



高水平铁饼运动员旋转中的 系统角动量特征研究

Study on Characteristics of the Thrower-discus System's Angular Momentum during Rotating for Top Discus Thrower

李玉章¹, 刘宇¹, 刘卉², 于冰³

LI Yu-zhang¹, LIU Yu¹, LIU Hui², YU Bing³

摘要: 旋转效果是影响铁饼投掷成绩的主要因素, 主要从人体-铁饼系统角动量的视角探讨铁饼投掷过程中系统总角动量以及在各坐标轴的分角动量的特征, 旨在揭示旋转与成绩的关系。选取了20多年来美国队最高水平的比赛中, 在同一场比赛、同一名运动员投掷最远和较差两投相差5 m多的28位女运动员和15位男运动员的86投进行3D数据分析。结果表明: 1) 两种投掷成绩差距的主要因素是空气动力学距离, 占总成绩差值的77.45% (女子)、65.43% (男子), 因此, 应该重视提高空气动力学距离; 2) 高水平女子铁饼运动员在投掷较远时比较近时, 系统总角动量在左脚离地瞬间、左脚着地瞬间存在显著性差异 ($P \leq 0.023$), X轴向负方向的角动量在左脚离地瞬间、左脚着地瞬间和出手瞬间存在显著性差异 ($P \leq 0.007$), Z轴向在左脚着地瞬间和出手瞬间有较大的正旋转, 存在显著性差异 ($P \leq 0.009$); 3) 高水平男子铁饼运动员在投掷较远时比较近时, 左脚着地瞬间, 在X轴向负方向的角动量和Y轴正方向的角动量存在显著性差异 ($P \leq 0.042$), 系统总角动量在出手瞬间较小, 存在显著性差异 ($P \leq 0.043$)。结论: 高水平铁饼运动员应更重视旋转过程中系统角动量的控制, 进而提升真空距离和空气动力学距离; 女运动员应该控制X轴的负旋转, 增大围绕垂直轴的正旋转, 即可以采用继续旋转的随前缓冲动作; 男运动员应该控制X轴的旋转, 增大Y轴和Z轴的正旋转, 进而提升出手效果。

关键词: 铁饼; 人体-铁饼系统; 角动量; 空气动力学距离; 真空飞行距离

Abstract: The rotating effect was the main influence factor in the discus throwing. The purpose of this study was to determine the relationship between rotation of the thrower-discus system and performance of discus throwing. Three-dimensional kinematic data were obtained from USA Track & Field biomechanical databases of discus throwing for 28 female and 15 male discus throwers. Each of these throwers had a long trial and a short trial in the same competition with the difference in official distance between long and short trials longer than 5 m. The resultant angular momentum of the thrower-discus system and direction cosines of the angular momentum vector were calculated at five critical instants of discus throwing, and compared between long and short trials. Results: 1) Aerodynamic distance was the primary contributor to the increases in official distance of long trials, overall difference of Do, females were 77.45%, and males were 65.43%. 2) Elite female throwers had significantly less amount of angular momentum at left foot takeoff and left foot touchdown ($P \leq 0.023$), less rotation in the negative direction of the anterior-posterior axis at the left foot takeoff, left foot touchdown, and release ($P \leq 0.007$), and significant greater rotation in positive direction of the superior-inferior axis at the left foot touchdown and release ($P \leq 0.009$) in long trials compared to short trials. 3) Elite male throwers had significantly less angular momentum in the negative direction of the anterior-posterior axis and in the positive direction of the left-right axis at the left foot touchdown ($P \leq 0.042$), and significantly less amount of angular momentum at the release ($P=0.043$). Conclusion: Elite discus throwers should control the amount of rotations of the thrower-discus system, especially in the posterior direction of the anterior-posterior axis, while increase rotation in positive direction of the superior-inferior axis at the delivery.

Keywords: top discus thrower; the thrower-discus system; angular momentum; vacuum flight distance; aerodynamic distance

中图分类号:G804.6 文献标识码:A

1 前言

投掷运动的技术原理指出:影响投掷成绩的主要因素是出手速度(V_r)、出手角度(A_r)以及出手高度(H_r),前人围绕这3大因素也进行了较多的运动学分析。最初的研究主要集中在小样本的2-D的研究(Bartlett, 1992),自1995年开始,三维的、大样本的研究逐渐开始(Hay和Yu, 1995)。但是,对于铁饼这项运动而言,影响其最终成绩的不仅是上述3大因素,空气的流体力学因素也是不容忽视的主要影响因素。有文献指出:铁饼项目的成绩(D_o)是由真空飞行距离(D_F)、空气动力学距离(D_A)和损失距离(D_L)3部分组成的,其中, D_F 是成绩组成的主要部分,受出手因素影响也最大; D_A 主要受铁饼姿态以及空气动力学影响,但是,铁饼的飞行姿态取决于人体-铁饼系统经过旋转和最后用力后铁饼出手瞬间的姿态^[21]。近年来,国内关于人体和铁饼的三维解析和线性分析的研究相对较多,如李建臣(2001)、王广楠(2010)等对男子铁饼运动员的重心移动速度、肩髋角、轨迹长等技术进行三维运动学分析;董文梅等(2000)、贾文彤等(2002)、Yu等(2002)、Leigh等(2007, 2008, 2010)、Dai等(2013)等从动作阶段的用时、旋转节奏、肩髋角、线速度、角速度、铁饼位置等对女子铁饼运动员技术特征进行分析;王琨等(2010)、李明哲(2010)、赵嵩(2012)等分析了铁饼投掷中的肌肉用力特征。但是,对于人体-铁饼组成的系统整体旋转效果的研究较少,其中,运用人体-铁饼系统角动量探讨整个投掷过程中身体控制和旋转效果的研究就更少。Dapena等(1989)指出:人体-链球系统的旋转效果对于链球成绩有显著的影响。然而,对于同样需要旋转获得动能的掷铁饼项目中的人体-铁饼系统角动量特征以及不同成绩间的角动量差异如何等问题并没有明确的结论。本研究将运用标准化的系统角动量以及各坐标轴方向的分角动量等参数深入分析,旨在剖析在不同动作阶段各轴向角动量参数的分布特征以及对成绩的影响。

2 研究对象与方法

2.1 研究对象

本研究为了避免运动员个体差异以及空气动力学等环境因素的影响,本文对北卡罗莱纳大学于冰教授20余年的拍摄资料进行了筛选,最终从98名女运动员的405投中确定了28名56投和122名男运动员的414投中确定了15名30投作为本研究的样本。这86投是43名运动员在同一年、同一场比赛中最好(最远)的1投和较差的1投,且此2投的成绩差大于5 m作为筛选的标准。所有的样本均是全美高水平运动员的数据,数据来源包括1990年、1997—2016年的全美室外锦标赛和奥运会选拔赛等重大赛事,成绩和级别均达到国际水准,具有很好的代表性。

2.2 研究方法

2.2.1 运动学分析

摄像系统:采用两台S-VHS摄像机分别从投掷圈的右面和后面进行3维拍摄,拍摄频率60帧/s,快门速度1/1 000 s。全程不停机。

坐标系与参考点:在比赛前和赛后分别采用24点的Peak框架(长2.5 m,宽2 m,高2.5 m)进行标定,坐标系设定为:X轴指向落地区方向,Y轴水平指向左侧,Z轴垂直向上。同时,在投掷圈周围选取了5个参考点,作为系统数据计算和同步标定的参考点(图1、图2、图3)。

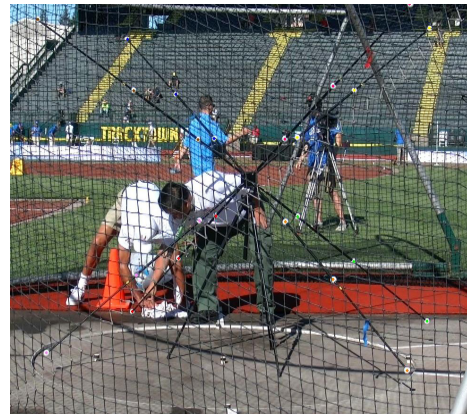


图1 放置于右侧的摄像机拍摄的标定框架

Figure 1. The Calibration Frame from the Camera on the Right

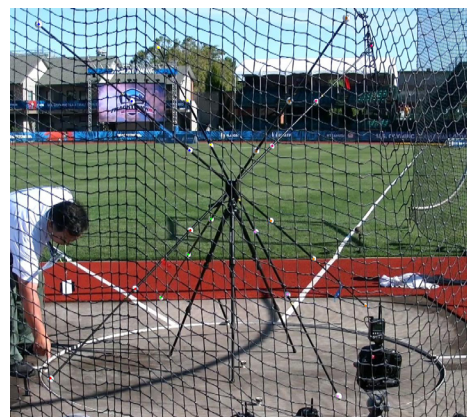


图2 放置于后侧的摄像机拍摄的标定框架

Figure 2. The Calibration Frame from the Camera on the Back Side

收稿日期:2017-04-27; 修订日期:2017-09-09

基金项目:上海市人类运动能力开发与保障重点实验室(11DZ2261100)。

作者简介:李玉章,男,副教授,博士,研究方向为运动训练科学监控,Email: yuzhang07@126.com; 刘宇,男,教授,博士,研究方向为运动生物力学、体育工程学,Email: yuliu@sus.edu.cn; 刘卉,女,教授,博士,研究方向为运动生物力学,Email: liuhuibupe@163.com。

作者单位:1.上海体育学院,上海200438; 2.北京体育大学运动人体科学学院,北京100084; 3.美国北卡罗莱纳大学教堂山分校人体运动科学中心,美国教堂山27599。

1.Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2.Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 3.University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC USA 27599.

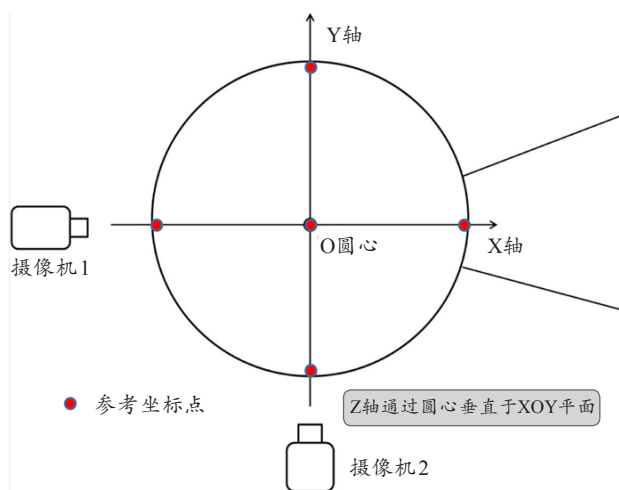


图3 坐标系设定平面图

Figure 3. The Graph of Coordinate Setting

2.2.2 数据采集与计算

动作阶段划分: 根据投掷铁饼技术原理和动作组成, 依据6个特殊的时刻点(时相)划分为5个阶段。6个时相分别为: 最大后摆、右脚离地、左脚离地、右脚着地、左脚着地、出手瞬间; 5个阶段分别为: 进入旋转双支撑阶段、左脚单支撑旋转阶段、腾空阶段、右脚单支撑旋转阶段、双支撑最后用力阶段。

人体数字化处理: 选择21个人体关节的汉森纳人体模型和铁饼的中心为计算点。画面截取以准备姿势铁饼最大后摆的前4帧开始, 逐帧进行手工点点数字化处理。3-D图像合成采用DLT计算方法获得人体三维运动的空间坐标, 计算有关的运动学参数。数据解析效率: 最大误差小于15 mm情况下平均计算误差小于10 mm。

参数计算: 采用Hay(1977)提出的由21个人体关节点

组成的14个刚体模型, 参考了Clauser等(1969)、Hinrichs等(1990)、Dumas(2007)的环节质量、质心修正方法计算各环节质心和整体质心; Whittsett(1963)环节惯性力矩、Dapena(1978)提出的角动量等研究成果作为角动量计算依据。如质心速度定义为质心坐标的时间导数; 上肢、下肢、头的角速度定义为其长轴方向变化的时间导数; 时间导数采用中心微分法; 躯干的角速度计算采用欧拉角参数计算; 环节角动量采用相对于整体的局部角动量和远程角动量之和进行计算; 角动量计算采用角速度和环节转动惯量的乘积; 转动惯量计算采用的是环节质量和环节质心与长轴的半径; 根据相关参数进行计算编程。软件系统采用动作软件——铁饼分析计算程序包(Motion Soft Discus Analysis computer program package, Motion Soft Inc., Chapel Hill, NC)。为了减少运动员体重、身高等因素的影响, 本研究中采用体重和标准身高的平方计算全身系统角动量的标准化值。

系统角动量的方向界定: 遵守右手螺旋法则, 大拇指指向坐标轴的方向, 以4指方向依次确定各轴的旋转方向。围绕X轴转动的角动量, 向左为负, 向右为正; 围绕Y轴转动的角动量, 向后(投掷的反方向)为负, 向前(投掷方向)为正; 围绕Z轴转动的角动量, 俯视条件下, 顺时针为负, 逆时针为正。

2.2.3 数据统计学分析

所有有效数据经过Excel软件整理和计算, 最终采用配对 t 检验的方法对每组数据进行统计学分析, 显著性水平选择为 $P < 0.05$ 水平。

3 结果与讨论

3.1 比赛成绩分析

表1 选取研究对象的平均投掷成绩以及成绩组成

Table 1 The Average Throw Distance and the Distance Composition of the Selected Subjects

	分类	D_O	D_L	D_F	D_A
女子	最远(m)	62.24 ± 2.29	0.35 ± 0.17	57.95 ± 3.26	4.64 ± 3.11
	较近(m)	55.81 ± 2.81	0.37 ± 0.19	56.52 ± 3.51	-0.34 ± 3.40
	差值(m)	6.43	0.02	1.43	4.98
	P	0.001	0.414	0.003	0.001
男子	最远(m)	63.67 ± 2.18	0.29 ± 0.21	60.07 ± 4.24	3.89 ± 3.57
	较近(m)	56.93 ± 1.87	0.26 ± 0.18	57.72 ± 2.93	-0.52 ± 3.17
	差值(m)	6.74	0.03	2.35	4.41
	P	0.001	0.556	0.004	0.001

从表1可以看出, 在总成绩(D_O)的构成中除了损失距离(D_L)未呈现显著性差异外, 其余各项均呈现显著性差异($P < 0.05$)。虽然真空飞行距离(D_F)占据很大比例, 其次是空气动力学距离(D_A), 但是, 进一步观察会发现, 无论女运动员, 还是男运动员, 保证其更大的空气动力学距离

对获得更好的成绩更重要, 是主要的决定因素。因为在最远和较差的两投中真空飞行距离相差仅1.43 m(女子)和2.35 m(男子), 而空气动力学距离的差值则达到了4.98 m(女子)和4.41 m(男子), 这一差值分别占总成绩差值的77.45%(女子)和65.43%(男子)。由此可见, 在保证真空

飞行距离的基础上,增加空气动力学距离是创造更好成绩的主要因素。虽然有文献指出:影响成绩的主要因素有出手瞬间铁饼的姿态(出手角度、倾角、攻角、自转速度、出手速度等)、空气动力学(空气密度、气流速度、风向)等^[16,21,23-25,27],但是本研究选取的是同一场比赛中同一名运动员的数据,

因此,环境因素和运动员间的个体因素可以忽略。由此可见,主要是投掷的技术因素,特别是投掷过程中的旋转技术和旋转效果,这也是获得最佳的出手效果和飞行效果的训练关注点。下文将对此展开对比分析。

3.2 女运动员投掷过程中的角动量分布特征分析

表2 女子铁饼运动员投掷过程中的角动量分布

Table 2 The Distribution of Normalized Angular Momentum during Throwing for Female Discus Throwers

分类	标准化的系统 总角动量	身体质心在正交轴各方向的角动量分布			
		X轴	Y轴	Z轴	
右脚离地瞬间	最远	0.159 6 ± 0.026 7	0.143 1 ± 0.161 5	0.541 8 ± 0.080 8	0.807 2 ± 0.056 1
	较近	0.158 2 ± 0.027 8	0.166 4 ± 0.186 5	0.528 0 ± 0.101 0	0.804 2 ± 0.059 5
	P	0.834	0.084	0.099	0.495
左脚离地瞬间	最远	0.168 5 ± 0.022 9	-0.129 1 ± 0.091 8	-0.333 6 ± 0.091 8	0.924 5 ± 0.034 0
	较近	0.173 8 ± 0.021 7	-0.162 4 ± 0.102 0	-0.342 6 ± 0.085 3	0.915 4 ± 0.035 6
	P	0.023	0.007	0.312	0.078
左脚着地瞬间	最远	0.168 9 ± 0.021 2	-0.182 5 ± 0.132 0	0.302 8 ± 0.127 3	0.915 8 ± 0.062 9
	较近	0.172 9 ± 0.018 8	-0.253 3 ± 0.135 5	0.328 5 ± 0.136 6	0.887 8 ± 0.064 0
	P	0.011	0.001	0.067	0.003
铁饼出手瞬间	最远	0.194 4 ± 0.028 6	-0.371 7 ± 0.191 7	0.220 2 ± 0.126 7	0.869 1 ± 0.086 1
	较近	0.198 8 ± 0.026 8	-0.418 7 ± 0.175 0	0.225 5 ± 0.121 5	0.849 2 ± 0.096 4
	P	0.083	0.006	0.665	0.009

表2可以看出,女子铁饼运动员在整个投掷的旋转过程中,人体-铁饼系统的总角动量是逐渐增加的,且在左脚离地瞬间和左脚着地瞬间存在显著性差异,这一特征既说明了铁饼投掷过程中系统总角动量逐渐递增符合投掷技术动作能量传递的生物力学要求,也说明获得更远飞行距离的必备条件——运动员在腾空阶段和右脚单支撑旋转的过渡阶段应适当控制系统转动,即要想获得理想的出手状态,合理控制系统转动总动量是非常重要的,特别是X轴向向左转动不是越大越好,此阶段应控制系统负角动量的数值,同时应重视增大Z轴向的逆时针转动。

首先,在右脚离地瞬间,即进入旋转前的双支撑启动阶段中,系统总角动量以及各轴向的分角动量在远投和近投时不存在显著性差异($P > 0.05$)。因为该阶段的主要任务是转移身体重心至左脚支撑上方,获得稳定的旋转轴,角速度相对较慢,半径相对固定。但是,两组间在X轴和Y轴向上存在数值的差异(尽管未达到统计学的显著性),该差异也说明了投掷距离较近时与投掷距离较远时相比,在启动阶段运动员身体向左转动较大,向投掷方向转动不足,这可能是破坏后续动作加速节奏的主要因素之一。

其次,进入左脚单支撑旋转和离地腾空阶段后,投掷距离较近时与投掷距离较远时相比,X轴向的角动量存在显著性差异,即投掷距离较近时,该阶段的人体-铁饼系统产生了过大的侧向角动量,这一侧向角动量将破坏系统有序地稳定旋转,以及人体和铁饼的姿态,导致后续动作无法在合理姿态下合理地完成动作,进而可能影响到Z轴向角动量的有效转化和增加。

最后,由于前序阶段中运动员动作的不稳定,导致后续右脚单支撑旋转阶段以及最后用力阶段,投掷距离较近时与投掷距离较远时相比,运动员在X轴向负角动量明显过大,而Z轴向正角动量明显不足,即投掷距离较近时运动员向投掷方向的转动效果明显不足,进而无法获得理想的出手效果,影响了真空飞行距离和空气动力学距离。

3.3 男运动员投掷过程中的角动量分布特征分析

表3可以看出,男子铁饼运动员在整个投掷过程中人体-铁饼系统的总角动量呈现和女子铁饼运动员基本一致的特征,均是逐渐增加,但在具体特征方面又存在明显的区别。女运动员表现为投掷距离较近的运动员在旋转过程中的系统角动量过大破坏了投掷技术动作的加速节奏,而男运动员则表现为投掷距离较远时比投掷距离较近时在系统总角动量的递增节奏上更为平滑、流畅,但是,投掷距离较近时表现为在最后用力阶段之前的系统总角动量偏小,即动力不足,到最后用力阶段又突然增大,且这种增大并不是来源于Z轴向,而是来源于X轴向的负角动量增加,因此,产生过大的身体倾斜破坏了最后的最佳出手条件,这可能是影响 D_F 、 D_A 的主要原因。这种现象可能与男运动员最后阶段靠力量投和采用跳投技术有关。

从各阶段3个轴向的系统分角动量可以看出,在进入右脚单支撑旋转阶段之前,投掷距离较远时和投掷距离较近时两组数据在各轴向的角动量上不存在显著性差异($P > 0.05$),即男运动员无论在投掷较远时,还是投掷较近时,此阶段技术动作相对比较稳定,身体姿态固定,可重复性强。但是,进入右脚单支撑旋转的转化阶段时,两

组间在X轴向和Y轴向的系统角动量上均存在显著性差异,这种差异表现为投掷距离较短时运动员在X轴向上产生了较大的负角动量,即系统质心产生了偏左的过大旋转,偏离直角坐标系,影响旋转效果;而在Y轴向的正角动量

又显著偏小,即向投掷方向的旋转动量也不足;Z轴向也未产生较大的角动量,即人体-铁饼系统向前转动不足,进而影响了产生较大的系统总角动量。

表3 男子铁饼运动员投掷过程中的角动量分布

Table 3 The Distribution of Normalized Angular Momentum during Throwing for Male Discus Throwers

分类	标准化的系统 总角动量	身体质心在正交轴各方向的角动量分布			
		X轴	Y轴	Z轴	
右脚离地瞬间	最远	0.185 7 ± 0.026 5	0.087 6 ± 0.167 9	0.515 1 ± 0.059 1	0.834 1 ± 0.043 8
	较近	0.185 0 ± 0.027 2	0.108 8 ± 0.145 9	0.506 8 ± 0.063 3	0.840 3 ± 0.040 6
	P	0.732	0.192	0.387	0.185
左脚离地瞬间	最远	0.199 0 ± 0.031 5	-0.043 2 ± 0.135 6	-0.337 1 ± 0.075 2	0.928 1 ± 0.027 1
	较近	0.196 8 ± 0.032 9	-0.034 9 ± 0.107 5	-0.334 0 ± 0.107 0	0.929 6 ± 0.040 6
	P	0.328	0.221	0.792	0.687
左脚着地瞬间	最远	0.201 2 ± 0.028 8	-0.295 5 ± 0.133 8	0.297 8 ± 0.107 5	0.890 2 ± 0.065 6
	较近	0.197 9 ± 0.028 8	-0.326 8 ± 0.156 0	0.257 8 ± 0.110 2	0.887 7 ± 0.071 2
	P	0.139	0.036	0.042	0.628
铁饼出手瞬间	最远	0.255 3 ± 0.049 5	-0.433 5 ± 0.107 4	0.247 8 ± 0.124 8	0.850 4 ± 0.048 8
	较近	0.262 0 ± 0.048 4	-0.446 1 ± 0.105 5	0.236 4 ± 0.111 9	0.849 0 ± 0.048 5
	P	0.043	0.285	0.324	0.817

到了最后用力阶段,尽管在各轴向的系统角动量分布不存在显著性差异($P > 0.05$),但仍可以看出,投掷较远时,运动员在X轴向和Z轴向的旋转控制相对更合理,向投掷方向的转动更佳,可能为铁饼获得更佳的出手效果奠定了基础。这也说明了男子铁饼运动员在投掷过程中,更应该注重后程的身体姿势控制,特别是控制向左的旋转动量,提高向投掷方向的转动动量,可能是获得更佳投掷距离的突破口。

3.4 系统角动量分析对掷铁饼的训练启示

通过上面的分析可以看出,控制旋转过程中的系统角动量以及各坐标轴的分角动量是非常重要的。对女子铁饼运动员来说,在左脚单支撑期,应该避免身体围绕X轴的过多旋转。人体-铁饼系统质心点应该位于左脚支撑点的上方,支撑地面反作用力将减少X轴的正角动量,保持合理的身体姿势;在腾空以及右脚单支撑阶段,应避免身体-系统质心偏离支撑点左侧,这样可以减少地面反作用力通过质心产生过大的负角动量,且不利于增加垂直轴的转动效果,这与前人的动力学研究结论一致(Yu, 2002);在左脚着地后的最后用力阶段,应该增加围绕着Z轴的逆时针旋转,获得更大的向前的动量,且有效地传递到手臂末端至铁饼。这可能主要与女子运动员所采用的出手后的缓冲技术有关,她们大多采用左侧支撑的换步制动式技术,决定了她们最后用力过程中角动量分布的转移。对男子运动员来讲,主要体现在力量上,技术的差异不明显,除转化阶段和最后用力早期阶段在旋转轴上存在差异外,其余均不存在显著性差异,但是,男子铁饼运动员应该在左脚着地瞬间控制身体-铁饼系统X轴的负旋转,增加Y轴的正

旋转,即控制左脚着地瞬间身体左倾,保持在右脚和左脚支撑的垂直空间内,同时利用右脚的蹬伸反作用力增加Y轴的系统正角动量,即整体向前性,进而转化为Z轴的旋转角动量,提升旋转效果和出手效果。对男运动员来讲,稳定的旋转节奏和加速能力更为重要,因此,发展相应承受能力的下肢力量,特别是快速的超等长力量以及平衡控制能力是训练的关键。

总之,对男、女铁饼运动员来讲,控制右脚单支撑转化阶段的身体姿态以及恰当的蹬伸用力时机是非常关键的,也是获得最佳旋转效果的关键阶段。

4 结论与建议

1. 空气动力学距离是影响高水平铁饼运动员投掷成绩的主要因素,与男运动员相比,女运动员受此影响更为明显,其原因主要与转动过程中的旋转效果有关。

2. 高水平女子铁饼运动员为了获得更远的真空飞行距离,应该在左脚离地、左脚着地以及出手瞬间控制人体-铁饼系统围绕着X轴的负旋转;同时,在左脚着地和最后用力阶段增加人体-铁饼系统围绕着Z轴的逆时针旋转。也就是说,女运动员在腾空过渡阶段尽可能减少身体向左侧的倾倒,在最后用力以及出手时应继续保证身体围绕着以左侧支撑为旋转轴的继续旋转,不能过早制动,建议有能力的女运动员可以尝试男运动员的跳投出手技术,即采用继续连续旋转的随前缓冲技术。

3. 高水平男子铁饼运动员为了获得更远的真空飞行距离,在保证前程技术稳定的前提下,应控制左脚着地时人体-铁饼系统围绕着X轴的负旋转、增加围绕着Y轴的正

旋转,即提高人体-铁饼系统的向前性,增加系统角动量,提高出手效果。也就是说,男子运动员大多采用跳投加旋转的出手技术,保证了围绕Z轴的旋转动量,但是,影响了系统围绕Y轴的正旋转动量,制约了向前性。建议运动员在保证围绕垂直轴旋转的同时增加铁饼-人体系统的整体向前性。

参考文献:

[1] 程昊.对李艳凤双腿支撑起转阶段肩、髋、膝关节的三维运动学分析[J].山东体育学院学报,2013,29(4):91-93.

[2] 董海军,苏明理,韩敬,等.国内外优秀女子铁饼选手旋转节奏及环节特征对比研究[J].山东体育学院学报,2010,26(6):54-61.

[3] 董文梅,李建臣.对我国优秀女子铁饼运动员肩、髋动作特征的研究[J].中国体育科技,2000,36(5):26-28.

[4] 范秦海,杨银田.我国女子铁饼运动员最后用力阶段技术分析[J].体育科研,2006,27(2):78-79.

[5] 贾文彤,李建臣.我国优秀女子铁饼运动员旋转过程中身体重心变化的三维运动学分析[J].中国体育科技,2002,38(7):26-28.

[6] 李厚林,苏明理,严波涛,等.第十一届全国运动会女子铁饼冠、亚军运动员技术特征研究[J].中国体育科技,2010,46(5):12-18.

[7] 李建臣,王新泽.对李少杰掷铁饼技术的三维运动学分析[J].中国体育科技,2001,37(10):29-31.

[8] 李建臣,肖涛.我国优秀女子铁饼选手旋转阶段肩髋饼速度变化的三维运动学特征[J].广东体育学院学报,2003,23(5):69-70.

[9] 李明哲.北京市青少年男子铁饼运动员技术动作的表面肌电图分析[D].北京:首都体育学院,2010.

[10] 刘建国,崔冬雪,刘卫彬,等.旋转掷铁饼技术中肩、髋、铁饼及人体重心的时空特征研究[J].中国体育科技,2004,40(4):20-26.

[11] 王广楠.我国优秀男子铁饼运动员旋转技术中肩髋线角度与身体重心移动速度的三维运动学分析[J].山东体育科技,2010,32(1):22-25.

[12] 王琨,张俊峰,周静,等.我国高水平女子铁饼运动员掷铁饼肌肉用力特征的分析[J].中国体育科技,2010,46(5):8-11.

[13] 赵嵩.男子铁饼运动员旋转过程主要用力肌群的表面肌电

分析[D].北京:首都体育学院,2012.

[14] BARTLETT R M. The biomechanics of the discus throw: A review [J]. J Sports Sci, 1992, 10 (5): 467-510.

[15] CLAUSER C E, MCCONVILLE J T, YOUNG J W. Weight, volume, and center of mass of segments of the human body [R]. AMRL Technical Report, 1969.

[16] DAI B Y, LEIGH S, LI H J, et al. The relationships between technique variability and performance in discus throwing [J]. J Sports Sci, 2013, 31 (2): 219-228.

[17] DAPENA J. A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity [J]. J Biomechan, 1978, 11 (5): 251-256.

[18] DAPENA J, MCDONALD C. A three-dimensional analysis of angular momentum in the hammer throw [J]. Med Sci Sports Exe, 1989, 21 (2): 206-220.

[19] DUMAS R, CHÈZE L., VERRIEST J-P. Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters [J]. J Biomechanics, 2007, 40 (3): 543-553

[20] HAY J G, WILSON B D, DAPENA J. A computational technique to determine the angular momentum of a human body [J]. J Biomechan, 1977, 10 (4): 269-277.

[21] HAY J G, YU B. Critical characteristics of technique in throwing the discus [J]. J Sports Sci, 1995, 13 (2): 125-140.

[22] HINRICHS R N. Adjustments of the segment center of mass proportions of Clauser et al (1969) [J]. J f Biomechan, 1990, 23 (9): 949-951.

[23] LEIGH S, YU B. The associations of selected technical parameters with discus throwing performance: A cross-sectional study [J]. Sports Biomechan, 2007, 6 (3): 269-284.

[24] LEIGH S, GROSS MT, LI L, et al. The relationship between discus throwing performance and combinations of selected technical parameters [J]. Sports Biomechan, 2008, 7 (2): 173-193.

[25] LEIGH S, LIU H, YU B, et al. Individualized optimal release angles in discus throwing [J]. J Biomechan, 2010, 43 (3): 540-545.

[26] WHITTSETT C E. Some dynamic response characteristics of weightless man [R]. AMRL, Technical Documentary Report, 1963.

[27] YU B, BROKER J, SILVERSTER L J. A kinetic analysis of discus-throwing techniques [J]. Sports Biomechan, 2002, 1 (1): 25-46.

