

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生活與應用科學科

佳作

030815

陀螺大「倒」~就是要「翻」!

學校名稱：基隆市立中正國民中學

| | |
|-------------------------|---------------------|
| 作者： 國二 劉心揚 國二 曹智昇 | 指導老師： 林秋雪 王世宏 |
|-------------------------|---------------------|

關鍵詞：倒轉陀螺、質量分布、力矩

摘要

以直徑 4.00cm 乒乓球作為球身、原子筆的塑膠筆心管作為轉軸，製作不同切口直徑及軸長的自製倒轉陀螺，並以自製發射器帶動自製倒轉陀螺旋轉，探討切口直徑、突出軸長與偏心率對倒轉陀螺翻轉的影響。發現倒轉陀螺必須兼顧球體的大小、轉軸長度、陀螺轉速等條件，才能從「轉軸朝上」旋轉，成功翻轉成為「轉軸朝下」旋轉。

我們製作出能最快翻轉成功的倒轉陀螺，平均只需約 2.3 秒就能翻轉成功，其比例為切口直徑 2.00cm、突出球體軸長 0.53cm；而翻轉成功後能繼續旋轉最久的倒轉陀螺，其比例為切口直徑 2.00cm、突出球體軸長 0.73cm，平均翻轉後還能繼續旋轉約 17.3 秒。兩者偏心率皆在 0.37~0.39 之間。

我們更進一步製作球體直徑 10cm 以上的大型倒轉陀螺，並將自製倒轉陀螺結合市購戰鬥陀螺的發射器，使自製倒轉陀螺更具科學性與娛樂性。最後我們從實驗中提出輕鬆快樂製作翻轉效果良好的倒轉陀螺要領，分享給大家。

壹、研究動機

在基隆這個人文薈萃、歷史悠久的文化古都，有一群喜歡研究傳統民俗技藝的年輕人。有一天，自然老師送給身為陀螺隊員的我們一顆小陀螺，要我們將小陀螺的轉軸朝上旋轉，小陀螺竟然能從「轉軸朝上」旋轉，逐漸翻轉變成「轉軸朝下」旋轉，這跟我們平常打的傳統陀螺差異甚大，非常有趣，引發了我們的研究動機。

我們跟自然老師討論其中的原理，老師告訴我們轉動的難易與九年級自然第五冊的「力矩」單元有關，至於陀螺翻轉的原因，希望我們更進一步去研究，於是我們以「倒轉陀螺的翻轉」作為科展的研究主題，想搞清楚這顆小陀螺會翻轉的秘密。

貳、研究目的

- 一、分析市購倒轉陀螺基本性質。
- 二、以自製乒乓球倒轉陀螺，探討偏心率對陀螺翻轉的影響。
- 三、製作出不同材質、不同大小的倒轉陀螺玩具。

參、使用設備及器材

- 一、市購陀螺：木頭製的切口型倒轉陀螺，

如圖 1：

- 二、自製陀螺：

- (一)球體材料：

- 1.乒乓球(直徑 4.00cm)、
- 2.玩具硬殼塑膠球(直徑 11.00cm)

- (二)轉軸材料：

- 1.原子筆的空心塑膠筆心管、
- 2.奇異筆的空心塑膠筆心管

- (三)黏膠：1.三秒膠 2.AB 膠

- (四)製作工具：美工刀、直尺、鉛筆、奇異筆、圓規、砂輪機

- (五)測量工具：電子天平、游標尺、直尺、碼表



圖 1 市購倒轉陀螺

三、自製陀螺發射器：

- (一)馬達：規格 3.0v 9000r.p.m.、7.2v8500r.p.m.
- (二)電路：三號電池、電池座(兩顆)、鱷魚夾、電線、三用電表
- (三)支架：自製金屬支架

四、自製重心測量器：

- (一)製作工具：棉線、膠帶、圓規
- (二)支架配備：卡紙、鐵架、雷射筆

肆、研究過程

一、分析市購倒轉陀螺基本性質

測量、觀察市購倒轉陀螺的基本性質：

- (一)測量陀螺的重心位置
- (二)測量陀螺的質量
- (三)測量陀螺各部位長度
- (四)測量陀螺翻轉所需時間與翻轉後繼續旋轉時間
- (五)觀察陀螺的材質
- (六)觀察市購倒轉陀螺的翻轉過程

1.利用數位攝影機，將市購倒轉陀螺「轉軸朝上」旋轉，拍攝陀螺由「轉軸朝上」旋轉，逐漸翻轉成「轉軸朝下」旋轉的翻轉過程，再以慢速播放，仔細觀察市購倒轉陀螺的翻轉情形。

2.利用「會聲會影」軟體，擷取市購倒轉陀螺翻轉過程的影像。由於「會聲會影」軟體擷取影像時間的最小單位為 1/30 秒，因此我們大約以 8/30 秒為公差，擷取陀螺動作變化較明顯的影像，製作成市購倒轉陀螺的翻轉過程圖。

- (七)製作仿市購長度比例的乒乓球倒轉陀螺

根據測量市購倒轉陀螺各部位所得的長度，依照比例換算，製作仿市購長度比例的乒乓球倒轉陀螺，並測試翻轉效果。

二、以自製乒乓球倒轉陀螺探討偏心率對陀螺翻轉的影響

自製乒乓球倒轉陀螺，目的在找出能讓陀螺翻轉且翻轉後還能旋轉的最佳比例。我們先參考第 42 屆全國中小學科展「魔力？摩力！我的陀螺會倒立」中，乒乓球的切口比例，作為我們自製倒轉陀螺球體切口的比例，並重新驗證其比例是否就是最佳比例。但由於該研究沒有關於轉軸部分探討，而《力學的趣味實驗》一書中，提出偏心率會影響陀螺的翻轉，我們決定以不同切口直徑及軸長，進行自製倒轉陀螺的實驗，並探討偏心率對陀螺翻轉的影響。

- (一)名詞定義：

- 1.軸心=陀螺轉軸中點。
- 2.重心=即質量中心(簡稱為質心)，指物質系統上被認為質量集中於此的一個假想點。
- 3.偏心率=軸心-重心。
- 4.偏心率=偏心率/球體半徑。

- (二)自製乒乓球倒轉陀螺：

- 1.製作切口型球體：

先用圓規在乒乓球上畫出需要的大小，再以砂輪機在平行赤道的部分切出一個圓面切口，把不要的部分切除，使球體呈一個空心的碗狀，成為切口型球體。

2.製作陀螺轉軸：

先用奇異筆在塑膠筆心管上畫出需要的長度，以美工刀縱切橫放的空心塑膠筆心管，把不要的部分切除，再以砂紙磨平切面，使塑膠筆心管呈一個空心的棒狀，成為陀螺轉軸。

3.測量球體中心點：

先將切口型球體的切口處朝地放置，取一空心圓柱置於朝天的圓面上，調整圓柱擺放的位置，使圓柱與圓面間的夾角趨於垂直，再以奇異筆伸入圓柱，於圓柱與圓面的中心點作記號，即得球體中心點。

4.自製乒乓球倒轉陀螺：

在切口型球體中滴入 3 到 4 滴的三秒膠(約 0.100 公克)，黏著轉軸於球體中心點，靜置一段時間，直到轉軸不再晃動，即完成一顆自製乒乓球倒轉陀螺。

(三)製作「自製陀螺發射器」：

由於手動旋轉陀螺時，每次所提供的力及能量皆無法固定，因此我們製作「自製陀螺發射器」，藉由控制輸入馬達的電壓，來控制馬達輸入陀螺的能量，以進行後續控制變因實驗的探討。如圖 2：

1.自製陀螺發射器的材料與製作方法：

(1)材料：金屬框架、金屬支架、發射鈕。

(2)製作方法：

a.製作陀螺發射器的金屬支架：

依電池座及三用電表的體積大小，製作可以安置電池座及三用電表的金屬框架，將三用電表及電池座置於金屬框架內，於進行實驗時測量電池的電壓。



圖 2 自製陀螺發射器

b.馬達帶動陀螺旋轉：

將馬達固定於金屬支架上，馬達轉軸下端黏著細金屬棒，可伸入陀螺的空心轉軸，藉以帶動陀螺旋轉。

c.製作馬達與陀螺分離的按鈕發射器：

於馬達上方的支架，加裝內建彈簧的按鈕發射器，當按下按鈕時，馬達的轉軸會向上彈起，陀螺便會與馬達的轉軸分離而自行旋轉。

d.以鱷魚夾電線連接馬達、電池座與三用電表。

2.操作方法，如圖 3 到 7：

(1)將自製陀螺發射器中，馬達轉軸下端黏著的細金屬棒插入乒乓球倒轉陀螺的空心塑膠筆心管中。

(2)啟動電池座後，馬達開始旋轉，並帶動乒乓球倒轉陀螺旋轉。

(3)按下發射鈕，按鈕發射器和馬達會向上彈起。

(4)細金屬棒會抽離陀螺的空心轉軸，倒轉陀螺便會脫離發射器，開始進行「轉軸朝上」的旋轉模式。

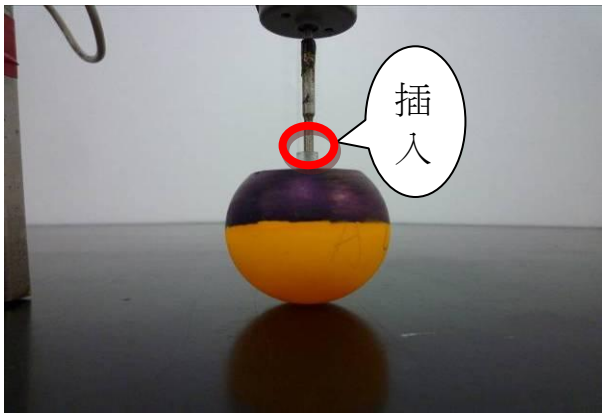


圖 3 將細金屬棒插入空心塑膠筆心管

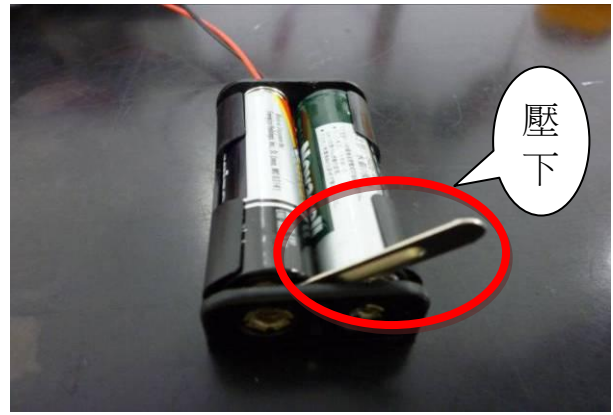


圖 4 啟動電池座，馬達開始運轉

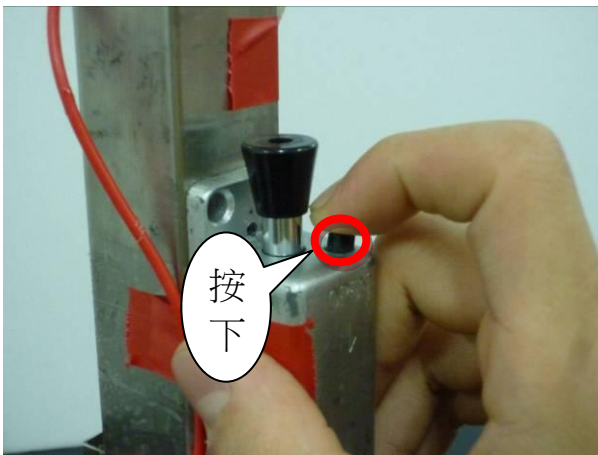


圖 5 馬達旋轉 2 秒之後按下發射鈕

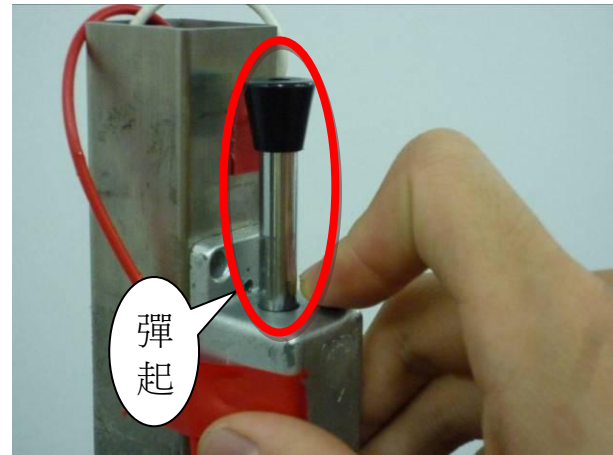


圖 6 按鈕發射器會和馬達向上彈起



圖 7 細金屬棒脫離陀螺，發射成功！

(四)探討切口長度與突出轉軸長度對陀螺翻轉的影響：

我們以陀螺的切口大小、突出轉軸長度作為操縱變因，進行自製倒轉陀螺的實驗設計及分析，並將自製倒轉陀螺是否翻轉成功、翻轉所需的時間與翻轉後可旋轉的時間記錄下來，接著測量陀螺的重心位置，探討偏心率對陀螺翻轉的影響。

1.控制變因：

- (1)旋轉面：平滑的帆布紙
- (2)馬達旋轉時間：翻轉效果最穩定的 2 秒
- (3)電池電壓：剛拆封時的電池電壓 2.90~3.10 伏特
- (4)陀螺材質：市購直徑 4.00 公分的乒乓球
- (5)轉軸材質：市購外徑 0.50 公分、內徑 0.40 公分的空心塑膠筆心管

2.本實驗的構想與程序如下：

- (1)固定切口直徑 2.00 公分，製作不同的突出轉軸長度(公差 0.40 公分)：0.10 公分、0.50 公分、0.90 公分、1.30 公分、1.70 公分、2.10 公分、2.50 公分，記錄是否翻轉成功、翻轉所需的時間與翻轉後可旋轉的時間。
- (2)將切口直徑分別改為 2.50 公分，重複步驟(1)。
- (3)將切口直徑分別改為 3.00 公分，重複步驟(1)。切口直徑 3.00 公分、突出轉軸長度 2.00 公分的陀螺，是以市購倒轉陀螺的比例放大而成，故特地於公差外製作此突出轉軸長度 2.00 公分。
- (4)若發現無法翻轉的軸長，則再向接近可翻轉成功的突出軸長逼近 0.20 公分，以求得更精確的突出軸長臨界值。

(五)製作「自製重心測量器」

由於乒乓球的球體半徑都相同，因此乒乓球倒轉陀螺的偏心率只受軸心、重心兩者影響。我們以直尺測量軸心，以「自製重心測量器」測量重心，以探討偏心率對於陀螺翻轉的影響。如圖 8：

1.自製重心測量器的材料與製作方法：

(1)材料：

- a.製作工具：棉線、膠帶、圓規
- b.支架配備：卡紙、鐵架、雷射筆

(2)製作方法：

- a.製作重心測量器的金屬支架：
將卡紙固定於滴定實驗會使用到的鐵架的圓環中，在圓環的上方固定雷射筆，再於卡紙上穿孔。



圖 8 自製重心測量器

b.乒乓球倒轉陀螺的加工：

以膠帶黏著兩條棉線於乒乓球倒轉陀螺的外部(約在赤道附近，球體直徑的兩端點)以棉線垂吊陀螺，使轉軸與線的夾角趨於垂直。再用圓規在棉線下端的球身部分穿孔。

2.操作方法，如圖 9 到 12：

- (1)將棉線穿入金屬支架的卡紙孔中，使轉軸與線的夾角垂直。
- (2)啟動雷射筆，雷射光平行棉線，射向球身上的孔。
- (3)用筆描繪雷射光照在轉軸上的點，此點即為重心。
- (4)用游標尺測量軸頂到兩點的距離，再用軸長扣掉此距離，即得球底到重心的距離。
- (5)重複步驟(1)到(4)，以同樣的方法描繪另一條棉線測得的點，求兩次球底到重心距離的平均值。



圖 9 轉軸與棉線的夾角趨於垂直

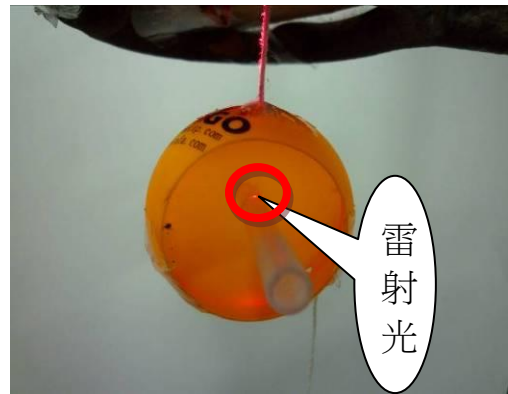


圖 10 雷射光穿透球身上的孔射在轉軸上

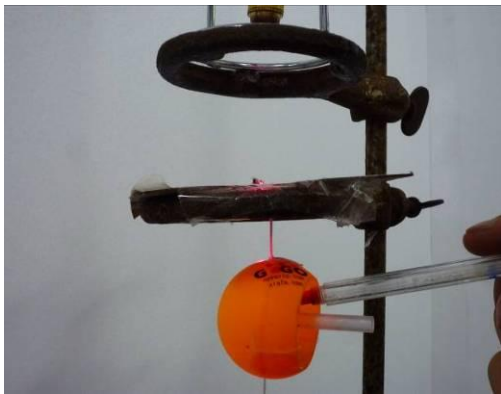


圖 11 在光點上輕輕一點

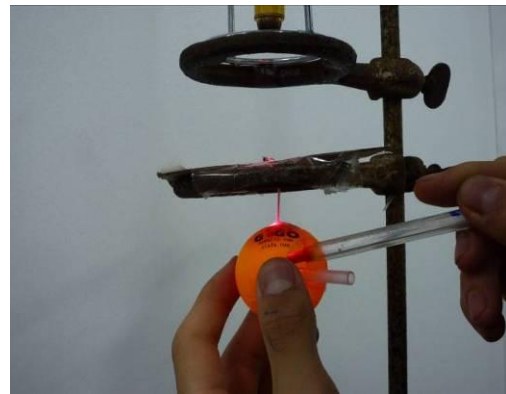


圖 12 用筆描繪圖 11 畫的點，即得重心位置

(六)探討偏心率對陀螺翻轉的影響

將總軸長長度除以二，減去球底到重心的距離可得偏心率，即軸心到重心的距離。因為乒乓球的球體半徑皆為 2.00 公分，所以偏心率的比就等於偏心量的比。我們要探討的是不同切口直徑、突出轉軸長度的陀螺偏心量的變化與對陀螺翻轉的影響。

(七)比較市購倒轉陀螺與乒乓球倒轉陀螺的翻轉效果

以同一種方式旋轉市購倒轉陀螺與乒乓球倒轉陀螺，比較兩者的翻轉效果。

三、製作出不同材質、不同大小的倒轉陀螺玩具

找出自製乒乓球倒轉陀螺的重心和軸心之間的關係後，我們嘗試以此比例改用玩具硬殼塑膠球，作為倒轉陀螺的球體，製作出球體直徑 10.00 公分以上，更大型的倒轉陀螺。

(一)製作玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺：

- 1.將自製乒乓球倒轉陀螺的各部位比例，經過等比例換算後，求出直徑 11.00 公分的玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺各部位長度，製作直徑 11.00 公分的玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺，如表 1。
- 2.以奇異筆作為陀螺轉軸。
- 3.通過圓心，以 A B 膠固定，即為玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺。如圖 13 到 14：
- 4.測試直徑 11.00 公分的玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺的翻轉效果。



圖 13 玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺側視圖



圖 14 玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺俯視圖

表 1 乒乓球與玩具硬殼塑膠球等比例換算表

| 項目 | 乒乓球(自製) | 玩具硬殼塑膠球 |
|-----------|----------|-----------|
| 球身直徑 | 4.00 公分 | 11.00 公分 |
| 切口直徑 | 3.00 公分 | 8.25 公分 |
| 突出球體的轉軸長度 | 1.07 公分 | 3.58 公分 |
| 轉軸外圈直徑 | 0.50 公分 | 1.38 公分 |
| 陀螺質量 | 2.785 公克 | 42.160 公克 |

(二)製作戰鬥倒轉陀螺發射器

- 1.購買市面上販售的戰鬥陀螺發射器。
- 2.將發射器的轉軸拔掉，裝上自己製作的鐵製轉軸，帶動乒乓球倒轉陀螺旋轉，如圖：



圖 15 戰鬥倒轉陀螺發射器

伍、研究結果

一、分析市購倒轉陀螺基本性質

(一) 將市購倒轉陀螺基本性質整理如表 2：

我們無法計算市購倒轉陀螺的偏心率，因為它的轉軸沒有插到底，而重心是整顆陀螺的，這樣以軸心減掉重心就不會是偏心率。所以我們把材質相同的球底一部分也當作轉軸，如此就可以計算其偏心率與偏心率。

表 2 市購倒轉陀螺基本性質表

| 性質 | 陀螺 | 切口型倒轉陀螺 |
|-----------|----|----------|
| 陀螺材質 | | 木頭製 |
| 球體直徑 | | 3.02 公分 |
| 切口直徑 | | 1.94 公分 |
| 突出轉軸長度 | | 1.29 公分 |
| 總軸長 | | 3.29 公分 |
| 球體總長 | | 3.72 公分 |
| 軸頂到重心 | | 2.63 公分 |
| 重心 | | 1.09 公分 |
| 偏心率 | | 0.76 公分 |
| 偏心率 | | 0.50 |
| 質量 | | 8.715 公克 |
| 翻轉所需時間 | | 2.49 秒 |
| 翻轉後繼續旋轉時間 | | 6.01 秒 |



圖 16 切口型市購倒轉陀螺

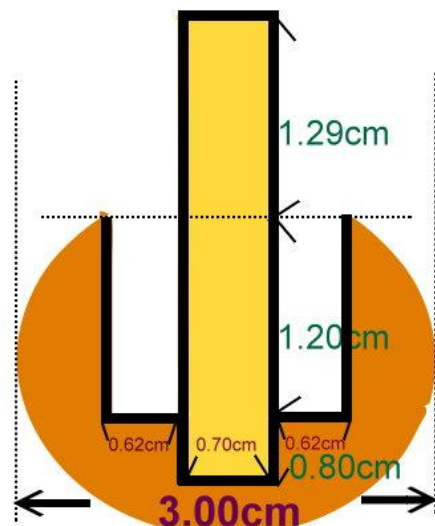


圖 17 市購倒轉陀螺各部位長度

(二)觀察市購倒轉陀螺翻轉的過程

- 1.仔細觀察市購倒轉陀螺翻轉過程的慢速播放影片，發現將陀螺從「轉軸朝上」開始旋轉，陀螺一開始會不穩定旋轉，轉軸會開始晃動，轉動一段時間後，陀螺一邊旋轉，而轉軸會逐漸往下傾斜。
- 2.當提供陀螺轉動的能量足夠時，陀螺會從「轉軸朝上」旋轉，逐漸翻轉成「轉軸水平」旋轉，接下來「轉軸朝下」旋轉。當「轉軸朝下」且接觸到地面時，仍會繼續旋轉，最後完全翻轉了過來，成為「轉軸朝下」的正轉陀螺，翻轉過程如圖 18 到 24：

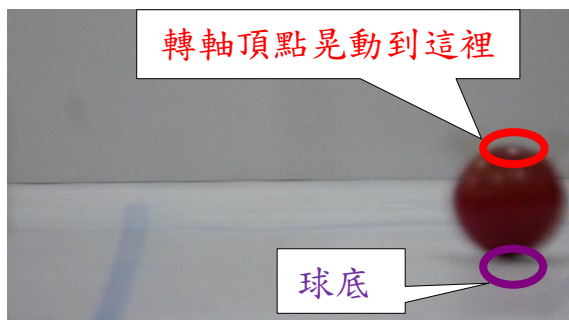


圖 18 0 秒 00

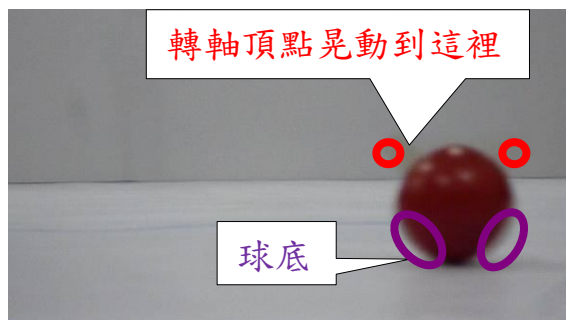


圖 19 0 秒 08

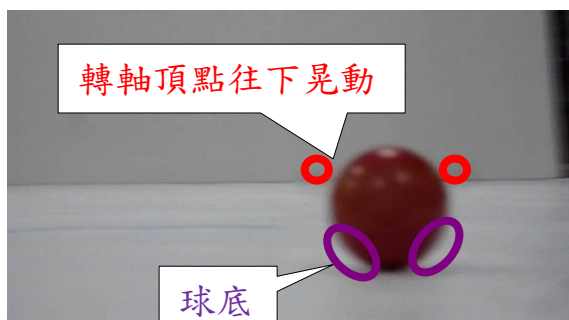


圖 20 0 秒 18

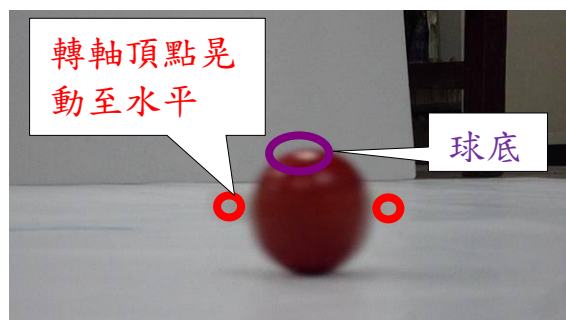


圖 21 0 秒 25

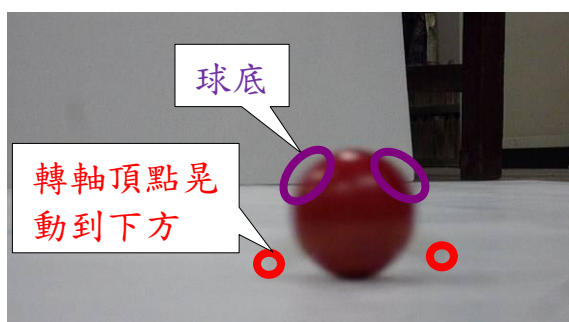


圖 22 1 秒 03

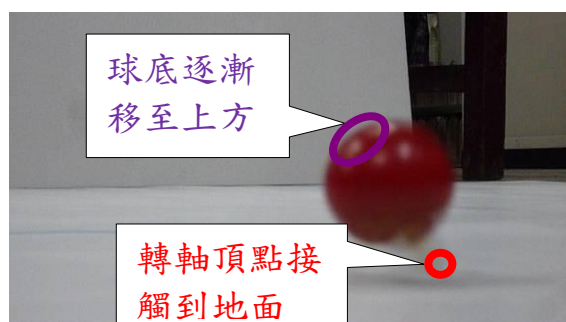


圖 23 1 秒 11

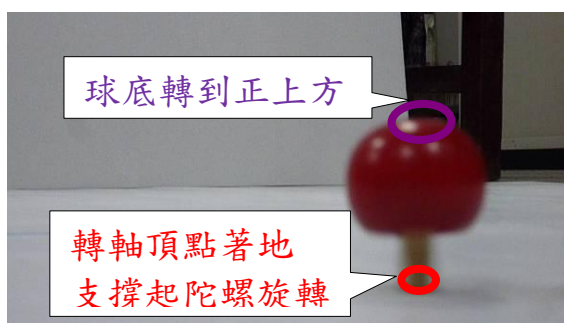


圖 24 1 秒 19

(三)製作仿市購長度比例的乒乓球倒轉陀螺

仿照市購長度比例的乒乓球倒轉陀螺(切口直徑比突出軸長約等於 2:3)偏心率平均為 0.54，和市購倒轉陀螺的偏心率 0.50 十分接近。但這三種仿市購長度比例的乒乓球倒轉陀螺的翻轉效果卻不太好。四者比較如表 3：

表 3 市購倒轉陀螺與仿市購長度比例乒乓球倒轉陀螺的比較

| 倒轉陀螺種類 | 切口直徑(公分) | 突出轉軸長度(公分) | 偏心率 | 翻轉所需時間(秒) | 翻轉後繼續旋轉時間(秒) |
|----------------|----------|------------|------|-----------|--------------|
| 市購倒轉陀螺 | 1.94 | 1.29 | 0.50 | 2.49 | 6.01 |
| 仿市購長度比例乒乓球倒轉陀螺 | 2.00 | 1.33 | 0.42 | 2.98 | 5.89 |
| | 2.50 | 1.67 | 0.59 | 2.27 | 2.44 |
| | 3.00 | 2.00 | 0.60 | 3.09 | 0.98 |

二、以自製乒乓球倒轉陀螺探討偏心率對陀螺翻轉的影響

(一)自製乒乓球倒轉陀螺：

- 1.利用數位攝影機，將自製乒乓球倒轉陀螺「轉軸朝上」旋轉，拍攝陀螺由「轉軸朝上」旋轉，逐漸翻轉成「轉軸朝下」旋轉的翻轉過程，再以慢速播放，仔細觀察自製乒乓球倒轉陀螺的翻轉情形。
- 2.利用「會聲會影」軟體，擷取自製乒乓球倒轉陀螺翻轉過程的影像。由於「會聲會影」軟體擷取影像時間的最小單位為 1/30 秒，因此我們大約以 8/30 秒為公差，擷取陀螺動作變化較明顯的影像，製作成自製乒乓球倒轉陀螺的翻轉過程圖。如圖 25 到圖 35：

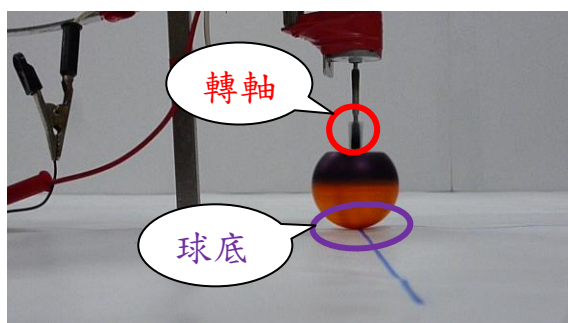


圖 25 0 秒 00

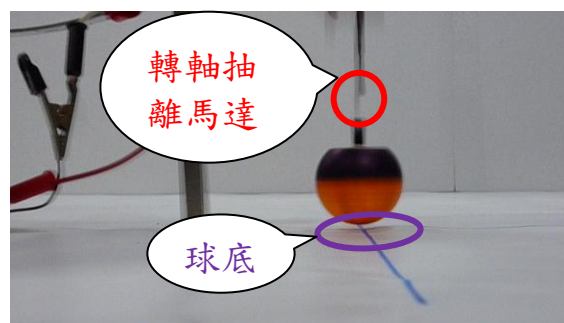


圖 26 0 秒 09

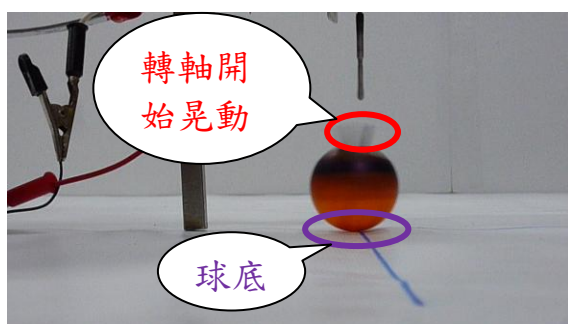


圖 27 0 秒 17

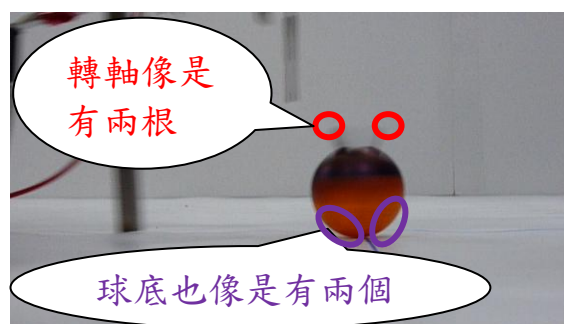


圖 28 0 秒 28

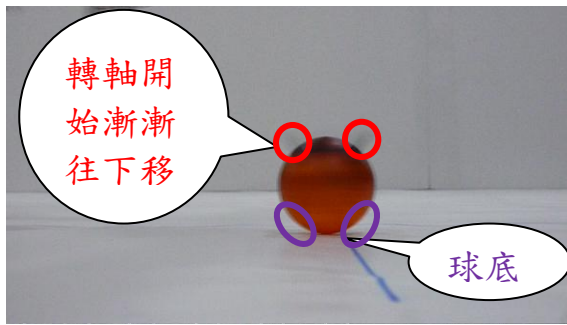


圖 29 1 秒 06

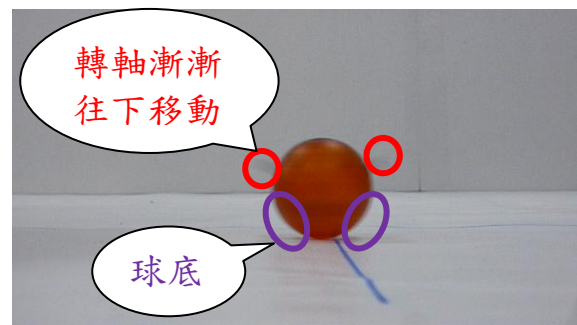


圖 30 1 秒 12

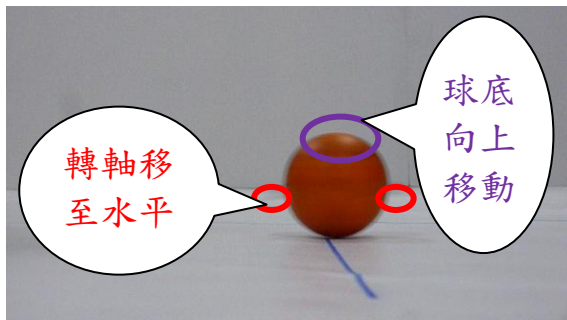


圖 31 1 秒 20

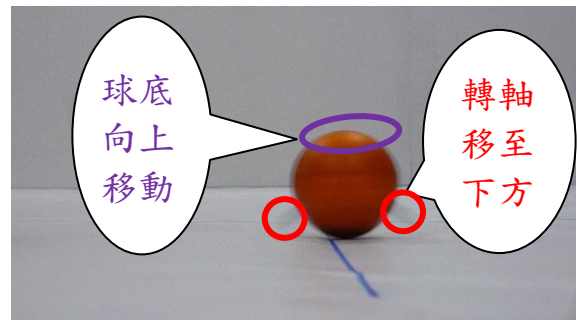


圖 32 1 秒 28

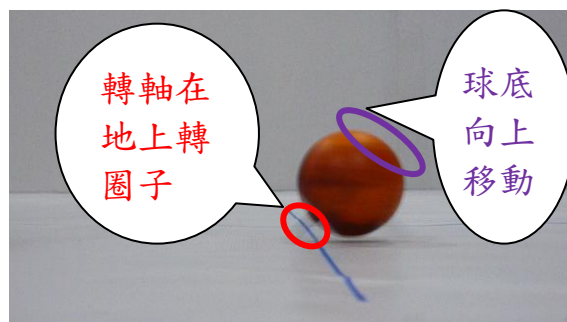


圖 33 2 秒 06

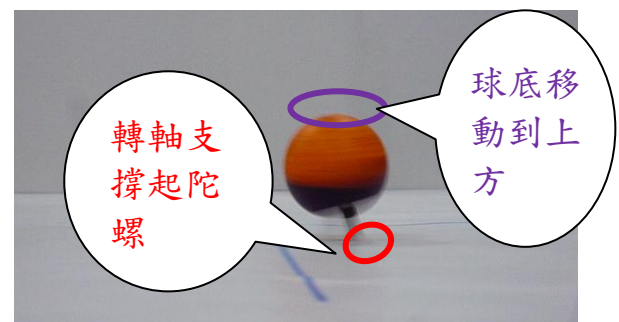


圖 34 2 秒 10

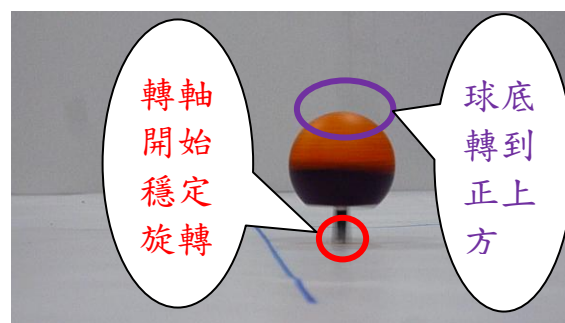


圖 35 2 秒 21

(二)探討切口長度與突出轉軸長度對陀螺翻轉的影響：

1.實驗數據總表，如表4：

表4 實驗數據總表

| 陀螺質量 (g) | 切口直徑 (cm) | 保留徑長 (cm) | 切掉徑長 (cm) | 突出軸長 (cm) | 總軸長 (cm) | 軸頂到重心 (cm) | 重心位置 (cm) | 軸心位置 (cm) | 偏心率 (cm) | 偏心率 | 翻轉所需時間 (秒) | 翻轉後繼續旋轉時間 (秒) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|-----------|-----------|----------|------|------------|---------------|
| 2.635 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 0.13 | 3.80 | 2.25 | 1.55 | 1.90 | 0.35 | 0.18 | 10.00 | 0.00 |
| 2.665 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 0.33 | 4.00 | 2.48 | 1.52 | 2.00 | 0.48 | 0.24 | 10.00 | 0.00 |
| 2.725 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 0.53 | 4.20 | 2.84 | 1.36 | 2.10 | 0.74 | 0.37 | 2.26 | 15.52 |
| 2.785 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 0.73 | 4.40 | 2.98 | 1.42 | 2.20 | 0.78 | 0.39 | 2.34 | 17.34 |
| 2.765 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 0.93 | 4.60 | 3.10 | 1.50 | 2.30 | 0.80 | 0.40 | 3.51 | 10.44 |
| 2.745 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 1.33 | 5.00 | 3.33 | 1.67 | 2.50 | 0.83 | 0.42 | 2.98 | 5.89 |
| 2.670 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 1.53 | 5.20 | 3.60 | 1.60 | 2.60 | 1.00 | 0.50 | 10.00 | 0.00 |
| 2.710 | 2.00 | 3.67 | 0.33 | 1.73 | 5.40 | 3.80 | 1.60 | 2.70 | 1.10 | 0.55 | 10.00 | 0.00 |
| ----- | | | | | | | | | | | | |
| 2.455 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 0.07 | 3.60 | 2.36 | 1.24 | 1.80 | 0.56 | 0.28 | 10.00 | 0.00 |
| 2.535 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 0.47 | 4.00 | 2.62 | 1.38 | 2.00 | 0.62 | 0.31 | 10.00 | 0.00 |
| 2.495 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 0.67 | 4.20 | 2.73 | 1.47 | 2.10 | 0.63 | 0.32 | 3.10 | 10.78 |
| 2.445 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 0.87 | 4.40 | 2.95 | 1.45 | 2.20 | 0.75 | 0.38 | 2.50 | 15.41 |
| 2.560 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 1.27 | 4.80 | 3.50 | 1.30 | 2.40 | 1.10 | 0.55 | 4.06 | 7.90 |
| 2.680 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 1.67 | 5.20 | 3.77 | 1.43 | 2.60 | 1.17 | 0.59 | 2.27 | 2.44 |
| 2.695 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 1.87 | 5.40 | 3.97 | 1.43 | 2.70 | 1.27 | 0.64 | 10.00 | 0.00 |
| 2.680 | 2.50 | 3.53 | 0.47 | 2.07 | 5.60 | 4.09 | 1.51 | 2.80 | 1.29 | 0.65 | 10.00 | 0.00 |
| ----- | | | | | | | | | | | | |
| 2.270 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 0.10 | 3.30 | 1.83 | 1.47 | 1.65 | 0.18 | 0.09 | 10.00 | 0.00 |
| 2.310 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 0.50 | 3.70 | 2.21 | 1.49 | 1.85 | 0.36 | 0.18 | 10.00 | 0.00 |
| 2.405 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 0.90 | 4.10 | 2.78 | 1.32 | 2.05 | 0.73 | 0.37 | 10.00 | 0.00 |
| 2.480 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 1.10 | 4.30 | 2.95 | 1.35 | 2.15 | 0.80 | 0.40 | 3.84 | 8.54 |
| 2.550 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 1.30 | 4.50 | 3.27 | 1.23 | 2.25 | 1.02 | 0.51 | 3.98 | 7.01 |
| 2.465 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 1.70 | 4.90 | 3.48 | 1.42 | 2.45 | 1.03 | 0.52 | 3.18 | 2.44 |
| 2.510 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 1.90 | 5.10 | 3.64 | 1.46 | 2.55 | 1.09 | 0.55 | 2.30 | 2.59 |
| 2.475 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 2.00 | 5.20 | 3.79 | 1.41 | 2.60 | 1.19 | 0.60 | 3.09 | 0.98 |
| 2.590 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 2.10 | 5.30 | 3.86 | 1.44 | 2.65 | 1.21 | 0.61 | 2.27 | 0.53 |
| 2.570 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 2.30 | 5.50 | 4.03 | 1.47 | 2.75 | 1.28 | 0.64 | 10.00 | 0.00 |
| 2.550 | 3.00 | 3.20 | 0.80 | 2.50 | 5.70 | 4.34 | 1.36 | 2.85 | 1.49 | 0.75 | 10.00 | 0.00 |

【註：翻轉所需時間 10 秒表示陀螺自行旋轉 10 秒之後還是不會翻轉。】

2.我們依表 4，以「突出軸長與翻轉所需時間」分析，得關係圖 36，從中可以發現：切口直徑越大，能翻轉成功需要的突出轉軸長度越長，且突出轉軸長度範圍越大；切口直徑越小的陀螺，能翻轉成功需要的突出轉軸長度越短，且突出轉軸長度範圍越小。三種切口直徑最快翻轉的陀螺如表 5：

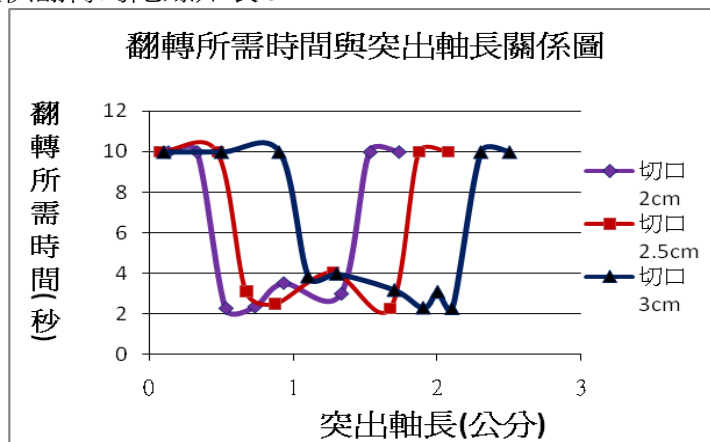


圖 36 翻轉所需時間與突出軸長關係圖

表 5 三種切口直徑最快翻轉的陀螺突出轉軸長度的比較

| 切口直徑(公分) | 突出轉軸長度(公分) | 翻轉所需時間(秒) | 翻轉後繼續旋轉時間(秒) |
|----------|------------|-----------|--------------|
| 2.00 | 0.53 | 2.26 | 15.52 |
| 2.50 | 1.67 | 2.27 | 2.44 |
| 3.00 | 1.90 | 2.30 | 2.59 |

3.我們依表 4，以「突出軸長與翻轉後繼續旋轉時間」分析，得關係圖 37，從中可發現：在翻轉後能繼續旋轉的陀螺中，切口直徑小的陀螺配上較短的轉軸，在翻轉之後能旋轉較長的時間；切口直徑大的陀螺配上較長的轉軸，大部分都不能完全倒立，翻轉後繼續旋轉平均只有不到 1 秒的時間。三種切口直徑翻轉後繼續旋轉最久的陀螺如表 6：

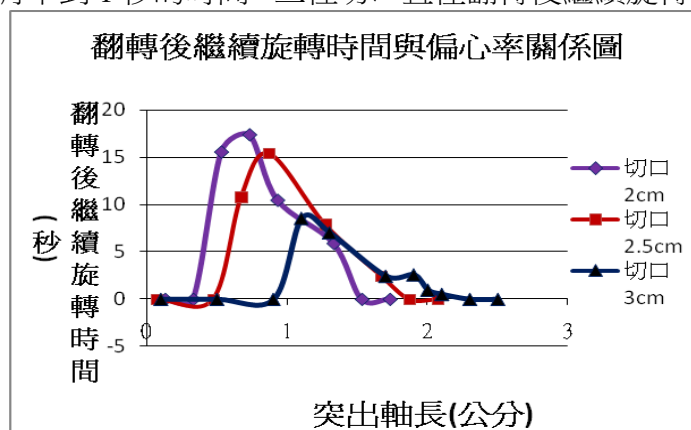


圖 37 翻轉後繼續旋轉時間與突出軸長關係圖

表 6 三種切口直徑翻轉後繼續旋轉最久的陀螺突出轉軸長度比較

| 切口直徑(公分) | 突出轉軸長度(公分) | 翻轉所需時間(秒) | 翻轉後繼續旋轉時間(秒) |
|----------|------------|-----------|--------------|
| 2.00 | 0.73 | 2.34 | 17.34 |
| 2.50 | 0.87 | 2.50 | 15.41 |
| 3.00 | 1.10 | 3.84 | 8.54 |

(三)探討偏心率對陀螺翻轉的影響

1.我們依表 4，以「偏心率與翻轉所需時間」分析，得關係圖 38，從中可發現：偏心率在 0.4 左右的陀螺，也就是偏心率在 0.8 左右的陀螺，翻轉所需的時間通常較少。三種切口直徑最快翻轉的陀螺如表 7(翻轉後必須旋轉 1 秒以上，否則不具倒立的效果)三者的偏心率平均為 0.45。三者比較如表 7：

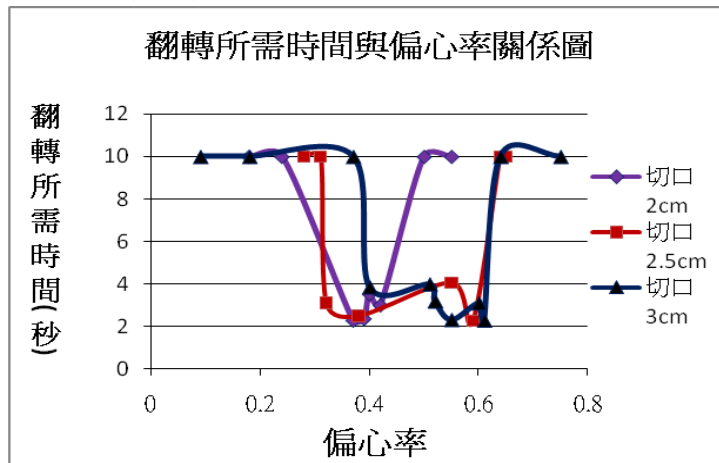


圖 38 翻轉所需時間與偏心率關係圖

表 7 三種切口直徑最快翻轉的陀螺偏心率的比較

| 切口直徑(公分) | 突出轉軸長度(公分) | 偏心率 | 翻轉所需時間(秒) | 翻轉後繼續旋轉時間(秒) |
|----------|------------|------|-----------|--------------|
| 2.00 | 0.53 | 0.37 | 2.26 | 15.52 |
| 2.50 | 1.67 | 0.59 | 2.27 | 2.44 |
| 3.00 | 1.90 | 0.55 | 2.30 | 2.59 |

2.我們依表 4，以「偏心率與翻轉後繼續旋轉時間」分析，得關係圖 39，從中可發現：偏心率在 0.4 左右的陀螺，也就是偏心率在 0.8 左右的陀螺，翻轉後繼續旋轉時間較長。三種切口直徑翻轉後繼續旋轉最久的陀螺如表 8，三者的偏心率平均為 0.39。

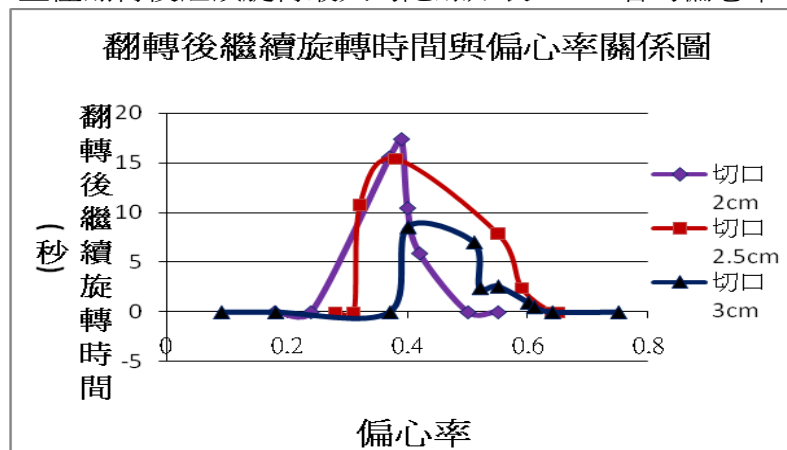


圖 39 翻轉後繼續旋轉時間與偏心率關係圖

表 8 三種切口直徑翻轉後繼續旋轉最久的陀螺偏心率比較

| 切口直徑(公分) | 突出轉軸長度(公分) | 偏心率 | 翻轉所需時間(秒) | 翻轉後繼續旋轉時間(秒) |
|----------|------------|------|-----------|--------------|
| 2.00 | 0.73 | 0.39 | 2.34 | 17.34 |
| 2.50 | 0.87 | 0.38 | 2.50 | 15.41 |
| 3.00 | 1.10 | 0.40 | 3.84 | 8.54 |

(四)比較市購倒轉陀螺與乒乓球倒轉陀螺的翻轉效果

我們選擇用手旋轉兩顆陀螺，一顆為市購倒轉陀螺，一顆為原本可以旋轉 10 秒以上的倒轉陀螺，發現市購倒轉陀螺翻轉所需時間較快，但自製乒乓球倒轉陀螺翻轉後卻可以繼續旋轉較久。兩者比較如表 9，並作相關時間比較長條圖如圖 40：

表 9 用手旋轉市購倒轉陀螺與自製乒乓球倒轉陀螺的比較

| 種類 | 切口直徑 (公分) | 突出轉軸長度 (公分) | 翻轉所需時間 (秒) | 翻轉後繼續旋轉時間(秒) |
|-----------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| 市購倒轉陀螺 | 1.94 | 1.29 | 2.49 | 6.01 |
| 自製乒乓球倒轉陀螺 | 2.00 | 0.53 | 3.31 | 10.51 |

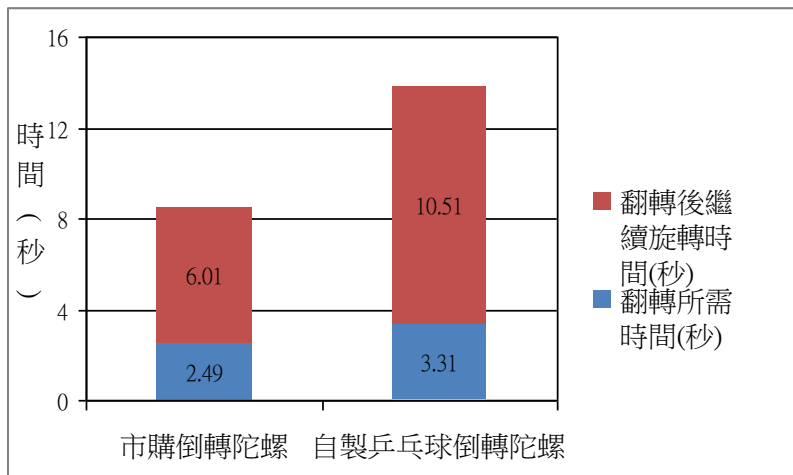


圖 40 用手旋轉市購倒轉陀螺與自製乒乓球倒轉陀螺的比較長條圖

三、製作出不同材質、不同大小的倒轉陀螺玩具

(一)玩具硬殼塑膠球倒轉陀螺：可成功翻轉，且翻轉後仍可繼續旋轉。如圖 41 到 52：



圖 41 0 秒 00

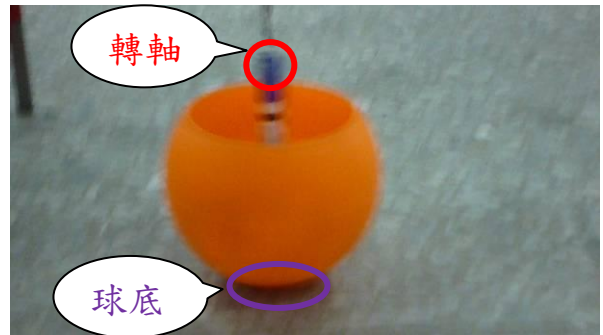


圖 42 5 秒 00

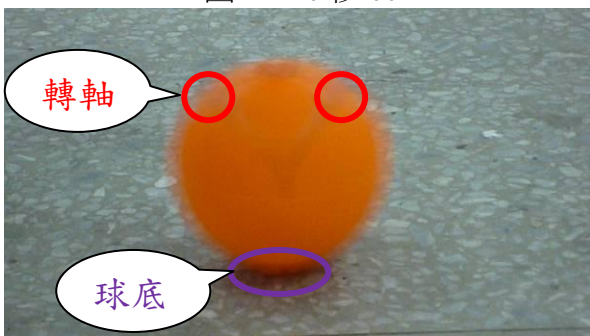


圖 43 5 秒 08

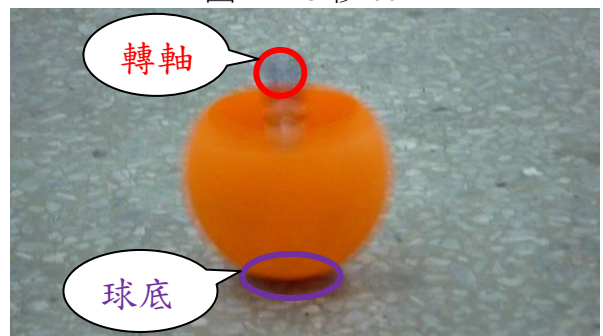


圖 44 5 秒 16

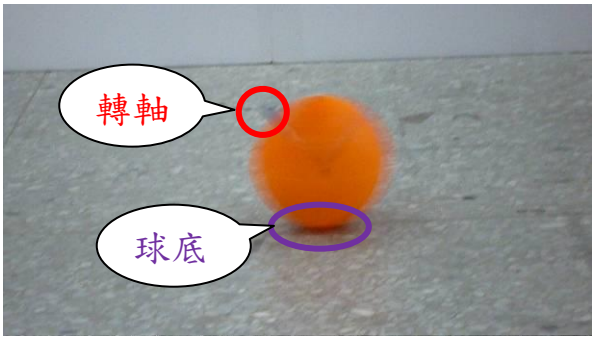


圖 45 11 秒 24

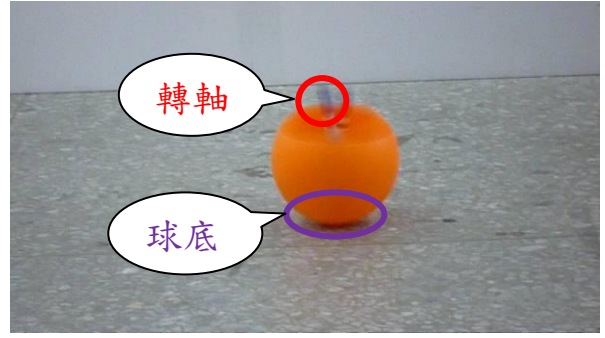


圖 46 12 秒 02

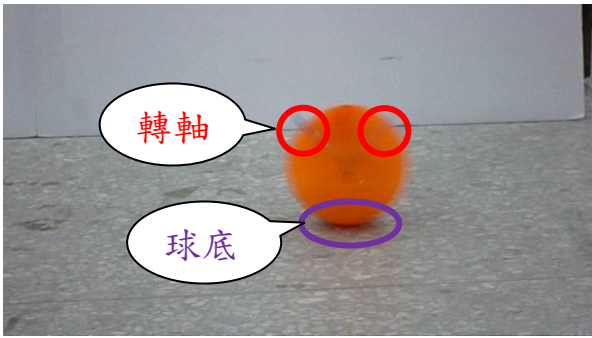


圖 47 12 秒 10

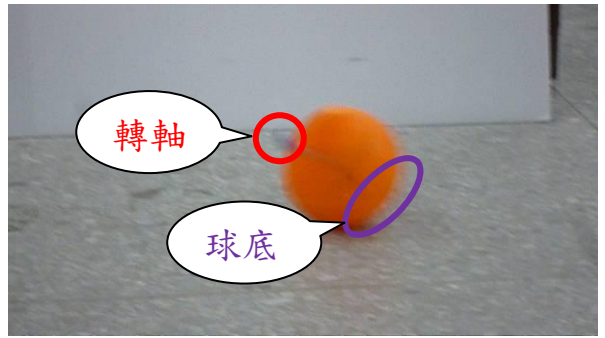


圖 48 12 秒 15

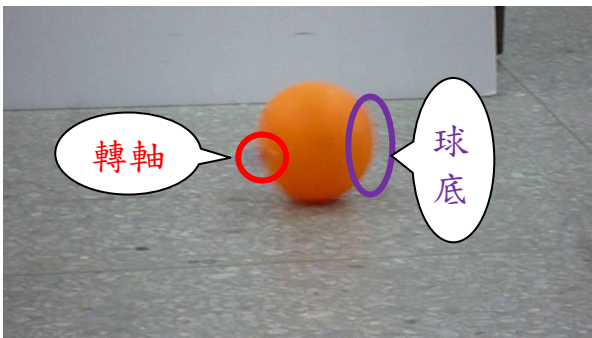


圖 49 12 秒 23

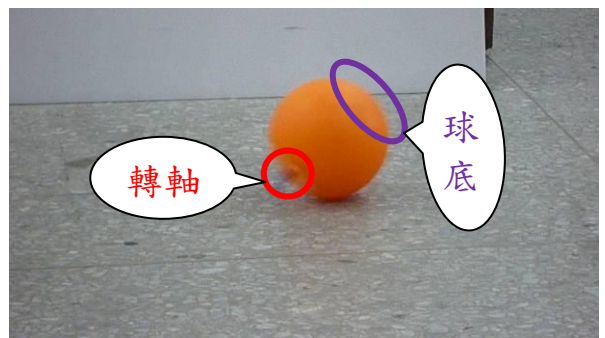


圖 50 13 秒 01

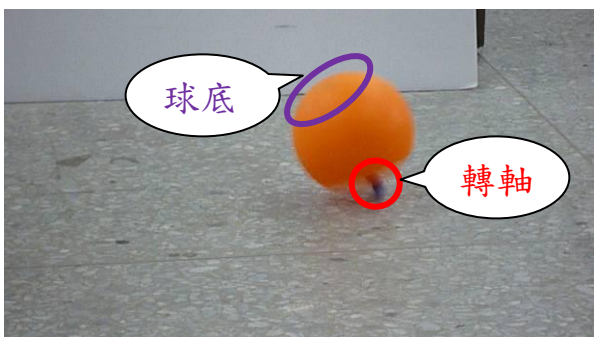


圖 51 13 秒 09

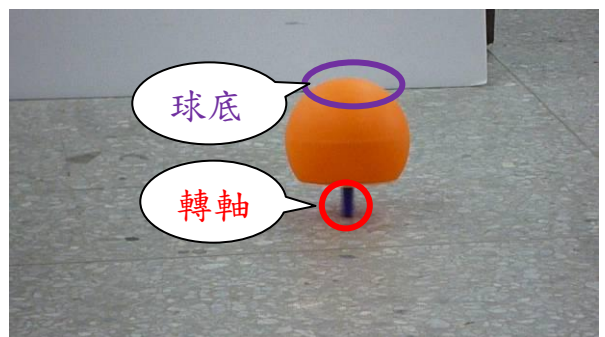


圖 52 13 秒 15

(二)戰鬥陀螺發射器：可成功帶動陀螺翻轉，且翻轉後仍可繼續旋轉。如圖 53 到 56：



圖 53 0 秒 00



圖 54 0 秒 14



圖 55 1 秒 08

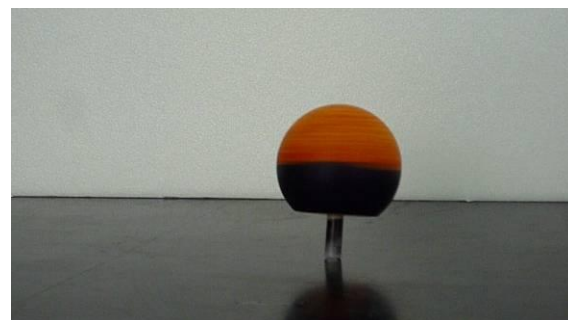


圖 56 3 秒 06

陸、分析與討論

一、分析市購倒轉陀螺基本性質

- (一)市購倒轉陀螺為的重心位於底部上方 1.09 公分處，偏整顆陀螺的下方。是因為市購倒轉陀螺在製作時有在底部、球身側邊加重。球身側邊並非像乒乓球一樣薄殼，而是有一點厚度。底部並非一個圓，而是像碗一樣的形狀，因密度相同、體積較大，質量也較乒乓球的圓底大。所以靜置不動時，因觸地面積較大，市購倒轉陀螺也會呈轉軸朝上的狀態。
- (二)市購倒轉陀螺「轉軸朝上」旋轉時，因陀螺重心位於球體中心的下方，故陀螺會從「轉軸朝上」旋轉，會逐漸翻轉變成「轉軸朝下」旋轉。當倒轉陀螺翻轉成「轉軸朝下」旋轉時，重心就移動至球體中心的上方，成為與傳統基本型陀螺一樣的穩定旋轉模式。
- (三)因為仿市購長度比例的乒乓球底部並未加重，球身部分也只有薄殼，和市購倒轉陀螺的質量分布有所差距，雖然可以翻轉，但效果都不及市購倒轉陀螺，因此我們推論：市購倒轉陀螺的長度比例只適合和它質量分布相似的物體，而我們找到不加重乒乓球的最佳比例，仍然比加重過的市購倒轉陀螺來的好。

二、以自製乒乓球倒轉陀螺探討偏心率對陀螺翻轉的影響

(一)自製乒乓球倒轉陀螺：

- 1.自製乒乓球倒轉陀螺十分容易，只要選定欲製作的切口直徑，用圓規取適當張口徑長，在乒乓球平行赤道的部分畫圓。
 - (1)製作切口直徑 2.00 公分：圓規張口徑長 1.05 公分；
 - (2)製作切口直徑 2.50 公分：圓規張口徑長 1.31 公分；
 - (3)製作切口直徑 3.00 公分：圓規張口徑長 1.62 公分。
- 2.以美工刀或筆刀切割用圓規畫的圓，再插入適當長度的空心塑膠筆心管轉軸，最後以三秒膠黏著，即可輕鬆完成一顆可以成功翻轉、翻轉後也可以繼續旋轉的乒乓球倒轉陀螺。有別於一般的倒轉陀螺都有在底部加工，如平底、加重等，我們自製的乒乓球倒轉陀螺的材料隨手可得，而且完全不需要另外加重，就能有超越市購倒轉陀螺的翻轉效果。
- 3.在製作實驗用的倒轉陀螺時，我們原本也以美工刀和筆刀切割球體，但我們發現手工的切法並不精準，切的圓總是不平整，所以我們找到砂輪機，以砂輪機切割的切口就比手工精準了許多。我們原本在製作陀螺轉軸時，切割完之後就直接黏上球體，但是我們發現切完之後的轉軸切面並不平整，所以我們又用砂紙磨平後才黏上球體，使轉軸能黏得更正、更直。
- 4.以切口直徑 2.00 公分的乒乓球製作倒轉陀螺，突出軸長在 0.50 公分到 0.70 公分之間(轉軸總長 4.20 公分到 4.40 公分)，或以切口直徑 2.50 公分的乒乓球製作倒轉陀螺，突出軸長在 0.70 公分到 0.90 公分之間(轉軸總長 4.20 公分到 4.40 公分)，乒乓球就能在 4 秒以內翻轉，而且翻轉之後可以繼續旋轉 10 秒以上。

(二)製作「自製陀螺發射器」：

自製陀螺發射器能夠順利發射陀螺，主要的原因在於陀螺轉軸與細金屬棒結合成功。在尚未確定馬達轉軸下端黏著的物質之前，我們曾經嘗試各種材質，如：吸管、黏土等物質，但是都沒有細金屬棒效果來的好，是因為它的粗細是設計過的，而且它的硬度不會太軟，又可以完全跟馬達結合，如此馬達轉動產生的動能就能全部傳入陀螺。

(三)探討切口長度與突出轉軸長度對陀螺翻轉的影響：

1.切口直徑：

倒轉陀螺上半部質量比較小，下半部的質量比較大。當旋轉陀螺時，陀螺為了尋找「上重下輕」的穩定旋轉模式，下面重的部分會往上跑，上面輕的部分會往下掉。使用切割的方式減少上半部的質量，可使球體達到下重上輕的最佳質量分布。切口直徑越大，上下半部的質量差異也就越大。

2.突出轉軸長度：

轉軸越長，旋轉時陀螺轉軸的晃動程度越大，而倒轉陀螺需要的即是讓朝上旋轉的轉軸晃動的效果，才能逐漸翻轉。如果轉軸太短，因力臂太小，轉動力矩太小，所以陀螺不易晃動；但轉軸如果太長，因力臂較大，轉動力矩也較大，所以轉軸很快就能從上面晃到下面。但又因力臂較大，轉動力矩較大，所以翻轉後旋轉時的晃動程度也較大，以致於穩定性不夠，所以翻轉後繼續旋轉時間也不久。

(四)製作「自製重心測量器」：

自製重心測量器能夠測出物體的重心，是利用「將物體用線垂吊，線延伸出去的直線必定通過物體的重心」這個原理。因為光有直進性，所以雷射光通過球身上的孔照在轉軸上的那一點，必定是棉線延伸的直線通過轉軸的交點。我們測量的時候，會確認棉線上是否有紅光，若有即表示雷射光真的是垂直棉線射向轉軸。我們又顧慮到一點：若雷射光和轉軸的夾角並非 90 度，棉線延伸出去的直線就會與轉軸有兩個交點。於是我們盡量讓每條棉線垂吊陀螺時，轉軸與棉線的夾角都呈垂直，如此便能將誤差降低，求出較精準的重心位置。

(五)探討偏心率對陀螺翻轉的影響

我們從數十顆陀螺中取三顆翻轉所需時間在 3 秒以內，且翻轉後繼續旋轉時間在 15 秒以上的陀螺和市購倒轉陀螺比較，探討偏心率對陀螺翻轉的影響。自製三顆乒乓球倒轉陀螺的偏心率都在 0.37~0.39 之間，因此我們推論偏心率在這個範圍內的陀螺，都能有不錯的翻轉效果。如表 10：

表 10 3 秒內翻轉且翻轉後可繼續旋轉 15 秒以上的自製倒轉陀螺和市購倒轉陀螺的比較

| 性質 | 陀螺 | | 自製切口型倒轉陀螺 | | |
|-----------|----------|----------|-----------|----------|--|
| | 切口型倒轉陀螺 | | | | |
| 陀螺材質 | 木頭製 | | 乒乓球 | | |
| 球體半徑 | 1.51 公分 | | 2.00 公分 | | |
| 切口直徑 | 1.94 公分 | 2.00 公分 | 2.00 公分 | 2.50 公分 | |
| 突出轉軸長度 | 1.29 公分 | 0.52 公分 | 0.72 公分 | 0.93 公分 | |
| 總軸長 | 3.29 公分 | 4.20 公分 | 4.40 公分 | 4.40 公分 | |
| 軸頂到重心 | 2.63 公分 | 2.84 公分 | 2.98 公分 | 2.95 公分 | |
| 重心 | 1.09 公分 | 1.36 公分 | 1.42 公分 | 1.45 公分 | |
| 偏心量 | 0.76 公分 | 0.74 公分 | 0.78 公分 | 0.75 公分 | |
| 偏心率 | 0.50 | 0.37 | 0.39 | 0.38 | |
| 質量 | 8.715 公克 | 2.725 公克 | 2.785 公克 | 2.445 公克 | |
| 翻轉所需時間 | 2.49 秒 | 2.26 秒 | 2.34 秒 | 2.50 秒 | |
| 翻轉後繼續旋轉時間 | 6.01 秒 | 15.52 秒 | 17.34 秒 | 15.41 秒 | |

(六)比較市購倒轉陀螺與乒乓球倒轉陀螺的翻轉效果：

為了使實驗更精準，我們在市購倒轉陀螺的軸中央挖洞，想以馬達帶動市購倒轉陀螺，以控制輸入陀螺的能量相等，但是卻因球身大小不一而不順利。我們又改用自製戰鬥陀螺發射器發射，雖然可以順利發射，但是好像是因為我們挖了洞，翻轉效果都不比用手旋轉來的好，所以我們最後還是選擇統一使用手旋轉，因為若要製成玩具販售，一般人也不會有馬達。市購倒轉陀螺的翻轉所需時間較短，而自製乒乓球倒轉陀螺翻轉後繼續旋轉時間較長。雖然比市購倒轉陀螺翻轉所需時間多了約 1 秒，但是翻轉後繼續旋轉時間可以比市購倒轉陀螺多 4 秒。

(七)我們查閱《力學的趣味實驗》一書，上面寫到關於陀螺切口位置的敘述：「把有柄的部分看作是北半球，用鋼絲鋸沿北緯 50 度線附近鋸開。」從實驗結果發現：切口直徑 2.00 公分及 2.50 公分，切口緯度分別在北緯 58.2 度及 48.6 度，可製作出翻轉效果較好的倒轉陀螺；而切口直徑 3.00 公分，切口緯度約為北緯 36.9 度，翻轉後旋轉時間最多只能繼續旋轉 8 秒多，是三種切口中較差的切口緯度，與《力學的趣味實驗》切口緯度在 50 度左右的說法相符。

三、製作出不同材質、不同大小的倒轉陀螺玩具

(一)玩具硬殼塑膠倒轉陀螺：

因為原本陀螺的球體是保齡球，所以有三個洞可以握住球身。為了將這三個洞切掉，只好選擇翻轉效果最差的切口直徑 3.00 公分比例來製作。我們以切口直徑 3.00 公分陀螺中的最佳比例：突出軸長 1.10 公分作為大球切口直徑和突出軸長的比例，選擇以空心塑膠奇異筆心管作為轉軸，和乒乓球的原子筆心塑膠筆心管道理相同。不但可以插

入馬達帶動陀螺旋轉，還可以節省特製的費用。陀螺翻轉所需時間非常久，但只要一翻過來，就會旋轉很長的一段時間。

(二)戰鬥倒轉陀螺發射器：

本實驗已成功將倒轉陀螺結合戰鬥陀螺發射器，發射倒轉陀螺使之翻轉且翻轉後繼續旋轉。但無法取代馬達的原因是：雖然發射器的齒輪裝置能夠固定產生的能量，但是我們發現手施予的力也會影響陀螺接收到的能量，所以還是決定以固定電壓的馬達進行實驗。而此發射器也就僅止於玩具階段，雖然不能使陀螺獲得穩定的能量，但是卻使倒轉陀螺的玩法更多元。

柒、結論

- 一、市購倒轉陀螺的重心偏球體下方，在底部、球身側邊有加重，使陀螺下半部質量比例較大。為了尋找穩定的旋轉，質量大的下半部會往上跑，陀螺就翻了過來。
- 二、一般陀螺無法翻轉是因為陀螺上半部質量比例較大，打出去之後即符合「上重下輕」的穩定旋轉模式。
- 三、切口直徑影響質量分布，突出轉軸長度影響力矩，兩者共同影響偏心率。切口直徑在 2.00 公分到 2.50 公分，突出轉軸長度在 0.70 公分到 0.90 公分的倒轉陀螺，能夠在 4 秒以內翻轉，翻轉以後能夠繼續旋轉 10 秒以上。
- 四、偏心率在 0.37~0.39 之間的倒轉陀螺，翻轉效果大部分都不錯。
- 五、市購倒轉陀螺製作過程繁複費工，一顆售價 20 元；「自製乒乓球倒轉陀螺」製作簡便，材料易取得，一顆成本只要 3.5 元。
- 六、用手旋轉市購倒轉陀螺只能旋轉 6 秒；用手旋轉自製乒乓球倒轉陀螺能旋轉 10 秒以上，還可配合戰鬥陀螺發射器帶動陀螺旋轉，成功製成倒轉陀螺玩具組。
- 七、本實驗已成功將玩具塑膠硬殼保齡球製作成塑膠硬殼倒轉陀螺，能夠具有更炫麗的視覺效果。
- 八、自製乒乓球倒轉陀螺中，最快翻轉的陀螺為切口直徑 2.00 公分、突出轉軸長度 0.53 公分的陀螺，平均只要 1.9 秒就可以翻轉；翻轉後繼續旋轉最久的陀螺為切口直徑 2.00 公分、突出轉軸長度 0.73 公分的陀螺，翻轉後平均可以繼續旋轉 17.3 秒。
- 九、從實驗中我們歸納出輕鬆製作翻轉後旋轉 10 秒以上的乒乓球倒轉陀螺五步驟，如下：
 - (一)在乒乓球平行赤道的部分切割半徑 1 公分或 1.3 公分的圓。如圖 57 到 59：
 - (二)將空心塑膠筆心管切割成長度在 4.2 公分到 4.4 公分之間。如圖 60、61：
 - (三)在切完球體的底部滴入 3 到 4 滴的三秒膠。如圖 62：

(四)將空心塑膠筆心管黏著於球體底部。

(五)靜置一段時間，倒轉陀螺完成！如圖 63：



圖 57 在乒乓球上平行赤道的部分畫圓



圖 58 切割半徑 1 公分或 1.3 公分的圓



圖 59 陀螺球體切割完成

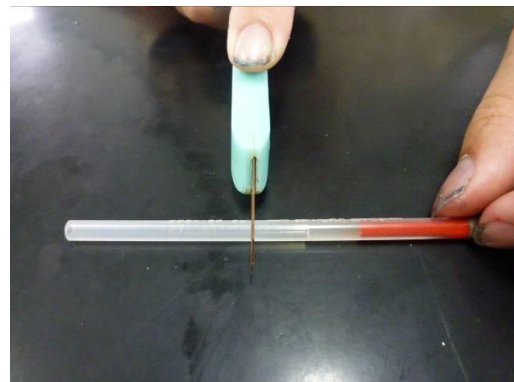


圖 60 將空心塑膠筆心管切割成長度在 4.2 公分到 4.4 公分之間



圖 61 轉軸切割完成



圖 62 在切完球體的底部滴入 3 到 4 滴的三秒膠

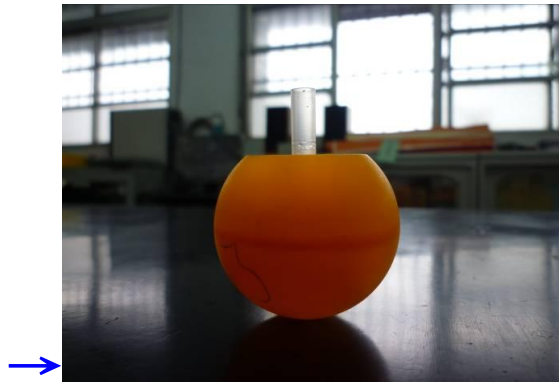


圖 63 倒轉陀螺完成！

十、從校內科展到全國科展將近十個月的努力，我們將倒轉陀螺徹底研究，了解到在一個小玩具的背後，竟然也涵蓋著如此博大精深的道理。雖然其中有些原理我們尚未學習，不過在這個過程中，我們也找到富有自創性、科學性和娛樂性的「自製倒轉陀螺」之製作方法。也希望藉著我們的報告，能讓未來有興趣研究的人在一定的基礎下繼續探討，將這個玩具研究的更深入、更透徹。

捌、參考資料

- 一、酒井高男(2000)。力學的趣味實驗。新竹市：凡異。
- 二、林英智等(2009)。國中自然與生活科技第五冊。台北縣：康軒。
- 三、張孔博等(2002)。魔力？摩力！我的陀螺會倒立。第 42 屆全國科展國中組物理科：
<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/42/pdf/d/1/030107.pdf>
- 四、陳柏廷等(2009)。翻滾吧！陀螺。台中縣第 49 屆科展國小組物理科：
[http://science.boe.tcc.edu.tw/up49/82_第 49 屆科展物理科-翻滾吧！陀螺_翁子國小.pdf](http://science.boe.tcc.edu.tw/up49/82_第49屆科展物理科-翻滾吧！陀螺_翁子國小.pdf)

【評語】 030815

本作品以製作“倒轉陀螺”為主，同時探討如何製作各樣大大小小材質不一的可倒轉陀螺。雖然之前的科展有類似的題目，但本作品更精密的量測了陀螺的質心位置與偏心率，及倒轉的時間關係。製作本身就好玩有趣，參與的人也學了不少知識。