

武术套路优秀运动员旋风脚转体 720° 接马步动作的运动生物力学分析

高丽

(鲁东大学 体育学院, 山东 烟台 264025)

摘 要: 通过三维高速摄影,对优秀武术套路运动员旋风脚转体 720°接马步动作进行了分析。结果发现,在助跑阶段不是助跑速度越快越好;在起跳阶段的缓冲时段,左膝角屈膝幅度、身体重心的下降值和重心水平速度的下降值呈显著性相关;在起跳阶段的前蹬伸时段,右腿着地时脚掌内扣、及时快速蹬伸,几乎没有做退让性动作,同时左腿的加速蹬伸、左臂快速摆动的协调配合是关键技术;在起跳阶段的后蹬伸时段,右腿蹬伸的幅度更大,两腿及上肢协调的“蹬摆结合”至关重要。右脚有效制动,可增大人体腾起角度;在腾空阶段,里合击响腿时刻均在人体重心上升时段,接近人体重心最高点。里合击响腿完成后,需及时双臂合抱、双腿伸直使人体尽量成一“直棍”;落地成稳固马步动作关键在于空中转体完成后尽快伸展肢体,增大人体转动惯量。

关 键 词: 武术套路; 旋风脚转体 720°; 马步; 运动生物力学

中图分类号: G804.68; G852 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2008)08-0106-07

Biodynamical analysis of excellent Wushu routine player's move of a whirlwind kick with a 720° turn followed by a horse-riding style halt

GAO Li

(School of Physical Education, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: By means of 3D high speed photography, the author analyzed excellent Wushu routine player's move of a whirlwind kick with a 720° turn followed by a horse-riding style halt, and revealed the following findings: the run-up speed at the run-up stage is not the faster the better; during buffering at the take-off stage, the bending angle of the left knee as well as the drop of the center of gravity and the drop of horizontal speed of the center of gravity of the body show significant correlation respectively; during forward kicking at the take-off stage, the sole of right leg bends inward and quickly kicks out in a timely fashion without any concessive move, in the mean time, the harmonious combination of accelerative kicking of the left leg and quick swinging of the left arm is the critical technique; during backward kicking at the take-off stage, it is utmost important to increase the left leg kicking amplitude and finish the “kicking and swinging combination” harmoniously done by the two legs and upper limbs; effective braking of the left leg can increase the jump-up angle of the human body; at the jump-up stage, the moment both legs inwardly bump to make a sound happens in the period when the center of gravity of the human body rises, at a point close to the highest point of the center of gravity of the human body; when the move of both legs inwardly bumping to make a sound is competed, the player should, in a timely fashion, embrace his/her arms and strengthen his/her legs to hold the body like a “straight stick” as much as possible; the key to form a stable house-riding style halt after landing is to extend the limbs as soon as possible after having finished the turn in the air, so as to increase the moment of inertia of the human body.

Key words: Wushu routine; whirlwind kick with a 720° turn; house-riding style halt; biodynamics

2003年,国家武术运动管理中心新出台了《武术套路竞赛规则》,新规则重点突出了难度动作,并建立了不同动作组别的难度分类,制定了不同等级的难度系数分值,规定了各种各样的难度组合或难度连接动作^[1]。旋风脚转体720°在新规则中是难度的最高级别——C级难度,有0.4分的加分。而旋风脚转体720°接马步又属于难度连接动作,有0.15分的加分。因而,若运动员在比赛中成功地完成此难度动作,将会得到0.55分的难度加分,这个分值在武术套路竞技比赛中举足轻重。可见,运动员在比赛中能否完成高难度动作直接影响到比赛成绩,即完成难度动作的成功率及质量成为制胜的重要因素。对此,本研究对7名优秀武术套路运动员旋风脚转体720°接马步动作进行三维摄像解析,揭示动作特点及运动学规律,为发展和改进套路技术提供理论和实践的参考。

1 研究对象与方法

1)研究对象为优秀武术套路运动员,基本情况见表1。

表1 研究对象基本情况

姓名	年龄	身高/cm	体重/kg	运动级别
周X	23	171	74	武英级
唐X	23	173	68	武英级
谢X	26	169	74	武英级
白X	19	165	72	武英级
程X	18	169	64	国家一级
夏X	18	166	68	国家一级
侯X	18	167	60	国家一级
$\bar{x} \pm s$	20.71±3.25	168.57±2.81	68.57±5.26	

2)研究方法。

采用两台JVC GR-DVL9800摄像机,对7名运动员完成旋风脚转体720°接马步动作进行拍摄。拍摄时,左机置于起跳方向的左侧,其主光轴对准动作阶段中心,拍摄距离12m;右机也置于起跳方向的左侧,并与左机主光轴成82°夹角,其主光轴对准动作阶段中心,拍摄距离12.5m。两台摄像机采用外时标(发光二极管)作为同步标记。拍摄速度为50帧/s。用艾立尔运动图像测量解析系统对技术的录像进行解析,解析中用日本松井秀治人体模型,所得数据进行数字化滤波平滑处理,截断频率6Hz。使用SPSS11.0统计软件对所获得的各项测量数据进行统计处理。

2 测试结果和分析

为了分析动作的方便和需要,把全套动作定义为

4个阶段7个时相:助跑阶段(从起动时相到左脚着地时相)、起跳阶段(从左脚着地时相到右脚离地时相,其中经过右脚着地时相、左脚离地时相)、腾空阶段(从右脚离地时相到左脚着地时相)、落地阶段(从左脚着地时相到马步动作时相)。

2.1 助跑阶段

竞技武术套路比赛中,空翻转体720°类动作一般都采用助跑来连接,助跑阶段动作的主要效果就是人体需获得一个适宜的水平速度,为后续起跳动作的完成作好准备^[2]。

旋风脚转体720°接马步动作助跑阶段最后一步是左脚快速跨步,右臂向上向后摆至头部后上方,左臂随之摆臂并收至右胸前。通过解析发现:7名运动员左脚着地时刻,重心水平速度为(1.27±0.89)m/s,可见,重心水平速度的离散程度非常大,周左脚着地时刻,重心水平速度达到最大3.09m/s;夏、侯次之(1.38和1.48m/s),谢和白最小,分别为0.47、0.51m/s。但从后续完成动作的情况来看,夏、侯左脚着地时刻虽然获得了较大的重心水平速度,但完成整个动作不够理想,而谢和白助跑阶段获得的重心水平速度虽较小,但整个动作的完成情况较好。上述结果揭示:助跑阶段结束时获得的重心水平速度并不是越大越好,它对后续动作的完成不产生决定性的影响。

2.2 起跳阶段

根据起跳技术的特点,将起跳技术分为2个时段:分别称为缓冲时段(t_1)、蹬伸时段(t_2), t_1 —左脚着地时刻至身体重心在最低点时刻; t_2 —身体重心最低点时刻至右脚离地时刻。

1)缓冲时段。

由表2可知,在助跑最后一步左腿(摆动腿)支撑过程的缓冲时段,运动员身体重心高度、重心水平速度和左膝角都有一定的下降。7名运动员身体重心高度下降值为(0.09±0.02)m,重心水平速度下降值为(0.48±0.45)m/s,左膝角屈膝幅度为(19.62±12.67)°。经检验,缓冲时段,左膝角屈膝幅度、身体重心的下降值和重心水平速度的下降值分别呈显著性相关($r=0.98, P<0.01$; $r=0.98, P<0.01$),即左膝角的屈膝幅度越大,重心高度下降得越多,重心水平速度损失越大。重心水平速度的下降主要是左脚着地时对地面产生的摩擦力引起的制动与支撑反作用力在水平方向的分力造成的。此时,若左膝屈膝幅度增大,身体重心下降幅度自然也就越大,重心水平速度损失也就越多,但一部分损失的水平速度可通过左腿的退让性收缩以肌肉弹性势能的形式储备起来,在蹬伸阶段再释放出来,为身体重心运动方向提早转变和垂直速度积累创

造有利条件。这一点,从运动员重心水平速度的下降值与左脚离地时刻重心垂直速度之间存在显著性相关关系($r=0.85$, $P<0.01$)中得以验证。以上分析表明,此时段可适当加大左膝的缓冲幅度,一方面保证了良好的制动效果,使助跑的动能更好地转化为左腿屈肌的弹性势能,从而使左腿在蹬伸时发挥更大的蹬伸力量;另一方面也可以有效地增加蹬伸距离,提高蹬离地时刻垂直速度。

表 2 缓冲时段运动员运动学参数

运动员	身体重心 下降幅度/m	身体重心水平速度 下降幅度/(m·s ⁻¹)	左膝屈膝 幅度/(°)
周	0.13	1.26	38.59
唐	0.09	0.54	21.18
谢	0.08	0.08	7.89
白	0.05	0.03	6.01
程	0.09	0.51	18.55
夏	0.10	0.84	33.95
侯	0.08	0.13	11.16
$\bar{x}\pm s$	0.09±0.02	0.48±0.45	19.62±12.67

注: H1—H2: 身体重心高度下降值 Vx1—Vx2: 身体重心水平速度下降值 D1—D2: 左膝屈膝幅度

2) 蹬伸时段。

为了更深入分析此时段人体运动学特征,依照该技术起跳动作的顺序,把蹬伸时段又分为前蹬伸时段(从身体重心最低点时刻到左脚离地时刻,其中经过了右脚着地时刻)和后蹬伸时段(从左脚离地时刻到右脚

离地时刻)。

(1) 前蹬伸时段左腿膝关节角度。

由表 3 可知,7 名运动员身体重心最低点时刻左膝角为(119.74±20.83)°,这时,左腿以脚内侧牢固支撑积极蹬伸,膝角开始增大,当右脚着地时左膝角为(139.26±14.17)°,在左脚离地时,膝角为(164.93±4.19)°,其蹬伸幅度为(45.19±21.48)°,重心垂直速度为(1.91±0.35) m/s。经检验,前蹬伸时段左膝蹬伸幅度与左脚离地时刻重心垂直速度呈显著性正相关($r=0.95$, $P<0.01$),说明前蹬伸时段左膝蹬伸幅度越大,左脚离地时刻重心垂直速度也越大。此外,左腿这一积极主动的蹬伸动作,能快速推动髋部和身体重心前移,这对于起跳时获得较大的冲量和右腿迅速踏上起跳点有着十分重要的意义。前蹬伸时段身体重心前移水平距离和重心水平速度分别为(0.18±0.08) m 和(2.21±0.81) m/s。经检验,前蹬伸时段身体重心前移水平距离和左脚离地时刻重心水平速度呈显著性相关($r=0.98$, $P<0.01$),这表明前蹬伸时段左腿蹬伸越充分,身体重心前移水平距离越大,越有利于获得较大的重心水平速度。周、唐、程、夏在前蹬伸时段充分发挥了左腿的积极作用,为后继右腿踏上起跳点后能迅速过渡到蹬伸动作及左腿的尽早摆动创造有利条件。谢等运动员均有不同程度的差距,原因主要是左腿蹬伸动作不积极,这对于提高重心速度以及调整起跳时良好的身体姿态极为不利。

表 3 运动员前蹬伸段的运动学参数¹⁾

运动员	$\varphi_1/(^\circ)$	$\varphi_2/(^\circ)$	$\varphi_3/(^\circ)$	$\varphi/(^\circ)$	$v_y/(m\cdot s^{-1})$	s/m	$v_x/(m\cdot s^{-1})$
周	86.54	133.48	168.20	81.66	2.42	0.35	3.63
唐	114.11	128.99	162.64	48.53	2.01	0.20	2.97
谢	141.23	163.29	169.47	18.14	1.69	0.13	1.89
白	140.31	155.01	167.90	17.59	1.80	0.10	1.32
程	111.70	131.32	160.08	48.38	1.97	0.19	2.13
夏	106.19	126.72	166.97	60.78	2.16	0.16	1.91
侯	138.09	136.69	159.23	21.14	1.33	0.12	1.65
$\bar{x}\pm s$	119.74±20.83	139.26±14.17	164.93±4.19	45.19±21.48	1.91±0.35	0.18±0.08	2.21±0.81

1) φ_1 —身体重心最低点时左膝角; φ_2 —右脚着地时左膝角; φ_3 —左脚离地时左膝角; φ —左膝角蹬伸幅度; v_y —左脚离地时重心垂直速度;

s—身体重心前移水平距离; v_x —左脚离地时重心水平速度

结合前面分析可知,运动员身体重心前移是人体惯性和通过左膝关节的蹬伸动作来实现的,左脚离地时刻,7 名运动员膝关节角度相差不多,均值为(164.93±4.19)°。因此,蹬伸幅度与左脚着地缓冲时刻膝关节弯曲的程度相关。建议运动员在训练中,要适当加强腿部肌群力量的发展。

(2) 前蹬伸时段右腿膝关节角度。

助跑最后一步结束左腿支撑过程中,右腿的摆动与进入起跳的着地方式直接影响起跳效果,这个技术动作完成的好坏直接影响后续蹬伸动作的完成质量。运动员从缓冲动作结束后,右腿膝关节即开始伸展,右脚着地时刻,7 名运动员膝角为(127.09±7.41)°,与重心最低点时刻相比分别增加了(16.57±12.26)°,左脚离地时刻膝角为(127.43±2.22)°,其蹬伸幅度为

(16.91 ± 18.93)°，此时身体重心获得的垂直速度为(1.91 ± 0.35) m/s。运动员在左腿支撑过程中，右腿积极主动上步，上步时前脚掌积极内扣，由脚外侧向前下方搓地并快速过渡到全脚掌及时蹬伸。这种起跳方式使右脚着地瞬间产生了积极制动，人体的惯性和右腿的制动效应形成了小腿绕踝关节、大腿绕膝关节、躯干绕髋关节转动的角动量，加之左腿、两臂向外的摆动动作及躯干向左拧转，这一特点可说明运动员为起跳形成人体绕垂直轴转动的动量矩提供初始条件。此外，这种起跳方式充分利用右脚着地瞬间产生的制动效应使右脚在踏跳时右脚掌与地面形成良好的拧转蹬地，从而使右脚踏上起跳点后能迅速进行蹬伸，改变了身体运动的方向，并提高了动作速度，为起跳创造前提条件。经检验，前蹬伸时段右膝蹬伸幅度与左脚离地时刻重心垂直速度呈显著性相关($r=0.92$, $P<0.01$)，这说明，右膝蹬伸幅度越大，蹬伸动作越充分，左脚离地时刻获得的重心垂直速度越大。

(3)前蹬伸时段两臂摆动速度。

从表 4 可知，前蹬伸时段，左右两臂摆动呈现不

同的变化规律。从重心最低点时刻至右脚着地时刻，左右两臂摆动速度不断增大，当右脚着地时左右两臂摆速分别为(8.64 ± 1.47)、(9.33 ± 1.73) m/s。结合前面分析可知，从重心最低点时刻至右脚着地时刻，运动员通过左腿的积极蹬伸，配合两臂的加速摆动，推动身体重心前移，为右腿积极快速地迈向起跳点创造有利条件。周、唐、程、夏蹬伸动作较充分，加之左右两臂的摆动速度大于其它运动员，这表明周等运动员充分利用两臂的摆动进行起跳的能力强于其它运动员。从右脚着地之后，左臂的摆速持续增大，当左脚离地时摆速达到最大(10.21 ± 2.24) m/s，而右臂摆速则呈现减小的趋势，随着左脚蹬离地面结束，右臂摆速降至(7.01 ± 1.51) m/s。经检验，左脚离地时刻，左臂的摆速与此时刻重心水平速度呈显著性的正相关($r=0.97$, $P<0.01$)。说明左臂摆动速度越大，左脚离地时刻重心水平速度就越大。可见，运动员从右脚着地至左脚离地时刻通过左臂的快速摆动使身体重心水平速度得到最大的提高，同时以减小右臂摆动速度来维持身体平衡。

表 4 前蹬伸时段运动员两臂摆动速度变化特征¹⁾

运动员	重心最低点时刻		右脚着地时刻		左脚离地时刻	
	v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2
周	4.08	9.00	11.03	12.18	14.80	9.20
唐	3.11	8.11	9.65	10.59	11.36	6.56
谢	4.62	7.80	8.25	8.01	9.16	5.55
白	4.74	7.06	6.32	7.26	8.32	7.61
程	4.12	8.32	8.93	9.88	9.53	7.02
夏	2.24	8.70	8.41	9.45	9.52	8.27
侯	3.86	7.15	7.88	7.95	8.76	4.86
$\bar{x} \pm s$	3.82 ± 0.88	8.02 ± 0.74	8.64 ± 1.47	9.33 ± 1.73	10.21 ± 2.24	7.01 ± 1.51

1) v_1 ：左臂摆动速度； v_2 ：右臂摆动速度

综上所述，在起跳动作的前蹬伸时段，运动员主要是通过左臂的加速摆臂使身体重心水平速度明显增大，并且在左脚离地时刻达到最大值，而身体重心垂直速度也增大是通过右腿的及时蹬伸以及左腿的蹬伸动作来实现的，并且初步获得了转体的力矩，即旋风脚转体 720° 动作进入腾空转体阶段获得的动力源是由起跳时人体绕垂直轴转动的角动量和起跳过程中蹬伸时支撑反作用力所提供的偏心推力(冲量矩)所组成。这是该技术动作表现出的显著特点之一。因此，在前蹬伸时段，右脚着地时脚掌内扣，及时快速蹬伸；左腿的加速蹬伸；左臂的快速摆动这 3 个主要环节的协调配合是完成旋风脚转体 720° 接马步动作起跳的最关键技术。

(4)后蹬伸时段右腿膝关节角度。

由表 5 可知，7 名运动员左脚离地时刻右膝角为(127.43 ± 2.22)°，右脚离地时刻膝角为(157.46 ± 9.55)°，其蹬伸幅度(30.03 ± 10.60)°，比前蹬伸时段右膝关节角度增幅大约 13°，即后蹬伸时期速度更快，比前蹬伸更重要。右脚离地时刻重心垂直速度为(3.40 ± 0.28) m/s。经检验，在后蹬伸时段中，右膝蹬伸幅度与右脚离地时重心垂直速度呈显著性相关($r=0.97$, $P<0.01$)。谢、白在后蹬伸过程中右腿蹬伸充分，其蹬伸幅度较大，右脚离地时刻垂直速度也较大，分别为 3.51、3.78 m/s。而夏、侯由于蹬伸动作不充分，所以离地时刻垂直速度较小，分别为 3.12 m/s、3.07 m/s。

表 5 后蹬伸时段右腿膝关节角度变化特征与重心垂直速度¹⁾

运动员	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\varphi/(\text{°})$	$v_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
周	127.29	164.29	37.00	3.60
唐	125.12	163.09	37.97	3.54
谢	126.13	160.92	34.79	3.51
白	126.28	168.46	42.18	3.78
程	128.78	153.16	24.38	3.16
夏	131.75	151.75	20.00	3.12
侯	126.65	140.57	13.92	3.07
$\bar{x} \pm s$	127.43±2.22	157.46±9.55	30.03±10.60	3.40±0.28

1) α —左脚离地时刻右膝角； β —右脚离地时刻右膝角； φ —右膝蹬伸幅度； v_y —右脚离地时刻重心垂直速度

(5)后蹬伸时段两臂、左腿的摆动效果。

后蹬伸时段 7 名运动员左臂的摆动速度开始下降，右臂摆动速度也持续下降，从左脚离地时刻到右脚离地时刻其下降值分别为(4.48±2.15)、(2.05±1.22) m/s(见表 6)。根据生物力学原理，左右臂制动后，动量发生了传递和转移，减少了起跳腿的肌肉负荷，使肌肉收缩的速度提高。从这点上来讲，7 名运动员两臂的摆动动作是基本符合技术动作的要求的。但右脚离地时刻双臂的制动还需加强。

表 6 后蹬伸时段运动员两臂、左腿摆动速度变化特征¹⁾

运动员	左脚离地时刻		左腿最大摆速		右脚离地时刻	
	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
周	14.80	9.20	15.09	6.30	6.92	8.07
唐	11.36	6.56	10.88	5.34	4.20	8.28
谢	9.16	5.55	10.20	4.61	4.86	6.85
白	8.32	7.61	13.33	5.89	5.44	8.36
程	9.53	7.02	9.90	6.13	4.96	8.09
夏	9.52	8.27	9.57	5.58	4.05	9.05
侯	8.76	4.86	8.54	6.17	4.30	8.06
$\bar{x} \pm s$	10.21±2.24	7.01±1.51	10.93±2.45	5.72±0.60	4.96±0.99	8.11±0.65

1) v_1 —左臂摆动速度； v_2 —右臂摆动速度； v_3 —左腿摆动速度

旋风脚转体 720°接马步动作的后蹬伸时段，左腿的摆动动作直接影响右腿的起跳蹬地效果，左腿的用力摆动引起的加速度可以增大右腿对地面的蹬力。我们从左腿速度的增大来判断左腿加速摆动的情况，由表 6 可知：右脚离地之前，7 名运动员左腿的摆动速度最大为(10.93±2.45) m/s，周、唐、谢、白、程左腿的摆速较大，他们在有限的摆动空间下，摆动动作果断有力，增大了右腿对地面的压力，有利于右腿蹬伸动作的进行。而夏、侯摆腿速度相对较低，分别为 9.57、8.54 m/s，说明这 2 名运动员左腿的摆动动作对右腿蹬伸力所产生的作用也相对较小，因而右脚离地时垂直速度也相对较低。经检验，左腿的加速外摆与右脚离地时重心垂直速度呈显著性相关($r=0.79$ ， $P<0.05$)，说明在后蹬伸时段中，摆腿速度越大，踏跳效果越明显，右脚离地时刻重心垂直速度就越大。

从表 6 可知，上述 7 名运动员均是在右腿未蹬离地面时，左腿的摆速便开始下降，均值为(8.11±0.65) m/s。7 人比较分析，谢、白在后蹬伸时段能充分发挥左腿的摆动作用以及加强右腿的蹬伸动作，从而弥补了前蹬伸时段技术动作的相对不足。而夏、侯虽然在前蹬伸时段较好的完成了技术动作，但在后蹬伸时段没能充分发挥左腿的摆动作用及加强右腿的蹬伸动作，建议夏、侯加强左腿的摆动和右腿的蹬伸。

综上所述，在后蹬伸时段，左腿的加速摆动和适时的减速制动以及左臂的及时制动能增大右腿的蹬地力量和转体力矩。而右腿的蹬伸效果直接影响离地时刻身体重心的腾起初速度。可见，两腿及上肢协调的“蹬摆结合”至关重要。

(6)腾起角度。

腾起角度是指人体在右脚离地时刻，人体重心的速度方向与水平面的夹角。

7 名运动员右脚离地时刻，重心腾起角度为(72.60±6.67)°(周、唐、谢、白、程、夏、侯分别为 69.60、70.40、80.60、83.50、69.40、67.70 和 66.00(°))。白在右脚离地时刻，水平速度的下降率最大(74.2%)，因而腾起角最大(83.50°)，腾起垂直初速度最大(3.78 m/s)；谢重心垂直速度为 3.51 m/s(见表 6)，略小于周、唐，而谢重心腾起的角度 80.6°却大于周、唐，这是因为在起跳离地时刻，谢水平速度的下降率(69.3%)大于周、唐(63.1%、55%)的缘故，也就是说，谢在起跳阶段的动作技术没有周、唐好，能获得这样的腾起角度是与由于较大的水平速度下降率的结果。侯在起跳过程中水平速度下降率较小(19.4%)，因而，腾起角度和垂直速度较小，分别为 66.0°和 3.07 m/s。可见，右腿的制动效果好，人体水平速度下降率大，对增大起跳腾起角度起了重要作用。

2.3 腾空阶段

腾空阶段从右腿离地时刻到左腿着地时刻，是体现动作难度和发挥技术水平的主要部分。腾空高度是完成旋风脚转体 720° 的前提条件。7 名运动员右脚离地时刻重心高度(0.91 ± 0.02) m。完成里合击响腿时刻重心上升高度为(1.48 ± 0.10) m，与重心腾起最大高度(1.49 ± 0.10) m 比较，两者差异极小(见表 7)，即完成击响腿动作时刻，重心几乎达到腾起的最大高度，这是完全符合动作本身的要求。

表 7 运动员空中里合腿击响时刻相关运动学参数 m

运动员	h	H	h_1
周	1.55	1.56	0.91
唐	1.57	1.57	0.95
谢	1.52	1.53	0.91
白	1.60	1.61	0.90
程	1.42	1.44	0.93
夏	1.37	1.38	0.89
侯	1.35	1.36	0.89
$\bar{x} \pm s$	1.48 ± 0.10	1.49 ± 0.10	0.91 ± 0.02

1) h —击响动作时刻人体重心的高度； H —人体重心腾起的最大高度；

h_1 —右脚离地时刻人体重心的高度

旋风脚转体 720° 接马步动作的空中身体动作成为影响转体 720° 的重要因素。从运动生物力学视角分析：人体进入腾空阶段，身体只受重力作用(忽略空气阻力)，无论空中动作形式如何复杂都必须遵循

角动量守恒定律。(I = 恒量)，亦即转动惯量 I 和角速度 ω 的乘积守恒。可见，腾空状态要想加快转体的角速度，只有通过改变转动惯量来实现。因此，运动员只有在空中通过改变肢体位置来减小人体转动惯量，加快转速，完成 720° 转体。

由表 8 可知，7 名运动员左、右肩角均有变化。周、唐左肩角度在减小，周从 110.51° 减小到 85.66°，唐从 110.16° 减小到 88.16°；白、程左肩角度在增加，白从 101.12° 增加到 122.74°，程从 95.55° 增加到 126.53°；而其它 4 名运动员右肩角度在减小，说明，他们在里合击响腿结束时，两臂快速向身体垂直轴靠拢，周、唐 2 名运动员采用两臂在体前交叉合抱的姿势，而白、程 2 名运动员则采用了左臂上，右臂胸前屈抱的姿势。并且，周、唐、白、程此时髋角较大，说明里合击响腿结束后，右腿也快速向身体靠拢。不管采用那一种两臂合抱的身体姿势，上述四名运动员都通过身体环节靠近垂直轴，从而减小了身体绕垂直轴的转动惯量，增加了转动的角速度。而谢、夏、侯 3 名运动员，两臂肩角变化不太大，髋角也较小，在完成里合击响腿之后，两臂没能迅速向身体靠拢，右腿的下摆幅度较小，即身体质量分布离转轴较远，因而，转动惯量较大，转体角速度较小，不利于后面动作的完成。可见里合击响腿完成后，需及时双臂合抱，双腿伸直使人体尽量成一“直棍”，加快转体完成 720°。

表 8 空中里合腿击响时刻至左脚着地前 0.12 s 时刻相关运动学参数¹⁾ (°)

运动员	空中击响腿时刻			左脚着地前 0.12 s 时刻		
	φ_1	φ_2	φ_3	φ_1	φ_2	φ_3
周	110.51	149.36	80.33	85.66	132.33	135.70
唐	110.16	141.06	79.93	88.16	126.52	115.09
谢	105.33	134.71	91.90	104.95	125.84	109.90
白	101.12	160.52	77.88	122.74	136.26	129.43
程	95.55	140.92	85.55	126.53	128.55	125.96
夏	94.36	151.84	102.88	108.24	141.54	110.35
侯	98.17	141.56	98.32	110.14	134.35	105.44
$\bar{x} \pm s$	102.17 ± 6.65	145.71 ± 8.69	88.11 ± 9.79	106.63 ± 15.57	132.20 ± 5.69	118.84 ± 11.49

1) φ_1 —左肩关节角度； φ_2 —右肩关节角度； φ_3 —右髋关节角度

2.4 落地阶段

落地阶段从左脚着地时刻到马步动作完成时刻。从技术上讲，要求运动员在转体 720° 后，上、下肢及时打开，增大人体转动惯量，减小转速，然后上体配合下肢做好缓冲，尽量使脚少移动或跳动，形成稳固的马步动作。

转体结束后，身体重心距离地面的高度越高，运

动员完成马步动作的时间和空间越充裕，上、下肢就能及时伸展，有利于落地动作的完成。转体结束时身体重心距地面高度 7 人平均值约 1.10 m 左右。

3 结论

通过以上讨论分析，得到以下结论与建议：

1) 在助跑阶段不是助跑速度越快越好，7 人重心水

平速度为 (1.27 ± 0.89) m/s。

2)在起跳阶段的缓冲时段,左膝角屈膝幅度、身体重心的下降值和重心水平速度的下降值分别呈显著性相关。重心高度的下降主要是通过左腿屈膝动作来完成的,7人身体重心下降 (0.09 ± 0.02) m,保证人体起跳时有一定的做功距离,重心水平速度的下降大小对后继起跳动作影响不是太大。

在起跳阶段的蹬伸时段中,前蹬伸时段左膝和右膝蹬伸幅度越大,左脚离地时刻重心垂直速度就越大。7名运动员左脚离地时刻左膝角为 $(164.93 \pm 4.19)^\circ$,蹬伸幅度为 $(45.19 \pm 21.48)^\circ$ 。右膝角为 $(127.43 \pm 2.22)^\circ$,蹬伸幅度为 $(16.91 \pm 18.93)^\circ$,人体重心垂直速度为 (1.91 ± 0.35) m/s。建议运动员在训练中,要适当加强下肢蹬伸肌群力量的发展;左脚离地时刻,左臂摆动速度越大,左脚离地时刻重心水平速度就越大,7人左臂摆动速度为 (10.20 ± 2.24) m/s,重心水平速度为 2.21 ± 0.81 m/s;右腿着地时脚掌内扣,及时快速蹬伸、几乎没有做退让性工作,同时左腿的加速蹬伸和摆动,左臂快速摆动的协调配合是关键技术。

后蹬伸时段,右膝角增大较多,右脚离地时刻膝角达到 $(157.46 \pm 9.55)^\circ$,增大了 $(30.03 \pm 10.60)^\circ$,右膝蹬伸幅度与重心垂直速度呈相关;在后蹬伸时段,左臂速度开始下降,下降值为 (4.48 ± 2.15) m/s,而左腿摆速在增加,在右脚离地之前,摆速达到最大 (10.93 ± 2.45) m/s,随后,左腿的摆速开始下降,当右脚离

地时刻摆动速度下降为 (8.11 ± 0.65) m/s。后蹬伸时段右腿蹬伸幅度更大,两腿及上肢协调的“蹬摆结合”至关重要;右脚的有效制动可增大人体腾起角度。7人离地时刻腾起角度为 $(72.60 \pm 6.67)^\circ$ 。

3)在腾空阶段,7名运动员里合击响腿时刻均在人体重心上升时段,接近人体重心最高点,里合击响腿结束后,需及时双臂合抱、两腿伸直尽量使人体成“直棍”,快速完成 720° 转体。

4)在落地阶段,完成稳固马步动作关键在于空中转体完成后尽快伸展肢体,增大人体的转动惯量,转体结束时身体重心距地面高度约1.10 m左右。

致谢:本论文得到成都体育学院武术系张选惠教授、运动生物力学教研室周继和教授的精心指导,在此表示诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] 国家体育总局武术运动管理中心. 武术套路竞赛规则(试行,2003)[S]. 北京:国家体育总局,2003:8-9.
- [2] 李良标. 运动生物力学[M]. 北京:北京体育学院出版社,1991:15.

[编辑:李寿荣]