

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080102

風到哪裡去了—氣流附壁作用之探討

學校名稱：高雄市三民區民族國民小學

作者： 小六 黃詣程 小六 蘇定軒 小五 黃荏澧	指導老師： 劉晏企 焦恒永
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：氣流、附壁作用、康達效應

摘要

「附壁作用」是指流體遇到障礙物（例如氣球），流體會沿著障礙物曲面流動的現象，並產生推往流體方向的作用力（氣球的舞動，2021）。於是採邊想邊實驗邊修改的模式來探究氣流附壁作用。研究結果發現：

- 一、氣流經過正角柱體時，會沿其側面流動且其底面邊數愈多愈明顯。
- 二、氣流流經直圓柱體時，會分為兩股附壁在兩側運動，到了另一端時再匯集成一股往前進。
- 三、氣流經過球體所產生的附壁作用，能使球體穩定飄浮，並帶動球體產生偏移。
- 四、氣流會從側面有斜度葉片沙漏型圓柱體的縫隙中流出，且附壁在曲面上形成一直環繞的現象。

將氣流一直環繞的特性運用於日常生活上，或許可設計出便利於生活的科技產品。

壹、前言

記得曾參加科學闖關遊戲，有一關要利用一根吸管將杯中的乒乓球吹出，可是我總吹不出，球只在杯裡轉，到底怎麼一回事？

為了釐清我上網查，看到兩篇科學遊戲介紹，分別是國立中央大學的「小球飄浮」和國立台中教育大學的「氣球的舞動」，尤其是「氣球的舞動」內容說明了「康達效應」又稱為「附壁作用」，是指流體遇到障礙物（例如氣球），流體會沿著障礙物曲面流動的現象，並產生推往流體方向的作用力（氣球的舞動，2021）。原來球只在杯裡轉是附壁作用的效果。

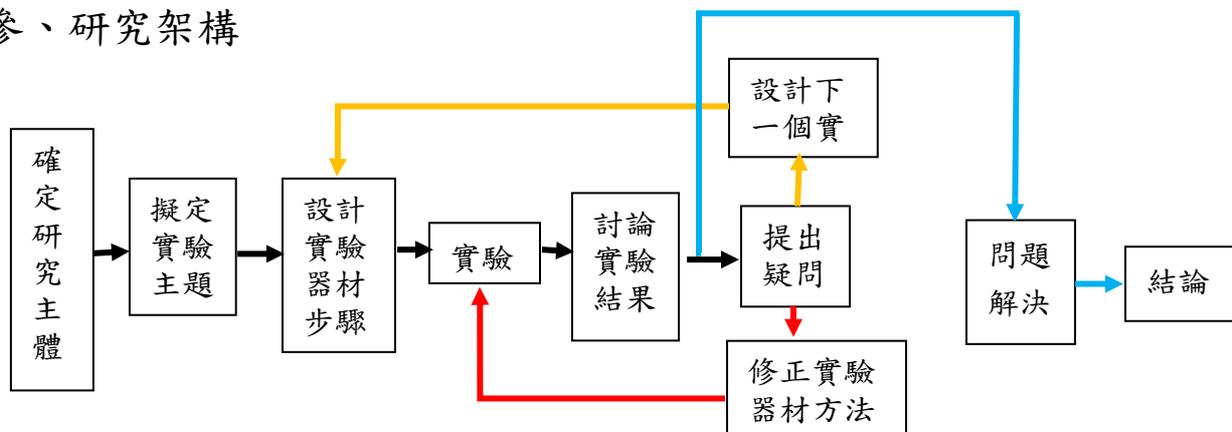
另外還有提到飛機的升力也與康達效應有關，根據 NASA 的實驗：機翼上下兩個表面的氣流雖然在機翼前端同時分開，但是根本沒有在機翼尾端同時匯合；另外，實驗也表明一個上下表面長度相同的機翼仍然可以產生足夠的升力（黃姮，2020）。

於是我們決定來探討氣流附壁作用，在老師的指導下開始一連串的實驗探究。

貳、研究設備及器材

- 一、吹風機、風速計、游標尺、電子秤、蠟燭及各類圓球。
- 二、自製各項研究器材及各種尺寸之正角柱體與直圓柱體。

參、研究架構



肆、研究目的與方法

本研究所謂氣流附壁作用，是指空氣流動經過障礙物所產生的附壁作用，我們稱為氣流附壁作用。採用實驗研究的方法，根據研究主題，逐步擬定實驗主題與設計實驗器材。研究

目的如下：

- 一、探討氣流流經正角柱體及直圓柱體後，氣流的運動軌跡。
- 二、探討氣流吹向各種不同球體後，在球體的附壁作用。
- 三、探討氣流對側面有縫隙的圓柱體曲面之附壁作用現象。

伍、研究結果與討論

【目的一】探討氣流流經正角柱體及直圓柱體後，氣流的運動軌跡。

【實驗一~1】探討氣流流經正角柱體及直圓柱體教具模型時的運動情形。

《實驗步驟》

1. 製作氣流流向角度觀察台(180cm×180cm)(如右上圖)，以觀察氣流經過障礙物後的運動軌跡。是以量角器右邊零刻度線為0°線，往左每10度為一分隔，到左邊零刻度線為180°。
2. 分別以正角柱體的側稜和側面及直圓柱體側面當作阻擋氣流運動時的障礙物。
3. 將障礙物對齊零刻度線，中間對齊90°線。
4. 將障礙物置放於吹風機出風口約3cm、6cm、9cm、18cm、36cm處，用吹風機冷風分別對著正角柱體的側稜、側面及直圓柱體側面吹出，觀察流蘇最先飄動的角度及飄動的區間角度，如表一~1~1。



氣流流向角度觀察台



氣流流向示意圖

表一~1 柱體規格一覽表(採用學校數學教學使用的教具)

柱體	直圓柱	正三角柱	正四角柱	正五角柱	正六角柱	正八角柱
邊長/直徑	7 cm	7 cm	7 cm	6 cm	5 cm	5 cm
高度	11 cm					

表一~1~1 氣流流經正角柱體的側稜或側面時，其運動時風向改變一覽表(單位：度)

柱體 面向		氣流柱體距離 飄動角度	3cm	6cm	9cm	18cm	36cm
			正三角柱	側稜	最先飄動 60 120	60 120	60 120
			飄動區間 50-70 130-110	50-70 130-110	50-70 130-110	70-90 110-90	70-90 110-90
	側面	最先飄動 0 180	0 180	0 180	0 180	0 180	0 180
			飄動區間 ×	×	×	0-10 180-170	10-20 170-160
正四角柱	側稜	最先飄動 45 135	45 135	45 135	45 135	45 135	45 135
			飄動區間 35-50 145-130	35-50 145-130	35-50 145-130	35-50 145-130	35-50 145-130
	側面	最先飄動 0 180	0 180	0 180	0 180	0 180	0 180
			飄動區間 ×	×	×	0-10 180-170	20-30 160-150
正五角柱	側稜	最先飄動 30 150	30 150	40 140	40 140	50 130	50 130
			飄動區間 25-40 155-140	25-40 155-140	25-40 155-140	20-45 160-135	20-45 160-135

	側面	最先飄動	0 180	10 170	10 170	20 160	40 140
		飄動區間	×	×	×	10-20 170-160	25-35 155-145
正六角柱	側棱	最先飄動	30 150	30 150	30 150	30 150	30 150
		飄動區間	30-45 150-135	30-45 150-135	30-45 150-135	30-45 150-135	30-50 150-130
	側面	最先飄動	×	×	×	×	×
		飄動區間	60 120	50-60 130-120	60-70 120-110	60-80 120-100	70-110 110-70
正八角柱	側棱	最先飄動	80	85	85	90	90
		飄動區間	80-90 100-90	80-90 100-90	80-90 100-90	80-100 100-80	80-100 100-80
	側面	最先飄動	×	×	×	×	×
		飄動區間	85-95 95-85	85-95 95-85	80-100 100-80	85-90 95-90	80-100 100-80
直圓柱	側面	飄動區間	85-95	85-95	80-100	80-100	80-100

【實驗結果】

從表一~1~1 得知：

一、氣流流經各正角柱體的側棱時：均能使流蘇在不同範圍飄動。

二、氣流流經各正角柱體的側面時：

(一)正三、四、五角柱體在距離較近(3cm~9cm)時，氣流會直接由左右兩側飄動；但當距離變大(36cm)時，運動方向才逐漸由外往內流動，出現飄動區間。

(二)正六、八角柱體在距離較大(18cm~36cm)時，氣流沒有被柱體的側面擋住而持續往前。

三、氣流流經直圓柱體側面時：在距離 9cm~36cm，流蘇飄動的區間介於 80 度至 100 度間，且氣流集中於直圓柱體的正前方(90 度線位置)附近。

【問題討論】

一、為何氣流經過正角柱體側面實驗時，沒有被側面阻擋？大家討論後提出質疑，吹風機吹出的氣流是否會有逐漸擴散的情形？於是要再實驗吹風機在無障礙物狀態下以直線方式吹出，觀察流蘇飄動的情形(如表一~1~2)。

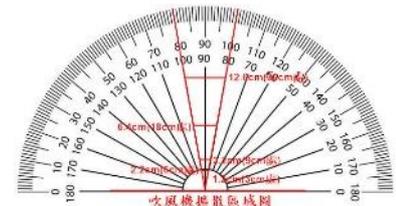
二、發現學校正角柱體教具的底面邊長太短、高度太低，氣流可以直接從柱體兩側或上面通過，所以我們決定重新製作底面邊長較長、高度較高的柱體來進行實驗探究。

表一~1~2 氣流吹向無障礙物時，其運動情形一覽表

機器	出風口 內徑	平均風速	3cm	6cm	9cm	18cm	36cm
吹風機	4.6cm	9.2 m/s	80°-90°-100°	80°-90°-100°	80°-90°-100°	80°-90°-100°	80°-90°-100°
量角器零刻度線中央 80°-100° 範圍水平距離			1.2cm	2.2cm	3.2cm	6.4cm	12.6cm

【實驗結果】

一、吹風機吹出來的氣流約有 20 度擴散區域，經由測出的水平距離，正好能說明正角柱體教具的側面因底面邊長太短，導致側面無法完全阻擋擴散的氣流而直接穿越。



吹風機氣流擴散區域圖

二、修正實驗。製作底面邊長為 20cm 高度為 25cm 的正角柱體及直徑 20cm 的直圓柱體，並增加正九、正十、正十二角柱體來做實驗探究。



【實驗一~2】探討氣流流經自製正角柱體時的運動情形。

《實驗步驟》

1. 自製如上述之正角柱體及直圓柱體。
2. 按照實驗一的步驟操作實驗，但只紀錄流蘇飄動最強烈的角度，結果如表一~2。

表一~2 氣流流經底面邊長 20cm 正柱體的側棱或側面時，其運動時風向改變一覽表(單位：度)

柱體 面向		距離 飄動角度					
		3cm	6cm	9cm	18cm	36cm	
正三角柱	側棱	60 120	60 120	60 120	60 120	60 120	
	側面	0 180	0 180	0 180	10 170	15 165	
正四角柱	側棱	45 135	45 135	45 135	45 135	45 135	
	側面	0 180	0 180	0 180	10 170	15 165	
正五角柱	側棱	35 145	35 145	35 145	35-45 145-135	35-45 145-135	
	側面	0 180	0 180	10 170	15 165	20 160	
正六角柱	側棱	30 150	30 150	30 150	20-45 150-135	25-50 155-130	
	側面	0 180	0 180	10 170	15 165	20 160	
正八角柱	側棱	23→50→60 157→130→120	23→50→60 157→130→120	23→50→60 157→130→120	25→50→60 155→130→120	25→45→65 155→135→115	
	側面	0 180	5 175	5→35 175→145	5→35→60 175→145→120	10→45→62 170→135→118	
正九角柱	側棱	18→45→70 162→135→110	18→45→70 162→135→110	18→50→70 162-130→110	20→55→75 160→125→105	20→55→75 160→125→105	
	側面	25→45 155→135 (微動)	25→45→65 155→135→115 (微動)	30→45→65 150→135→115 (微動)	30→45→70→80 150→135→110→100 (微動)	30→45→68→80 150→135→112→100 (微動)	
正十角柱	側棱	15→45→70 165→135→110	15→45→75 165→135→105	15→45→80 165→135→100	18→55→85 162→125→95	20→55→85 160→125→95	
	側面	25→50→65 155→130→115 (微動)	25→50→70 155→130→110 (微動)	30→50→70 150→130→110 (微動)	30→50→70→85 150→130→110→95 (微動)	30→50→70→85 150→130→110→95 (微動)	
正十二角柱	側棱	10→30→60→75 170→150→120→105	10→30→70→75 170→150→110→105	10→30→70→80 170→150→110→100	15→35→65→80 165→145→115→100	15→35→70→85 165→145→110→95	
	側面	30→50→65 150→130→115 (微動)	30→50→70 150→130→110 (微動)	30→50→70 150→130→110 (微動)	30→50→70→85 150→130→110→95 (微動)	30→50→75→85 150→130→105→95 (微動)	
直圓柱	側面	60-120	65-115	70-110	75-105	80-100	

【實驗結果與討論】

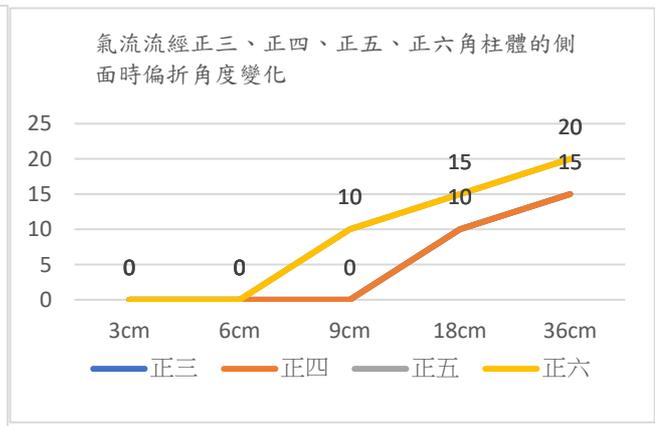
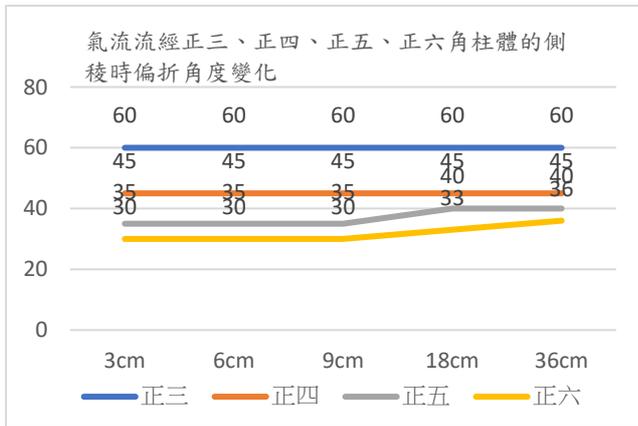
一、氣流流經正三、正四、正五、正六角柱體的側棱及側面時，偏折角度的變化情形。

(一) 氣流流經側棱時：

1. 從表一~2 及圖一得知，氣流會分為兩股，使兩側的流蘇飄動，觀察飄動的角度是對稱的。
2. 氣流沿著正角柱體側面右邊直線運動，最先使流蘇飄動最強烈的角度分別為 60° 、 45° 、 35° 、 30° ，我們發現這個角度剛好或接近正角柱體底面外角的一半。例如正三角柱體內角為 60° ，外角為 120° ，外角的一半為 60° 。
3. 由於正角柱體底面邊長 20cm 夠長，導致氣流擴散情形不明顯，而使氣流沿正角柱體側面直線運動，並未產生氣流附壁作用。
4. 氣流流經正五、正六角柱體的側棱時，當與正角柱體距離(18cm-36cm)較遠時，已出現氣流擴散情形。

(二) 氣流流經側面時：

1. 從表一~2 來看：氣流會分為兩股，使兩側的流蘇飄動，飄動的角度也是對稱的。
2. 從表一~2 及圖二來看：氣流基本上被正角柱體側面擋住，只能使兩側 0 度及 180 度左右的流蘇飄動。
3. 但在氣流與正角柱體距離(9cm-36cm)時，氣流有擴散的現象發生。



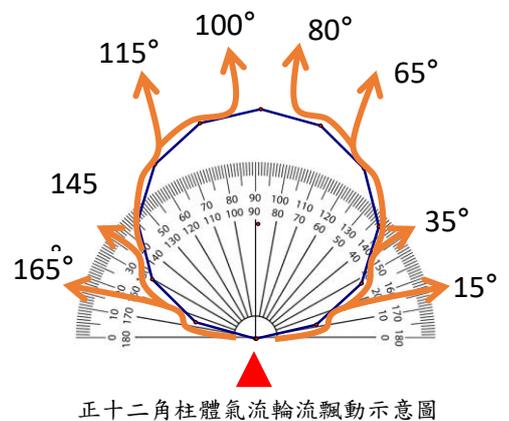
圖一 氣流流經正角柱體的側棱時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)

圖二 氣流流經正角柱體的側面時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)

二、氣流經過正八、正九、正十、正十二角柱體的側棱、側面及直圓柱體側面時偏折角度的變化情形。

(一) 氣流流經側棱時：

1. 從表一~2 來看：氣流會分為兩股，使兩側的流蘇飄動，飄動的角度是對稱的。
2. 從表一~2 及圖三到圖七中發現氣流與柱體距離 3cm-36cm 時，流蘇均有輪流飄動的現象。
3. 發現氣流有沿著正角柱體側面偏折的軌跡，例如正十二角柱體(如右圖)，氣流從距離正角柱體 18cm 處出發，氣流先使 15° (165°)左右的流蘇飄動，而後偏折到 35° (145°)左右，再偏折到 65° (115°)左右，最後偏折到 80° (100°)左右。
4. 氣流與正角柱體距離逐漸拉遠，偏折角度會產生些微改變。但我們發現到氣流偏折的角



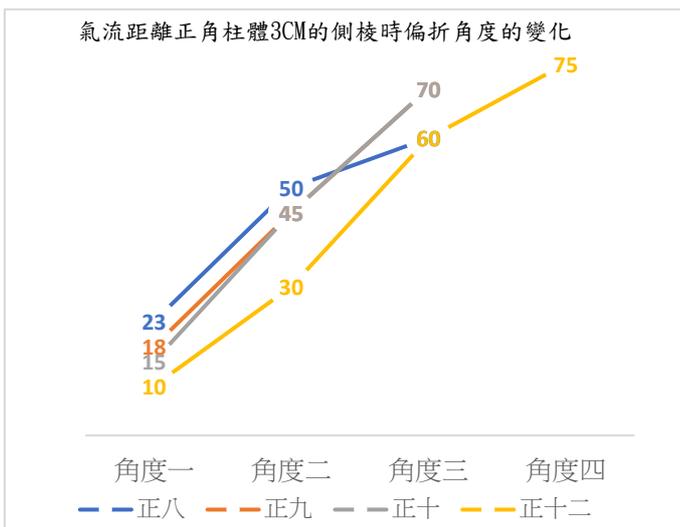
度跟正角柱體底面外角的角度有關。

(二) 氣流流經側面時：

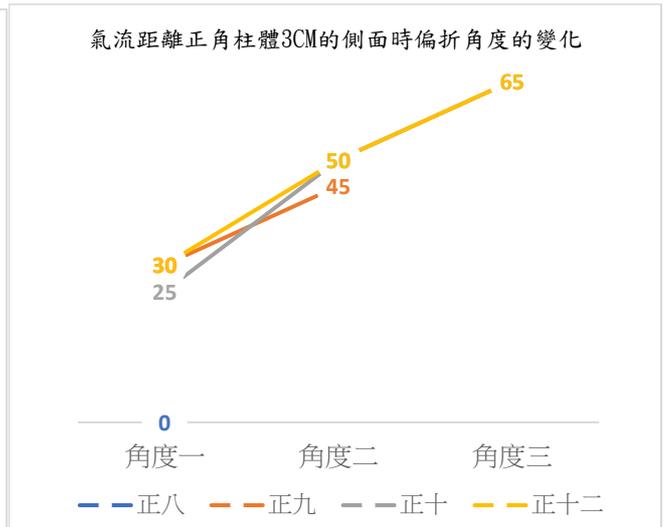
1. 從表一~2 來看：氣流會分為兩股，使兩側的流蘇飄動，飄動的角度是對稱的。
2. 從表一~2 及圖八到圖十二來看：氣流運動均使流蘇出現輪流飄動的現象，這與氣流直接流經正角柱體側棱時的運動軌跡類似。
3. 雖然從正角柱體側面出發的氣流只能讓流蘇微微飄動，但也能說明氣流確實會沿著角柱體側面流動的軌跡。
4. 從上述實驗結果來看，可發現到氣流會沿著正角柱體相鄰側面運動的軌跡，這正是氣流附壁作用的現象。

(三) 氣流流經直圓柱體(直徑 20cm)的側面時：

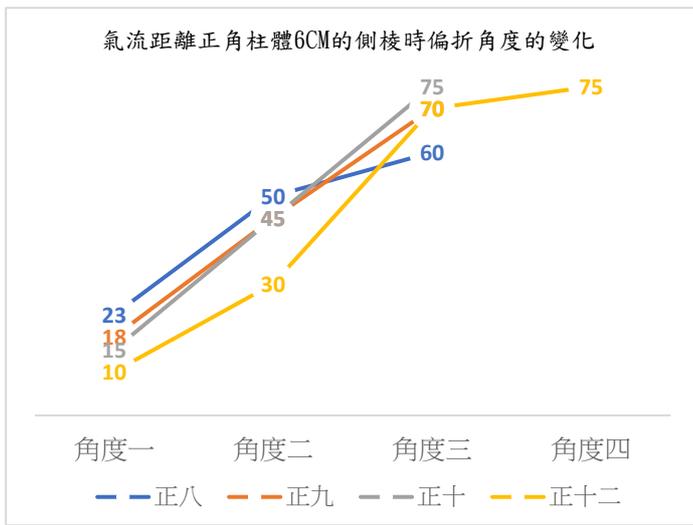
1. 從表一~2 及圖十三來看，氣流流經直圓柱體時，在距離 3cm 時，流蘇飄動範圍較廣，但只是微微飄動。
2. 但隨著距離逐漸拉至 18cm 到 36cm 時，流蘇飄動最強烈的角度逐漸往中央(90 度)的兩側流動，飄動也最強烈。
3. 因此發現：氣流會沿著直圓柱體左右側面流動，當匯集到中央時，就往前流動。



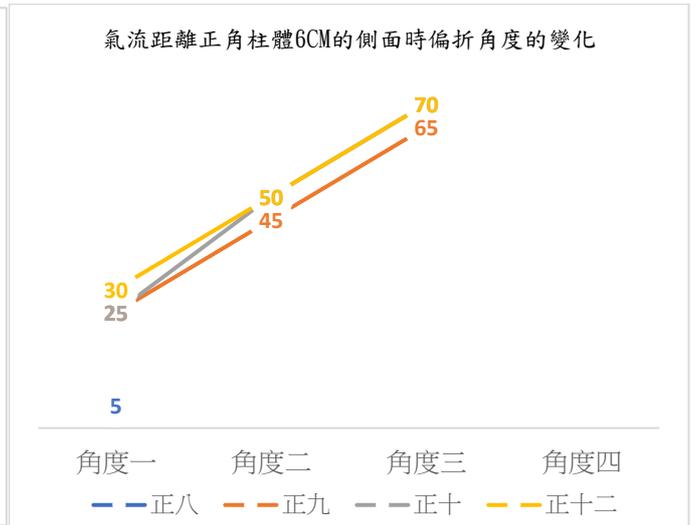
圖三 氣流距離正角柱體 3cm 的側棱時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



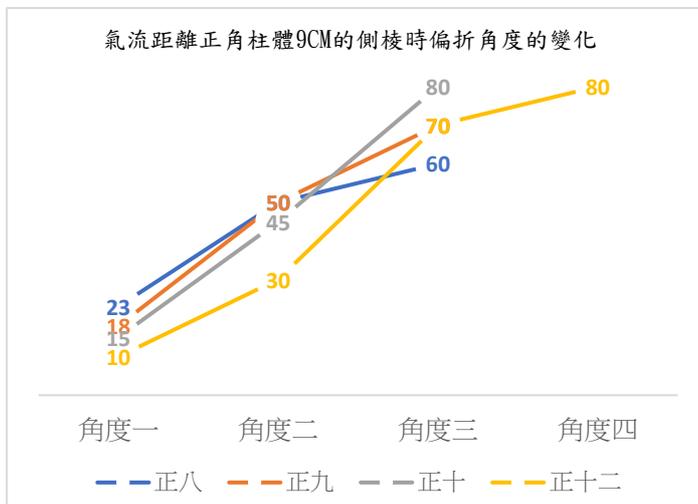
圖八 氣流距離正角柱體 3cm 的側面時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



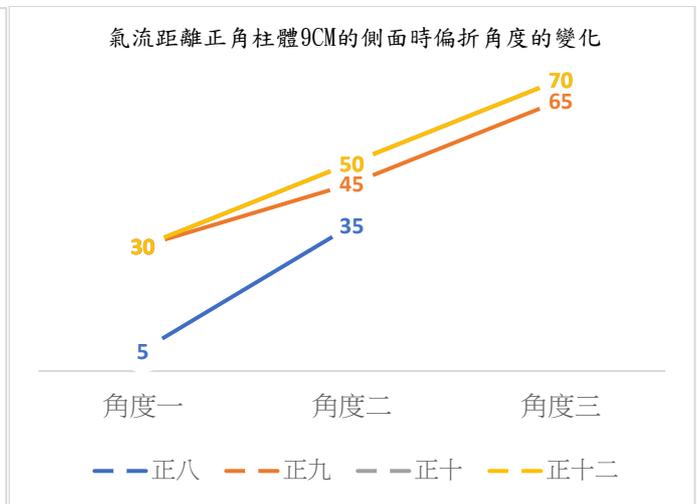
圖四 氣流距離正角柱體 6cm 的側棱時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



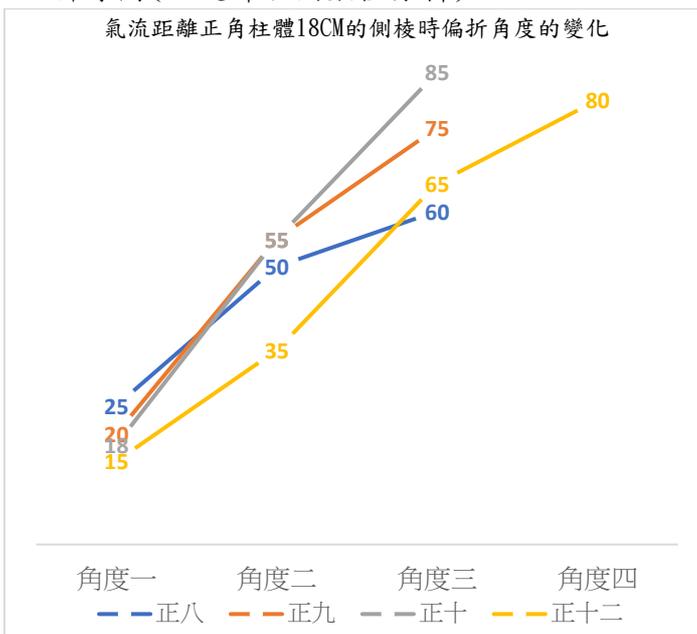
圖九 氣流距離正角柱體 6cm 的側面時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



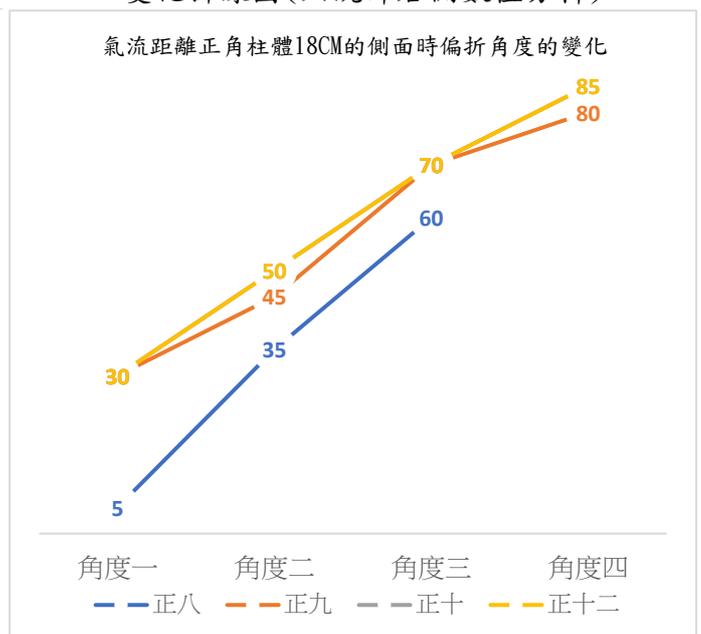
圖五 氣流距離正角柱體 9cm 的側棱時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



圖十 氣流距離正角柱體 9cm 的側面時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



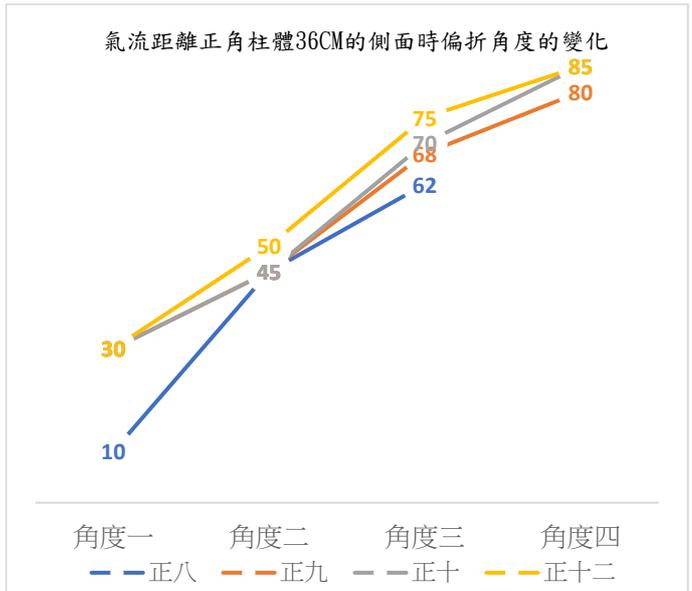
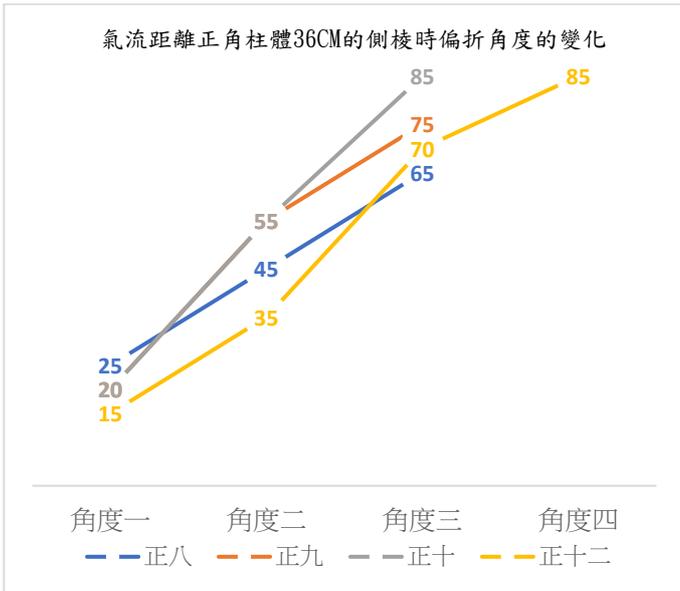
圖六 氣流距離正角柱體 18cm 的側棱時偏折角



圖十一 氣流距離正角柱體 18cm 的側面時偏折角

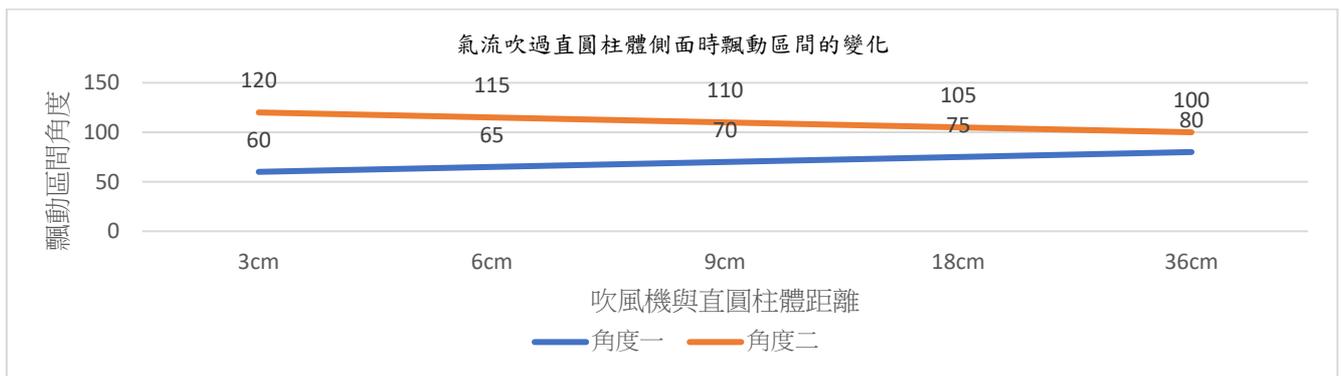
度變化折線圖(只統計右側數值分析)

度變化折線圖(只統計右側數值分析)



圖七 氣流距離正角柱體 36cm 的側棱時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)

圖十二 氣流距離正角柱體 36cm 的側面時偏折角度變化折線圖(只統計右側數值分析)



圖十三 氣流吹過直圓柱體的側面時飄動區間的變化折線圖

【問題】 氣流經過障礙物會使流蘇飄動，從正八角柱體開始就出現輪流飄動的現象。正角柱體底面的邊數愈多，氣流沿著相鄰側面流動的現象是不是會愈明顯呢？假設完全遮住正角柱體的其中半邊時，氣流運動的方向又會如何改變？於是設計以下的實驗分別對正八、正九、正十、正十二角柱體及直圓柱體再次進行實驗探究。

【實驗一~3】 探討氣流流經底面邊長 20cm 正角柱體與直圓柱體一邊時的運動情形。

《實驗步驟》

1. 量取長 88cm 高 25cm 的長板子，用來遮住正角柱體及直圓柱體的左邊。
2. 同實驗一的實驗步驟依序操作，紀錄氣流經過正八、正九、正十、正十二角柱體右邊時，流蘇飄動最強烈的角度，如表一~3。

表一~3 遮住底面邊長 20cm 的正八、九、十、十二角柱體及直圓柱體(直徑 20cm)的左邊時，其氣流運動時方向改變一覽表(單位：度)

柱體	遮住方向	距離				
		3cm	6cm	9cm	18cm	36cm
正八角柱	遮住左邊	10→30→60	12→32→65	15→35→65	15→35→65	15→40→65

正九角柱	遮住左邊	12→40→80	12→40→80	13→45→82	15→45→85	15→45→85
正十角柱	遮住左邊	10→38→72	10→38→68→78	10→38→68→78	10→40→70→80	10→40→75→85
正十二角柱	遮住左邊	8→30→65→78	8→30→68→80	8→30→68→80	8→35→68→82	8→35→70→85
直圓柱	遮住左邊	70-90	75-95	80-100	95-110	105-135

【實驗結果與討論】

一、遮住正八、正九、正十、正十二角柱體及直圓柱體的左邊時，氣流運動情形如下：

(一)從表一~3 及圖十四到圖十七中發現，從正八角柱體開始，氣流碰到障礙物的側棱時，有一部分會直接往前流動，也有一部份會順著正角柱體相鄰側面流動的現象，而這種現象在正十二角柱體時更明顯。

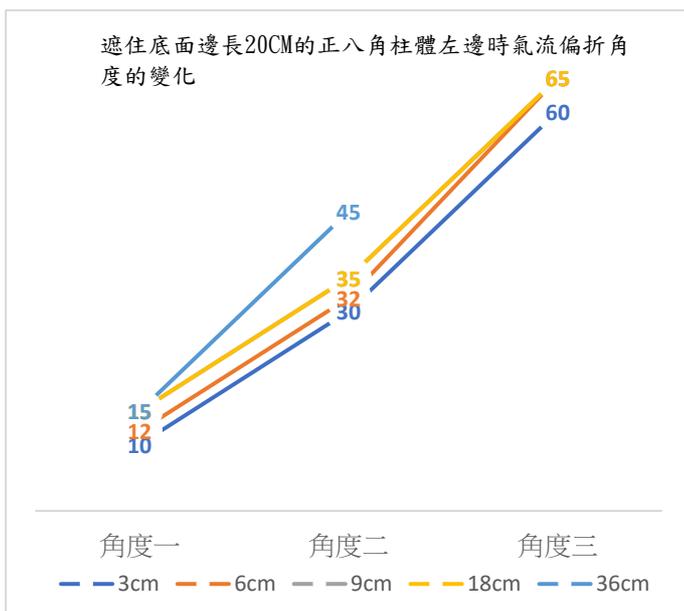
(二)從氣流偏折的軌跡發現，氣流會隨著正角柱體相鄰側面運動，而這種現象會隨著正角柱體的底面邊數愈多就愈明顯。例如：在距離 18cm 時，氣流從正八角柱體的側棱出發時，流蘇輪流飄動的角度從 15 度→35 度→65 度；而氣流從正十二角柱體的側棱出發時，流蘇輪流飄動的角度從 8 度→35 度→68 度→82 度。

二、遮住直圓柱體的左邊時，氣流運動情形如下：

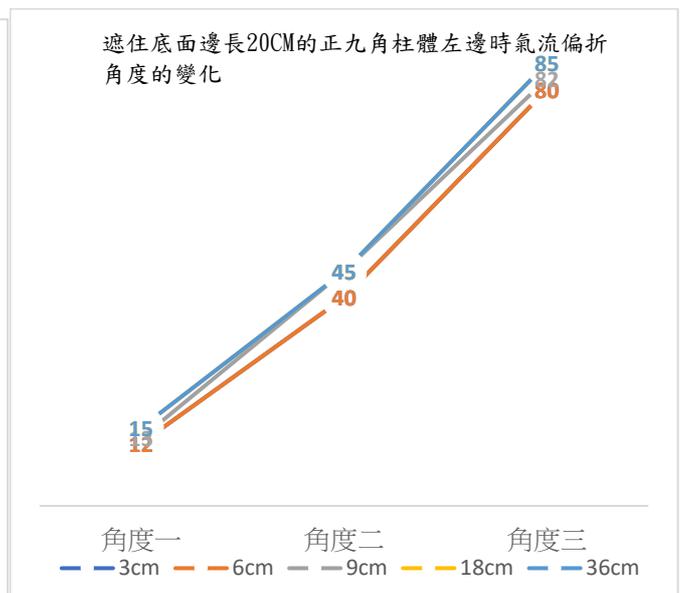
(一)從表一~3 及圖十八中發現，直圓柱體在完全遮住左邊時，氣流與直圓柱體距離 18cm-36cm，流蘇飄動的角度大於 90 度，甚至到達 135 度左右。

(二)和表一~2 的直圓柱體實驗比較，可以證明氣流沿著直圓柱體的兩側流動，當二股氣流通過障礙物後，會再度匯集成一股氣流直接往前流動。

(三)直圓柱體的側面即為曲面，可顯示附壁作用的軌跡。

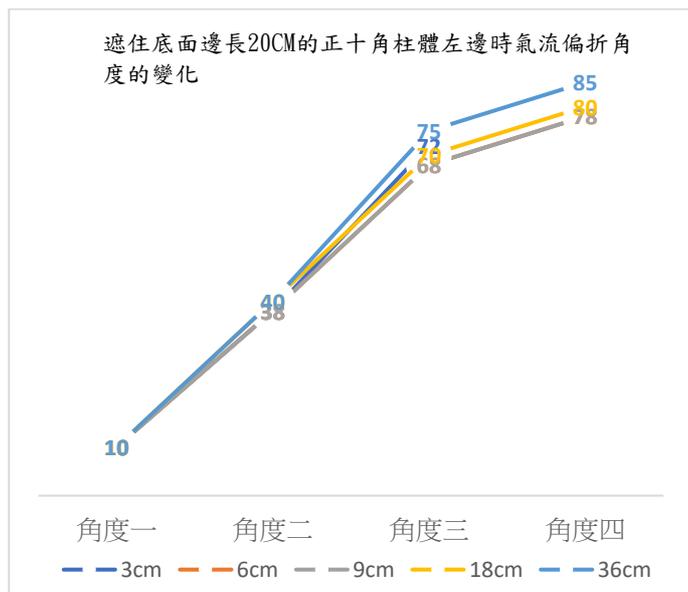


圖十四 遮住正八角柱體左邊時氣流偏折角度的

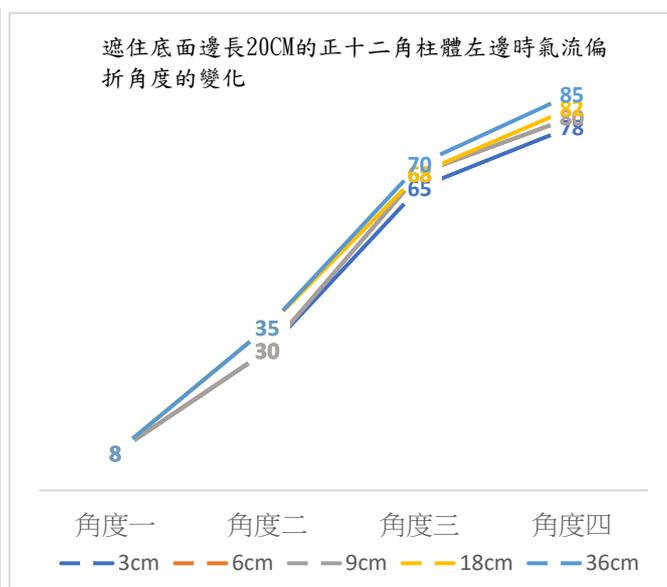


圖十五 遮住正九角柱體左邊時氣流偏折角度的變化折線圖

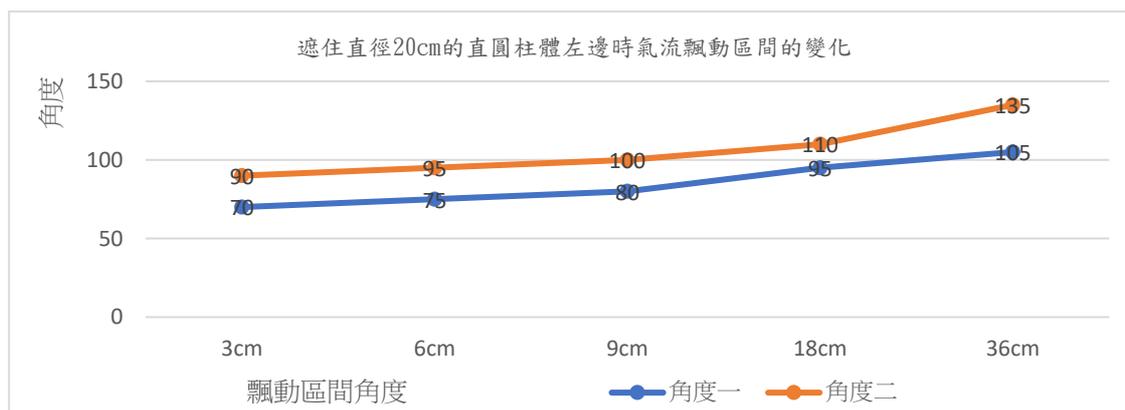
變化折線圖



圖十六 遮住正十角柱體左邊時氣流偏折角度的變化折線圖



圖十七 遮住正十二角柱體左邊時氣流偏折角度的變化折線圖



圖十八 遮住直徑 20cm 的直圓柱體左邊時氣流飄動區間的變化折線圖

【問題】

- 一、從上述的討論，我們質疑：真的有部分氣流會隨著正角柱體相鄰側面運動嗎？先假設氣流會隨著正角柱體相鄰側面運動，如果氣流經過必定會使燭火搖動，甚至吹熄，於是決定觀察燭火是否熄滅來驗證氣流會隨著正角柱體相鄰側面運動的情形。
- 二、考量前面實驗時使用底面邊長 20cm 的正十二角柱體的體積已經太過龐大，所以我們除了實驗邊長 20cm 的正十、正十二角柱體外，再製作底面邊長 10cm 的正十、正十二及正二十角柱體來做實驗探究。

【實驗一~4】氣流流經底面邊長 20cm 正十、正十二與邊長 10cm 正十、正十二及正二十角柱體及直徑 10cm 直圓柱體周圍時，蠟燭熄滅的情形。

《實驗步驟》

1. 製作底面邊長 10cm 高 25cm 的正十、正十二及正二十角柱體及直徑 10cm 的直圓柱體。

- 在正角柱體的每個相鄰側面轉折處均放置圓形蠟燭一個，直圓柱體則每隔 10 度放置一個蠟燭。
- 讓氣流分別從距離 18cm、36cm 處流經障礙物，觀察燭火變化的情形。



表一~4 氣流流經底面邊長 20cm 的正十、正十二角柱體、直徑 20cm 的直圓柱體及底面邊長 10cm 的正十、正十二、正二十角柱體、直徑 10cm 的直圓柱體周圍時，蠟燭變化情形一覽表

角柱體	邊長 / 直徑	蠟燭數	熄滅數	氣流影響燭火的情形																			
				20°		40°		55°		75°		90°		105°		125°		140°		160°			
正十角柱體	20cm	9	6	★		★		★		△		×		△		★		★		★			
正十二角柱體	20cm	11	8	★		★		★		★		△		×		△		★		★		★	
直圓柱	20cm	17	17	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	
正十角柱體	10cm	9	6	★		★		★		△		×		△		★		★		★			
正十二角柱體	10cm	11	8	★		★		★		★		△		△		△		★		★		★	
正二十角柱體	10cm	19	14	★	★	★	★	★	★	★	△	△	△	△	△	★	★	★	★	★	★	★	
直圓柱	10cm	17	17	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	

★代表『熄滅』，△代表『閃動』，×代表『不動』

Ps：距離 18cm 及 36cm 的結果相同，所以只呈現一個表格。

表一~4~1 蠟燭燃燒情形統計表

	正十 (20cm)	正十二 (20cm)	直圓柱 (20cm)	正十 (10cm)	正十二 (10cm)	正二十 (10cm)	直圓柱 (10cm)
蠟燭數	9	11	17	9	11	19	17
燭火熄滅數	6	8	17	6	8	14	17
燭火閃動數	2	2	0	2	3	5	0
閃動角度	75°、105°	75°、105°		80°、100°	80°、90°、100°	80°、85°、90°、95°、100°	
燭火未熄滅數	1	1	0	1	0	0	0
未熄滅角度	90°	90°		90°			

【實驗結果與討論】

一、從表一~4 及表一~4~1 的統計表中發現：氣流會沿著正角柱體的相鄰側面流動，而且底面

邊數愈多愈明顯。

二、發現氣流的附壁作用在正角柱體及直圓柱體側面流動的軌跡，驗證了實驗一~3 的假設。

三、依據正角柱體底面有正多邊形的特性，當底面邊數愈多，內角愈大，即外角愈小，相鄰的兩邊會愈接近弧線；當正角柱體的底面邊數為 n ，則其內角為 $(n-2) \times 180^\circ / n$ ，外角(θ)為 $180^\circ - (n-2) \times 180^\circ / n$ ，如果 n 趨近無限大時， θ 就趨近於 0，正角柱體相鄰的側面就會愈趨近於凸曲面。

四、正角柱體的底面邊數愈多，其相鄰側面就愈近似凸曲面，代表此正角柱體會愈近似直圓柱體，因此氣流沿著曲面運動，產生的附壁作用也愈來愈明顯。

五、不論直圓柱體的直徑是 10cm 或 20cm，當氣流分別從距離 18cm 及 36cm 處吹來時，周圍的蠟燭均能完全熄滅，代表氣流在直圓柱體的曲面運動時產生的附壁作用最明顯，而直圓柱體側面即是凸曲面。

【問題】 既然氣流在直圓柱體的曲面所產生的附壁作用最明顯，那麼氣流在距離不同直徑的直圓柱體流動時，又會產生怎樣的情形呢？實驗結果如表一~4~2。

【實驗一~4~1】 氣流在距離不同直徑的直圓柱體流動時，在 90° 線位置的燭火變化情形。

【實驗步驟】

1. 在氣流流向角度觀察台零刻度線放置直圓柱體，另一端 90° 線位置從貼近圓柱體開始，依序隔半徑(r)及 $2r$ 位置各放一個蠟燭。
2. 吹風機分別從距離 $r/2$ 、 r 、 $3/2r$ 、 $2r$ 位置吹向直圓柱體，觀察燭火變化情形。

表一~4~2 氣流流經不同直徑的直圓柱體所產生的附壁作用使燭火變化情形一覽表

圓柱直徑	蠟燭位置	吹風機與直圓柱體距離			
		$d=2r$	$d=3r/2$	$d=r$	$d=r/2$
		影片時間/經過時間	影片時間/經過時間	影片時間/經過時間	影片時間/經過時間
R=24	全亮	5"	4"	6"	6"
	$r=0$	21"/t=16	37"/t=33	58"/t=52	16"/t=10
	$r=12$	6"/t=1	5"/t=1	8"/t=2	7"/t=1
	$2r=24$	8"/t=3	5"/t=1	9"/t=3	12"/t=6
R=20	全亮	4"	2"	3"	0"
	$r=0$	5"/t=1	3"/t=1	10"/t=7	13"/t=13
	$r=10$	5"/t=1	3"/t=1	4"/t=1	1"/t=1
	$2r=20$	6"/t=2	6"/t=4	6"/t=3	7"/t=7
R=16	全亮	15"	40"	4"	9"
	$r=0$	16"/t=1	40"/t<1	6"/t=2	10"/t=1
	$r=8$	15"/t<1	40"/t<1	5"/t=1	9"/t<1
	$2r=16$	15"/t<1	40"/t<1	5"/t=1	9"/t<1
R=12	全亮	7"	23"	40"	6"
	$r=0$	7"/t<1	25"/t=2	41"/t=1	8"/t=2
	$r=6$	7"/t<1	24"/t=1	41"/t=1	6"/t<1
	$2r=12$	7"/t<1	24"/t=1	41"/t=1	8"/t=2

●灰色底代表最先熄滅。

【實驗結果】從表一~4~2 發現：

- 一、氣流流經不同直徑的直圓柱體時，吹風機在距離 $r/2 \sim 2r$ 的實驗中均能使 90° 線上的三個燭火熄滅，此四處均能產生附壁作用。呼應了實驗一~2 及一~3 的結果。
- 二、氣流強度相同時，當 r 較小，三個燭火熄滅的時間幾乎同時，都瞬間熄滅；但 r 較大時，前二個燭火熄滅的時間接近，第三個則需較長的時間才熄。
- 三、當氣流從二股匯集成一股時，距離 r 處的氣流最強，是最先熄滅的。換句話說，蠟燭放置地點最佳地點是距離直圓柱體的 r 處。以影片代表截圖為例，如表一~4~3

表一~4~3 以吹風機與直圓柱體距離 $d=2r$ 為例



圓柱直徑	蠟燭位置	吹風機與直圓柱體距離 $d=2r$			
		實驗開始(全亮)	最先熄滅	第二熄滅	最慢熄滅
R=24	r=12				
R=20	r=10				
R=16	r=8				
R=12	r=6				

【問題】從實驗一~3 發現，當遮住直圓柱體的左邊時，氣流沿著直圓柱體由右邊向左運動，會超過 90° 度，甚至到達 135° 左右。這讓我們又產生了疑問，氣流流經曲面時，是一直附壁在凸曲面上運動嗎？

【實驗一~5】探討氣流流經曲面時，氣流會一直附壁在凸曲面物體上運動的情形。

《實驗步驟》

1. 取直(外)徑 11.5cm 的直圓柱體的 PVC 管，以圓心角 $/360^\circ$ 來代表不同弧度曲面，製作各種不同凸曲面弧度的實驗器材。

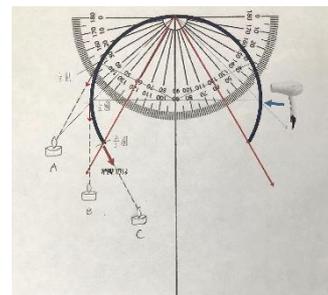


凸曲面氣流觀察器



不同凸曲面弧度實驗器材

- 將各種不同凸曲面的圓弧中心線頂點放置於實驗架上(如圖)，架子下以隔板分兩邊，一邊提供氣流通過，另一邊在圓弧的端點切線下方 5cm 處放置蠟燭，觀察氣流經過各種不同凸曲面時燭火變化情形。
- 我們將不同凸曲面弧度的 PVC 管正面投影在平面上，會呈現出不同圓心角的圓弧，以方便實驗的記錄與討論。
- 以凸曲面弧度的最高點對準平面座標的原點，重新設定座標夾角，由 0 度線向右下方依序往左移動至 180 度線，找到各端點切線位置，記錄於表格一~5 中的「端點切線位置」內。



表一~5 氣流在不同弧度的曲面所產生附壁作用情形一覽表

倍數 圓心角 蠟燭	不同弧度曲面												
	1/2 圓	1/3 圓	2/3 圓	1/4 圓	3/4 圓	1/5 圓	2/5 圓	3/5 圓	4/5 圓	1/6 圓	5/6 圓	3/8 圓	5/8 圓
	180°	120°	240°	90°	270°	72°	144°	216°	288°	60°	300°	135°	225°
右邊端 點切線 位置	45°	30°	60°	23°	67°	18°	36°	54°	72°	15°	75°	34°	56°
左邊端 點切線 位置	135°	150°	120°	157°	113°	162°	144°	126°	108°	165°	105°	146°	124°
蠟燭燃 燒情形	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★

★代表『熄滅』，△代表『閃動』，×代表『不動』



【實驗結果與討論】

- 由表一~5 發現，不論圓弧的大小，當出風口的位置放置於直徑與圓周的交點上方處時，另一側的蠟燭擺放於圓弧端點切線下的適當位置，最容易瞬間吹熄燭火。情形如下：
 - 1/2 圓的圓心角為 180°：氣流順著弧面從右側流向左側垂直向下射出，瞬間吹熄燭火。
 - 1/6 圓、1/5 圓、1/4 圓、1/3 圓、3/8 圓、2/5 圓的圓心角皆小於 180°：氣流順著弧面從右側流向左側並沿著圓弧端點切線向外射出，瞬間吹熄燭火。
 - 3/5 圓、5/8 圓、2/3 圓、3/4 圓、4/5 圓、5/6 圓的圓心角皆大於 180°：氣流順著弧面從右側流向左側並沿著圓弧端點切線向內射出，瞬間吹熄燭火。
- 從以上發現得知，氣流流經凸曲面圓弧時，會沿著凸曲面流動，到達凸曲面端點時沿切線方向射出，可以看出氣流沿著凸曲面流動的軌跡，證明氣流在凸曲面產生的附壁作用。

【問題】既然氣流會附壁在凸曲面圓弧流動，讓我們想到飛機的機翼是否也會有此現象，決定利用此器材來模擬。設計了乾冰在上圓弧面及下平面流動現象的觀察實驗來進行探究，如表一~5~1。

【實驗一~5~1】在相同風速時間的條件下，氣流吹向乾冰在上圓弧面及下平面流動的情形。

表一~5~1 在相同風速時間的條件下，氣流(乾冰)在圓弧流動所產生附壁作用一覽表

倍數 圓心角	弧度				
	1/5 圓	1/4 圓	1/3 圓	3/8 圓	2/5 圓

煙位置	72°	90°	120°	135°	144°
乾冰飄動位置圖示	 上弧度1/5圓 (72度)	 上弧度1/4圓 (90度)	 上弧度1/3圓 (120度)	 上弧度3/8圓 (135度)	 上弧度2/5圓 (144度)

《實驗步驟》

1. 我們採用弧度 $<180^\circ$ 的PVC管來模擬機翼的上圓弧。
2. 在左側端點位置放置乾冰，當氣流經過時，紀錄乾冰流動的位置。

【實驗結果與討論】

根據表一~5~1圖中乾冰的位置可以發現，在相同風速時間的條件下，同時出發通過左側上圓弧面與下平面的乾冰運動情形，上圓弧乾冰流過的距離並沒有比下平面乾冰距離遠，二者並未同時到達右側，顯示乾冰在上圓弧表面出現了附壁作用。

【問題】根據目的一的實驗結果，氣流沿著凸曲面流動時，會產生附壁作用。那麼假設將氣流吹向球體時，會使球體產生何種運動情形呢？於是設計以下實驗來進行探究。

【目的二】探討氣流吹向各種不同球體後，在球體的附壁作用。

【實驗二~1】探討相同風速的氣流垂直吹向球體，球體的運動情形。

《實驗步驟》

1. 蒐集並觀察各類球體的表面並測量直徑及重量，如表二~1。
2. 製作氣流垂直高度測量器，並固定吹風機來測量球體被氣流吹升的高度。
3. 實驗時，我們設定垂直向上的角度為0度，觀察球體的變化，如表二~1~1。

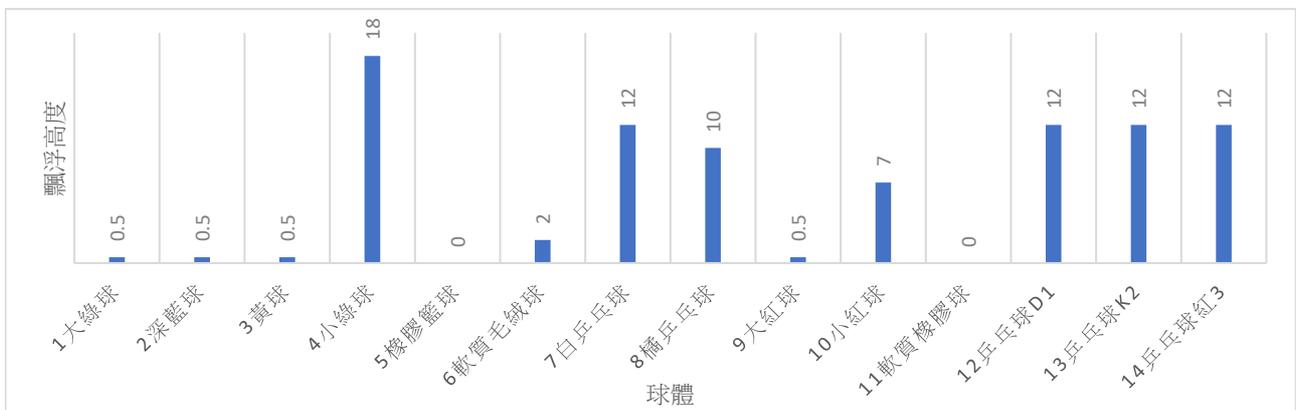
表二~1 各類球體規格一覽表

編號	品名	表面觀察	直徑 cm	重量 g
1	大綠球	綠色、塑膠、二個半球合成、光滑無紋路空心(輕壓會凹陷)	6.8	10.7
2	深藍球	深藍色、塑膠、二個半球合成、光滑有紋路空心(輕壓不會凹陷)	4.8	6.2
3	黃球	黃色、塑膠、二個半球合成、光滑無紋路空心(輕壓不會凹陷)	5.3	7.3
4	小綠球	綠色、塑膠、二個半球合成、光滑無紋路空心(輕壓不會凹陷)	3.0	1.7
5	橡膠籃球	橘色、橡膠、二個半球合成、粗糙有紋路顆粒空心(輕壓會凹陷)	5.2	15.6
6	軟質毛絨球	黃中帶有紅色、塑膠、粗糙有絨毛實心(輕壓稍微凹陷)	4.8	6.0
7	白乒乓球	白色、賽璐珞、平整無紋路空心(輕壓不會凹陷)	3.7	2.6
8	橘乒乓球	橘色、賽璐珞、平整無紋路空心(輕壓不會凹陷)	3.9	2.7
9	大紅球	紅色、塑膠、二個半球合成、粗糙(有細小顆粒)空心(輕壓不會凹陷)	5.4	8.0
10	小紅球	紅色、塑膠、二個半球合成、平整無紋路空心(輕壓不會凹陷)	3.8	3.0
11	軟質橡膠球	紅色、橡膠、二個半球合成、無紋路實心(輕壓稍微凹陷)	3.3	13.5
12	乒乓球D1	白色、新塑料、平整無紋路空心(輕壓不會凹陷)	4.0	2.4
13	乒乓球K2	白色、新塑料、平整無紋路空心(輕壓不會凹陷)	4.0	2.5
14	乒乓球R3	白色、新塑料、平整無紋路空心(輕壓不會凹陷)	4.0	2.6

表二~1~1 在氣流流向為垂直向上(0度)，球體置於出風口適當高度所產生的變化一覽表

編號	品名	飄浮高度	球體運動情形
----	----	------	--------

1	大綠球	0.5	左右搖晃
2	深藍球	0.5	左右搖晃、上下跳動
3	黃球	0.5	左右搖晃、上下跳動，會跳離出風口
4	小綠球	18	垂直旋轉、上下(距離長)飄浮(飄浮高度高)
5	橡膠籃球	0	在出風口上水平旋轉
6	軟質毛絨球	2	離出風口不遠處定點飄浮且緩慢水平旋轉
7	白乒乓球	12	上下飄浮(距離短)、垂直旋轉
8	橘乒乓球	10	上下飄浮(距離短)、緩慢垂直旋轉
9	大紅球	0.5	出風口前後左右搖晃
10	小紅球	7	定點飄浮、垂直緩慢旋轉
11	軟質橡膠球	0	稍微移動
12	乒乓球D1	12	上下飄浮(距離短)、垂直穩定旋轉
13	乒乓球K2	12	上下飄浮(距離短)、偶而垂直旋轉
14	乒乓球紅3	12	定點飄浮、垂直穩定旋轉



圖十九 在氣流流向為垂直向上（0度），球體置於出風口適當高度所產生的變化直條圖

【實驗結果與討論】

從表二~1~1 並對照表二~1 綜合分析發現：

- 一、5號及11號球重量達13g以上，表面粗糙有紋路顆粒或是實心，無法被氣流吹起。
- 二、1、2、3、9號球是能被氣流吹起0.5cm的球體，直徑介於4.8cm-6.8cm間、重量在6.2g-10.7g間，空心的塑膠材質，飄浮時大都是左右晃動或跳動。
- 三、4號球重量輕，能垂直旋轉，且飄浮高度最高，但上下飄浮距離長。
- 四、6號球是實心毛絨球，能被氣流吹起並能定點飄浮，但飄浮高度不高且緩慢水平旋轉。
- 五、7、8、10、12、13、14號球，共同特徵是直徑介於3.7cm-4.0cm間、重量在2.4g-3.0g間，較能定點飄浮，且大都在飄浮高度處原地垂直旋轉。

【問題】風速大小會不會影響球體飄浮的結果？於是設計風速不一樣的吹風機及吸塵器來做實驗探究。實驗結果如表二~2。

【實驗二~2】探討不同風速的氣流垂直吹向球體，球體飄浮的運動情形。

《實驗步驟》

1. 將四種不同風速的吹風機及一台兩用吸塵器，依平均風速及最大風速大小由左向右紀錄，按照實驗一的操作步驟逐一實驗。
2. 觀察並紀錄不同球體因氣流風速大小所產生的飄浮結果，如表二~2。

表二~2 不同氣流大小對不同球體成功飄浮結果一覽表

編號	藍白	灰紫	黑金	銀	米白
	平均風速：4.1m/s 最大風速：4.7m/s	平均風速：6.4m/s 最大風速：6.9m/s	平均風速：6.9m/s 最大風速：8.0m/s	平均風速：8.3m/s 最大風速：10.1m/s	平均風速：16.2m/s 最大風速：17.7m/s
	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度
1	0	0.5	0.5	0.5	21
2	0	0.5	0.5	0.5	23
3	0	0.5	0.5	0.5	24
4	0	7	8	18	63
5	0	0	0	0	13
6	0	2	1.5	2	40
7	0	4	5	12	44
8	0	4	4	10	41
9	0	0.5	0.5	0.5	26
10	0	3	3	7	38
11	0	0	0	0	3
12	0	4	5	12	43
13	0	4	5	12	43
14	0	5	6	12	42

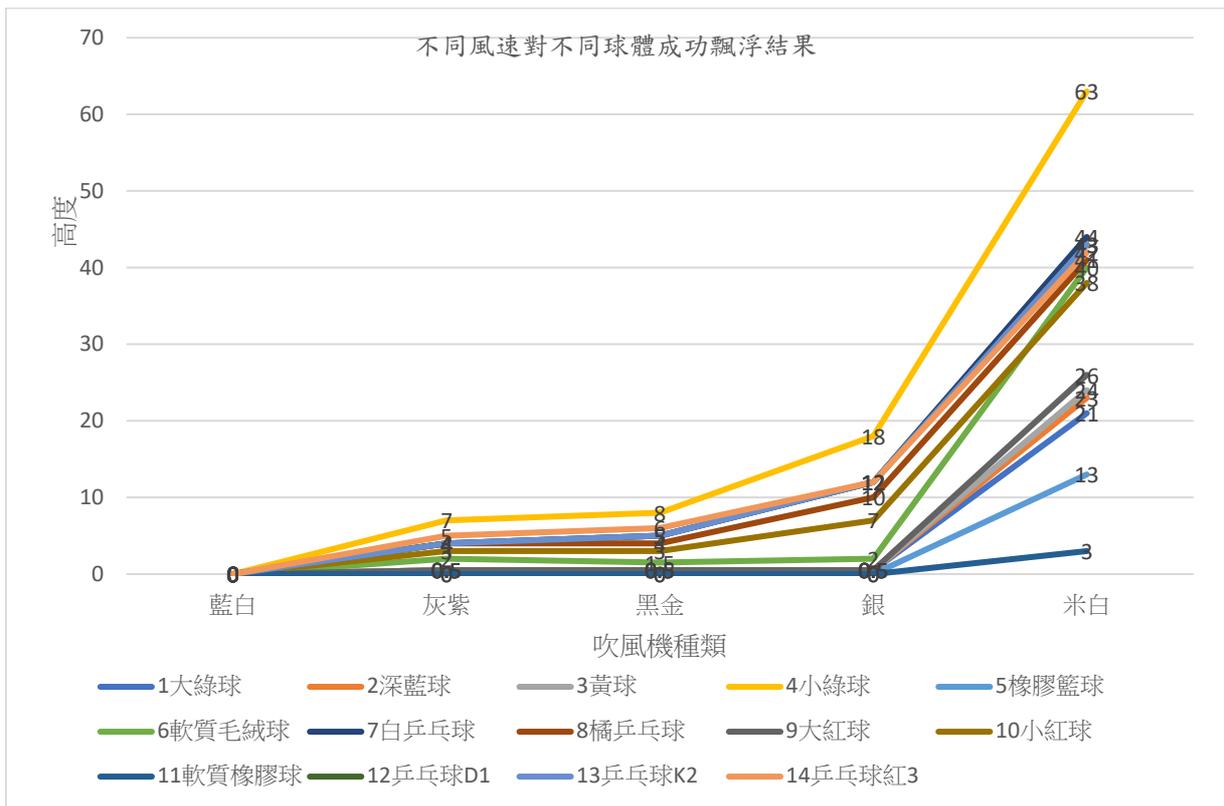
【實驗結果與討論】

一、由表二~2 及圖二十的折線圖並對照表二~1 來分析：

- (一)藍白吹風機因風速太弱，5 號及 11 號球停留出風口不動。而其他球體都只能在出風口左右移動或是繞出風口旋轉，無法飄浮。
- (二)灰紫及黑金吹風機因風速較接近，5 號及 11 號球只能在出風口左右移動或繞出風口旋轉，其餘均能飄浮 0.5 公分以上，其中 4、7、8、10、12、13 及 14 號球飄浮較明顯。
- (三)銀色吹風機風速較強，對 4、7、8、10、12、13 及 14 號球的飄浮高度有提升。
- (四)米白兩用吸塵器的風速較前四支吹風機加倍，所有球體均可飄浮，且飄浮高度都明顯增加，就連很重的 11 號球也能飄浮 3cm。

二、綜合分析討論：

- (一)球體飄浮的高度與球體直徑、重量有關。
- (二)氣流的強弱會影響球體的飄浮，且球體會產生上下飄浮的情形與氣流不穩定有關係。
- (三)有些球體雖然能夠飄浮，但飄浮高度低及產生上下跳動或是左右晃動的情形，其共同特徵是表面粗糙、球體中間有黏合縫或是有不規則紋路。
- (四)球體飄浮時產生垂直旋轉的情形，是附壁作用的現象。
- (五)實驗中表面平整的球體，直徑大小在 3.7cm-4.0cm 及重量在 1.7g-2.7g，較能穩定飄浮且飄浮高度較高及垂直旋轉，產生的附壁作用最明顯。



圖二十 不同風速對不同球體成功飄浮結果的折線圖



【問題】 從不同角度來的氣流是否也會讓這些球體因附壁作用而產生飄浮現象？於是設計氣流角度偏移的實驗。

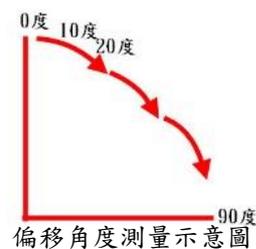
【實驗二~3】 探討氣流在球體產生的附壁作用時，角度偏移的運動情形。

《實驗步驟》

1. 使用氣流垂直高度與偏移角度測量器(如右圖)。
2. 設定垂直向上為 0° 線，向右偏移順序依序為 10° 、 20° ……，直到水平為 90° 線(如右下圖)。
3. 分別將 4、7、8、10、12、13、14 號球放置於氣流偏移角度測量器上實驗。觀察並紀錄球體的運動情形，如表二~3。



氣流垂直高度與偏移角度測量器

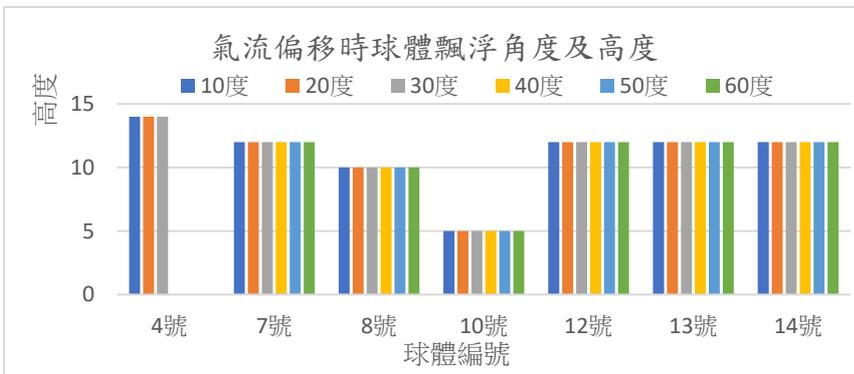




表二~3 氣流偏移時球體飄浮角度及高度一覽表

編號	球體直徑	球體重量	氣流偏移角度						備註
			10°	20°	30°	40°	50°	60°	
			飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	
4	3.0	1.7	14cm	14cm	14cm	×	×	×	超過 30° 後垂直掉落
7	3.7	2.7	12 cm	12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	超過 60° 後垂直掉落
8	3.9	3.0	10 cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	超過 60° 後垂直掉落
10	3.8	3.1	5cm	5cm	5cm	5cm	5cm	5cm	超過 60° 後垂直掉落
12	4.0	2.9	12 cm	12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	超過 60° 後垂直掉落
13	4.0	2.7	12 cm	12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	超過 60° 後垂直掉落
14	4.0	2.6	12 cm	12 cm	12cm	12cm	12cm	12 cm	超過 60° 後垂直掉落

註：定義：以垂直向上為 0°，往右偏移至水平為 90°。



圖二十一 氣流偏移時球體飄浮角度及高度情形折線圖

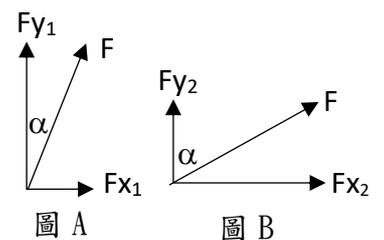
【實驗結果與討論】

- 一、不同的球在不同的風向角度時也會有因附壁作用產生飄浮現象。
- 二、4 號球最輕(1.7g)，在 0° 時飄浮最高，但能偏移的角度卻最小。
- 三、7 號、8 號、12 號、13 號、14 號球直徑與重量相近，旋轉穩定，飄浮高度與偏移角度也較一致。

四、從作用力分解圖，相同的力在不同的偏移角度(α)時，垂直分力與水平分力不同，4 號球就如同圖 A，其餘球則為圖 B。

(一)4 號球直徑最小，重量最輕，在相同風速下，能飄浮最高，但水平分力較小，故在偏移 30° 時即脫離氣流控制而垂直掉落。

(二)其他球體因其體積與重量差異不大且能穩定旋轉，相較於 4 號球而言較重，能飄浮的高度較低，但水平分力相對較大，故能有較大的偏移角度。



五、10 號球為塑膠球，雖然大小與重量均與乒乓球相似，但飄浮高度卻稍低。仔細觀察是二個半球合成的，是否因球體中間的這道接縫線，導致球體重量分布不均勻所影響，有待進一步實驗。

【問題】 重量分布不均勻是不是影響氣流附壁作用的原因？於是設計球體重量不均勻的情形來進行探究。

【實驗二~4】 探討氣流吹向重量不均勻的球體，氣流附壁作用影響球體的飄浮情形。

《實驗步驟》

一、將 4、7、8、10、12、13、14 等球用鋁箔紙包覆，仿照如同兩個半圓球所合成，製造出球體重量不均勻的情形，使通過直徑的截面圓形部分較重。

二、讓吹風機垂直(0 度)吹向球體，每個球體均嘗試 5 次，觀察並記錄成功或失敗次數及成功之垂直高度、偏移後掉落角度及高度，並質性描述球體運動情形。

表二~4~1 氣流吹向重量分布不均勻的球體，附壁作用影響球體飄浮情形一覽表

編號	重量(g)	第一次			第二次			第三次			第四次			第五次			運動情形
		成功飄浮/失敗掉落			成功飄浮/失敗掉落			成功飄浮/失敗掉落			成功飄浮/失敗掉落			成功飄浮/失敗掉落			
		垂直高度	偏移角度	掉落高度													
4	2.4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	第 5 次差一點成功。
7	3.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	13	40°	14	上下跳動 5-15cm 後跳離，第 5 次成功飄浮且垂直旋轉。
8	3.6	×	×	×	×	×	×	15	20°	15	15	45°	13	13	40°	14	成功時先上下移動，穩定時會垂直旋轉。
10	3.5	14	30°	14	15	30°	12	×	×	×	12	20°	12	12	30°	12	成功時只有飄浮沒有旋轉。
12	3.5	16	30°	17	15	30°	17	×	×	×	×	×	×	17	35°	17	成功時垂直旋轉，第 5 次先 S 形左右搖晃後垂直旋轉。
13	3.3	17	30°	17	×	×	×	15	30°	15	16	20°	15	15	25°	17	先飄浮後輕微晃動，第 5 次穩定飄浮。
14	3.4	15	25°	15	×	×	×	14	35°	14	16	45°	13	×	×	×	成功時先上下移動，穩定時會垂直旋轉。

【實驗結果與討論】

從觀察實驗過程及表二~3 和表二~4~1 及表二~4~2 發現：

- 一、包覆鋁箔紙的球體偏移角度會變小，成功飄浮時運動情形也比較不穩定。
- 二、失敗的球體運動情形都是一被氣流吹起來後就迅速跳離；即使偶爾成功也是先上下移動後才慢慢穩定，有些是飄浮、有些是左右搖晃後垂直旋轉、有些是直接垂直旋轉。
- 三、由於氣流垂直吹到包覆鋁箔紙的球體之位置狀況不太一樣，所以當氣流偏移時，發現球體有時會成功飄浮，有時一吹就瞬間掉落。我們推論是球體重量不均勻時，氣流吹到球體的位置每次都不同所導致的結果。

四、包覆鋁箔紙的球體雖然重量不均勻，但只要找到球體的適當位置，並把包覆的鋁箔紙壓平，使其部分表面仍呈現平整的曲面，仍然能使球體飄浮，甚至有些還會有垂直旋轉的現象，證明氣流的附壁作用仍然會產生。

五、因此球體重量分布是否均勻，確實會影響氣流的附壁作用現象。



包鋁箔球體偏折實驗



包鋁箔球體偏折實驗



包鋁箔球體偏折實驗



包鋁箔球體偏折實驗

【問題】 氣流在表面平整的凸曲面上運動時的附壁作用最明顯，那在有縫隙的凸曲面表面運動時又會如何？於是製作側面有縫隙的圓柱體來進行實驗探究。

【目的三】 探討氣流對側面有縫隙的圓柱體曲面之附壁作用現象。

【實驗三~1】 探討氣流的附壁作用在側面有縫隙的直圓柱體曲面之運動情形。

《實驗步驟》

1. 用特厚紙板(450P)製作側面有縫隙的直圓柱體實驗器材。
2. 縫隙間の間隔寬度(本研究統稱為葉片)，葉片組合有 12 條且長度為 13cm，並能圍成直圓柱體，分別為 2.0cm×13cm、1.7cm×13cm、1.2cm×13cm、0.9cm×13cm 及 0.6cm×13cm。
3. 葉片間所形成的縫隙空間，用尺測量小於 0.1cm。
4. 吹風機出風口加裝適合直圓柱體的進風口，來覆蓋住底面的一端，另一端底面則封住，形成封閉的空間。
5. 用細皺紋紙條(長度 55cm)放在實驗器材的葉片縫隙處的側面上方垂下，以觀察氣流經過縫隙後的運動情形。



表三~1 氣流的附壁作用在側面有縫隙的直圓柱體曲面運動情形一覽表

氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)					實驗是否成功產生附壁作用
	2.0×13	1.7×13	1.2×13	0.9×13	0.6×13	
直接被吹開	✓	✓	✓	✓	✓	否
表面吸附						
有環繞現象						
一直環繞						

【實驗結果與討論】

經過反覆操作及觀察，從表三~1 發現，氣流在側面有縫隙的直圓柱體曲面運動時，幾乎都是在葉片中間的縫隙直接將細皺紋紙吹開，沒有產生氣流附壁作用的現象。

【問題】 既然側面有縫隙的直圓柱體曲面沒有氣流附壁作用現象產生。假設改為有斜度葉片的圓柱體，是否就能產生附壁作用？於是製作有斜度葉片的圓柱體來進行實驗探究。



【實驗三~2】探討氣流的附壁作用在有斜度葉片的圓柱體曲面之運動情形。

《實驗步驟》

1. 改善實驗器材，用特厚紙板製作有斜度葉片的圓柱體曲面(稱為原型)，葉片與圓柱體高的夾角(本研究統稱為葉片斜度)分別為 5° 及 10° 。
2. 同實驗三~1 的步驟，觀察實驗並記錄。

表三~2 氣流的附壁作用在有斜度葉片的原型圓柱體曲面運動情形一覽表

葉片斜度	氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)					實驗是否成功產生附壁作用
		2.0×13	1.7×13	1.2×13	0.9×13	0.6×13	
5°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附	✓		✓	✓		稍微
	有環繞現象		✓				是
	一直環繞						
10°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附	✓	✓	✓	✓		稍微
	有環繞現象						
	一直環繞						

【實驗結果與討論】

從表三~2 中發現：

- 一、葉片斜度 5° ：細皺紋紙在葉片寬度 1.7cm 時出現了環繞現象；而在 2.0cm、1.2cm 及 0.9cm 時，則順著風向被吸附在表面上。顯示有產生附壁作用。
- 二、葉片斜度 10° ：細皺紋紙在葉片寬度 2.0cm、1.7cm、1.2cm 及 0.9cm 均順著風向被吸附在表面上。顯示有產生附壁作用。
- 三、葉片斜度 5° 、 10° 時，細皺紋紙在葉片寬度 0.6cm 都是直接被吹開，沒有產生附壁作用。

【問題】實驗過程中發現氣流經過圓柱體時，能把細皺紋紙吸附於表面或環繞的位置大都是在圓柱體的其中一端；而中間的葉片會膨脹，造成縫隙變大。這讓我們懷疑是葉片長度太短或是縫隙太大的影響，所以決定依序解決問題。首先我們先將葉片長度拉長至 18cm，看看是否有關？實驗結果如表三~2~1。

【實驗三~2~1】探討氣流的附壁作用在有斜度葉片加長型的圓柱體曲面之運動情形。

表三~2~1 氣流的附壁作用在有斜度葉片的加長型圓柱體曲面運動情形一覽表

葉片斜度	氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)					實驗是否成功產生附壁作用
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	0.6×18	
5°	直接被吹開				✓	✓	否
	表面吸附	✓	✓	✓			稍微
	有環繞現象						
	一直環繞						
10°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附			✓	✓		稍微

	有環繞現象	✓	✓				是
	一直環繞						

【實驗結果與討論】

從表三~2~1 與表三~2 比較發現：

- 一、葉片斜度 5°：在葉片寬度 0.9cm 反而出現直接被吹開的現象，沒有產生附壁作用。
- 二、葉片斜度 10°：在葉片寬度 2.0cm 和 1.7cm 卻出現了環繞現象，有產生附壁作用。

【綜合統計】統計表三~1、表三~2、表三~2~1 如下：

表三~2~2 氣流的附壁作用在有縫隙的圓柱體曲面運動情形統計表

葉片斜度	圓柱體曲面	葉片寬度×葉片長度(單位公分)				
		2.0×13/ 2.0×18	1.7×13/ 1.7×18	1.2×13/ 1.2×18	0.9×13/ 0.9×18	0.6×13/ 0.6×18
0°	直圓柱體曲面	×	×	×	×	×
5°	原型曲面	△	✓	△	△	×
	加長型曲面	△	△	△	×	×
10°	原型曲面	△	△	△	△	×
	加長型曲面	✓	✓	△	△	×

「×」直接被吹開、「△」表面吸附、「✓」有環繞現象、「★」一直環繞

【發現】

- 一、當葉片長度變長時，對寬度較大的葉片影響不大，但卻使寬度較小(0.9cm)的葉片中間膨脹更明顯，縫隙也明顯變大。
- 二、在實驗過程中發現 18cm 長較有利於實驗操作，所以繼續採用加長型圓柱體來做實驗。

【問題】接著探討縫隙變大是不是影響因素，於是試著將加長型圓柱體稍微扭轉來繼續實驗探究，如表三~2~3。

【實驗三~2~2】探討氣流的附壁作用在有斜度葉片扭轉型的圓柱體曲面之運動情形。

表三~2~3 氣流的附壁作用在有斜度葉片的扭轉型圓柱體曲面下運動情形一覽表

葉片斜度	氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)					實驗是否成功產生附壁作用
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	0.6×18	
5°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附						
	有環繞現象	✓	✓	✓	✓		是
	一直環繞						
10°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附						
	有環繞現象	✓	✓	✓	✓		是
	一直環繞						

【實驗結果與討論】

從表三~2~3 的實驗過程中發現，將加長型圓柱體稍微扭轉竟能讓縫隙變平均且更小。

葉片斜度 5° 及 10° ，葉片寬度在 2.0cm、1.7cm、1.2cm 及 0.9cm，細皺紋紙都能順著風向在圓柱體的曲面產生環繞現象，有產生附壁作用。但在 0.6cm 的仍然直接被吹開。

【綜合發現】

- 一、氣流經過圓柱體時會使中間葉片膨脹，造成縫隙變大；但兩端的縫隙卻變小，能讓細皺紋紙有環繞現象或一直環繞的位置是接近圓柱體的兩端。
- 二、反覆將實驗器材稍微扭轉，使葉片有相互重疊的現象，可以讓縫隙變得較為平均。發現：
 - (一)在葉片稍微重疊、縫隙大小平均時，造成氣流的環繞現象會更明顯。
 - (二)但 0.6cm 的葉片寬度太小，稍微扭轉就使中間葉片重疊在一起，無法構成曲面且縫隙大小也不平均，因而使細皺紋紙直接被吹開。
 - (三)當圓柱體扭轉變形時，其形狀類似沙漏型。

【問題】從上面發現，決定製作類似沙漏型的圓柱體，觀察其曲面是否能出現氣流附壁作用。

【實驗三~3】探討氣流的附壁作用在有斜度葉片的沙漏型圓柱體曲面之運動情形。

《實驗步驟》

1. 改良實驗器材，以合適的橡皮筋圈住圓柱體中間，讓圓柱體變成沙漏型，此時葉片稍微相互重疊，且縫隙小於 0.1cm。
2. 按照實驗三~2 的步驟，觀察實驗並記錄。



表三~3 氣流的附壁作用在葉片斜度 5° 、 10° 的沙漏型圓柱體曲面運動情形一覽表

葉片斜度	氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)					實驗是否成功產生附壁作用
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	0.6×18	
5°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附						
	有環繞現象						
	一直環繞	✓	✓	✓	✓		是
10°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附						
	有環繞現象						
	一直環繞	✓	✓	✓	✓		是



葉片 0.9cm 斜 5°



葉片 0.9cm 斜 5°



葉片 1.2cm 斜 5°



葉片 1.2cm 斜 10°



葉片 1.7cm 斜 5°



葉片 1.7cm 斜 10°



葉片 2.0cm 斜 5°



葉片 2.0cm 斜 10°

【實驗結果與討論】

- 一、從表三~3 發現，在沙漏型圓柱體中，葉片斜度 5° 及 10° ，葉片寬度 2.0cm、1.7cm、1.2cm、0.9cm，細皺紋紙都能順著風向一直環繞在圓柱體中間的曲面上，明顯產生附壁作用。
- 二、仔細觀察，氣流進入沙漏型圓柱體後，雖然葉片也會稍微膨脹，但中間因有橡皮筋的束縛，葉片一樣會稍微相互重疊，縫隙同樣可變小且平均。
- 三、氣流進入葉片稍微相互重疊且縫隙微小的沙漏型圓柱體後，再沿著縫隙從柱體內部流出，此時葉片構造對氣流而言如同一個螺旋狀的凸曲面，細皺紋紙便容易被吸附，甚至能一直環繞。產生附壁作用的現象明顯。

【發現】

- 一、用特厚紙板製作的實驗器材經過多次實驗後，會有軟化變形的情形不利於多次實驗觀察。
- 二、用 0.6cm 葉片寬度所製作的圓柱體太小，綁上橡皮筋後反而使葉片扭在一起，造成氣流被橡皮筋擋住，不適合作為實驗器材，故淘汰。

【問題】如何改良紙板軟化的問題，製作合適的實驗器材？於是決定再找尋材料，改變材質後再次進行實驗探究。

【實驗三~4】探討改變材質，讓氣流附壁作用在有斜度葉片的沙漏型圓柱體曲面運動情形。

《實驗步驟》

1. 使用馬糞紙(750P)製作實驗器材，此次實驗再增加葉片斜度 15° 。
2. 製作完成的實驗器材，外形如同燈籠形狀，中間會膨脹、葉片會稍微扭轉。以合適的橡皮筋圍住燈籠形圓柱體的葉片中間，此時圓柱體的中間較細，二側較寬，外形又如同沙漏型。葉片間形成如螺旋形的凸曲面，且葉片間能相互重疊、縫隙微小平均；測量後，葉片重疊範圍約為 0.2cm、縫隙小於 0.1cm。
3. 同實驗三~2 的步驟，觀察實驗並記錄。



表三~4 改變材質，讓氣流的附壁作用在有斜度葉片的沙漏型圓柱體曲面運動情形一覽表

葉片斜度	氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)				實驗是否成功產生附壁作用
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	
5°	直接被吹開					
	表面吸附					
	有環繞現象				✓	是
	一直環繞	✓	✓	✓		是
10°	直接被吹開				✓	否
	表面吸附					
	有環繞現象					
	一直環繞	✓	✓	✓		是
15°	直接吹開				✓	否
	表面吸附					
	有環繞現象					
	一直環繞	✓	✓	✓		是



葉片 1.2cm 斜 5°



葉片 1.2cm 斜 10°



葉片 1.2cm 斜 15°



葉片 1.7cm 斜 5°



葉片 1.7cm 斜 10°



葉片 1.7cm 斜 15°



葉片 2.0cm 斜 5°



葉片 2.0cm 斜 10°



葉片 2.0cm 斜 15°

【實驗結果與討論】

- 一、從表三~4 可以得知：葉片斜度 5°、10° 及 15°，葉片寬度 2.0cm、1.7cm、1.2cm，細皺紋紙都能順著風向立即一直環繞在中間的曲面上，產生附壁作用的現象明顯。但 0.9cm 的葉片寬度卻只在葉片斜度 5° 的情形產生環繞現象。
- 二、氣流在葉片形成螺旋狀且相互重疊約 0.2cm、縫隙微小且平均的曲面能一直產生環繞現象，產生附壁作用的效果較明顯。

表三~4-1 氣流的附壁作用在有斜度葉片的圓柱體曲面運動情形統計表

葉片斜度	圓柱體曲面	葉片寬度×葉片長度(單位公分)				
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	0.6×18
5°	加長型	△	△	△	×	×
	扭轉型	✓	✓	✓	✓	×
	沙漏型	★	★	★	★	×
	改變材質沙漏型	★	★	★	✓	/
10°	加長型	✓	✓	△	△	×
	扭轉型	✓	✓	✓	✓	×
	沙漏型	★	★	★	★	×
	改變材質沙漏型	★	★	★	×	/
15°	改變材質沙漏型	★	★	★	×	/
是否成功產生附壁作用		是	是	是		否

「×」直接被吹開、「△」表面吸附、「✓」有環繞現象、「★」一直環繞

【綜合發現】

- 一、從統計表三~4-1 發現，葉片有斜度、葉片寬度 2.0cm、1.7cm、1.2cm，氣流於沙漏型圓柱體曲面一直產生環繞的現象最好，產生附壁作用現象最明顯。
- 二、綜合本實驗結果，讓氣流於凸曲面產生一直環繞現象的條件有：
 - (一)葉片要有斜度、葉片能形成螺旋形的凸曲面且葉片寬度為 2.0cm、1.7cm、1.2cm 最佳。
 - (二)葉片間能稍微重疊約 0.2cm 左右，葉片間縫隙微小(小於 0.1cm)且縫隙大小要平均。
- 三、用馬糞紙雖然硬度比特厚紙板好，但實驗久了還是會膨脹，且會被橡皮筋塑形，所以仍然不是理想的材料。我們曾想到用 PVC 管，但要把 PVC 管變成螺旋形真不容易，也曾想過寶特瓶塑料……等等，此時心中閃過 3D 列印機，似乎可以嘗試看看。
- 四、將氣流附壁作用於凸曲面產生一直環繞的現象，運用於日常生活的科技產品上，使生活更便利，這是我們下一個研究目標。

陸、結論

一、吹風機與正角柱體或直圓柱體的距離過近或太遠時，氣流的附壁作用較不明顯；兩者之間的適當距離，視正角柱體或直圓柱體的大小而定；依實驗得知，其距離在 18cm-36cm 間，氣流附壁作用較明顯。

(一) 氣流流經正角柱體，在適當條件下也能顯現附壁作用的現象。

1. 氣流經過正角柱體時，偏折的角度與正角柱體底面外角有關，而第一次偏折的角度約為正角柱體底面外角的一半。
2. 正角柱體底面是正多邊形，當底面的邊數愈多，內角愈大，外角愈小，相鄰的兩邊會愈接近弧線，正角柱體相鄰的側面就會愈趨近於凸曲面。
3. 氣流經過正角柱體時，會沿著正角柱體的側面流動，而且底面邊數愈多愈明顯。這是氣流附壁作用在正角柱體側面流動的軌跡。

(二) 氣流在直圓柱體的凸曲面運動時產生的附壁作用最明顯。

1. 氣流流經不同直徑的直圓柱體時，吹風機在距離 $r/2 \sim 2r$ 的實驗中均能使 90° 線上的三個燭火熄滅，此四處均能產生附壁作用。但燭火放置於 r 處的效果最佳。
2. 氣流流經凸曲面圓弧時，會沿著凸曲面流動，顯現附壁作用的現象。

二、氣流經過球體能夠產生附壁作用。

(一) 氣流產生的作用力必須大於球體的重量，球體材質重量分布愈均勻，垂直飄浮旋轉也會愈穩定。

(二) 本研究中，直徑大小約在 3.0cm-4.0cm 及重量約在 1.7g-3.0g 左右，表面平整、重量分布平均的球體，較能穩定飄浮並垂直旋轉，產生附壁作用最明顯。

(三) 氣流能在偏移的球體產生附壁作用。本研究中在相同風速下，直徑(3.7cm~4cm)、重量(2.5g~3.0g)與重量分布均勻的球體能偏移的角度較大。

三、氣流也能對側面有縫隙的圓柱體曲面產生附壁作用。

(一) 當有斜度葉片形成螺旋狀並相互重疊且葉片間縫隙微小平均，其所組成的沙漏型圓柱體凸曲面上，氣流的附壁作用會一直產生環繞現象。

(二) 本研究中，讓氣流附壁作用於凸曲面產生環繞現象的條件有：

1. 葉片要有斜度、葉片能形成螺旋形的凸曲面，且葉片寬度為 2.0cm、1.7cm、1.2cm 最佳。
2. 葉片間能稍微重疊約 0.2cm 左右，葉片間縫隙微小(小於 0.1cm)且縫隙大小要平均。

四、若能將氣流附壁作用在有斜度葉片的圓柱體曲面上形成一直環繞的現象運用於日常生活中，應該能設計出便利於生活的科技產品，我們也將此列為日後延續性的研究題材。

柒、參考資料

氣流(2021)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%94%E6%B5%81>

小球飄浮(2021)。國立中央大學科學教育中心。取自

<http://phy.tw/%E7%A7%91%E5%AD%B8%E5%AF%A6%E9%A9%97/item/145-2016-07-12-04-26-24>

氣球的舞動(2021)。NTCU-科學遊戲實驗室。取自

<http://scigame.ntcu.edu.tw/balloon/balloon-004.html>

黃姩(2020年8月20日)。流體力學中伯努利定律把仰角調整到 90° 可以讓飛機豎著飛嗎。

每日頭條。取自 <https://kknews.cc/zh-tw/n/445gylx.html>

【培訓機師冷知識 - 白努力定律，你確定？】(2019年12月4日)。FTTW 培訓機師。取自

<https://www.fttw.com.tw/news/html/?272.html>

高中物理教材內容討論:白努力定律與康達效應(2017年6月6日)。國立台灣師範大學物理系 物理教學示範實驗教室(舊網站) 物理問題討論區。取自

<https://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=27868>

張慧貞(2016年5月5日)。白努力定理的誤解與錯誤應用。物理雙月刊。取自

https://pb.ps-taiwan.org/catalog/ins.php?index_m1_id=3&index_id=192

康達效應(2021)。中文百科知識。取自

<https://www.easyatm.com.tw/wiki/%E5%BA%B7%E9%81%94%E6%95%88%E6%87%89>

柱體(2021)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh-yue.wikipedia.org/wiki/%E6%9F%B1%E9%AB%94>

角柱體(2021)。維基百科，自由的百科全書。取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%A3%B1%E6%9F%B1>

圓柱_百度百科(2021)。百度百科。取自

<https://baike.baidu.hk/item/%E5%9C%93%E6%9F%B1/8193982>

圓柱(2021)。求真百科。取自

<https://factpedia.org/index.php?title=%E5%9C%86%E6%9F%B1&variant=zh-hant>

【評語】 080102

本作品探討各種尺寸之正角柱體與直圓柱體氣流的運動軌跡。自製器材並觀察流蘇最先飄動的角度及飄動的區間角度探究氣流附壁作用。雖然進行變因控制但是流體不容易控制，造成實驗上不確定度。此類的探究活動以及科展作品已經相當的多，相較於其他作品，原創性以及嚴謹性都有改進的空間。

作品簡報

風到哪裡去了-氣流附壁作用之探討

國小組 物理科

風到哪裡去了-氣流附壁作用之探討

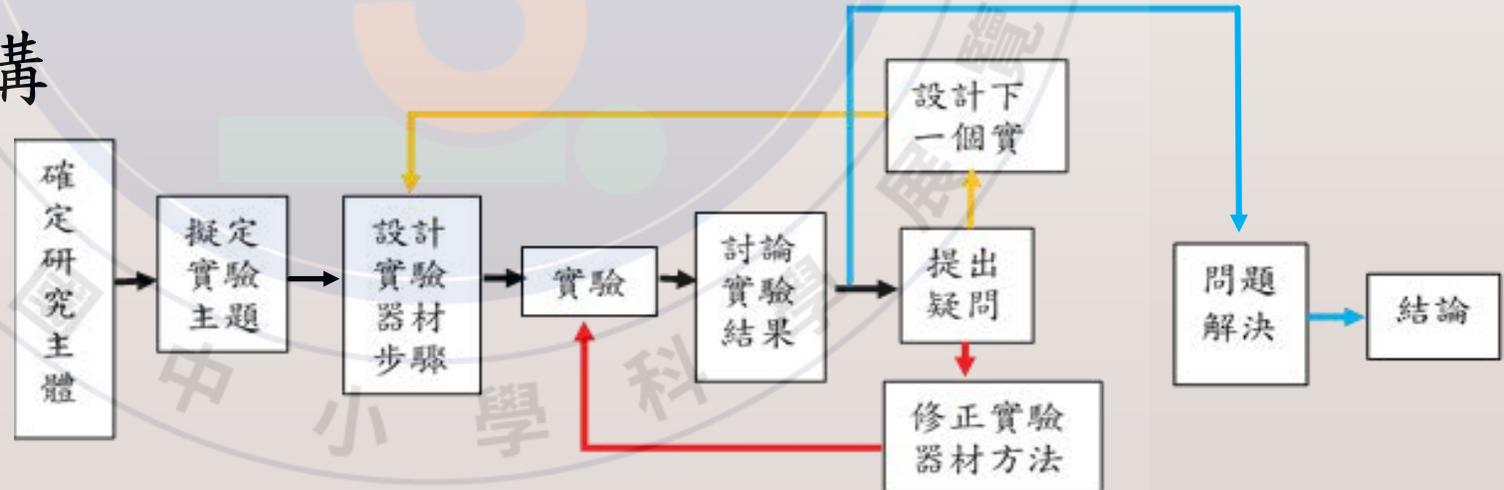
壹、前言

「康達效應」又稱為「附壁作用」，是指流體遇到障礙物（例如氣球），流體會沿著障礙物曲面流動的現象，並產生推往流體方向的作用力（氣球的舞動，2021）。於是決定研究目的就是探討氣流附壁作用。

參、研究目的

- 一、探討氣流流經正角柱體及直圓柱體後，氣流的運動軌跡。
- 二、探討氣流吹向各種不同球體後，在球體的附壁作用。
- 三、探討氣流對側面有縫隙的圓柱體曲面之附壁作用現象。

貳、研究架構



肆、研究結果與討論

【目的一】 探討氣流流經正角柱體及直圓柱體後，氣流的運動軌跡。

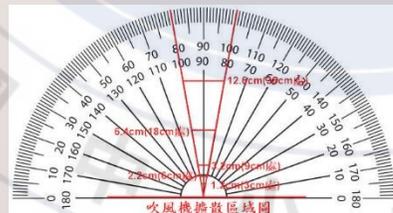
一、氣流流經正三、正四、正五、正六角柱體偏折角度的變化情形。

(一) 氣流會分為兩股使兩側的流蘇飄動，飄動的角度是對稱的。

(二) 氣流沿著正角柱體右邊側面直線運動，角度剛好或接近正角柱體底面外角的一半。以正三角柱體為例是 60° 。

(三) 當底面邊長夠長時(20cm)，則氣流擴散情形不明顯，並未產生氣流附壁作用。

(四) 當氣流與正五、正六角柱體距離較遠時(18cm-36cm)，已出現氣流擴散情形。以正六角柱體為例。



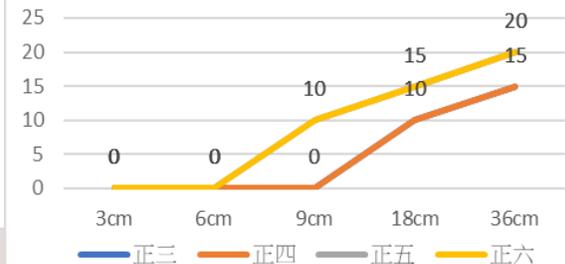
氣流擴散示意圖

距離 飄動角度 柱體 面向		3cm	6cm	9cm	18cm	36cm
正三角柱	側棱	60	60	60	60	60
	側面	120	120	120	120	120
正四角柱	側棱	45	45	45	45	45
	側面	180	180	180	170	165
正五角柱	側棱	35	35	35	35-45	35-45
	側面	180	180	170	165	160
正六角柱	側棱	30	30	30	20-45	25-50
	側面	180	180	170	15	20

氣流流經正三、正四、正五、正六角柱體的側棱時偏折角度變化



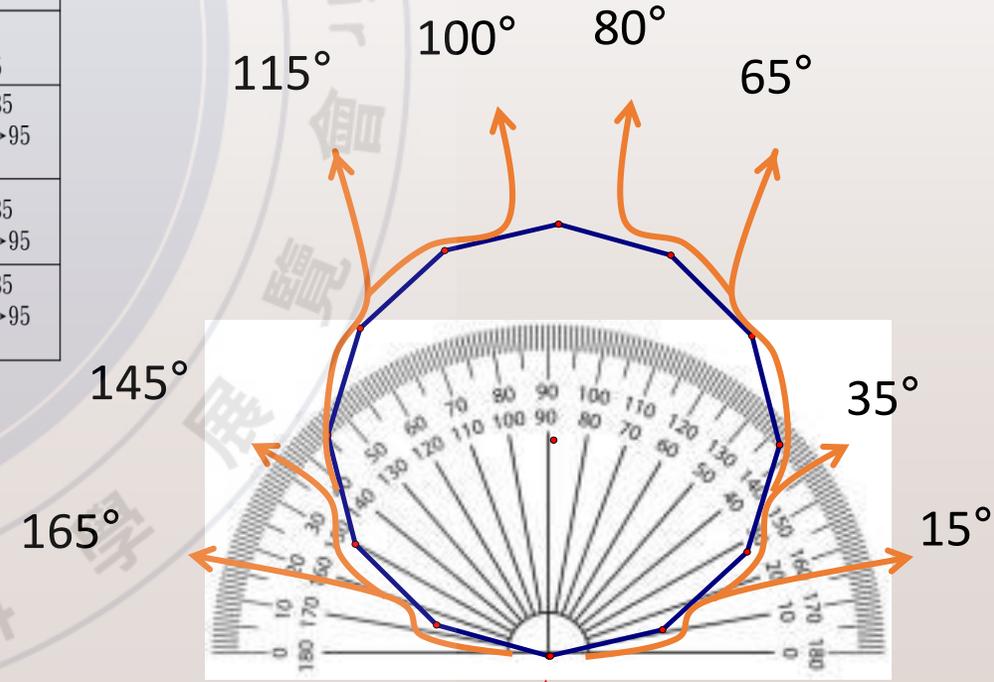
氣流流經正三、正四、正五、正六角柱體的側面時偏折角度變化



二、氣流經過正八、正九、正十、正十二角柱體的偏折角度的變化情形。

距離 飄動角度 柱體 面向		3cm	6cm	9cm	18cm	36cm
正八角柱	側棱	23→50→60 157→130→120	23→50→60 157→130→120	23→50→60 157→130→120	25→50→60 155→130→120	25→45→65 155→135→115
	側面	0 180	5 175	5→35 175→145	5→35→60 175→145→120	10→45→62 170→135→118
正九角柱	側棱	18→45→70 162→135→110	18→45→70 162→135→110	18→50→70 162→130→110	20→55→75 160→125→105	20→55→75 160→125→105
	側面	25→45 155→135 (微動)	25→45→65 155→135→115 (微動)	30→45→65 150→135→115 (微動)	30→45→70→80 150→135→110→100 (微動)	30→45→68→80 150→135→112→100 (微動)
正十角柱	側棱	15→45→70 165→135→110	15→45→75 165→135→105	15→45→80 165→135→100	18→55→85 162→125→95	20→55→85 160→125→95
	側面	25→50→65 155→130→115 (微動)	25→50→70 155→130→110 (微動)	30→50→70 150→130→110 (微動)	30→50→70→85 150→130→110→95 (微動)	30→50→70→85 150→130→110→95 (微動)
正十二角柱	側棱	10→30→60→75 170→150→120→105	10→30→70→75 170→150→110→105	10→30→70→80 170→150→110→100	15→35→65→80 165→145→115→100	15→35→70→85 165→145→110→95
	側面	30→50→65 150→130→115 (微動)	30→50→70 150→130→110 (微動)	30→50→70 150→130→110 (微動)	30→50→70 150→130→110→95 (微動)	30→50→75→85 150→130→105→95 (微動)

- (一) 氣流會分為兩股，使兩側的流蘇飄動，飄動的角度是對稱的。
- (二) 流蘇均有輪流飄動的現象。
- (三) 氣流有沿著正角柱體側面偏折的軌跡，以正十二角柱體為例（如下圖）。
- (四) 氣流與正角柱體距離逐漸拉遠，偏折角度會些微改變。此變化跟正角柱體底面外角的角度有關。



正十二角柱體氣流輪流飄動示意圖

(五) 流蘇出現輪流飄動的現象，也是氣流沿著相鄰側面流動的軌跡，這正是氣流附壁作用的現象。

我們經由在正角柱體周圍放置蠟燭來觀察燭火熄滅的情形來驗證

因此接著探討氣流在距離不同直徑的直圓柱體流動時，在90°線位置的燭火變化情形。



圓柱直徑	蠟燭位置	吹風機與直圓柱體距離 $d=2r$			
		實驗開始(全亮)	最先熄滅	第二熄滅	最慢熄滅
R=24	r=12				
R=20	r=10				
R=16	r=8				
R=12	r=6				

當氣流從二股匯集成一股時，三處的燭火都能先後被吹熄，而距離 r_2 處的氣流最強，是最先熄滅的。

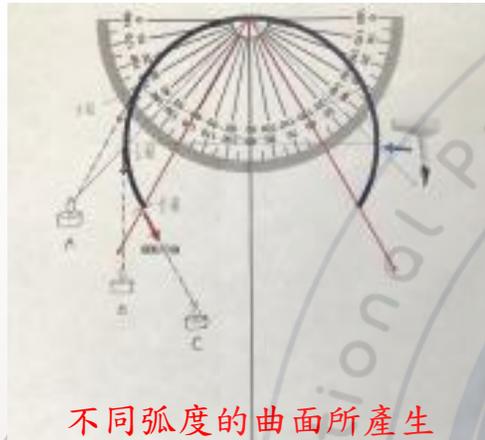
圓柱直徑	蠟燭位置	吹風機與直圓柱體距離			
		$d=2r$	$d=3r/2$	$d=r$	$d=r/2$
		影片時間/經過時間	影片時間/經過時間	影片時間/經過時間	影片時間/經過時間
R=24	全亮	5"	4"	6"	6"
	$r_1=0$	21"/t=16	37"/t=33	58"/t=52	16"/t=10
	$r_2=12$	6"/t=1	5"/t=1	8"/t=2	7"/t=1
	$r_3=24$	8"/t=3	5"/t=1	9"/t=3	12"/t=6
R=20	全亮	4"	2"	3"	0"
	$r_1=0$	5"/t=1	3"/t=1	10"/t=7	13"/t=13
	$r_2=10$	5"/t=1	3"/t=1	4"/t=1	1"/t=1
	$r_3=20$	6"/t=2	6"/t=4	6"/t=3	7"/t=7
R=16	全亮	15"	40"	4"	9"
	$r_1=0$	16"/t=1	40"/t<1	6"/t=2	10"/t=1
	$r_2=8$	15"/t<1	40"/t<1	5"/t=1	9"/t<1
	$r_3=16$	15"/t<1	40"/t<1	5"/t=1	9"/t<1
R=12	全亮	7"	23"	40"	6"
	$r_1=0$	7"/t<1	25"/t=2	41"/t=1	8"/t=2
	$r_2=6$	7"/t<1	24"/t=1	41"/t=1	6"/t<1
	$r_3=12$	7"/t<1	24"/t=1	41"/t=1	8"/t=2

驗證：蠟燭放置地點最佳地點是距離直圓柱體的 r_2 (半徑)處。

探討氣流會一直附壁在凸曲面物體上運動嗎？



探討氣流在不同弧度的曲面所產生附壁作用情形



不同弧度的曲面所產生附壁作用示意圖

倍數	不同弧度曲面												
	1/2圓	1/3圓	2/3圓	1/4圓	3/4圓	1/5圓	2/5圓	3/5圓	4/5圓	1/6圓	5/6圓	3/8圓	5/8圓
圓心角	180°	120°	240°	90°	270°	72°	144°	216°	288°	60°	300°	135°	225°
蠟燭	180°	120°	240°	90°	270°	72°	144°	216°	288°	60°	300°	135°	225°
左邊端點切線位置	135°	150°	120°	157°	113°	162°	144°	126°	108°	165°	105°	146°	124°
蠟燭燃燒情形	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅	熄滅

☞ 用凸曲面圓弧進行實驗，氣流可以一直附壁在凸曲面上運動且會沿凸曲面的端點切線射出，瞬間吹熄蠟燭。

探討在相同風速時間的條件下，氣流吹向乾冰在上圓弧面及下平面流動的情形

倍數	弧度				
	1/5圓	1/4圓	1/3圓	3/8圓	2/5圓
圓心角	72°	90°	120°	135°	144°
煙位置	72°	90°	120°	135°	144°
乾冰飄動位置圖示					
	上弧度1/5圓 (72度)	上弧度1/4圓 (90度)	上弧度1/3圓 (120度)	上弧度3/8圓 (135度)	上弧度2/5圓 (144度)

☞ 上圓弧乾冰流過的距離並沒有比下平面乾冰距離遠，二者並未同時到達右側，顯示乾冰在上圓弧表面出現了附壁作用。

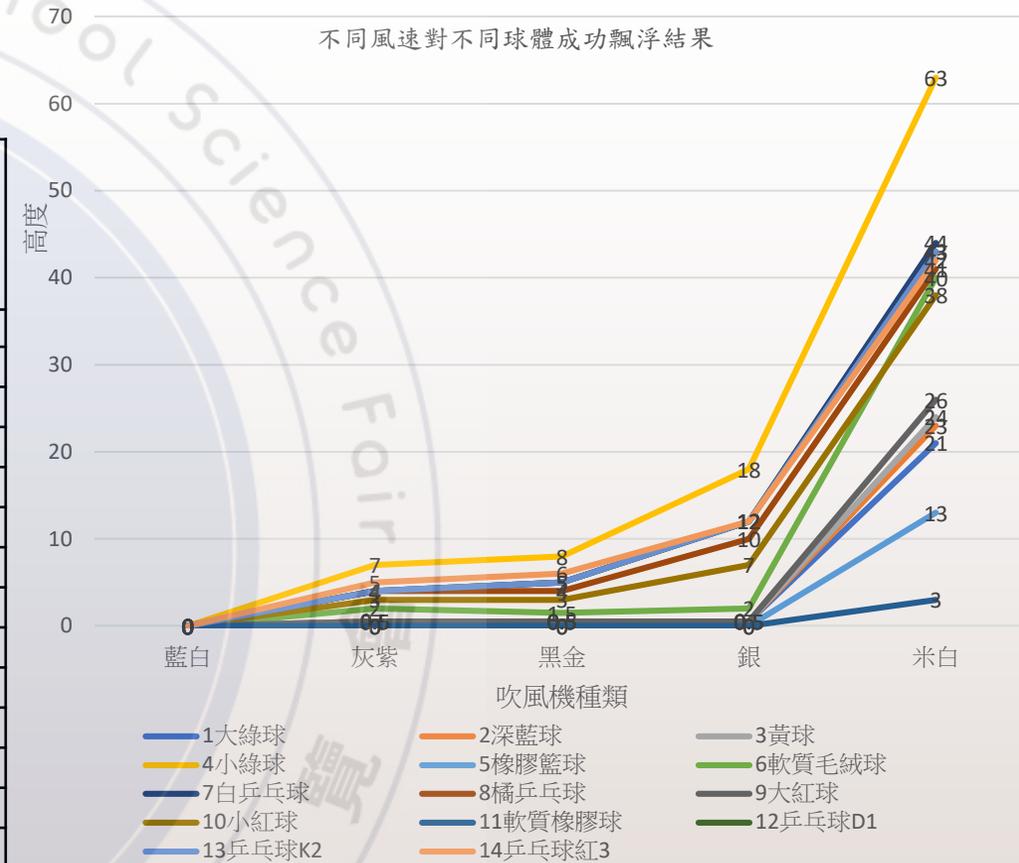


【目的二】探討氣流吹向各種不同球體後，在球體的附壁作用。

探討不同風速變化對球體飄浮的運動情形。

不同氣流大小對不同球體成功飄浮結果

編號	藍白 平均風速：4.1m/s 最大風速：4.7m/s	灰紫 平均風速：6.4m/s 最大風速：6.9m/s	黑金 平均風速：6.9m/s 最大風速：8.0m/s	銀 平均風速：8.3m/s 最大風速： 10.1m/s	米白 平均風速： 16.2m/s 最大風速： 17.7m/s
	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度
1	0	0.5	0.5	0.5	21
2	0	0.5	0.5	0.5	23
3	0	0.5	0.5	0.5	24
4	0	7	8	18	63
5	0	0	0	0	13
6	0	2	1.5	2	40
7	0	4	5	12	44
8	0	4	4	10	41
9	0	0.5	0.5	0.5	26
10	0	3	3	7	38
11	0	0	0	0	3
12	0	4	5	12	43
13	0	4	5	12	43
14	0	5	6	12	42



綜合分析

- 表面平整、直徑介於3.0cm-4.0cm間、重量在1.7g-3.0g間的球體，較能定點飄浮。
- 球體飄浮的高度與球體直徑、重量有關。
- 氣流的強弱與穩定性會影響球體的飄浮。
- 中間有黏合縫或是表面粗糙、有不規則紋路的球體，飄浮的情形較不穩定。
- 球體飄浮時產生垂直旋轉的情形，是附壁作用的現象。



氣流垂直高度與偏移角度測量器

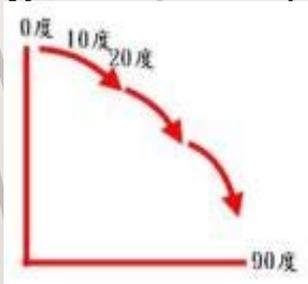
探討氣流在球體產生的附壁作用時，角度偏移的運動情形。

編號	球體直徑	球體重量	氣流偏移角度						備註
			10°	20°	30°	40°	50°	60°	
			飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	飄浮高度	
4	3.0	1.7	14cm	14cm	14cm	×	×	×	超過30°後垂直掉落
7	3.7	2.7	12 cm	12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	超過60°後垂直掉落
8	3.9	3.0	10 cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	超過60°後垂直掉落
10	3.8	3.1	5cm	5cm	5cm	5cm	5cm	5cm	超過60°後垂直掉落
12	4.0	2.9	12 cm	12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	超過60°後垂直掉落
13	4.0	2.7	12 cm	12cm	12cm	12cm <td 12cm	12cm	超過60°後垂直掉落	
14	4.0	2.6	12 cm	12 cm	12cm	12cm	12cm	12 cm	超過60°後垂直掉落



■ 偏移吹風機角度進行實驗

→ 球體在不同的風向角度時也會有因附壁作用產生飄浮現象，且因作用力的原理，相同的力在不同的偏移角度(α)時，產生的垂直分力與水平分力也會不同，如圖A、圖B所示。



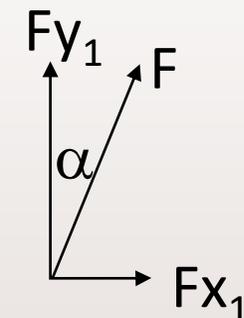
偏移角度測量示意圖



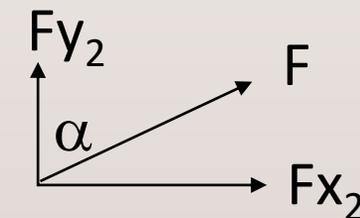
小紅飄浮偏移實驗 小紅飄浮偏移實驗 橘乒乓球飄浮偏移實驗 橘乒乓球飄浮偏移實驗 橘乒乓球飄浮偏移實驗



小綠飄浮偏移實驗 小綠飄浮偏移實驗 白乒乓球飄浮偏移實驗 白乒乓球飄浮偏移實驗 白乒乓球飄浮偏移實驗



圖A



圖B

■ 重量分布不均勻是不是影響氣流附壁作用的原因？

→ 球用鋁箔紙包覆，使通過直徑的截面圓形部分較重，能成功飄浮的機率變小，可飄浮的高度也較低

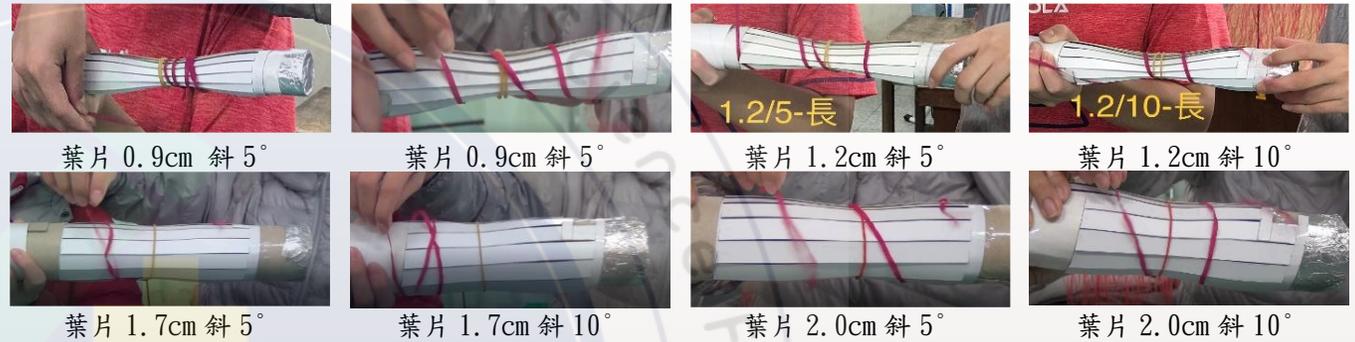
→ 因此球體重量分布是否均勻，確實會影響氣流的附壁作用



【目的三】探討氣流對側面有縫隙的圓柱體曲面之附壁作用現象。

探討氣流的附壁作用在側面有縫隙直圓柱體曲面運動情形

氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)				
	2.0×13	1.7×13	1.2×13	0.9×13	0.6×13
直接吹開	✓	✓	✓	✓	✓
表面吸附					
有環繞現象					
一直環繞					



探討氣流的附壁作用在沙漏型圓柱體曲面運動情形

葉片斜度	氣流運動情形	葉片寬度×葉片長度(單位公分)					實驗是否成功產生附壁作用
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	0.6×18	
5°	直接被吹開						否
	表面吸附						
	有環繞現象						
	一直環繞	✓	✓	✓	✓		是
10°	直接被吹開					✓	否
	表面吸附						
	有環繞現象						
	一直環繞	✓	✓	✓	✓		是

- 1) 在側面有縫隙的直圓柱體曲面無法產生附壁作用之後，經過原型曲面→加長型曲面→扭轉型曲面的試驗，發現細皺紋紙多數能順著風向一直環繞在沙漏型曲面。
- 2) 在沙漏型圓柱體中，葉片斜度5°及10°，葉片寬度2.0、1.7、1.2及0.9cm可成功。
- 3) 氣流進入葉片稍微相互重疊且縫隙微小的沙漏型圓柱體後，再沿著縫隙從柱體內部流出，此時葉片構造對氣流而言：如同一個螺旋狀的凸曲面，細皺紋紙便容易被吸附，甚至能一直環繞，產生附壁作用的現象明顯。

- 在過程中經過不斷的實驗與製作器材，從不會產生附壁作用的現象到形成附壁作用現象且產生一直環繞的情形，讓我們對氣流附壁作用的特性有更加進一步的了解。

➤ 改變材質：馬糞紙



葉片 1.2cm 斜 5°



葉片 1.2cm 斜 10°



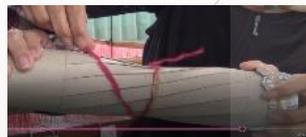
葉片 1.2cm 斜 15°



葉片 1.7cm 斜 5°



葉片 1.7cm 斜 10°



葉片 1.7cm 斜 15°



葉片 2.0cm 斜 5°



葉片 2.0cm 斜 10°



葉片 2.0cm 斜 15°

發現：使用馬糞紙時，葉片有斜度、葉片寬度2.0、1.7及1.2cm，氣流於沙漏型圓柱體曲面產生一直環繞的現象最好。

葉片斜度	圓柱體曲面	葉片寬度×葉片長度(單位公分)				
		2.0×18	1.7×18	1.2×18	0.9×18	0.6×18
5°	加長型	△	△	△	×	×
	扭轉型	✓	✓	✓	✓	×
	沙漏型	★	★	★	★	×
	改變材質 沙漏型	★	★	★	✓	
10°	加長型	✓	✓	△	△	×
	扭轉型	✓	✓	✓	✓	×
	沙漏型	★	★	★	★	×
	改變材質 沙漏型	★	★	★	×	
15°	改變材質 沙漏型	★	★	★	×	
是否成功產生附壁作用		是	是	是		否

「×」直接被吹開、「△」表面吸附、「✓」有環繞現象、「★」一直環繞

● 綜合本實驗結果：

讓氣流於凸曲面產生一直環繞現象的條件有：

- 葉片要有斜度、葉片能形成螺旋形的凸曲面且葉片寬度為2.0cm、1.7cm、1.2cm最佳。
- 葉片間能稍微重疊約0.2cm左右，葉片間縫隙微小(小於0.1cm)且縫隙大小要平均。

- 用馬糞紙、特厚紙板都可成功，但也會膨脹，都不是理想的材料。曾想過用PVC管，也曾想過寶特瓶塑料、3D列印機……等等，似乎都可嘗試看看。

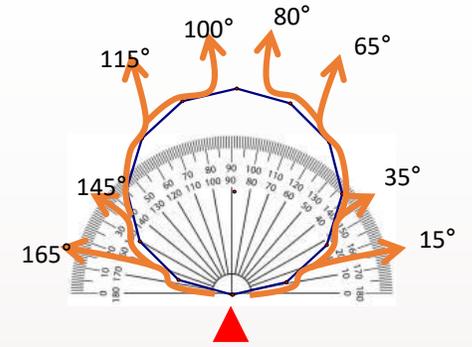
◆ 發現將直圓柱體的側面變成沙漏型曲面，氣流於此曲面形成一直環繞的現象最好，產生附壁作用現象最明顯。

結論

一、吹風機與正角柱體或直圓柱體之間的適當距離，視正角柱體或直圓柱體的大小而定；依實驗得知，其距離在18cm-36cm間，氣流附壁作用較明顯。

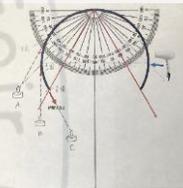
(一)氣流流經正角柱體，在適當條件下也能顯現附壁作用的現象。

- 1.氣流偏折的角度與正角柱體底面外角有關。
- 2.底面的邊數愈多，氣流會沿著其側面流動的情形愈明顯。
此即為氣流附壁作用在正角柱體側面流動的軌跡。



(二)氣流在直圓柱體的凸曲面運動時產生的附壁作用最明顯。

- 1.氣流能使90°線上燭火熄滅，置於距離半徑處的效果最佳。
- 2.氣流流經凸曲面圓弧時，會沿著凸曲面流動。



二、氣流經過球體能夠產生附壁作用。

- 1.氣流產生的作用力必須大於球體的重量。
- 2.球體材質重量分布愈均勻，垂直飄浮旋轉也會愈穩定，能偏移的角度也較大。

三、氣流也能對側面有縫隙的圓柱體曲面產生附壁作用。

氣流在有斜度葉片形成螺旋狀(相互重疊且葉片間縫隙微小平均)的沙漏型圓柱體凸曲面上，會產生一直環繞的現象。



四、若能將『氣流附壁作用在有斜度葉片的圓柱體曲面上形成一直環繞的現象』，設計出便利於生活的科技產品，是我們接下來延續性的研究題材，也是一大挑戰。

參考書目

氣球的舞動(2021)。NTCU-科學遊戲實驗室。取自<http://scigame.ntcu.edu.tw/balloon/balloon-004.html>
黃姘(2020年8月20日)。流體力學中伯努利定律把仰角調整到90°可以讓飛機豎著飛嗎。每日頭條。取自<https://kknews.cc/zh-tw/n/445gylx.html>