

## 背越式跳高起跳过程支撑关节角度变化特征的动力学观测

陈先彪<sup>1</sup> 董奕风<sup>2</sup>

1. 浙江理工大学, 浙江 杭州 310018

2. 浙江省杭州第四中学, 浙江 杭州 310018

**[摘要]** 研究目的: 为了揭示跳高起跳过程支撑关节角度变化特征的动力学依据。研究方法: 采用三维高速摄像法、三维测力法、录像解析法和数理统计法等研究方法。研究结果和结论: (1) 起跳过程起跳髋、膝、踝三关节角度变化特征存在较大差异。(2) 缓冲阶段, 主要支撑关节角度先快速减小后减速变慢或趋于稳定, 对应的支撑反作用力先迅速增大后波动减小, 而后逐渐增大或波动增大; 蹬伸阶段, 关节角度增大趋势是先慢后快, 对应的支撑反作用力减小趋势也是先慢后快。(3) 起跳腿膝关节角度最小值即刻(最大缓冲)与支撑反作用力的“第二峰值”存在对应关系, 说明支撑反作用力开始减小是缓冲向蹬伸转换的力学条件。角度变化幅度从小到大依次为: 髋、膝、踝关节, 髋、膝关节角度变化过程存在明显的“稳定期”, 且髋、膝关节的蹬伸时机早于踝关节。

**[关键词]** 背越式跳高; 支撑关节角度; 动力学

DOI: 10.33142/jscs.v4i5.14011

中图分类号: G823.1

文献标识码: A

### Dynamic Observation of the Variation Characteristics of the Angle of the Supporting Joint during the Take-Off Process of the Forsberg High Jump

CHEN Xianbiao<sup>1</sup>, DONG Yifeng<sup>2</sup>

1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

2. Hangzhou No.4 High School, Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

**Abstract:** Research objective: in order to reveal the dynamic basis of the angle changes of the supporting joints during the high jump take-off process. Research methods: adopting research methods such as 3D high-speed camera, 3D force measurement, video analysis, and mathematical statistics. Research results and conclusion: (1) There are significant differences in the angle changes of the hip, knee, and ankle joints of the take-off leg during the take-off process. (2) In the buffering stage, the main supporting joint angle first rapidly decreases and then slows down or tends to stabilize, and the corresponding supporting reaction force first rapidly increases and then fluctuates and decreases, and then gradually increases or fluctuates; During the stretching stage, the increasing trend of joint angle is slow at first and then fast, and the corresponding decreasing trend of support reaction force is also slow at first and then fast. (3) There is a corresponding relationship between the minimum knee joint angle of the take-off leg (maximum buffering) and the "second peak" of the supporting reaction force, indicating that the decrease in the supporting reaction force is a mechanical condition for the transition from buffering to extension. The amplitude of angle changes from small to large is as follows: hip, knee, ankle joints. The process of angle changes in hip and knee joints has a clear "stable period", and the timing of hip and knee joint extension is earlier than that of ankle joint.

**Keywords:** forsberg high jump; supporting joint angle; dynamics

#### 引言

背越式跳高是田径项目中技术最为复杂的运动项目之一, 起跳过程伴随着身体倾斜与旋转、支撑与摆动、缓冲与蹬伸等一系列动作的复杂变化。基于背越式跳高技术的复杂性, 该领域学者进行了深入研究, 就跳高技术的生物力学研究而言, 以往的研究多偏重于运动学分析, 对起跳过程动作结构变化的力学条件研究相对较少, 尤其是动力学观测指标的应用相对匮乏。周成之、王保成(1985)采用高速摄像和三维测力台获取起跳过程的运动学和动力学参数, 研究人体起跳腾起的力学条件<sup>[3]</sup>; 孙守正和白二字(1989)采用运动学与动力学同步的方法, 研究影响

起跳效果的评定参数<sup>[4]</sup>; 许崇高(1986)对背越式跳高不同弧线助跑的生物力学效应进行了地面三维测力观察<sup>[5]</sup>。闫之朴、黄玉新(2006)对背越式跳高起跳阶段有效获得垂直速度进行了研究<sup>[6]</sup>; 以上是我国关于跳高项目数量不多的运动学与动力学相结合的基础性研究。

跳高起跳过程, 支撑反作用力是引起支撑关节角度适应性变化的直接原因, 而支撑关节的角度变化特征是影响起跳效果的重要因素之一。以往关于支撑关节角度的理论研究多集中于运动员关键时刻点角度参数的横向对比, 缺乏角度变化过程的动态描述, 更缺少对应的动力学观测指标。为了揭示起跳过程支撑关节角度变化特征的动

力学依据, 本文以不同运动水平运动员起跳过程中主要支撑关节(髌、膝、踝关节)的角度变化过程, 以及对应的动力学参数为研究内容, 探讨起跳缓冲与蹬伸用力转换过程的力学特征, 旨在为背越式跳高教学、训练提供理论依据。

## 1 实验对象及方法

### 1.1 实验对象

本实验的研究对象的基本情况见表1, 李佳伦为2021年全运会亚军; 孙绪淼为2023年首届中国学生(青年)运动会跳高季军; 王沛泽为23级浙江理工大学跳高专项学生。

表1 实验对象基本情况一览表

姓名	身高(m)	体重(kg)	本次测试成绩(m)	个人最好成绩(m)	运动等级
李佳伦	1.98	80	2.15	2.25	健将
孙绪淼	1.90	70	2.0	2.11	一级
王沛泽	1.93	75	1.85	2.00	二级

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 实验测试法

##### 1.2.1.1 测试仪器与标定

两台 pulnix 高速摄像机 CCD 高速扫描摄像头(TM-6710CL), 有效感光面积  $5.8\text{mm} \times 4.3\text{mm}$ , CCD 感光元件尺度为  $9.0\ \mu\text{m} \times 9.0\ \mu\text{m}$ , 有效图像像素  $648(\text{长}) \times 484(\text{高})$ , 曝光时间为  $1/1000$  秒, 拍摄频率为  $120\text{P/s}$ , 高速采集卡为 METEORII-CAMERA-LINK; Kistler ( $60\text{cm} \times 90\text{cm} \times 10\text{cm}$ ) 三维测力台一台, 采样频率为  $500\text{HZ}$ ; MegaWin6000 同步仪。辅助测试工具: 爱捷三维 DLT 辐射立体框架一套、体重计、皮尺。

##### 1.2.1.2 测试仪器安装与同步数据采集

①测力台置于室内田径馆跳高场地起跳点确定位置, 测力台面与塑胶跑道齐平; 两台摄像机分别架设于测力台的左侧位和正后方, 摄像机距离测力台中心的距离均为16米(根据拍摄距离达到需要运动范围的5~6倍确定距离), 机高1.2米, 两台摄像机主光轴夹角约为90度, 采用光信号仪对摄像机、测力台进行同步连接、(测力台启动时, 同步仪亮起, 摄像机开机), 如图1。

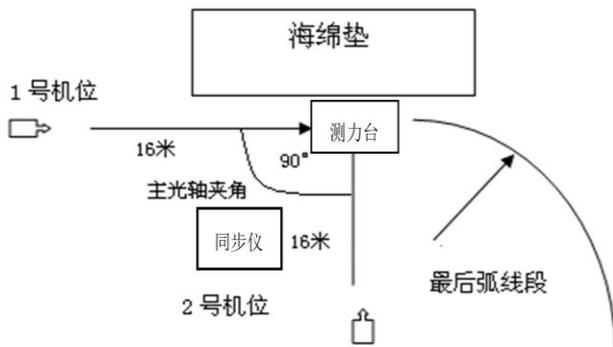


图1 跳高拍摄、测力现场示意图

②实验对象试跳前后分别拍摄置于拍摄中心的爱捷三维辐射立体框架。爱捷三维辐射框架的摆放位置: 1号杆和2号杆最外面的球中心连线为X轴, 与横杆平行; 2号杆最外面的球射出的水平线为X轴、垂线为Y轴; Z轴为X、Y轴构成的平面的垂直方向(见图2, X、Y为水平轴, Z为垂直轴)。

③助跑开始时即启动高速摄像机, 当运动员接近起跳点时启动测力台, 同步仪亮起后测力台和高速摄像机同步采集数据。运用 BOIWAER 软件采集受试者起跳过程中 X、Y、Z 轴三个方向(见图2)上的 F-T 力值数据, 并对所获得的数据进行储存、分析处理。

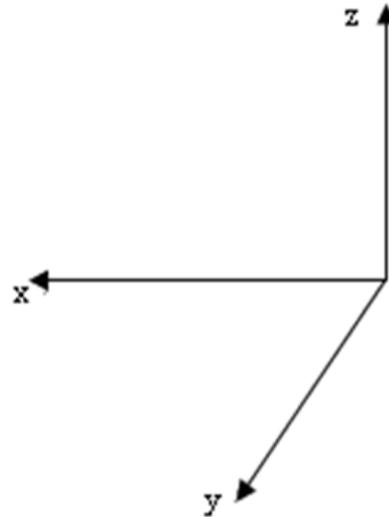


图2 三维解析(测力)坐标示意图

#### 1.2.2 影像解析与数理处理

采用美国艾里尔运动生物力学分析系统 APAS(Ariel Performance Analysis System) 对实验对象测试中最好成绩跳次助跑后两步至起跳过程的动作影像资料, 采用日本松井秀治人体惯性参数模型, 选取19个关节进行解析; 采用低通数字滤波法对解析数据进行平滑处理, 截止频率设定为  $8\text{Hz}$ 。运用 Excel2007 办公软件系统对所获得的原始数据进行了统计处理和参数比较分析。

## 2 研究结果与讨论

### 2.1 相关动作概念及动作阶段划分

缓冲阶段: 起跳腿触地时刻至膝关节角度最小值时刻时段;

蹬伸阶段: 起跳腿膝关节角度最小值时刻至起跳腿离地时段;

最大缓冲时刻: 起跳腿膝关节角度最小值时刻;

着地峰值: 起跳腿着地时产生的冲击力的最大值;

第二峰值: 起跳缓冲与蹬伸转化过程支撑反作用力的最大值;

支撑反作用力——测力台获取的 X 轴、Y 轴和 Z 轴上

的合力。

### 2.2 起跳过程支撑关节角度变化特征

背越式跳高起跳过程中,通过支撑肢体以力的形式作用于起跳支撑点,产生大小相等、方向相反的支持反力。支持反力作用于支撑肢体,引起支撑关节角度的适应性变化,关节角度变化直接影响起跳力学条件(伸肌初长度和肌张力)。研究表明:关节角度缓冲幅度要在合理的范围之内才能取得较好的起跳效果,过大的缓冲幅度会造成支撑关节负荷过大,不利于形成合理的蹬伸用力条件,进而影响蹬伸速度,降低起跳效果<sup>[7]</sup>。

起跳髌、膝、踝三关节是主要的支撑关节。见图 2、3、4,结合表 2 中数据,对比三名不同运动等级运动员(见表 1)的三关节角度变化特征,由数据可以看出:不同时刻点支撑关节角度及角度变化幅度均存在一定差异,但角度变化过程表现出如下共性特征:

髌、膝、踝三关节角度变化幅度从小到大依次为:髌关节、膝关节、踝关节。见表 2,李佳伦三关节角度变化幅度分别为 27.1°、37.6°和 62.2°;孙绪淼和王沛泽的对应角度分别是 24.8°、37.9°、44.8°和 24.6°、40.8°、52.3°。

起跳过程,踝关节角度逐渐减小后渐进增大,变化过程未表现出明显的“稳定期”(角度变化小,趋于稳定);但髌、膝关节角度变化过程表现出明显的“稳定期”,其中,髌关节角度趋于稳定的时机更早,且时间更长。见图 3、4、5,能够直观地看到三关节角度变化趋势。

髌、膝、踝三关节的蹬伸时机并不一致。髌、膝关节角度达到最小值后开始增大时,踝关节角度仍在减小,这说明髌、膝关节的蹬伸时机早于踝关节。

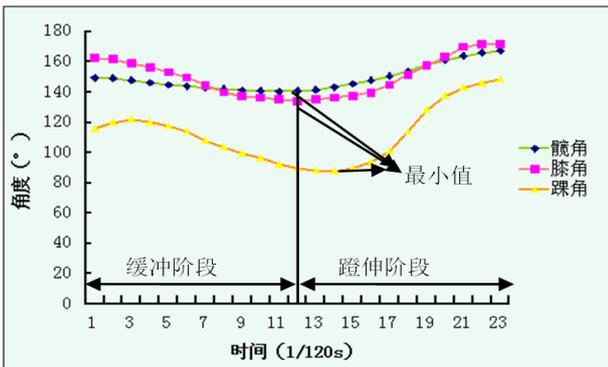


图 3 李佳伦起跳过程起跳髌、膝、踝关节角度变化曲线图

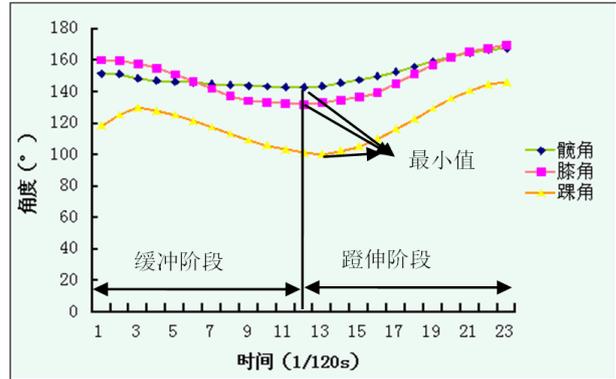


图 4 孙绪淼起跳过程起跳髌、膝、踝关节角度变化曲线图

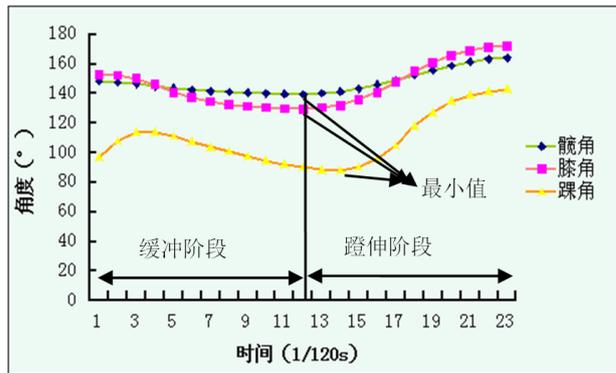


图 5 王沛泽起跳过程起跳髌、膝、踝关节角度变化曲线图

综上所述我们可以看出,起跳过程起跳髌、膝、踝三关节角度变化特征存在较大差异。角度变化幅度从小到大依次为:髌、膝、踝关节,髌、膝关节角度变化过程存在明显的“稳定期”,且髌、膝关节的蹬伸时机早于踝关节。上海体育学院硕士论文《背越式跳高起跳技术环节肌肉用力特点的研究》一文关于起跳髌、膝、踝三关节角度变化幅度的研究结论与本文一致(杨文明,2010);但以往文献并未涉及角度变化的动态特征及关节蹬伸时机等问题。笔者认为:深入了解起跳过程支撑关节运动特征,并以此为依据设计专项能力练习方法,有利于提高训练效果。

### 2.3 起跳过程支撑关节角度变化的动力学特征

实验对象起跳过程支撑反作用力的变化趋势表现为:L1 时段,力值先迅速增大后波动减小;L2 时段,而后逐渐增大或波动增大;L3 时段,力值逐渐减小,减小趋势为先慢后快(见图 5、6、7)。而起跳腿主要支撑关节角度变化的整体特征可以概括为:关节角度先快速减小后减

表 2 研究对象起跳过程支撑关节角度一览表

姓名	着地时刻 (°)			最大缓冲时刻 (°)			离地时刻 (°)			角度变化幅度 (°)		
	髌角	膝角	踝角	髌角	膝角	踝角	髌角	膝角	踝角	髌角	膝角	踝角
李佳伦	148.6	162.6	116	140.5	134.2	89.9	167.6	171.8	148.4	27.1	37.6	62.2
孙绪淼	151.7	160.3	118.5	142.9	132.0	101.3	167.7	169.9	146.1	24.8	37.9	44.8
王沛泽	148.3	153.1	97	139.7	129.5	90.3	164.3	170.3	143	24.6	40.8	52.3

小速度变慢或趋于稳定,而后关节角度逐渐增大,增大速度为先慢后快。由此可见,起跳过程支撑关节角度变化的动力学特征表现为:

缓冲阶段,关节角度减小速度较慢或趋于稳定时,支撑反作用力逐渐增大或波动增大;支撑关节角度快速减小时,对应的支撑反作用力快速减小或波动减小。

蹬伸阶段,支撑关节角度缓慢增大,对应的支撑反作用力缓慢减小;支撑关节角度快速增大,力值迅速减小。

跳高起跳时,助跑获得的速度会以“冲量”的形式作用于起跳腿,即 $FT=MV$ ,起跳腿着地瞬间支撑反作用力急速增大,迅速达到峰值(着地峰值,见图6、7、8),巨大的冲击力致使支撑关节角度快速减小以缓冲关节压力,由对应的F-T力值曲线可见,支撑反作用力也快速减小;然而,随着支撑关节缓冲速度的减慢,产生了截然不同的动力学效应:支撑反作用力逐渐增大,达到第二峰值(见图6、7、8)。以往文献中普遍认同起跳过程支撑反作用力的极值发生在缓冲阶段(周成之,1984;孙守正、白二字,1989)<sup>[3-4]</sup>,本文的研究结果支持这一观点;但是,本文通过采样频率为500HZ的三维测力台同步拍摄频率为120P/s的两台高速摄像头,解析录像获取起跳腿膝关节角度的运动学参数,对研究对象起跳腿膝关节角度最小值即刻(最大缓冲)的动力学参数的观察,发现这一时刻点与支撑反作用力的“第二峰值”存在着对应关系(由于测力台和高速摄像头的采集频率不同,同步测试存在一定误差,因此把膝角最小值时刻对应的支撑反作用力在“第二峰值”时刻前后,误差在0.008s以内,均视为对应关系),说明支撑反作用力开始减小是缓冲向蹬伸转换的力学条件。关于缓冲与蹬伸转换过程动力学效应的产生机制问题,我们将在下文进行讨论。

起跳蹬伸阶段主要支撑关节角度的增大特征为先慢后快,我们认为这一现象是由于蹬伸用力条件的不同造成的。由缓冲过渡到蹬伸时,支撑反作用力及支撑肌群的肌张力大、收缩初长度大,限制了肌肉进行快速地收缩,随着重心与支撑点位置关系的变化,起跳力学条件随之改变,支撑关节的压力负荷减小,蹬伸速度加快,关节角度迅速增大。

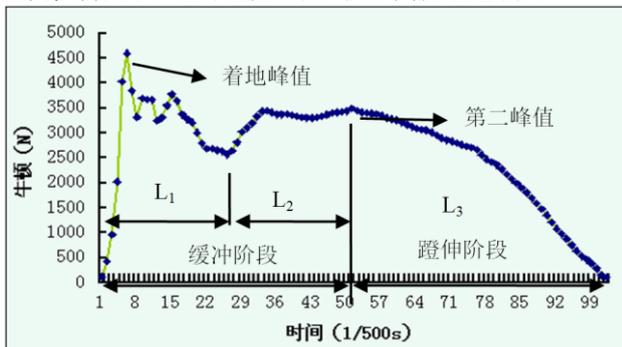


图6 李佳伦起跳过程支撑反作用力F-T力值曲线图

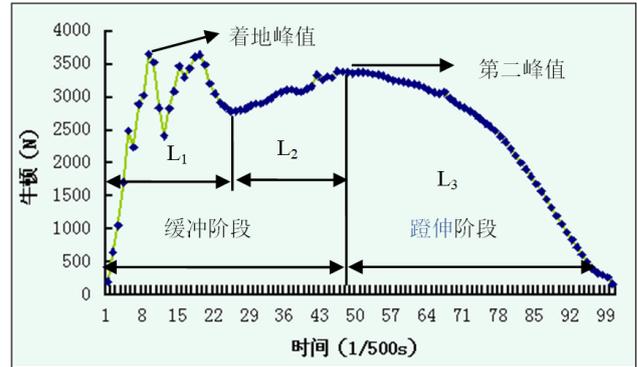


图7 孙绪淼起跳过程支撑反作用力F-T力值曲线图

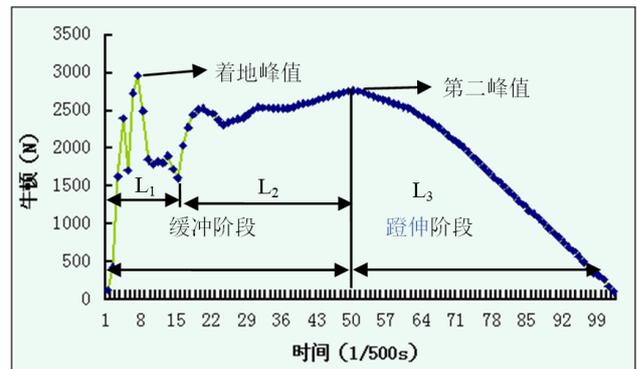


图8 王沛泽起跳过程支撑反作用力F-T力值曲线图

## 2.4 起跳缓冲与蹬伸转换过程力学条件的探讨

起跳缓冲动作发生于一切带助跑的跳跃之中,缓冲效果会因支撑、摆动及环节配合等因素的变化而变化。缓冲效果不同,蹬伸用力条件相应发生变化,从而影响起跳效果。上世纪80年代,学者周成之(1985)和王保成(1982)对田径跳跃项目的起跳用力条件做了深入的理论分析,认为缓冲与蹬伸转换时刻伸肌的肌张力和初长度是决定起跳效果的关键因素<sup>[3][7]</sup>,然而研究中并没有对缓冲与蹬伸转换过程动力学特征的具体描述,后续研究也未涉及此项内容。

### 2.4.1 起跳缓冲过程的神经调节机制

起跳缓冲过程中,随着支撑关节伸肌离心收缩速度的改变,会产生截然不同的力学效果。为揭示缓冲过程中主要支撑关节角度变化过程的动力学特征,有必要对关节伸肌的收缩机制进行分析。

起跳过程中枢神经系统对肌肉活动的支配和调节,是通过位于肌肉和肌腱的运动感受器—肌梭和腱梭以及反射弧来实现的。起跳腿着地后,在强烈的冲击力的刺激下,支撑关节伸肌发生腱梭反应(当被动拉伸状态下的肌肉用力紧张时,就会激活腱梭,产生反射性放松,增加肌肉长度),以减小支撑腿的压力。肌肉快速的离心收缩激活了牵张反射,反射性地引起肌肉活动强度的增加(komi,1984)<sup>[10]</sup>;有研究表明:拉长速度对肌肉的反射性增强起着更重要的作用,

快速的离心式拉长可以使肌梭发出高频率的信号,导致神经-肌肉系统的反射活动加强(Gottlieb,1979)<sup>[11]</sup>;乔伊斯等人(Joyce,1969)在动物试验中发现:在大幅度和快速拉长的情况下,肌紧张先下降,随后出现肌张力的较大幅度上升,该阶段肌力的提高被认为是在神经中枢的支配下肌肉对退让性肌张力下降的补偿,是肌肉力量反射性增强的证明<sup>[11]</sup>。因此,我们认为缓冲过程支撑反作用力逐渐增大或波动增大是肌肉神经反射过程产生的动力学效应,该阶段的动力学特征直接决定进入起跳蹬伸即刻支撑反作用力的大小。有研究表明:蹬伸阶段垂直方向力会对起跳效果产生直接影响(孙守正,白二宇1989)<sup>[4]</sup>;因此,起跳过程应充分利用肌肉神经反射机制,提高蹬伸阶段垂直方向力,以利于获得理想起跳效果。

#### 2.4.2 缓冲与蹬伸转换即刻力学条件的探讨

力是改变物体运动状态的原因,起跳缓冲与蹬伸是运动状态相反的动作过程,因此,只有达到一定力学条件才会实现缓冲与蹬伸动作的转换。上文中研究结果:起跳腿膝关节角度最小值即刻(最大缓冲)与支撑反作用力的“第二峰值”存在着对应关系,换言之,进入起跳蹬伸即刻支撑反作用力开始减小。综上所述,支撑反作用力开始减小是缓冲向蹬伸转换的力学条件。

背越式跳高的起跳动作是以肌肉“超等长收缩”的形式用力:肌肉先被动做离心式拉长,然后主动做向心式收缩,利用弹性能量在肌肉中的储存与再释放以及神经反射性调节,完成快速收缩(王保成,1982)<sup>[7]</sup>。大量研究已经证明,“超等长收缩”主要发生在运动技术的关键环节,对速度力量性项目的运动成绩具有重要影响。由于支撑反作用力开始减小是缓冲向蹬伸转换的力学条件,因此,支撑反作用力开始减小的时机和力值梯度的变化节律,会限制肌肉向心收缩的时机,进而影响“超等长收缩”用力效果。为了揭示缓冲向蹬伸转换的动作机制,我们需要对支撑反作用力开始减小的原因进行分析探讨。

起跳过程,摆动腿的摆动动作是作用于起跳腿的“压力调节系统”,摆动腿通过摆动节奏的变化分别对支撑腿产生“减压-加压-减压”作用。笔者认为:摆动腿的“减压”作用是支撑反作用力开始减小的直接原因;那么摆动腿的“减压-加压-减压”效应的“动作时机”就显得尤为重要。由于摆动过程产生的力学效应将成为起跳蹬伸的重要力学条件,因此,适宜的摆动节奏能够充分地利用弹性能量的储存与再释放,发挥神经反射性调节作用,提高起跳“超等长收缩”用力效果。然而,长期以来我国跳高理论研究和训练实践中均一味地强调摆动腿的摆动速度,而忽视了摆动节奏在起跳过程中所发挥的重要作用,也缺乏对摆动节奏的深入研讨,过分

强调摆动腿的积极快摆易破坏摆动节奏,降低摆动腿“压力调节系统”的作用。我们认为摆动腿的摆动过程应做到快慢有序,充分利用神经反射性调节作用,才能获得理想的起跳效果。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

起跳过程起跳腿髋、膝、踝三关节角度变化特征存在较大差异。角度变化幅度从小到大依次为:髋、膝、踝关节;其中,髋、膝关节角度变化过程中存在明显的“稳定期”;三关节的蹬伸时机并不一致,髋、膝关节的蹬伸时机要早于踝关节。

缓冲阶段,主要支撑关节角度先快速减小后减速变慢或趋于稳定,对应的支撑反作用力迅速增大后波动减小,而后逐渐增大或波动增大。

蹬伸阶段,关节角度增大趋势和对应的支撑反作用力减小趋势均为先慢后快。

起跳腿膝关节角度最小值即刻(最大缓冲)与支撑反作用力的“第二峰值”存在着对应关系,这意味着支撑反作用力开始减小是缓冲向蹬伸转换的力学条件。

#### 3.2 建议

起跳过程,主要支撑关节角度变化幅度、蹬伸时机等存在较大差异,深入了解支撑关节角度变化特征及其变化过程产生的动力学效应,以及起跳缓冲与蹬伸转换过程的力学条件,并以此为依据设计专项技术和专项体能练习方法,有利于提高背越式跳高教学、训练效果。

#### [参考文献]

- [1]孙楠,等.现代田径训练高级教程[M].北京:北京体育大学出版社,2010.
- [2][美]弗拉基米·扎齐奥尔斯基.运动生物力学[M].北京:人民体育出版社,2000.
- [3]周成之,王保成.人体起跳机制和起跳效果之研究[J].西安体育学院学报,1985(4):1-11.
- [4]孙守正,白二宇.对影响跳高起跳效果诸因素的再研究[J].首都体育学院学报,1989(1):72-78.
- [5]许崇高,权德庆.背越式跳高不同弧线助跑及其生物力学效应的探讨[J].西安体育学院学报,1986(2):20-27.
- [6]闫之朴,黄玉新.跳高起跳垂直速度的生物力学研究[J].山东体育学院学报,2006(2):73-76.
- [7]王保成.跳跃训练起跳腿伸肌的退让性收缩能力[J].中国体育科技,1982(5):8-13.
- [8]杨文明.背越式跳高起跳技术环节肌肉用力特点的研究[D].上海:上海体育学院,2010.
- [9]陈小平.对反应力量可训练性的研究[J].体育科学,2004,24(2):25-28.
- [10]Komi P V.Physiological and biomechanical

correlates of muscle function: Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed[J]. Exercise and Sports Sciences Reviews/ACSM, 1984(12): 81-121.

[11] Gottlieb G L, Agarwal G C. Response to sudden torques about ankle in man: Myotatic reflex[J]. Neurophysiol, 1979(42): 91-106.

[12] Joyce G C, Rank P M H, Westbury D R. The mechanical properties of cat soleus muscle during controlled lengthening and shortening movements[J]. Physiol, 1969(204): 461-474.

[13] Dapena J. Biomechanical analysis of the Fosbury flop[J]. Track Technique, 1988(104): 3307-3317.

[14] 荆雅楠. 我国现役男子跳高运动员李佳伦倒二步助跑与起跳技术特征的运动学分析[D]. 西安: 西安体育学院, 2023.

[15] 付肖凡. 天津市优秀男子青少年跳高运动员起跳技术的运动学分析[D]. 西安: 天津体育学院, 2022.

[16] 肖和伟, 陈世红, 黄晓燕. 以动力学为视角分析背越式跳高起跳技术[J]. 田径, 2023(12): 78-80.

[17] 赵清波. 我国男子跳高运动员王臣起跳过程的生物力学探讨[J]. 西安体育学院学报, 2014(2): 231-236.

作者简介: 陈先彪(1991—), 男, 汉族, 安徽淮南人, 硕士, 讲师, 浙江理工大学, 研究方向: 田径训练方法与理论; 董奕风(1989—), 男, 汉族, 浙江杭州人, 本科, 一级教师, 主要研究方向: 学校体育, 青少年田径训练。