

更快、更高、更强的奥妙

• 忻鼎亮

一 在世界紀錄背後

標槍的奇蹟

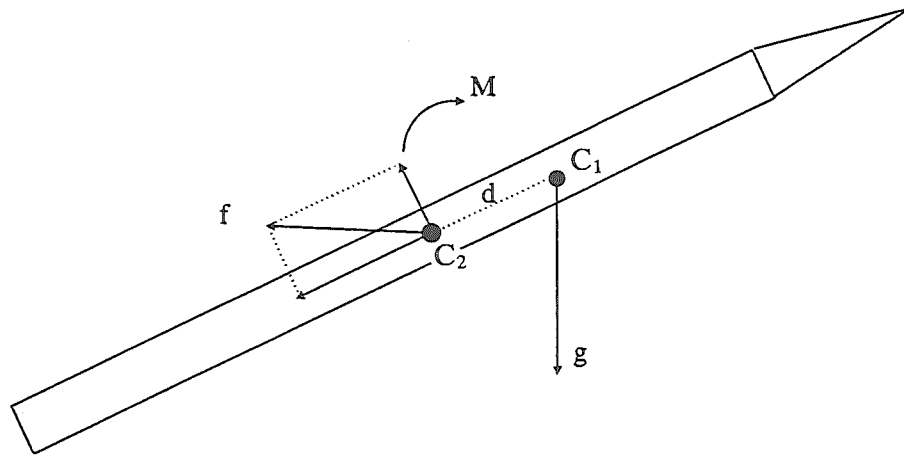
在80年代後期，前東德運動員標槍成績闖出了100米大關，以致可能危及徑賽跑道上運動員的安全，這使國際田聯不得不對標槍結構作新的規定，並且取消了這一在田徑史上令人咋舌的紀錄。標槍擲過100米的奇蹟出現與美籍華人一位姓宋的教授(Prof. Soong Tsai-chen)所作的理論研究是分不開的。他指出：標槍飛行時，重力作用點在槍的重心，但空氣阻力作用點則在槍的形心，這兩者之間的距離 d 是決定標槍飛行軌跡的關鍵因素：阻力和重力形成的外力距 \vec{M} (圖1) 是使槍尖指向改變並最後栽入地面的唯一外力距；如果改變槍形令 d 減小，則 \vec{M} 相應變小，這將使標槍下栽變緩，從而產生滑翔效應，標槍就會飛得更遠。因此，宋預言：按他的槍形設計，世界紀錄能提高16.13米(當時的紀錄是90.47米)。

事隔十年，標槍形狀確實按照他設計的方向改進，而擲槍成績也果然接近了他的預言。這個突破，以及它所產生的反應(即國際田聯被迫協議限制標槍槍形的改變)，戲劇性地說明了運動界的一個公開秘密：奧林匹克精神所追求的「更快、更高、更強」不但有賴於個人的體能、技巧和意志，而且，對頂尖運動員來說，更越來越倚賴個人背後的科技。

打破10秒極限的關鍵

同樣可以說明這個秘密的，是奧運會最引人矚目的百米賽跑的歷史。在50年代，百米跑世界紀錄始終未能突破10秒大關，甚至有人認為10秒跑100米是人類速度的極限。但是自60年代末塑膠跑道出現以後，海恩斯(Jim Hines)終於在1968年奧運會上跑出了9.9秒的成績，其中原因成了運動力學學者的研究課題。經過對跑步運動錄影詳細分析後，他們發現：新式塑膠跑道與舊式煤

圖1 飛行中的標槍所受的外力和外力矩。 g 是作用於重心 C_1 的重力， f 是作用於幾何形心的空氣阻力， M 則是令槍轉向（即圍繞一通過重心且與槍軸垂直的水平向軸旋轉）的外力矩，它與 C_1C_2 間的距離 d 成比例。



渣跑道所產生的約束反作用力有基本區別。在塑膠跑道上，運動員除了在腿後蹬時能產生動力之外，還能在腿前伸時充分利用扒地動作產生動力；而在煤渣跑道上，運動員則不能用力扒地，因為可能由於跑道鬆散，約束力不足而跌倒。因此，在塑膠跑道上跑步姿勢與傳統跑姿明顯不同：最合理跑姿的產生及其訓練方法的形成，其實都和跑道性質以及跑步的力學研究有密切關係。

能屈能伸的撐竿

另一個公眾可能較為熟悉的例子是撐竿跳高。從力學角度看，這基本上是藉着竿的作用，將運動員在起跑時累積的動能轉變為竿的彈性勢能並最終轉變為運動員位能的過程。所以，起跳時的重心速度應該就是所跳出高度的最重要的因素。然而，60年代初出現的玻璃纖維跳竿取代了以前慣用的金屬和竹竿之後，撐竿成績才打破16呎（約4.88米）大關，自此以後紀錄不斷翻新，以迄目前超過了6米的驚人紀錄。這其中的奧妙就在於富有彈性的玻璃纖維竿能大幅度變形，從而減低起跳前竿末端在地面插定過程中衝擊震盪而產生的能耗；而且，用玻璃纖維竿的話，運動員在竿插定後以及本身躍起前的短暫剎那，還可以用力前衝增加竿的彎曲，也就是說繼續作功提高竿所儲藏的彈性能量（見以下圖6(b)-(d)）。

除了以上三個顯著的例子之外，器材對運動技術以及比賽成績的影響可以說是不勝枚舉，例如賽艇槳的長度和形狀、跳馬跳板的形狀和彈性，單槓材料的選擇，乃至自由體操所用的地毯，對運動成績都是有關鍵性影響的。

二 在競賽技術背後

除了器材和設備的改進之外，科學對運動員的技術和訓練也有極大影響。在這方面，遺傳學、解剖學、生理學、心理學、醫藥衛生等生命科學的重要性

固然不在話下，即使是物理科學，其實也一樣關係密切。譬如，所謂「運動生物力學」(biomechanics of sports)目前就已經形成一個重要的專門學科。

力學與運動的關係並不難理解：競賽性運動所追求的「更快、更高、更強」無非是人體物理性運動(physical motion)問題，而力學恰恰能應用規律解決運動問題。實際上，高速攝影、傳感器、電子計算機以至抽象的力學理論的應用，都為運動競賽的研究、分析和改進提供了重要條件。

更快的奧妙：最少能耗

例如，百米賽跑一向被視為最劇烈，需要在最短時間發揮最大能力的競賽，所以運動員往往有錯覺，認為最好的策略就是自始至終都盡最大力量去跑。是否真正如此呢？這是可以純理論加以研究的①。

很容易證明，賽跑運動員所作的功，亦即他的能量消耗E，可以用下式模擬：

$$\begin{aligned}
 E &= \int_0^{s_1} (m\dot{v} + m\sigma v + mA v^2) ds \\
 &= m \int_0^T v (\dot{v} + \sigma v + A v^2) dt
 \end{aligned}
 \tag{A}$$

其中 $v(t) = ds/dt$ 是速度， $s(t)$ 是所跑距離的時間函數， s_1 是終點距離， T 為抵達終點時間， $mA v^2$ 是空氣阻力， $m\sigma v$ 是跑道上的等效摩阻力。假定所跑成績 T 為固定，即邊界條件為 $s(0) = v(0) = 0$ ， $s(T) = s_1$ ，那麼很明顯，最佳體力分配策略便是由適合上述邊界條件而能令 E 取極小值的 $s(t)$ 或 $v(t)$ 函數所決定。這是一個熟知的變分問題，用標準方法可證明其解 $v(t)$ 由下列微分方程決定：

$$(3Av + \sigma t) \dot{v} + \sigma v - \lambda = 0
 \tag{B}$$

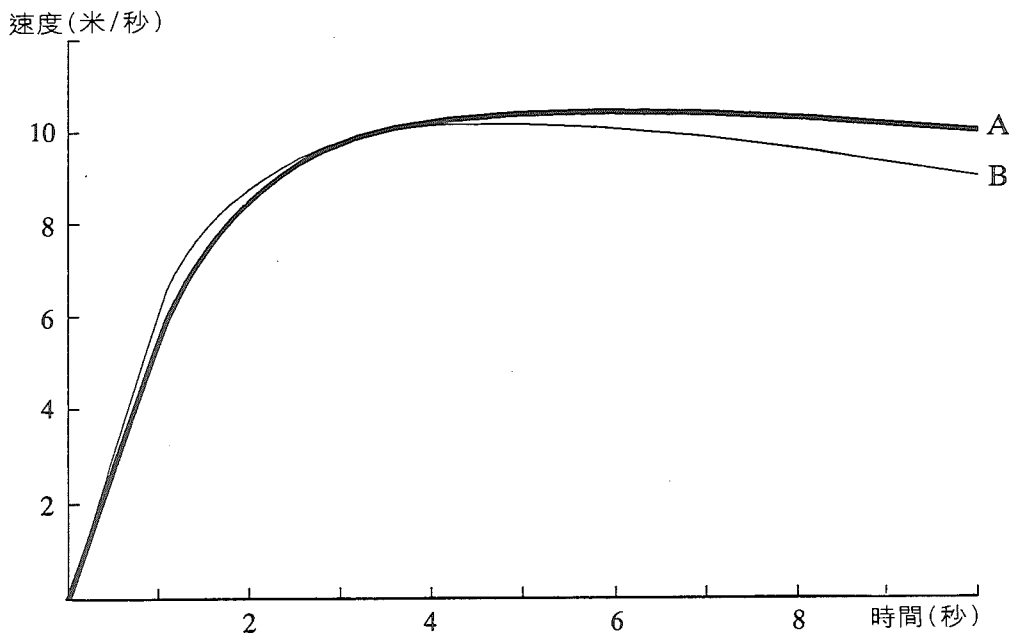


圖2 百米賽跑速度分佈曲線 $v(t)$ 。A為根據體能最佳分配原則，亦即固定成績下最低能耗原則所決定的理論曲線，B則為典型的短跑運動員比賽實測曲線。

其中待定係數 λ 是由邊界條件 $s(T) = s_1$ 決定。這方程的解是

$$v(t) = \frac{1}{3A} (\sqrt{\sigma^2 t^2 + 6\lambda At} - \sigma t) \quad (C)$$

從圖2可見，許多短跑運動員在實際百米競賽中的速度比起最優變化方程(C)來，在前段($s < 30$ 米)往往太快，而在後段則太慢②。換而言之，是不符合以最低能耗取得最佳成績這原則的。這是以理論力學證明了「自始至終盡最大努力」，這一直覺想法的錯誤。同時，詳細比較顯示，優秀的西方短跑運動員的實際速度分配的確更為接近理論曲線，其標準方差大約只有中國運動員的1/4左右。

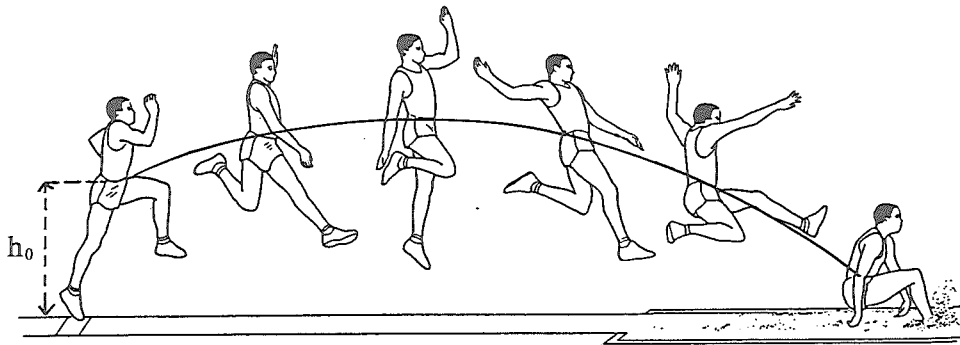
當然，方程(C)不但對百米賽跑有意義，對其他短距離的賽跑、游泳等速度競賽運動也同樣適用。但到了中長距離的競賽，則決定能量供應的生理因素，可能變得更為重要。

更遠的奧妙：兩種速度的平衡

從百米跑成績，我們知道一個優秀運動員的衝刺速度可以到達10米/秒以上③；而眾所周知，一個質點倘若速度 v 固定，那麼以仰角 45° 上衝，則所跳過的距離 $s = v^2/g$ ($g = 9.8\text{m/s}^2$ 是重力加速度)應該為最大。因此，跳遠應該能達到 $s = 10^2/9.8 = 10.2\text{m}$ 左右。實際世界紀錄的確接近這個數字，但也還差10%以上。那麼，我們是否真能用這麼簡單的力學來分析跳遠呢？

其實，上述理想化計算並不太離譜，因為略去空氣阻力(那實際上可忽略)之後，運動員一旦躍起在空中，那麼重心所依循的，必然是一條完全由起跳狀況決定的拋物線。但有兩個修正是必要的：第一，運動員起跳的時候，質心離地面已經有一定高度 h_0 (1.2–1.3米左右)，而完成跳遠後質心接近地面(圖3)；第二，在保持主要由助跑過程產生的整體速度 v 的前提下，運動員躍起之前大約只有0.11–0.13秒時間以足蹬踏板。這一蹬只能產生2.8–3.5米/秒左右的垂直上升速度 v_y ，因此實際上起跳仰角 θ 不可能達到理想的 45° ，而只有 $5\text{--}22^\circ$ 左右。經簡單計算，可證明所跳實際距離應為

圖3 跳遠過程中重心所依循的拋物線。注意運動員躍起剎那重心離地高度是 h_0 ，着地時重心接近地面。



$$s = \frac{2 f(h_0) v_x v_y}{g} + \Delta \quad (D)$$

$$= \frac{v^2 f(h_0) \sin 2\theta}{g} + \Delta$$

其中 v_x 是起跳時的水平速度，與 h_0 有關的因子 f 是

$$f = [1 + (1 + 2gh_0/v_y^2)^{1/2}]/2 \quad (E)$$

在(D)式中，起跳角小和重心有高度這兩個作用相反的修正因子(即分別為 $\sin 2\theta \sim 0.5-0.7$ 以及 $f \sim 1.14-1.17$)，總體效果是把 v^2/g 減少大約 $1/3$ 左右，所以，10米/秒的衝刺速度只能產生大約6.5-7米的飛躍距離。但(D)式還包含額外的「起跳距離」(即起跳時重心離跳板前緣的水平距離)以及「落地距離」(即落地時踏足印跡離重心的水平距離)，即 Δ 項，它大約有1.0-1.5米。因此，實際上的跳遠成績可以達到8-8.5米④。

從(E)式可以看出，跳遠結果基本上由兩個大致獨立的因素 v_x 和 v_y 決定：前者主要得之於助跑速度，後者則關乎躍起之前一蹬的力量。從實測數據可知跳遠名將的水平速度 v_x 一般達9-10米/秒，即接近已知極限，但上躍速度 v_y (2.8-3.5米/秒)卻顯著低於跳高運動員。這其中奧妙何在？我們且先看跳高，再來分析其中緣故。

跳高的奧妙：屈以求伸和兩個旋轉

決定跳高成績 h 的方程比(D)(E)更簡單，它顯然是

$$h = h_0 + \frac{v_y^2}{2g} - \Delta \quad (F)$$

其中 Δ 是過竿時重心離竿的高度。從(F)式可以立即看出：運動員高度非常重要，因為 h_0 直接影響跳高成績。所以，在1983年創2.38米跳高世界紀錄的朱建華是身高1.94米，重69.5公斤的高瘦個子是十分自然的。當然，除了身裁這一先決條件外，決定 v_y 的蹬腿力量，以及助跑、轉身翻騰過竿等技術還是主要的。

在目前，運動員在競賽過程中的實際動作以及位置、速度變化曲線，都已經可以應用大量生產的配套設備進行分析，成為幫助運動員改進技術的常規辦法⑤。其程序大致上是將高速(每秒50-200張硬照)攝影所得畫面逐格在電腦屏幕顯示出來，然後用滑鼠描繪運動員輪廓，輸入電腦，電腦以標準化程式確定運動員重心和軀幹、肢體的空間位置，再根據指示將整個過程的有關時間函數描繪或計算出來(圖4)。表1是用這類方法所得的不同水平跳高運動員的動作數據。

從表1我們可以看出跳高運動的一些特點⑥。首先，顯然運動員不必過分着重助跑速度，而且在起跳前要「剎車」，將7-8米/秒的水平速度減低到4米/秒左右。這主要為的是配合上躍速度，將起跳時的騰躍角度調到40°至50°之間。

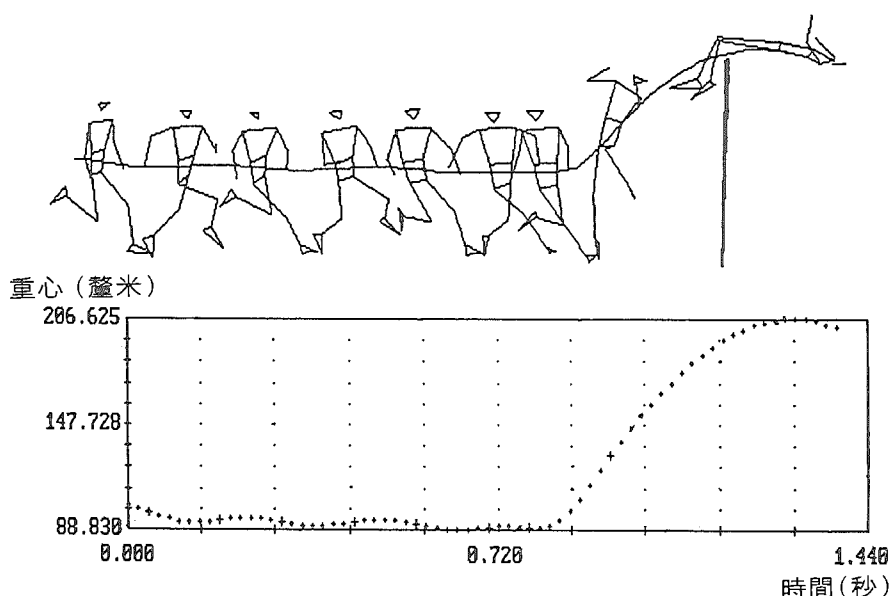


圖4 香港運動員張宇浩跳過2.00米過程錄像經電腦分析後重組的連環示意圖(上)；過程中重心高度的時間變化(下)。

由香港體育學院運動生物力學組提供

表1 不同水平跳高運動員的數據分析

(資料見註⑥⑦)

運動員	助跑速度		躍起速度 v_y	騰躍角 θ	起跳重心高度 h_0	躍起高度 h_1	過竿高度 Δ	成績
	最高	起跳前 v_x						
朱建華	8.73	4.30	4.66	47.7°	1.35	1.11	0.09	2.37
24屆奧運決賽男子平均	7.7	4.0	4.70	49.3°	1.37	1.12	0.14	2.35
24屆奧運決賽女子平均	7.0	3.7	3.90	46.5°	1.21	0.77	0.07	1.91
張宇浩(香港)	7.7	4.9	4.0	39.2°	1.30	0.81	0.06	2.00

換而言之，起跳剎那重心並非垂直上升，而是斜向上升。這是由於運動員要橫越過竿必須經歷一定的水平距離，所以要跳越橫竿就必須有相當的水平速度才成。其次，躍起高度 h_1 佔跳高成績還不到一半，充分說明身裁對跳高運動的重要。

第三，無論跳高抑或跳遠，起跳時的水平速度都是由助跑速度得來，但垂直速度則有賴起跳時瞬間的蹬腿動作。在蹬躍過程中，跳高和跳遠運動員所用的垂直蹬力 F_y 都可以從 $F_y \sim (mv_y / \Delta t)$ (Δt 是躍起前的單腿支撐時間) 加以估計。令人驚奇的是：兩者結果相差不太遠，大致上都能達到運動員本身重量的 3.4–3.7 倍左右！然而，跳高運動員的上躍速度 (4.0–4.6 米/秒) 卻明顯高於跳遠運動員 (2.8–3.5 米/秒)。這是怎麼一回事呢？原來差別在於跳高者躍起之前的

單腿支撐時間(0.17秒左右)，也就是運用蹬力的時間，要比跳遠者(0.11–0.13秒)長50%左右，因此所造成的上躍動量和速度也增加了50%。

為甚麼跳高運動員可以有較長的蹬腿時間？奧妙在於起跳之前單足支撐的階段：此時跳高運動員有意識地將腿微屈(這也起了緩衝水平速度的作用)，重心因而降低，然後再用力蹬腿上躍(見圖5(g)–(k))。這樣重心在支撐階段所上升的總距離可以達到0.4米之多。運用蹬力時間之延長就是從此而來：倘若從靜止開始，以三倍重力加速度 g 運動，那麼移動0.4米所需時間正是0.16秒左右。

當然，目前運動員所普遍採用的背越式過竿法是難度極高的動作，調整助跑速度和爭取躍起速度只不過是其最基本部分而已。除此之外，起跳時有兩個沿直交軸的 180° 轉體動作是非常之關鍵的。

首先，在單足支撐階段運動員不但要蹬腿，還要同時環繞自身長軸作急速旋轉，以從側向橫竿變為背向橫竿(圖5(i)–(m))。這也就是說，要在0.17秒內準確地轉 90° ，即達到 $530^\circ/\text{秒}$ 的平均角速度。其次，躍起時運動員還必須獲得環繞水平橫軸的翻滾角動量，然後藉着手足的屈伸(也就是慣性矩的改變)準確控制在空中的翻滾角速度，以使質心升到最高點時身體恰好約略從垂直位置轉到水平位置(圖5(k)–(p))，這一過程角速度也達到 $200^\circ/\text{秒}$ 至 $240^\circ/\text{秒}$ 左右。

由於這兩個旋轉互相關聯，而且必須和重心的拋物線運動配合，以免觸竿，所以技術要求非常嚴格。例如，在越竿過程中，運動員必須先揮臂和擺腿，抑制上述繞自身軸的第一個旋轉繼續進行，以保持背向橫竿(圖5(m)–(q))；另一方面，卻又必須及時縮起雙膝，以減低繞水平橫軸翻滾的轉動慣量，增加仰翻的角速度(圖5(n)–(r))。過竿之後身體下墜時，腿要重新伸直避免觸竿，手也要作着墊準備而貼體，這時繞自身軸的旋轉就會繼續進行，因此身體就變為從另一個方向側對橫竿了(圖5(s)–(v))。

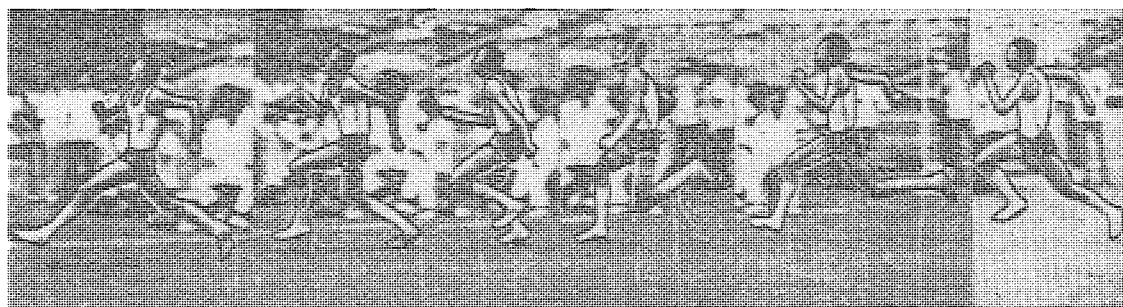
以上這連串動作都要在大約1秒鐘之內準確完成，其困難可想而知。因此，比賽和訓練過程的攝錄和分析對教練以及運動員都有極大幫助。

撐竿跳高：動能和位能的轉換

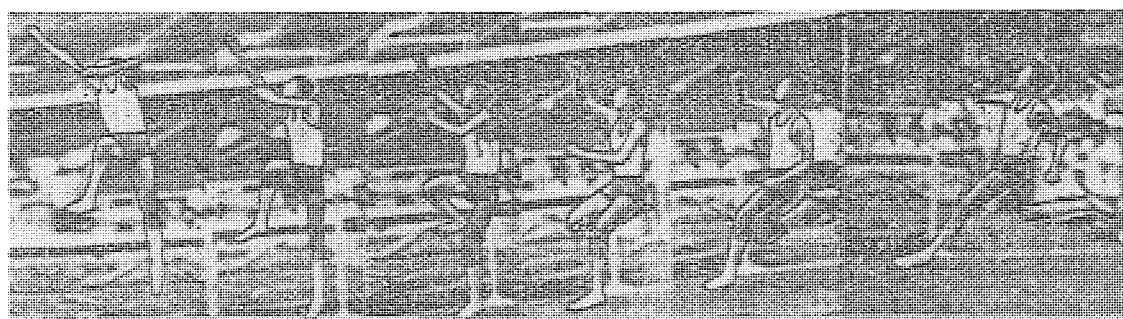
撐竿跳高和跳高或跳遠的最大差別在於：藉着跳竿(特別是彈性強的纖維跳竿)的作用，運動員可以將由助跑獲得的動能幾乎全部轉變為位能，因此其成績 h 是：

$$h = h_0 + \frac{v^2}{2g} + \Delta \quad (G)$$

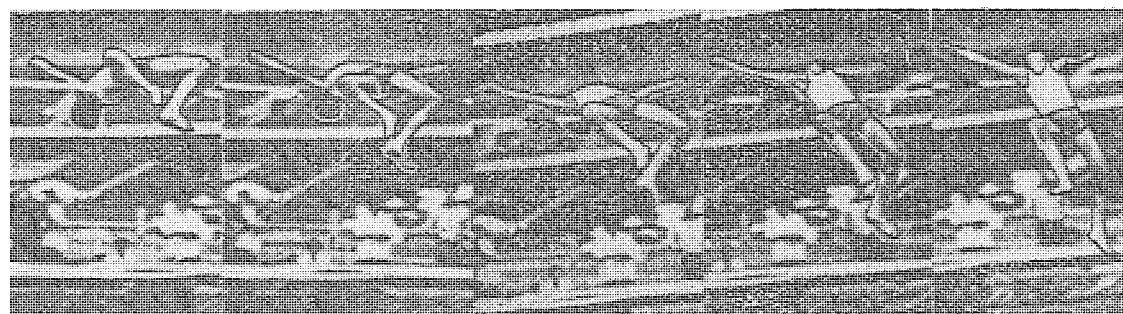
其中 v 是起跳時的全部速度。對優秀運動員來說，他雖然要持竿奔跑，速度 v 仍然可以達到9.2米/秒左右，這已接近短跑速度的極限^⑩。這速度相當於4.33米，頗接近在撐竿跳過程中質心高度的實際升幅 h_1 。但其中還有小小複雜性：即撐起過程以至竿脫手之前，運動員還可以以手臂作功，但這樣獲得的能量有部分可能為竿在屈伸過程以及其末端轉動摩擦所產生的能耗抵消。因此質心上升幅度大致仍在4.0–4.5米左右，加上起跳時的質心高度 h_0 (~1.3米)，總的撐



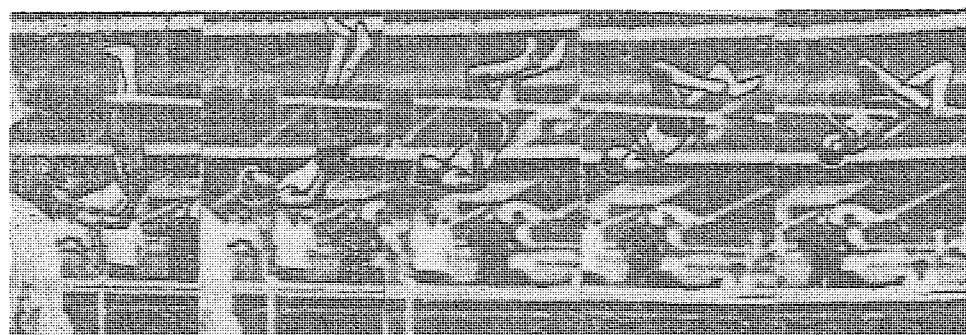
(f) (e) (d) (c) (b) (a)



(l) (k) (j) (i) (h) (g)



(q) (p) (o) (n) (m)



(v) (u) (t) (s) (r)

圖5 朱建華1983年6月11日以2.37米成績打破世界跳高紀錄過程的高速攝影連環圖像。

圖片資料取自註⑨

表2 跳躍運動成績的決定性因素

項目	決定跳躍距離的公式	h_0 項 / f 因子的影響	餘項 Δ
跳高	$h_0 + \frac{v_y^2}{2g} - \Delta$	50-55%	5%
撐竿跳高	$h_0 + \frac{v^2}{2g} + \Delta$	20-22%	2-4%
跳遠	$\frac{2v_x v_y f(h_0)}{g} + \Delta$	14-17%	10%

v_x 是由助跑所獲致的水平速度， v_y 是垂直躍起速度， h_0 是起跳時質心高度。撐竿跳中 $v^2 = v_x^2 + v_y^2$ ，但 $v_x \gg v_y$ 。

竿高度可達5.3-5.8米之間。在(G)式中， h_1 與 $v^2/2g$ 的差別，運動員推開撐竿時所獲得的些微額外動能，以及質心在最高點離橫竿的高度等效應等等都包含在 Δ 項中。

當然，像跳高一樣，撐竿跳高也是難度極高的一套動作。首先，它包含了三個不同的翻躍和轉體：即從直立變為翻上竿頂倒立；然後從背竿轉為向竿；然後再從倒立翻回直立，同時越過橫竿（見圖6的說明）。和徒手跳高不同的是，這些轉體動作時間的控制，除了靠手足屈伸改變轉動慣量之外，還要藉著手臂和撐竿之間產生的外力矩，並且要和撐竿的轉動以及屈伸配合。換一種方式來說，就是要能控制由人和撐竿（後者下端固定）所形成的「可撓倒雙擺」(inverted flexible double pendulum)這個複雜系統的節奏。顯然，錄像和力學分析對訓練也是非常有用的。

最後，撇開技術細節，回到最基本的力學方程，我們可以從表2看出，跳遠、跳高和撐竿跳高三者有共同的決定性因素，即身高加上由助跑或蹬腿所獲得的跳躍速度。當然，在實際競賽中這些因素可能非常之接近，真正決定結果的可能是反映技術水平的餘項 Δ 。

長跑、划艇和其他

賽跑，特別是短跑，是大家最熟悉的運動。那麼運動員之所以能提高速度，究竟關鍵何在？從整體來說，跑速 v 必然是跨距 s 和步頻 f 的乘積 $v = sf$ 。然而，最少對短跑來說，由於腳着地的時間很短促，跨距的增加受到限制，一般難以超過2.2米，所以短跑運動員速度的提高主要靠增加步頻^①；另一方面，長跑則向來認為應着重大跨距和低步頻。

然而，最近崛起，震撼世界體壇的中國長跑「馬家軍」創造了田徑場上的奇迹。除了訓練和營養方面的秘訣之外，她們跑姿的力學分析也成為需要深入探索的課題。從紀錄片看來，她們的特點基本上是頻率快步幅小，不同於傳統的邁大步跑法。這種跑姿的優越性何在？它與能耗之間的關係是否能定量測得？

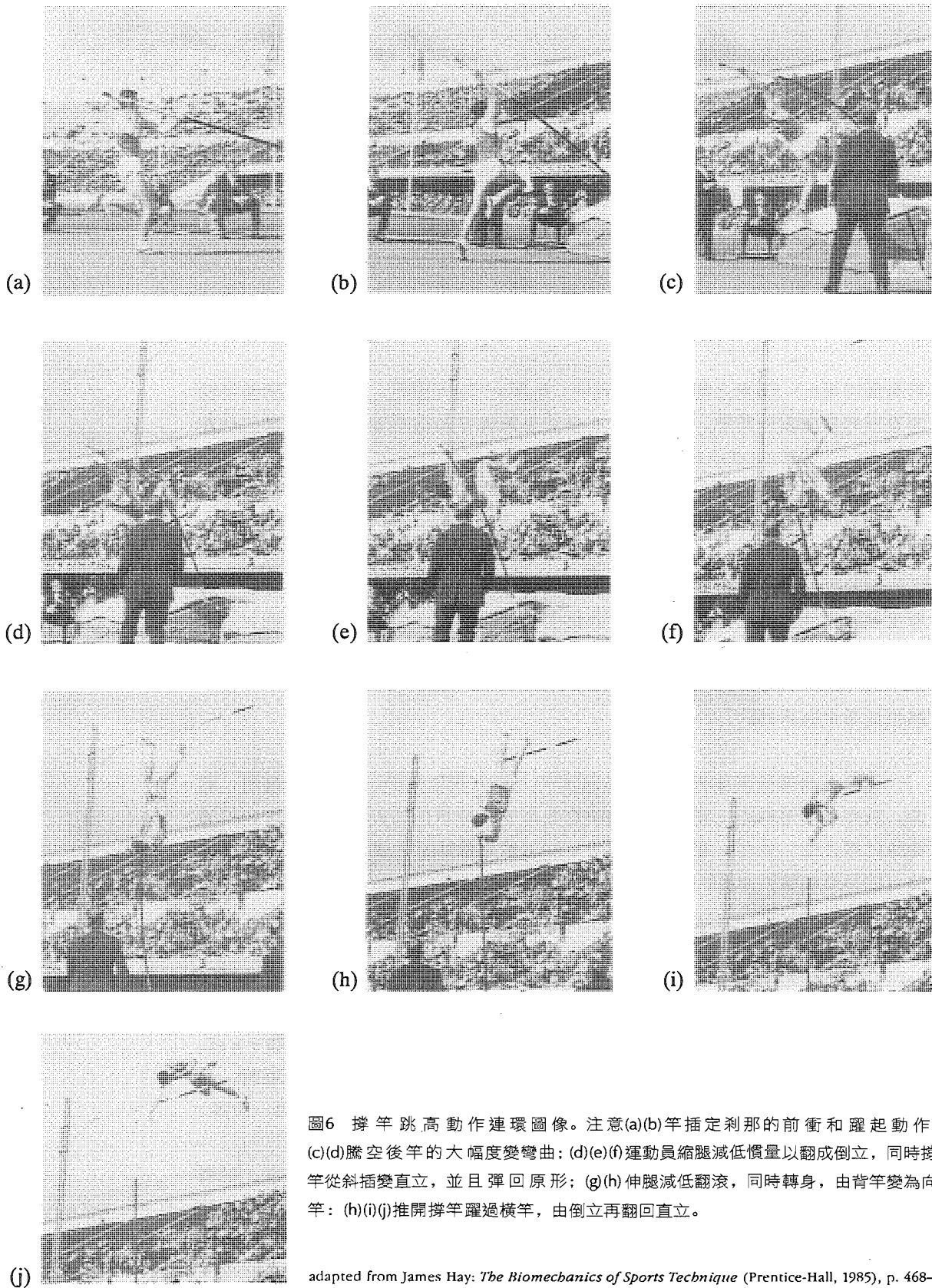


圖6 撐竿跳高動作連環圖像。注意(a)(b)竿插定刹那的前衝和躍起動作；(c)(d)騰空後竿的大幅度變彎曲；(d)(e)(f)運動員縮腿減低慣量以翻成倒立，同時撐竿從斜插變直立，並且彈回原形；(g)(h)伸腿減低翻滾，同時轉身，由背竿變為向竿；(h)(i)(j)推開撐竿躍過橫竿，由倒立再翻回直立。

adapted from James Hay: *The Biomechanics of Sports Technique* (Prentice-Hall, 1985), p. 468-71.

從力學理論角度，肯定馬家軍的業績將是生物力學家有待解決的專題。

又例如划艇比賽，那好像只是有規則和機械地拚命用力氣的事情，但其實也是可以用力學模型研究的^⑫。這模型牽涉到人的軀幹、手臂、大腿、小腿，還有船槳以及船身，是一組互相牽連的六個剛體，所以是個相當複雜的力學系統。但經複雜的計算，理論上可以證明：倘若運動員划槳時採用時間 t 的二次曲線加速，以及採用 t 的特定餘弦曲線控制滑座，就能得出理想狀態運動曲線。將這曲線與運動員運動實測曲線進行方差分析比較，就可以對運動員技術的優劣程度，作出定量判斷。將理論上求得的滑座和划槳曲線與10個優秀運動員的實際曲線進行比較，結果方差總和最小的即是水平最高的運動員。用這方法判斷運動員技術優劣，與有經驗的教練感覺大體相似，使教練和運動員對這一研究結果感到確信。換而言之，划艇比賽中用力氣的規律和技巧是可以從力學原理計算的。

再例如，中國跳水運動員壓水花技術堪稱一絕。這一運動過程是否能作力學描述並作理論解釋呢？其實，下列數學模型與壓水花動作非常相似：一個相對速度為 $v(t)$ 的水柱，在接觸一物體的瞬時，物體覆蓋住柱面局部。壓水花效應可模擬為：覆蓋面積與覆蓋時刻和柱面上水表面振動效應之間的關係。這一模擬符合數理方程中的拉普拉斯方程，完全能對壓水花技術作出嚴謹的力學理論解釋，並提出改善途徑。

由上面的許多例子可見，力學分析是瞭解以及改進運動技術的一個主要途徑，運動生物力學的發展與體育的發展形成良性的互動，而它作為一門嶄新的學科正在進入科技文化領域，隨着理論和觀測的進步逐步充實內容。

三 體育科學和奧林匹克精神

運動生物力學僅僅是體育科學的一個分支而已。近年來，體育科學迅速發展，競技體育水平因而也不斷提高，令頂尖運動員在技術上、體能上、身體素質及心理上不斷遭到超越極限的挑戰。同時，注意運動以及參加競賽的人也越來越多，這無疑是奧林匹克精神在現代世界的發揚。

然而，另一方面，發展到極致的運動競賽對奧林匹克精神本身恐怕也會構成威脅。奧運會之逐漸蛻變為各國政府勾心鬥角的場所，或者淪為受電視網絡和大商業機構操縱的「景觀」(spectacle)，那已經是眾所周知的事實。即使撇開這一面不談，科學(不單止於生物力學，還有醫藥、生理、人體解剖……)之在運動競賽中日益重要，其實對所謂奧林匹克精神也是一種嘲諷、一種顛覆。因為說到底，古希臘的奧林匹克精神所代表的是個人意志的舒展，個人智力和體能的自然發揮。倘若運動員被理想化為一個質點，或者剖析為15個連接的剛體，或者被視為對某套訓練程序或者飲食(更不要說藥物)程序會有可預見的良好反應的生物體系，那末「更快、更高、更強」所代表的，到底是運動員個人的稟賦、意志和體能，還是他背後的實驗室、科學家、計算機、以及規劃人員的心思、魄力呢？也許有一天，在運動競賽頒獎的時候，除了站在禮台上的優勝

運動員之外，有關教練、研究者、訓練設計師的名字也要在電子板上——開列——正如電影開頭或者終結時要顯示製作陣容名單一樣。這並不一定是壞事，但這種可能性和它的含意是值得我們深思的。

參考文獻

James G. Hay: *The Biomechanics of Sports Techniques* (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985)

B.V. Gheluwe & J. Atha: *Current Research in Sports Biomechanics* (New York: Karger, 1987)

Tom Ecker: *Basic Track & Field Biomechanics* (Los Altos, California: Tafnews Press, 1985)

註釋

- ① 本節理論取自忻鼎亮：〈百米短跑速度分配問題的研究〉(上海體育科學研究所論文，1994)。
- ② 理論與實測數據比較的細節見①。在計算整體平均跑速時，起跑反應時間(約0.45秒)必須在跑畢全程時間中扣除。
- ③ 10.5秒的百米成績已相當於9.95米/秒的全程平均速度，見註②。
- ④ 有關跳遠的各項實際數據估計見Hay，頁422-32。
- ⑤ 忻鼎亮：〈電子計算機模擬方法在體育科學中的應用〉(上海體育科學研究所論文，1982)。
- ⑥ 5th Report of Biomechanical Analysis for Track and Field—High Jump by the Sports Biomechanist, Hong Kong Sports Institute (November 25, 1992).
- ⑦ 馮敦壽、王大愚、忻鼎亮：〈朱建華技術的運動生物力學分析〉(上海體育科學研究所論文，1983)。
- ⑧ 以下討論詳見註⑦以及註⑨。
- ⑨ 馮敦壽、王大愚、忻鼎亮：〈朱建華破世界紀錄的技術特點初析〉(上海體育科學研究所論文，1983)。
- ⑩ 本節的圖片、資料及討論見Hay，頁456-74。
- ⑪ G.A. Wood: "Biomechanical Limitations to Sprint Running", in Gheluwe & Atha, pp. 58-71.
- ⑫ 忻鼎亮：〈優秀賽艇運動員技術分析〉，《划船運動的訓練與科學》(上海，1988)。

後記：本文由忻鼎亮先生供稿並提供多種有關資料，由本刊編輯室補充及重新編寫。定稿蒙香港中文大學洪友廉博士校閱，謹此致謝，但倘有錯誤，仍由編輯室負責。

忻鼎亮 1945年生，1969年畢業於中國科技大學近代力學系，1981年獲上海交通大學工程力學系碩士學位。1982年起就職於上海體育研究所，對田徑、划船、體操、射擊等項目作過較系統的力學分析和研究，多次獲得各級政府機關頒發的科技進步獎。現任該所儀器電化室主任、副研究員。