。
4. 為了要在前端任意的放置釣魚線，於是我們在 Tinkercad 網站上設計出有小方孔和為了方便增加重量的前桿，接著用厚 3 釐米的木板，再用雷射切割機做出上、下結構。
5. 用快乾將上、下結構組合。(圖四左)
6. 先用釣魚線將上下結構中的第三條線以上、下結構懸浮時不互相接觸到的狀態下進行黏合。
7. 第一號線用快乾與釣魚線黏合。第一號線的長度要確保上結構在懸浮時會保持水平的狀態。再黏第二號線，第二號線的長度要和第一號線一樣長，並確保上結構懸浮時會保持水平狀態。
8. 此時的張拉共構體仍然會往後倒，於是我們繼續在前桿上逐漸增加重量，直到上結構懸浮不會倒為止。紀錄該距離所需的最小重量。

六、實驗五、前桿重物重量對晃動幅度穩定度的影響

(一) 目的：無意間發現張拉共構體前桿加重物，重量與距離有一定的關係，若加的重物越輕只要一點的力，張拉共構體就會倒下，於是這個實驗我們將要做一個對張拉共構體前桿加重物的晃動測驗。

1. 動上結構的第四條線連接點 5、8 公分，找出維持平衡下最小掛的重物重量。



圖五、晃動實驗的移動方式。

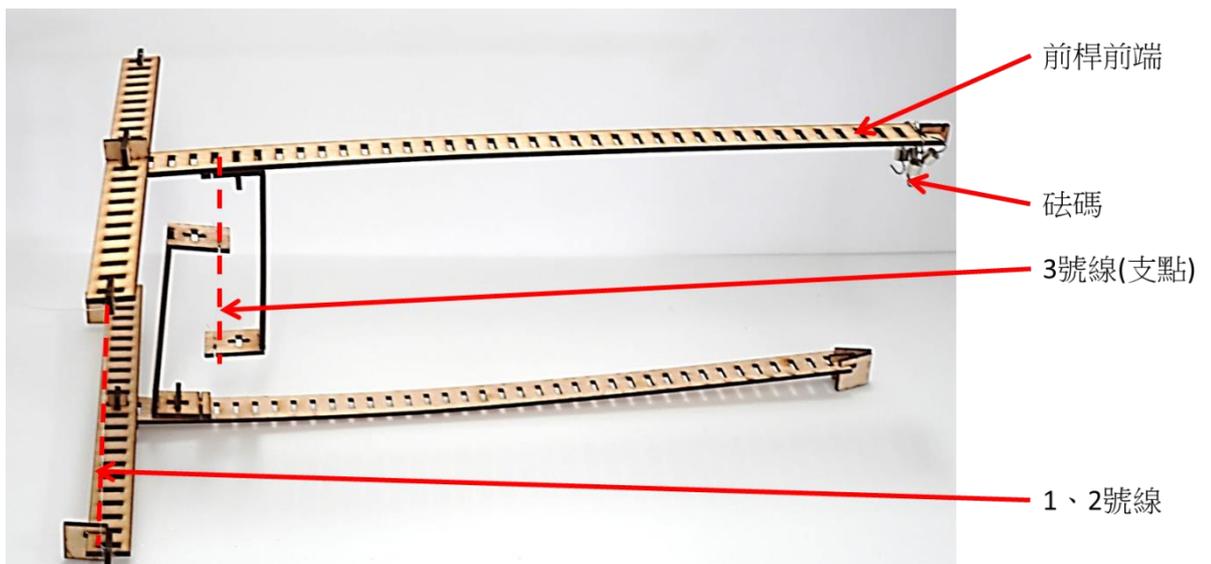
(二) 觀察方法：

1. 假設：上結構晃動的幅度越大、重物到的三條線位置的距離越短，張拉共構體上結構所需的前桿重物越重，。
2. 操縱變因：重物到第三條線的距離和上結構的晃動幅度。
3. 應變變因：張拉共構體前桿上的重物重量。
4. 先在張拉共構體前桿上加重物，在前方放一把尺，並以橫向推動到五或八公分，要是倒下就持續追加重物，推測每個位置加重物的重量。

七、實驗六：晃動極限測試

(一) 目的：

為了實證張拉共構體中只使用三條線也能成功穩定懸浮，所以我們製作了第三代張拉共構體(圖六)，並在上下結構中做出長方孔，並把後面的部位去除，做成橫向的 T 形，讓上下結構長的一樣。本實驗要做晃動測驗，為了找出張拉共構體最大晃動長度且重量最小的第三條線位置。



圖六、第三代張拉共構體。

(二) 觀察及提問：

考慮到張拉共構體的前桿和下結構的三角形邊緣圓孔行成直線，於是我們把上下結構都做成 T 形，這樣上下結構就不會行成直線，以方便它晃動測驗較不會倒，也使張拉共構體更穩定。對於這次的實驗我們提出了以下問題:

1. 張拉共構體晃動測驗是第三條線位置越靠近前桿前端，晃動幅度的極限就越小?
2. 張拉共構體晃動測驗是第三條線到哪一格長方孔會無法移動?
3. 第三代張拉共構體能否以不加重的情況下懸浮。

(三) 假設:

晃動測試第三條線位置越靠近後面晃動幅度的極限就越小。

(四) 實驗設計：

- (1) 在 Tinkercad 上設計出張拉共構體上下的長方孔，並把前桿做成橫向，讓上下結構形成 T 形，再做出固定釣魚線的卡榫。
- (2) 用雷射切割機把各零件切出來，再用卡榫把中間第三條線固定，另外第一、二條線用快乾黏合。
- (3) 確保張拉共構體上結構前後左右水平，若張拉共構體前後沒有水平，可以用砝碼加重，若左右沒有水平，則要調整繩子長度。
- (4) 以橫向推動前桿前端，觀察並記錄前桿前端位置移動的極限
- (5) 逐漸移動第三條線往前桿前端，測試每個位置點的幅度晃動實驗。

肆、研究結果

為了製作出穩定的張拉共構體，我們慢慢的做了許多的實驗，在做實驗過程中我們發現了許多意外的事情，有些甚至引響了實驗，但我們還是做了一些改正，重新進行實驗。我們先模仿其他文獻，製作了四條線的張拉共構體，接著又製作了三條線的張拉共構體發現張拉共構體會不斷倒下，於是我們再做一個四條線的張拉共構體，並拍照錄影張拉共構體第四條線剪斷時的模樣，發現張拉共構體會有規律地往一倒下。於是我們製作了有前桿、和後面部分的第一代張拉共構

體，因為我們想到能在前桿上加重，代替第四條線，就能以三條線的方式穩定平衡。接著我們想用彈簧代替釣魚線去推測出釣魚線的拉力，但發現彈簧不像線一樣會晃、倒下，因此放棄。

然後我們又想測試張拉共構體是否符合槓桿原理，為了方便實驗我們做了第二代張拉共構體，我們將圓孔改成相距一公分的長方孔。我們用第二代張拉共構體進行晃動測驗，最後發現每次懸掛的重物重量都不一樣，懸掛越前端，所需的重物重量就越輕，懸掛點越靠近第三條線，所需的重物重量就越重，也發現前桿和下結構三角形邊緣行成直線時會倒下。

最後我們最了第三代張拉共構體，為了解決前桿和三角形邊緣行程直線會倒下的問題，我們將上下結構都作成 T 型，並進行晃動實驗，最終發現第三條線位置越靠近後面晃動幅度的極限就越小、越靠近前面晃動幅度就越大，因此第三條線的位置放在第一格是最堅固的。

一、 實驗一：三條線的張拉共體真的做不出來嗎

根據前人的研究，三條線的張拉共構體不能做出來，於是我們要驗證是否真的做不出來。首先我們根據前人的科展文獻做出四條線張拉共構體，並錄影把第四條線剪斷的瞬間，觀看張拉共構體會往哪個方向倒。為了方便實驗，我們做了上下結構上有小圓孔的第一代張拉共構體，繼續在張拉共構體前端加重直到不會倒下。

二、 實驗二：使用彈簧去替代釣魚線用來測定這條繩子的拉力

運用虎克定律，用彈簧替代釣魚線來測出拉力，但後來發現張拉共構體以彈簧代替釣魚線，彈簧會晃以至於張拉共構體上結構倒下。

三、 實驗三：張拉共構體的上結構外加了重物是否每一個位置所需的重量都一樣重？

將重物懸掛在張拉共構體的前桿上，觀察重物在張拉共構體上的哪個位置

上張拉共構體會穩定。最後發現重物懸掛在越後面越穩定，越接近第三條線位置就為需要更多的重物。

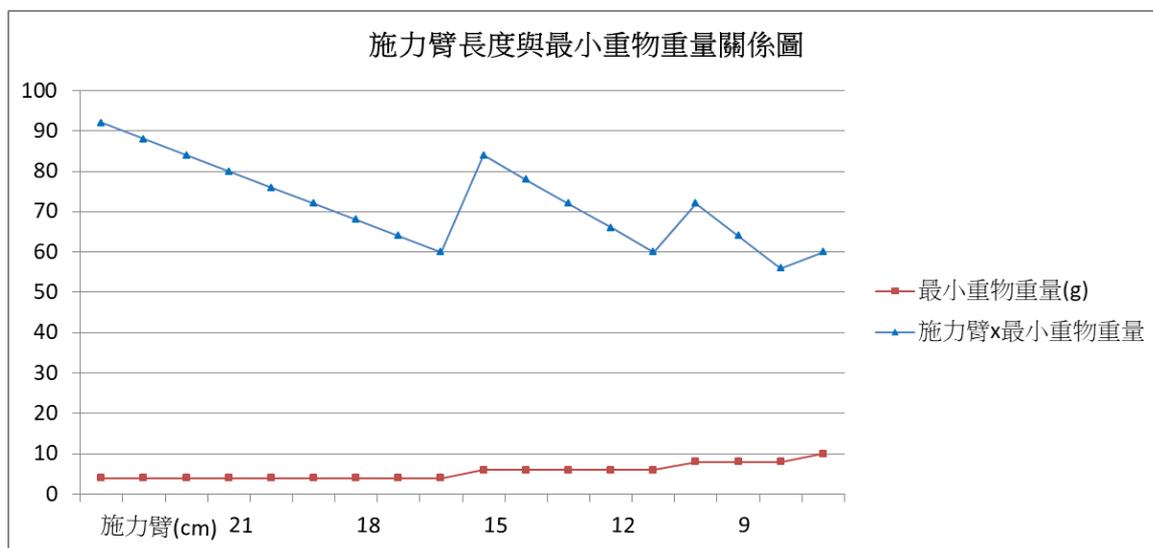
四、實驗四：張拉共構體的上結構外加了重物是否符合槓桿原理？

透過實驗三我們發現張拉共構體，重物懸掛在前桿的最前方時。會比懸掛在靠近第三條線位置所需的重量還要輕。若將該重物往第三條線位置靠近，上結構會倒下來，的關係很像槓桿原理，於是做了第二代張拉共構體，並在每個固定距離，觀察所需的最小重量。

表一、施力臂長度與最小重物重量關係紀錄表。

施力臂(cm)	最小重物重量(g)	施力臂 x 最小重物重量
23	4	92
22	4	88
21	4	84
20	4	80
19	4	76
18	4	72
17	4	68
16	4	64
15	4	60
14	6	84
13	6	78
12	6	72
11	6	66
10	6	60
9	8	72
8	8	64

7	8	56
6	10	60



圖七、施力臂長度與最小重物重量及施力臂乘以最小重物重量關係圖。

在實驗四的實驗中，把實驗結果記錄在表一。我們將表一的實驗結果繪製成折線圖，如圖七。我們發現放在前桿前端的最小重物重量會隨著施力臂越短，所需的重物重量就越重。根據槓桿原理，施力矩是施力臂長度乘以施力大小，於是我們將最小重物重量乘以施力臂長度，繪製在圖七的藍線。我們發現藍線呈現鋸齒狀，因為在實驗時每增加砝碼最小重量就是兩公克，也許槓桿所需的重量會落在 1.5 克重左右，若能找出更小的重量，線可能會呈現直線。另外我們發現施力臂大小最小重物重量的積低於六十以下，張拉共構體的上結構就會倒下(測到最小的積是 56)。

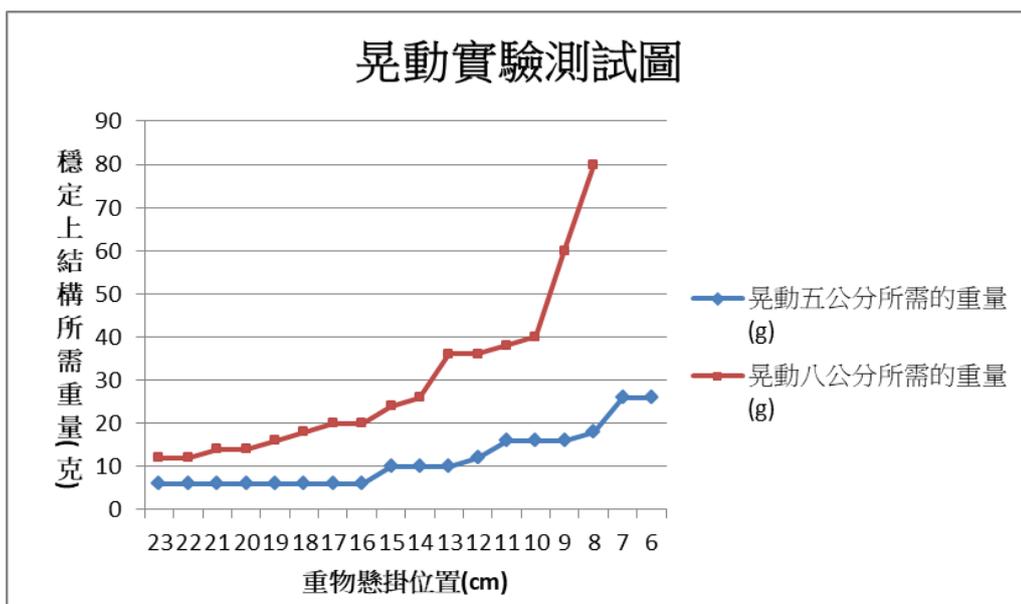
五、實驗五：前桿重物重量對晃動幅度穩定度的影響

張拉共構體上結構懸掛砝碼，重量與距離有一定的關係，於是針對這個關係我們做了對張拉共構體前桿加重物的晃動測驗。發現張拉共構體上結構橫向移

動到 5 或 8 公分時會倒下，是因為張拉共構體上結構前桿和下結構的三角形邊緣行程直線會倒下。

表二、晃動實驗測試表。

重物懸掛位置(cm)	晃動五公分所需的重量(g)	晃動八公分所需的重量(g)
23	6	12
22	6	12
21	6	14
20	6	14
19	6	16
18	6	18
17	6	20
16	6	20
15	10	24
14	10	26
13	10	36
12	12	36
11	16	38
10	16	40
9	16	60
8	18	80
7	26	過重
6	26	過重



圖八、晃動實驗測試折線圖。

在圖八，我們將表二的實驗過程'結果也做成折線圖，分為晃動五公分和晃動八公分的重量。實驗當中發現晃動越遠，所需的重量越重，如果晃動幅度超過九公分張拉共構體就會倒下，表示懸掛物越重、懸掛距離越遠，則上結構越穩定。還發現重物越接近第三條線時，晃動保持穩定所需的重量就越重。在該實驗中，亦有發現距離越遠重物越輕的現象，符合槓桿原理。

六、實驗六：晃動極限測試

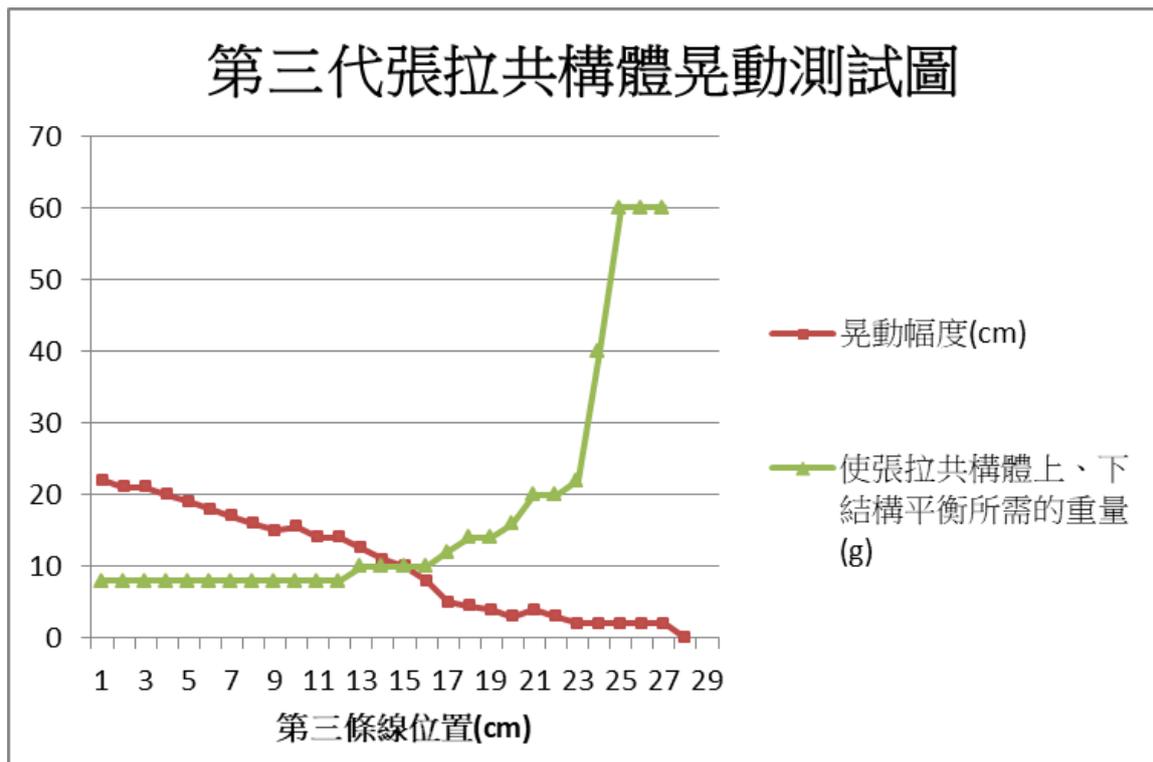
經歷實驗五我們打算讓張拉共構體更加穩固，於是做了第三代張拉共構體，要用它找出最穩定的第三條線位置。我們將張拉共構體的第三條線位置不斷前進(遠離第 1、2 號線的距離)，若倒下就持續加重(如圖九)。

我們將第三代晃動實驗做成折線圖。最終得出結論是張拉共構體第三條線在前桿後端時越穩固，可以忍受的晃動幅度就越大，若越接近前桿前端，則上結構越不穩固，甚至無法平衡，因此第三條線位置在最接近前桿後端的位置是最穩定的，最可以忍受大幅度的晃動。發現張拉共構體第三條線位置越靠近前桿前端縮需重量越重，晃動幅度越小，最後的第 28、29 公分時甚至無法使張拉共構體平衡。

表三、第三代張拉共構體晃動測試表。

第三條線位置(cm)	晃動幅度(cm)	使張拉共構體上、下結構平衡所需的重量(g)
1	22	8
2	21	8
3.	21	8
4	20	8
5	19	8
6	18	8
7	17	8
8	16	8
9	15	8
10	15.5	8
11	14	8
12	14	8
13	12.5	10
14	11	10
15	10	10
16	8	10
17	5	12
18	4.5	14
19	4	14
20	3	16
21	4	20
22	3	20
23	2	22
24	2	40

25	2	60
26	2	60
27	2	60
28	因過重而無法測試	
29		



圖九、第三代張拉共構體晃動測試折線圖。

伍、討論

根據前人的研究，三條線的張拉共構體不能做出來(高滕悅等人，2021)，於是我們要驗證是否真的做不出來。首先我們根據前人的科展文獻做出四條線張拉共構體，並錄影把第四條線剪斷的瞬間，觀看張拉共構體會往哪個方向倒。最後得知上結構都是往後翻倒，於是我們該開始在前端加上重物，後來算是蠻穩定的。

在第三個實驗中，我們仍在摸索三線式的張拉共構體穩定方式。我們觀察到在上結構放置重物的位置是有趨勢的，放在越遠離第 1、2 條線的位置會越穩定，而且也有觀察到似乎離 1、2 號線越近的時候，需要的重物就會越重。

因此我們在實驗四又進一步的重新設計作品(如圖四)。藉此可以透過等距的孔洞來懸掛各種不同重量的重物來是著穩定上結構(如圖七)。我們觀察到懸掛的距離越遠，所需的物體重量就越輕，移往接近 1、2 號線的位置時，就會慢慢不穩定而倒下，需要繼續追加重物的重量。繪製在圖七的藍線。我們發現藍線呈現鋸齒狀，因為在實驗時每增加砝碼最小重量就是兩公克，所以當發現上結構不穩定而增加重量時，每一次就是兩公克，導致懸掛物品的重量與長度的積在圖七的折線圖中呈現鋸齒狀，而且距離越遠鋸齒就越嚴重。積在在該裝置的實驗中發現只要低於六十以下，張拉共構體的上結構就會倒下(測到最小的積是 56)。

在實驗四的實驗中，發現穩定度的測試可以使用讓上結構前端橫移的距離與上結構是否傾倒的關係進行觀察，而且物體越重而上結構似乎對橫移的距離忍受度越大。於是，我們在第二代的張拉共構體作了方便進行懸掛物品的修改，並進行 5、8 公分的橫移實驗。發現隨著晃動幅度越大、懸掛重物位置距離 1、2 號線的距離越近，需要的物體重量越重。

在實驗中四，我們發現一旦上結構前桿前端與第三條線及第一或第二條線連成一線，上結構一定倒塌，於是我們又設計了實驗五，讓第三條線的位置可以被調整。藉此研究第三條線位置與張拉共構體穩定性的關係(實驗結果如圖九)。我們發現當第三條線位置的數字越大(距離前桿前端距離越近)，就如我們之前實驗的，平衡所需要的重物重量就越大，另外，我們也發現當第三條線距離前桿前端越近(距離第 1、2 號線越遠)，能夠承受的橫移幅度就會越小。

陸、結論

根據前人的研究，有提到四條線的張拉共構體非常穩定，所以我們以四條線的張拉共構體為基礎，找出製作三條線張拉共構體的訣竅。四條線時，其中一條負責提吊張拉共構體的上結構，另外三條線負責往下拉住、固定上結構，使上結構不會傾斜或旋轉；當剩下三條線時，仍然需要一條線往上拉，剩下兩條線往下拉，平面物體需要三個著力點才能穩固，否則會出現傾斜倒下的問題，所以我們後來發現可以直接在原本第三個點

加上重物，充當往下的拉力，就可以讓物體懸掛起來。

用物體重力當作向下拉力會有一個缺點，就是沒有橫向穩固上結構扭轉的力，會變得不穩固、容易偏轉。經過這次實驗，我們預測：如果持續想辦法用地心引力減少線的數量，有機會做出只有兩條線的張拉共構體，但是會變得比較不穩定。

我們本來想使用釣魚線全部更換成彈簧，運用虎克定律，用彈簧替代釣魚線來測出拉力，但後來發現張拉共構體以彈簧代替釣魚線，彈簧會晃動導致沒辦法上結構沒辦法穩定的懸浮。還是很希望接來有機會可以測量當下繩子的拉力，進一步了解張拉共構體的張拉力關係。

在研究三線式張拉共構體的過程中，我們發現如果要作出穩定的三線式張拉共構體，有一些條件需要滿足：

第一個條件：上結構的前桿前端要設計得比較長，用以懸掛重物，懸掛的重物重量與距離第三條線距離的積需要維持在一定的數值以上才能避免上結構倒下。如果前桿夠重，就可以取代懸掛重物的重量。

第二個條件是上結構的槓桿現象。懸掛物距離第三條線的距離越長，保持上結構穩定所需要的重物重量就越輕；越近則需要越重的懸掛物。

第三個，懸掛比較輕的懸掛重物時，上結構比較不能承受太大的搖晃幅度。懸掛比較重的懸掛物有助張拉共構體發生側向搖晃的忍受力較強。

第四個，我們發現不管懸掛的重物多重，只要張拉共構體上結構前桿、第三條線和下結構的三角形邊緣形成直線會倒下，也就是說第三條線與 1、2 號線的位置也會影響上結構發生側向搖晃時的忍受範圍。也就是說第三條線的位置越接近第 1、2 號線的連接處，上結構越穩定；如果第三條線的位置離第 1、2 號線距離越遠，上結構越不穩定，容易因為一點點晃動，就倒下來了。

柒、參考文獻資料

高滕悅、胡起元、陳品萱、邱秀蓮(2021 年)。破解反重力懸浮數-運用力的平衡對抗重力。

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會作品說明書。取自

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-080108.pdf?0.17991876020096242>

戴明鳳(2022 年)。張拉整體結構的發展史與其應用。科學研習月刊，61-01。取自

<https://www.ntsec.edu.tw/monthly/detail.aspx?a=19208>

彈力(2023 年 2 月 7 日)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%BC%B9%E5%8A%9B>

虎克定律(2024 年 2 月 12 日)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%83%A1%E5%85%8B%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

康軒文教事業(2022)。自然與生活科技 第五冊。臺北市：康軒文教事業股份有限公司。

康軒文教事業(2022)。自然與生活科技 第八冊。臺北市：康軒文教事業股份有限公司。