

中長跑技術的力學分析與應用

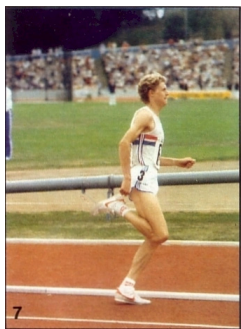
教練/導師：黃德誠

中長跑的特點

在現代奧運會的田徑比賽分類中，「中長跑」是指 800 米及以上的徑賽項目。800 米及 1500 米屬中距離跑，3000 米及以上的項目屬長距離跑。中長跑一方面要求盡可能減少體力的消耗，維持一定的跑速，但另一方面卻要求在跑的過程中，能按比賽的實際需要有加速跑的能力，所以正確的技術和合理的體力分配對中長跑運動員來說是非常重要的。

中長跑要求運動員要跑得輕鬆協調，身體重心平穩，直線性強，有良好的節奏，還要盡量提高肌肉用力和放鬆的能力。跑的距離越長，這些要求也就越加重要。各種中長跑的技術基本相同，但由於各種距離的長短和強度有所不同，跑的動作也就有不同程度的差異。一般來說，跑的距離越長，步長越短，前擺與後蹬的用力程度也越小，騰空時間與支撐時間的比值也相對地小。

中長跑的技術動作



身體姿勢

1. 上體正直或稍前傾。
2. 頭部自然，眼平視，面部和頸部肌肉要放鬆。



後蹬與前擺

1. 當擺動腿通過身體垂直部位向前擺動時，支撐腿首先伸展髖關節，再迅速有力地伸展膝關節和踝關節。
2. 腳掌的小肌肉也要積極參加，最後用腳趾蹬離地面。



3. 在擺動腿前擺的過程中，小腿保持放鬆而自然下垂。
4. 後蹬結束時，支撐腿幾乎伸直或伸直，擺動腿的小腿與支撐腿幾乎呈平行的狀態。
5. 跑的距離越長，大腿抬起的高度越低。



騰空

1. 支撐腿蹬離地面後，小腿亦迅速向大腿靠攏，形成大、小腿邊折疊邊前擺的動作。
2. 同時，擺動腿以髖關節為軸，積極下壓，膝關節放鬆，小腿自然向下伸展，準備著地。



著地緩衝

1. 著地位置約在身體重心投影點前的一腳長至一腳半處。
2. 在中長跑中，可以用腳前掌著地過渡到全腳掌，亦可以用全腳掌著地。（腳著地的技術取決於運動員的訓練程度、跑的速度、與個人特點等。）
3. 腳著地後，支撐腿迅速彎屈進行緩衝，並為過渡到後蹬創造良好的條件。
4. 這時，擺動腿亦以大、小腿折疊的姿勢迅速向前擺動。



擺臂動作

1. 輕握雙拳，拇指放在食指上。
2. 肘關節自然彎曲，以肩為軸前後自然擺動。
3. 當臂擺到軀幹的垂直部位時，肘關節的角度要大一些，使肌肉得到短時間的放鬆。



中長跑的目標

所有徑賽項目，包括中長跑，就是以最短的時間完成一個指定的距離；而時間與距離、速度的關係見下列公式：

$$\text{時間} = \frac{\text{距離}}{\text{平均速度}}$$

影響速度的因素

影響中長跑表現的因素主要包括：

- 反應時間
- (平均) 速度
- 技術
- 肌肉纖維種類
- 訓練

反應時間 (Reaction Time)

反應時間其實是人腦內資訊處理過程所需的時間，也就是接收到刺激至產生行動前所需的時間。例如，聽到起步槍聲至開始做出起跑動作前所需的時間。

(平均) 速度 (Average Speed)

在整個跑的路程中，跑的速度都有著或多或少的變化。通常會由靜止加速至正常的步速，然後盡可能保持這個速度，直至最後因為疲勞而出現減速的情況。在中長跑比賽的過程中，速度在途中的起伏會更大。

技術 (Skill)

中長跑的技術目標，首要當然是節省能量、維持跑速，其次就是防止運動創傷的發生。

肌肉纖維種類 (Muscle Fiber Types)

人體的骨骼肌內分佈著兩類不同的肌肉纖維，白肌肉纖維較能適應速度高和力量大的項目要求，而紅肌肉纖維則較能適應耐力性項目的要求。肌肉內紅肌肉纖維的比例越高，越有利於較長距離項目。一般來說，訓練並不能改變肌肉纖維的種類，但卻可以增進肌肉纖維的各種能力。

訓練 (Training)

雖然部分影響運動成績的因素是先天決定（如身高），但後天的訓練卻可以改善與生俱來的特質，甚至轉弱為強。

速度的組合成分

一般所指的速度，其實就是「平均速度」，所以除非特別聲明，否則往後所說的速度都是指「平均速度」。

速度是由「步長」和「步頻」組成，它們之間的關係可以用下列公式表達：

$$\text{速度} = \text{步長} \times \text{步頻}$$

步長 (Stride Length)

在跑步的運動生物力學研究中，一步 (stride) 通常是指半個跑的週期（例如，由左腳著地至下一次右腳著地）。假設一個運動員的步長為 2 米，而他的步頻是每秒 3 步，那麼他的速度就是：

$$\begin{aligned}\text{速度} &= 2\text{米/步} \times 3\text{步/秒} \\ &= 6\text{米/秒}\end{aligned}$$

（相當於用 10 秒跑 60 米）

增加速度的方法

假設運動員的體適能狀況已得到改善，如果要提升速度，便可透過增加步長或增加步頻，甚至是兩者同時增加而達成。

例一

$$\begin{aligned}\text{原來速度} &= 2\text{米/步} \times 3\text{步/秒} \\ &= 6\text{米/秒} \\ \text{新的速度} &= 1.5\text{米/步} \times 4\text{步/秒} \\ &= 6\text{米/秒}\end{aligned}$$

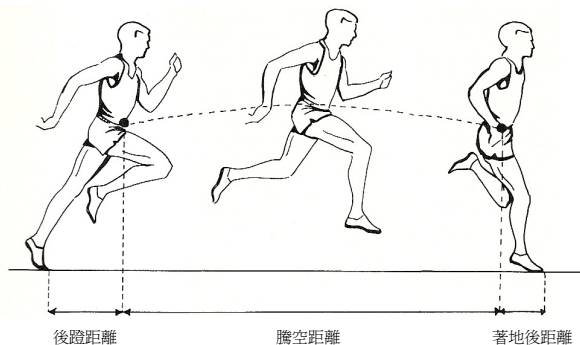
例二

$$\begin{aligned}\text{原來速度} &= 2\text{米/步} \times 3\text{步/秒} \\ &= 6\text{米/秒} \\ \text{新的速度} &= 1.8\text{米/步} \times 4\text{步/秒} \\ &= 7.2\text{米/秒}\end{aligned}$$

從例一及例二可見，要有速度上的增進，在提升一項因素（如步頻）的時候，另一項因素（如步長）不能有太大的衰減，否則可能會得不償失。

步長的構成

步長是由後蹬距離、騰空距離、著地後距離三段構成。



Atwater (1981) 對 12 名男性 100 米跑運動員（成績由 9.9 秒至 10.4 秒）進行分析，他們後蹬距離、騰空距離、著地後距離（佔步長百分比）的分佈見下表：

	最小	平均	最大
後蹬距離	22	26	30
騰空距離	50	57	64
著地後距離	12	17	20

影響騰空距離的因素

正如其他投射物（projectile）一樣，影響騰空距離的因素包括：蹬離地面時的初速度、蹬地的角度和空氣阻力。

影響初速度的因素

影響初速度的因素主要為蹬地時地面施加於運動員身上的反作用力，這其實是運動員充分伸展髖、膝、踝關節，向後蹬地用力的成果。

著地時的常犯錯誤

著地時的一個常犯錯誤就是刻意把小腿踢前，以增加步長，其實這會影響到前進速度，因為腳向前踢出的動作在正式著地時會產生向後的反作用力，形成了「制動」（braking）的效果，反而降低了原本向前的速度。

步頻的構成

步頻取決於完成一步所需的時間，需時越長，在一指定時間內的步頻越低。完成一步的時間組合可以被分為：接觸地面的時間和騰空時間兩個部分。

根據 Housden (1964) 和 Atwater (1981)，頂級短跑運動員完成一步的時間比例為：

	接觸地面的時間	騰空時間
起跑	2	1
途中跑	1	1.3 – 1.5

一些有關步長與步頻的研究結果

Hoffman (1971)

研究了 56 名男性短跑運動員（最佳時間由 10.0 秒至 11.4 秒）後發現：

- 平均步長與身高和腿長有關。
- 平均步長一般為身高的 1.14 倍，腿長的 2.11 倍。
- 平均步頻與身高或腿長都分別成反比，即身材越高，步頻越低；腿越長，步頻也越低。
- 最高步長為身高的 1.24 倍。

Hoffman (1972)

研究了 23 名女性短跑運動員（最佳時間由 11.0 秒至 12.4 秒）後發現：

- 研究結果與 Hoffman (1971) 相似。
- 平均步長一般為身高的 1.15 倍，腿長的 2.16 倍。

Rompotti (1975)

研究了 20 名男大學生和 12 名優秀男性大學生運動員後發現：

- 全速跑步長 = $1.17 \times \text{身高} \pm 10 \text{ cm}$ 。

Atwater (1981)

分兩組研究了 23 名男性短跑運動員（最佳時間由 9.9 秒至 10.4 秒）後發現：

- 其中一組的平均步長為 2.5 米（於 50 米處），即身高的 1.41 倍，腿長的 2.65 倍。
- 另一組的平均步長為 2.34 米（於 60 米處），即身高的 1.31 倍，腿長的 2.47 倍。
- 所得數值高於 Hoffman (1971) 及 Rompotti (1975)，主要可能是地面（煤渣跑道與塑膠跑道）及運動員能力的分別。

技術動作的力學分析

腿部動作

腿部動作是一種循環動作，而且可以分為三個階段：支撐階段、蹬地階段、恢復階段。

支撐階段

支撐階段由腳著地一刻開始，直至運動員的重心向前移過著地點後結束。腳的著地方法是跑的技術環節中最具爭議的地方，有些人主張應該以腳跟先著地，然後滾動至腳前掌，再以腳趾蹬離地面。不過，這種著地方法會降低了向前的動量（momentum），因為在腳跟著地的一刹那，腳部仍在向前的動作會繼續向前（牛頓第一定律），並形成一鼓向前的作用力（action）施加於地面，而地面亦會同時回應一鼓力度相同，方向相反（向後）的反作用力（reaction，牛頓第三定律），減慢了運動員向前的動作。同樣道理，刻意把小腿踢前以增大步長時，腳部於著地的一刹那也正在向前移動，所受到的反作用力一樣會減慢了向前的速度。

因此，正確的著地方法應該是以腳前掌（外側）先著地，然後過渡至全腳觸地，並藉此緩衝部分腳著地時因地心吸力所產生的撞擊力^[1]；而且腳著地後亦應該繼續向後移動，

利用從地面而來的反作用力使身體可以更快地向前推進。至於腳著地的位置，亦應該盡量接近運動員身體重心在地上的投影點。

當跑的距離增長，速度會相應變慢，腳著地的部位也會向腳跟方向後移。其實大部分短跑運動員（包括頂級運動員），著地後腳跟都會觸及地面（Nett, 1964）。Payne (1983) 的研究亦發現，在 18 個國際級 200 米跑運動員中，只有一個是全程腳跟沒有觸地。而另一組共有 41 個從事 400 米至 1500 米的國際級運動員中，亦只有 6 個是採用同樣的技術（腳跟不觸地）。由此可見，無論是短跑還是中長跑運動員，都不應刻意禁止腳跟著地。

為了減低因地心吸力而來的撞擊力，腳著地後，髖、膝、踝關節都會適當彎屈，以吸收腳撞擊地面時的震盪。

蹬地階段

支撐階段一結束，便會進入蹬地階段，直至蹬地腿的腳部離開地面為止。運動員這時應用力蹬伸髖、膝、踝關節，並向下、向後用力把身體推離地面。蹬離地面時的初速度是取決於髖、膝、踝關節的肌肉力量，也會影響到實際的步長。

恢復階段

恢復階段是指腳部蹬離地面後，被送前並準備下一次著地的一段期間。

支撐腿蹬離地面後，小腿應迅速向大腿靠攏，並形成大、小腿邊折疊邊前擺的動作。當小腿向後、向上靠攏大腿的時候，腳部應盡量貼近臀部，從而把腿的轉動慣量（moment of inertia）降至最低和增加角速度（angular velocity），使腿可以更迅速地向前擺出。與此同時，擺動腿亦以髖關節為軸，積極下壓，膝關節放鬆，小腿自然向下伸展，準備著地。



總共撞擊地面超過 37,000 次。如果跑步是在堅硬的地面進行，每次的撞擊力可以是身體重量的 5 倍（Anderson, n.d.）。

¹ 跑步實際是一連串身體撞擊地面的活動（一般為每分鐘 180 次），以一個在 3:30 內完成馬拉松的運動員來說，腳部

手部動作

研究過 10 名跑步人士的手部動作後，Hinrichs (1982) 指出，手部動作的主要功用是平衡由於腿部動作而產生的角動量 (angular momentum)，而且對提升身體重心亦有一定的貢獻 (約 10%)。一般來說，手部動作向前不應高於肩膀，向後也不應超過臀部 1 腳長的距離，而且亦要避免左右扭動，慕求以最大的合力把身體向前推進。

空氣阻力

在所有跑的項目中，部分的能量會被浪費於克服空氣阻力 (air resistance)，因而降低了運動員的動能 (kinetic energy)，影響了速度。

空氣阻力是與運動員跑速的「平方」成正比，所以速度越高，要抵抗的空氣阻力越大。跟據 Dyson (1986)，在靜止的氣流下，若運動員的跑速為 10.67 米/秒 (一般優秀短跑運動員的最高速度)，作用於運動員身上的空氣阻力便有 15.93 牛頓 (3.58 磅)。因此，特別在大風的日子，中長跑運動員都應該避免領先跑。

速度與年齡

根據 Anderson (n.d.)，美國北愛荷華州大學 (University of Northern Iowa) 的 Nancy Hamilton 博士發現，跑步成績和跑姿會隨著年齡的增長而產生戲劇性的變化。雖然許多研究人員都把速度隨著年齡增長而下降的現象歸因於心臟輸出的能力、肌肉質量和肌肉力量的損失等生理因素，但 Hamilton 博士卻將這些現象歸因於跑姿的轉變。

Hamilton 在 1989 年間，共攝錄了 162 名國際級跑步運動員 (83 男，79 女) 的比賽片段，並將其數碼化後進行力學分析，她把表現較佳和表現較差的運動員進行比較，亦把年齡較大和年齡較小的運動員進行比較，她深信運動員之間表現上的分別主要在於力學上的因素，特別是髖、膝、踝關節的活動幅度。Hamilton 的論據是這些

關節的活動幅度會影響到步長與步頻，而增加步長或步頻，甚至是兩者同時進行下，都是跑得更快的先決條件。

就以一個 5000 米跑 18:30 的運動員為例，如果她目前的步頻是 180 步/分鐘，而步長則是 1.5 米，那麼她完成 5000 米共需要跑

$$5000 \text{ 米} \div 1.5 \text{ 米/步} \approx 3334 \text{ 步}$$

假設該名運動員在體適能上有所改善，而且使到步頻有 1% 的增進，那麼她 5000 米跑的時間便可降低至 18:20 左右。如果步頻保持不變，而步長方面有 1% 的增進，同樣能夠把時間降低至 18:20 左右。如果步頻和步長兩者都同時有 1% 的改善，那麼時間就更可以降低至 18:10 左右。

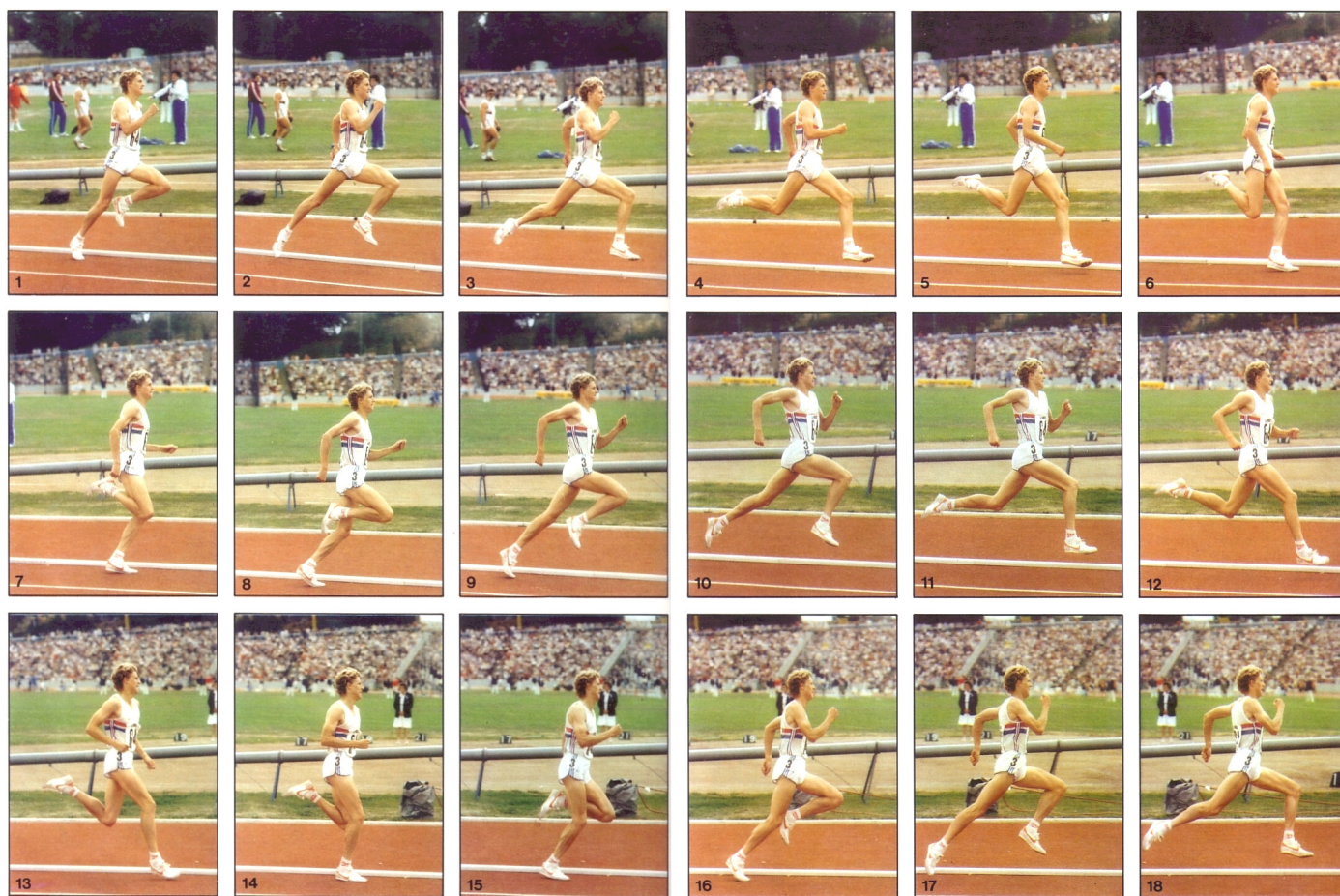
Hamilton 的研究發現，隨著年齡的增加，步頻的下降並不明顯 (80 歲與 35 歲的相差只不過是 4 至 5%)。另一方面，雖然步長在 35 至 55 歲間仍會有些微增長，但自此以後，步長便會逐漸下降 (90 歲的比 35 歲的下降了 40%，由每步 2.36 米縮短至 1.42 米)。由此可見，自 40 歲過後，步長會明顯下降。

Hamilton 發現年齡較大的運動員，腳接觸地面的時間較長，這主要是髖和膝等關節的活動幅度下降所致。例如，膝關節在跑步時的活動幅度自 35 歲至 90 歲間竟減少了 33% (從 123 度下降至 95 度)，這使到膝關節於腿向前擺動時折疊不足，腳與髖關節的距離變遠，力矩 (moment) 增大，影響了前擺的速度，也就影響了另一腿及時蹬地用力，把身體前送的速度。此外，髖關節在跑步時的活動幅度比膝關節下降得還要厲害，自 35 歲至 90 歲間減少了 38%，這些都影響了步長。

因此，Hamilton 主張應該改善髖關節的活動幅度，並且加強四頭肌 (大腿前方肌肉) 的柔軟度，令腿前擺時可以折疊得更好，使到腳能夠貼得更近臀部，減少力矩，加快前擺的速度；而且臀部附近的肌肉亦要加強向後用力，把人體迅速推離地面。此外，腳著地後要避免膝、踝關節的「過分」彎屈，好使盡快從支撐階段過渡至蹬地階段，縮短兩腳與地面接觸的時間。

參考資料

- Anderson, O. (n.d.). Running form: *How you can become a better runner without increased fitness – with the right form*. Retrieved 2006-9-2 from <http://www.pponline.co.uk/encyc/0122.htm>.
- Anderson, O. (n.d.). Running Surfaces: Why Haile boycotted the Atlanta oval – and can tuned tracks improve your own performances? Retrieved 2006-11-23 from <http://www.pponline.co.uk/encyc/0818.htm>.
- Atwater, A.E. (1981). Kinematic analysis of sprinting. In J. M. Cooper and B. Haven (Eds.), *Proceedings of the Biomechanics Symposium, Indiana University, October 26-28, 1980* (p. 309). Ind: The Indiana State Board of Health.
- Dyson, G. (1986). *Dyson's mechanics of athletics* (8th Ed.). Great Britain: Hodder and Stoughton Educational.
- Hay, J. G. (1993). *The biomechanics of sports techniques* (4th Ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Hinrichs, R. N. (1982). *Upper extremity function in running*. Ph.D. dissertation, Pennsylvania State University.
- Hoffman, K. (1971). Stature, leg length, and stride frequency. *Track Technique*, **46**, 1463-1469.
- Hoffman, K. (1972). Stride length and frequency of female sprinters. *Track Technique*, **23**, 301-318.
- Housden, F. (1964). Mechanical analysis of the running movement. In F. Wilt (Ed.), *Run, Run, Run* (pp. 240-241). Los Altos, Calif.: Track and Fields News, Inc.
- Nett, T. (1964). Foot plant in running. *Track Technique*, **15**, 462-463.
- Payne, A. H. (1983). Foot to ground contact forces of elite runners. In H. Matsui and K. Kobayashi (Eds.), *Biomechanics VII-B*, pp. 746-753. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Rompotti, K. (1975). A study of stride length in running. In D. Canham and P. Diamond (Eds.), *International Track and Field Digest* (pp. 249-256). An Arbor, Mich.: Champions on Film.
- Wilson, H. (1985). Middle Distance. In H. Payne (Ed.), *Athletes in Action: The Official International Amateur Athletic Federation Book on Track and Field Techniques* (pp. 35-48). Italy: Pelham Books.



圖片示範 (Steve Cram, 英國): 1984 年奧運會 1500 米銀牌 (3'33.40''); 1985 年 1500 米世界紀錄 (3'29.67'')。