

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

第三名

030103

不再 DOWN 的啄木鳥-探究科學玩具啄木鳥上升之因素與原理

學校名稱： 嘉義市立北興國民中學

作者：	指導老師：
國二 王榆喬	王一民
國二 張湘羚	林嘉慶
國二 李宥均	

關鍵詞： 啄木鳥科學玩具、共振、頻率

摘要

本研究在探討啄木鳥科學玩具向上爬升的原理，並透過井字形結構，加振動喇叭的動力啄木鳥，探討懸臂長度、孔徑大小、輸入音源的振動頻率、振源位置與音源輸入振幅對啄木鳥上升速度的影響

研究發現，啄木鳥玩具會在特定頻率下快速上升，與振動頻率是否對應到機構的自然頻率及共振效應有關。動力啄木鳥在懸臂長為 300mm、孔徑 10.3mm、振動頻率 150Hz 時，上升速度最快。振動喇叭放置位置會對啄木鳥上升速度造成影響，速度大小依序為懸臂前端 > 懸臂末端 > 懸臂中間。孔徑會影響啄木鳥的上升速度，而非自然頻率。音源輸入振幅需大於 iPad 音量 10 格才能使啄木鳥上升。

壹、 前言

一、研究動機

常見的啄木鳥科學玩具，運用生活中可取得的鐵絲與鐵桿便能製作。在去年學校的獨立研究課程中，我們接觸到了這項科學玩具。而在一次的實驗當中，發現原先應該要緩慢下降的啄木鳥竟然在以手指施力的狀況下上升了！這令我們感到十分驚訝，也感到非常的困惑。上網查找卻無法發現有關此現象的文獻。起初我們試著用鐵絲來還原當初會上升的啄木鳥，但是每次的纏繞形狀都不盡相同，無法有效的控制變因。因此，經過多次的修正改良後，我們在學校自造中心製作自己設計的啄木鳥結構，並使用振動喇叭控制驅動的力量與頻率，利用改變啄木鳥科學玩具的懸臂長、孔徑大小與振動喇叭的頻率、音量（振幅）和振源位置，試著找出可以上升的最快最穩定的啄木鳥以及影響啄木鳥上升的因素。

二、研究目的

- (一) 探討啄木鳥科學玩具上升的原因
- (二) 製作可以穩定控制變因的啄木鳥科學玩具
- (三) 探討影響啄木鳥科學玩具上升的因素
 1. 探討振動頻率對啄木鳥科學玩具上升速度影響
 2. 探討振源位置對啄木鳥科學玩具上升速度的影響
 3. 探討懸臂長度對啄木鳥科學玩具上升速度影響
 4. 探討孔徑大小對啄木鳥科學玩具上升速度的影響
 5. 探討振幅大小對啄木鳥科學玩具上升速度影響

三、文獻回顧

我們透過網路科學教育館與 google 瀏覽器查到兩份關於啄木鳥科學玩具的研究資料，分別是第 46 屆全國科展的啄木鳥跳跳緩降機（1995，[5]）、第 38 屆嘉義市科展的啄木鳥玩具大挑戰（2020，[6]）。兩份報告均討論啄木鳥科學向下運動的狀況，與本實驗的目的有差異，但內容仍可以給我們參考與啟發。

在「啄木鳥跳跳緩降機」的研究中，啄木鳥科學玩具是沿著鐵管下降，與我們的實驗裝置相似，都是剛性結構。他們針對啄木鳥科學玩具的開孔位置、孔徑大小、緩降機厚度、緩降機長度、重量與重心為位置進行探討，目的為製作製作能搬運物品的「啄木鳥跳跳緩降機」。而在「啄木鳥玩具大挑戰」的研究中，啄木鳥科學玩具是沿著軟性的繩管或橡皮筋下降，這和我們的實驗裝置有較大的不同。他們想要探討影響啄木鳥玩具移動快慢的機制，探討的變因有啄木鳥科學玩具的兩側重量、重量、水平重心位置、垂直重心位置、繩管直徑（同孔徑）、繩管高度與橡皮筋鬆緊度。

在兩份報告共同有討論到的變因包含了啄木鳥科學玩具的長度（懸臂長）、重量與孔徑大小。或許因為啄木鳥科學玩具下降的方式不同（硬管與軟管），在實驗結果有很大的差異。在硬管時（啄木鳥跳跳緩降機），重量越輕、懸臂長越短，啄木鳥科學玩具下降的速度越慢。在軟管時（啄木鳥玩具大挑戰），重量越重，水平重心位置越外側，下降速度越慢。唯一相同的是，針對孔徑大小的討論皆為孔徑越小，啄木鳥科學玩具下降的速度越慢。顯示孔徑大小對於啄木鳥科學玩具的下降有明顯的影響。

透過文獻探討的結果，我們除了探討施加外力的頻率高低、振幅大小、振源位置等變因對於啄木鳥科學玩具上升速度的影響，也加入懸臂長度與孔徑大小這兩項變因。觀察這兩項變因對於一般啄木鳥與向上啄木鳥的影響有何差異。

貳、 研究設備及器材

不同粗細鐵絲、3D列印模具、高速攝影機、鐵尺、斜口鉗、尖嘴鉗、固定架（鐵架）、平板、長尾夾、電池、游標卡尺、熱熔膠條、電池盒、鋰電池、電動馬達、船型開關、電路板、PWM脈衝調速器、碼表、振動馬達、振動喇叭、曬衣夾、塑膠尺、木工用F夾（固定用）

參、 研究過程或方法

一、啄木鳥科學玩具介紹與原理

（一）啄木鳥科學玩具原理

我們透過使用振動喇叭來做為啄木鳥的動力，根據翰林自然科學課本第三冊的主題-波動與聲音，我們可以知道聲波是靠振動產生，我們將振動喇叭置於懸臂自由末端，透過

振動懸臂造成力矩、摩擦力變化、彈力位能等的變化，成為啄木鳥上升動力。其中我們在探究向上爬的啄木鳥過程中，應用到的原理我們分作以下幾點探討：

1. 摩擦力 (Friction) :

不管是一般抖動向下的啄木鳥，或是我們設計的動力啄木鳥，都需要有停留在桿子上的時間，而能夠克服重力停滯在桿子上靠的就是摩擦力了。而動摩擦力與靜摩擦力兩者，我們主要需要考慮的是靜摩擦力，因啄木鳥玩具在桿子上產生的靜摩擦力是要能抵抗它本身的重力，這樣啄木鳥玩具才不會像自由落體往下掉。

2. 摩擦自鎖 (Frictional Self-locking) :

摩擦自鎖是指物體在受到外力時，由於摩擦力的作用，使其無法滑動或移動，即使外力停止施加，物體仍然保持靜止的狀態。這種現象通常發生在某些機械結構或斜坡運動中，當摩擦力足夠大時，物體不會自行滑動。而我們啄木鳥玩具有能夠停留在垂直桿子上而不下滑，也就是一種摩擦自鎖的現象。

3. 力矩 (Moment) :

力矩是指讓物體產生轉動的能力。力矩的大小取決於力與垂直力臂，具有方向性。在啄木鳥玩具中，桿子懸掛出去部件的重力，對在桿子上的機構作力矩，力矩會造成轉動，但因為啄木鳥機構是套在固定桿上，無法旋轉，因此頂在固定桿上的啄木鳥機構會讓桿件產生一反作用力，而這反作用力就能讓啄木鳥機構無法旋轉，而也因這啄木鳥機構頂在桿件上的力成為摩擦力的正向力，也讓啄木鳥機構因為摩擦力而不會直接下滑。

4. 波動與振動頻率 (Wave motion、Vibration frequency) :

波是一種能量傳遞，振動可以造成波動，需靠介質傳遞的波叫做機械波，依振動方式又分為橫波（高低波）跟縱波（疏密波），振動頻率則是指一秒可以振動幾次，也就是一秒可以產生幾個波。在動力啄木鳥，我們利用振動喇叭造成振動，且振動喇叭口朝上掛在懸臂自由端，造成對懸臂的上下振動，產生的也就是橫波（高低波），懸臂傳遞振動造成的橫波到桿子處，造成摩擦自鎖可以暫時解開，在短暫的解開期間，懸臂擺動造成的重心偏移會有機會讓啄木鳥往上升。

5. 位能 (Potential energy) :

在動力啄木鳥上升的現象中，我們也試著以能量的觀點來分析，主要用到的是重力位能與彈力位能。重力位能是當物體被抬升到某個高度時，會因為地球重力場而儲存的能量，彈力位能則是有彈性的物體受力形變時而儲存能量，回復形變即釋放出能量。動力啄木鳥的在振動喇叭的振動下造成懸臂上下擺動，也就造成懸臂不停的形變與回復的彈力位能，而彈力位能在擺動期間造成重心偏移向上時轉換成動能爬升，條件是要在剛好摩擦自鎖解開的時候，爬升後接著摩擦自鎖再度將啄木鳥固定，因此彈力位能也就順利轉換成重力位能，所以搭配摩擦力讓啄木鳥能否可自由移動的時間點很重要，而能夠影響這時間差的因素即振動喇叭的振動頻率。

6. 自然頻率 (Natural Frequency) :

又稱「特徵頻率」、「固有頻率」。系統在不受外力及阻力作用時，若系統發生振盪，系統會傾向以自然頻率振盪。我們啄木鳥機構應該有它的自然頻率，物體可以有不只一個自然頻率。通常分為第一模態、第二模態、第三模態來看，自然頻率是振動模態裡的其中一個元素。

7. 共振效應：

一個外力作用在某個物體上時，如果外力的週期與物體本身的自然頻率相同，將會使物體的振動量越來越大，這個現象稱為共振。動力啄木鳥的設計是以振動喇叭產生不同的頻率來讓啄木鳥上升，若頻率剛好有對到該系統的自然頻率，那麼振幅將會放大，對動力啄木鳥上升是有利的。

(二) 名詞解釋

1. 「動力啄木鳥」構造示意圖

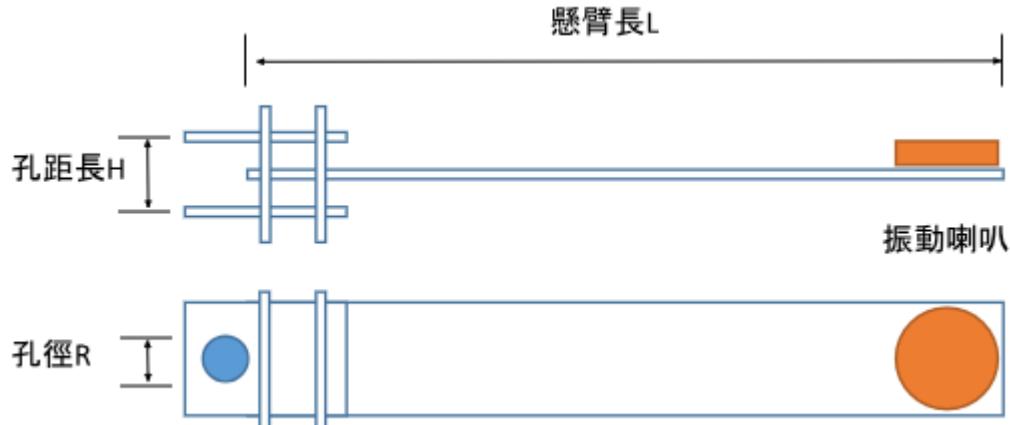


圖 3-1-1 動力啄木鳥結構圖，出處詳如圖片來源 1

2. 名詞解釋

- (1) 孔徑：在動力啄木鳥當中，與鐵桿接觸的兩個孔洞的直徑即為孔徑，在實驗中，我們以 10.3mm 為基準值。
- (2) 懸臂長：孔徑端點至木板末端長度為懸臂長。
- (3) 振源位置：在動力啄木鳥當中，放置振動喇叭的地方即為振源位置。除探討振源位置對啄木鳥的影響外，我們的實驗皆將振源位置設置在懸臂的最後方。
- (4) 振動喇叭：對動力啄木鳥施加外力的裝置。透過播放頻率時所產生的上下震動，造成啄木鳥重心偏移，進而帶動其上升。
- (5) 振動頻率：在操作動力啄木鳥的時候，我們會使用物理 APP 「phyphox」的音調產生器播放不同的頻率使振動喇叭產生震動，而每秒內震動的次數我們即為振動頻率。
- (6) 振幅：動力啄木鳥震動的幅度大小。在實驗當中，我們透過控制 ipad 的音量大小來控制啄木鳥的振幅大小。
- (7) 上升速度：在動力啄木鳥的實驗當中，我們以其每五秒內的上升高度作為啄木鳥的上升速度。

二、研究流程與架構：

(一) 實驗流程圖，出處詳如圖片來源 1



(二) 實驗一、探討振動頻率對啄木鳥科學玩具上升速度影響

1. 操縱變因：

以控制振動喇叭的振動頻率為操控變因，我們從 20Hz 開始測試，每次增加 10Hz 為一個單位，一個頻率做七次，到 340Hz 結束。

2. 控制變因：

動力啄木鳥的懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm，喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格)、振源位置 30cm。

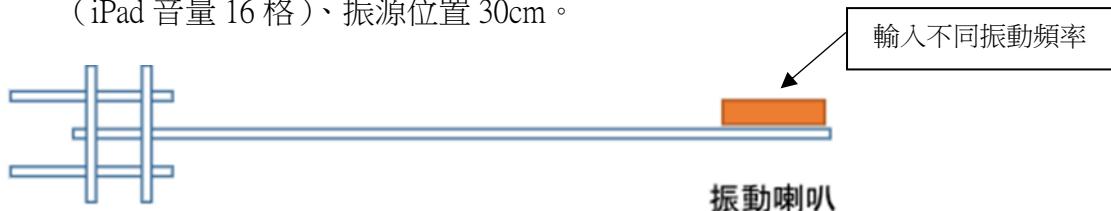


圖 3-1-2 動力啄木鳥頻率震動操縱變因示意，出處詳如圖片來源 1

(三) 實驗二、探討振源位置對啄木鳥科學玩具上升高度的影響

1. 操縱變因：

以不同的振源位置當作操縱變因，分別是 30cm、25.5cm、21cm、16.5cm、12cm、7.5cm。

2. 控制變因：

為了實驗準確性，我們使用同一隻啄木鳥 (孔徑 10.3mm、懸臂長 300mm、孔距 28mm、平板音量 100%)，測量時所使用的頻率皆為 90Hz。

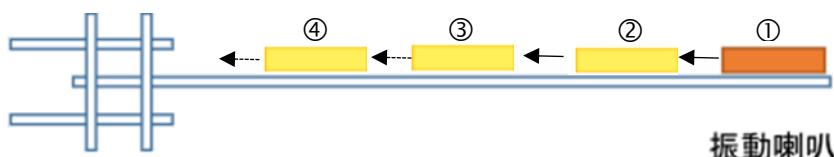


圖 3-1-3 動力啄木鳥震動位置操縱變因示意，出處詳如圖片來源 1

(四) 實驗三、探討懸臂長度對啄木鳥科學玩具上升速度影響

1. 操縱變因：

用同一支啄木鳥，以不同的懸臂長當作操縱變因，長度分別是 300mm、255mm、210mm、165mm、120mm。

2. 控制變因：

為了實驗準確性，我們都是使用同一隻啄木鳥（孔徑 10.3mm、振源位置 30cm、孔距 28mm、平板音量 100%），但是不斷用美工刀切割啄木鳥的懸臂以達到我們的實驗目的。測量時所使用的頻率從 20~340Hz，以 10Hz 為間隔，每一組數據測量 7 次。

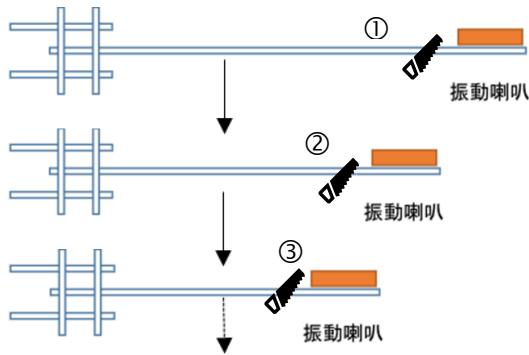


圖 3-1-4 動力啄木鳥懸臂長操縱變因示意，出處詳如圖片來源 1

(五) 實驗四、探討孔徑對啄木鳥科學玩具上升高度的影響

1. 操縱變因：

孔徑 10.1mm、10.3mm、10.5mm。

2. 控制變因：

長度 300mm，孔距 28mm，頻率 60~160Hz（間隔 10Hz），喇叭音量 100%（iPad 音量 16 格）、振源位置 30cm。

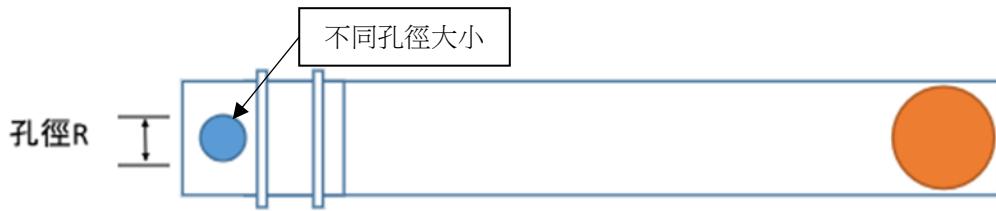


圖 3-1-5 動力啄木鳥孔徑大小操縱變因示意，出處詳如圖片來源 1

(六) 實驗五、探討振幅對啄木鳥科學玩具上升速度影響

1. 操縱變因：

輸入音量從 100%（iPad 音量 16 格）開始，每次調降兩格。

2. 控制變因：

為了實驗的準確性，我們使用同一隻啄木鳥（孔徑 10.3mm、振源位置 30cm、孔距 28mm、懸臂長 300mm）進行測量，輸入的振動頻率原預定以懸臂長 300mm

的兩個上升峰值的頻率 90Hz 與 150Hz 進行測量。但因振動頻率在頻率 150Hz 時，啄木鳥 5 秒的上升高度會超過鐵桿高度，容易有測量誤差，因此將振幅實驗的振動頻率為分別以 90Hz 與 160Hz 進行測量。

三、實驗步驟：

我們的實驗都在學校的實驗室中進行，環境中無風的流動影響，穩定的室溫環境，每組條件組合實驗都會重複做七次量測，最後去除最高與最低的數據做分析，實驗步驟如下：

步驟一：實驗室鐵架底座置於桌角，以兩個固定 F 夾固定，確保底座不會搖晃。

步驟二：鐵桿螺紋端旋入鐵架，要轉到底確保鐵桿不會搖晃。

步驟三：將動力啄木鳥孔徑端套入鐵桿，對齊鐵桿上做好的刻度記號。

步驟四：振動喇叭黏於懸臂尾端，並以傳輸線接上藍芽電路板。

步驟五：開啟平板與藍芽喇叭連線，並以 APP 「Phyphox」設定頻率與音量。

步驟六：使用 APP 內建計時器計時 5 秒即可按開始鍵，時間到即自動停止震動。

步驟七：量測啄木鳥上升的高度並記錄，相同條件下重複七次。

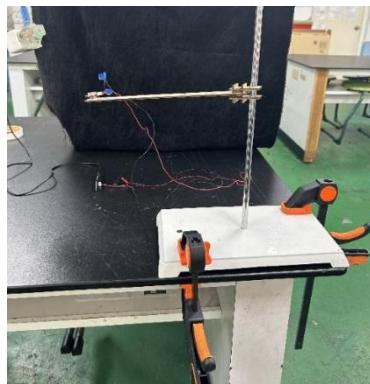


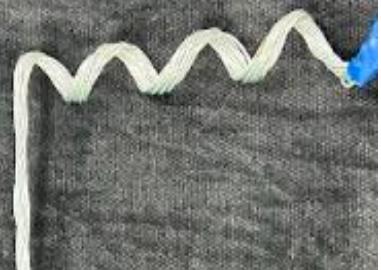
圖 3-3-1 實驗裝置圖，出處詳如圖片來源 1

肆、研究結果

一、製作可以穩定控制變因的啄木鳥科學玩具探究歷程

(一) 由構造方面探討啄木鳥的演進

表 4-1-1 啄木鳥構造演進過程表，出處詳如圖片來源 1

鋼絲啄木鳥	曬衣夾啄木鳥	動力啄木鳥
螺旋形結構	三角形結構	井字形結構
		

1. 鋼絲啄木鳥：

我們延續國一獨立研究課程製作的鋼絲啄木鳥進行實驗。原先我們以不同粗細的原子筆，做為控制纏繞孔徑的工具，並以孔徑大小作為操縱變因。但以原子筆的粗細大小作為工具，有無法隨意變更孔徑大小的問題。因此我們使用學校自造中心的 3 D 列印機製作模具，利用 3 D 列印技術來製作啄木鳥的模具（如圖 4-1-1），進一步控制我們的實驗變因。

我們根據實驗的需求，分別以螺距、螺紋直徑兩方面對模具做出改變，外型方面改變了懸臂長、纏繞圈數、懸臂角度、線徑四個方面。

透過 3 D 列印技術，我們可以更精準的控制啄木鳥的變因，也可擴大我們實驗的多元性。可隨著實驗的進程，我們發現到以下問題：

- (1) 因為纏繞時施力大小不相同，造成啄木鳥的孔徑大小仍會有些微差異。
- (2) 在將啄木鳥從模具當中取出的時候，容易導致形狀改變，造成實驗數據不準確。

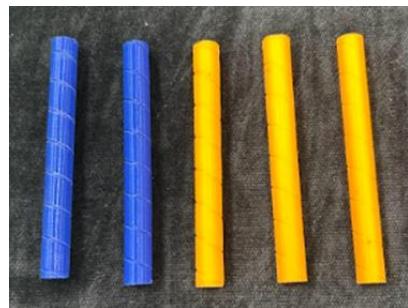


圖 4-1-1 3 D 列印製作模具控制鋼絲螺距與螺紋直徑大小，出處詳如圖片來源 1

2. 曬衣夾啄木鳥：

為了改變鐵絲啄木鳥纏繞時，可能會造成誤差的問題，我們改為使用市面上形狀尺寸固定大小的曬衣夾。

在構造方面，我們使用曬衣夾的孔洞來代替原先的螺旋；塑膠軟尺來代替啄木鳥的懸臂（圖 4-1-2）。使用曬衣夾，可以更確定與掌握啄木鳥的形狀，且使用塑膠軟尺，可承載物體的面積增加，讓我們可以試著在啄木鳥懸臂的後方放置物品以增添重量。且透過簡化實驗裝置，我們可以更清楚觀察到啄木鳥上升時的運動情形，與無法上升亦或者是下降的原因。在實驗過程中，我們發現以下問題：

- (1) 使用曬衣夾的孔洞雖然可以固定形狀與孔洞大小，但是透過之後的觀察，我們發現到曬衣夾的孔洞並非固定的圓形，而是種不規則的形狀。
- (2) 使用曬衣夾的孔洞，無法像之前使用 3 D 列印模具一般，依照實驗需求改變孔徑大小，無法進一步的設計實驗。
- (3) 因為塑膠軟尺的承重有限，當我們試著在軟尺上方增加重量的時候，軟尺會出現下垂的跡象，這可能會導致我們的實驗數據不穩定。（圖 4-1-3）



圖 4-1-2 曬衣夾啄木鳥構造

出處詳如圖片來源 1

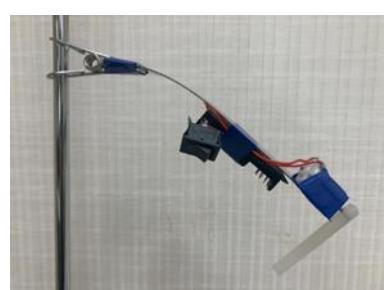


圖 4-1-3 軟尺承受過多重量下垂

出處詳如圖片來源 1

3. 動力啄木鳥：

為了更容易控制變因，我們結合鋼絲啄木鳥的螺旋型構造與曬衣夾啄木鳥的三角形構造，設計出井字型構造的動力啄木鳥，如圖 4-1-4。以學校自造中心的雷射切割機，透過雷射切割技術精準的製作動力啄木鳥的各個元件，再進行組裝。使用雷射切割，我們可以更精準控制孔徑大小、孔距、懸臂長度，進一步觀察這些變因對於啄木鳥上升的影響。



圖 4-1-4 動力啄木鳥側面圖，出處詳如圖片來源 1

(二) 由施力方面探討啄木鳥的演進

表 4-1-2 啄木鳥施力演進過程表，出處詳如圖片來源 1

第一代 手動施力	第二代 重物施力	第三代 震動馬達施力	第四代 控制轉速施力	第五代 振動喇叭施力
以手動方式在懸臂末端施力	透過從固定高度將重物落下，來固定施力大小	以不等長的熱融膠條，製作震動馬達對啄木鳥施力	利用脈衝調速器 PWM，調整電壓以控制熱熔膠條轉速，	以 phyphox APP 透過藍芽連結振動喇叭對啄木鳥施力

1. 手動施力：

在國一獨立研究課程所使用施力方式是以手指在懸臂末端施力，透過彈力帶動啄木鳥的上升，施力方式示意圖如圖 4-2-1。

使用此方法讓我們可以在過程中自由控制施力的位置與大小，為我們的實驗帶來了許多方便性，可我們也在實驗過程中發現了以下困境：

- (1) 使用手動的方式施力，我們無法精準地控制每一次施力的大小以及位置，導致我們無法量化實驗數據。
- (2) 伴隨著每一次的施力位置不均，啄木鳥的懸臂可能會造成彎曲，當啄木鳥懸臂的角度不同時，都會影響我們每一次的實驗結果。

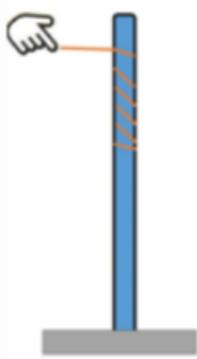


圖 4-1-5 手動施力，出處詳如圖片來源 2

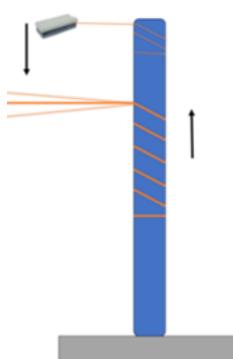


圖 4-1-6 重物施力，出處詳如圖片來源 2

2. 重物施力：

為了改變手動啄木鳥無法量化施力大小的困境，我們改為使用重物（板擦）施力的方式。在鐵桿的上方放置鐵絲作為基準線，在施力時將板擦的中心對準鐵絲末端，透過板擦掉下撞擊力，帶動啄木鳥上升。(圖 4-1-6)

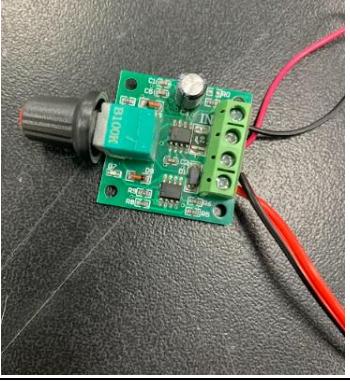
使用板擦作為施力方式，透過從固定的高度落下，可以固定與量化每次對啄木鳥施的力，但在實驗當中我們發現到了：

- (1) 當我們在調整啄木鳥的懸臂長時，每次敲擊到啄木鳥懸臂的範圍會隨著懸臂減短而變少，造成施力不均的困境。
- (2) 在將板擦掉落時，我們除了可以確定在剛放手時是垂直掉落的狀況外，無法確定在撞擊到板擦的當下是否是垂直擊中。

3. 震動馬達施力：

為了改善使用重物施力可能造成的施力不均問題，我們跟生活科技老師討論後，我們以馬達結合熱熔膠條製作震動馬達。透過馬達上的不等長熱熔膠條轉動，馬達會因為偏心軸的關係產生震動，對啄木鳥施力，裝置如圖 4-1-7。

使用自製的震動馬達施力，我們可以固定每一次施力的位置與施力大小，但仍無法改變施力大小與改變施力頻率。

	
圖 4-1-7 電動施力方式	圖 4-1-8 PWM 脈衝調速器控制轉速施力
圖片出處詳如圖片來源 1	

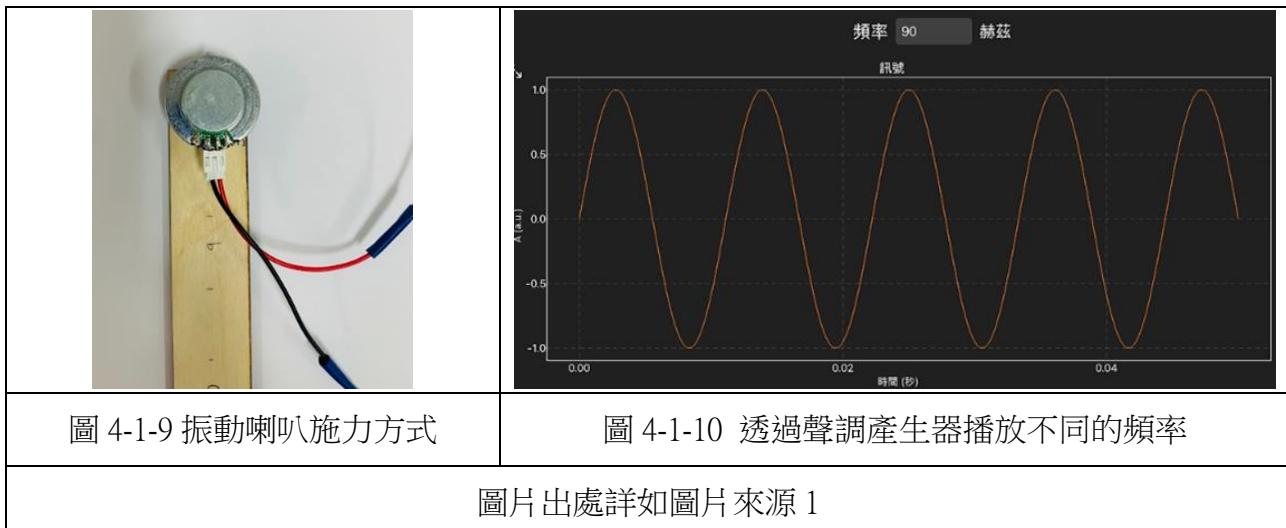
4. 以 PWM 脈衝調速器控制輸入電壓，調整馬達轉速，改變施力：

為控制施力大小與頻率問題，我們使用 PWM 脈衝調速器控制輸入電壓，調整馬達轉速，改變施力，裝置如圖 4-1-8。透過此裝置，我們做到了以電壓控制馬達轉速，達到改變施力大小與頻率的目的，但馬達的額定電壓有一定範圍，我們可以進行控制的電壓部分有限，無法進行差異較大的量測。並且以自製震動馬達進行施力，我們僅能透過電壓大小控制施力大小，無法量化電壓大小與施力大小的關係。

5. 以振動喇叭施力：

為了改善 PWM 脈衝調速器無法量化電壓與施力大小關係的困境，我們改為使用振動喇叭（圖 4-1-9）搭配「phyphox」物理程式中的聲調產生器（圖 4-1-10），來控制施力的頻率並透過藍芽控制平板輸出的音量來控制施力大小。

振動喇叭的施力方式大大改善了之前無法在量化與控制啄木鳥施力大小的問題，也讓我們能夠進行影響動力啄木鳥上升因素的討論。



(三) 動力啄木鳥穩定性測試

為了確定實驗的準確性，我們做了七支相同的動力啄木鳥（懸臂 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm），並以振動喇叭音量 100%（iPad 音量 16 格）、振源位置為 30cm 進行 5 秒鐘上升高度的穩定性測試。由表 4-1-3 可以發現七支啄木鳥的變異係數（CV）均於 3%，顯示各支動力啄木鳥的測量數據都有良好的一致性。分析七支動力啄木鳥樣本間的一致性分析，可以發現七支啄木鳥樣本 5 秒鐘上升高度的平均值 41.92，標準差為 2.37，變異係數（CV）為 5.65%，為中等程度變異。其中 2 號（45.81）和 3 號（43.56），與其他樣本有稍高偏差。因此，後續進行實驗時，我們以內部一致性較高，且 5 秒鐘上升高度較為接近的 1 號與 5 號樣本作為本實驗的實驗器材。

表 4-1-3 動力啄木鳥內部一致性測試表

樣本	平均值	標準差	CV (%)
1 號	40.82	0.08	0.20
2 號	46.20	0.86	1.87
3 號	43.46	0.70	1.61
4 號	38.30	0.84	2.19
5 號	40.98	0.98	2.39
6 號	42.42	1.17	2.76
7 號	42.42	1.17	2.76

二、實驗一：探討音源輸入振動頻率對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

動力啄木鳥以懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm，喇叭音量 100%（iPad 音量 16 格）、振源位置 30cm，測試不同頻率爬升速度數據如下表：

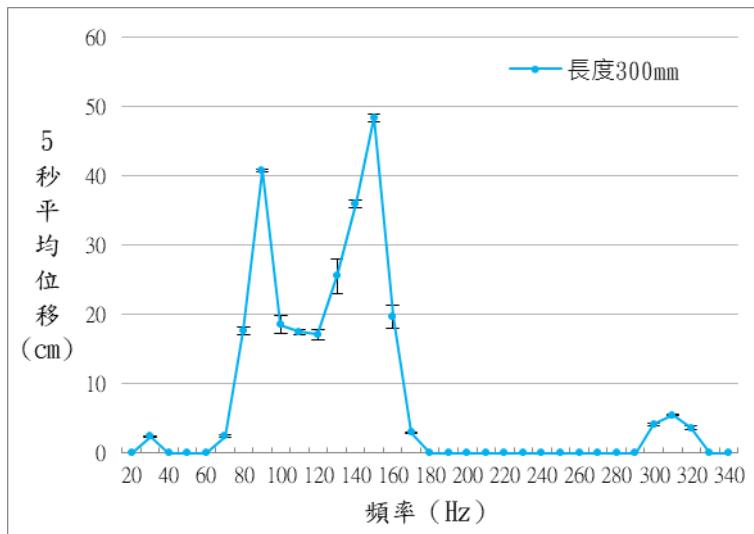


圖 4-2-1 振動頻率與啄木鳥上升速度的關係圖，出處詳如圖片來源 1

實驗觀察：實驗數據顯示，在頻率 20Hz 時，啄木鳥無上升跡象；在 30Hz 時啄木鳥出現了些微的上升；在 40Hz 到 60Hz 時，啄木鳥皆沒有動靜；在 70Hz 時，啄木鳥開始出現上升的趨勢，並在 90Hz 時達到第一個高峰。接下來隨著頻率上升，上升速度會先下降再上升，在 150Hz 達到第二高峰，頻率超過 150Hz 後，爬升速度開始下降，在 300Hz 時又產生微小的上升。

三、實驗二：探討振源位置對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

動力啄木鳥以懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm、振動頻率 90Hz、喇叭音量 100%（iPad 音量 16 格），測試不同振源位置爬升速度數據如下表：

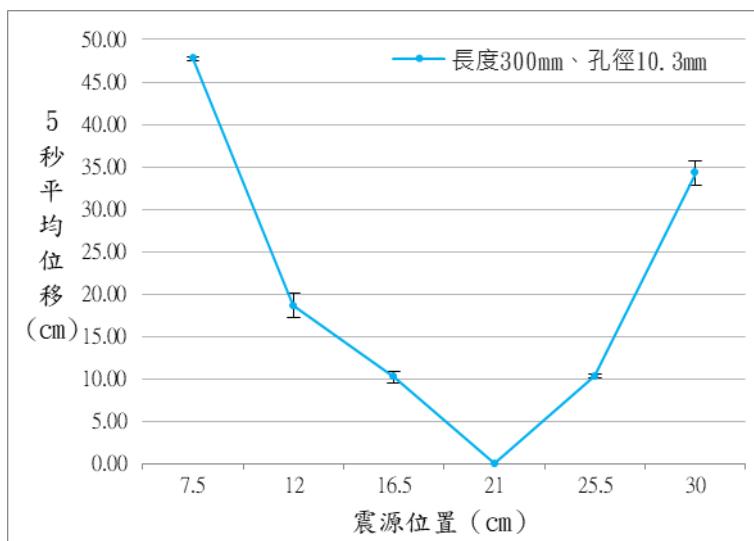


圖 4-3-1 振源位置與上升速度關係圖，出處詳如圖片來源 1

實驗觀察：將震動馬達的位置，由啄木鳥懸臂最外側時（300mm）往內移動時，上升速度會從 34.28cm/s 開始下降。在振源位置在 21.00 公分時，啄木鳥無法上升最慢。而振源位置由 21.00 公分、16.50 公分、12.50 公分逐漸移動到 7.5 公分處，啄木鳥的上升速度會逐漸變快。振源位置在 7.5 公分時，啄木鳥的速度達到最快 47.74cm/s。

四、實驗三：探討不同懸臂長對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

動力啄木鳥以孔徑 10.3mm、孔距 28mm，喇叭音量 100%（iPad 音量 16 格）、振源位置 30cm，分別以懸臂 300mm、255mm、210mm、165mm、120mm，測試不同懸臂長爬升速度數據如下表：

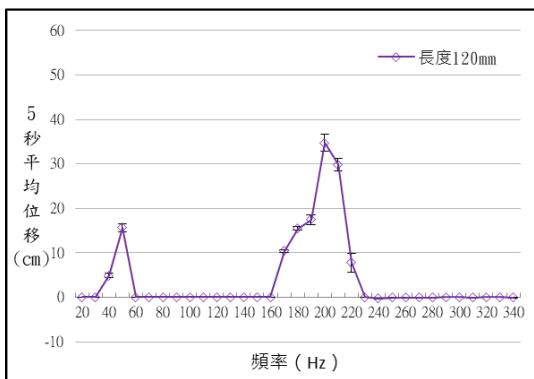


圖 4-4-1、不同頻率於懸臂長 120mm

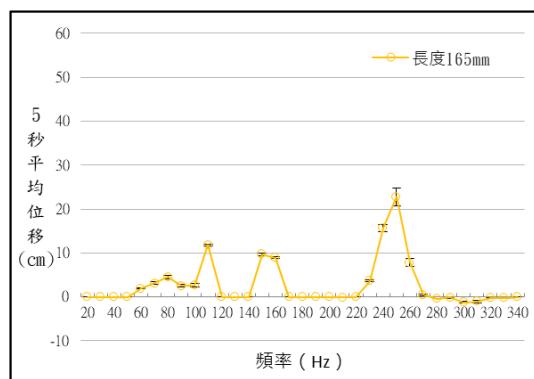


圖 4-4-2、不同頻率於懸臂長 165mm

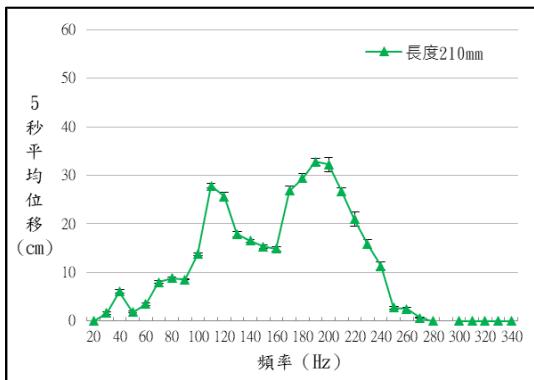


圖 4-4-3、不同頻率於懸臂長 210mm

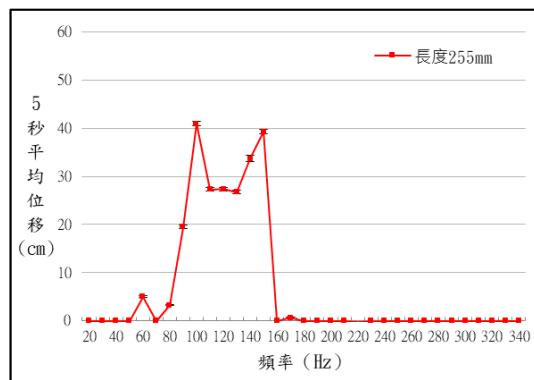


圖 4-4-4、不同頻率於懸臂長 255mm

圖片出處詳如圖片來源 1

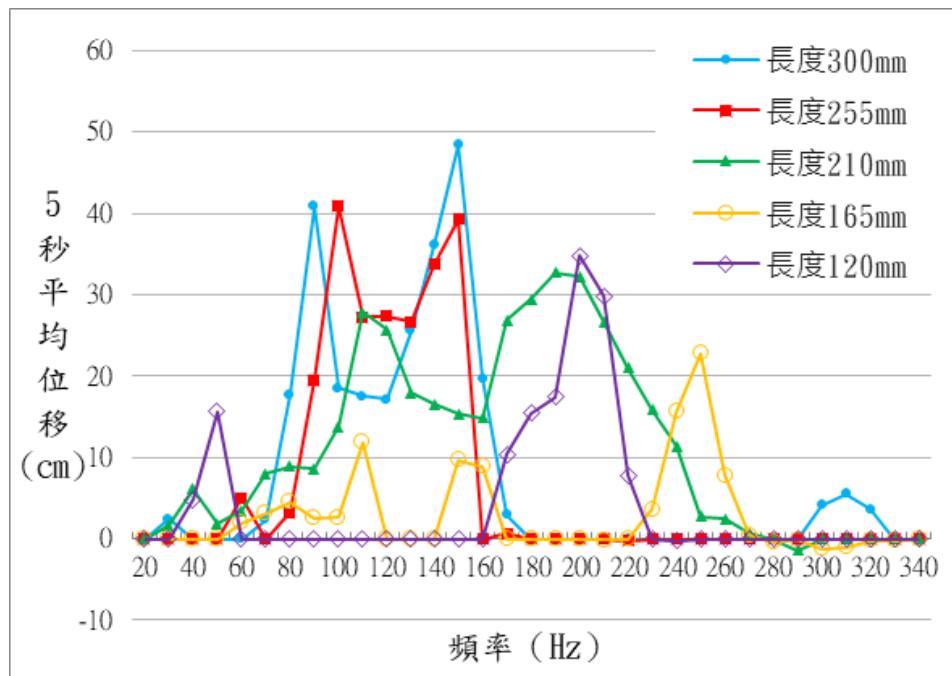


圖 4-4-5 不同懸臂長振動頻率與上升速度關係圖，出處詳如圖片來源 1

實驗觀察：懸臂長 300mm 的啄木鳥所對應到的最大峰波為 150Hz，懸臂長 255mm 的啄木鳥所對應到的最大峰波為 100Hz，懸臂長 210mm 的啄木鳥所對應到的最大峰波為 190Hz，懸臂長 165mm 的啄木鳥所對應到的最大峰波為 250Hz，懸臂長 120mm 的啄木鳥所對應到的最大峰波為 200Hz。每隻懸臂長不同的啄木鳥皆有自己上升速度最快的頻率。

五、實驗四：探討啄木鳥科學玩具孔徑對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

動力啄木鳥以懸臂長 300mm、孔距 28mm，喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格)、振源位置 30cm，以孔徑 10.1、10.3、10.5 的啄木鳥測試不同孔徑大小對爬升速度數據如下表：

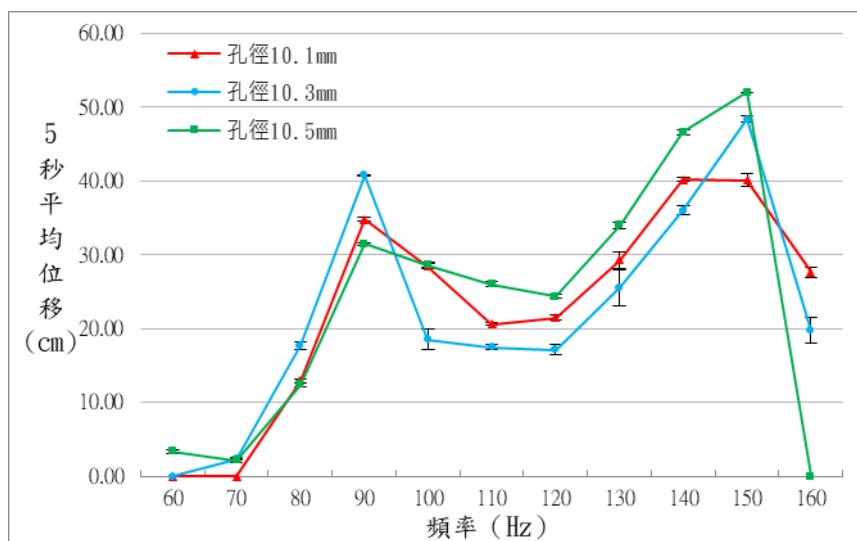


圖 4-5-1 不同孔徑大小的啄木鳥振動頻率與上升速度關係圖，出處詳如圖片來源 1

實驗觀察：圖表中三個不同孔徑的啄木鳥所產生的曲線有很高的相似性，皆在 90Hz 達到第一個高峰，並開始下降達到 120Hz 時又開始上升，在 150Hz 時達到第二個高峰，並在 160Hz 下降。

六、實驗五：探討振幅對於啄木鳥科學玩具上升速度影響自造啄木鳥

以懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm，喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格)、振源位置 30cm，測試不同頻率爬升速度數據如下表：

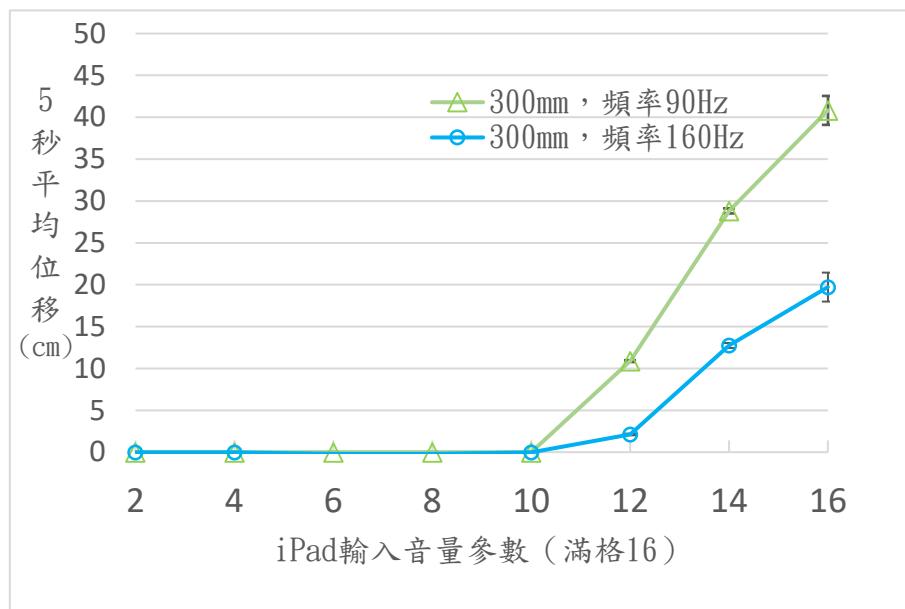


圖 4-6-1 不同輸入音量(振幅)對於上升速度關係圖，出處詳如圖片來源 1

實驗觀察：在音量 0 到 10 格時，動力啄木鳥無上升跡象，音量 12 格時，頻率 90Hz 和 160Hz 的啄木鳥都開始上升，並且隨音量增加，振幅增加，啄木鳥的上升速度也增加。

伍、 討論

一、實驗一：探討音源輸入振幅對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

(一) 實驗數據與現場實驗觀察分析：

在實驗過程中，我們發現啄木鳥在不同頻率下的反應有所差異。當頻率為 30Hz 時，出現輕微上升的情形，但反應不算明顯；到了 40Hz，啄木鳥的移動幾乎停止，看不出有明顯的變化。直到頻率提升到 70Hz 時，啄木鳥才又開始上升。從 80Hz 到 160Hz 之間，是上升幅度最明顯、最穩定的區段，變化趨勢也最清楚。另外，啄木鳥在高頻的 300Hz 到 320Hz 之間，也出現了再次上升的情況，但這一段的幅度明顯比較小。根據圖 4-2-1，我們可以看到較明顯的峰值集中在 90Hz 和 150Hz

附近，顯示模型在這些頻率下的反應特別強烈。而在數據分析方面，我們每個條件都進行了七次實驗，並採用去頭去尾的方式，只取中間五筆數據來做統計分析，這樣可以減少偶發誤差的影響。從計算結果來看，各組的標準差普遍偏低，表示我們的數據相當穩定，沒有太大的波動。因此，我們使用 95% 信賴區間計算的誤差棒（Error bar）在圖中幾乎不明顯，這說明本實驗的準確度和重複性都非常良好。我們推測這與我們在操作上的一致性和良好的重複測量有關，就控制變因與操縱變因的掌控上有達到好的成效。

（二）振動頻率造成啄木鳥上升因素分析：

從圖 4-2-1 可以看出，在振動頻率介於 70Hz 至 170Hz 之間時，啄木鳥模型會出現穩定上升的現象。其中，以 150Hz 的表現最為明顯，特別是在懸臂長度為 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm，喇叭音量為 100% 的組合條件下，150Hz 似乎是最佳適合讓模型順利上升的頻率。此外，在 90Hz 附近也出現另一個明顯的峰值，但當頻率超過 150Hz 後，上升速度又快速下降。從這些觀察來看，可以推測：不同的懸臂長度可能對應不同的最佳振動頻率，啄木鳥模型能夠有效上升的頻率並不會是固定的單一數值。至於為什麼必須達到特定頻率模型才會開始上升，我們推測與「摩擦自鎖」的現象有關。當振動頻率剛好達到能夠解除摩擦自鎖的程度時，啄木鳥就能上升。啄木鳥解鎖後到回復自鎖的時間很短暫，解鎖期間，懸臂要能在回復自鎖前造成擺動剛好向上造成重心偏移，這樣啄木鳥才有機會上升。而上升後又要可以馬上自鎖，這樣才能固定在已經上升的高度，接著要再靠相同的擺動頻率讓鐵桿端的啄木鳥固定點再度解開，一再重複前面的步驟，就可以一直順暢的往上爬升，如下圖 5-1-1 所示（圖中以擺動幅度大來呈現，是為了比較清楚說明，實際上振動喇叭造成的擺動不會這麼明顯）。從圖中可以看出靜止狀態時，摩擦自鎖的摩擦力位置為上孔洞左邊、下孔洞右邊，因此要造成摩擦自鎖解開，勢必是在懸臂上擺時才有可能（機構逆時針旋轉），而解開時正好重心偏移向上，所以啄木鳥可以上升，接著振動下擺時，整體會順時針轉，孔洞也就回到先前角度與鐵桿呈現摩擦自鎖狀態，因此即使重心下移也不會讓啄木鳥下降，所以這樣可以理解懸臂擺動時，啄木鳥基本是上升的。

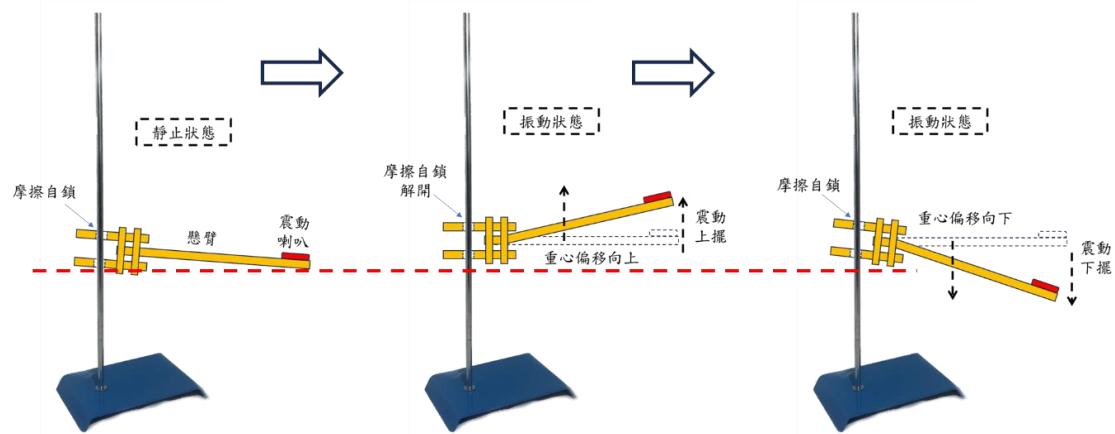


圖 5-1-1 動力啄木鳥上升原理示意圖，出處詳如圖片來源 2

(三) 摩擦自鎖與振動頻率探究：

從我們數據看出，這組條件組合的啄木鳥要上升最適合的頻率為 150Hz，若以波的觀點來看，振動喇叭能造成懸臂擺動的幅度其實很小，這麼小的幅度要讓摩擦自鎖解開應該是有困難，但是若是頻率能對到啄木鳥機構的自然頻率，那麼振動喇叭的頻率也就成為激振頻率，與啄木鳥的機構能引發「共振效應」，這時的幅度就會大很多，因此摩擦自鎖就有機會解開。這也就說明了為何 150Hz 能夠有最好的上升高度了，因為 150Hz 應該就是有對應到該組機構的自然頻率，而其他頻率應該就是沒有對應到機構的自然頻率，所以才無法完全解開摩擦自鎖。

(四) 能量與啄木鳥上升探討：

若以能量的觀點來看這個現象，我們喇叭振動提供了能量，利用波的形式靠懸臂傳遞。其中懸臂因振動獲得彈力位能，能量傳遞至啄木鳥固定端造成摩擦解鎖後，就能轉為機構上升的動能，動能再轉換為重力位能，符合能量守恆原理。因為我們使用的音量大小都一樣，也就是振幅相同，振幅代表能量大小，所以實驗中不同頻率的能量應該都相同，但不同的是，若振動喇叭輸出的頻率對應到機構的自然頻率，引發共振效應而讓振幅變大，振幅變大也就代表能量變大。就能夠比其他頻率更能解開摩擦自鎖。那些不能造成上升的頻率，應該就是摩擦力的影響造成，也就是摩擦自鎖，才沒辦法順利將能量做轉換重力位能。

二、實驗二：探討振源位置對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

(一) 振源位置對上升峰值的探討：

從圖 4-3-1 中可以觀察到，在振源位置設定為 30cm 與 7.5cm 時，也就是振動喇叭分別放置在懸臂最末端與最靠近鐵桿的兩端時，啄木鳥的上升速度是所有位置中表現最好的。其中又以距離鐵桿最近的 7.5cm 位置效果最佳，啄木鳥的上升最為明顯。

我們推測，這樣的結果與振動能量的傳遞方式有關。當振源靠近鐵桿（即 7.5cm 處）時，振動產生的能量能更直接傳導至與啄木鳥接觸的鐵桿部位，減少了經由懸臂傳遞時的能量損耗，因此對啄木鳥產生的推力較大。而振源若設於懸臂最末端（30cm 處），雖然離啄木鳥較遠，但整體能量仍朝鐵桿方向集中傳遞，經過懸臂彎曲與彈性的引導後仍保有一定的驅動效果。

相比之下，當振源位置在懸臂中間（21cm 處）時，情況則不同。這個位置剛好在兩端之間，振動產生的能量會向兩邊分散，傳遞至啄木鳥位置的能量反而較少，導致上升效果明顯下降。

三、實驗三：探討不同懸臂長對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

(一) 實驗數據與現場實驗觀察分析：

表 5-3-1 不同懸臂長度的動力啄木鳥上升速度峰值的頻率大小

懸臂長 (mm)	120	165	210	255	300
最大峰值	200Hz	250Hz	190Hz	100Hz	150Hz
第二峰值	50Hz	110Hz	110Hz	150Hz	90Hz
第三峰值	無	150Hz	無	60Hz	310Hz

從數據方面來看，除了懸臂長 120mm 和 210mm 之外，幾乎所有的啄木鳥都可以觀察到三個上升速度的峰值。而振動頻率在懸臂長為 120mm 和 165mm 時，可以看到振動頻率與上升速度的峰值較為明顯（兩個上升峰值之間，啄木鳥幾乎不會上升）；在懸臂長 210mm、255mm 與 300mm 時，在最大峰值與第二峰值之間，則可以觀察到啄木鳥上升速度變小，但仍可以向上爬升。

(二) 懸臂長與上升峰值探討：

從實驗結果中的峰值表現來看，每一種懸臂長度皆對應一個最適合的振動頻率，這與之前提到的「機構自然頻率」有密切關係。由於共振效應會使摩擦自鎖被解除，

因此當振動頻率接近該機構的自然頻率時，就更有可能出現明顯的上升現象。

根據圖 4-4-1 的數據可觀察到，各種懸臂長度所對應的最大上升峰值，其所發生的頻率並未隨著懸臂長的增加呈現明顯的線性趨勢。這表示影響因素並非單純的頻率高低，而是振動頻率是否剛好對應該懸臂系統的自然頻率。由於不同長度的懸臂會改變整個機構的結構特性，進而導致自然頻率改變，因此產生峰值的頻率也會有所不同。換句話說，啄木鳥模型是否能有效上升，關鍵不在於振動頻率高或低，而在於是否對到系統的自然頻率產生共振。

(三) 不同懸臂長與對應上升頻率探討：

在實驗中，我們進行了懸臂長度為 120mm、165mm、210mm、255mm 與 300mm 等不同懸臂長度。在懸臂長 165mm 與 120mm，結果顯示這兩種較短懸臂的模態表現較為穩定。進一步分析圖表後，我們注意到真正不穩定的狀況反而集中在懸臂長 210mm，在這段區間內，數據波動明顯且難以辨認出明確峰值。

我們推測，這個範圍可能正好落在一個模態穩定性波動區間（Modal Stability Fluctuation Zone）內，也就是機構處於模態過渡或切換的邊緣，使整體共振反應變得模糊或不穩定。由於模態不穩定，摩擦自鎖的解除與上鎖也就難以有規律的發生，導致啄木鳥無法順利上升。而當懸臂長繼續增加或縮短時，模態表現反而趨於穩定，上升峰值也變得明顯。

四、實驗四：探討啄木鳥科學玩具孔徑對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

(一) 以摩擦自鎖來探討孔徑對上升速度的影響：

在圖 4-5-1 中我們可以發現，孔徑 10.1mm、10.3mm、10.5mm 並沒有固定哪個比較快，而是交錯的。但是大致上我們也可以看到孔徑 10.1mm 的上升速度並沒有特別快，我們推測是因為孔徑較窄，啄木鳥可移動範圍較少，如下圖 5-4-1 所示，因為振動造成啄木鳥機構逆時針旋轉，摩擦自鎖解開，重心偏移向上即往上升，但因為可移動範圍太小，靜止時原本上左下右的摩擦自鎖狀態，機構逆時針旋轉後變成上又下左與鐵桿產生磨擦力，因此每次懸臂擺動要能上升的時間很短，所以上升位移小。而在孔徑 10.3cm 的時候上升效果最好，我們認為是因為他的孔徑正好可以讓啄木鳥上升並且不會造成它下降，也就是說機構逆時針解開摩擦自鎖時，還沒像圖 5-4-1 這樣

碰到鐵桿產生摩擦力，重心偏移造成的上升力就已經完成了上升，接著擺臂下擺機構順時針轉回來，在還沒因重力掉落前完成摩擦自鎖，這樣就可以保住每一次的上升高度，接著再重複循環剛開始懸臂振動的逆時針旋轉。而孔徑 10.5mm 得上升高度之所以會在高頻時急速下降是因為孔徑較寬可能會造成每次上升後又有一點點下降，推測是因為孔洞較大，逆時針旋轉解開摩擦自鎖時，懸臂下擺轉回順時針時，因為孔洞內範圍大，還來不及完成摩擦自鎖就已經被重力拉往下，此段時間啄木鳥就會先上升再下降，造成上升的速度較小。

(二) 以振動頻率探討孔徑對上升速度的影響：

在圖 4-5-1 中我們可以發現，孔徑 10.1mm、10.3mm、10.5mm 在不同振動頻率時啄木鳥上升速度並沒有固定哪個比較快；但若以整體的趨勢來說，仍可以看到啄木鳥上升速度的峰值會對應到相同的頻率。我們推測啄木鳥的孔徑大小在不同振動頻率的上升速度會有些許的差異，但對於機構的自然頻率並不會造成影響。

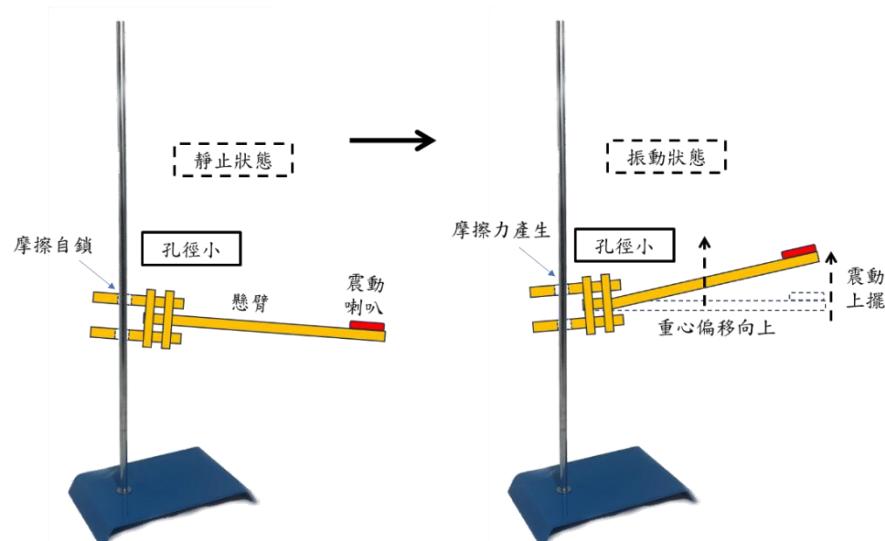


圖 5-4-1 孔徑大小對於動力啄木鳥上升影響示意圖，出處詳如圖片來源 2

五、實驗五：探討振幅對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

(一) 以能量觀點作音量大小與上升速度探討：

根據圖 4-6-1，我們可以得知在音量為 12 格之前，上升的效果都不明顯。在我們八年級上學期自然科中學到，聲波的音量大小即振幅大小，也是能量大小，因此我們推測這組實驗中，是因為振幅越大，聲波所含的能量也就越多，摩擦自鎖解鎖的機會更大，而振幅大、重心偏移量也會越大，讓啄木鳥可以上升的高度也變得更多。而會

導致啄木鳥下降或停止不動的振幅都相對較小，可能振動提供的能量只足夠解開摩擦自鎖，自鎖解開時，已無法提供讓他上升所需的能量，才會導致啄木鳥下降。

(二) 以頻率探討音量大小與懸臂長：

在懸臂長 300mm，測試頻率 90Hz 和 160Hz 在輸入振幅不同時對上升的影響。根據實驗一的結果可以發現，90Hz 對應到懸臂長 300mm 時的第二自然頻率。而在對應自然頻率時，整個系統會產生共振現象，導致懸臂的振幅被放大。這樣的共振效果會讓懸臂在短時間內擺動得更劇烈，也就更有機會讓啄木鳥的摩擦自鎖被解開，進而讓啄木鳥上升。相較之下，160Hz 並非對應 300mm 懸臂的自然頻率，因此共振放大效果不明顯，懸臂擺動幅度相對較小。因此，即使在相同的輸入振幅條件下，90Hz 所帶來的振動效果會比 160Hz 強烈許多，實際觀察中也的確能看到 90Hz 條件下的啄木鳥上升高度更明顯。因此，可以合理推測：當輸入頻率接近或等於懸臂的自然頻率時，透過共振所產生的放大效應，會顯著提升啄木鳥的上升效率與上升高度。

陸、 結論

一、結論

本研究在探討影響啄木鳥科學玩具上升的因素與原理，分別討論音源輸入的振動頻率、懸臂長度、振源位置、孔徑大小及音源輸入振幅等變因，對啄木鳥科學玩具上升速度的影響，獲得以下結論：

- (一) 在原理方面，動力啄木鳥可以上升是因為在懸臂震動上擺、摩擦自鎖解開時，重心偏移向上，而在懸臂下擺時，摩擦自鎖已將啄木鳥卡住，所以重心偏移向下也不會讓它下降。透過振動喇叭提供的動能轉變成彈力位能，再變成動力啄木鳥的重力位能。
- (二) 我們嘗試了不同構造和施力方式後，發現以用雷射切割木板製作井字形結構，搭配振動喇叭的動力啄木鳥能精準地控制變因並且具有良好的穩定性，進行實驗的效果最佳。
- (三) 影響啄木鳥玩具上升的因素，實驗結果如下：
 1. 音源輸入振動頻率對啄木鳥科學玩具的上升行為有關鍵影響。在音源振動頻率達到或接近啄木鳥機構自然頻率時，可引發共振效應，有效解除摩擦自鎖，產生明顯的上升現象。在本次實驗中，當頻率為 150Hz 時，上升效果最為顯著。
 2. 振源位置會影響啄木鳥科學玩具的上升效率。動力啄木鳥上升速度大小依序為振源位置於懸臂前段(靠近鐵桿)>振源於懸臂末段(遠離鐵桿)>振源於懸臂中段。
 3. 不同懸臂長度對應不同的最大共振峰值頻率，每一種長度都有他最適合的頻率組合。
 4. 啄木鳥科學玩具的孔徑大小主要影響其上升的速度，但推測與機構的自然頻率無關。孔徑過小可能限制了啄木鳥的移動範圍，而孔徑過大可能導致摩擦自鎖不穩定，造成上升後又略有下滑。其中，孔徑 10.3mm 是效果最好的。
 5. 音源輸入振幅(以 iPad 音量格數表示)大於 12 格時，動力啄木鳥才能夠上升。

二、未來研究與展望：

(一) 科學教育的教材教具：

以往在獨立研究課程製作的啄木鳥，僅能以鐵絲繞螺旋的方式，透過控制螺旋的鬆緊度、懸臂長度來探討這些變因對於啄木鳥往下滑落的速度的影響。在我們設計的動力啄木鳥，除了能進行原先往下滑落的啄木鳥的探究實驗（孔徑與懸臂長對於下滑速度的影響），加入振動喇叭後，還可以進行音源振動頻率與振幅的討論，在未來也還能加入其他變因討論來讓啄木鳥科學玩具變得更有趣，如變換啄木鳥材質、兩孔之間的孔距，甚至是透過機電整合，製作遙控啄木鳥等，都可以提高探究實驗的樂趣與想像。對於跟我們一樣喜歡探究思考的學生是一個相當有趣的教材教具。

(二) 啟發工程設計的靈感：

在這次的啄木鳥實驗裡，我們看到了啄木鳥可以沿著鐵桿就可以垂直向上爬升，這讓我們想到未來在相關的工程機械設計，或許可以有不一樣的想法，例如：電力器材檢修時，須以雲梯車搭載人員，或許未來可以利用類似啄木鳥的裝備器材就能夠垂直上下，不需使用雲梯車。又例如在狹小空間裡的垂直移動與運送，或許就可以利用向上啄木鳥的運動方式與結構進行。雖然這方面的應用可能還需要更深入的研究，但透過這次的實驗，讓我們看到了更多的可能。

柒、 參考文獻資料

一、「小行星樂樂 TV」頻道。【動手玩科學】抖抖啄木鳥。 <https://www.youtube.com/watch?v=i8dmFOTa3Cg>

二、王栢村（2019）。《振動噪音科譜專欄》「自然頻率」和「共振頻率」有差別嗎？。震動噪音產學技術聯盟。<https://aitanhv.blogspot.com/2019/09/blog-post.html>。

三、吳宜恩、王立心、侯喻文（2019）。啄木鳥玩具大挑戰。嘉義市第 38 屆中小學科學展覽會國中組物理科。

四、國民中學自然科學課本

(一) 國民中學自然科學（二上）（2023）。第 3 章 波動與聲音 翰林出版社。

(二) 國民中學自然科學（二下）（2023）。第 6 章 摩擦力 翰林出版社。

(三) 國民中學自然科學（三上）（2023）。第2章 力與運動 翰林出版社。

(四) 國民中學自然科學（三上）（2023）。第3章 功與能 翰林出版社。

五、陳沛哲、陳韻如、涂喻涵、蔡晉源、許菁芸、侯云婷（1995）。啄木鳥跳跳緩降機。中華民國第四十六屆中小學科學展覽會國小組生活與應用科學科。

六、魏子喬、鄭宜興、朱怡璇、王怡琳（1997）。大有「旋機」—透過旋轉式機制重新探討機翼升力。中華民國第四十八屆中小學科學展覽會國中組 理化科。

圖片來源

1. 本圖片由作者親自拍攝或編輯。
2. 本圖片由指導老師親自拍攝或編輯。

【評語】030103

本研究以科學玩具「啄木鳥」為題，深入探討其能沿桿上升的物理原理，並發現特定頻率會使其上升效果最佳，顯示出作者在實驗觀察與現象解析上的敏銳度。研究中運用了多項基礎而重要的物理概念。整體作品架構完整，探究動機明確，具啟發性。建議未來在作品說明中可更清楚標示所引用資料的出處，並在圖說中註明圖片是否為自行繪製或引自參考資料，以提升報告的完整性與科學倫理意識。整體而言，是一件兼具趣味性與科學精神的優秀作品！

作品海報



不再 DOWN 的啄木鳥

探究科學玩具啄木鳥上升之因素與原理

壹、前言

一、研究動機

在國一的獨立研究課程中，我們接觸到啄木鳥科學玩具，某次的實驗中，應該要下降的啄木鳥竟然上升了！令我們感到驚訝和困惑。上網卻未發現有關此現象的文獻。起初我們試著用鐵絲來還原會上升的啄木鳥，但不可控制的因素過多，經過多次的改良版本，現在我們使用振動喇叭搭配合成木板組成的機構，能做到精準控制懸臂、孔徑、間距，找出可以上升的最快最穩定的啄木鳥。

二、研究目的

1. 探討啄木鳥科學玩具上升的原因
2. 製作可以穩定控制變因的啄木鳥科學玩具
3. 探討影響啄木鳥科學玩具上升的因素

三、文獻回顧

在「啄木鳥跳跳緩降機」（1995）、「啄木鳥玩具大挑戰」（2019）的研究中，他們針對啄木鳥科學玩具的開孔位置、孔徑大小、緩降機厚度、緩降機長度、重量與重心位置進行探討，兩份報告共同討論到的變因包含了啄木鳥科學玩具的長度（懸臂長）、重量與孔徑大小，但兩份報告皆是討論下降啄木鳥的變因，可仍能給我們啟發。透過參考文獻，我們除了研究頻率高低、振幅大小、振源位置等因素外，也加入懸臂長度與孔徑大小兩項變因。

貳、研究設備及器材

鐵絲、3D 列印模具、高速攝影機、鐵尺、固定架、平板、船型開關、電路板、PWM 脈衝調速器、碼表、振動馬達、振動喇叭、曬衣夾、塑膠尺、木工用 F 夾（固定用）

參、研究過程或方法

一、啄木鳥科學玩具介紹與原理

1. 摩擦力(Friction):

啄木鳥能夠克服重力停滯在桿子上靠的就是摩擦力。我們主要需要考慮的是靜摩擦力，因啄木鳥玩具在桿子上產生的靜摩擦力是要能抵抗它本身的重力，這樣啄木鳥玩具才不會像自由落體往下掉。

2. 摩擦自鎖(Frictional Self-locking) :

摩擦自鎖是指物體在受到外力時，由於摩擦力的作用，使其無法滑動或移動，即使外力停止施加，物體仍然保持靜止的狀態。啄木鳥玩具能夠停留在垂直桿子上而不下滑，也就是一種摩擦自鎖的現象。

3. 力矩(Moment):

啄木鳥玩具中，懸掛部件的重力對桿上機構產生力矩，因機構套在固定桿上無法旋轉，產生反作用力阻止其轉動。此外，此反作用力形成摩擦力的正向力，使機構不會直接下滑。

4. 波動與振動頻率(Wave motion、Vibration frequency):

我們利用振動喇叭造成對懸臂的上下振動，產生的也就是橫波，懸臂傳遞振動產生的橫波到桿子處，造成摩擦自鎖可以暫時解開，在短暫的解開期間，懸臂擺動造成的重心偏移會有機會讓啄木鳥往上升。

5. 位能(Potential energy):

啄木鳥受振動喇叭影響使懸臂擺動，產生彈力位能並轉換為動能爬升，當摩擦自鎖解開時上升，隨後自鎖固定，完成彈力位能向重力位能轉換。摩擦力決定移動時間點，振動頻率則影響時間差。

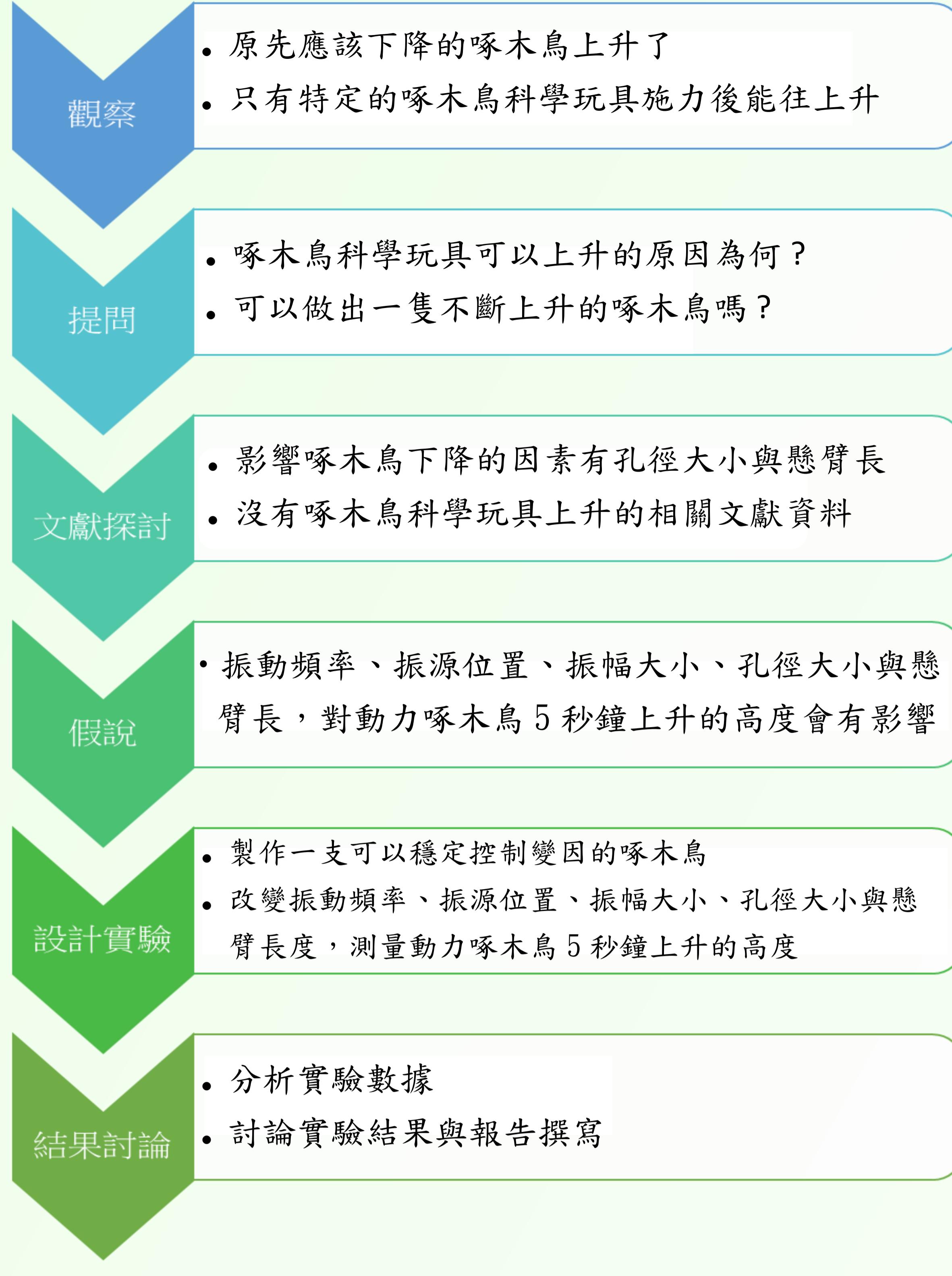
6. 自然頻率(Natural Frequency) :

又稱「特徵頻率」、「固有頻率」。我們啄木鳥機構應該有它的自然頻率，物體可以有不只一個自然頻率。自然頻率是振動模態裡的其中一個元素。

7. 共振現象(Resonance) :

當外力頻率與物體自然頻率相同時，振動量增大，稱為共振。啄木鳥實驗中，振動喇叭產生不同頻率，若匹配系統自然頻率，將放大振幅，有利於啄木鳥上升。

二、研究流程與架構



三、研究步驟

實驗都在學校的理化實驗室中進行，環境中無風的流動影響，穩定的室溫環境，每組條件組合實驗都會重複做七次量測，最後去除最高與最低的數據做分析，實驗步驟如下：

步驟一

平板與藍芽喇叭連線，並以 APP 「Phyphox」設定頻率與音量

步驟二

平板 APP 時間設定五秒後按開始，時間到自動關閉 APP

步驟三

量測啄木鳥上升的高度並記錄，相同條件下重複七次

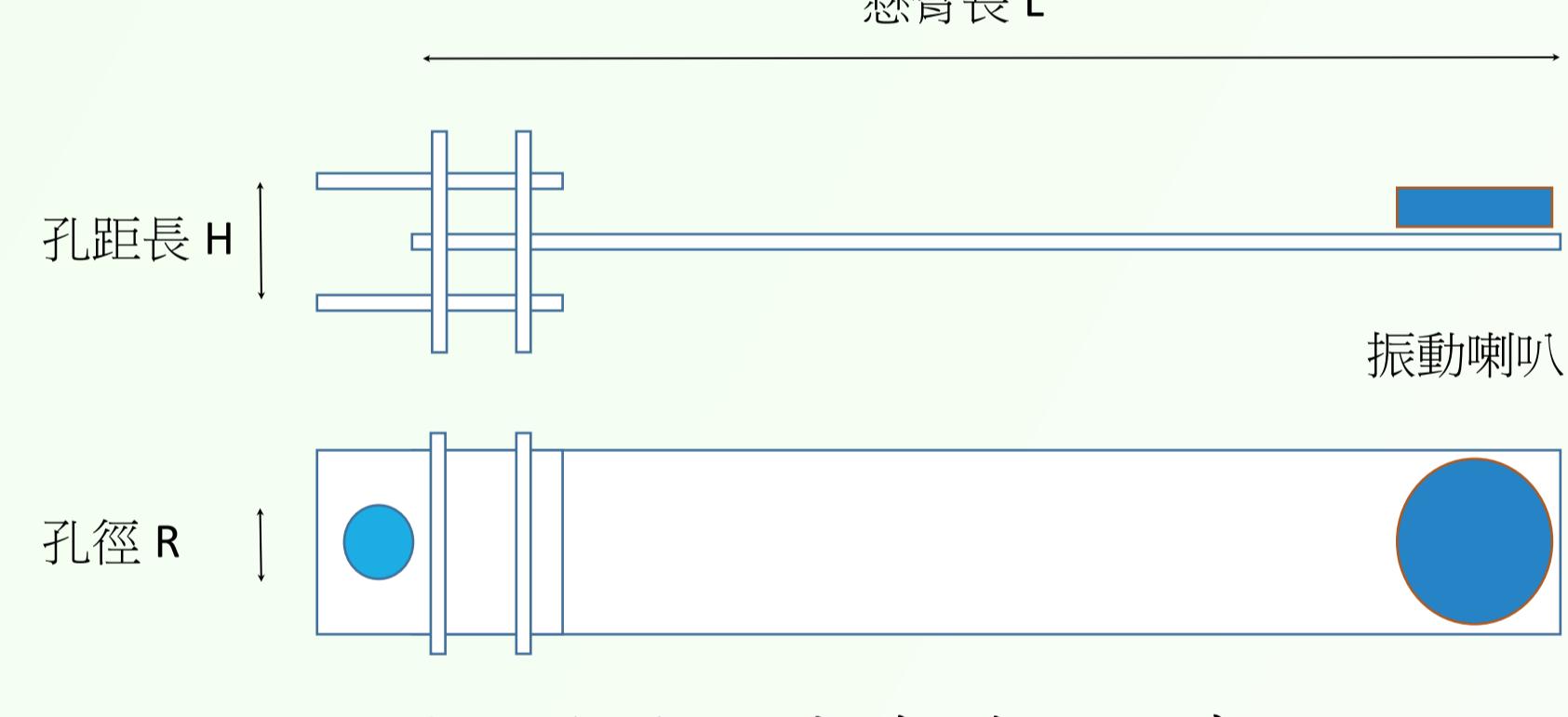


圖 4-7 動力啄木鳥構造示意圖

圖片出處詳如圖片來源(2)

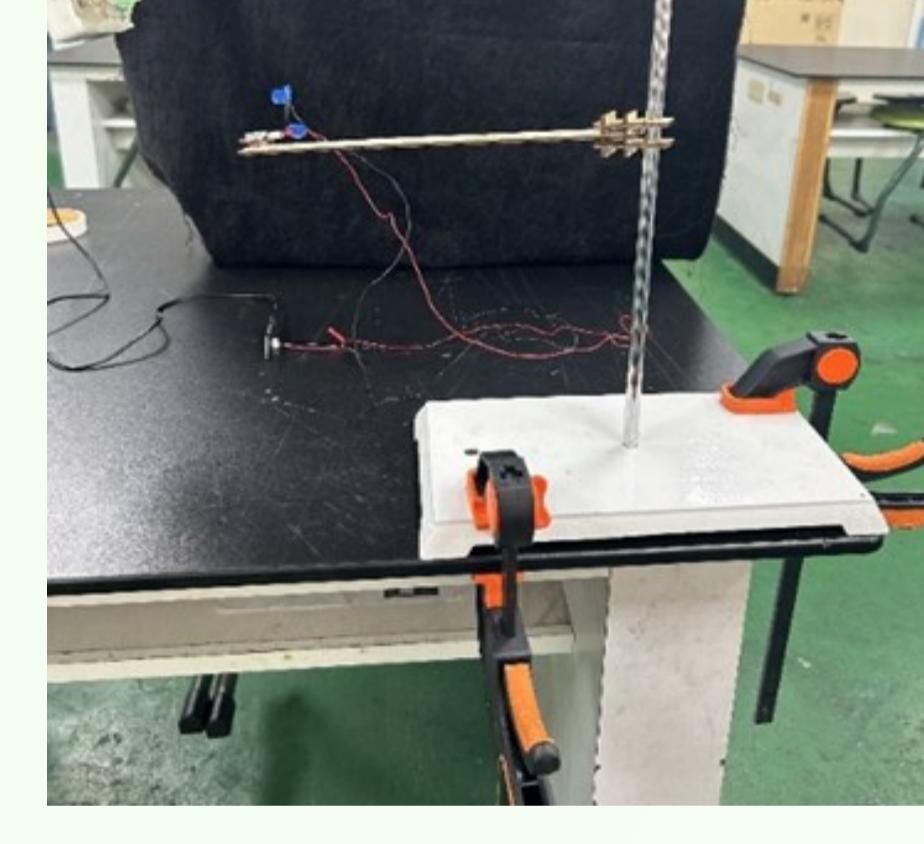


圖 4-8 實驗裝置圖

圖片出處詳如圖片來源(1)



圖 4-9 調控頻率 APP

圖片出處詳如圖片來源(1)

肆、研究結果

一、製作可以穩定控制變因的啄木鳥科學玩具探究歷程

(一)由構造方面探討啄木鳥的演進



圖 5-1-1 啄木鳥構造演進過程表

圖片出處詳如圖片來源(1)

1. 螺旋形結構：

起源：延續國一獨立研究課程，與校園自造中心合作，利用 3D 列印製作模具。

優點：可以隨著實驗變因自由改變形狀。

缺點：纏繞時施力大小不同，就算使用模具，孔徑大小還是會改變，且將啄木鳥從模具中取出時，容易形狀改變。

2. 三角形結構：

目的：改善螺旋形結構形狀改變的困境。

做出的改變：以曬衣夾代替螺旋，塑膠軟尺代替懸臂。

優點：簡化實驗裝置，更容易觀察到啄木鳥運動情形，且使用塑膠軟尺可承載的物體面積增加，更方便固定施力工具。

缺點：曬衣夾孔洞固定無法改變，且形狀為不規則孔洞；塑膠軟尺承重有限，所以軟尺會出現下垂的跡象。

3. 井字形結構：

目的：改善無法自由調控變因的困境

做出的改變：改為使用合成木板加雷射切割。

優點：更精準控制變因。



圖 5-1-1 動力啄木鳥側面圖 圖片出處詳如圖片來源(1)

(二)由施力方面探討啄木鳥的演進

第一代 手動施力	第二代 重物施力	第三代 震動馬達施 力	第四代 控制轉速施力	第五代 振動喇叭施 力
以手動方式在 懸臂末端施力	透過從固定 高度將重物 落下，來固 定施力大小	以不等長的 熱融膠條， 製作震動馬 達對啄木鳥 施力	利用脈衝調速 器 PWM，調整 電壓以控制熱 熔膠條轉速，	以 phyphox APP 透過藍芽 連結振動喇 叭對啄木鳥 施力

表 5-1-2 啄木鳥施力方式演進過程表

圖片出處詳如圖片來源(1)

(三)啄木鳥穩定性測試

為了確定實驗的準確性，我們做了七支相同的動力啄木鳥（懸臂 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm），並以振動喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格)、振源位置為 30cm 進行 5 秒鐘上升高度的穩定性測試。從統計結果來看，七支啄木鳥的變異係數 (CV) 均於 3%，顯示各支動力啄木鳥的測量數據都有良好的一致性，這說明我們設計的動力啄木鳥的穩定性很高。

伍、討論

一、音源輸入振動頻率對於啄木鳥科學玩具上升速度的影響

在這個實驗中，我們使用懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm 的動力啄木鳥，喇叭音量設為 100% (iPad 音量 16 格)。我們測試頻率 20Hz 到 340Hz 對啄木鳥科學玩具(以下稱為啄木鳥)上升速度的影響。

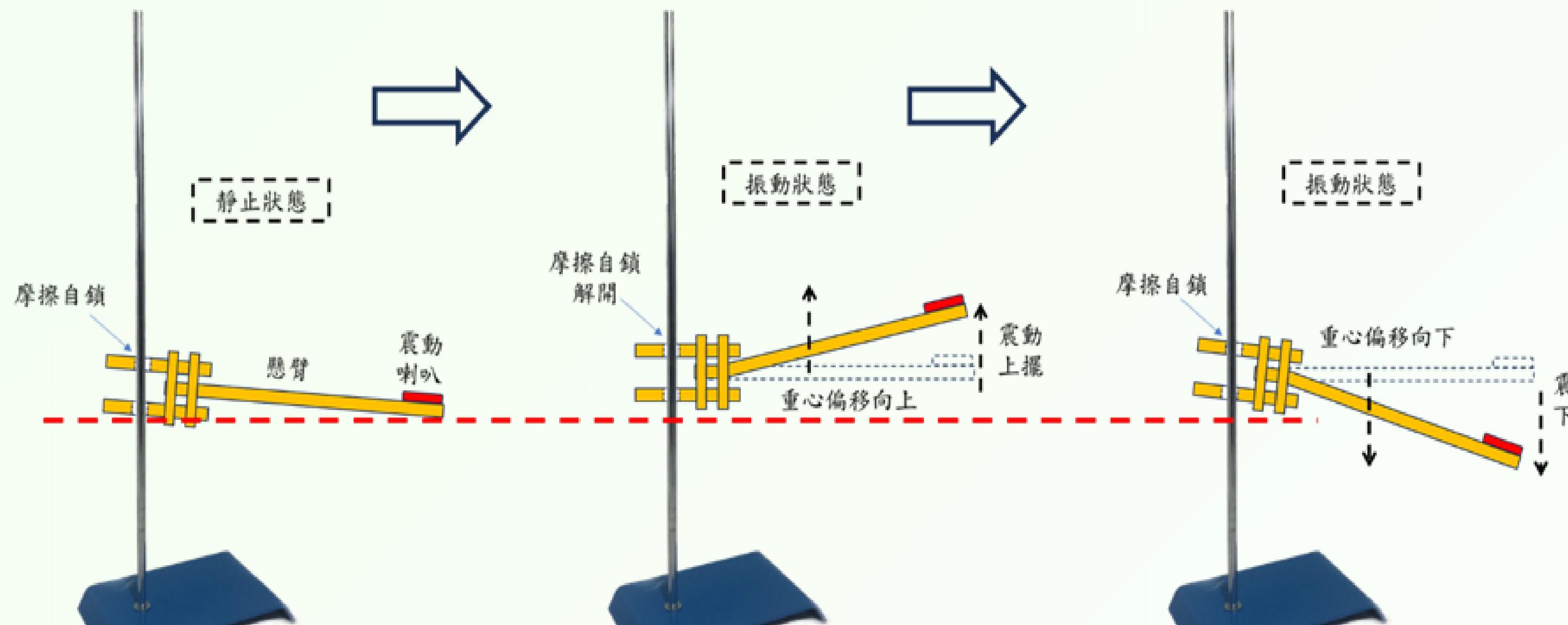


圖 6-1-2 啄木鳥解開摩擦自鎖後振動上升示意圖

圖片出處詳如圖片來源(1)

我們推測啄木鳥能在特定頻率上升的原因是該頻率能將摩擦自鎖解開，而啄木鳥的懸臂能在解鎖期間造成擺動向上造成重心偏移，讓啄木鳥上升。而上升後又要馬上自鎖，這樣才能固定在已經上升的高度，接著要再靠相同的擺動頻率讓鐵桿端的啄木鳥固定點再度解開，一再重複前面的步驟，讓啄木鳥一直順暢的往上爬升(如圖 6-1-2)。

在圖 4-2-1 中我們觀察到了兩個峰值，分別是 90Hz 和 150Hz，由此可知啄木鳥模型能夠有效上升的頻率並不會是固定的單一數值。若以波的觀點來看，振動喇叭能造成懸臂擺動的幅度其實很小，所以我們認為，若是頻率能對到啄木鳥機構的自然頻率，那麼振動喇叭的頻率也就成為激振頻率，與啄木鳥的機構能引發「共振效應」，這時振動的幅度就會大很多，因此摩擦自鎖更有機會解開，這

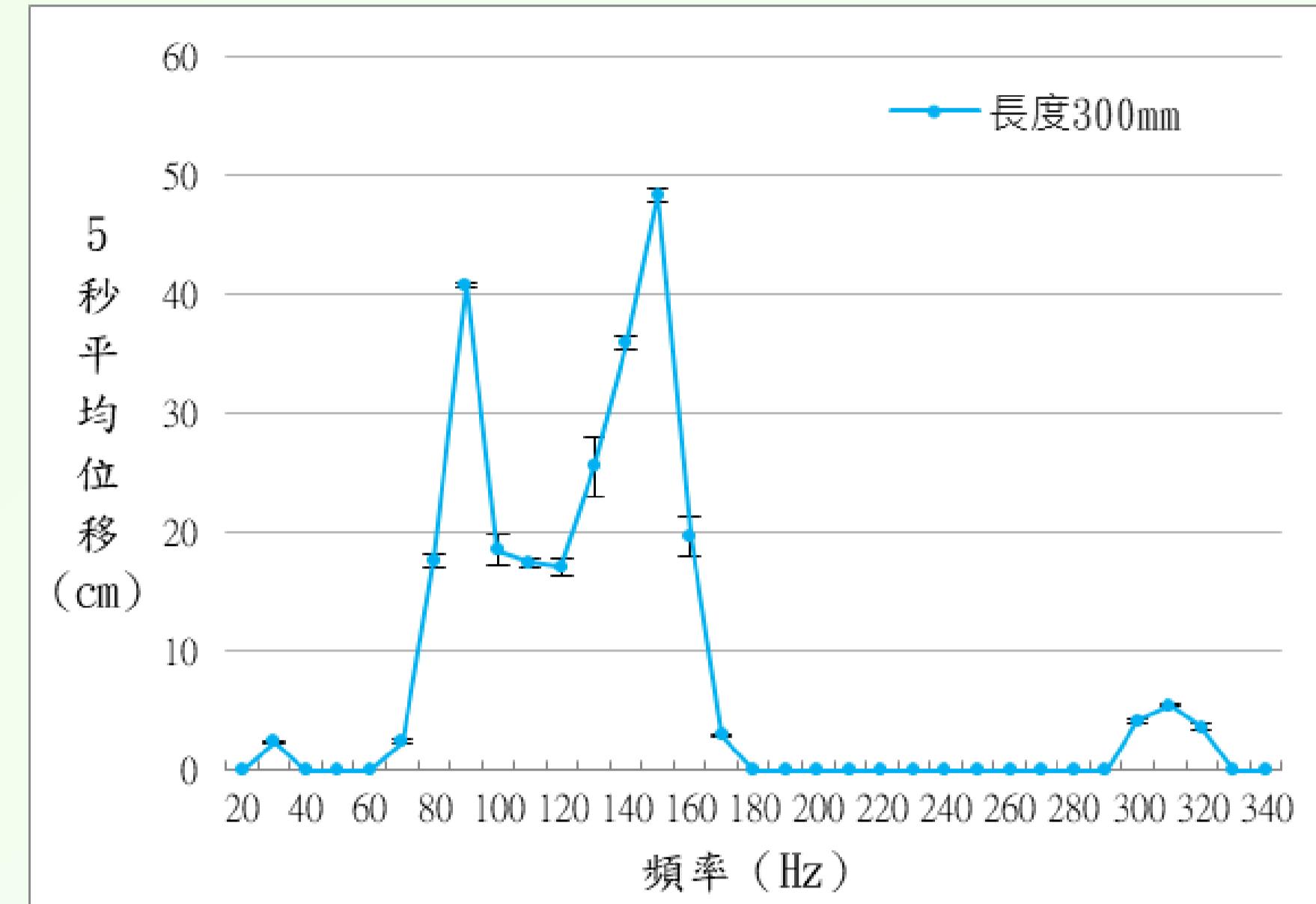


圖 4-2-1 音源振動頻率與懸臂 300mm 上升速度關係圖

圖片出處詳如圖片來源(1)

二、探討振動喇叭振源位置對於啄木鳥科學玩具上升速度的影響

在這個實驗中，我們以動力啄木鳥懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm、振動頻率 90Hz、喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格) 為控制變因，測試不同振源位置為操縱變因。

從圖 4-3-1 當中可以得知，不同振源位置下啄木鳥的上升趨勢和波相似，上升速度分別以懸臂前端 > 懸臂末端 > 懸臂中間。

我們推測，這樣的結果與振動能量的傳遞方式有關。當振源靠近鐵桿時，減少了經由懸臂傳遞的能量損耗，因此對啄木鳥推力較大；當振源靠近懸臂末端時，雖然離啄木鳥較遠，但整體能量仍朝鐵桿方向集中傳遞，經過懸臂彎曲與彈性的引導後仍保有一定的驅動效果。相比之下，當振源位置在懸臂中段時，振源產生的能量會朝兩端分散，傳遞至啄木鳥位置的推力反而較小。

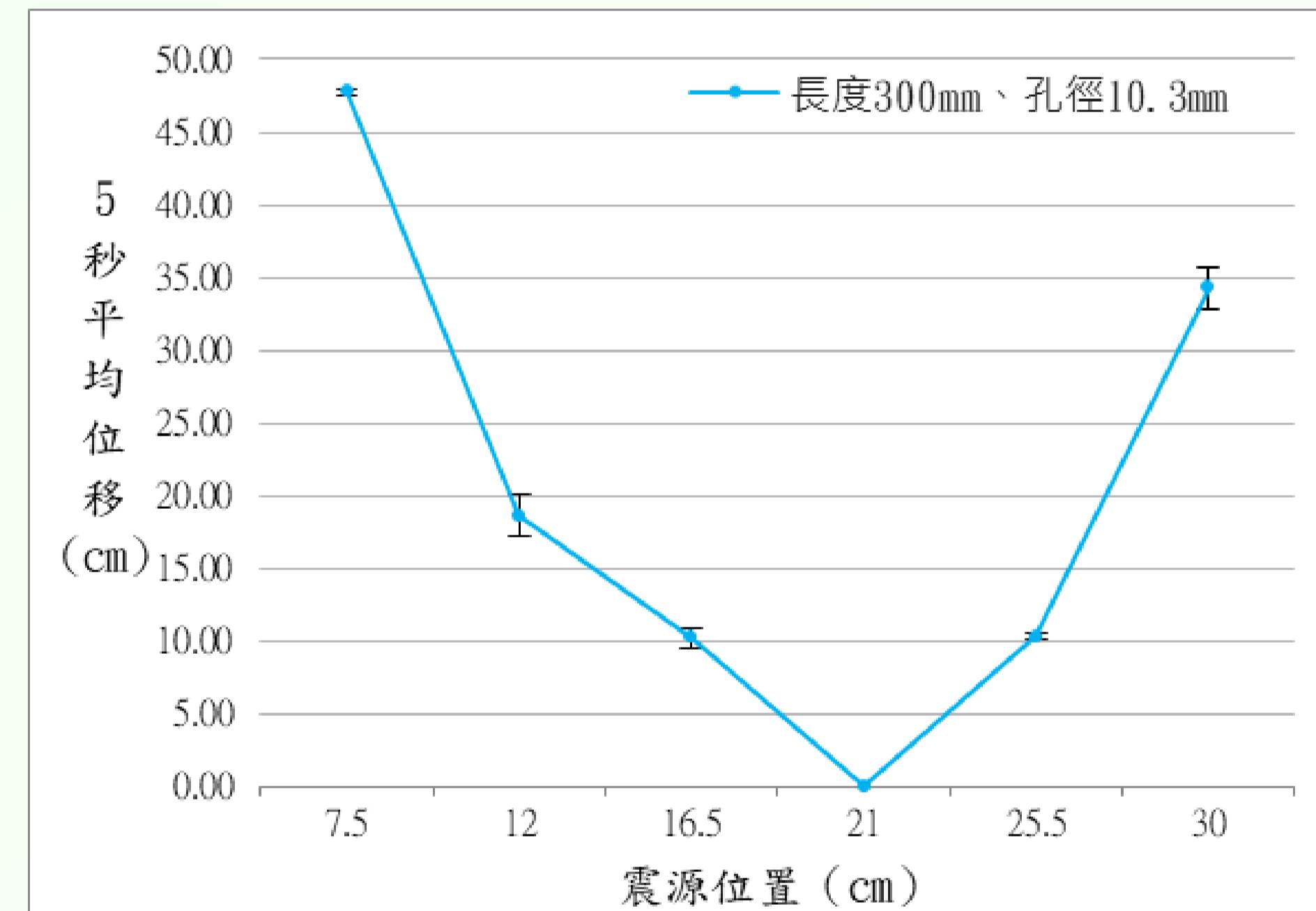
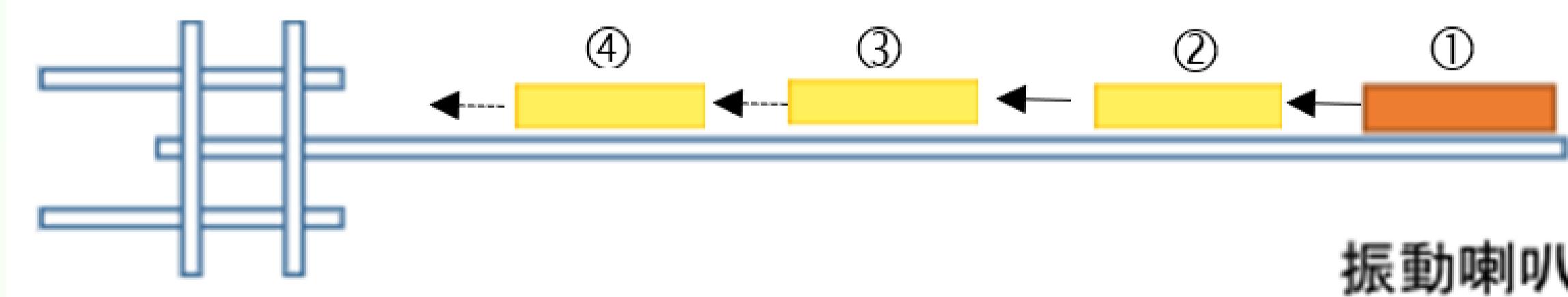


圖 4-3-1 振源位置與上升速度關係圖

圖片出處詳如圖片來源(1)



振動喇叭

圖 3-1-3 動力啄木鳥振動位置操縱變因

圖片出處詳如圖片來源(2)

三、探討不同懸臂長對於啄木鳥科學玩具上升速度影響

動力啄木鳥以孔徑 10.3mm、孔距 28mm，喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格)、振源位置 30cm，分別以懸臂 300mm、255mm、210mm、165mm、120mm，測試不同懸臂長爬升速度數據如下表：

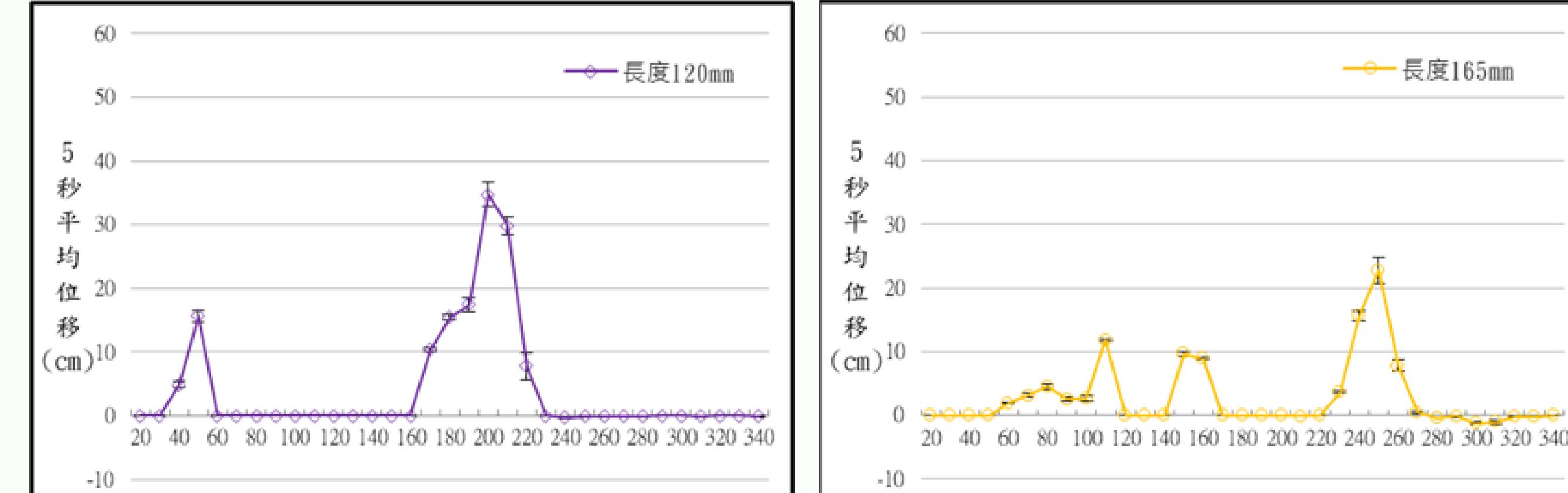


圖 4-4-1 不同頻率於懸臂長 120mm

圖片出處詳如圖片來源(1)

圖 4-4-2 不同頻率於懸臂長 165mm

圖片出處詳如圖片來源(1)

五、探討音源輸入振幅對啄木鳥科學玩具上升速度的影響

動力啄木鳥以懸臂長 300mm、孔徑 10.3mm、孔距 28mm、振源位置 30cm，測試不同振幅對啄木鳥上升的影響。

我們推測因為振幅越大，聲波能量越多，越能解除摩擦自鎖，並因重心偏移，促使啄木鳥上升；反之，振幅小則能量不足，僅能解鎖卻無力上升，導致啄木鳥下降或停滯。根據圖 4-6-1 可知，在音量未達 12 格前啄木鳥不會上升，只有在懸臂末端有些許的晃動。

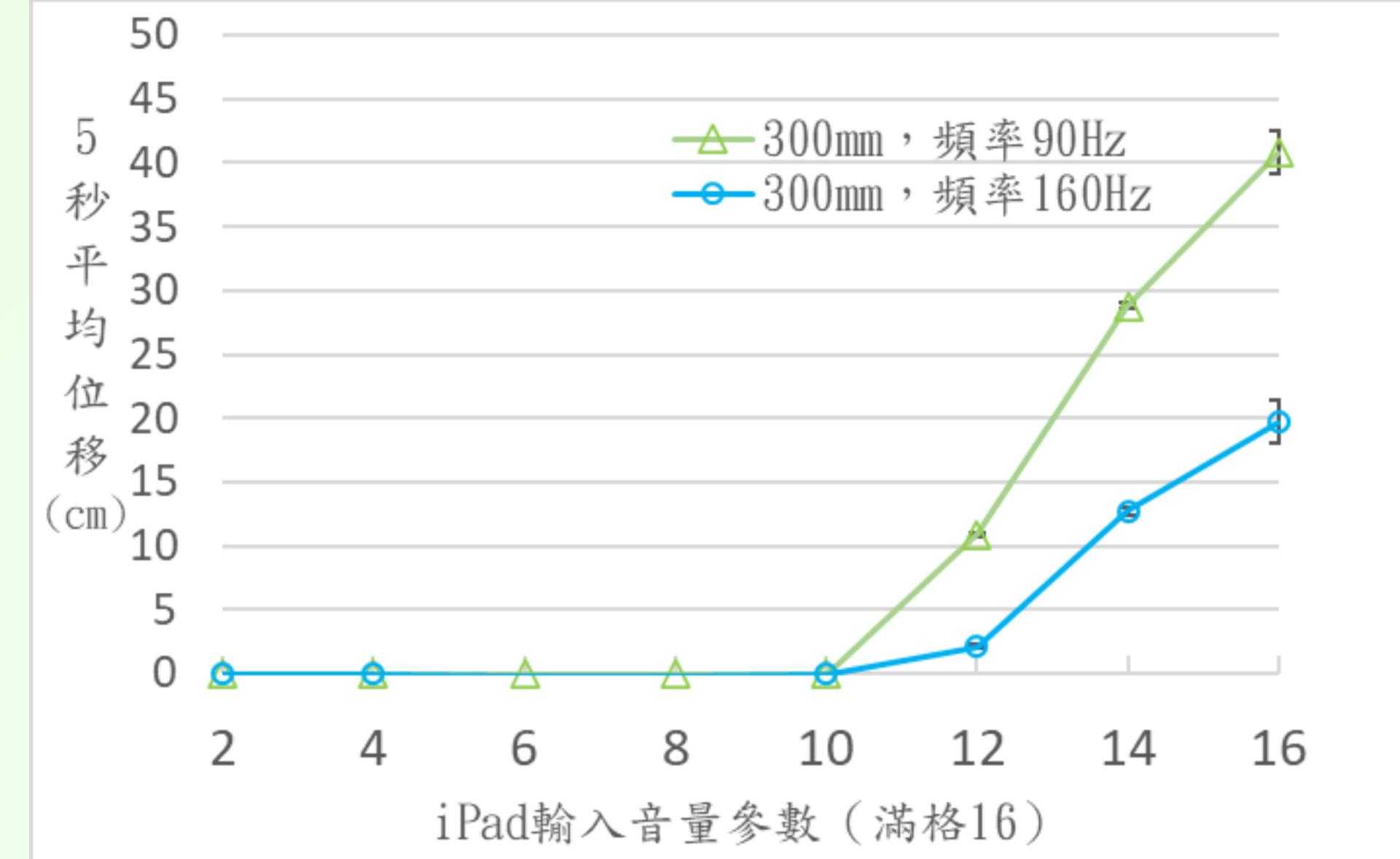


圖 4-6-1 不同輸入音量(振幅)對於上升速度關係圖
圖片出處詳如圖片來源(1)

六、結論

一、結論

- (一)在原理方面，動力啄木鳥可以上升是因為在懸臂振動上擺、摩擦自鎖解開時，重心偏移向上，而在懸臂下擺時，摩擦自鎖已將啄木鳥卡住，所以重心偏移向下也不會讓它下降。透過振動喇叭提供的動能轉變成彈力位能，再變成動力啄木鳥的重力位能。
- (二)我們嘗試了不同構造和施力方式後，發現以用雷射切割木板製作井字形結構，搭配振動喇叭的動力啄木鳥能精準地控制變因並且具有良好的穩定性，進行實驗的效果最佳。
- (三)影響啄木鳥玩具上升的因素，實驗結果如下：

1. 音源輸入振動頻率對啄木鳥科學玩具的上升行為有關影響。在音源振動頻率達到或接近啄木鳥機構自然頻率時，可引發共振效應，有效解除摩擦自鎖，產生明顯的上升現象。在本次實驗中，當頻率為 150Hz 時，上升效果最為顯著。
2. 振源位置會影響啄木鳥科學玩具的上升效率。動力啄木鳥上升速度大小依序為振源位置於懸臂前段(靠近鐵桿) > 振源於懸臂末段(遠離鐵桿) > 振源於懸臂中段。
3. 不同懸臂長度對應不同的最大共振峰值頻率，每一種長度都有他最適合的頻率組合。
4. 啄木鳥科學玩具的孔徑大小主要影響其上升的速度，但推測與機構的自然頻率無關。孔徑過大或過小都會影響啄木鳥摩擦自鎖解開的效果。
5. 音源輸入振幅(以 iPad 音量格數表示)大於 12 格時，動力啄木鳥才能夠上升。

二、未來研究與展望

(一)科學教育的教材教具：

在我們設計的自造啄木鳥，除了能進行原先向下滑落的啄木鳥的探究實驗(孔徑與懸臂長對於下滑速度的影響)加入振動喇叭後，還可以進行音源振動頻率與振幅的討論，在未來可變換啄木鳥材質、兩孔之間的孔距，甚至是透過機電整合，製作遙控啄木鳥等新興玩具。

(二)啟發工程設計的靈感：

在這次的啄木鳥實驗裡，我們看到了啄木鳥可以沿著鐵桿就可以垂直向上爬升，未來可應用在電力器材檢修時，

柒、參考文獻資料

如作品說明書

圖片來源

(1)本圖片由作者親自拍攝或編輯

(2)本圖片由指導老師親自拍攝或編輯

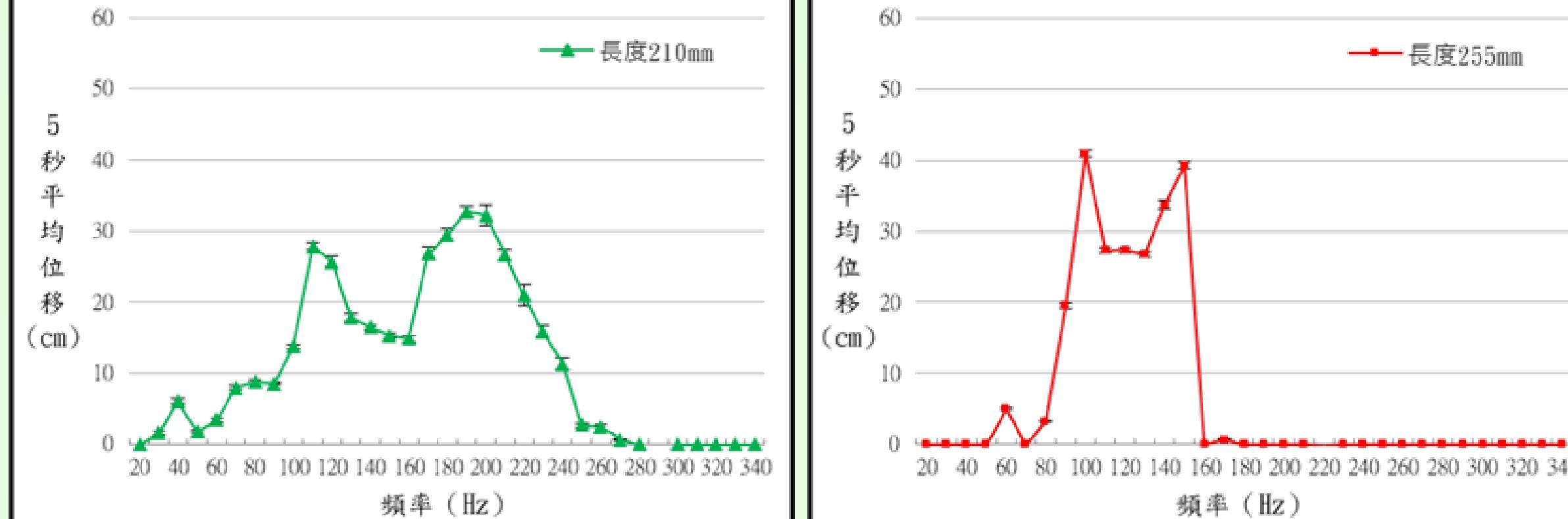


圖 4-4-3 不同頻率於懸臂 210mm 圖 4-4-4 不同頻率於懸臂 255mm

圖片出處詳如圖片來源(1)

圖片出處詳如圖片來源(1)

從峰值來看，每個懸臂長度都有適合他的頻率，這跟前面一組實驗討論提到的機構自然頻率有關，因共振效應解開摩擦自鎖。我們根據圖 4-4-5 的數據推斷，因為各懸臂長度的上升最大峰值對到的頻率並沒有因為長度加長而有一個趨勢，只是因為懸臂長度不同，導致整個機構的自然頻率也不一樣，這跟頻率大或小沒有關係，單純是能否對到自然頻率而已。

1. 210mm 區間特徵：

- 數據波動大，難以辨認出明確的峰值
- 懷疑此區間處於模態穩定性波動區間
- 推測處於模態轉換或切換的狀態，導致共振反應不明顯或不穩定

2. 懸臂長度變化的影響：

- 懸臂長若再增加或縮短，模態又會趨於穩定
- 在穩定模態下，裝置的上升峰值會變得明顯，啄木鳥能順利上升

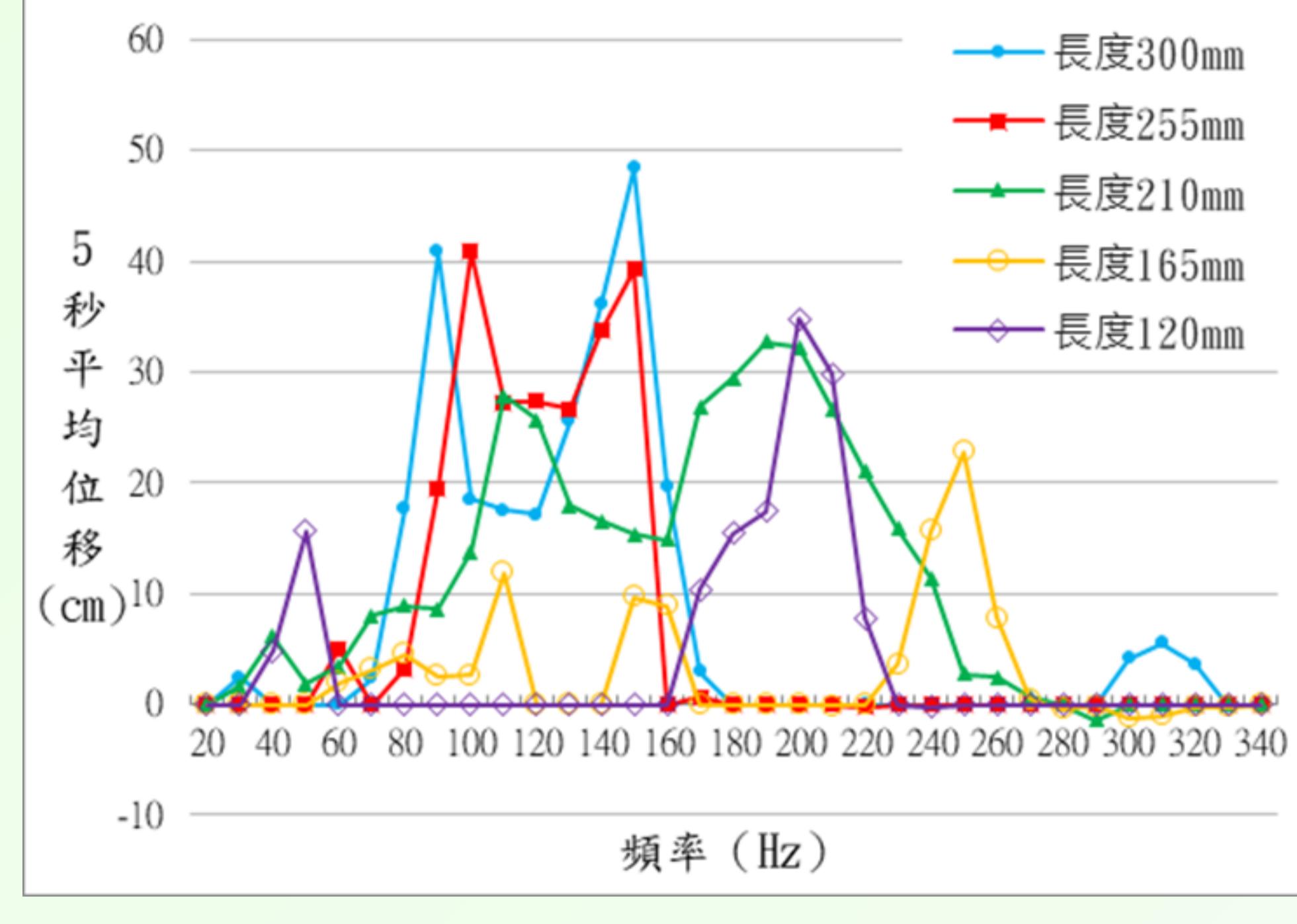


圖 4-4-5 不同懸臂長振動頻率與上升速度關係

圖片出處詳如圖片來源(1)

四、探討孔徑對於啄木鳥科學玩具上升速度的影響

動力啄木鳥以懸臂長 300mm、孔距 28mm，喇叭音量 100% (iPad 音量 16 格)、振源位置 30cm，分別以孔徑 10.1、10.3、10.5mm 的啄木鳥測試不同孔徑大小對爬升速度的影響。



圖 3-1-5 動力啄木鳥孔徑大小操縱變因示意圖

圖片出處詳如圖片來源(1)

在圖中，我們可以看到啄木鳥上升的趨勢幾乎是一樣的，所以我們推測孔徑大小並不影響機構的自然頻率，只會影響上升速度。

孔徑過小可能限制了啄木鳥的移動範圍，而孔徑過大可能會導致摩擦自鎖不穩定，造成上升後又略有下滑。其中，孔徑 10.3mm 是效果最好的。

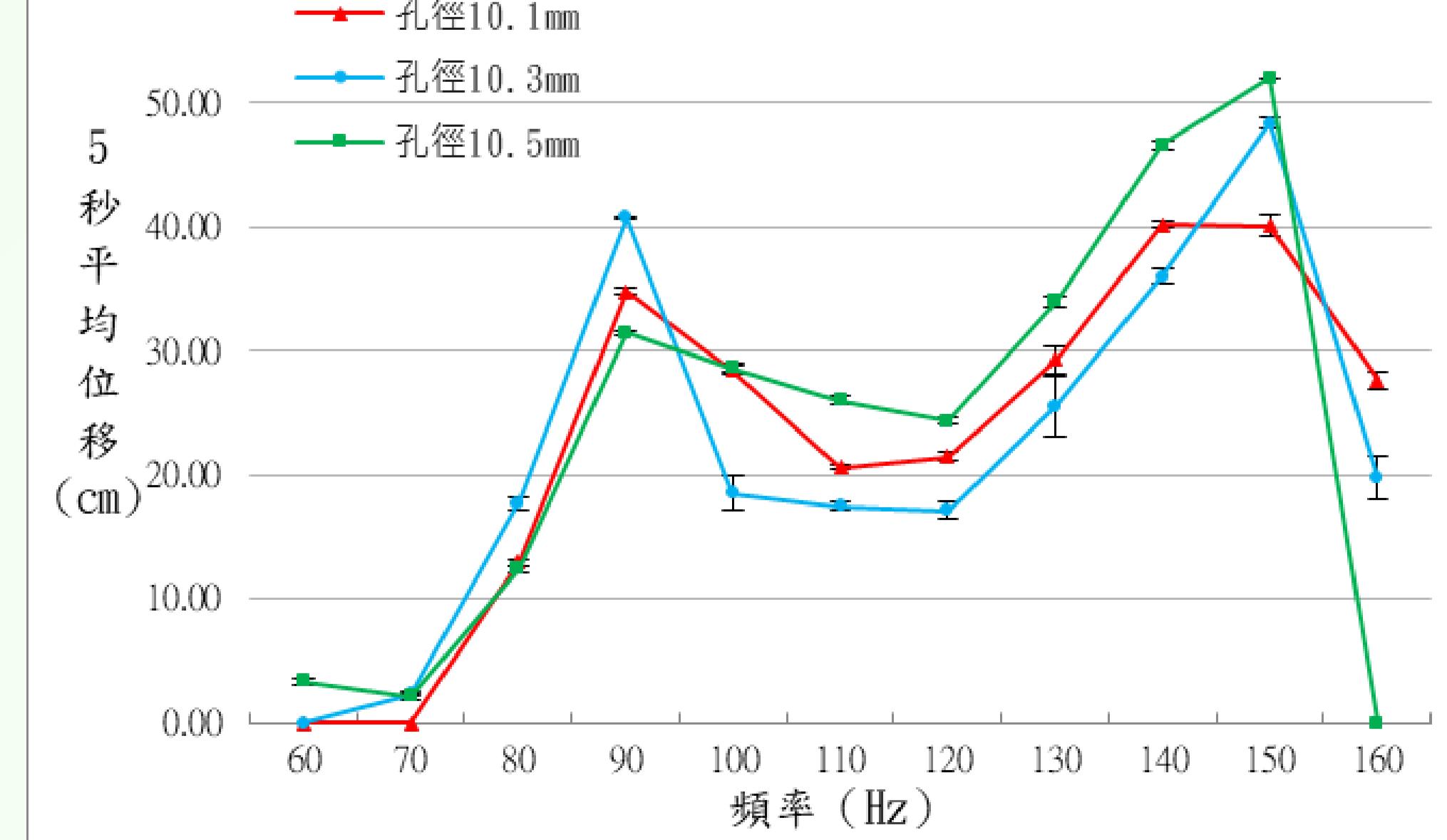


圖 4-5-1 不同孔徑的啄木鳥振動頻率與上升速度關係圖

圖片出處詳如圖片來源(1)