

速率越大阻力就越大嗎？

—— 流體阻力的探討

高中組物理科第三名

省立台中女中高級中學

作 者：李怡玲

指導教師：盧錦玲

一、研究動機

當我在書上看到「汽車在行駛時，當風速達某一限度，再增加速度反使阻力減小」時不禁覺得驚訝，因為我一直以為速率越大阻力就越大，於是開始了以下的實驗。

二、研究目的

(一)空氣中物體所受阻力與速率之關係：

1. 光滑球在空氣中所受阻力與速率之關係
2. 粗糙球在空氣中所受阻力與速率之關係

(二)雷諾係數 (Reynolds number) 低時的史多克阻力定律 (Stokes' Law) ($F = 3\pi\mu V_0 d$) :

1. 球形物體在甘油中所受阻力與速率是否成正比
2. 球形物體在甘油中定阻力下，長度與終端速度是否成反比

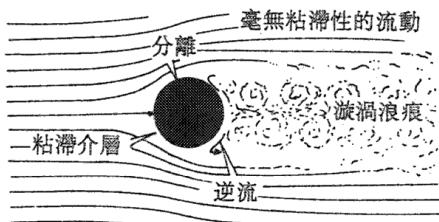
(三)比較流線形物體與球形物體在甘油中所受阻力

三、原理

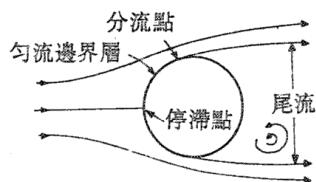
(一)流線形物體及非流線形物體之壓阻力：

流線形物體的介層不會分離，雷諾係數大時 $< \text{雷諾係數} = \text{密度} \times \text{速率} \times \text{長度} / \text{黏滯度} >$ ，一個流線形物體沒有壓阻力是因為作用於物體後方之平均壓阻力正好等於作用於物體前方之壓力。

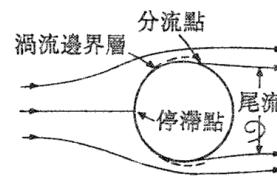
但圓球、圓棒之類的非流線形物體因沒有細尖的末端，介層就在肩膀下游不久的地方，很快地發生失速現象，在分離處下游形成一比流線形浪痕寬的許多漩渦浪痕（如圖一），因此在物體後方之平均壓力小於前方之壓力，而形成了一個淨壓阻力，此壓阻力，比黏滯阻力大好幾倍。



圖一



圖二



圖三

(二)雷諾係數小時流線形物體阻力較大的緣故：

因雷諾係數小時，流體並不分離，流線形不能改變太多壓阻力，但因流線形受摩擦應力的面積大，而在沿物體表面增加不少黏滯阻力，因此流線形物體所受阻力較球形物體大。

(三)速率增加阻力反而減小的緣故：

當風速低時，介層是勻流 (Laminar flow)，分離現象較早發生，而留下很寬的餘波 (如圖二)，當風速增大時，雷諾係數也增大，介層也由勻流變渦流 (Turbulent flow)，渦流介層可附著在球面直到超過最寬的地方 (如圖三)，這有兩種效應：(1)在球的下游，壓力小的面積，比在勻流時的面積小，(2)球的下游的壓力，比在勻流時大。而這兩種效應都使壓阻力減小。

(四)粗糙面可以減少阻力的緣故：

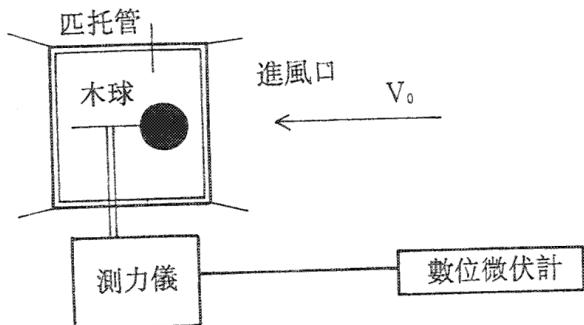
風速低時，光滑球與粗糙球的介層都是勻流，因此兩球流動的分離現象差不多同時發生，兩球所生之壓阻力也幾乎相同，然而粗糙面卻增加摩擦阻力，因此粗糙球的總阻力比光滑球的總阻力大，但風速增加時，粗糙球的介層比光滑球的介層早變為渦流，在前面已見過渦流介層，可以附著在球面上稍為持久也產生較小的餘波，因此球面因粗糙而產生的壓阻力旋即減小。

(五)雷諾係數低時的史多克阻力定律：

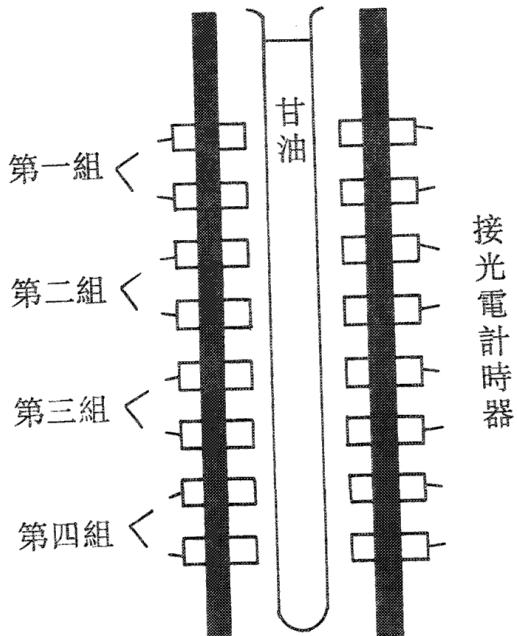
史多克曾作解析證明，雷諾係數極低的層流，其中慣性力可忽略不計，僅需考慮黏滯力。直徑為 d 的球體以 V_0 速度通過黏滯度 μ 的流體，其所受阻力 F 可由下式定出： $F = 3\pi\mu V_0 d$

四、研究設備

- | | | | |
|----------|--------|---------|----------|
| (1)風洞 | (2)測力儀 | (3)匹托管 | (4)風速指示板 |
| (5)數位微伏計 | (6)測壓計 | (7)光電閘組 | (8)光電計時器 |



圖四



圖五

五、研究步驟

(一)1. 光滑球在空氣中所受阻力與速率之關係：

- (1) 將光滑木球置於風洞中之測力儀上，測力儀一端接一數位微伏計（如圖四）。
- (2) 利用風速指示板讀取自由流之風速。
- (3) 利用匹托管、測壓計讀取壓力差，再換算出球所在處之風速。
- (4) 利用數位微伏計之讀數換算阻力，即可求出阻力與速率之關係。

(一)2. 粗糙球在空氣中所受阻力與速率之關係：

- (1) 將寬約0.3公分之細長膠帶黏貼在光滑木球表面，以所黏膠帶多寡改變木球的粗糙度。
- (2) 重覆一、1. 之實驗步驟。

(二)1. 球形物體在甘油中所受阻力與速率之關係：

- (1) 將四組光電閘組由上至下分列於盛裝甘油之玻璃管的兩側，另一端分別接到四架光電計時器上（如圖五）。
- (2) 物體在甘油中落下時，可由其經過光電閘組之啟動組與停止組間的距離和時間，求得物體落下速率。
- (3) 當物體達終端速度時，其所受阻力等於其在甘油中之重量，改變物體之重量，找出其所受阻力與速率之關係。

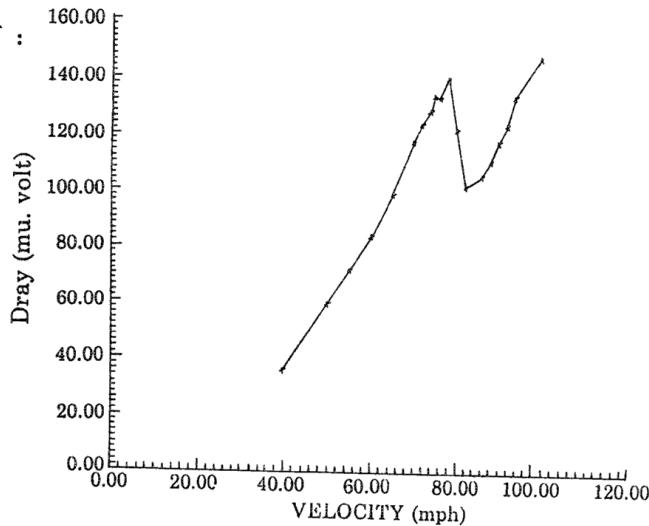
(二)2. 球形物體在甘油中定阻力下長度與終端速度之關係：

- (1) 將半徑不同之球調整至在甘油中重量相同。
- (2) 利用二、1. (1)(2)之方法，可求出其長度與終端速度之關係。
- (三) 比較流線形物體與球形物體在甘油中所受阻力：
- (1) 將最寬處相同之流線形與球形物體調整至在甘油中重量相同。
- (2) 利用二、1. (1)(2)之方法，可找出流線形物體與球形物體在甘油中所受阻力之關係。

六、研究結果

(一) 1. 光滑球在空氣中所受阻力與速率之關係：

○速率對阻力之函數圖形如下：



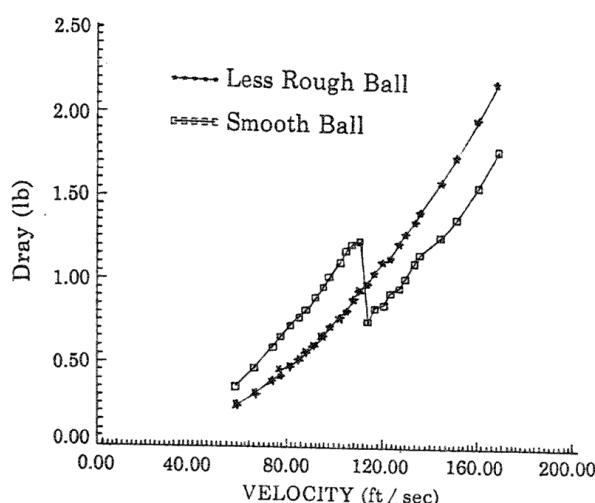
圖六

2. 粗糙球在空氣中所受阻力與速率之關係：

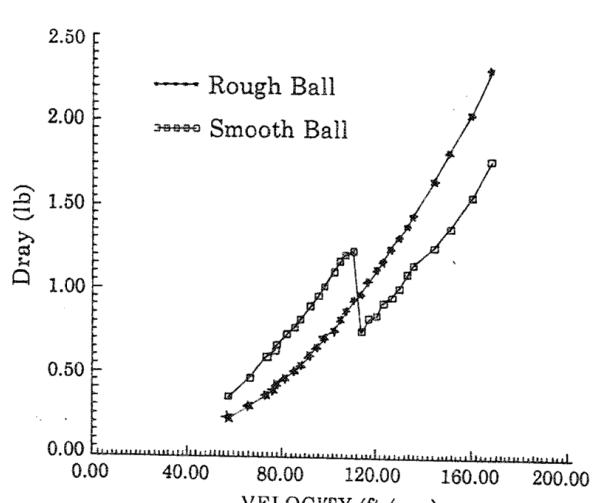
○速率對所受阻力之函數圖形如下：

(1) 略粗糙球與光滑球之比較：

(2) 粗糙球與光滑球之比較：



圖七



圖八

○討論：本實驗所用粗糙球乃是在原光滑球上加黏膠帶，可能皆太粗糙，無法看到由勻流轉變為渦流之過程，即由於一開始粗糙面阻力已比光滑面小，由此可知粗糙球一開始已在渦流中。

(二)1. 球形物體在甘油中所受阻力與速率之關係：

依雷諾係數低時的史多克阻力定律 $F = 3\pi\mu V_0 d$ ，若控制 d 與 μ 不變，則當物體達終端速度時，物體在甘油中之重量等於其所受阻力，此時重力與終端速度成正比。今以直徑均為25.6釐，在甘油中重量不同之球實驗，結果如下：

物體在甘油中之重量	9.16g	11.40g	12.35g	14.43g
終端速度 (cm / s)	9.8338	12.1876	13.0892	15.2141
F / V	0.9315	0.9354	0.9435	0.9485

○討論：由 F / V 所得之值幾乎相同可知，阻力與終端速度成正比，即 $F \propto V$ 。

2. 球形物體在甘油中所受阻力與長度之關係：

依雷諾係數低時的史多克阻力定律 $F = 3\pi\mu V_0 d$ ，若控制 F 與 μ 不變，則當物體達終端速度時，物體在甘油中之重量等於其所受阻力，此時物體長度與終端速度成反比。今以在甘油中重量相同 (14.43gw)，直徑不同之球實驗，結果如下：

球之直徑	19.8mm	25.6mm
終端速度 (cm / s)	19.6581	15.2141
$V \times d$	38.9231	38.9481

○討論：由 $V \times d$ 所得之值幾乎相同可知，物體長度與終端速度成反比，即

$$V \propto \frac{1}{d}.$$

(三)比較流線形物體與球形物體在甘油中所受阻力：

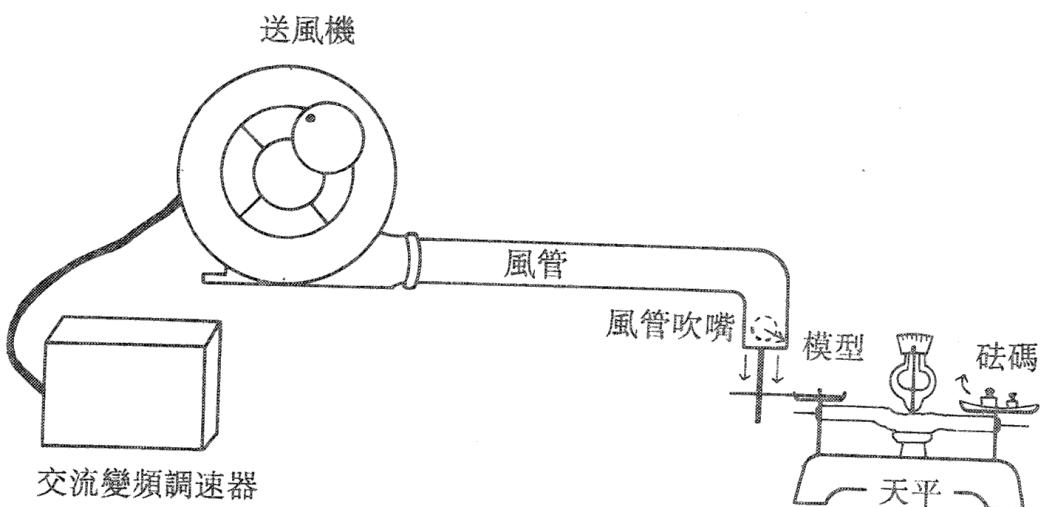
在甘油中均為9.5gw之球形物體與流線形物體，其最寬處直徑均為19.8公釐，且流線形物體長為77.7公釐。比較兩物在甘油中自由落下之終端速度，結果如下：

物體形狀	球 形	流線形
終端速度 (cm / s)	4.7223	3.5856

◎討論：因流線形物體與球形物體在甘油中重量相同，即定阻力下，球形物體之終端速度大於流線形物體之終端速度，根據史多克阻力定律 $F = 3\pi\mu V_0 d$ ，當流線形物體與球形物體在甘油中速度相同時，流線形物體所受阻力大於球形物體所受阻力。由此可知在雷諾係數小時，流線形物體所受阻力大於球形物體所受阻力。

七、討論

- (一)本實驗最初乃是採用自行組合之小風洞（如圖九），其設備為交流變頻調速器連接送風機，再接風管，風管吹嘴下方放置模型，此模型固定於一天平之一端，氣流作用於球的力即球對氣流的阻力，天平的另一端用砝碼可求出阻力。但利用自行組合之小風洞作實驗，並未得到「速率越大阻力反小」的結果，可能是開放式的系統，試驗區段的速度不是均勻的，即非穩定氣流，努力改善設備仍舊無法得到，所以我改到逢甲大學的風洞作實驗，終於得到「速率越大阻力反小」的結果。
- (二)由本實驗所得阻力與速率關係圖表可求出臨界雷諾數。以阻力開始下降時之速度代入 $<\text{雷諾係數} = \text{密度} \times \text{速率} \times \text{長度} / \text{黏滯度}>$ 之公式，可得半徑 5 英吋的木球的臨界雷諾數為 2.99×10^5 。低於此臨界雷諾數時，介層不會形成渦流。



圖九

(三)由本實驗之結果，我們可以很清楚地知道高爾夫球為什麼要做成麻面的。

(四)本實驗設計之優點：

在測量物體於甘油中阻力與速率之關係時，常見一般實驗方法是用線拉住

物體，通過滑輪，測量不同速率下物體所受之阻力，此時線的阻力成爲誤差來源。本實驗是利用物體在甘油中落下達終端速度時，阻力等於物體在甘油中之重量，在玻璃容器內灌蠟及水銀，改變其重量，求不同阻力下之終端速度，即可求出阻力與速率之關係。

八、結論

(一) 並非速率越大阻力就越大：

物體在空氣中，並非速率越大，阻力就越大，如實驗結果(一)A顯示，有一阻力下降之情形產生，此乃因粗短狀物體在勻流中時，大部分的阻力來自壓阻力，僅小部分阻力來自黏滯阻力。而物體在渦流中所受黏滯阻力比在勻流中所受黏滯阻力爲大，但其所受壓阻力卻小得多，結果勻流變渦流時，壓阻力加上黏滯阻力所形成的總阻力反而較小。圖六中阻力下降就是由勻流變渦流的結果。

2. 粗糙球可以減少阻力：

粗糙球的介層比光滑球的介層較早變爲渦流，在特定之風速範圍內，粗糙球所受之總阻力比光滑球所受之總阻力小，高爾夫球被做成麻面的就是這個原因。

(二) 驗證了史多克阻力定律：

驗證了雷諾係數低時的史多克阻力定律 $F = 3\pi\mu V_0 d$ ，若控制 d 與 μ 不變，此時物體所受阻力與終端速度成正比，即 $F \propto V$ 。

2. 驗證了史多克阻力定律：

驗證了雷諾係數低時的史多克阻力定律 $F = 3\pi\mu V_0 d$ ，若控制 F 與 μ 不變，此時物體長度與終端速度成反比，即 $V_0 \propto \frac{1}{d}$ 。

(三) 在甘油中，流線形物體阻力反而較大：

流線形物體在雷諾係數大的空氣中運動時，其所受阻力較其他形狀物體所受阻力小，但在甘油中時，因甘油雷諾係數小，物體在其中運動，介層沒有分離現象，流線形並不能改變太多壓阻力，可是流線形增加受摩擦面積，增加了黏滯阻力，故總阻力比球形物體大，且流線形物體長度越長，受摩擦面積越大，總阻力也越大。

(四) 總結論：

綜合空氣中阻力與甘油中阻力之實驗得知，阻力與速率的關係，與雷諾係數有很大的關係：

{ 雷諾係數小時，阻力與速率成正比。
雷諾係數大時不一定，速率大時阻力可能變小，即當速率達某一程度後，速率再增加，阻力反而下降。

九、參考資料

- (一)形與流帶阻力的流體力學
Ascher H. Shapiro 著 中華書局 印行
(二)基本流體力學
Vennard / Street 著 曹家政 譯 科技圖書股份有限公司 印行
(三)逢甲大學風洞設備說明書
任碩 / 張俊盛 譯

十、編後語

- (一)本實驗最初自行組合之小風洞雖在阻力與速率之關係沒有得到「速率越大，阻力反而下降」的結果，但利用此設備可做出「在空氣中，流線形物體所受阻力較其他形狀物體所受阻力小」之實驗，更可看出機翼之升力。關於升力與機翼形狀之關係，及升力與風速之關係，是我可以繼續研究的目標。
(二)感謝逢甲大學航空工程系系主任梁德博士及李永淑助教熱心指導，並提供實驗設備，使本實驗能順利完成，謹此致謝。

評 語

本作品先使用自行設計之小風洞初步研究物體在流體中所受阻力。然後利用逢甲大學的風洞，實驗流體速率對物體所受阻力的關係，得出在空氣中並非流速越大阻力就越大的重要結論，值得推薦。