

# 旋，還是不旋 變化球問題

一個只投慢速球的投手，  
如何能在美國職棒大聯盟生存？

許多世界一流的排球選手，  
為何接很慢的發球時還會漏接？

李志揚 陳政宏





## 兒時記憶

不知你是否和作者及同一世代在台灣長大的孩子一樣，對於棒球所帶來的魔力是不具任何免疫力的。深夜兩三點起來觀看電視衛星立即實況轉播，已成為難忘的兒時記憶。

當然隨著觀看的興奮，很快就引起了身體力行的夢想。為了實現這個夢，我們與鄰居的兒時玩伴們一樣，每天帶著破舊不堪的紙手套參與街頭巷尾的即興比賽，變化球三個字是必勝的魔法，卻也是遙不可及的神話，即使我們再怎麼努力地投，也無法領悟出其中的道理。這個技術上的停滯倒是可以諒解的，畢竟那時我們都是十歲左右的少年。幾年之後上了大學或研究所，對棒球的熱愛似乎又湧上來，但已把它當作是休閒運動，兒時那種夾雜著民族情緒或神話情結的棒球夢早已隨風遠去！

## 旋或是不旋

棒球裡，投手是防守的第一關，而投手厲害的武器之一就是變化球。變化球有很多種：曲球、反曲球、滑球、下墜球、伸卡球（sinker，日文讀音類似sin-ka，演變成台灣俗稱的伸卡球）上升快速球和近幾年頗為矚目的切球（介於滑球與直球之間），其常用者如紐約洋基隊著名的救援投手李維拉（Marian Rivera）等。

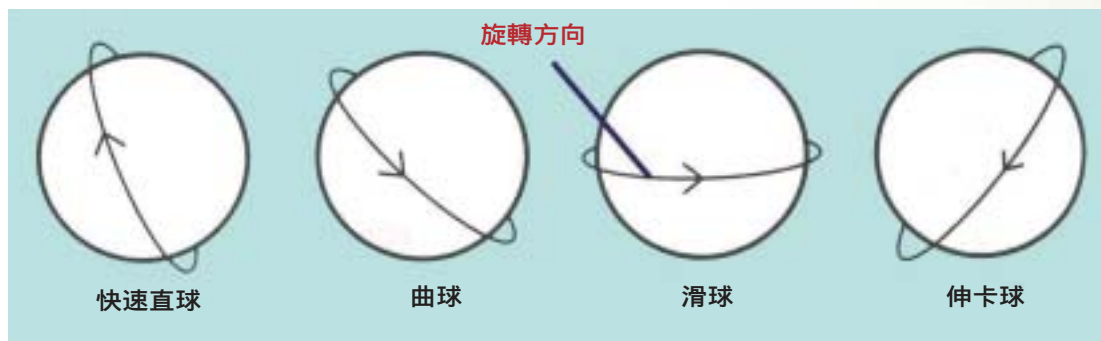
這些變化球因為投出時的手臂或手指動作不同，而造成不同的角度與弧度的差異。例如由投手方向看去，下墜球是使球的上側向前旋轉，而

且幾乎沒有側向的旋轉。右投手的滑球則是使球的右側向前旋轉，這會讓球偏向投手的左側；反之，若是讓球的右側向後旋轉，則會讓球偏向右投手的右側，成為反曲球。至於曲球，右投手要讓球的右上側都向前旋轉，也就是介於下墜球與滑球之間，像轉門把的方式轉手腕，這會使球向右投手的左下方偏去。

有時棒球或壘球被擊出後，我們也常常看到球的行進方向會偏移，而當時可能並沒有風，這時球的路徑會改變也是基於相同的原理，球在接觸球棒的瞬間受到球棒所施的扭力，使得打出去的球旋轉，因而在空氣中受到側向力。由於打到外野的球飛行時間較長，如果這種球旋轉的方向是球的前側由下往上，常會使球飛得較看起來的樣子來得遠，容易造成外野手誤判落點的遠近。

如果球旋轉的方向是左右旋轉，則較不會產生判斷錯誤，但是球旋轉的強弱卻很有可能造成界外球、沿邊線二壘安打或全壘打的重大差別。厲害的打擊手朝外角方向推打時，更可以利用這原理，使球飛向邊線與二壘間的方向，但是讓球向界外的方向旋轉，於是球飛過內野手之後會向邊線的方向偏行而落在邊線附近，再向界外滾行。除非外野手恰巧站對位置，否則通常得跑到界外才能拿到球，打者因而爭取到不少跑壘的時間。

此外，打排球時也有類似的情形出現。最近世界一流的排球隊伍，無論男女，都很流行跳躍發球，以求增高擊球點，使對手較難接球。在跳躍發球時，由於擊球點已經超過網高，發球者可



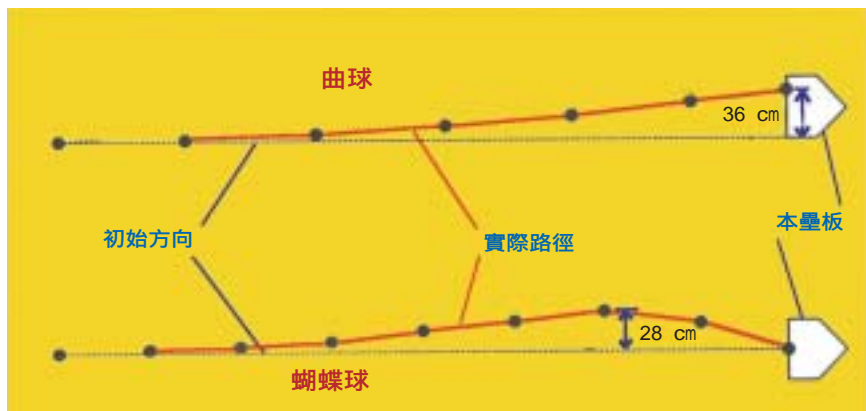
從打擊者方向看過去各種右投手變化球的旋轉方向



http://www.fivb.org/

古巴女排18號芭蘿絲 (Zoila Barros) 的身材高大且跳躍發球威力強，下墜快，常令對方接球措手不及。

**典型的曲球與蝴蝶球的路徑** 曲球可以從內角偏到外角，偏移達 36 cm 之多。而蝴蝶球先向一方偏移也可達 28 cm 之多，似乎像是壞球，然後快到本壘板時才又忽然偏移回來，令打者措手不及，或是無法擊中球心。

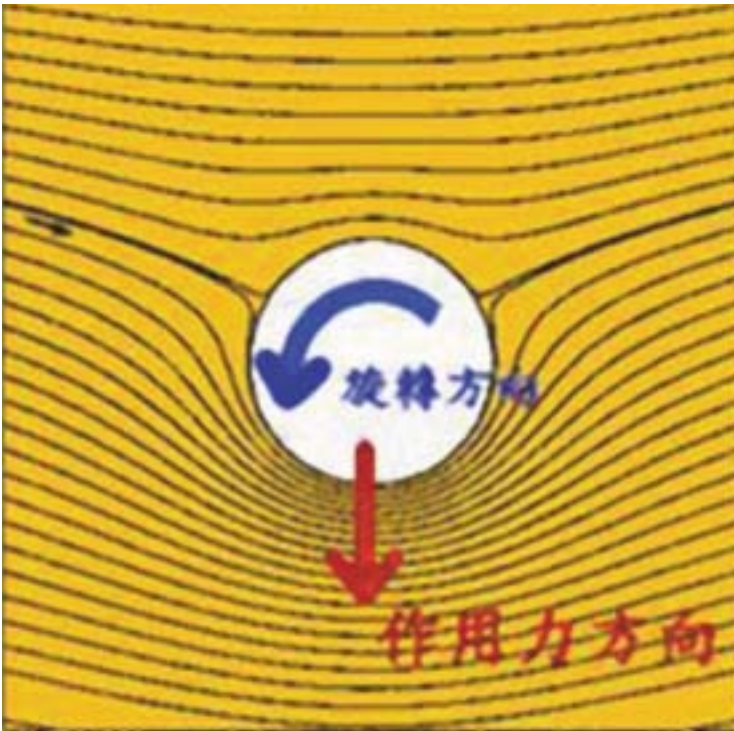


以把球水平或略向上擊出，但是擊球速度很快，並且加上手腕用力扣球，讓球產生上緣向前轉的強力旋轉，使球如同棒球的下墜球般，比沒有旋轉時更快落地，故對手即使撲倒在地還是構不著球或接歪掉。殺球時也會有類似的情形發生，只是球速更快，飛行時間更短，路徑的偏折不是那麼明顯。

其實排球活動是相當立體的，除非像棒球轉播般，一場比賽用上十幾台攝影機，否則像現在一般電視轉播只用六台攝影機，角度又多由高處往下拍，觀眾是不容易看清楚球的路徑變化之大，還會納悶怎麼一流選手的接球如此差勁。

相對於前述的變化球，另一種廣為球迷津津樂道的是近乎不旋轉的變化球，莊勝雄的彈指球和郭泰源的指叉球都屬於這一類。仔細想一想，要把一顆棒球迅速地投到18公尺外的捕手手套裡而不帶什麼旋轉，似乎不是件容易的事，更不用說進入好球帶並且讓打者揮棒落空。然而，這類球真正令人著迷的地方在於它難以預測的行徑，不僅打者猜不著，連投手與捕手也不知道球會怎麼跑！許多彈指球因此被稱為蝴蝶球。

相信許多棒球愛好者和筆者一



勢流模型中，一個逆時針方向旋轉的球體，對由左向右流的流體所改變的流線型態。圖中明顯可見下方的流線較密，表示其壓力較上方小，因此會受到向下的作用力。

及流動是非旋性的。在這樣簡化的模型之下，我們可以用一些不是很難的數學技巧，解出所謂的流函數 (stream function)，或者是說我們就能由這求取流場中各點的速度，進而得知壓力與其他變數。當然，在這些假設之下，我們忽略了黏性摩擦力與紊流的可能及影響，不過可以藉此了解其他作用的效果。

旋轉的球在二維流場裡可以被簡化成圓柱體，這假設改變了原有模型，但不影響其流體的基本型態。這是一個古典的勢流問題，因為它有特殊的解析解，在某些狀況下可以用紙筆求得，並不需要靠近代的快速電腦幫忙計算。解這流函

數的邊界條件是，在旋轉的球表面上，流體的速度與球表面的切線速度一致，大小是半徑乘以轉速，方向則與半徑垂直。把這邊界值代入流場函數的方程式，可以得到流場分布。

對一個逆時針方向旋轉的球體而言，當流場從左往右時，也可以說是球從右飛向左。這時流場分布在球上方較疏，在下方則較密，也就是有比較多的流體從下方流過，這表示流體流經球下方的速度比較快。白努利定律告訴我們，流體速度快的地方造成的壓力較小，可以看成空氣對這個反時鐘方向旋轉的球，施加一個向下的力量！

雖然變化球的種類很多，但是它們在空氣動力學上，促使球改變方向的作用是大致相同的。且讓我們來探討一般旋轉類變化球的原理，看看它們是如何與周遭的空氣互相作用而改變行進路徑。

我們仔細地把壓力分布沿著球表面積分，可以得到下壓的力量大小是：流體密度乘以空氣與球的相對速度後，再乘以球表面的環流量（速度沿一曲線與其切線內積的環積分），而作用的方向是與相對速度垂直的，這就是著名的庫塔 - 久柯斯基理論。它是由德國數學家庫塔 (Kutta) 與俄國物理學家久柯斯基 (Joukowski)，在 20 世紀初分別獨自推得的結果。

### 勢流模型的解釋

我們先來看一個流體力學中簡化的模型——勢流模型，所謂勢流 (potential flow)，是指假設流體本身沒有黏性，流體本身的密度也不變，以



排球殺球時球的旋轉，可以從這張攝於2001年8月在高雄鳳山舉行的女排大獎賽的照片中看出。古巴隊殺球時，由於配合不理想加上美國隊封網確實，攻擊手於是選擇不把球直接往下扣，改以水平略偏上的角度擊出，同時加上強烈的旋轉，試圖讓球越過封網者的手以後才靠旋轉帶來的下墜力量讓球落在場內。由於這張照片快門較慢，剛被擊出的球呈現一條軌跡，被黑色的背景襯托得很清晰。曝光開始時原來在球下方的藍色與黃色條紋（紅色箭頭所指處），在曝光結束時隨著旋轉已經轉到中間（橙色箭頭所指處）。

我們從這個模型得到的啟示是，棒球所受空氣側向的施力與其球速、空氣密度和環流量成正比。這當中，空氣密度顯然不是人所能控制，但是球速與環流量就是投手們可以大展身手的地方了。由於投手丘至本壘板的距離大約是18公尺，一個典型的曲球球速大約是每小時110公里，每分鐘轉速若為1,800轉，則在這距離內大約會旋轉17次。至於排球的轉速似乎還沒有人測過，不過從一些比賽時的影片中可以看到，殺球時球的旋轉也是很厲害的。

## 風洞實驗

透過勢流模型所建立的理論，對

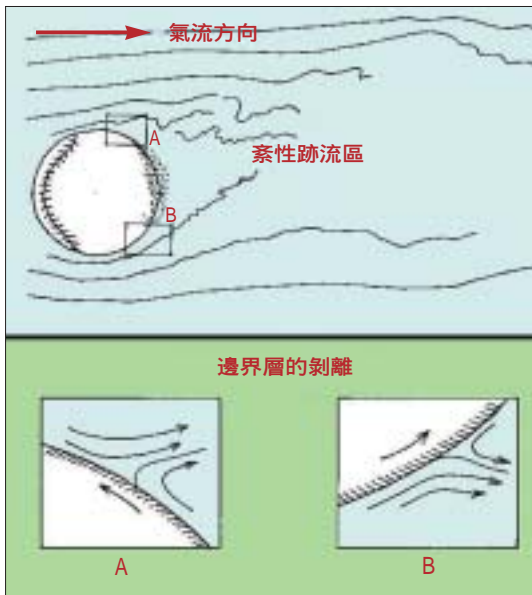
變化球的原理有了初步的解釋，但是實際上的現象是否與這個模型一樣呢？由勢流所建立的數學方程式，是基於沒有黏性，而且沒有渦流值的流場所導出的，很多人馬上會想到，如果沒有黏性，那麼無論球如何旋轉，也不至於會影響周遭的流場，也就是說，一顆轉得再厲害的球跟一顆不轉的球會有相同的流場！

這個說法並沒有錯。讓流場周邊速度等於球面轉動速度，確實是人工附加的邊界條件，或許這一假設並不合理，但是也不會真正影響到勢流模型，我們在意的是，以這一條件補強原有模型之後的推演。

棒球表面氣流的旋轉，的確是經

由空氣黏性才能使周遭流場一起作用，因而有別於一顆沒有旋轉的球。但也因為黏性帶動強大剪力，造成局部強勁的漩渦，而且這些作用力只發生在極為靠近棒球表面的地方，且空氣的平均速度受黏性影響的邊界層裡。在棒球的前端，這層薄薄的邊界層一直往流場下游延伸。由於棒球表面的粗糙，以及棒球縫線的不規則突起，原本保持速度均勻平滑的層流流場迅速地產生強勁的渦流而轉變為紊流，隨著下游的跡流離開球體。

布朗 (F.N.M. Brown) 在他1971年的風洞實驗中，清楚地顯示棒球旋轉時附近的流場。在他的實驗中，風由左向右吹，球以逆時針方向旋轉，



布朗 1971 年風洞實驗結果的示意圖 在球表面的A點與B點分別發生邊界層的剝離現象，原本貼著球表面的流體在此處離開球表面，於是此點後方球表面的速度是逆向的，並產生球後方帶有渦旋的紊性跡流區。

也就是說球的上表面是向上游前方移動，而下表面向下游後方移動。

從他的風洞實驗結果的示意圖，可以看出幾點與我們原先理想化勢流的差異。首先，流場只在棒球前端一半的地方保持層流的狀態，過了中線之後，明顯有渦流夾雜，呈現典型的紊流型

態。第二，球體的轉動並沒有造成勢流模型中的流場，而受影響的部分似乎只局限在靠近球表面的邊界層裡。球下方的流場分布似乎較密，但並不如勢流模型裡預測的那麼強烈。

這個流場疏密並不十分明顯的事實，當然引出了最關鍵的疑問——垂直於流場速度的作用力是從何而來？我們仔細觀看棒球的風洞實驗圖片，棒球下游的跡流有著往上傾斜的趨勢，這表示棒球對流體有向上的作用力存在，如果以反作用力的角度來看，流體對棒球則施予向下的作用力。

而轉動中的棒球如何造成向上傾斜的跡流呢？棒球風洞實驗圖片中的A與B二處，流場發生所謂的邊界層剝離現象，剝離現象的產生與邊界層裡流體的動量有關。A圖裡，由於球的上表面是向上游移動，減低了邊界層裡流體動量，導致剝離現象較早發生。B圖則因球的下表面是向下游移動，延遲了剝離現象的發生，二者交互作用下，最後造成偏向上方的紊性跡流，也就是棒球本身得到空氣施予的向下作用力。

### 蝴蝶球為何漂浮擺動

滑球與曲球的轉向確實令我們這些業餘打



威克菲爾德投球前的瞬間，其招牌彈指球的抓球法清晰可見。

## 一般報導 變化球問題

者，常在打擊區裡望球興嘆，然而這類旋轉變化球仍有些模式可循，依據每個投手的習慣，或是球上紅線旋轉的方向，有時可以多少看出一些球路，這也就是有些變化球仍然會被擊成全壘打的原因。但是另外一類的變化球如彈指球和指叉球，則是靠它們幾乎不旋轉的特性來改變球的路徑，乍聽之下十分令人困惑吧！我們用了這麼多的篇幅描寫球的旋轉如何造成球行徑的變化，為何現在又出現這類幾乎不旋轉的變化球呢？

記得第一次在本壘板後面接指叉球與彈指球的情形，隊友們投出來的球起先與一般直球並無差異，直到最後幾尺，眼見它本應順勢進入捕手手套，這些球卻像石頭一般下沉，有些甚至往左右兩邊飄去。與一般曲球、滑球不同的是它們改變方向的方式，幾乎是毫無任何跡象可循，而且下沉之突然，常令打者完全構不著球。另一方面，一路看似漂浮過來的棒球，更常令人難以判斷它距離的遠近。

多年來這類彈指球一直帶著神秘色彩，彈指球也因此獲得蝴蝶球的美名。還記得1990年代先在匹茲堡海盜隊，後來投效波士頓紅襪隊的威克菲爾德（Tim Wakefield）嗎？這位當時非常年輕的投手幾乎只投一種球，那就是彈指球，其球速之慢讓人難以想像，畢竟這是美國職棒大聯盟，世界一流的棒球菁英聚集之處！

然而這個看似慢動作的球，在進入本壘板時通常會有大動作的變化，不只是下沉幾英寸而已，它可以不定性地飄出正常行徑2英尺以上！最令人著迷的是從電視轉播中，你還可以清楚地看出球上的紅線幾乎不動地隨

球而來。同樣地，如何投彈指球的難題就交給投手的指導教練們去煩惱，本文僅就流體動力學的觀點來探討這問題。

試想一個完全光滑的球體放在一個等速的風洞裡，會不會有任何橫向的作用力產生在球上呢？這個問題實際上指出了流體力學裡的基本觀念——當密度、流速及物體大小的乘積與流體黏度的比率，即所謂的雷諾數（Reynolds number）增加時，流場的穩定性是無法存在的。也就是說，均勻而等速的空氣流過棒球之後，無法再保持穩定而均勻的速度型態，棒球下游的流場是隨著時間變化的動態紊性流場。

了解流體的特性後，再回到彈指球的問題上，我們或許就不會覺得如此突兀了。必須注意到實際的棒球並非一個平滑的球體，就如同前面談及的曲球與滑球一樣，彈指球同樣依賴著球上的縫線，作為流體力學上重要的驅動力。彈指球的研究在瓦茲與索耶（Watts & Sawyer）1974年的實驗研究中得到合理的解答，他們小心地把棒球以不同的角度放置在風洞裡，然後仔細地測量棒球所受到的橫向作用力。

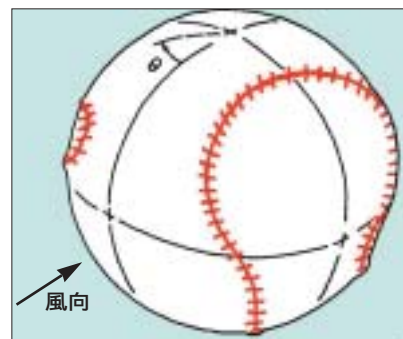
實驗結果發現一些令人玩味的現象，作用於球上的橫向作用力大約從向右0.45牛頓到往左0.45牛頓不等。在縫線與風向相對夾角等於140度和220度時，作用力幾乎從往一邊0.35牛頓跳到往另一邊0.35牛頓；而在等於52度時，作用力交替地在兩個方向間改變，大小差距大約是0.8牛頓，周期則是每1-2秒一次。

這奇妙的現象起因於棒球本身的

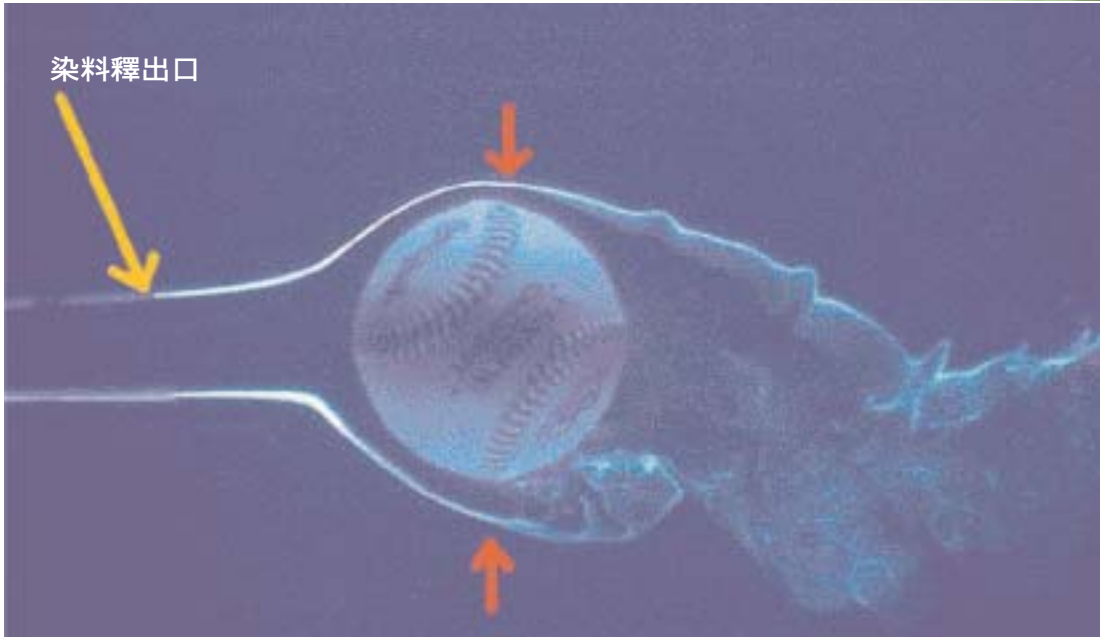
構造，也就是球上的縫線。這些用來綁住球皮的縫線，突起於球表面，引發流體邊界層的剝離，邊界層是否會自球表面剝離與流速及縫線位置都有關，當球位於前述提及的角度時，剝離現象會從較為上游的縫線突然跳到較為下游的縫線，或者是從下游跳向上游，如此不但作用力突然增加或減少，方向也受到改變。試想一個緩慢旋轉的球受到這些突然改變的作用力，在接近本壘時，行徑變化益加明顯，這就是為何這類變化球那麼難以捉摸的原因。

由於彈指球或指叉球不好練也不容易投好，一旦失手，很可能變成不太會飄動的慢速直球，形同全壘打比賽的餵球，所以沒練好彈指球或指叉球的投手是不太敢投蝴蝶球的。但是這種飄忽不定的特性實在很好用，因而有了一般所謂的口球與凡士林球，就是把球的一部分塗上口水或凡士林，以造成球的阻力不均勻，雖然球速比彈指球或指叉球快，卻也一樣具有漂浮不定的性質，只是用了比較骯髒的技倆，當然這種「偷吃步」是違反比賽規則的。

排球發球時的漂浮球也是類似的道理，雖然球速不快，但是路徑一直飄忽不定，令接球者難以調整位置，



瓦茲與索耶的實驗中縫線方位與風向相對夾角的定義



<http://wings.aikids.com/Books/Sports/instructor/crueball-01.html>

## 一般報導 變化球問題

風洞實驗中，黃色的染料顯示邊界層到了紅色箭頭所指的縫線處就會開始從球的表面剝離，於是球的正後方產生一個紊性跡流區，下方的染料很快就因而散亂開來，而上方的染料也呈現不規則的抖動，並逐漸散開。

常常在接球前一瞬間又改變方向，使接球者手臂和球的接觸點不理想，甚至造成失誤。

不過，排球產生漂浮球的機制可能與棒球略為不同，從棒球的實驗中我們知道要使球的路徑飄忽不定，作用在球表面不同處的阻力大小必須有可能產生不斷的變化。棒球靠的是縫線，而排球沒有縫線，所以機制必然不同。排球的機制可能是在發球時，排球受手掌拍擊造成變形，由於其本身材質較富彈性，於是會像彈簧般產生不斷往復的變形，造成作用在球面不同處的阻力變來變去。但是這項理論似乎還沒有仔細的實驗證實，而有待深入的研究。

### 有為者亦若是

許多人會以為手掌必須大到某一種程度才能投出彈指球。筆者在密西根大學念書時常與美國同學 Pete 在校園裡練球，Pete 是彈指球的能手，從他打少棒時便學會了。他的三根手指輕放在球上，然後以熟練的投球動作（完全看不出與直球有任何的不一樣）與精確的放球時機把球投出，就是一個彈指球。對他而言，球的大小不是問題，給他一顆壘球，他照樣彈指出去！筆者與同

學練了許久，一個成功率從來不超過 10%，而另一個從沒成功過，這點證明人的資質顯然比手掌大小來的重要。

至於流體力學方面，倒是無需人們操心，只要球速、旋轉及角度適當，變化就一定會發生的！要嘛我們讓球旋轉，不論球面是否光滑，邊界層剝離的位置在旋轉方向的兩側上會不同，造成側向力而使球往一側偏去。或者我們讓球幾乎不轉動，這時棒球要靠不對稱的縫線位置，而排球要靠不停地變形來使邊界層剝離的情形不穩定，使作用在球上的力量也一直變化，造成漂浮不定的蝴蝶球。所以，當不成郭泰源的你我，改行做個知道變化球為何如此有威力的流體力學家也挺有趣的。

李志揚

美國 Tru-Si Technologies 公司

陳政宏

成功大學系統及船舶機電工程系

### 延伸閱讀

《牛頓打棒球》，Robert K. Adair 著，李靜宜譯，牛頓出版社，台北市，1993。