

跳远前旋角动量研究

石磊¹, 陈亮²

(1. 天津师范大学体育科学学院, 天津 300387)

(2. 天津体育学院运动生物力学实验室, 天津 300381)

[摘要] 运用录像解析法对跳远运动员起跳过程中导致身体前旋角动量的变化进行定量分析. 研究发现, 运动员着板—垂直支撑阶段由于制动力的作用, 使人体产生向前翻转的角动量, 且增长幅度较大. 通过垂直支撑面后制动力转变为动力, 由于偏心力矩的作用, 角动量出现一定的增加或减小, 但幅度较小; 运动员的实际成绩和理论成绩的差值与离板时身体前旋角动量成正相关, 说明减小起跳离板时的前旋角动量有助于维持身体在空中的平衡, 从而能够更有效地利用身体质心抛物线所能达到的距离, 提高跳远成绩.

[关键词] 跳远, 起跳, 前旋, 角动量

[中图分类号] G823.3 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2014)02-0140-05

Study on the Angular Momentum of Forward Rotation of the Long Jump

Shi Lei¹, Chen Liang²

(1. School of Sports Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

(2. Biomechanics of Sports Laboratory, Tianjin University of Sports, Tianjin 300381, China)

Abstract: Based on the quantitative analysis towards the changing characteristics of the angular momentum when the long jumpers are turning around the centre of mass horizontal axis in the process of the take-off by video analysis method, the study finds that influenced by the breaking force, the body gets the angular momentum of turning forward in the stage from touching down to the vertical support in long jump, and the rate of growing is very large. After passing through the vertical support surface, the breaking force changes to the motivate power, as it is affected by the moment of eccentric force, the angular momentum increases or decreases, but in a small range; the difference between the actual achievement and theory achievement is positively related to the plate body of spin angular momentum, which shows that the reducing the take-off from the board before the spin angular momentum helps to maintain the body in balance in the air, so that athletes can improve performance by making more effective use of the achieving distance of body mass parabola.

Key words: long jump, take-off, forward rotation, angular momentum

不论跳远运动员水平高低,在起跳之后都会感觉到身体有不同程度的前旋,而跳远运动腾空技术的发展也正是围绕着如何克服身体前旋来进行的,从蹲踞式到挺身式,再到当今世界优秀选手普遍采用的走步式,其目的都是为了减小身体在空中的前旋,维持身体的平衡,最大限度地利用身体质心抛物线轨迹,把两腿充分地向前伸出,以获得最佳的成绩.相反,出现在 20 世纪 70 年代的前空翻式跳远(已被禁用)正是利用了起跳中获得的前旋来取得最佳的落地姿势.不论是利用前旋还是抑制前旋,都体现了世界跳远运动技术围绕着克服和利用前旋所进行的一系列变革.然而一直以来人们都把注意力过多地集中在起跳后的腾空动作,却忽略了前旋产生的重要环节——起跳.最好的跳跃来自于出色的助跑与起跳的结合,而身体在空中任何的前旋和落地时难以做出的有效动作,归根到底是起跳存在问题.本文尝试把定性分析与定量研究相结合,研究起跳中导致身体前旋角动量的产生原因及前旋角动量在起跳中的变化特征,并对前旋角动量与跳远成绩的关系进行相关的探讨与分析,以期教练员和体育科研人员对跳远运动的研究提供一点新的思路.

收稿日期:2013-04-08.

通讯联系人:石磊,讲师,研究方向:田径运动教学与训练. E-mail: shileitjsd@163.com

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为参加全国体育院校田径比赛男子跳远决赛的 11 名运动员,实际成绩距离平均成绩为 7.48 m(包括趾-板距离)。

1.2 研究方法

1.2.1 文献资料法

通过大量阅读与本研究相关的国内外文献资料,了解当前国内外的研究现状,并进一步确定研究方向和内容。

1.2.2 录像法

在比赛现场采用 Panasonic M9500 摄像机对男子跳远决赛进行拍摄,拍摄场频率为 Pal 制 50 Hz。从助跑道正侧面距离跑道中线 20 m 处进行拍摄,摄像机高 1.20 m,以助跑道内距丈量线 0.8 m 处为拍摄中心,拍摄范围为 5 m。

1.2.3 解析法

使用国产爱捷 EIMG71 解析系统完成录像解析工作。人体模型选用扎齐奥斯基人体模型。对所得数据进行平滑处理,平滑采用的滤波截断频率为 8 Hz,最终获得本研所需数据。

1.2.4 数据统计法

用 SPSS13.0 软件对数据进行处理分析。

1.2.5 人体前旋角动量的计算

通过身体重心额状轴的角动量为各环节重心所在位置的角动量与各环节相对于重心的角动量的和,即:

$$H_0 = \sum_{i=1}^{16} (r_i m_i v_i + I_i \omega_i). \quad (1)$$

式(1)左边为通过人体重心额状轴的整个人体的角动量,右边为身体各环节相对于人体重心额状轴的角动量。其中 m_i 、 r_i 、 v_i 、 I_i 、 ω_i 分别表示环节的质量,环节重心相对于系统重心的重心位置矢量,在惯性参照系中环节重心的速度矢量,环节相对于运动平面垂直并通过环节重心轴的转动惯量和环节的角速度矢量^[1,2]。

2 结果与分析

2.1 跳远起跳阶段人体前旋角动量变化特征及其原因分析

在跳远起跳阶段由于制动力的作用,会使人体产生围绕身体重心额状轴前旋的角动量(描述物体转动状态的量)。从表 1 可知,11 名运动员在着板瞬间角动量平均值为 4.08 kg·m²/s,其产生原因主要是运动员起跳脚着板瞬间,由于重心投影点处于支撑面的后方,地面对人体产生了一个制动力 F (图 1(a))。而这个力有 2 个作用效果(图 1(b)),其中水平分力 f 是脚着地瞬间,制动力 F 所产生的水平分力,其作用方向与人体运动方向相反,对人体产生负加速度,起跳中水平分力 f 越大,则水平速度的损失就越多。而垂直分力 N 是由制动力 F 所产生的垂直分力,能够使人体获得一定的垂直速度,当然这也是人体获得垂直速度的主要来源。同时,水平分力对人体产生向前翻转的力矩($M_1 = f \times h$),垂直分力产生向后翻转的力矩($M_2 = N \times L$)。由于人体从脚着地向支撑面中心的垂

表 1 起跳阶段绕过重心额状轴的前旋角动量值(kg·m²/s)

Table 1 The angular momentum when turning around the centre of mass horizontal axis in the process of the tak-off(kg·m²/s)

姓名	着板瞬间	垂直支持	离板瞬间	角动量变化
A	3.82	9.41	14.59	10.77
B	4.41	17.94	17.8	13.39
C	7.67	17.35	17.53	9.86
D	4.13	9.28	9.67	5.54
E	2.54	12.7	14.06	11.52
F	1.78	7.13	9.9	8.12
G	7.78	9.56	10.38	2.6
H	1.29	5.94	9.15	7.86
I	7.72	16.62	16.57	8.85
G	2.25	4.35	6.39	4.14
K	1.52	6.56	7.49	5.97
平均值	4.08	10.62	12.14	8.06
标准差	2.56	4.83	4.10	3.28

直上方运动,实际上是人体围绕支撑人体的支撑面向前转动.这个向前翻转的力学条件是由水平分力 f 提供的.所以,人体跳远起跳时运动的力矩,必须是 $M_1 > M_2$,才能使人体保持动态平衡和迅速位移.因此在起跳时,从起跳脚着地至垂直支撑阶段,人体产生向前转动的角加速度是通过 M_1 减去 M_2 力矩获得的^[3],而人体向前翻转的角动量也是由这2个不同方向角动量的差值所得的结果.

随着身体向前的转动,角动量在不断地增大,这是由于外力矩对人体转动的积累效应所致,缓冲时间越长,人体转动状态的变化也越大.当缓冲结束后人体达到垂直支撑时相,地面对人体作用力的水平分力由负(制动力)变正(动力)的临界点,绕过身体重心额状轴的角动量达到 $10.62 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,着板瞬间-垂直支撑阶段角动量的增加幅度达到 $6.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$.从理论上讲,通过垂直支撑面后,地面对人体的作用力性质发生变化由制动力变为动力,角动量不应该再继续增加,但从图2及表1中可以明显地发现,从垂直支撑-离板瞬间的蹬伸过程中角动量依然在增加,但增加幅度较小,平均仅为 $1.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$.这是由于在垂直支撑-离板瞬间的蹬伸过程中地面对人体的作用力是一偏心力,即地面对人体的支撑反作用力没有通过重心,力的作用线在人体重心后侧通过,这样便产生了偏心力矩,这个偏心力矩便是蹬伸过程中角动量继续增加的原因.

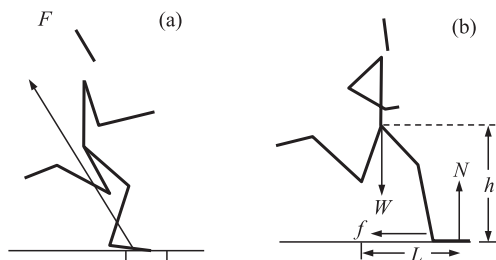


图1 着板至垂直支撑阶段受力特点

Fig. 1 The loading features in the process of touching down to the vertical support

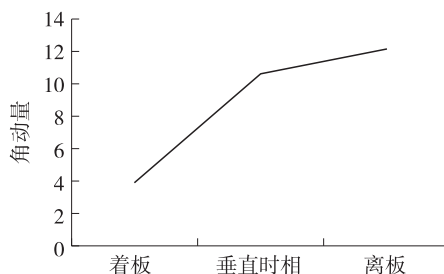


图2 起跳中各时相角动量变化特征($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)

Fig. 2 The changing characters of the angular momentum in different processes of take-off($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$)

对比起跳中这3个时相的角动量值,在离板阶段基本达到最大值 $12.14 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,仅B与I两名运动员在垂直支撑-离板阶段角动量有小幅度的下降,这是由于在蹬伸过程中地面对人体的反作用力没有通过重心,在人体重心前侧通过,从而产生了一个使人体向后翻转的力矩,但由此产生的角动量较小,不足以改变人体腾空后前旋的运动趋势.因此,在垂直支撑-离板瞬间角动量的增加或减小均与蹬伸过程中产生的偏心力矩有关,而这与跳远蹬伸动作的质量有着直接的关系,若蹬伸效果差,地面对人体的反作用力方向便容易偏离重心,导致角动量的增加或减小,但变化幅度微小,不足以改变整体的前旋趋势.

总的来看,11名运动员在起跳过程中角动量的增加值平均达到 $8.06 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,其中B运动员在起跳中角动量的变化幅度最大,达到 $13.39 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,而且在离板瞬间他的角动量也高达 $17.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,为11人中的最大值.

2.2 离板瞬间角动量对跳远成绩的影响

腾空后身体前旋的角动量取决于起跳中角动量变化的综合效应的结果,根据角动量守恒定律可知:无论人体在空中动作多么复杂,其总角动量完全由腾空瞬间的初始条件所决定,借助人体姿态的变化和环节的相对运动^[4],可以实现人体转动速度的变化或角动量在基本轴间的转移,但总角动量的大小和方向均守恒.人民体育出版社出版的《运动生物力学》一书中引用了相关研究计算得出蹲踞式跳远所能产生的角动量约为 $0.44 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,挺身式约为 $1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,走步式约为 $1.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ ^[5].可以看出在3种跳远腾空技术中,走步式技术最能够抑制身体在空中的前旋.这是由于运动员在空中,通过上肢的伸展前摆以及下肢的伸展后摆增加了上下肢的转动惯量,从而加大了上肢与下肢顺时针方向转动的角动量,减小了躯干前旋的角动量,使躯干处于合理的位置,实现了身体总的角动量在四肢与躯干间进行了重新的分配,从而有利于维持身体的平衡.但空中动作所能产生的角动量与本次研究中11名运动员离板瞬间 $12.14 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ 的角动量相比,即使是最佳的走步式也显得微不足道.因此运动员腾空后由于前旋角动量较大势必会难以维持身体在空中的平衡,导致落地前双腿不能充分地前伸,双脚实际落点比理论上身体质心落点近,如图3所示,没能够充分地利用身体质心抛物线轨迹所能达到的水平距离,从而影响了成绩.图3中 S_1

为起跳离板瞬间,身体质心投影点离起跳脚趾尖点的距离,11名运动员平均成绩为0.37 m(表2); S_2 为运动员身体总质心在腾空时所能达到的远度,根据 $S_2 = \frac{V_0^2 \sin \alpha \cos \alpha + V_0 \cos \alpha (V_0^2 \sin^2 \alpha + 2gh)^{\frac{1}{2}}}{g}$ 公式求出 S_2 的距离,平均为7.91 m(不计空气阻力); S 为 S_1 与 S_2 之和,即为运动员在没有损失距离情况下的理论成绩,平均为8.28 m,与11名运动员7.48 m的实际成绩相比,两者的差值 L 平均为0.8 m, L 值越大说明运动员落地时双脚落点距理论上身体质心的投影点越远,损失的距离越多,成绩也越差.从表2可知,G和K两名运动员的实际落点距理论上的质心落点距离最近, L 值分别仅为0.44 m与0.41 m,相对应的两名运动员离板时的角动量分别仅为6.39 kg·m²/s和7.49 kg·m²/s,均为11名运动员中的最小值.相反,C运动员的离板角动量为17.53 kg·m²/s,其 L 值也高达1.49 m.通过相关性分析发现,损失距离 L 与离板时身体前旋角动量呈显著性相关,相关系数为0.674($P < 0.05$),说明运动员起跳离板时身体前旋角动量越大,腾空时身体的前旋就越强烈,导致落地前双腿不能充分地前伸,双脚过早地着地,从而过多地损失了身体质心抛物线所能达到的水平距离,最终影响了成绩.

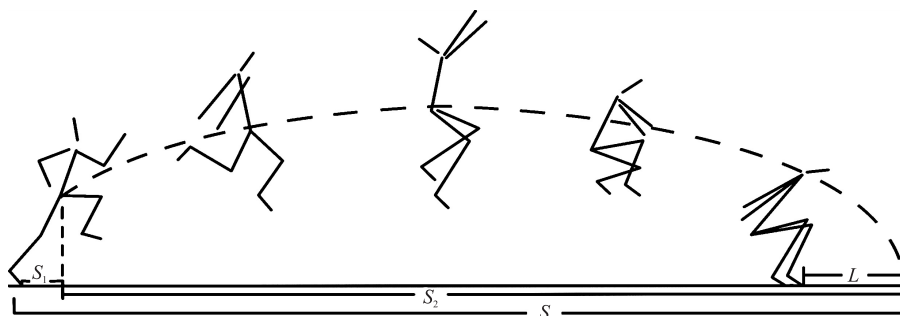


图3 跳远中各分段距离图示

Fig. 3 The distance graphic of different stages in the long jump

表2 运动员身体总质心腾空距离及相关指标

Table 2 The empty distance of the athlete bodys whole center of gravity and the related index

姓名	实际成绩距离	S_2	S_1	S	L	α	v_0	h
A	7.41	8.08	0.41	8.49	1.08	23.8	8.94	1.22
B	7.28	7.85	0.43	8.28	1	20.5	9.17	1.16
C	7.42	8.43	0.48	8.91	1.49	20.3	9.60	1.18
D	7.65	7.83	0.42	8.25	0.6	21.5	9.05	1.15
E	7.27	7.56	0.24	7.8	0.53	23	8.78	1.08
F	7.15	7.33	0.39	7.72	0.57	24.4	8.30	1.28
G	7.56	8.42	0.28	8.7	1.14	24.5	9.16	1.16
H	7.24	7.47	0.54	8.01	0.77	18.3	9.03	1.24
I	8.01	8.4	0.41	8.81	0.8	20.6	9.58	1.14
G	7.73	8.02	0.15	8.17	0.44	24.9	8.87	1.15
K	7.53	7.61	0.33	7.94	0.41	19.3	9.13	1.16
平均值	7.48	7.91	0.37	8.28	0.8	21.9	9.06	1.17
标准差	0.25	0.40	0.11	0.41	0.34	2.3	0.36	0.05

注: α 为腾起角度; v_0 为腾起初速度; h 为离地和落地时总质心高度差.

而长期以来一些观点片面地把落地前双腿不能充分地高举前伸完全归咎于运动员的落地技术较差所致^[6],忽略了在起跳中产生的围绕身体重心额状轴前旋角动量的作用.因此,对于B、C等前旋角动量较大的运动员来说,提高成绩的途径除了在发展助跑速度、起跳力量等方面外,更应该努力去细抠起跳技术,提高起跳质量,减小起跳中的前旋角动量.然而在跳远起跳过程中角动量的产生又是必然的,因为运动员需要通过适宜的制动来获得一定的腾起角度,只要有制动就一定会产生角动量,因此想要彻底消除角动量是不可能的,关键是如何通过改进起跳技术来减少在起跳中角动量的增加,关于这一问题目前的研究相对较少,仅骆建在《跳远运动员起跳的旋转特点及起跳能力与腾空技术》一文中研究认为:在跳远起跳结束时,从摆动腿快速制动开始至结束,摆动腿环节重心必然受到惯性效应影响,形成惯性效应对髋关节的力矩,使人体产生向后翻转的转动角动量,这种向后翻转的转动角动量,是抵消或减小起跳时人体产生向前翻转的转动角动量^[3].但这一研究仅停留在理论分析,尚无定量研究.因此关于如何通过改进起跳技术来减少

起跳中角动量的增加是本研究今后的难点所在.

3 结论

(1)在着板瞬间,由于身体重心投影点处于支撑面的后方,地面对人体产生了制动力,从而使人体产生围绕身体重心额状轴前旋的角动量,其平均值为 $4.08 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$;在缓冲过程中,由于外力矩对人体转动的积累效应,角动量在不断地增大,当缓冲结束后人体达到垂直支撑时相角动量增加至 $10.62 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$,着板瞬间-垂直支撑阶段角动量的增加幅度为 $6.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$;通过垂直支撑面后,地面对人体的作用力性质发生变化由制动力变为动力,角动量不应再有变化,但由于运动员蹬伸效果不同,导致地面对人体的反作用力方向容易偏离重心,便产生了偏心力矩,从而使角动量出现一定的增加或减小,但总体变化幅度较小,不足以改变整体的前旋趋势.

(2)实际成绩和理论成绩的差值与离板时身体前旋角动量呈显著性相关,相关系数为 0.674,说明减小起跳离板时的前旋角动量有助于维持身体在空中的平衡,从而能够更有效地利用身体质心抛物线所能达到的距离,有利于提高成绩.

[参考文献]

- [1] 陈志伟,侯曼.跳远角动量的计算[J].天津体育学院学报,2001(12):58-60.
- [2] 金季春.运动生物力学高级教程[M].北京:北京体育大学出版社,2007,9:426-427.
- [3] 骆建.跳远运动员起跳的旋转特点及起跳能力与腾空技术[J].成都体育学院学报,2004(1):47-50.
- [4] 《运动生物力学》教材编写组.运动生物力学[M].北京:高等教育出版社,2000:252.
- [5] 体育院校成人教育协作组《运动生物力学》教材编写组.运动生物力学[M].北京:人民体育出版社,2003:185.
- [6] Geoffrey·Dyson.田径运动力学[M].北京:人民体育出版社,1989:170.

[责任编辑:黄 敏]