

教學心得

「流體力學」教學的困境與突破

陳瓊森¹ 顧炳宏² 楊孟欣¹

¹國立彰化師範大學 物理系

²國立彰化師範大學 科學教育研究所

「流體力學」教學的困境

「流體力學」是力學的一部份，但常因為特別而被分割成獨立的部份。「流體力學」裡的物理現象很有趣，在生活上也有很多的應用，物理教師也很容易安排讓學生做實驗或做示範實驗，應該是很容易教的單元，那為什麼會有「流體力學教學困境」的說法呢？

如果我們仔細比較國中理化、高中物理、和大一普通物理課程三者在「流體力學」單元的教學，就會發現高中物理在流體靜力學是增加了表面張力單元，但在更重要的「流體動力學」部份，卻與國中理化課程相差不多，教材內容多數還是集中在伯努力定律的定性示範。至於大一普通物理的教學，在「流體力學」這一章的內容，與高中物理相差不多，但很奇怪的是，多數普物實驗還保留黏滯係數和泊醉定律(Poiseuille's law)的實驗，卻很少普物課本包含這一方面的內容，很多學

生只是依樣畫葫蘆地做完實驗，沒有多久就忘光了，因而產生「流體力學教學困境」的問題，需要集物理教育工作者的力量，一齊努力來解決這些教學的困境。

「文氏管」示範實驗所呈現的問題

大部份物理課本或教師都會以「文氏管」(Venturi tube)的示範實驗來講解伯努力定律。如下圖所示的「文氏管」裝置，測量兩垂直玻璃管液體的高度差 h ，即可計算管內點 1 與點 2 的氣體壓力差 $\Delta P = P_1 - P_2 = \rho_{\text{Liquid}} gh$ ，至於產生這個氣體壓力差的原因，伯努力定律就是利用能量守恆來說明其中的關係：

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

點 1 處氣體的流速 v_1 會小於點 2 處的流速 v_2 ，因為在穩定而且不可壓縮的流體裡，根據連續方程式 (Equation of Continuity) $v_1 A_1 = v_2 A_2$ ，即可得點 1 與點 2 處的流速比，再應用伯努力定律，即可計算寬管點 1 與比窄管點 2 的氣體壓力大了多少。(如圖 1)

這個「文氏管」的示範實驗如果是屬於定性的，表面上來看好像沒有什麼太大的問題，但要成為定量的實驗就有問題了。但可能更令人驚訝的是，如果物理教師在示範時一不小心，把鼓風機接到圖 1 中的出口處，

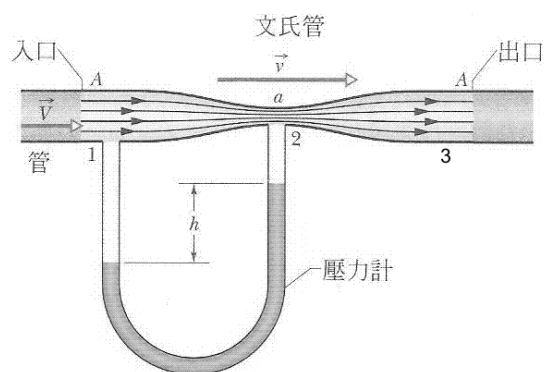


圖 1

就會讓學生觀察到與理論不符的奇怪現象，窄管(點 2 處)的氣體壓力竟然比寬管(點 1 處)的氣體壓力還要大哩！如果學生很有好奇心地要問為什麼，因為根據伯努力定律的理論，鼓風機接到哪一邊不是應該沒有什麼差別嗎？此時物理教師可能會很尷尬地不知道要如何解釋。

事實上許多物理教師訂製的文氏管，乃是與圖 1 相似的「寬-窄-寬」管，但不同的是在「寬-窄-寬」三處都分別接到連通在一起的封閉式壓力計，亦即在圖 1 中的點 3 處，也接一個管子連接到測量點 1 與點 2 的氣體壓力的液體處。如此不管物理教師把鼓風機接到左右哪一端，都一定會遭遇上述的問題：雖然窄管(點 2 處)的氣體壓力確實比氣體入口附近點 1 處(寬管)的氣體壓力小，但卻比氣體出口附近點 3 處(也是寬管)的氣體壓力大，無法用伯努力定律來解釋。這個問題長期存在，卻很少有學生或教師去質疑，進而面對這個問題。

其實這是流體在流動時遭遇阻力的問題，至於流體在最常使用之圓形管子中流動時所受的阻力，則早在 1840 年，就由法國物理學家泊醉(Jean Marie Poiseuille 1799-1869)等人先經由實驗，再透過理論推導而得到完整的解決。就算是氣體，其在流動時，阻力也是大到不能忽略。

如果物理教師在訂製文氏管時，不要製作成圖 1 所示的封閉壓力計，而是更節省地製作成如圖 2 所示的開口，只要在下方的三個開口接透明塑膠管(或者再接玻璃管)，讓塑膠管接到水槽，在左端或右端吹氣，就可以從塑膠管內水位上升的情形來測量氣體的壓力差。

像這樣製作的文氏管還有一個更大的好處，那就是我們可以把這個文氏管上下翻轉，使測量壓力的開口向上，同樣在三個開口接透明塑膠管(或者再接玻璃管)，要學生用手扶著，或者用實驗室裡的鐵架使其垂直固定好，然後就可以用透明水管把文氏管左端或右端接到水龍頭，此時測量各處水位的高度，就可以計算水在水管裡流動時各處的水壓力了。這樣可以幫助學生對於伯努力定律更多的理解，也才有可能探討下文所述的流體力學教學的困境與解決之道。

伯努力定律的方程式的教學問題

每個教到流體力學的物理教師都會教伯努力定律的方程式：

$\rho + (1/2) \rho v^2 + \rho gy = \text{constant}$ ，當然也會推導，可是就是只能用理論推導，沒有辦法用實驗做出來。如上所述一般物理教師訂製的文氏管，都是屬於封閉式壓力計，只能用氣體來

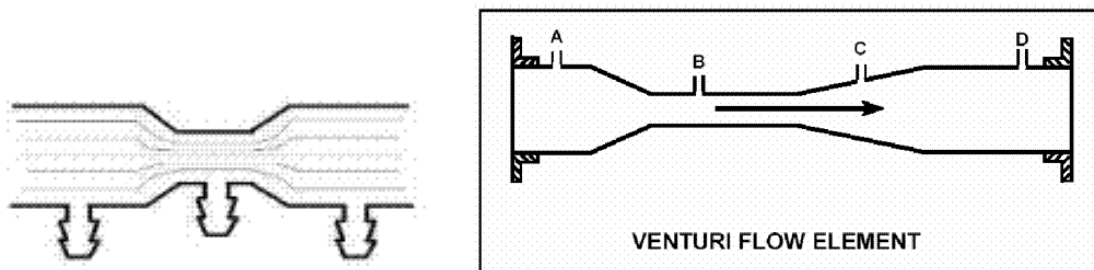


圖 2

做實驗，結果伯努力定律方程式中的 ρgy 項根本做不出來，因為這要用液體才能做出來，而用液體做實驗時，就得採用我們所建議的開口式壓力計。但不管用氣體或液體來做實驗，都不只有 $(1/2)\rho v^2$ 項而已，還有如下文所討論、不能忽略的阻力問題。

物理教學普遍存在的一個問題：與生活脫節

上述所討論流體阻力的問題，並不是一個特例，而是物理教學普遍存在的一個問題，那就是與生活脫節。其中最顯著例子之一，就是阻力與摩擦力在日常生活中普遍存在，但在物理課本和物理課堂裡，卻著墨不多，例如輪子的發明，對近代文明的發展是多麼重要，但即使是大學普物課本，討論到滾動摩擦也不多見。這也間接說明，為什麼多數的物理教師和學生，會誤認為從比薩斜塔頂同時放手之同樣大小(體積相同或質量相同皆可)的鐵球和木球，會同時著地，也就不足為奇了。

雖然這些忽略或誤導，可能起源於摩擦力和阻力的複雜，不容易用公式計算清楚，也不利於考試出計算題，但定性地討論這些重要的議題，卻是讓物理教學不會與生活脫節問題的不可或缺的良方。

伽利略：同樣大小的鉛球和木球從比薩斜塔高處同時落下會同時著地嗎？

流體動力學對於阻力的探討，可以粗略分成兩部份：第一是物體在流體中運動時所受阻力的探討，第二是流體本身在流動時遭遇阻力的問題，其中第二部份是下文討論的重點，我們先來約略討論第一部份。物體在

流體中運動時所受阻力，又可以分成兩類，首先是物體在流體中運動速度較小時，所受流體阻力的與速度成正比，此即是 Stokes' law $F_d = 6\pi r v \eta$ ；其次則是速度較快時的阻力與速度平方成正比。何者影響比較大？這

可以用雷諾數 $N_R = \frac{\rho_0 v r}{\eta}$ 來判斷，當 N_R 大

於 1 時，阻力與速度平方成正比，其公式為

$$F_{drag} = C_d A \frac{\rho_0 v^2}{2}$$

之處有二：第一，重力加速度 g 是很大的，故物體從空中落下做加速運動，不需多久，速度即快到需適用後者這個阻力與速度平方成正比的公式；第二，這個阻力與物體之截面積成正比。

因此對於兩種自由落體何者先著地之問題的探討，應該是選擇質量相同、形狀相似、但體積不同的金屬與木頭，例如如果此金屬的密度是木頭的 8 倍，則木頭的截面積就會是此金屬的 4 倍，木頭在空氣中落下所受的阻力 F_{drag} 也會是此金屬的 4 倍之多，此時物理教師要學生探討的是當速度有多快時，空氣的阻力就必須考慮的「真問題」，而不是如一般物理教師之只要學生討論兩個極端情形：1. 空氣無阻力時，2. 空氣阻力使得物體到達終端速度(棉花或乒乓球)時，何者先著地之「假問題」。

事實上伽利略也考慮過這個問題，他在《Two New Science(1638)》書裡宣稱：一個鉛球與一個木球從 100 公尺(比薩斜塔高度則為 54.6 公尺)高處同時落下，在落地時，鉛球只會領先木球 4 in 而已，但近代的一個實驗，使用半徑均為 10 公分的鉛球與木球從 100 公尺高處同時落下，結果在鉛球落地時，木球竟還離地 7 公尺。如果是 100 磅的鉛球與 1 磅的木球，落地時會相差 1.3 公尺。(Benson, 1995)

如果教師能帶著學生，約略(定性)探討高爾夫球在空氣中前進受到空氣阻力的情形，而不只是計算以何種角度擊球可以使球跑得最遠的理想問題，將會是更有啟發性且更有趣的。

血流和物理課程

血液在血管中流動的情形，其重要性應該是不言而喻，這些內容應該成為各級和各種課程的一部份，也許會得到很多人的認同。多數給醫學院和生物系等與生命科學有關的學生讀的普通物理教科書，都會以很大的篇幅，介紹「流體動力學」的內容，特別是探討流體在圓形管子(例如血管)中流動時受到阻力的情形。可惜的是，給物理系、工學院、和其它理學院學生讀的普通物理教科書，在「流體力學」那一章裡，通常也只包括伯努力定律，而不介紹流體阻力的內容，但卻很奇怪的是有不少普物實驗課程，還保留黏滯係數和泊醉定律(Poiseuille's law)的實驗。只是正課不教，很難讓學生留下深刻印象，且由於現在物理系已經不常開流體力學的課，以致於許多物理系學生(和物理教師)對流體動力學的認識，僅止於伯努力定律而已。

醫學院學生在二年級時，通常要修「物化生物學」，這個課程把物理、化學、生物三門科學整合在一起，而「血液流動與流體動力學」，乃是這門課裡很重要的一環。像這樣的課程，總是能讓學生有相當的體會與感動，物理、化學、和生物之間的關係密不可分。當一個人生病失去健康時，身體內部或週遭的物理或化學現象，都會給我們相當的警訊，如果我們的物理或化學素養不要太差，也不要太過於輕忽，就不會導至人體物理、化學、和生物的骨牌效應，產生不可挽

回的嚴重結果。

高中物理和大一普通物理課程應有的差別

許多大一普通物理課程的教師，都會認為學生的物理程度太差，甚至怪罪於高中物理的教學，但竟然有不算少的學生認為大一普物和高中物理差不多，甚至有些學生在大一時忙於外務而輕忽大一普通物理，這些學生後來都付出很大的代價。雖然大一普物課堂教的物理定律或現象和高中物理相差不遠，但其實大一普物和高中物理至少有三大差別：第一，高中物理是 Algebra-based，而大一普物則是 Calculus-based 的課程，這可是很大很大的差別；第二，高中物理沒有時間照顧到實驗，大一普物則相對地重視實驗，而缺少實驗會嚴重影響學生對物理的學習，即使是考得不錯的學生，隔一段時間後接受檢驗，就可以證明很大的比例的學習是用背誦的；第三，大一普物大多採用英文的教科書。

由於大一普物和高中物理有上述三大差別，如果有學生輕忽大一普通物理，在第一次考試時也許還能應付，之後就會嚴重落後，而且很難補救。事實上，有些物理系試圖以縮減普通物理課程為基礎物理的改革，幾乎全部是失敗的。而高中有些名校試圖減少基礎物理來增加物理課的上課時數，也幾乎都遭到失敗的下場，而受害者則是學生。這些經驗給我們不少啟示，其中之一就是(物理)教師們應該在教法的改革多下功夫，至少失敗的話副作用也比較少，而不是大膽地在教材或甚至課程上的改革，拿學生當白老鼠(課程=教材+教法)。

不過本篇文章的重點，還是要強調高中

物理和大一普通物理課程在流體力學教材方面應有的差別。前述物理系或其它理學院學生用的大一普物教科書通常名為《Physics for Scientists and Engineers》，高中物理則不應該過於嚴重地偏向物理學在工程學上的應用，而是應該多少兼顧物理學在生命科學方面的應用，例如本文所論述的血流與流體阻力等方面的主題。當然這方面的責任主要應由大學物理系教授承擔，畢竟高中物理課程綱要與教科書都是物理系教授編著的，不過我們還是要呼籲高中物理教師多做這方面的思考，並且勇於表達自己的立場。

MIT 物理系 Physics 8.01X 課程介紹：以流體動力學之流阻與黏滯係數實驗為例

前述不少普物實驗課程，還保留黏滯係數和泊稔定律(Poiseuille's law)的實驗，只是正課不教，很難讓學生留下深刻印象，更何況這個實驗看起來雖然簡單，但並不好做，而且數據分析很不容易。典型的作法是用壓克力製的盛水容器，水流透過下方的小孔流洩出，則容器內水位高度隨時間下降，而此水位高度下降的速率就是這個實驗要探討的主題。經由量測水位高度的 $y(t)$ 函數，探討水之黏滯性與出水孔之流阻對於水流量(以及水流速率)的影響。這個實驗器材雖然簡單，但實驗很不容易做好，數據的分析非常困難。

美國麻省理工學院(MIT)物理系有很多個傑出而具有特色的普通物理課程，其中 TEAL 普物教學實驗室課程和 Walter Lewin 精彩演示教學最為出名，另外的普物 Physics 8.01X 課程也很有特色，這個課程特別重視實驗，而且幾乎所有的實驗器材，都應用日

常生活中經常會用到器具，讓學生從最基本的素材做起，而非一般普物實驗的使用套裝設備，學生只是做些校正和量測的工作而已。相對而言，MIT 物理系 Physics 8.01X 是一個非常具有啟發性的普物實驗課程。

圖 3 所示即是其中一個典型的例子，探討流阻與黏滯係數的流體動力學實驗，全部使用日常生活的器材，這個實驗比起上述一般普物流阻實驗有趣且好做，不過還是同樣透過水位高度的 $y(t)$ 與時間的關係，探討水之黏滯性與出水孔之流阻對於水流量(以及水流速率)的影響，因此實驗結果的分析一樣複雜，同樣必須使用微積分。



圖 3-1



圖 3-2

不過還是同樣透過水位高度的 $y(t)$ 與時間的關係，探討水之黏滯性與出水孔之流阻對於水流量(以及水流速率)的影響，因此實驗結果的分析一樣複雜，同樣必須使用微積分。

改良過的流體動力學實驗--流阻與黏滯係數

上述兩個實驗都沒有直接測量水流量，而是測量水位高度的 $y(t)$ 與時間的關係，每個時間的水流量都不相同，再由此推導出探討水之黏滯性與出水孔之流阻對於水流量(以及水流速率)的影響，這使得實驗結果的分析非常複雜，同樣必須使用微積分。我們其改良成有穩定水流，這使得數據的分析大為簡化，也比較容易讓學生理解。

一、實驗簡介

連續方程式的推導乃是利用質量守恆與不可壓縮，而伯努力定律的推導則是利用能量守恆定律，只適用於理想氣體。事實上，真實的氣體或液體，都具有黏滯性，使得其在流動時會受到自身的阻力，特別是在封閉的管內，流體之阻力是相當大而不能被忽略的。

右圖簡示實驗裝置，供水槽上不同高度處各開了小洞，且用抽水馬達不斷的將水注入供水槽中，透過馬達電壓或水流開關(水龍頭)之調整，使供水槽的水位高度維持固定，並藉由開放不同高度的小洞，來調整水位的高度。

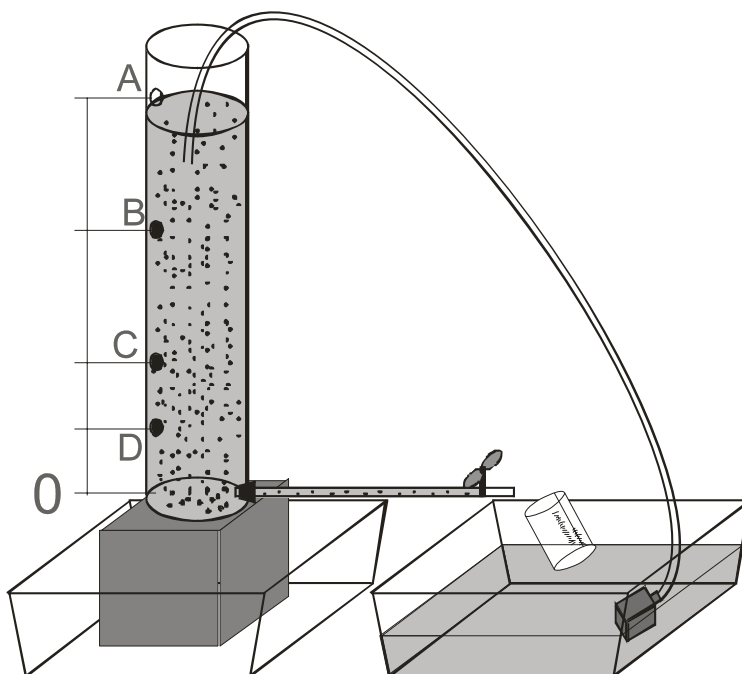


圖 4

(如果沒有抽水馬達，也可以指派一位組員專門負責用燒杯穩定地倒水進去來維持水位高度，並不會嚴重地影響實驗結果)

簡單來說，流體在流動過程中會有流阻，就像電流的流動會遭遇到阻力一般(就是電阻)，有關流體流經小圓管的描述，泊醉定律 (Poiseuille's Law) 有定量的公式如下： $i_r = \Delta P / R_r$ ，其中 ΔP 為小圓管兩端的壓力差， $i_r = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 為流經小圓管的體積流率(單位時間流過的水容量)，而 R_r 就是流阻。此公式看起來就像歐姆定律 $V = IR$ 。而流阻與幾個

相關參數之間的關係如下式： $R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$... 其中 $L =$ 小圓管的長度(cm)， $r =$ 小圓管的半徑(cm)， $\eta =$ 水的黏滯係數($\frac{g}{cm \cdot s}$)，而 $\Delta P =$

小圓管兩端壓力差 $(\frac{g}{cm \cdot s^2})$, $(\frac{\Delta Q}{\Delta t}) =$ 體積流
率 $(\frac{cm^3}{s})$

二、實驗要求

1. 如圖 4 所示，大圓柱型容器內裝水，下方開口接玻璃管，水由玻璃管口流出，隊員集思廣益，討論有哪些變因可能會影響水流 i_f (每秒流出的水量)，至少想出七種可能變因。
2. 選擇一個變因做為操縱變因(Independent variables)，例如玻璃管的管徑，安排適合之實驗步驟與方法，進行實驗，探討玻璃管的管徑如何影響應變變因(Dependent variables)水流 i 。實驗過程中記得要注意控制其它所有變因(Controll other variables)。
3. 再選擇另外兩項變因做為操縱變因，重複進行上述實驗。
4. 將伯努力方程式與帕穗定律結合，推導出要如何從水流 i_f 來求水管的流阻 R_f 。
5. 你是否能從實驗數據歸納出泊醉定律？能否從實驗數據歸納出流體流經小圓管的流阻 R_f 的公式？最後則計算黏滯係數。
6. 合理解釋實驗值與理論值的差異，並且討

論本次實驗裝置中流體之位能變成動能與熱能(阻力)的比例對實驗誤差的影響。

三、主要材料(如表 1)

四、預習內容

1. 由伯努力定律、連續方程式、與泊醉定律推導出要水流 i 與水管流阻 R_f 的關係。
2. 設計實驗步驟，以利用泊醉定律 (Poiseuille's Law) 得到黏滯係數。

實驗公式之推導

上述改良過之流阻與黏滯係數實驗公式，利用能量守恆，即可輕易推導而得。當水由高處(水面)流到玻璃管之出水口，由能量定律 $\Delta U = \Delta K + \Delta W$ ，其中 ΔW 是水阻所消耗掉的負功。

$$\begin{aligned}\Delta W &= F_1 \Delta L_1 - F_2 \Delta L_2 = P_1 A_1 \Delta L_1 - P_2 A_2 \Delta L_2 \\ &= P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = \Delta V \Delta P\end{aligned}$$

$$\text{由 Poiseuille's law } i_f = \frac{\Delta P}{R_f},$$

$$\Delta W = \Delta V (i_f R_f)$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= \Delta mgy_2 - \Delta mgy_1 = \rho \Delta V gy_2 - \rho \Delta V gy_1 \\ &= \rho \Delta V gh \quad h \text{ 為高度差}\end{aligned}$$

表 1

器材(規格)	數量	器材(規格)	數量
壓克力筒	1	量筒	1
燒杯	2	碼表	1
玻璃管(6 號, 短)	1	玻璃管(6 號, 長)	1
玻璃管(7 號, 短)	1	玻璃管(7 號, 長)	1
玻璃管(8 號, 短)	1	玻璃管(8 號, 長)	1
游標尺	1	尺	1
水盆(大)	1	水盆(中)	1
橡皮塞(1 號)	2	橡皮塞(2 號)	3
溫度計	1	抹布	1
水	自取	鑽孔器	共用

$$\Delta K = \frac{1}{2} \Delta m v_3^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta V v_3^2 - 0$$

$$= \frac{1}{2} \rho \Delta V v^2 \quad v \text{ 爲出水口之水流速}$$

$$\text{得 } \rho \Delta V g h = \frac{1}{2} \rho \Delta V v^2 + \Delta V (i_f R_f)$$

兩邊除以 ΔV ，即得

$$\rho g h = \frac{1}{2} \rho v^2 + i_f R_f \quad (1)$$

$$\text{再由水流之定義 } i_f = \frac{dV}{dt} = A \frac{dL}{dt} = Av$$

$$\text{得 } v = \frac{i_f}{A} \text{ 代入式(1)}$$

$$\text{得 } \rho g h = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{i_f}{A}\right)^2 + i_f R_f \text{，經由實驗測量 } i_f \text{，就可以由此計算得 } R_f \text{。}$$

不是水流中有一個歐姆定律，而是 電流中有一個泊醉定律

上述之改良過之流阻與黏滯係數實驗雖然看起來還是有些複雜，但如果物理教師能適當地加以引導，且避開太難的理論的推導過程，例如重複泊醉等人就是透過實驗，來求得水流與水壓和水阻的關係，以及水管之水阻與水管之長度、半徑、水之黏滯係數的關係的經驗，而不是透過理論的推導來求得泊醉定律，就不會讓學生覺得非常困難了，這個實驗不需要用到微積分，因此也很適合高中物理的教學。

如果我們有參考科學史，就會發現歐姆在發展出後來所謂的歐姆定律的過程中，其實是參考泊醉的研究，把導線中的電流，想像成圓管中的水流，才能過研究出歐姆定律

的，因此我們可以很篤定地說，並不是水流中有一個歐姆定律，而是電流中有一個泊醉定律。

事實上，電子是很抽象的概念，電流的概念也因而是非常抽象的，電流根本無法直接觀察或測量，更明確地說，所有電流的測量都是間接的(試問安培計測到的指針偏轉角度是什麼)。因此，唯有透過水流模型，學生才能夠真正理解電流，以及電壓、電阻、歐姆定律等非常抽象的電學概念和定律了。當然要注意的是，並不是一般泛泛之論的水流的比喻(如水溝裡的水流)，而是圓管中水流的類比或模型，這也是我們在《應用有效的類比和模型來幫助學生學習電學》的研究中，設計很有效的封閉水流來幫助學生學習電學的緣起。

層流與層流現象的觀察

要理解泊醉定律的成因和理論的推導過程，則必須先了解流體在流動時的不同狀況。一般而言，流體可區分為穩定流體(Steady Flow)、非穩定流體(Unsteady Flow)、及紊亂流體(Turbulent Flow)，這些不同狀況的流體，基本上可以用雷諾數(Reynolds number) $N_R = \rho v r / \eta$ 的大小來區分。流體速度不是太快而且密度保持一定的水流，就是屬於穩定且不可壓縮的流體。流體的雷諾數 N_R 值小於 2000，就會是順流(laminar)，如果 N_R 大於 3000，就一定會變成湍流(turbulent)。3000 > N_R > 2000 時，流動不穩定，可能在層流與湍流之間轉換。

當流體以一穩定的速率在一長而平滑的圓管內流動時，是呈流線型的流動，流體的每一層都與管壁保持一定的距離。另外，流體的中心部份也都一直保持在管子的中央。這種流體流動的形式稱為層流。這與亂流，

即流體在管子內往任意方向流動，同時不斷的混合在一起是截然不同的。

有關層流現象的觀察，可以使用黏滯係數高的流體(例如白膠)，置於漏斗使其流入垂直置放、事先充滿此流體的透明壓克力管，且用有顏色的油漆在流體中做水平記號，當重力使流體向下流動時，即可觀察到層流現象，管中央的流體的流速遠大於管邊緣流體的流速，且速度與管壁的距離成正比，流體在圓管中流體的情形好像是一層接一層地有不同的流速。

再論血流和物理課程

根據生物物理學家王唯工教授在其曠世巨著《氣的樂章》一書的論述，人類十大死因裡，十之八九，都與血流和血液有關，可見其重要性。

血液在血管中流動的情形，其重要性應該是不言而喻，但必須是真正的理解，才能有效的應用。我們對血液在血管中流動的最基本理解，至少應該知道這是泊醉定律的直接應用。人體血管主要由多種大小各異的動脈、微血管、和靜脈等串聯和並聯所形成的

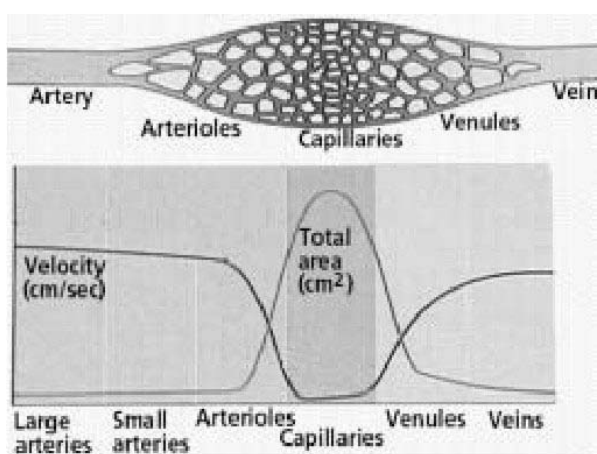


圖 5

一個複雜的系統，圖 5 簡要整理血管的形狀要分佈，整個來說，微血管的總截面積要比動脈和靜脈大很多，但流速則小很多，這些當然都是起因於泊醉定律，至於動脈、靜脈和微血管的總流量，根據連續方程式，串聯線路的流量要相等。

根據泊醉定律的第一公式 $i_f = \Delta P / R_f$ ，即血流量與阻力成正比，與血壓成正比。身體各部份所需的養分、氧氣、和其它消化後的廢棄物，都需要透過血液來運輸，當血流量不足時，身體各處的細胞或系統就會發出訊號給心臟，請其加加油，通常心臟能做的就是加壓來增加血流量了，而這當然也就高血壓的主要原因了。

高血壓起源於心臟對於血流量減少時需要增加血流量的反應，而血流量的減少當然就是起源於血管阻力的增加，根據泊醉定律的第二公式 $R_f = 8\eta L / r^4$ ，即影響血管阻力的原因主要為血管的半徑 r 和血液的黏滯係數 η 。不過這個公式可能讓初次學生的學生嚇一跳，流阻或血管的阻力，竟然與血管半徑 r 的四次方成反比，不同於歐姆定律第二公式中導線電阻與截面積(即半徑 r 的二次方)而已，每一位學生應該都很能體會血管半徑變小所造成的嚴重後果了。那血管半徑為什麼會變小呢？通常是吃得太油膩所引起的，這可以說是常識。血管阻力變大的另一個主因是不健康人的血液的黏滯係數 η 變大了，其實就是血液的品質變差了(轉譯成白話就是很多毒素)，而其起因也是多數最初起緣於飲食多於其它病變。

清楚了高血壓和許多心血管疾病的物理和化學成因，解決知道應當不難。然而怪異的是西醫雖然都熟讀泊醉定律、血流阻力的原理與血液的問題，可惜解決之道都是物理所謂的暫時解，而不是穩定解或根本解，例

如高血壓藥不是血管擴張劑，就是使血液暫時變不稠(即暫時降低血液黏滯係數 η)的藥，難怪得了高血壓後通常就代表要吃一輩子的降高血壓藥。從教育的觀點，這實在不是很有智慧的作法。

變化球

職業棒球投手投出來的變化球，乃是伯努力定律的應用，每位物理教師教到流體力學時，都會教到的這些內容，不須在此多所贅言，但可惜的是，幾乎千篇一律的只舉棒球的例子。事實上，凡是球類運動，都會涉及伯努力效應，當然球速要相當快，伯努力效應才會比較明顯。除了棒球的例子之外，乒乓球、網球、和高爾夫球(特別是第一桿)，都是顯著的例子，其中乒乓球和網球也為一般人所熟悉，物理教師也可以都舉這方面的例子。

圖 6 所示，乃是非常重視日常生活應用之 Giancoli (2005) 普物教科書裡，在拋體運動這一章的一個題目，一個職業網球選手輪到要發球給對手，首先他必須把球發進發球區裡，即圖中球員對角 7.0 m 長之方框內，否則就失去一分。其次他的球速必須夠快，例如時速接近 100 哩，才能夠讓對手產生壓力，否則就失去了發球應有的優勢了。像這樣的球速，如果發球的角度稍低，就會觸網失分，如果發球的角度稍高，就可能會超過發球區而失分，這個題目就是要計算能夠成

功發球的角度是多麼地小，顯見職業網球高手的技巧是多麼不容易。

在實際的網球比賽時，不管是發球或後續的擊球，球前進的路徑是用拋體運動描繪的平飛球的比例並不高，多數是要打有旋轉(spin)的變化球，例如發 top spin 的變化球，相對於平飛球而言會有更多下降，這就好像是棒球中的下墜球，它可以讓球員有更多的角度可以成功地發球，球落地反彈時也有比較多的變化，會讓對手不好接，雖然球速會比快速直球慢些。在回擊時的抽球，多數也是抽 top spin 的變化球，或更複雜的其它變化球，平飛球非常容易過低觸網或過長出界。

打乒乓球的人更多，除了殺球可能是用拋體運動描繪的平飛球之外，其它都是屬於必須運用伯努力定律的變化球。除了棒球之外，物理教師可以多舉例說明，許多球類運動多數是在玩運用伯努力定律變化球的遊戲。

球類運動表現考驗物理教師的應用能力

每一種運動，特別包括球類運動，都不可能違反物理學原理(特別是指力學定律)。換句話說，要把球類運動打好，或者說要提升打球技術，工夫都是花在更正確地運用物理學原理(或力學定律)。這也是《牛頓打棒球》一書的主要內容。

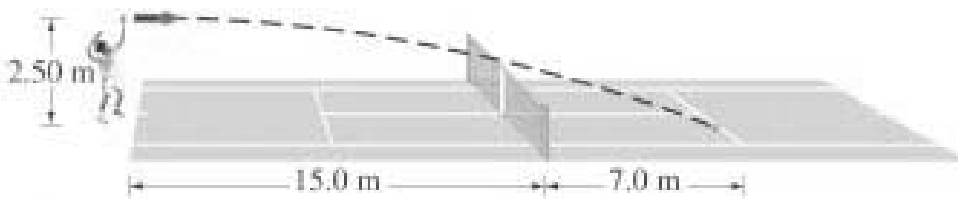


圖 6

如以上節的打網球來說，在理解進階網球技術多數都在玩運用伯努力定律變化球的遊戲之後，就是要把發 top spin 變化球和抽 top spin 變化球的技術練好，而這些技術也當然都是要用到力學裡有關動量和轉動的原理，因為發球和抽球的動作都和轉身有密切的關係，切球時也都在運用轉動的原理。也許如《牛頓打棒球》一書所寫的，球打得好的人並不一定能夠說很多物理的術語，但一定得把物理定律充分發揮。在另一方面，一個好教練一定要懂很多物理，因為他通常不只是一要示範正確的動作(合乎物理定律)而已，還要回答「好」學生的發問：為什麼要這麼做？好教練要說得出解釋，才能讓更多學生因理解而把動作做得更正確，而非只是大聲回答：「別問這麼多！照我示範的方式做就對了！」不問的學生，如果一開始動作做好，就可能很難進步，因為他根本不知道錯在那裡，也就無從改善起。

我們常聽到說要把物理教好，就是要多做實驗、多學生活中應用例子、以及多讓學生討論。球類運動經常是力學定律的最好例子，學生覺得有趣，也更容易體會所要學的物理概念或定律。

從理論上來說，在運動(特別是球類運動)方面，物理系的學生或物理教師，平均來說，應該比其它學門的人更喜歡球類運動而且表現得更好。如果調查結果不是如此，那就會成爲「學物理的人多數只強於空談物理理論，弱於實際應用」的更外一個佐證了。

水流抽氣幫浦 伯努力定律的有趣應用

物理教師在教到大氣壓力、聲音不能在真空裡傳播等單元時，都需要抽真空，運用



圖 7

波義耳定律的 Mechanical pump 抽氣機是最常用的設備，不過有時使用「水流抽氣幫浦」可能更有趣，或更適合國中理化老師採購和使用。

圖 7 所示爲一典型的水流抽氣幫浦的外觀，使用時把它的上端較粗的口徑處和水龍頭的出水口相接，其直下方的開口爲水流出口，側方的連通管則連接到欲抽氣的容器上。當水向下流入水流抽氣幫浦時，其內部的導流構造，使得水流經窄管沖下，由連續方程式，造成水流速度變大，而在其近旁的空氣分子的運動速率也會加快，由伯努力定律可知，在其側管內靠近水流的氣體壓力應較其外側的氣體壓力低。因此使得側管的氣體不斷地向水流處移動，而產生了抽取其它容器中氣體的功能。

襟翼--伯努力定律的應用

伯努力定律的最大應用，當然是飛機機翼的構造，使得飛機在前進速度達到某一個臨界值時，由伯努力定律效應造成的升力，大於飛機的重量，才能夠離地起飛的，這是連學生都耳熟能詳的，不須我們贅言，但我們還是有兩個建議：第一，不是理論談一談或是定性的介紹而已，而是應該做些定量的

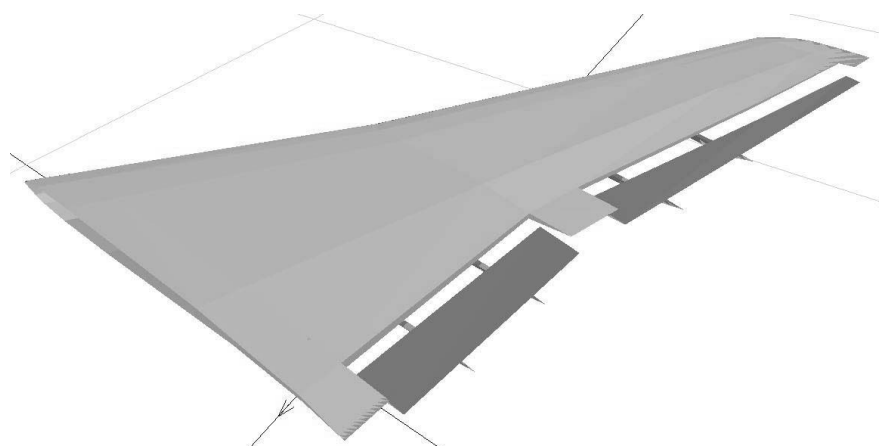


圖 8

實驗，至少放一些定量實驗的影片給學生看，上網搜尋就可以找到相關的影片。

第二的建議是有關飛機襟翼的介紹。如果機翼的構造(外形下方接近水平上方有相當弧度)是固定的，則控制升力的方法只有改變飛機前進的速度。要在同一速度時改變升力，那就得改變機翼形狀，這就是襟翼的作用了，圖 8 所示的襟翼，乃是向外延伸的機翼，以液壓連桿構造控制其收放。可以增加機翼面積。在下述的狀況下，飛機需要襟翼的輔助。1.飛機在起飛時，希望以較低速度下獲得較大升力。2.飛機在降落時，希望以較低的速度維持滯空能力。3.飛機在低空盤旋，希望能以較低速度獲得較好的操控能力。

物理教師如果能放襟翼的影片給學生看，或建議學生坐飛機時，能坐在中間之後靠窗的位置，觀察飛機在升降時機師操控襟翼的情形，對學生的學習是很有幫助的。

結語

流體力學是物理課程裡很有趣的一章，在生活上也有很多的應用，物理教師也很容

易安排讓學生做實驗或做示範實驗，應該是很容易教的單元，但若深入檢視，就會發現本文所提到諸多有關流體力學的教學困境，學生的學習都只是很膚淺的表面現象，多數只學到背誦的知識而已。

針對流體力學的教學困境，本文提出許多突破困境的教學建議，希望能夠拋磚引玉，吸引更多物理教師來正視流體力學的教學問題，進而一齊來設計更好的學習活動，使流體力學的教學能夠達到更好的境界。

參考文獻

1. 王唯工(2002)：氣的樂章，大塊。
2. Adair, Robert K. (1993). 牛頓打棒球，牛頓。
3. Benson, Harris: (1995). University Physics. Revised ed.
4. Giancoli (2008). Physics for Scientists & Engineers, with Modern Physics, 4th edition, Pearson Education.
5. Rogers, E.M. (1960). Physics for the inquiring mind: The methods, nature, and philosophy of physical science. Princeton,