

·竞赛与训练·

对我国男子优秀跳高运动员起跳技术的三维运动学分析

宋广林¹, 闫之朴²

(1. 山东师范大学 体育学院, 山东 济南 250014; 2. 山东聊城大学 体育学院, 山东 聊城 252059)

摘要:采用两台 SONY 高速摄像机对我国部分男子优秀背越式跳高运动员进行赛场同步拍摄, 运用爱捷运动录像反馈系统进行解析。结果表明: 在起跳开始瞬间, 身体重心的垂直速度较低; 起跳腿的髋、膝、踝 3 关节蹬伸不充分, 摆动腿的摆动速度和高度较低, 助跑水平速度未能合理地转化为起跳的垂直速度。起跳的垂直速度是影响我国男子跳高运动员成绩的主要因素。

关键词:跳高起跳技术; 三维运动学; 男子跳高运动员; 中国

中图分类号:G823.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7116(2005)06-0115-04

Three dimensional kinematical analysis of the lift-off technique used by excellent male high jumpers in China

SONG Guang-lin¹, YAN Zhi-pu²

(1. College of Physical Education, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. College of Physical Education, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract:The authors used two Sony high speed video cameras to shoot part of the excellent male back-crossing style high jumpers in China in the contest field synchronously and analyzed the video by applying Aijie sports video feedback system, and revealed the following findings: At the instant the lift-off began, the vertical speed of the body's center of gravity was kind of low; the hip joint, knee joint and ankle joint of the lift-off leg were not stretched out sufficient enough, the swinging speed and height of the swinging leg were kind of low, and the horizontal run-up speed failed to be turned into vertical speed rationally; the vertical speed of lift-off was the main factor that affected the performance of male high jumpers in China.

Key words:lift-off technique for high jump; three dimensional kinematics; male high jumper; China

起跳技术是背越式跳高的关键技术环节。本文旨在对我国现阶段男子优秀跳高运动员(见表 1)的起跳技术进行三维运动学分析, 并与国外优秀选手相关运动学参数进行比较, 从而作出正确的技术诊断, 为我国男子跳高运动训练实践提供借鉴和参考。

表 1 研究对象的基本情况

序号	姓名	单位	身高/m	体重/kg	本次成绩/m
1	刘洋	国家集训队	1.86	64	2.24
2	徐欣	解放军队	1.89	68	2.21
3	张树峰	黑龙江队	1.85	63	2.18
4	范恩亮	河北队	1.88	70	2.14
5	徐伟强	山东队	1.88	71	2.14
6	崔凯	上海队	1.92	70	2.14
7	吴欣榕	上海队	1.92	65	2.10
8	王舟舟	上海队	1.98	75	2.10

采用两台 SONY 摄像机进行现场同步拍摄, 拍摄频率为 50 帧/s。两摄像机距拍摄中心均为 15 m, 两机的高度均为 1.20 m, 两机主光轴夹角约为 90°。比赛前后放置了 PEAK 三维立体坐标辐射框架, X 轴与横杆平行, 向左为正向, Y 轴与横杆投影线垂直, 助跑弧线内侧为正向, Z 轴垂直向上。采用爱捷运动录像反馈系统, 选用日本松井秀治人体模型进行图像解析。两组图像各关节的数据用 DLT 方法进行合成, 生成空间坐标。合成后进行数据截断误差法平滑处理, 截止频率位移量(位移、角度)选用 8 Hz, 速度量(位移速度、角速度)选用 6 Hz。本文被试运动员均从右侧助跑用左脚起跳。

均数比较 T 检验和相关分析采用社会科学统计软件包 SPSS for Windows Version 12.0。现将结果报告如下。

1 起跳开始瞬间身体重心的垂直速度

起跳开始瞬间, 运动员的身体重心一般表现为向下的运

收稿日期: 2005-01-31

作者简介: 宋广林(1960-), 男, 教授, 研究方向: 田径教学与训练。

动,因此,多数运动员在此时的垂直速度是向下的。本文被试者此时的垂直速度平均为 $(-0.13 \pm 0.12)\text{m/s}$,国外优秀运动员平均为 $(-0.48 \pm 0.21)\text{m/s}$ (见表 2),经检验,两组变量差异有显著性意义(见表 3)。我们知道,在起跳阶段起跳腿会受到地面强大的冲力,毫无疑问,起跳开始瞬间身体重心的垂直速度越大,起跳腿的负担就越大。美国著名生物力

学专家贾萨斯·代培那(Jesus Dapenna)^[1]认为:在起跳脚着地瞬间,向下的垂直速度较小者,是这方面技术最好的跳高运动员。另外,我国运动员在力量素质特别是爆发力方面与国外优秀运动员相比不占优势,所以,本文被试者这种技术符合我国运动员的身体特点,从而能够有效地降低起跳腿的负担,有利于快速完成蹬伸起跳。

表 2 国内外运动员重心高度和助跑速度¹⁾

姓名	身高/m	重心高度/m	重心高度:身高/%	水平速度/(m·s ⁻¹)	垂直速度(m·s ⁻¹)
刘洋	1.86	0.90	48.3	7.74	-0.13
徐欣	1.89	0.87	46.2	6.66	0.10
张树峰	1.85	0.88	47.5	7.35	-0.10
范恩亮	1.88	0.93	49.6	7.20	-0.07
徐伟强	1.88	0.96	51.3	7.75	-0.10
崔凯	1.92	0.86	44.8	7.30	-0.30
吴欣榕	1.92	0.93	48.3	7.02	-0.22
王舟舟	1.98	0.99	50.2	6.36	-0.22
$\bar{x} \pm s$	1.90 ± 0.04	0.92 ± 0.05	48.3 ± 2.1	7.17 ± 0.49	-0.13 ± 0.12
阿费杰廷科	2.02	0.97	48.0	7.8	-0.3
达尔蒙泽尔	1.90	0.90	47.5	7.7	-0.6
霍华德	1.96	0.95	48.5	7.9	-0.3
马泰	1.83	0.90	49.0	7.8	-0.2
纳尔克维特	1.93	1.01	52.5	7.9	-0.5
帕克林	1.91	0.89	46.5	7.6	-0.5
索托马约尔	1.95	0.90	46.5	8.3	-0.9
斯通斯	1.95	0.98	50.0	6.9	-0.4
兹瓦拉	1.91	0.94	49.0	6.5	-0.6
$\bar{x} \pm s$	1.93 ± 0.05	0.94 ± 0.04	48.6 ± 1.9	7.60 ± 0.56	-0.48 ± 0.21

1)国外优秀运动员数据引自参考文献[5]。

表 3 我国与国外优秀运动员的水平速度、重心高度、重心高度/身高¹⁾($\bar{x} \pm s$)

运动员	水平速度/(m·s ⁻¹)	重心高度/m	重心高度·身高 ⁻¹ /%	垂直速度/(m·s ⁻¹)
我国运动员	7.17 ± 0.49	0.92 ± 0.047	48.28 ± 2.12	-0.13 ± 0.12
国外优秀运动员	7.60 ± 0.56	0.94 ± 0.043	48.61 ± 1.87	-0.48 ± 0.21
t 值	-1.681	-1.060	-0.347	4.092
P 值	>0.05	>0.05	>0.05	<0.01

1)均为起跳开始瞬间的运动学参数;国外优秀运动员数据引自参考文献[5]。

2 起跳开始瞬间身体重心的水平速度和重心高度

由力学原理知道,人体所能够腾起的高度是由人体在垂直方向上所受的垂直冲量决定的,垂直冲量的大小决定动量的改变量,即决定人体腾起瞬间的垂直速度。公式:

$$\int F_z dt = mV_{z2} - mV_{z1}$$

其中: F_z 为人体所受的冲力在垂直方向上的分量, t 为起跳时间; m 为人体的质量; V_{z2} 为起跳离地瞬间的质心垂直速度; V_{z1} 为起跳着地瞬间的质心垂直速度。从而表明,为了提高起跳后腾起的垂直速度,一方面要加大对地面的垂直作用力,另一方面还要延长力的作用时间。助跑结束瞬间的水平速度和重心高度对起跳过程中人体所受垂直冲量的大小有着重要的影响。

助跑速度越大,人体具有的动量越大,那么在起跳过程中特别是在缓冲阶段,人体对地面产生的作用力越大,对地面的垂直作用力也相应加大。从表 2 的统计数据来看,本文被试者起跳时的重心水平速度平均为 $(7.17 \pm 0.49)\text{m/s}$,国外优秀运动员平均为 $(7.60 \pm 0.56)\text{m/s}$,经统计学检验,两者

差异没有显著性意义($P > 0.05$)。但是徐欣、王舟舟速度较低,分别仅为 6.66m/s 和 6.36m/s ,这对有效增加人体对地面的垂直作用力极为不利,在以后的训练中,进一步提高助跑速度应是他们努力的方向之一。

另一方面,要加大动量的改变量,提高起跳结束瞬间的垂直速度,还要尽量延长人体对地面的作用时间。但是单纯地延长力的作用时间对起跳效果是不起作用的,必须在保证对地面产生最大垂直作用力的情况下加大起跳时间才是最有效的。如果人体对地面施加的垂直作用力是一定的,那么在起跳阶段蹬伸距离越大,人体对地面的作用时间则越长。为此,运动员要使身体重心在起跳着地瞬间处于较低的位置,而在起跳结束瞬间身体重心要处于较高的位置。表 3 列出了中外运动员助跑结束即起跳脚着地瞬间的重心高度,为了增加可比性,也同时列出了每名运动员身体重心高度与其身高的百分比。从本文被试者与国外优秀运动员的数据对比情况来看,我国运动员的重心高度与身高的百分比值平均为 $(48.3 \pm 2.1)\%$,外国优秀运动员为 $(48.6 \pm 1.9)\%$,经统计

学检验,差异没有显著性($P > 0.05$)。但我国部分运动员此指标较高,应结合自身情况适度降低身体重心高度,延长力的作用时间,加大垂直冲量。

3 起跳阶段起跳腿的角量参数

由表 4 可知,被试者起跳离地瞬间起跳腿的三关节均没有充分蹬伸,仍有较大的蹬伸余地。笔者认为这与起跳腿的专项力量素质有关。从起跳腿肌肉的工作方式考虑,在起跳的缓冲阶段,起跳腿的伸肌作离心收缩,而在蹬伸阶段作向心收缩。被试者在起跳的最大缓冲瞬间左膝角平均(144.0 ± 8.99)°,卢钢等人^[2]认为最大缓冲时膝关节角应掌握在 $140^\circ \sim 150^\circ$,可见总体均数在此范围之内,但部分被试者此时左膝角过小。经统计学检验,起跳最大缓冲瞬间左膝角与离地瞬间的膝关节角相关性是显著的,从而说明在一定程度上膝关节缓冲幅度越小即左膝角越大,起跳腿蹬伸越充分。而最大缓冲时起跳腿膝关节角的大小与起跳腿伸肌的离心收缩能力有关,因为起跳腿伸肌的离心收缩能力越高,起跳腿承受负荷的能力越强,因而起跳腿越不容易弯曲。当然,起跳腿没有充分蹬伸还与伸肌的向心收缩能力有关,不具备一定的爆发性蹬伸能力,起跳腿是不容易充分伸展的。

表 4 起跳阶段有关起跳腿角量参数 (°)

运动员	最大缓冲		离地瞬间		
	左膝角	左踝角	左踝角	左膝角	左踝角
刘洋	148.6	152.3	143.7	168.8	162.3
徐欣	133.4	155.2	135.3	162.1	171.4
张树峰	135.0	147.4	146.3	162.1	168.0
范恩亮	150.5	157.5	136.5	165.8	167.6
徐伟强	151.0	153.3	142.8	176.6	163.2
崔凯	153.8	156.4	137.6	174.8	174.3
吴欣榕	131.7	154.7	137.3	165.0	169.8
王舟舟	147.7	156.3	146.4	168.1	159.6
$\bar{x} \pm s$	144.0 ± 8.99	154.1 ± 3.21	140.7 ± 4.54	167.9 ± 5.40	167.0 ± 4.97

另外,左踝关节的蹬伸也不容忽视。被试者在起跳离地瞬间,左踝角平均为(140.7 ± 4.54)°,显然还有很大的蹬伸余地。左踝关节与膝、髌关节相比,虽属小关节,但是它在起跳过程中却具有重要作用,小关节的强弱直接影响蹬伸速度并

决定人体上位环节作用力的效率^[3]。在起跳结束瞬间,左膝角、左髌角分别平均为(167.9 ± 5.40)°、(167.0 ± 4.97)°,显然没有充分伸展。前苏联弗·克里亚热夫等认为:起跳阶段左踝关节的屈伸能力决定起跳阶段的蹬伸程度。所以,左踝关节在跳高起跳过程中起着关键作用。

4 起跳阶段摆动腿的摆动角速度

摆动腿的快速摆动对增加垂直冲力从而提高起跳的垂直速度起着至关重要的作用。为了加大垂直冲力,摆动腿应该快速向前上方摆动。摆动腿的平均角速度可以作为摆动腿摆动效果的一项评价标准,因为,一般来说摆动角速度越大,摆动腿对地面产生的垂直作用力也就越大。被试者摆动腿的平均角速度只有(311.3 ± 76.5)°,而朱建华在跳 2.37 m 破世界纪录时,摆动腿的平均角速度竟高达 589.6 ^[4]。本文被试者摆动腿角速度均低于朱建华,并且有不同程度的差距。本文被试者摆动腿摆动速度较低的原因,笔者认为可能与摆动腿的力量有关,也可能与起跳腿的专项力量素质有关,因为起跳腿的力量不够,起跳的蹬伸速度就有限。我们知道,人体的运动是在神经系统的调节下进行的,在一定程度上,人体是一协调、有序、完整的有机体,摆臂和摆动腿的摆动速度应与起跳腿的蹬伸速度是协调一致的。倘若过分追求摆动速度,势必会加大起跳腿的负担,反而会影响到起跳腿的蹬伸速度。所以,问题的关键还是在于起跳腿的专项力量素质,只有提高起跳腿的专项力量素质,加大摆动速度,才能提高人体所受的垂直冲力,从而有利于提高起跳的垂直速度。

5 起跳结束瞬间的垂直速度

跳高成绩是由起跳结束瞬间的重心高度 h_1 、身体重心在空中的腾起高度 h_2 、身体重心的最高点距横杆的垂直距离 h_3 组成。经统计学检验(见表 5),本文被试者与国外优秀运动员在 h_1 和 h_3 上均没有显著性差异($P > 0.05$),而在 h_2 上与国外优秀运动员相比差异有非常显著性($P < 0.01$),这说明本文被试者与国外优秀运动员在成绩上的差距主要是由 h_2 造成的。按照斜抛运动的原理,在竖直方向上身体质心作匀变速运动,起跳结束瞬间的垂直速度决定质心的上升高度。所以,本文被试者和国外优秀运动员在成绩上的差距主要是由于起跳结束瞬间的垂直速度造成的。

表 5 起跳阶段有关运动学数据¹⁾($\bar{x} \pm s$)

对象	V_z	V_{k2}	V_k 变化	h_1	h_2	做功距离	h_3
国外运动员	4.59 ± 0.12	3.83 ± 0.39	3.48 ± 0.55	1.35 ± 0.06	1.05 ± 0.04	0.45 ± 0.07	0.06 ± 0.02
本文被试者	4.29 ± 0.09	4.42 ± 0.47	2.82 ± 0.33	1.32 ± 0.04	0.91 ± 0.05	0.38 ± 0.04	0.08 ± 0.04
t 值	-5.34	2.52	-2.81	-1.31	-5.53	-2.28	0.77
df	12	12	12	12	12	12	12
P 值	<0.01	<0.05	<0.05	>0.05	<0.01	<0.05	>0.05

1) V_z :起跳结束瞬间的垂直速度; V_{k2} :起跳结束瞬间的水平速度; V_k 变化:起跳结束瞬间的水平速度与起跳开始瞬间的水平速度之差。世界优秀运动员数据引自参考文献[5]。

V_h 变化量笔者把它界定为起跳开始瞬间与起跳结束瞬间质心水平速度之差,也就是起跳过程中质心水平速度的损失量。本文被试者水平速度变化量平均为 (2.82 ± 0.33) m/s,而国外优秀运动员平均为 (3.48 ± 0.55) m/s,经统计学检验,两组变量差异有显著性意义($P < 0.05$),这说明本文被试者起跳前后水平速度的变化量较小,也就是说本文被试者在起跳过程中水平速度的损失较小。从而表明本文被试者在起跳过程中受到的来自地面的水平制动力较小。而地面的水平制动力在很大程度上是由缓冲阶段起跳腿的离心收缩力决定的。缓冲阶段起跳腿伸肌发挥的离心收缩力越大,来自地面的水平制动力也就越大,反之,越小。所以可以推断出,本文被试者在缓冲阶段所发挥的离心收缩力与国外优秀运动员相比较小。倘若离心收缩能力较低的话,那么在缓冲阶段起跳腿会因离心收缩能力低而撑不住身体,会使身体向前方冲出去。其结果呢,起跳结束后身体重心向前的水平速度较大,而向上的垂直速度反而较低,这对腾起高度 h_2 是不利的。经统计学检验,本文被试者起跳结束瞬间水平速度明显高于国外优秀运动员,而向上的垂直速度上却明显低于国外优秀运动员。这是当前我国男子跳高运动员所普遍存在的问题。为解决这个问题,我们认为应特别注重发展起跳腿伸肌的离心收缩能力。只有离心收缩能力增强了,人体才不致于在起跳过程中快速地向前方冲出去。另外更为重要的是有利于由助跑所获得的动能转化为起跳腿伸肌的弹性势能。这种被储存的弹性势能能够促进起跳腿的伸肌在蹬伸阶段产生较大的向心收缩力,从而能够产生较大的垂直速度。同时离心收缩能力的增强,能够在蹬伸阶段产生较快的离心收缩速度。肌肉力学试验表明:肌肉产生的向心收缩力量不仅与肌肉的初长度有关,更与肌肉的离心收缩速度有关。较快的离心收缩速度能够对肌肉神经系统产生较强的刺激强度,因此肌肉会产生较强的牵张性反射,从而有利于肌肉在向心收缩阶段产生较强的爆发力。因此提高起跳腿伸肌的离心收缩能力对于提高起跳的垂直速度具有特别重要的意义。同时,在发展起跳腿离心收缩能力的训练方法和手段上,应严格符合跳高起跳的专项技术特点,如注意用力性质、动作结构等,只有这样才能收到较好的训练效果。

由表5可知,本文被试者在起跳阶段蹬伸距离平均为 (0.38 ± 0.04) m,而国外优秀运动员平均为 (0.46 ± 0.07) m,经检验,两组变量差异有显著性意义($P < 0.05$),表明本文被试者蹬伸距离偏小。蹬伸距离的大小等于起跳结束瞬间重心高度 h_1 与起跳开始瞬间重心高度 h_0 之差。从力学的角度来讲,蹬伸距离越长,越有利于提高起跳的垂直速度。另外,经统计学检验,蹬伸距离与起跳结束瞬间垂直速度有显

著性相关,相关系数为0.600,这进一步说明了蹬伸距离越长,起跳的垂直速度越高。蹬伸距离除身高因素外,与起跳开始瞬间的重心高度和起跳腿是否充分蹬伸等因素有关。建议本文被试应合理地降低起跳开始瞬间的重心高度,提高起跳腿的专项力量素质,充分蹬伸起跳腿的髌、膝、踝关节,加大蹬伸距离。

6 结论与建议

(1)在起跳开始瞬间,我国运动员身体重心的垂直速度较低,符合自身特点,有利于快速完成蹬伸起跳。

(2)我国运动员的髌、膝、踝3关节没有充分蹬伸,这与起跳腿伸肌的离心收缩能力有关,离心收缩能力影响起跳腿的缓冲幅度,从而进一步影响起跳腿的蹬伸;另外还与起跳腿伸肌的向心收缩能力有关,踝关节的力量以及柔韧性也起着关键作用。

(3)在起跳阶段,我国运动员摆动腿的摆动速度与国外优秀运动员相比较低,这与起跳腿的蹬伸速度有关。

(4)我国运动员起跳的垂直速度较低,与国外优秀运动员在成绩上的差距主要是由起跳的垂直速度造成的。起跳腿的离心收缩能力差,助跑的水平速度没有合理地转化到起跳的垂直速度上去。建议应特别注重发展起跳腿的离心收缩能力。

总之,影响我国男子跳高运动员水平的原因为复杂。起跳技术的每一环节都对其后继环节有着直接的影响,且有着明显的因果关系。技术的改进应严格按照跳高的技术结构特点,提高跳高的专项力量素质。

参考文献:

- [1] Dapenna J. Biomechanical analysis of the Fosbury - flop[J]. Track Technique 1988, 104:3307 - 3333.
- [2] 卢 钢, 蔡永祥. 背越式跳高技术力学分析[J]. 体育与科学, 1998, 19(4): 63 - 64.
- [3] 全国体院教材委员会. 运动生物力学[M]. 北京: 人民体育出版社, 1999: 211 - 212.
- [4] 冯敦寿, 王大愚. 朱建华创跳高2.37 m世界纪录的技术特点初析[A]. 现代跳高训练和技术研究[C]. 上海体科所成果专辑.
- [5] 布吕格曼. 第六届世锦赛生物力学研究报告(跳高)[J]. 田径, 1998(4): 22 - 24.

[编辑:周威]