

## 对现代短跑技术若干问题的重新审视

姜自立<sup>1</sup>, 李庆<sup>1</sup>, 曹人天<sup>2</sup>

(1.清华大学 体育部, 北京 100084; 2.清华大学 机械系, 北京 100084)

**摘 要:** 基于短跑生物力学的最新研究成果, 并结合多年的短跑训练经验, 对现代短跑技术中存在争议的若干问题进行了重新审视, 得出如下结论: 起跑时, “左前右后”的蹲踞方式可以提高运动员的反应速度, 双脚同时蹬离起跑器能比单脚蹬离起跑器产生更大的动作冲量; 在纯加速阶段, 增大步长比增加步频更有利于提高跑的经济性, “摇摆型”步态比“直线型”步态更有利于提高加速度; 在途中跑阶段, “非对称反弹技术”比“弹簧-质点技术”产生更大的地反力, “五分法”比“四分法”更为准确地反映出短跑运动的技术特征和优化全程速度节奏。

**关键词:** 训练与竞赛; 现代短跑技术; 反应时间; 动作冲量; 加速度; 步宽; 速度节奏  
**中图分类号:** G822.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2016)04-0006-06

### Reexamination of several issues about modern sprint techniques

JIANG Zi-li<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, CAO Ren-tian<sup>2</sup>

(1.Department of Physical Education, , Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on latest research achievements in sprint biomechanics, and coupled with several years of experience in sprint training, the authors reexamined several controversial issues about modern sprint techniques, and drew the following conclusions: at starting, the “left foot front and right foot rear” squatting manner can improve athlete’s reaction speed, hitting the starting blocks with both feet can produce more action momentum than hitting the starting block with one foot; at the pure acceleration stage, increasing stride length is more conducive to enhancing running economy than increasing stride frequency; “swaying” type running is more conducive to increasing acceleration than “straight line” type running; at the midway running stage, the “asymmetrical rebounding technique” produces a ground rebounding force greater than that produced by the “spring-mass technique”; the “5-stage dividing method” can reflect print technical characteristics and optimize full course speed rhythm in a way more accurate than the “4-stage dividing method”.

**Key words:** competition and training; modern sprint technique; reaction time; action momentum; acceleration; stride width; speed rhythm

短跑是竞技体育中重要的基础性项目, 短跑成绩的突破可带动其他运动项目的发展。在运动训练中, 运动表现的突破主要依赖于运动员身体形态的改变、生理机能的提高和运动技术的完善 3 个方面。但是, 随着人类体能逐渐逼近极限, 尤其是对于成年运动员而言, 身体形态将维持在一个相对稳定的水平上, 能量代谢的可塑空间也将受到限制, 因此, 运动成绩的

提高就主要依赖于运动技术的进一步完善<sup>[1]</sup>。近年来, 随着短跑生物力学研究的不断深入, 训练界对短跑技术的认识在很多方面已经达成了一致。然而, 在当前的短跑训练实践中, 关于“起跑时如何选择摆动腿、如何蹬离起跑器, 加速跑时如何调整步长和步频、如何控制步态特征, 途中跑时如何优化力量输出效率、如何调整全程速度节奏”等技术环节的认识仍然存在

收稿日期: 2016-02-20

基金项目: 2015 年度清华大学资助科研计划(重点项目)(2015THZWZD04)。

作者简介: 姜自立(1983-), 男, 田径一级教练, 博士研究生, 研究方向: 运动训练理论与实践。E-mail: jiangzili2010@163.com

较大争议,且这些争议和分歧在一定程度上影响到了短跑运动水平的进一步提高。鉴于此,本研究基于短跑技术的最新研究成果,并结合多年的短跑训练经验,对上述具有争议和分歧的技术环节进行了重新审视,以期对短跑训练实践提供参考。

## 1 起跑技术

### 1.1 “个人习惯”与“左前右后”

在田径比赛中,反应时是指枪响后到力量出现变化之初的时距。在当今世界级男子100 m比赛中,比赛胜负往往在毫秒之间,而运动员的起跑反应时间约占比赛总时间的5%,更为重要的是,反应速度的快慢还会影响到运动员的全程节奏<sup>[1]</sup>。

对于短跑运动而言,运动员的双腿是同等重要的。因此,大多数短跑教练员在训练实践中主张运动员在起跑时根据个人偏好或习惯选择“摆动腿”。在神经传导速度既定的条件下,运动员的反应速度主要取决于运动条件反射的巩固程度,即起跑技术的熟练程度<sup>[2]</sup>。然而,也有不少教练认为,就蹲踞式起跑技术而言,运动员双腿的作用是非对称的。因为蹲踞式起跑的技术特征决定了运动员的双腿需前后放置,摆动腿或后置腿在枪响后需率先做出反应,并在随后进行相对运动<sup>[3]</sup>。而在人体内,肢体主要受对侧大脑半球的控制,即右侧大脑控制左侧肢体,左侧大脑控制右侧肢体<sup>[5]</sup>。由于右脑具有更强的空间和口令处理能力(对信号的察觉能力)<sup>[6]</sup>,而左脑则具有更强的执行肌肉力量的能力<sup>[7-8]</sup>。因此,从理论上讲,“左前右后”的蹲踞方式可以使运动员获得更快的反应速度和动作速度。这一假设也得到Eikenberry等<sup>[4]</sup>的证实,他们的研究表明,右脚在后比左脚在后的反应时间快80 ms,而右脚在后比左脚在后的动作时间快104 ms。因此,当右脚在后时,运动员能得到近80 ms的反应时间优势和104 ms的动作时间优势。本研究对近5届世界田径锦标赛男子100 m决赛的视频进行分析后发现,约93%的运动员采用“左前右后”的蹲踞方式。其中,黄种人最快纪录保持者苏炳添在将“右前左后”的蹲踞方式改为“左前右后”的蹲踞方式后,100 m成绩也由10.04 s提高到了9.99 s。

因此,反应速度不仅取决于运动员的个人偏好或训练习惯(起跑技术的熟练程度),还取决于大脑组织的特定功能。因此,对于青少年运动员而言,应从小养成“左前右后”的起跑习惯;而对于尚未形成“左前右后”起跑习惯的成年运动员而言,蹲踞方式的改变或许是运动成绩再次取得突破的重要途径。值得注意的是,起跑技术的改进一般应安排在过渡期或一般

准备期内进行,只有这样才能使运动员有足够的时间来改进和适应新技术。

### 1.2 单脚蹬离起跑器与双脚蹬离起跑器

在短跑比赛中,起跑的主要目的是让运动员获得一个尽可能大的动作冲量和初速度,以使身体迅速地摆脱静止状态。为了达到此目的,运动员在蹬离起跑器时必须产生足够大的垂直力量以克服地球引力的作用。同时,运动员也必须产生尽可能大的水平力量以推动身体向前位移<sup>[3]</sup>。

在当前的短跑训练实践中,运动员普遍采用“单脚蹬离起跑器”技术,即在听到发令枪响后,运动员以前置腿为支撑,迅速迈出摆动腿。其基本原理是,通过支撑腿的积极蹬伸和扩大摆动腿的摆动幅度来增加运动员的动作冲量和初速度。然而,我们通过对短跑训练和比赛的长期观察发现,“单脚蹬离起跑器技术”容易导致运动员起跑后的第1步过大、身体重心的过早抬起和产生过大的垂直分量,进而导致“起跑-加速”技术衔接的脱节,最终导致运动表现的降低。为了避免“单脚蹬离起跑器技术”的缺陷,近年来世界级的短跑运动员开始采用“双脚蹬离起跑器技术”,即在听到发令枪响后,运动员双脚同时用力蹬离起跑器,并顺势迈出摆动腿。由于“双脚蹬离起跑器技术”减少了摆动腿的摆动幅度,因而可以防止运动员身体重心的过早抬起和避免产生过大的垂直分量。另一方面,“双脚同时蹬离起跑器”可以比“单脚蹬离起跑器”产生更大的动作冲量。2011年,美国著名生物力学专家Mann等<sup>[9]</sup>的研究发现,相对于普通组短跑运动员(10.10~10.35 s),精英组短跑运动员(9.83~10.0 s)在起跑时有一个明显的“双脚同时蹬离起跑器”的动作,而普通组短跑运动员却没有掌握此技术环节。精英短跑运动员单脚蹬离起跑器时产生的水平分量和垂直力量分别为900 N和1 200 N,而双脚同时蹬离起跑器时产生的水平分量和垂直分量分别可达到1 200 N和1 400 N<sup>[9]</sup>,即两者之间的水平和垂直力量分别相差约300和200 N。显然,300 N的水平力量优势和200 N的垂直力量优势对于一个爆炸性起跑的意义是非常重大的。

因此,“双脚蹬离起跑器技术”能比“单脚蹬离起跑器技术”产生更大的动作冲量,并能有效地避免身体重心的过早抬起,增加运动员的初速度和跑动时的向前性。但值得注意的是,一个流畅的蹬离技术同样也是获得最佳动作冲量和初速度的必要条件。因此,如何使运动员掌握“双脚蹬离起跑器技术”也是教练员必须重视的问题。在短跑训练实践中,“双脚蹬离起跑器技术”的常用辅助练习主要包括双脚半蹲式前抛实心球、后抛实心球、立定跳远等末端释放训练<sup>[10-12]</sup>。

## 2 加速跑技术

### 2.1 增大步长与增加步频

步长与步频是影响跑速的两个基础变量, 两者的合理组合是变换节奏、节省能量和提高跑步经济性的重要途径。在短跑训练实践中, 运动员在蹬离起跑器后应该先通过加快步频来提高加速度, 还是应该先通过增加步长来提高加速度, 一直是短跑技术领域中具有较大争议的问题。有的教练员认为, 起跑后迅速增加步频有利于获得更大的加速度; 但也有教练员认为, 起跑后先增加步长有利于节省能量、优化节奏和提高全程表现。

从 100 m 跑的专项特征来看, 加速跑的主要目的有两个: 一是获得尽可能大的水平加速度, 为运动员在随后的比赛中达到最大速度做准备; 二是节省能量, 为运动员保持最大速度作储备。前期研究表明, 在世界级的 100 m 比赛中, 当跑速低于 9 m/s 时, 步长的增加比步频增加更加有利于运动员获得更大的动作加速度<sup>[13]</sup>, 而优秀运动员在纯加速阶段(0~20 m)的最大速度一般都在低于 9 m/s, 因此, 步长是该阶段速度增加的主导变量; 另有研究表明, 在周期性运动中肌肉收缩的能量消耗与肌肉的收缩速度成立方比, 即肌肉的收缩速度每增加 1 倍, 其耗氧量就会增加 7 倍<sup>[14]</sup>。因此, 从能量代谢的角度来看, 在加速阶段通过增加步长提高加速度比通过加快步频提高加速度更具经济性<sup>[15]</sup>。此外, 运动员的最大速度取决于神经-肌肉系统的协调和放松能力, 若运动员在蹬离起跑器后急于增加步频, 必然会导致神经-肌肉系统的过度紧张, 这不利于中枢神经系统快速发放神经冲动, 也不利于 ATP 的重新合成, 从而对全程节奏和运动成绩产生不利影响。Ito 等<sup>[16]</sup>对优秀组短跑运动员(10.12~10.32 s,  $n=9$  人)和普通组短跑运动员(10.40~10.90 s,  $n=9$  人)加速阶段的步长和步频变化特征进行了对比研究。结果显示, 在纯加速阶段(0~8 步), 优秀组短跑运动员的步长明显大于普通组, 同时, 优秀组短跑运动员的步频又明显小于普通组, 这一结论也得到了 Mann 等<sup>[9]</sup>著名短跑生物力学专家的支持。

因此, 在 100 m 比赛的加速阶段, 步长的增加比步频的增加更有利于运动员提高水平加速度和跑的经济性, 进而提高整体运动表现。值得注意的是, 运动员在蹬离起跑器后第 1 步和第 2 步的步长不宜过大, 否则会导致运动员的身体重心过早抬起, 不利于加速。研究表明, 世界级短跑运动员(9.83~10.00 s)的起跑后第 1 步和第 2 步的步长分别为 1.13 m 和 1.30 m, 优秀短跑运动员(10.10~10.35 s)分别为 1.17 m 和 1.40 m, 一般短跑运动员(10.50~11.00 s)分别为 1.21 m 和 1.50 m<sup>[9]</sup>。

在短跑训练实践中, 为了防止运动员在起跑后过早增大步长, 教练员可以通过“跑格”的方式来限制运动员在加速阶段的步长。必须强调的是, 步长的调整不能一蹴而就, 而应循序渐进, 如从每步增加或缩短 2~3 cm 开始, 逐渐使运动员在加速阶段达到理想的步长, 否则将会破坏运动员的整体技术动作结构和全程节奏。

### 2.2 “直线型”步态与“摇摆型”步态

步宽是指运动员在跑动过程中双脚触地点之间的平行距离<sup>[17]</sup>。在短跑比赛中, 运动员在蹬离起跑器后应该采用什么样的步态模式也一直是短跑技术中具有争议的问题。在短跑训练实践中, 有的教练员主张运动员在蹬离起跑器后使用触地点接近身体重心、步宽较小的“直线型”步态; 也有的教练员则主张运动员使用触地点远离身体重心、步宽较大的“摇摆型”步态(图 1)。

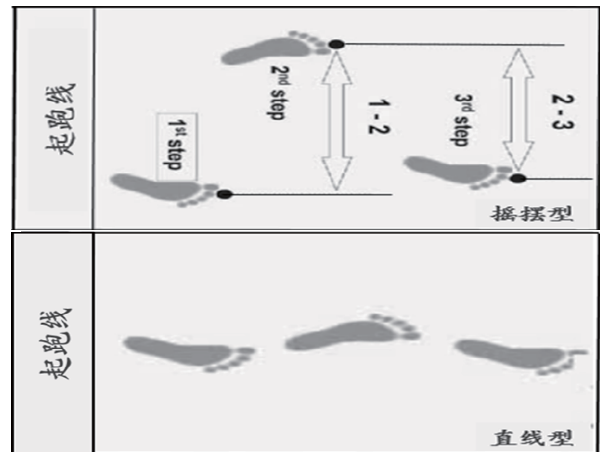


图 1 摇摆型和直线型步态示意图

通过“倒立弹簧摆”理论模型分析可知, 相对于直线型步态, 摇摆型步态更有助于运动员获得更大的加速度。如图 2 所示, 脚的触地点与身体轴线方向的分开角度为  $\alpha$ , 触地阶段产生的小转角为  $\beta$ , 转动方向如图 2 中所示方向, 绕轴顺时针转动, 其中  $L_1$  为质心到触地点的距离, 即腿的长度,  $L_2$  为质心到转动轴的距离, 令  $I_1$  为直线型步态转动时的转动惯量,  $I_2$  为摇摆型步态的转动惯量, 由此可以得出如下关系:

$$\begin{aligned} I_1 &= mL_1^2 \\ I_2 &= mL_2^2 = m(L_1 \cos \alpha)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

由转动动能公式得出如下关系:

$$E_1 = \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2 = \frac{1}{2} mL_1^2 \omega_1^2 \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} m(L_1 \cos \alpha)^2 \omega_2^2 \quad (3)$$

其中,  $E_1$  为直线型步态的转动动能,  $E_2$  为摇摆型

步态的转动动能,  $\omega_1$ 为直线型步态的转动角速度,  $\omega_2$ 为摇摆型步态的转动角速度。由公式(2)、(3)可知, 若想到相同的角速度, 相对于直线型步态, 摇摆型步态所需的转动动能更小, 那么在前一次蹬摆中获得的水平动能则能较少地转化为转动动能, 从而有利于节省更多的能量消耗; 又由转动惯量公式可知, 若两种步态特征转过的角度相同, 在小角度转动中, 转动惯量较小的摇摆型步态在转过相同角度时的角速度会比直线型步态更快, 即摇摆型步态比直线型步态能获得更大的加速度, 从而更有利于运动员在加速阶段达到迅速摆脱静止状态的目的。

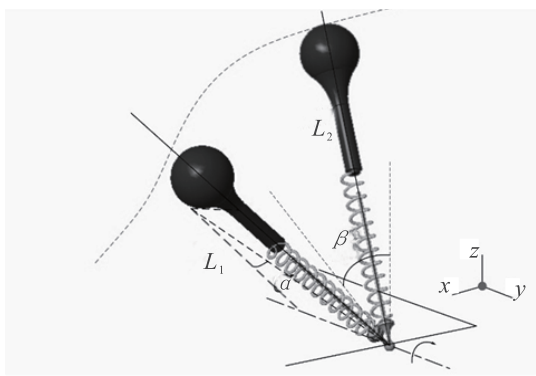


图2 步态特征与倒立弹簧摆模型的相互关系

进入到途中跑阶段后, 运动员已经获得了较大的动作惯性和水平加速度, 因此, 此阶段的主要目的也就变成了“达到和保持最大速度”。由于摇摆型步态的步宽较大, 跑动时向两侧损失的地反力分量也就比直线型步态大, 这不利于运动员将所产生的地反力转化成水平速度; 而“直线型”步态因步宽较小, 蹬地时向两侧损失的地反力分量也相对较小, 因此, 更有利于将运动员所产生地反力转化成水平速度, 推动身体向前位移, 以达到和保持最大速度。在世界短跑名将中, 采用“摇摆型”步态的典型代表有尤塞恩·博尔特、约翰·布雷克、泰森·盖伊等, 而采用“直线型”步态的典型代表只有阿塞法·鲍威尔。另外, Ito等<sup>[16]</sup>研究表明, 优秀短跑运动员(10.12~10.32 s,  $n=9$ )在蹬离起跑器后0~7步的步宽在28~38 cm之间, 但随着比赛的推进, 运动员会逐渐将步宽缩小, 当进入到途中跑阶段后, 步宽缩小到了17 cm左右, 变成了直线型步态。

因此, 在纯加速阶段, 步宽较大的“摇摆型”步态更有利于运动员迅速地摆脱静止状态, 获更大的加速度; 而进入到途中跑阶段后, 步宽较小的“直线型”步态则有利于减少运动员触地时地反力分量的损失, 将

所有地反力转化成水平位移, 以达到和保持最大速度。

### 3 途中跑技术

#### 3.1 “弹簧-质点”与“非对称反弹技术”

“弹簧-质点”理论最早形成于20世纪80年代, 也正是从那时起, 世界短跑技术的发展就一直受到“弹簧-质点”理论的影响, 即在触地时的制动阶段, 当地心引力拉动运动员身体重心下沉时, 肢体被压缩的同时将肌肉中的弹性成分拉长, 储存弹性势能, 并在触地时的驱动阶段通过弹性回缩释放弹性势能, 提升身体重心, 推动身体向前位移<sup>[18]</sup>。迄今为止, 仍有不少训练学专家和教练认为, 运动员在跑步过程中的每次触地都是通过“类似于弹簧的方式”来优化力量输出、提高跑的经济性和整体表现。在“弹簧-质点”理论的影响下, 教练员们在短跑训练实践中会特别重视通过大量的杠铃深蹲练习和超等长练习来提高运动员的髋部伸肌的力量和地反力。毋庸置疑, 杠铃深蹲和超等长练习都是提高短跑运动表现的有效手段。但也有不少学者认为, “弹簧-质点”理论并不能合理地解释精英短跑运动员为什么比普通运动员跑得更快这一现象。

2014年, Clark等<sup>[19]</sup>通过不同水平运动员跑步时的地反力参数进行了对比研究。结果显示, 精英短跑运动员与一般运动员触地时的地反力波形曲线存在明显差异, 即普通运动员触地时的地反力波形曲线与“弹簧-质点”模型的地反力波形曲线基本一致, 但精英短跑运动员触地时的地反力波形曲线却与“弹簧-质点”模型的地反力波形曲线不符, 即精英短跑运动员在触地时制动阶段的地反力波形曲线出现了明显的向左偏移。这说明, 精英短跑运动员之所以能比普通短跑运动员跑得更快, 在于他们独特的肢体动力学特征。从技术结构的层面而言, 普通运动员在触地时仅被动地利用了腿部的“地反力”来推动身体向前位移, 而精英短跑运动员会在触地前尽量抬高膝盖, 并在最初触地后将膝和踝关节的角速度降低2%, 同时使踝关节保持僵硬, 以降低小腿的摆动或晃动, 并最终通过阻止小腿的晃动来提高脚对地面的冲击力。由此可见, 相对于普通运动员而言, 精英短跑运动员掌握了一种独特的“鞭打和力量传送”技术, 而普通运动员却没有掌握这种技术。由于精英短跑运动员在触地时力量的输出和传递过程存在着明显的非对称性, 因此, 可将这种独特的力量输出和传输过程称之为“非对称反弹技术”。“非对称反弹技术”是在“弹簧-质点技术”的基础上更加强调运动员触地时的“趴地”或“鞭打”动作, 因此这种技术对运动员髋关节的灵活性和柔韧

性、髋部屈肌以及股后肌群的力量也提出了更高的要求。在短跑训练实践中,弹力带屈髋练习、负重弓箭步、跨步跳等辅助练习在生物力学特征上与“非对称反弹技术”相近,因此,有助于运动员掌握“非对称反弹技术”。

### 3.2 “四分法”与“五分法”

全程速度节奏既是短跑技术的一个重要组成部分,也是教练员制定比赛策略、诊断专项能力、设计训练方法和手段的重要依据<sup>[20]</sup>。

在过去的研究和训练实践中,训练学专家和教练员们根据世界高水平短跑运动员比赛中的“速度曲线变化特征”,将 100 m 跑的全程节奏划分为起跑、加速跑(0~30 m)、途中跑(30~80 m)和冲刺跑(80~100 m)4 个阶段<sup>[21-22]</sup>(简称“四分法”),并以此为依据安排和设计短跑训练。然而,由公式“速度=步长×步频”可知,以速度曲线的变化特征为依据对 100 m 全程节奏进行划分并不能准确地反映出短跑项目的技术特点,因此,以此为依据设计的训练方法和手段也就不能有效地发展短跑运动员的专项能力或掌握合理的短跑技术。本研究认为,应以运动员比赛中“步长与步频的变化特征”为依据对 100 m 跑的全程节奏重新进行划分。在 100 m 跑全程中,世界优秀短跑运动员的步长一直保持着稳步增加的趋势,但步频会出现多次明显的波动。在 0~20 m,运动员的步频为 4.1~4.2 Hz;但在 20~40 m,步频则由 4.1 Hz 急剧增加到了 4.8 Hz;并在 40~80 m 和 80~100 m,步频两次出现明显的下降。在短跑训练实践中,教练员一般将 20~40 m 运动员步频急剧增加的阶段称之为“转换阶段”。这就是说,根据运动员步长和步频的变化特征可将 100 m 跑重新划分为起跑、纯加速(0~20 m)、转换(20~40 m)、最大速度(40~80 m)和降速(80~100 m)5 个阶段(简称“五分法”)。由图 3 可知,“五分法”是在“四分法”的基础上将“加速跑阶段”进一步细分为“纯加速阶段”和“转换阶段”。

另外,从 100 m 跑中运动员腿部肌电活性的变化特征来看,加速跑和途中跑是短跑运动中两个不同的专项阶段,即在加速跑阶段,触地时间相对较长,运动员有相对充分的时间来完成蹬伸动作,因此,运动员在此阶段主要以髋部伸肌(臀大肌)和腿部前群伸肌(股直肌、股外肌、腓肠肌)的最大收缩为主;但当进入到途中跑阶段后,触地时间相对较短,运动员已经没有足够的时间来进行蹬伸,这将导致腿部前群肌肉参与收缩的比重逐渐下降,髋部屈肌和股后肌群肌肉参与收缩的比重逐渐上升<sup>[23]</sup>。因此,为了实现两个专项阶段的顺利过渡,也需要一个特殊的衔接阶段,即转换阶段。

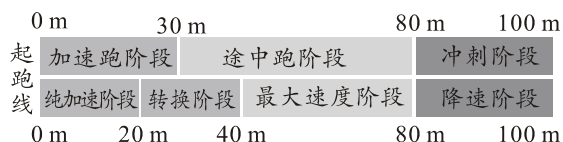


图 3 100 m 全程节奏的两种不同划分方法示意图

“转换阶段”的技术特点是,充分利用“纯加速阶段”获得的速度惯性,在稳定步长的同时通过“顺势跑”将步频增加至最大。在“顺势跑”时,运动员不需 100%用力,肌肉处于相对放松的状态,这一方面有助于节省能量的消耗和加速 ATP-CP 的再合成<sup>[24]</sup>,为达到和保持最大速度储备能量;另一方面,放松的肌肉状态是中枢神经系统快速发放神经冲动、获得最大步频,进而达到最大速度的基本前提<sup>[25]</sup>。在短跑训练实践中,教练员可通过变速跑(20 m 快+20 m 慢+20 m 快+20 m 慢)、阻力跑和助力跑等手段来帮助运动员掌握由“纯加速阶段”向“途中跑阶段”过渡的“转换技术”。

运动技术的不断改进和完善是短跑运动成绩不断取得突破的重要因素,但合理短跑技术的掌握并非一日之功。因此,从青少年运动员接触短跑专项训练伊始,教练员就应该向其灌输正确的短跑技术理念,使其掌握科学合理的短跑技术,因为错误的技术动作结构一旦定型,就难以纠正。对于成年运动员而言,即使当运动成绩遇到瓶颈,不得不对运动技术进行改造时,也切忌大刀阔斧地进行,而只能在原有技术动作的基础上进行微调,否则将会破坏整个技术动作结构系统,导致运动成绩的急剧下降。必须强调的是,科学训练的基本前提是区别对待,聪明的教练员不应将所谓“完美的短跑技术”强加于任何运动员,而是应在其理解正确短跑技术原理的基础上,结合运动员的个人特点,选择合适的训练方法和手段,形成独具风格的短跑技术。

### 参考文献:

- [1] 黎涌明,纪晓楠,资薇. 人体运动的本质[J]. 体育科学, 2014, 34(2): 11-17.
- [2] HARLAND M J, STEELE J R. Biomechanics of the sprint start[J]. Sports Medicine, 1997, 23(1): 11-20.
- [3] MERO A, KUITUNEN S, HARLAND M, et al. Effects of muscle-tendon length on joint moment and power during sprint starts[J]. Journal of Sports Sciences, 2006, 24(2): 165-173.
- [4] EIKENBERRY A, MCAULIFFE J, WELSH T N,

- et al. Starting with the “right” foot minimizes sprint start time[J]. *Acta Psychologica*, 2008, 127(2): 495-500.
- [5] BRAUN C M J, DAIGNEAULT S. Effects of a right hemifield advantage on crossed-uncrossed differentials in simple reaction time: toward a new model of inter-hemispheric relay[J]. *Acta Psychologica*, 1994, 85(2): 91-98.
- [6] MIESCHKE P E, ELLIOTT D, HELSEN W F, et al. Manual asymmetries in the preparation and control of goal-directed movements[J]. *Brain and Cognition*, 2001, 45(1): 129-140.
- [7] CARSON R G. Putative right hemisphere contributions to the preparation of reaching and aiming movements [J]. *Manual Asymmetries in Motor Performance*, 1996: 159-172.
- [8] ELLIOTT D, CHUA R. Manual asymmetries in goal-directed movement [J]. *Manual Asymmetries in Motor Performance*, 1996: 143-158.
- [9] MANN R. The mechanics of sprinting and hurdling [M]. CreateSpace, 2011.
- [10] 王锋, 李成梁, 王新雷, 等. 论末端释放训练及其在竞技体育中的应用[J]. *体育科学*, 2015, 35(4): 82-89.
- [11] TRIPLETT N T, ERICKSON T M, MCBRIDE J M. Power associations with running speed[J]. *Strength and Conditioning Journal*, 2012, 34(6): 29-33.
- [12] WISLØFF U, CASTAGNA C, HELGERUD J, et al. Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2004, 38(3): 285-288.
- [13] HÖGBERG P. Length of stride, stride frequency, flight” period and maximum distance between the feet during running with different speeds[J]. *Arbeitsphysiologie*, 1952, 14(6): 431-436.
- [14] 李广文, 李鸿江. 现代 100 m 跑运动员速度, 步态变化特征理论的应用[J]. *首都体育学院学报*, 2009, 21(2): 250-253.
- [15] 姜自立, 李庆. 现代男子 100 m 速度节奏特征的多维分析及其对训练的启示[J]. *山东体育学院学报*, 2015, 31(3): 98-104.
- [16] ITO A, ISHIKAWA M, ISOLEHTO J, et al. Changes in the step width, step length, and step frequency of the world’s top sprinters during a 100 m race[J]. *New Studies in Athletics*, 2006, 21(3): 35-39.
- [17] JIMSON LEE. Optimal step width out of the blocks [EB/OL]. [2015-07-15]. <http://speedendurance.com>.
- [18] ROBERTS T J, AZIZI E. Flexible mechanisms: the diverse roles of biological springs in vertebrate movement [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(3): 353-361.
- [19] CLARK K P, WEYAND P G. Are running speeds maximized with simple-spring stancemechanics?[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2014, 117(6): 604-615.
- [20] MACKALA K. Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 metres[J]. *New Studies in Athletics*, 2007, 22(2): 7-15.
- [21] MCFARLANE B. Sport-specific: a basic and advanced technical model for speed[J]. *Strength and Conditioning Journal*, 1993, 15(5): 57-62.
- [22] MERO A, KOMI P V, GREGOR R J. Biomechanics of sprint running[J]. *Sports Medicine*, 1992, 13(6): 376-392.
- [23] HAMNER S R, SETH A, DELP S L. Muscle contributions to propulsion and support during running [J]. *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(14): 2709-2716.
- [24] KRAM R, TAYLOR C R. Energetics of running: a new perspective[J]. *Nature*, 1990, 346(19): 265-266.
- [25] WEYAND P G, STERNLIGHT D B, BELLIZZI M J, et al. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2000, 89(5): 1991-1999.