

短跑支撑阶段运动生物力学分析

施宝兴

摘要: 采用测力、高速录像及特殊的数据平滑处理方法研究短跑运动员途中跑技术的运动学和动力学特征, 进行田径技术原理的探索。结果表明, 支撑时期可以分为着地阶段和蹬伸阶段, 蹬伸阶段可分前蹬, 后蹬前段, 后蹬后段。途中跑前蹬段是人体重心垂直方向向上加速的重要时刻, 前蹬时下肢一定程度的垂直加速用力虽影响水平速度, 但对提高垂直速度有积极意义, 前蹬和后蹬前段是身体重心垂直向上加速运动的阶段。着地缓冲后的前蹬用力也是实现良好成绩的技术之一。途中跑着地和前蹬阶段失去的水平速度损失完全可以从后蹬中得到补充。着地点过近对前支撑阶段获得重要的垂直速度不利, 支撑阶段离地前的20ms身体重心速度已经开始下降。

关键词: 短跑; 途中跑; 水平速度; 垂直速度; 周期; 净肌力矩

中图分类号: G804.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-1207(2010)06-0040-04

Sport Biomechanical Analysis of Dash Supporting Phase

SHI Bao-xing

(Physical Education Institute of Guangzhou, Guangzhou 510500 China)

Abstract: The ways of force measurement, hi-speed video record and special data processing were adopted to study kinematic and kinetic characteristics of dash man's running technique. The result shows that the supporting phase can be divided into landing phase and extending phase. The extending phase includes front support phase, the first half of the push phase and the latter half of the push phase. The front support phase is an important moment for vertical acceleration. Though the vertical acceleration of the lower extremities decreases the horizontal speed, it plays a positive role in promoting vertical velocity, which is acquired in front support phase and the first half of the push phase. Powerful pushing after landing support is important in achieving good results. The horizontal velocity loss in landing and front support phase can be compensated in the latter half of the push phase. It is unfavorable for obtaining vertical velocity if the landing position is near the center of gravity. Vertical velocity decreases at the moment of 20ms before the foot leaves the ground.

Key words: dash; running; horizontal velocity; vertical velocity; cycle; net muscular moment

跑是人类活动的基本技能之一, 是人体实现快速位移的手段。短跑技术理论争论最多, 包括对跑的周期划分、短跑动力的来源、着地点远近、下肢关节肌肉工作状况等问题。本研究在实验基础上根据支撑阶段的运动学和动力学特征探索短跑的技术理论。

1 对象与方法

1.1 采用2台JVC9800高速摄像机对15名健将、一、二级短跑运动员起跑后50 m处途中跑的支撑阶段进行定点定焦常规拍摄, 一台拍摄全身, 一台拍摄下肢, 摄像机主光轴与运动平面垂直, 拍摄距离为20 m, 拍摄频率为100 Hz, 曝光时间为1/250 s。测力台(Kistler 9281B型)埋于塑胶跑道距起点50 m处的中间, 测力台台面上粘贴塑胶皮, 厚16 mm, 现场安装后测力台上的塑胶皮与跑道塑胶皮齐平。运动员一旦踏上测力台时发出同步电压信号, 送到置于摄像机镜头前的发光二极管。

1.2 采用动力学数据积分平滑运动学数据的方法。利用测力台测量地面的反作用力, 根据已知的身体质量计算身体重心加速度变化的规律, 根据加速度积分计算速度值。

1.3 图像解析采用德国SIMI运动分析系统, 得到原始关节点坐标后自编程序进行其他计算。

2 结果与分析

2.1 重新认识短跑途中跑支撑阶段的运动学和动力学特征

图1是我国优秀运动员杨某在起跑后50 m处途中跑支撑阶段的运动学和动力学特征合成直观视图, 包括各三维反力、支撑阶段身体重心的水平速度、垂直位移、垂直速度、垂直加速度以及下肢各关节净力矩和脚底压心的变化, 图中的关节净力矩数据为逆向动力学计算的结果, 其计算方法经过验证^[1]。仔细分析水平速度与垂直速度的变化, 发现水平速度着地时下降比较快, 在支撑时刻的中间段变化相对比较平缓。垂直速度的曲线走向就与传统的理论相差比较大, 本研

收稿日期: 2010-11-06

作者简介: 施宝兴, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师. 主要研究方向: 运动技术的生物力学研究.

作者单位: 广州体育学院田径教研室, 广州 510500

究显示垂直速度上升的时刻在支撑着地后的28 ms时刻,垂直速度也在离地前20 ms开始下降。田径运动高级教程认为“在垂直支撑阶段约过0.01 s,身体总重心的位置处于最低点,这时除了膝关节的屈度最大以外…”^[2];李诚志(1987)对我国优秀运动员技术分析表明,重心最低点不是在垂直时刻,膝关节最小也不是在垂直时刻,而是在身体重心过垂直线之后^[3]。显然与本研究的的结果有很大差别。

短跑途中跑支撑阶段时间非常短,一般在100 ms左右,水平方向的身体重心位移变化比较大,能比较正确地进行水平速度的计算,而垂直方向上的位移和速度由于垂直位移量比较小,如李诚志(1987)研究的垂直位移的变化在0.044 m左右,这样导致一阶导数计算的速度变化差异很大,再加上在短跑研究中水平速度是最重要的,探索垂直速度的变化被忽略。

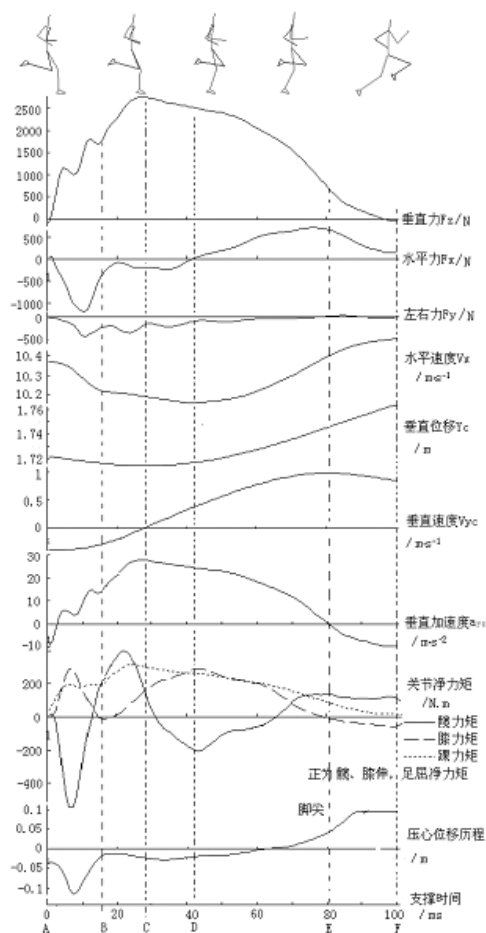


图1 短跑途中跑支撑阶段运动学和动力学特征
Figure 1 Kinematic and Kinetic Characteristics of Dash Support Phase

运动中人体重心的运动学变化应严格遵循力学定律,即其运动应与地面反力呈现良好的力学匹配关系,即应符合重心运动定律的规律。人体重心运动学数据通常都是基于人体

刚体模型对影像解析后再计算得到的,不存在个体的差异,更有简化所带来的生物体实际不是刚体而形成的误差。相反,地面反作用力则可以通过测力台精确地测量得到,在认为力值数据是可靠的基础上去考察人体重心运动,自然就会发现两者之间存在不匹配的力学关系。为能揭示出短跑中人体重心变化的真实规律,本研究采用高速录像同时测量地面的反力,对解析的坐标数据计算的人体重心坐标利用积分平滑进行重新平滑处理,即在常规解析结果的基础上对重心的运动学数据进行重构,从而在理论上解决这个不匹配问题。所谓积分平滑其原理是根据已知的身体重心加速度变化规律及人体重心的初始位置,假设一个初始的速度变量,求得理论上重心位置运动的函数表达式,再进一步将各时刻人体重心的理论坐标与同时刻解析所得到的重心坐标进行最小二乘法拟合便可求得更为正确的初始速度,这样就可根据已知的重心加速度算出完全符合力学定律的任意时刻人体重心的速度及位置^[4]。

图2是对刚体模型身体重心位移进行积分平滑前后的对比,两者均显示身体重心的垂直位移在着地后先下降后上升,但“真实”重心的上升时刻要早于影像解析模型结果中的时刻。因为模型一般把人体处理为刚体,但实际上人体不是个真正的刚体,着地冲击阶段,包含内脏器官及其他部位软组织组成的人体的真实重心的运动与人体刚体模型重心的运动肯定有一定的区别。采用了积分平滑的方法能更加明显地看出重心真实的变化规律。

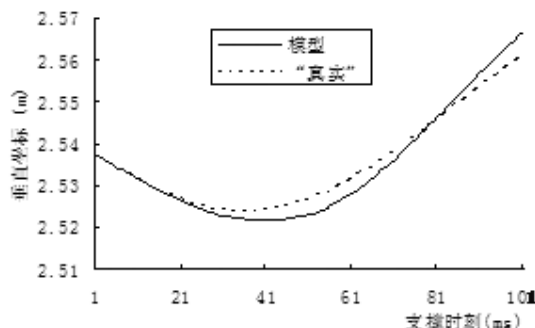


图2 运动员支撑阶段垂直位移
Figure 2 Vertical Displacement of Dash Man in Support Phase

在图1中,我们在各相关变量变化重要的时刻画了竖虚线,就垂直反力来说,显示的是典型的三波上升,线B所示时刻是反力第2波开始增加瞬间,此时着地时水平反力在经过着地的冲击后已经变得较小,水平速度在着地到着地后17 ms的AB段下降最快,B时刻后水平速度下降较小,足底压心位置从着地时的趾关节处急速向踝关节转移后又快速向前移动到第二跖趾关节附近,技术上表现为踝关节的弹性对减少前支撑的水平阻力有重要的意义。而膝关节的肌力矩从着地时的急剧增大经过上升后又回到比较小的时刻,髌关节的肌肉力矩正好处于前群肌肉的退让性收缩到后群肌肉的向心收缩阶段,无论从压心的快速变化和肌肉的工作特点都符合一个动作技术的拐点,所以我们把从着地时刻到B时刻AB这段17 ms称为着地时期。

时刻C是人体重心垂直位移最低点时刻,也是垂直加速

度最大时刻。C时刻后人体的重心开始上升,从时刻B到C阶段人体垂直反力绝对值逐渐达到最大。BC时段身体重心垂直加速度比较大的时刻,有助于克服人体着地瞬间垂直速度的下降,至C点时身体重心将开始升高。BC段垂直反力加速上升,是人体蹬地用力的结果,蹬地使已经变小的水平反力又开始增加,引起水平速度的下降变大,但下降幅度较小,这是由于该时刻身体重心接近于压心的位置,人体虽用力蹬地,但反作用力在水平方向上的分量已经显得很小,而人体的向下的运动得到克制。

从着地到身体重心越过压心时刻,水平速度的减少与支撑水平反力所形成的冲量直接相关,跟瞬间的力值大小无关。BD段的水平冲量比较小与压心快速移动有关,良好的踝关节弹性可降低水平速度减少。从踝关节和膝关节的净力矩来看,BC段也是两关节肌力矩增加比较大的时刻,踝关节肌力矩在C时刻达整个支撑阶段最大,膝关节在D时刻达到整个支撑阶段的最大值,两关节的肌肉在此阶段表现为比较大的力矩。

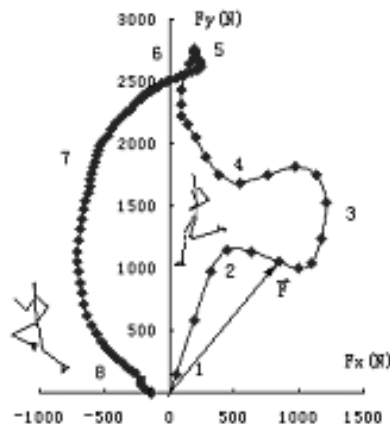
BD段是跑动中支撑阶段比较关键的时刻,从图1的数据分析可以看出,BD阶段是人体垂直速度加速的重要阶段,这种加速对于提高身体重心垂直速度具有重要的意义,人体总重心垂直速度在着地后5 ms瞬间达到向下的最大速度,5 ms后人体向下的垂直速度逐渐减小,着地后25~30 ms时身体重心垂直速度开始向上增加,身体重心开始升高,垂直速度至离地前20 ms时达到最大值。身体处于垂直支撑位置前后时刻阶段的加速蹬伸对于取得垂直速度并对人体的腾空具有重要意义,虽然这个加速从冲量角度看实际上影响水平速度的,但对获得垂直速度具有重大的意义,也是将来结束支撑时形成垂直方向腾起初速度的一个“动力”来源。因此前支撑阶段也是存在加速用力的情况,这种加速引起支撑反作用力方向的变化(图3)。前支撑阶段存在垂直加速用力的情况,但前支撑的加速用力提供了垂直动力,如果不认真考虑垂直方向上的运动规律,也就无法认清短跑的本质规律,这个也是多年来关于前支撑阶段动力来源争论不休的原因,最根本的原因是缺少垂直方向上速度的正确描述。

BD段虽然处于膝关节和踝关节的退让性工作的情况下,但肌肉的净力矩要大于向心收缩时净力矩,前支撑阶段由于身体重心与惯性的作用,下肢关节被迫做退让性工作,下肢关节屈曲呈被压缩的状态,我们的教科书称之为缓冲动作。在着地20 ms后的碰撞行为中,非但没有缓和,肌肉收缩元中主动张力“不再”被缓冲而用于克服外界的更大的阻力,只是由于人体下肢关节生物学因素而被迫让踝、膝两关节退让,实际踝关节关节节点的坐标位置已经证明在那个时间段上升。一般的教科书均认为,后蹬时是动力,前蹬是阻力,姜姚黄认为短跑中主要的阶段是后蹬,并强调蹬地的力量,主要是支撑腿的迅速伸直所造成的。在前支撑阶段用前蹬来描述着地和着地后的用力很普遍,而根据跑时前支撑时所表现出来的运动学和动力学特征我们认为前支撑阶段可以划分为着地和前蹬。着地技术讲究弹性,前蹬的目的是提高身体重心速度,并与后支撑时的蹬伸组成统一的连贯动作技术。

从D时刻开始垂直方向上的蹬伸力度开始减弱,是人体水平速度由减少到增加的分界点,此时身体重心投影点越过

压心位置,此时人体的垂直反力开始减少,水平分力逐渐增加,水平速度随之提高,逐渐弥补AD段损失的水平速度。在关节力矩上表现为踝关节力矩的减少,但踝关节肌肉功率急剧增加,膝关节虽然净肌力矩逐渐减少,但膝关节伸肌群的功率也迅速增加。后蹬阶段把力逐渐用到水平方向上去这对减少垂直波动差有一定意义。

E时刻后是人体垂直分力不足于支撑人体向上加速运动而表现出人体支撑阶段身体重心垂直速度出现下降,此时身体重心位移继续升高,但垂直速度逐渐减小,水平分力也下降,水平速度增加缓慢。后蹬的后半部分EF阶段人体虽然继续向上运动,下肢关节肌肉的功率发生了一些变化,踝关节肌肉功率变小,膝关节出现屈肌力矩,也就是“屈蹬现象”。屈肌力矩表现出比较大的功率,髋关节肌肉功率也达到后蹬阶段的最大。



1 着地 5 力垂直最高 6 垂直瞬间 7 后蹬阶段

图3 跑的支撑力矢量图

Figure 3 Support Force Vector in Running

2.2 支撑阶段的周期划分

图1中显示了短跑中下肢关节肌肉的净力矩的变化,髋关节力矩在着地后10 ms左右有很大的屈肌力矩,髋关节在支撑阶段存在关节屈伸肌群交替工作,前群肌肉先退让性工作,然后是后群肌肉快速收缩,在离地前髋关节伸肌功率达最大。而膝关节的伸肌在接近一半的支撑时间内是做离心收缩,而且表现出比较大的伸膝力矩。离地前20%时刻膝关节屈肌起重要作用。所以说后蹬阶段的后半部分如果不把注意力转移到膝屈肌群的力量训练上来,将影响水平速度的获得。

根据支撑阶段总体的运动学和动力学特征,也参考下肢主要关节净肌力矩的实际情况,在支撑阶段,我们把AB称为着地阶段,如果把BD和DF合并称为蹬伸阶段,这样短跑支撑阶段只划分为着地阶段和蹬伸阶段。蹬伸阶段中的BD称为前蹬时期,DF段还是可以按照习惯称为后蹬,把整个后蹬阶段的DE称为后蹬前期,EF称为后蹬后期。在整个支撑阶段的中间时刻BE段是最重要的垂直蹬伸阶段,后蹬阶段DF是获得水平速度补偿的重要阶段。这样更有利于对技术的理解,也符合人体意识用力的实际情况。跑的周期划分改进为如图4所示。

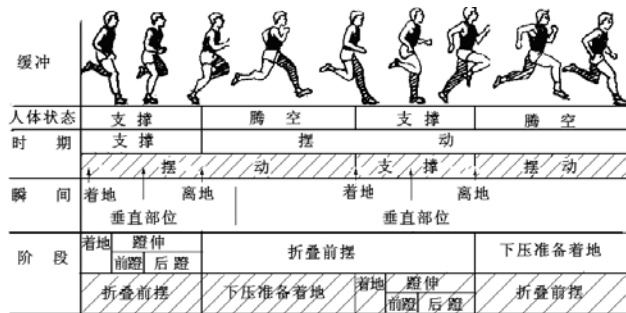


图4 跑的周期划分示意图

Figure 4 Division of Cycles in Running

3 结论与建议

3.1 途中跑支撑阶段可以划分为着地阶段和蹬伸阶段。蹬伸阶段也可以分为前蹬和后蹬。根据下肢肌肉工作情况后蹬可以划分为后蹬前段、后蹬后段。后蹬前段前群肌肉先退让性工作，然后是后群肌肉快速向心收缩。后蹬后段膝关节以屈群肌肉工作为主。

3.2 前蹬阶段运动员加速用力，此加速用力虽影响水平速度，但对提高垂直速度有积极意义。支撑阶段离地前的20 ms身体重心速度已经开始下降，前蹬和后蹬前段是身体重心垂直向上加速运动的阶段。着地后充分的前支撑用力也是实现良好成绩的技术之一。

3.3 途中跑前支撑阶段失去的速度损失完全可以从后蹬中得到补充，着地点过近对前支撑获得垂直速度不利，片面强调着地点接近身体投影点的理论会破坏动作的合理性。

3.4 本研究采用的积分平滑处理的数学方法可提高研究的精度。支撑阶段划分理论可有助于根据下肢关节肌肉的工作特点来选择合适的训练方法。

参考文献：

- [1] 施宝兴, 魏文仪. 应用逆向动力学计算关节内力的可靠性分析[J]. 北京体育大学学报, 2004, 27(9): 1223-1225
- [2] 田径运动高级教程[M]. 体育学院专修通用教材. 全国体育学院教材委员会审定. 北京: 人民体育出版社, 1996
- [3] 陆金甫, 关治著. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 1
- [4] 施宝兴, 魏文仪. 影片数据平滑方法的研究[J]. 西安体育学院学报, 2001, 18(2): 42-43
- [5] 冯雅芳. 起跑后加速跑蹬地力测试结果与分析[J]. 北京体育大学学报, 1989, 12(2)
- [6] 施宝兴. 短跑途中跑支撑阶段支撑腿关节肌肉生物力学特性的研究[J]. 天津体育学院学报, 2006, 21(6): 495-499
- [7] 跑跳中下肢关节肌肉生物力学特性测试方法的研究[J]. 南京体育学院学报, 2008, 13(4)
- [8] 奥卓林等主编, 卢建功、周成之等译. 田径运动[M]. 西安体育学院学报编辑部, 1991
- [9] 崔喜灿, 毛兴海. 论跑步周期阶段的重新划分[J]. 中国体育科技, 2003(2): 49-51.
- [10] 蔡国钧. 短跑技术基础理论初探[J]. 江苏体育科技, 1982, (1): 12-19
- [11] 杜少武等. 短跑前支撑阶段动力学分析[J]. 体育科学, 2002(5): 122-123.
- [12] 骆建. 论短跑途中跑支撑时人体重心轨迹变化特点[J]. 成都体育学院学报, 1999, 25(3): 36-37

(责任编辑: 何聪)