

壹、前 言

任何一種運動項目都是在流體中進行且受其影響。空氣和水是運動項目中最常接觸到的流體，例如高空跳傘選手為減緩下降而將身體在空中水平展開以增加空氣阻力。又如百米選手為了克服空氣阻力向後的作用力而將身體向前傾

。這些都是屬於人體在空氣中運動所受到的影響，流體對運動所產生的影響有大有小，例如擲鉛球，跳高等的影響甚小，幾乎可以不計。然像射矢、棒球、高爾夫球等其影響是十分明顯的。

水的密度較空氣大，因此在水中運動其阻力自然較大，例如划船、游泳和滑水等。吾人必須瞭解流體的特性才能進一步想法去克服它或利用它的特性，

流體力學與游泳

張 至 滿（私立中國文化大學體育系主任）



使得運動成績更上一層，游泳技術的理論與方法是建立在流體力學和運動生物力學的基礎上。

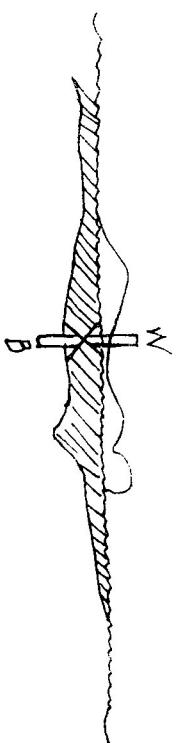
本文先就人體在水中的種種特性加以說明，然後敘述如何利用和避免在水中運動時所產生的推進力和阻力，有了基本概念後，游泳推進力理論的演變和影響游泳的生物力學因素就不難瞭解了，最後本文略述目前有關蛙式及自由式生物力學的研究結果，期有助益於教練的工作。

貳、靜態漂浮能力

身體在水中的靜態漂浮能力（floatation）不但影響初學游泳者而且亦影響高水準的游泳選手，因為初學游泳的人如能浮在水面則可減少他在心理上的壓力而不必畏懼下沈，因此學習速度較快。浮力好的游泳選手在前進時所遭遇到的阻力亦較小，因為他祇要在向前的推進力下功夫而不必顧慮下沈之憂。根據 Whiting 的研究結果顯示男孩在 10—13 歲之間的靜態漂浮能力最好，13 歲以上則身體比重增加，其靜態漂浮能力遞減甚快。男孩年齡在 18 歲以上的靜態漂浮能力和成人在基本上是沒有多大差異的。女孩最好的靜態漂浮能力是在 10—13 歲及 15—17 歲之間。身體是否會浮在水面乃視比重而定，而人體比重之大小與體內脂肪之多寡、肺活量之大小以及骨骼組織的密度大小有密切的關係，這項研究結果在游泳教學上的啓示已十分明顯，亦即最適學游泳的年齡男孩應在 10—13 歲之間，而女孩則在 10—13 歲及 15—17 歲之間，若初學游泳的學生錯過這些最適年齡，則在教學上可利用浮板等器材輔助之，以增加其浮力，或先教打水以避免腿部下沈，此亦不失為補救的好辦法。

參、浮力、密度與比重

身體是否會浮，在流體力學上的解釋又如何呢？假設一游泳選手俯臥浮在水面上並保持平衡不動的狀態，如下圖所示：



圖中選手本身具有重量（W）然她不下沈必有另一向上的垂直力量作用在她身上才能使身體維持平衡的狀態，這個向上的垂直力量叫浮力（B, buoyant force），身體能在水面保持平衡，作用在選手上的浮力必定等於選手本身的體重，由此可知若體重大於浮力則身體將會漸漸下沈，反之若體重小於或等於浮力則身體會浮在水面上，因此身體只有在體重小於或等於浮力的情況下才會浮在水面上。

當游泳選手俯臥在水面上呈平衡狀態時，他排開一定量的水（如上圖斜線部份所示）。此排開水的重量即等於浮力，這就是衆所週知的阿基米德原理，這也是他在洗澡時發現的。理論上，作用在沈於水中圓柱體下方的浮力（B）等於液體壓力（P）與底部橫截面積（A）之乘積。即

式中 B = 浮力 P = 液

周子賦集卷三

A = 1 柱體的橫斷面積

上卷

卷之三

在體浸在水中之體積(V_i)

$$P = h d w \dots \dots$$

$$Vi = hA \dots$$

將公式②與③代入公式①得

$$B = dw \quad Vi \dots \dots \textcircled{4}$$

④ 鄭示圓柱體的浮力等於水的密度

B. buoyancy factor) 若這個比率愈近似於1則選手愈容易浮在水面上。若比率为大於1則會浮，小於1則沉入水中。若將浮力因素以方程式表示之

假設該選手浸在水中之體積 (V_i) 與其本身的體積相等，則公式⑤可縮

寫
爲

公式⑥中水的密度若視爲／則

由公式(7)可知浮力因素為選手身體密度之倒數，通常D₁值非常近於1，若小於1則身體會下沉，選手欲使身體不下沈而要獲得額外的浮力則只有靠打水，因打水所產生的垂直反作用力可使身體浮起。

其所排開水的重量則身體會浮在水面上，比重 (Specific gravity) 即為體重與其所排開水的重量之比。人體的比重與身體的組織有關，而不同組織間的比重亦有所不同，脂肪的比重大約等於 0.8，肌肉的比重約等於 1，骨骼的比重大約在 1.5—2.0 之間。每個人的比重由於各種組織的比例不同而有所差異。此外在肺中的空氣亦影響漂浮能力。因深呼吸後胸腔擴大，身體體積增加，但體重不因深呼吸而增加，兩者比較之下使比重減小因而增加漂浮能力。反之若用力呼氣，胸腔縮小，身體體積減小，比重相形增加致使漂浮能力減小，身體主要組織的比例隨年齡的變化亦有所改變。這個改變直接影響比重，一般而言，年紀較輕或上了年紀的人其比重較小故較易浮在水面上。女子由於其脂肪在身體的比例較男子為高，故其比重較輕而易浮。Carter 及 Cureton 研究運動選手的體格發現游泳選手的體脂肪較其他運動項目的選手為高。

肆、流體阻力與推進力

當鐵餅在空氣中向前飛行時，有兩件事情發生。一為鐵餅周圍與鐵餅進行方向相同之空氣的轉向，一為空氣速度的減緩（此因空氣與鐵餅產生摩擦的緣故）。

由於鐵餅在空中飛行的時候，施力於空氣，根據牛頓第三定律，空氣亦給鐵餅一個反作用力（Reaction）。若將此反作用力分解為其分力，則與原來空氣流動方向平行的分力叫曳力（drag）；因為曳力的關係，使鐵餅向前的速度減緩下來。游泳選手在轉身向池壁蹬足，向前再游時，也是因為曳力的關係而使選手的速度減慢，欲再獲得較快的速度，必須再划水與打水。另外一個分力是與曳力互相垂直的叫做昇力（lift）。例如滑水時，若滑水板維持與水面垂直的話，則由於曳力太大致無法浮出水面滑行。而如果將滑水板放在水底

與水面呈平行，也無法浮出水面滑行。比賽一開始，爲了要很快就浮出水面滑行，滑水板的放置位置必須向前向上，使滑水板的尖端剛好露出水面。惟有如此方能獲得昇力，利用昇力使滑水板升出水面。飛機的機翼也是朝著要獲得最大昇力的方向去設計的。有許多的運動項目都是在設法獲得較大的昇力以爭取較好的成績。鐵餅、標槍、高空滑雪等都是例子。就連賽車也是利用了昇力的原理，將賽車的尾部裝上尾翼，這尾翼的裝法正好與飛機機翼的裝法相反，因此在賽車時可獲得向下的昇力，由於此向下的昇力使車胎與地面穩穩接觸，轉彎時則不必減速，而達到較高的速度。由此可知，昇力不必一定是向上的力量，它可向下亦可向前或向後。如果你到海霸王吃海鮮，留意一下玻璃櫈窗裏的魚，你會發現它們所以能夠前進，也是靠著昇力，如果你還懷疑昇力怎麼會向前的話，試想曳扇左右旋轉何以風會向前吹，你就應該明白了，昇力是最有效力的推進力，否則現代化的輪船是不會用螺旋槳的。

無論生物或機械都可產生昇力，我們游泳當然也可以藉昇力而前進。至於如何利用昇力原理而獲得最有效的前進速度則有待下述。

力減至最低限度，這個阻力，就是前述之曳力。曳力可分為三種：

一、表面曳力
當氣層與飛行中的鐵餅表面接觸時，最內層的分子與鐵餅表面摩擦的結果，使該層氣流速度減慢，而由於比內層氣流速度的減慢，影響到下一層氣流速度也跟著慢下來。如此一層影響一層，直到某一距離之後，氣層不再平行，而呈不穩定狀態。這些受影響的氣層統稱為臨界層（Boundary layer），其中與鐵餅表面平行者叶片流（Laminar flow），即不穩定狀態的氣層叫亂流（Turbulent flow），這整個過程即鐵餅週圍空氣被減緩速度，以及亂流的產生，是由於鐵餅施力於空氣，空氣給鐵餅一個反作用力而產生。此空氣作用於鐵餅的力量是為表面曳力（Surface drag）。表面曳力的大小受四個因素的影響。速度愈快表面曳力愈大，因速度的平方與表面曳力成正比。然而在擲鐵餅或游泳時，我們却不能為減少表面曳力而降低速度，因這與我們從事這些運動的目的相違背。表面曳力與流體的種類亦有關係，然這項因素我們無法改變。另有一項因素會影響表面曳力的是表面積，這對游泳選手而言，也是無法改變的。還有一項影響表面曳力的因素是表面平滑度，表面愈平滑，表面曳力愈小。最好的例子就是游泳選手在比賽時將身體塗油。

除去體毛或剃髮等。Karpovich早期的研究發現，毛製泳衣的阻力要比絲質的來得大。現在游泳選手所穿之泳衣的質料都是十分光滑的，其主要作用即在減少表面曳力。

二、正面曳力 若鐵餅在擲出時其角度與地面成垂直，則空氣在鐵餅的上下兩端分開，無法立即會合，而在鐵餅的後方形成一個口袋。此口袋中的氣流十分不穩定，形成一種渦流（Eddy current），由於渦流而發生低壓；然在鐵餅的正面尚有一高壓，此高低壓之差是為正面曳力（Form drag）。正面曳力受三個因素的影響：橫斷面積愈大，形成的低壓也愈大，其正面曳力因而愈大。是故自由車選手以高速前進時，上身都向前傾；速度滑冰選手亦然，外表形狀也會影響正面曳力。汽車、飛機以流線型設計，是為避免在其後產生低壓區。另一影響正面曳力的是表面平滑度。表面愈光滑，其正面曳力愈大，因光滑的表面容易產生較大的口袋。高爾夫球表面的小洞，其深度是一定的，若小洞的深度加深，打出的距離會增加許多；又如正式比賽用的棒球，其縫合線的數目也是一定的，投手時常搓新球，使球面粗糙，其作用即在減少正面曳力。

三、波浪曳力 當游泳選手在平靜的水面上前進時其前方的水會堆起來，這堆水的後面會低凹下去，波浪就這樣產生了。水受選手施壓變形而產生的阻力是謂波浪曳力（Wave drag）。Counsilman 發現當游泳速度不很快時波浪曳力甚小，然速度增加到某一個程度時，波浪曳力的影響則十分明顯。Alley 實驗結果謂速度到達每秒 6.5 呎時波浪阻力急促上升。一九五〇年代許多蛙式選手為避免波浪曳力將整個身體沒入水中，結果成績十分可觀，如今規則修改每一趟只允許沒入水中一次。游泳時亦需避免身體上下的動作，因這個動作會「造浪」而增加波浪阻力。

伍、游泳推進力理論的演變

早期的游泳推進力理論是夾水前進（Wedge theory），即兩腿用力夾水使水向後退，水的反作用力再作用到選手身體得以推進。Cureton 首先對這項理論感到懷疑，因為只靠單腳或雙腳做其他非夾水的動作，身體亦可有效的向前推進。Counsilman 索性將染料置於水中，發現當夾水時這些染了色的水在腿部周圍打轉而並非向後退。

後來的理論認為選手能夠在水中推進乃與划船用槳的動作一樣，此即所謂的正面曳力理論（drag theory）。這個理論的解釋是，為使身體向前進，必須將水向後直推。選手用力的方向與前進的方向平行但方向相反，即欲利用正面曳力達成有效的推進，手掌必須打平不能彎曲，同時直線向後划水。後來 Counsilman 發現有效的推進是無法直接將水直線後推的。因為一旦水被向後推，欲再推已向後流動的水必須花費相當大的力量，又此時水流方向與手用力方向相同致使相對速度減小，導致推進力顯著的降低。這個現象與我們在逆流中游泳互相類似。觀察游泳選手划水的軌跡顯示他們都採用 S 型或非直線的划水方式似乎可以支持 Counsilman 的論點。由於這個關係 Counsilman 認為昇力才是游泳最重要的推進力。

早期在水中拖選手研究曳力大小的實驗，發現在低速進行時腿部通常會沉下，當拖速增加時腿便昇上來。根據 Alley 和 Counsilman 的記錄，拖速在每秒約 2 呎時昇力即開始產生。若選手完全利用昇力做為推進力的話，其手掌與水流方向必須成某些角度。就像螺旋槳推進器一樣。Schleihauf 目前正進行以手划軌跡，手划速度，與手划角度的實驗來證實昇力是游泳的主要推進力。Barthels 以攝影法進行研究蝶式的推進力，認為曳力和昇力二者同時被利用作為推進力，亦即推進力是曳力和昇力二者的合力（resultant）。她指出蝶式手臂入水後向內的動作是以昇力做為主要推進力，然雙手到向後推的部份則以曳力做為主要的推進力。

陸、影響游泳的生物力學因素

游泳選手比賽的目的是要以最快的速度去完成與賽的距離，速度愈快則成績愈佳。比賽時所游出的平均速度（average Speed）等於平均划長（average Stroke length）與平均划數（average Stroke frequency）之乘積。平均划長可由手划的完全週期數與所划距離求出。例如仰式選手以 12 秒時間完成 60 呎的距離，總共划了 10 個完全週期，則其平均划長等於 $60\text{呎}/10\text{週期} = 6\text{呎}/\text{週期}$ ，亦即手臂每划一次平均前進 6 呎。平均划數則由手划之完全週期數與其所費的時間決定。以上例為準則平均划數等於 $10\text{週期}/12\text{秒} = 0.83\text{週期}/\text{秒}$ ，亦即每秒划不到一個完全的週期。此選手的平均速率等於 $6\text{呎}/\text{週期} \times 0.83\text{週期}/\text{秒} = 4.98\text{呎}/\text{秒}$ 。划長全視推進力之大小與阻力之多少而定。就自由式與仰式而言，手是主

要的推進力，蛙式的推進力以腿大於手，而蝶式的手與腿似乎同時重要。划長受三種阻力的影響而會減短，此即正面曳力、表面曳力和波浪曳力，影響正面曳力的因素已如前述，而其中可避免的是減少橫斷面積，通常調整選手在水中的傾斜姿勢，或腿打水的範圍即可。頭抬得太高或腳沉得太低均會使正面曳力增加。

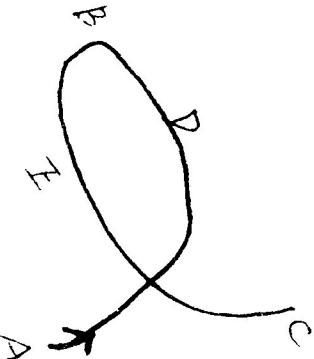
划數視用力期與恢復期的時間而定。所有四式的用力期皆較恢復期的時間為長。選手可從下列三個方法去修正用力期與恢復期的時間：(1)改變手臂形狀，即減少手臂以肩為軸的轉動慣量(2)調整動作範圍，若動作範圍大則該期所需時間相形增加，及(3)改變力距之大小，力距愈大所需時間愈短。

划長與划數是相互依賴的。為增加划長，用力時間自然增加，但划數會相對減少。為增加划數，用力時間自然減短致使划長減短。East 研究結果謂欲使成績更上一層應在划長下工夫較為有效。

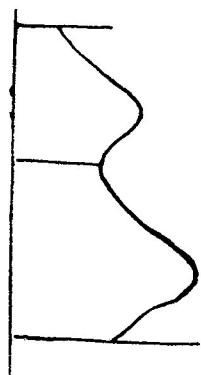
柒、蛙式生物力學

利用蛙式手臂所產生的推進力是四式中之最簡單者，然其中尚有許多問題，諸如划水是向後或向旁邊呢？手肘是否靠近肋骨呢？划水應長划或短划呢？又手划水的速度是等速抑是加速？欲客觀回答這些問題必須利用水底攝影取得資料然後做定性與定量生物力學分析。以下就手的划水軌跡，速度與角度加以探討。

將小燈泡置於選手指尖，然後將攝影機放入池底，攝得選手正面划水的軌跡，如下圖所示，從 A 到 B 是向外，從 B 到 C 則向內。由此軌跡中可看出蛙式划水並非向後拉（曳力理論）。若有向後拉的成份那只有 D E 間的距離而已。



手划水一週期的速度曲線是呈不等雙峯分配。典型手划速度曲線如下圖所示。



向外划 向內划

矮峯出現在向外划至三分之二的地方。手划速度最快的地方出現在向內划即將完成之時。峯谷的速度最慢，此時手為正要由外向內划之際。從這個手划速度曲線可以看出手划水不是在等速的情況下進行的而是向旁邊且有二個快速期。

有些選手的划水軌跡，手划速度與前述一樣接近理想狀況，但其前進速度甚慢。這是由於不理想的的手划角度致使無法產生較大推進力之故。機翼能產生最大曳力的角度是 18 度。然游泳選手的手划傾斜角以 37 度為最理想，其間的差異乃是手的形狀與表面結構與機翼不同之故。

划水時若將手肘拉向身體肘骨旁是所謂的長划 (long Stroke) 其所得之正面划水軌跡會漸近於圓形。以致手的傾斜角增大而導致曳力的減小。選手應避免如此長的手划動作，手划動作應以不過肩之後，同時雙肘要離開肘骨。

許多選手雙手划水範圍不超過雙肘展開的範圍，於是在向內划時無法在短的距離內加速而獲得較大的速度，為使手向內划時獲得更大的推進力，手划範圍應寬點。Counsilman 建議雙手划水之寬度應超過雙肘展開的寬度。

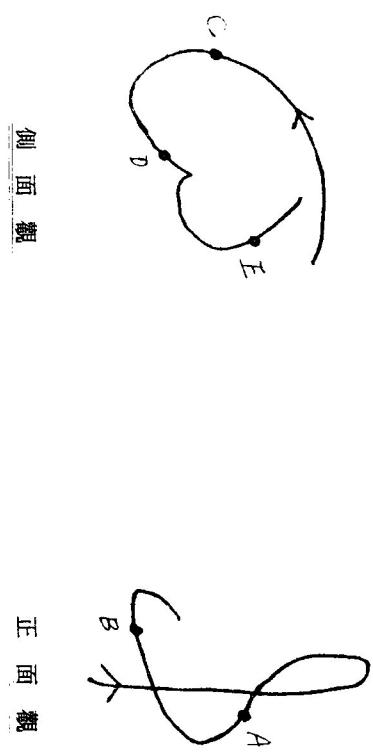
捌、自由式生物力學

自由式是以手臂划水為其主要的推進力。Allen 指出手佔自由式推進力的百分之八十五，Counsilman 謂：「就多數自由式選手而言手臂是僅有的推進力。」這句話似乎說得過份些。然他強調手臂在自由式中所扮演的角色是可

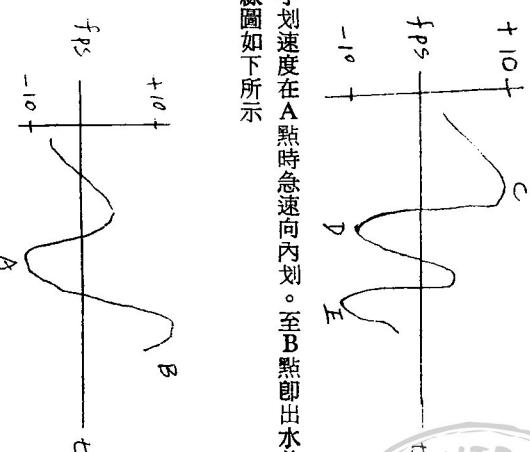


以想像得到的。以下就自由式手划軌跡、速度及角度予以簡述。

利用在水底的攝影機可攝得選手指尖小燈泡的軌跡。若將此影片沖洗出來，在放映時將每一個畫面的光點予以連接起來可獲得如下的軌跡。



正面觀的手划速度在A點時急速向內划。至B點即出水前也快速向外划。其手划速度曲線圖如下所示



根據手划軌跡我們不難知道手應該向那個方向划。又依手划速度曲線我們亦知在那個地方應用多少力量。

這裏必須重申一點就是選手的划水軌跡和速度可能與理想的狀況相差無幾，但仍然無法獲得好的成績。就像學生學拳有架式而無功力。為了獲得有效的推進力，手划角度是不容忽視的。試想機翼要是裝錯角度，堪飛多高？自由式手划軌跡的變化由上可知，至少是兩度空間的，即上下左右。因此最適手划角度亦與時俱變。其目的乃在找到靜水以得到最大的有效推進力。

玖、結語

游泳技術的演變是所有運動項目中最迅速者。一九七〇年代以前自由式的恢復期只要其手肘提出水面的高度，就可分辨澳洲式或美國式，然今日已完全改觀。用力期的推進理論變化更大，欲瞭解其中的道理，對流體力學應有基本的概念，除此之外運動生物力學的運動學與動力學亦不能等閒視之，唯有貫通這些理論，創造新的游泳技術才有希望。