

嘉義市第 38 屆中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：螞蟻吊大象

關 鍵 詞：槓桿、平衡、重心

編 號：

摘要

從科普教室中「螞蟻吊大象」的課程裡可以知道脆弱的火柴棒可以靠簡易的結構撐起六、七瓶 600ml 礦泉水。我們好奇幫助火柴棒支撐重物的物理結構，因此開始實驗探討。從最基本的支撐架選定材料到改變支撐架的結構，結果發現若增加支撐架的強度、改善支撐架與接觸面的環境可以有效的增加負重量；另外也發現此支撐架是利用槓桿原理支撐重物。此外，延伸探討出 S 型掛勾更是利用此原理來達到負重的效果，在整個實驗過後，讓我們對力學有了更深入的了解。

壹、研究動機

在一年一度的「科學 168 活動」中，科普教室舉辦許多的課程，而學校所設計的課程為「螞蟻吊大象」。在課程裡介紹三支小火柴棒組成的支架能懸掛重物的奇妙現象，使我們好奇：利用此結構的承載架為何可懸臂支持重物？此結構最多可以承受多少的重量？若改變一些結構，是否能增加承載架的負重量？一個又一個的問題讓我們開始一連串的實驗。

貳、研究目的

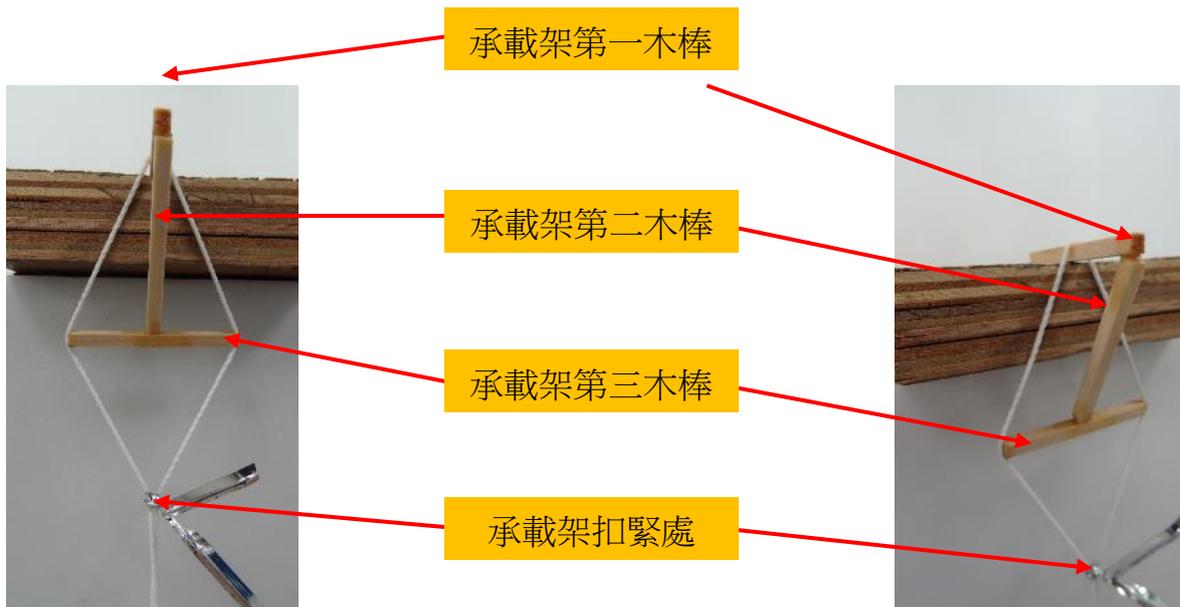
- 一、探討此構造可懸臂支持重物的關鍵因素。
- 二、探討如何增加此承載架負重能力。
- 三、延伸探究相關結構之力的平衡關係。

參、研究設備及器材

實驗器材：木板、松木棒、空桶、棉繩、束線帶、水、水桶、水瓢、膠帶、磚頭、砂紙。
測量儀器：磅秤。

肆、研究過程及方法

- 一、本實驗所定義之第一、二、三木棒及扣緊處如圖所示。
- 二、對照組承載架是由粗細 0.3x0.3 公分，長度 4 公分的三根松木棒組成，繩子扣緊處離承載架第一木棒距離為 $4\sqrt{3}$ 公分(兩倍第三木棒與第一木棒距離長，控制第三木棒與繩圍成的兩三角形皆為正三角形)。



三、材料選定

先以各種型態的材料測試操作穩定度，包括火柴、竹籤、竹筷、松木棒、特殊火柴棒(無火藥頭火柴棒)等，經多次測量比較載重的穩定度後，選定以松木棒作為爾後實驗的主要材料。



↑ 特殊火柴棒

四、實驗流程

(一)先將不同粗細松木棒(3x3、4x4、5x5、6x6、7x7 毫米)裁成指定長度。

(二)將棉繩用膠帶黏在空桶的重心上，使其不會傾斜。

(三)材料備齊後，先將木板部分懸空，接下來把第一木棒平放於木板上，使其一半平貼木板並以磚頭壓住，避免架設承載架未完成架設前傾倒，一半懸空。接著利用重物壓住木板上的一端，以防止增重時整塊木板連同承載架因重量而傾倒(使用木板之用途為控制實驗變因，維持木棒與木板接觸端點的角度為 90 度)(圖一)。

(四)將一開始綁有棉繩的酒精桶，掛在第一木棒最內端(圖二)。

(五)將棉線撐開並量取適當長度，將第三木棒卡入其中(圖三)。

(六)最後再將第二木棒卡入前兩根松木棒內。(圖四)

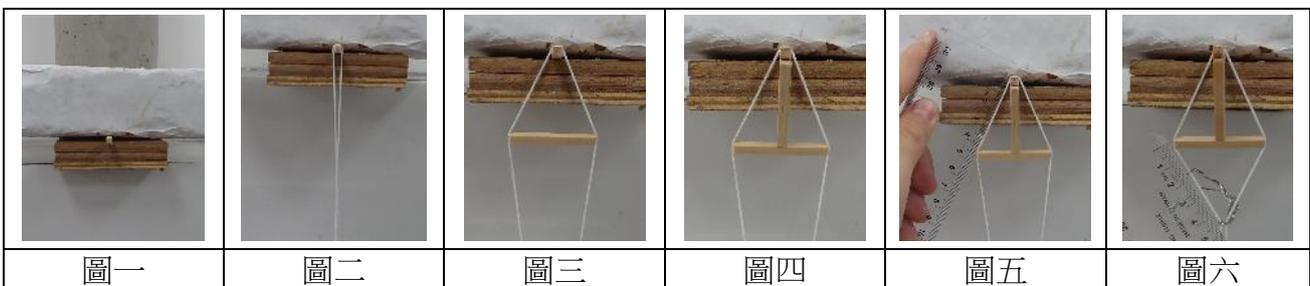
(七)量取第一木棒到第三木棒之繩的距離。(圖五)

(八)將束線帶束在第三木棒下與剛剛測量同距離繩處。(圖六)

(九)最後將磚頭移開，完成承載架架設。

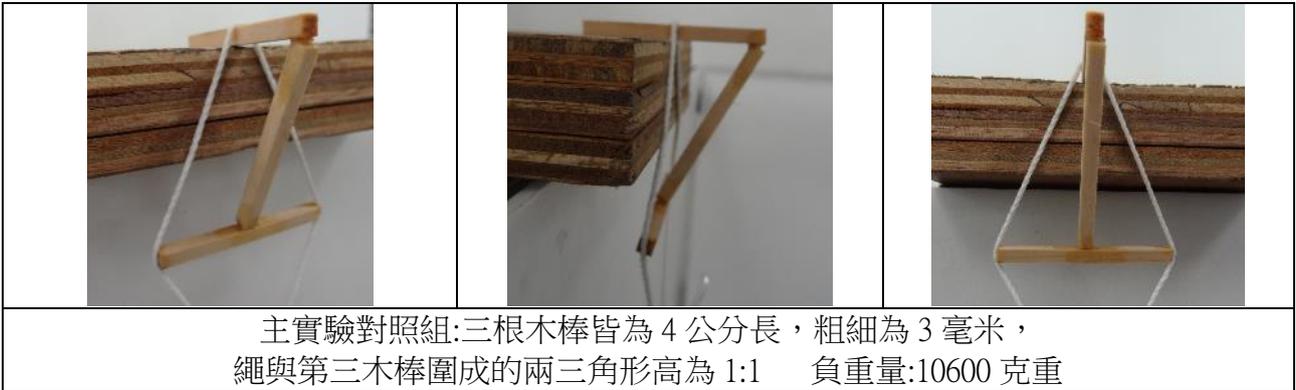
(十)將水緩慢倒入酒精桶內，直到承載架倒塌。

(十一)測量載重量並記錄，接著依照各組操縱便因需求重複步驟三~九，並求取其平均值，完成各組數據。



伍、研究結果

一、主實驗:初步實測改變變因與對照組承載架負重量的差距，大方向的尋找增加承載架負重量的方法。

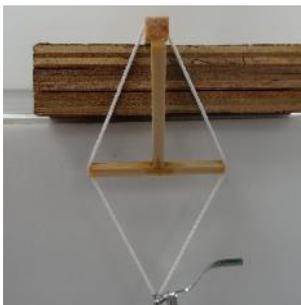
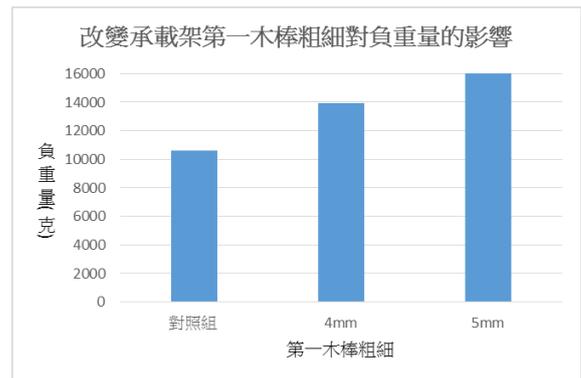


(一)探討改變承載架第一木棒的粗細對負重量的影響。

操縱變因：承載架第一木棒的粗細。

目的：加強承載架第一木棒本身纖維強度。

實驗結果：由圖表可知，增加承載架第一木棒粗細，能增加負重量。

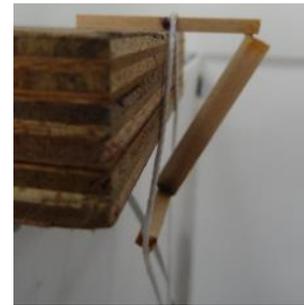
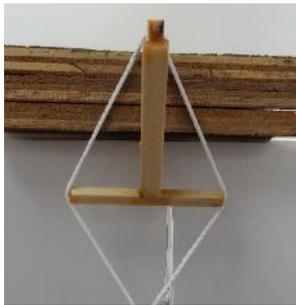
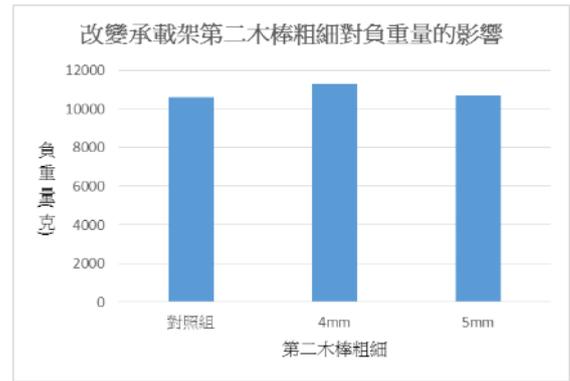


(二)探討改變承載架第二木棒的粗細對負重量的影響。

操縱變因：承載架第二木棒的粗細。

目的：加強承載架第二木棒本身纖維強度。

實驗結果：由圖表可知，增加承載架第二木棒粗細，對負重量無太大影響。

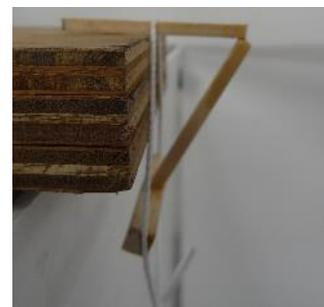
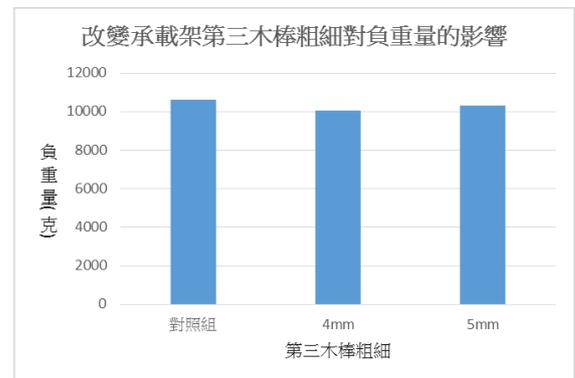


(三)探討改變承載架第三木棒的粗細對負重量的影響。

操縱變因：承載架第三木棒的粗細。

目的：加強承載架第三木棒本身纖維強度。

實驗結果：由圖表可知，增加承載架第三木棒粗細，對負重量無太大影響。

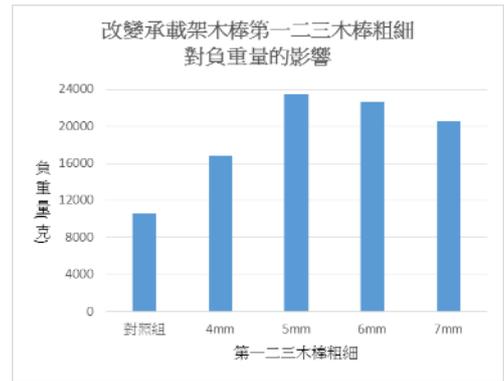


(四)探討改變承載架第一二三木棒粗細對其負重量的影響。

操縱變因：承載架第一二三木棒粗細。

目的：增加松木棒本身纖維強度。

實驗結果：由圖表可知，增加承載架第一二三木棒粗細，能增加其負重量，但當粗細達 5 毫米之後，增加粗細，負重不再上升，而略有些許下降。

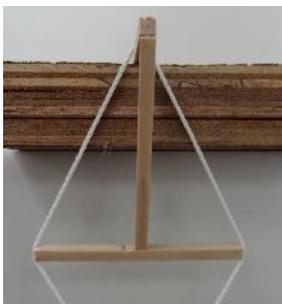
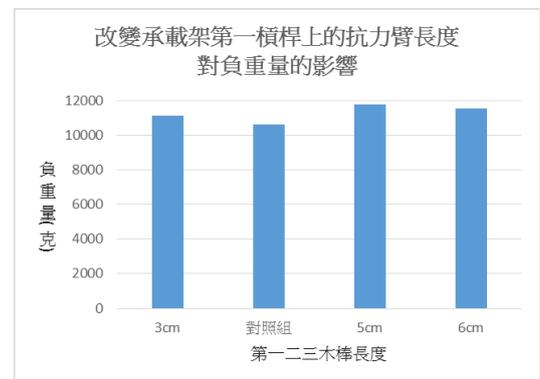


(五)探討改變承載架的大小對其負重量的影響。

操縱變因：承載架第一二三木棒的長度。

目的：改變承載架第一槓桿抗力臂長度。

實驗結果：由圖表可知，不改變承載架結構，只改變第一槓桿上的抗力臂長短，對負重量無明顯影響。

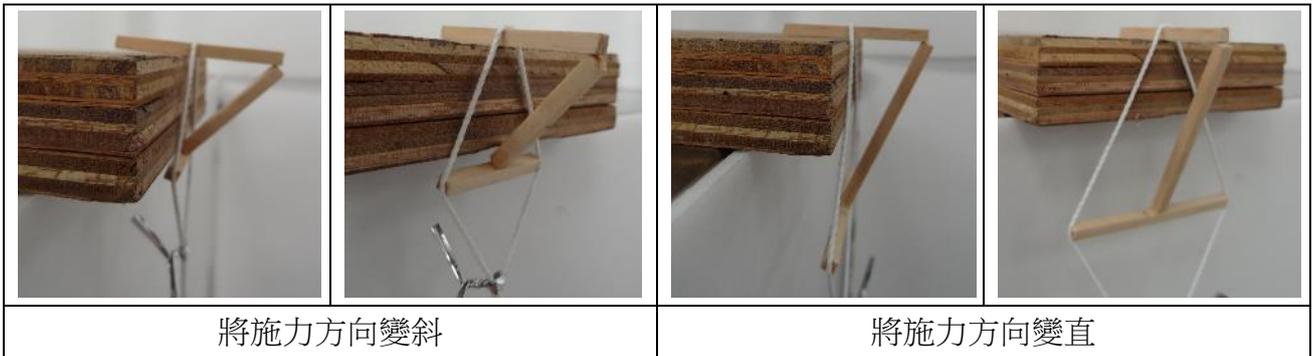
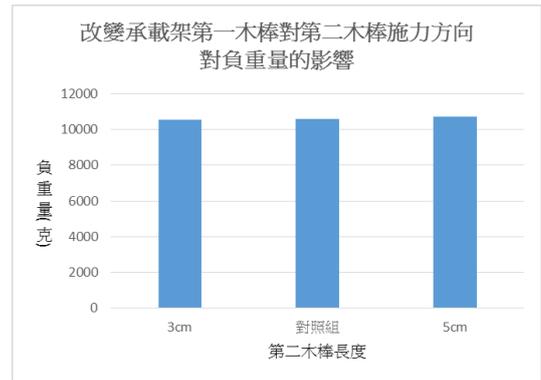


(六)探討改變承載架第二、三木棒長度對其負重量的影響。

操縱變因：改變承載架第二木棒長度。為維持第三木棒與繩圍成的三角形為正三角形，當第二木棒長 3 公分，第三木棒長 $\sqrt{15/3}$ 公分；當第二木棒長 5 公分，第三木棒長 $\sqrt{33/3}$ 公分)

目的：改變承載架第二木棒施力的方向。

實驗結果：由圖表可知，改變承載架第二木棒施力方向對負重量並無太大影響。

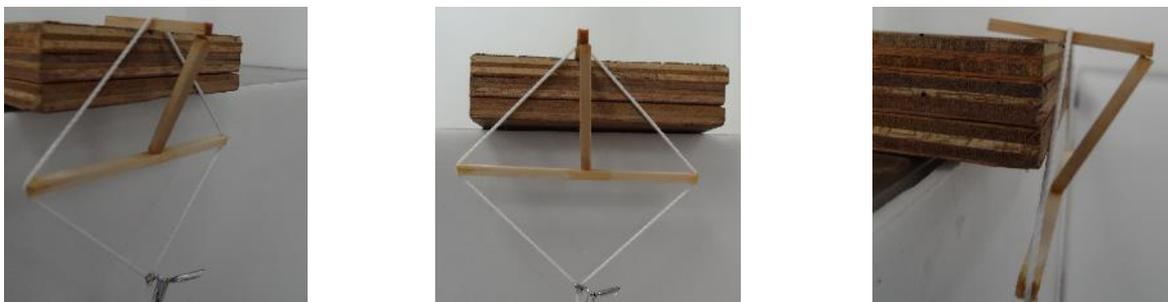
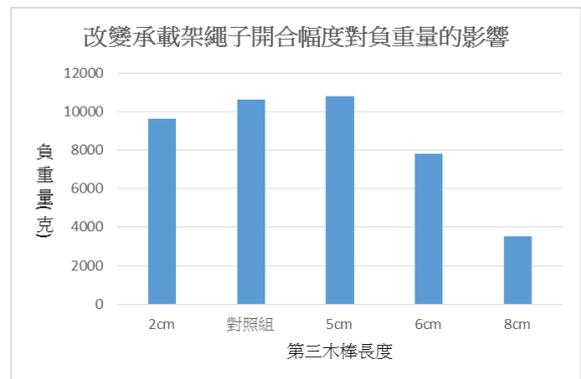


(七)探討改變承載架第三木棒長度對負重量的影響。

操縱變因：承載架第三木棒長度。

目的：改變繩子張合幅度。

實驗結果：由圖表可知，改變承載架第三木棒長度，當承載架第三木棒與繩子所形成三角形底角越趨近於 60 度，負重量越大。

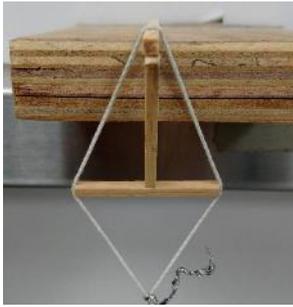
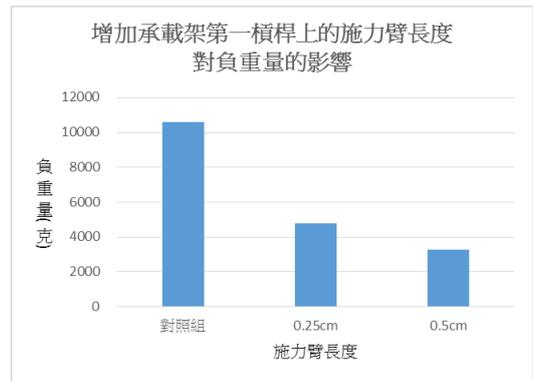


(八)探討增加承載架施力臂長度對負重量的影響。

操縱變因：將繩子掛在第一木棒與木板接觸支點外 0.25、0.5 公分處。

目的：增加承載架的一木棒所形成的槓桿施力臂長度。

實驗結果：由圖表可知，增加承載架施力臂長度，負重量明顯下降。

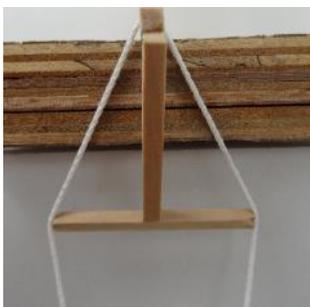
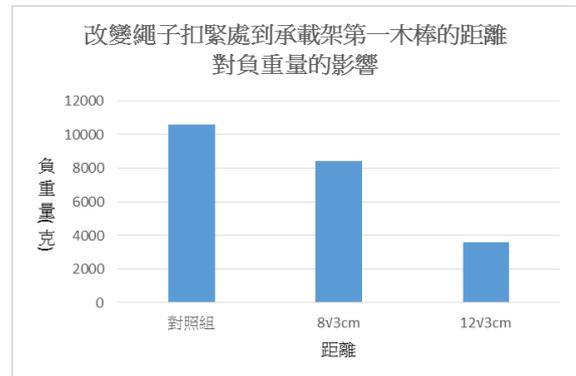


(九)探討改變繩子扣緊處到承載架第一木棒的距離對負重量的影響。

操縱變因：扣緊處到承載架第一木棒的距離。

目的：改變繩子夾住承載架第三木棒的鬆緊。

實驗結果：由圖表可知，改變繩子扣緊處，使承載架第三木棒與繩子形成兩個底角不同的角形，當底下的三角形底角越大，負重量越小。

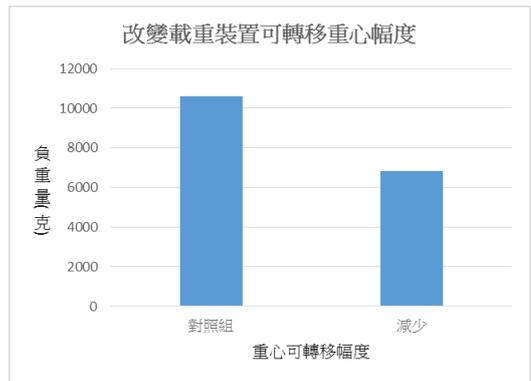


(十)探討改變承載架可轉移重心幅度對負重量的影響。

操縱變因：在第一木棒平貼之木板下增一檔版。

目的：減少承載架傾斜後移進而轉移重心的能力。

實驗結果：由圖表可知，使原本的承載架可轉移重心幅度減少，負重量下降。



二、延伸探討：

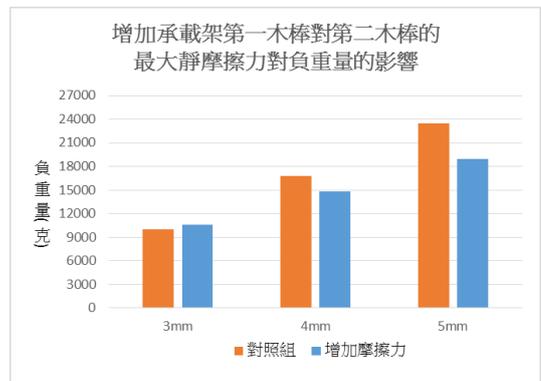
將對照組訂為三根木棒皆為 4 公分長，同粗細之承載架，尋找增加承載架負重量的細部方法。

(一)探討改變承載架第一木棒對第二木棒的摩擦力對負重量的影響。

操縱變因：承載架第一木棒對第二木棒的摩擦力 (在第一木棒與第二木棒銜接觸切成缺口，將第二木棒卡入缺口，增加摩擦力。)

目的：防止承載架第二木棒因載重增加而滑出承載架。

實驗結果：由圖表可知，當改變承載架第一木棒對第二木棒的摩擦力時，負重量減少。

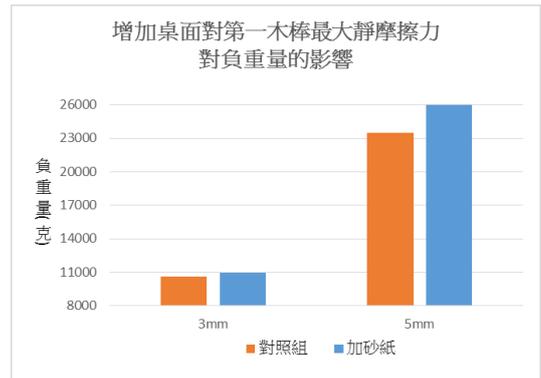


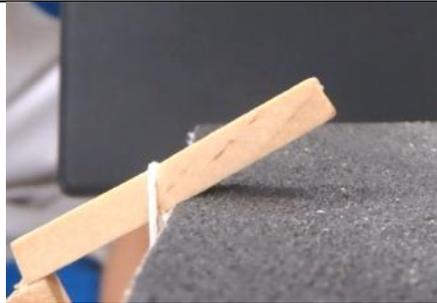
(二)探討在第一木棒平貼之木板上增加粗糙面對負重量的影響。

操縱變因：在第一木棒接觸之木板上平貼砂紙(60號)以增加粗糙面。

目的：增加第一木棒平貼之木板對第一木棒的最大靜摩擦力。

實驗結果：由圖表可知，若增加第一木棒平貼之木板對第一木棒的最大靜摩擦力，能增加粗細 5 毫米的承載架負重量，3 毫米則否。



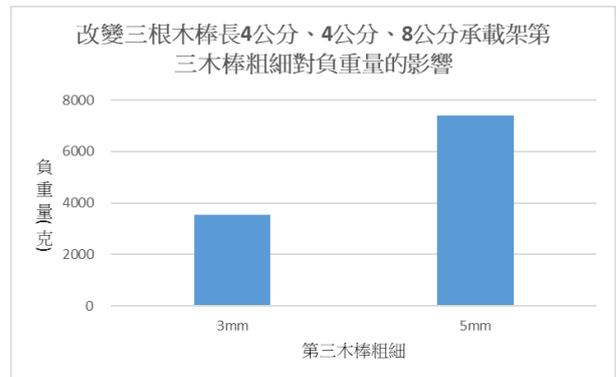
圖片		
名稱	對照組	加砂紙
三次實驗平均傾斜角度	15 度	27 度
粗細 5 毫米承載架掉落前一刻第一木棒傾斜情況		

(三)探討改變三根木棒長 4 公分、4 公分、8 公分之承載架第三木棒粗細對負重量的影響。

操縱變因：第三木棒粗細。

目的：加強承載架第三木棒本身纖維強度。

實驗結果：增加 4、4、8 公分承載架的粗細，負重提升。



陸、討論

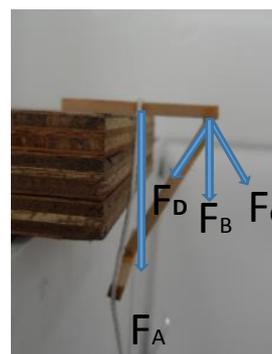
一、有關實驗材料選定

考量承載架第二木棒的固定以及負重量穩定度，可發現：

- >火柴棒因粗細及火柴頭火藥含量不一，導致實驗誤差過大。
- >竹籤、竹筷本身為圓柱，接觸面可能導致力量分散不一而影響實驗結果。
- >無火藥頭之火柴棒因粗細不一，導致實驗誤差過大。
- >松木棒相較於其他材料較穩定，故實驗採取松木棒作為主要材料。

二、承載架載重原理:觀察每次進行實驗時承載架負重過程，於實驗結束後進行討論提出五點承載架載重原理。

(一)、當載重(F_A)形成，導至第一木棒翻轉對第二木棒施力(F_B)， F_B 會產生兩分力(F_C 、 F_D)， F_D 藉由第二木棒傳力到第三木棒，而第三木棒與繩之間的摩擦力將第三木棒撐起，使承載架穩定； F_C 則為一向外的分力，可能使第二木棒滑出使承載架倒塌。



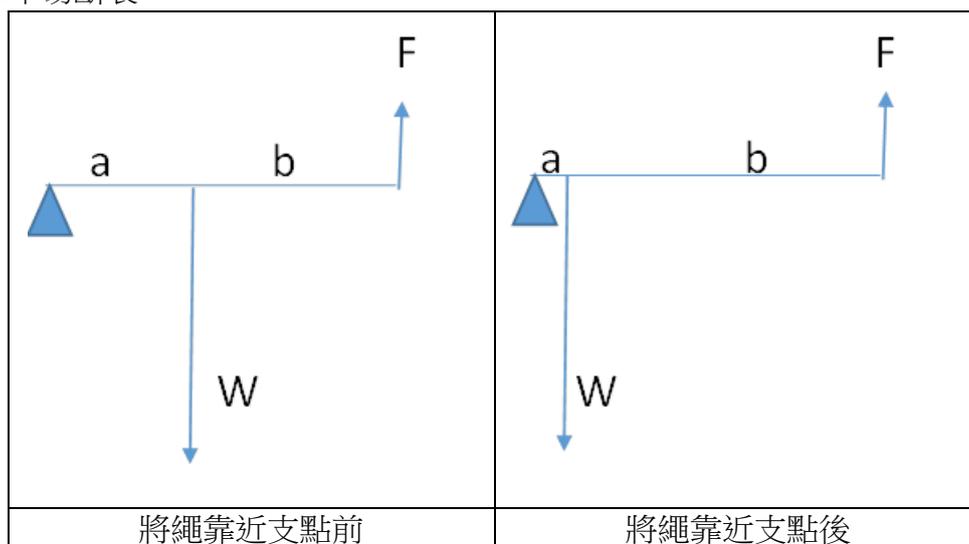
(二)、以承載架第一木棒做為一個獨立槓桿，稱為第一槓桿，設載重點為施力點，與支點距離則為施力臂(a)；支撐點為抗力點，與支點的距離為抗力臂($a+b$)，負重經由棉繩施加在第一木棒的力為 W ，第二木棒對第一木棒的支持力為 F 。

由式 $aw = (a + b)F$

> $F = \frac{a}{a+b}w$ 可知

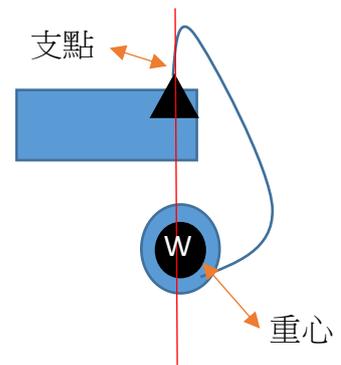
>當 b 增加， a 漸小，則 F 值會下降(將繩往桌靠)。

>如果 a 值極小，施力點與支點幾乎為同一點，端點只要提供極小的 F 值即可使槓桿達平衡，且第一木棒不易斷裂。

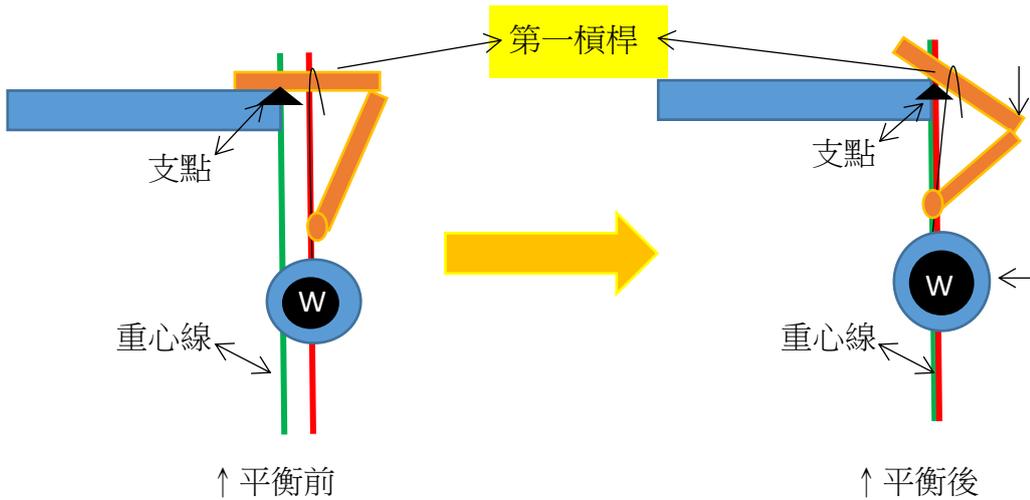


(三)、支點與重心的關係：

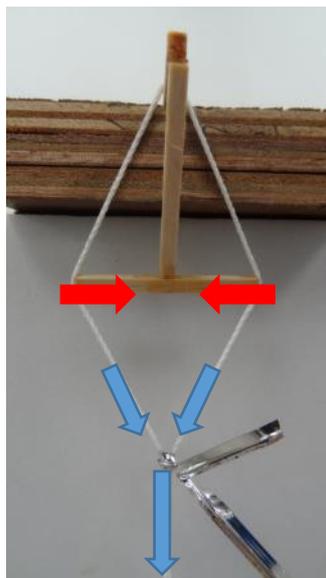
整體而言，承載架的重心必須在支點下方，才能使系統穩定(見右圖)。



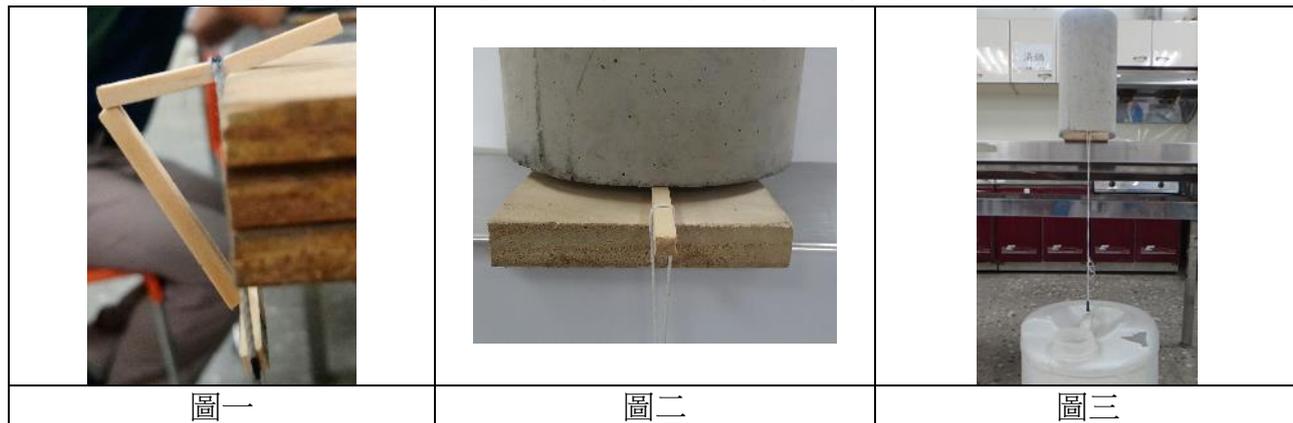
(四)、承載架因受力傾斜，使重心轉移到支點下方，維持承載架穩定(見下圖)
(若重心無法轉移到支點下方，則承載架倒塌)



(五)、當載重形成，繩子受到負重產生張力(如下圖藍色箭頭)，對第三木棒產生夾力(如下圖紅色箭頭)，使第三木棒與繩的摩擦力變大，將第三木棒固定住，支撐第二木棒，抵住第一木棒向下翻轉，穩定承載架，保持系統平衡。

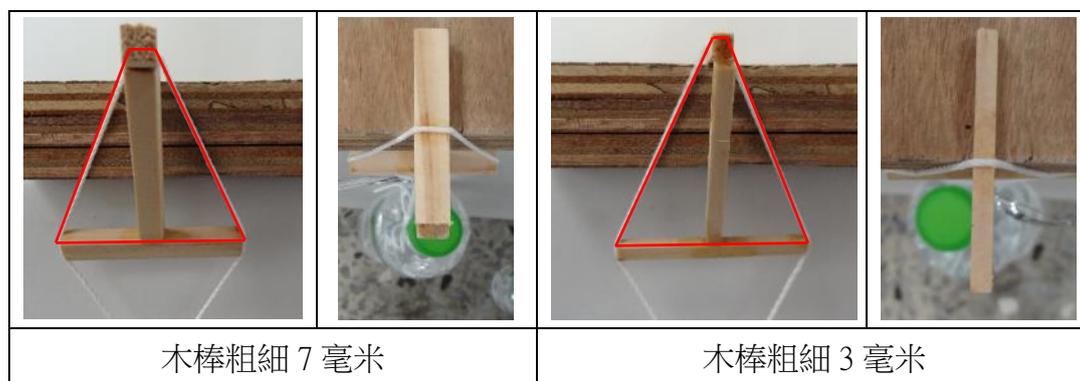


三、從實驗(一)可知，承載架第一木棒本身的纖維強度極為重要，實驗觀察當懸掛物重量增加時，第一木棒粗細為 3 及 4 毫米時，因單點受力下拉而明顯彎曲變形(見下圖一)。從實驗結果中可發現，在第一木棒 5mm 以下時，增加第一木棒的粗細，就能增加其負重量。此外，我們更進一步實驗發現，若單獨只採一根松木棒，平貼桌支點端，並用重物壓住木棒，測其可掛重量(見下圖二、三)，在松木棒細時(3~4 毫米)，掛物重與同粗細之承載架無明顯差異；當松木棒粗細增至 5 毫米時，可支撐 30000 克重以上的重量，負重量明顯較同粗細之承載架增加。第一木棒的纖維強度在粗細 5 毫米以下的承載架上平衡極重要的因素；而第二三木棒增加粗細並未有效提升掛重。根據承載架載重原理(二)，第一槓桿抗力臂遠大於其施力臂，因此負重傳到第二木棒時已不大，不易使第二木棒變形；而第三木棒受繩夾力雖大，但施力從兩端平均分散在整枝木棒中，因此相較於第一木棒，第三木棒較不易變形。



四、從實驗(一、二、三)得知，承載架三根木棒纖維強度以第一木棒來得相對重要，但對照實驗(一)及實驗(四)的結果，三根木棒粗細為 5 毫米的承載架負重量(23000 克重)相較於只加粗第一木棒至 5 毫米的承載架負重量(16000 克重)多，可推論增加承載架第二三木棒纖維強度在負重量較大時，能提高負重量。

五、從實驗(四)得知:以三支木棒形成承載架時，當第一木棒粗細達 5 毫米之上，增加粗細，負重不再上升，而略有些許下降。推論可能是因為當第一木棒越粗，接觸在第一木棒上的繩子會被拉的比較開，使原本的三角形擴至梯形，使結構變得較不穩定(見下圖)。觀察以三支木棒形成支架時，第一木棒的纖維強度是重要因素之一，但對第一木棒所形成之槓桿而言，第一二木棒間的受力也是一重要因素，負責傳力至支點內側。



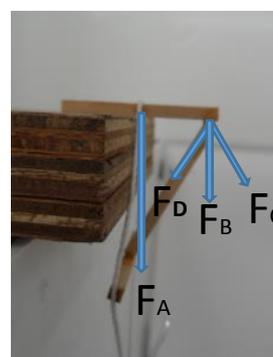
六、承載架第一木棒與第二木棒的接觸點所提供的力其實並不大(因為槓桿抗力臂遠大於施力臂)，但其極為重要，能保持重物的重心位於承載架支點下方。但若無此力，即重物的重心位於懸掛處底下，雖與支點相差距離極短，但其影響之大使承載架不能掛任何物體，不論重量多輕。

七、當承載架第一木棒粗細為 3 毫米及 4 毫米時，實驗結果第一木棒大多呈現折斷狀況，為承載架倒塌的主要原因；當承載架第一木棒粗細達 5 毫米，承載架因為第一木棒受極大的負重量而傾斜嚴重，最後滑落，無法再轉移重心保持整體平衡，為承載架倒塌的主要原因，此外實驗後發現粗細 5 毫米第一木棒僅呈現些微凹陷；當承載架第一木棒粗細達六毫米及七毫米，實驗結果發現負重量停止增加。由此可知，第一木棒粗細到達 5 毫米時，已經可以達到承載的極限值，此時將承載架可轉移重心幅度的提高對於掛物重量的增加相對重要(延伸實驗二)。而第一木棒太細時(4 毫米或以下) 重心轉移的空間顯然已足夠支持至第一木棒折斷，此時增加桌面對第一木棒的摩擦力是無助於增加掛物重。

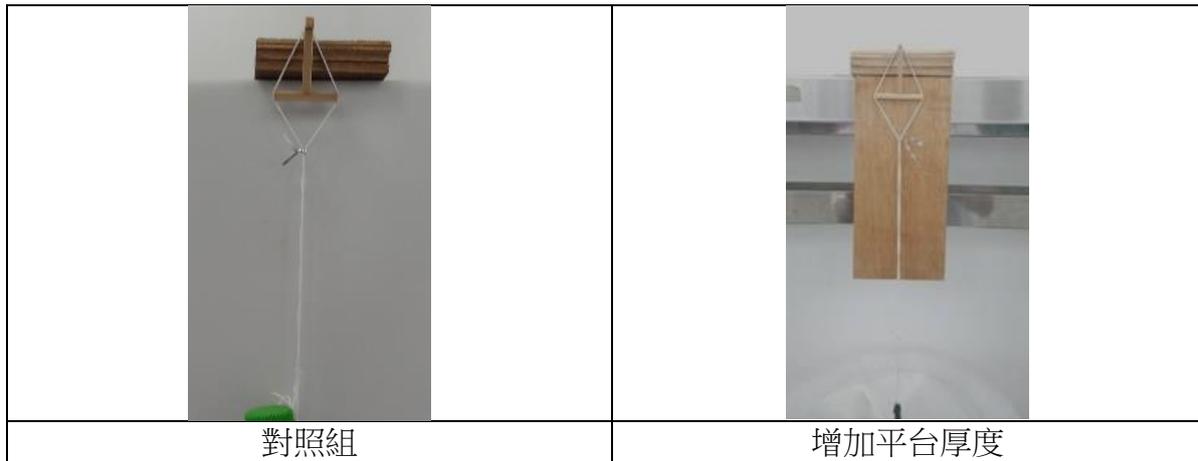
八、有關第二三木棒及掛線方式對掛物重的影響，從實驗(七)中可知三木棒及掛線所構成的形狀越趨於正三角形時，負重能力越大。當實驗(五)加長第一木棒形成的槓桿抗力臂時，應可提高掛重，但實驗結果相差不大，其原因為粗細為 3 毫米承載架無法繼續負重的主因是第一木棒支撐力不足斷裂導致，改變抗力臂長短無助於第一木棒支撐力。加長第三木棒長度，使其與兩端線的夾角變小，預測應可因掛線對第三木棒的推力變大，可使掛重增加，但實驗觀察當三角形底角過大時，導致該區結構變差，容易變形倒塌，因此設計了延伸實驗三，藉以探討改變三根木棒長 4 公分、4 公分、8 公分之承載架第三木棒粗細對負重量的影響，實驗結果增加第三木棒粗細能增加負重量，可知太大的推力易使第三木棒彎曲變形，故增加第三木棒纖維強度能增加負重量，但即使但三木棒粗細增至 5 毫米(7400gw)，負重量仍比對照組(10600gw)小，可知第三木棒與繩圍成的三角型結構強度，仍是影響承載架負重量的因素之一。

九、藉由承載架在原理(二)，說明實驗(八)的結果，若增加第一槓桿施力臂長度，使第二木棒須提供更大支撐力穩定第一槓桿，且系統重心偏外導致第一木棒須更傾斜使重心維持在支點下方，除此之外第一槓桿上施力臂變長，更容易使第一木棒變形斷裂，故若增加第一槓桿施力臂長度，負重量必然明顯減少。

十、實驗前預測，若能增加承載架第一木棒對第二木棒的摩擦力，有利於第一木棒端點向上作用力，且根據右承載架載重原理圖， F_C 為一向外的分力，可能使第二木棒滑出使承載架倒塌，因此設計了一實驗(延伸實驗一)，將第一木棒挖一凹槽，並將第二木棒卡入其中，使第一木棒對第二木棒的最大靜摩擦力增加，防止第二木棒滑出，如此一來應可有效增加負重，但實驗結果並非如預測。當增加過大的摩擦力，反將使其伸縮度減少，造成第一木棒單點受力嚴重而明顯變形，使第一木棒缺口處提早斷裂，反而降低負重量。在整個實驗結束後，經過了一些式子的推導發現承載架負重時有以下特性：根據公式最大靜摩擦力=下壓力 x 摩擦係數，可得知下壓力與最大靜摩擦力成正比，因此載重增加，下壓力隨之增長，使得第一木棒對第二木棒的最大靜摩擦力增加(負重量與下壓力成正比，而下壓力又與最大靜摩擦力成正比，因此負重量與最大靜摩擦力也成正比，兩者成同倍數成長)，故第二木棒向外之力 F_C 一定小於第一木棒對第二木棒的最大靜摩擦力，所以第二木棒滑出非承載架倒塌的主因。



十一、有關於重心影響承載架的負重能力，實驗(十)設計以改變平台厚度，改變掛物重心轉移空間。實驗結果當平台變厚，掛物重明顯減少，可知重心可否轉移位置是影響承載架平衡重要因素。



十二、從延伸實驗二結果得知:在第一木棒平貼之木板上增加粗糙面，能增加粗細 5 毫米的承載架負重量，但 3 毫米則否。推論因粗細 3 毫米承載架無法繼續負重的主因為第一木棒彎曲而斷裂，故增加粗糙面無法增加其負重量；而粗細 5 毫米承載架無法繼續負重主因為第一木棒為使承載架重心靠內而傾斜，當傾斜達到一定程度使第一木棒與木板的摩擦力不足時，承載架倒塌，故增加木板與第一木棒間摩擦力能增加第一木棒最大傾斜角度，使負重量增加。

柒、結論

一、由上探討可知此構造可懸臂支持重物的關鍵因素，在於(1)第一槓桿須處於平衡關係，(2)同時系統重心須於第一槓桿支點下方。實驗結果發現，承載架是利用槓桿原理來支撐重物，而承載架的第一木棒極為重要，若能將第一木棒加粗，載重必然大幅提升(實驗一、四)，若第一槓桿施力臂太長，負重量明顯減少(實驗八)。本承載架載重主要依靠重心的轉移讓整體平衡，若承載架無法進行改變重心位置，則承載架會無法平衡而導致無法負重(實驗十)，反之若能增加承載架可轉移重心幅度，負重量增加(延伸實驗二)。

二、由上探討可知此承載架負重能力，在於第一木棒的纖維強度，第一木棒越粗，可支持的物重越大。但當第一木棒粗細增達一定程度時(5 毫米以上)，再增加粗細負重量並不會再增，反而略降。第一二木棒間的摩擦力，雖不需多大，但可使第二木棒傳力至槓桿支點的內側，是平衡的重要因素。繩子扣緊處到承載架第一木棒的距離相當重要，繩子對第三木棒的摩擦力能提供一向上的力，使第三木棒穩定，維持承載架平衡(實驗九)。

三、實驗整合：關於改變承載架第二木棒(實驗二)或第三木棒(實驗三)粗細、增加第一槓桿抗力臂長度(實驗五)、改變承載架第一木棒施力方向(實驗六)，皆對負重量無太大影響；改變承載架第三木棒長度，當繩子開合角度越接近 60 度，負重量越大(實驗七)；若三根松木棒粗細皆達到 5 毫米以上，負重量會更接近極限值(實驗四)；承載架必須留伸縮縫，否則承載架可能因為無法伸縮導致單點受力明顯而提早倒塌(延伸實驗一)。

四、延伸尋找本實驗承載架載重原理在生活中的實例。

以一 S 型掛勾一端掛於桌面，令一端懸掛重物，可維持裝置平衡，當將重物移除則裝置倒塌，可見此裝置需有重量將重心維持在支點下方才可維持裝置穩定。與本實驗承載架皆依靠重心的轉移維持裝置穩定。



五、延伸探討相關結構之力的平衡關係。

以鐵尺、鐵鎚、繩子，調整鎚頭吊掛重心，可使結構穩定平衡。

操縱變因：增加鎚頭掛重。

目的：觀察鐵尺(相當第一木棒)所形成的槓桿，在增加掛重時鐵尺和鐵鎚接觸點會因負重增加而上彎，可知負重大小，對接觸點之間的力，有一定影響。且重心的位置須保持於桌上支點之下，隨掛重增加能明顯觀察移動狀況(鐵槌順時針轉，鐵尺向上彎曲)。



捌、參考資料

1. 螞蟻吊大象--一起見證火柴棒的神奇力量！

取自:國立台中教育大學 NTCU 科學教育與應用學系

<http://scigame.ntcu.edu.tw/power/power-055.html>

2. 「絕對不偏心」—酒架平衡重心的探討與廣用酒架的設計。

取自新北市板橋區埔墘國民小學

中華民國第五四 屆中小學科學展覽會作品

三. 科學角落 - 重心與平衡 取自 Kiwi 的物理教室

https://kiwiphysics.blogspot.com/2014/11/blog-post_10.html#!/2014/11/blog-post_10.html