

·竞赛与训练·

## 运用仿真计算对跳远踏板姿势的优化

罗炯, 公立政

(西南大学 体育学院, 重庆 400715)

**摘 要:** 运用多刚体模型及现代计算机仿真技术, 探讨人体在不同姿势下踏板所引起的跳远远度的变化特征, 以寻找最佳的起跳着板姿势。结果表明: 着板时小腿的姿态角、膝关节角不同组合可以使人体获得相同的远度, 故仅凭着板角的大小来衡量着板技术的优劣显然是不合理的; 跳远踏板时刻、人体各环节姿态角对跳远距离的影响作用大小并不一致, 其重要性排序依次为踏跳腿小腿的姿态角最重要, 其次是踏跳腿的膝角, 而躯干斜角、大腿夹角及摆动腿的膝角对跳远距离的影响相对较小; 运动员在跳远踏板时刻, 一定存在一个最佳的踏跳腿膝关节角和小腿与地面的夹角, 以这种方式上板, 可获得最大的跳远距离。

**关 键 词:** 运动生物力学; 跳远; 起跳姿势; 多刚体模型

**中图分类号:** K890; G852 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7116(2012)04-0092-06

### A study of the optimization of board striding for taking off posture in long jump by applying simulation computation

LUO Jiong, GONG Li-zheng

(School of Physical Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** According to the characteristics of body movement at board striding for taking off in long jump, and by applying a multiple rigid body model and modern computer simulation technology, the authors probed into the characteristics of changing of long jump farness caused by board striding in different postures, so as to seek for the optimal board striding for taking off posture, and revealed the following findings: different combinations of shank attitude angle and knee joint angle formed at board striding enable the body to reach the same farness, therefore it is obviously irrational to judge the performance of board striding technology based solely on the magnitude of board striding angle; at the moment of board striding for taking off in long jump, the magnitudes of influence of attitude angles of various body parts on long jump distance are different, the order of their importance is in turn the attitude angle of the shank of the take-off leg as the most important one, followed by the knee angle of the take-off leg, while the influence of torso tilting angle, thigh included angle and the knee angle of the swinging leg on long jump distance is relatively small; at the moment a long jumper strides on the board for taking off in long jump, there certainly are an optimal knee joint angle of the take-off leg and an optimal included angle between the shank and the ground, which enable the long jumper to reach the farthest long jump distance if he/she strides on the board in such a way.

**Key words:** sports biomechanics; long jump; take-off posture; multiple rigid body model

自美国优秀的男子跳远运动员迈克·鲍威尔在 1991 年以 8.95 m 的成绩打破了比蒙保持了近 23 年的男子跳远世界纪录以来, 20 年过去了, 至今这一纪录无人企及。跳远运动成绩取决于起跳完成瞬间腾起的初速度和腾起角, 而腾起时刻初速度可分解为水平速

度和垂直速度, 其中水平速度大小受制于助跑速度的利用率, 而垂直速度的产生, 除了主要来自助跑速度的转化外, 还有一部分来自运动员起跳过程中的蹬伸做功。为了获得最佳的腾起初速度及腾起角, 众多学者以运动学分析为主体, 结合踏跳过程中的动力学

收稿日期: 2011-09-24

作者简介: 罗炯(1966-), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向: 运动技术诊断与全民健身。

特点, 从而对人体踏跳技术进行理论研究, 获得了一些有益的结论<sup>[1-4]</sup>。人体运动的计算机仿真是一种新颖的技术诊断、动作优化方法, 它可将复杂的运动技术问题简化在经典力学范畴内, 从而利用精确的计算机编程进行理论推算。故本研究根据跳远踏跳着板时的人体运动的特点, 将人体简化为由铰链相联的 5 刚体模型, 着重探讨人体以不同姿势踏板对跳远距离的影响, 从而寻找最佳的踏跳着板姿势, 希望能够给广大教练员、运动员提供一些有益的帮助。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 踏跳着板时刻的数学模型

将人体简化为由 5 个环节组成的平面刚体模型, 即左、右小腿, 足, 左、右大腿, 而把躯干及左右手视为一个环节。由图 1 所示, 以左足触板点为坐标原点(记为  $O$ ), 据此左膝、左髋、右膝、右踝关节中心及人体顶点分别记为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ , 建立固定坐标系  $O-XY$ 。以连接各关节的轴作为各身体的连接轴, 则定义  $\beta_j(j=1, 2, 3, 4, 5)$  为各刚体的广义坐标<sup>[5]</sup>。人体总质心的坐标和速度表达式为:

$$\begin{cases} X = \sum_{i=1}^5 X_{ic} m_i / m \\ Y = \sum_{i=1}^5 Y_{ic} m_i / m \end{cases}; \begin{cases} v_x = \dot{X} = \sum_{i=1}^5 \dot{X}_{ic} m_i / m \\ v_y = \dot{Y} = \sum_{i=1}^5 \dot{Y}_{ic} m_i / m \end{cases}$$

式中  $X_{ic}$  是环节质心坐标,  $m_i$  是环节质量,  $m$  是运动员质量。

查阅研究文献[6-8], 跳远踏跳时, 人体姿态主要由 5 个姿态角决定,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ 。本研究作出如下定义:  $\beta_1$  称之为着板时刻小腿姿态角, 是着地时小腿迎角(由着地点与膝关节中心连线与水平正向构成的角);  $\beta_2$  着板时刻膝关节姿态角, 是着板时, 着地腿的大腿与小腿夹角;  $\beta_3$  躯干姿态角, 又称躯干迎角或躯干倾角, 为着板时人体上部与水平正向夹角;  $\beta_4$  为着板时人体两大腿夹角;  $\beta_5$  为摆动腿膝关节姿态角, 为着板时刻摆动腿小腿与水平正向夹角(见图 1)。

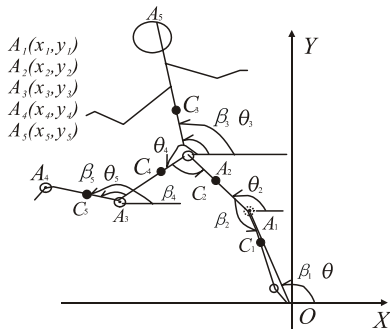


图 1 着地时刻各姿态角定义

从踏板开始到人体进入腾空瞬间止, 假设仅考虑人体总重心( $C^*$ )的运动情况, 并假定支撑点( $O$ )在整个过程中不发生移动。因而可建立如图 2 所示的直角坐标系, 即踏跳过程中, 人体重心受 2 个力作用: 重力及地面反作用力(空气阻力不计)。又设踏跳过程中, 人体重心  $C^*$  到支撑点  $O$  的距离为  $d_0$ (即矢量  $OC^*$  的大小), 那么人体重心速度  $v$  及重心位移  $S$  的规律可按图 3 所示确定。

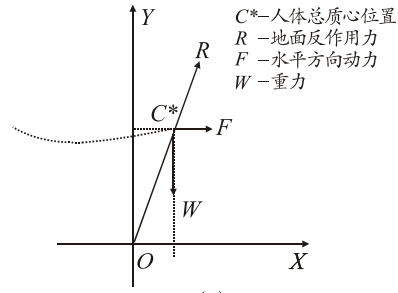


图 2 蹬离过程中受力

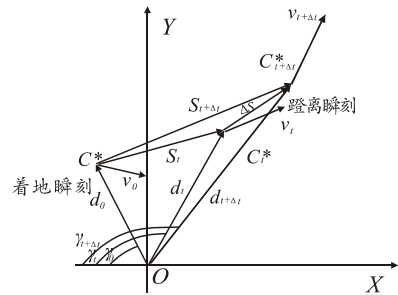


图 3 蹬离过程中位移、质心速变化

根据质心运动规律可获得相关运动学递归公式:

$$\begin{cases} v_{xt+\Delta t} = v_{xt} - \Delta t \cdot R_t \cdot \cos \gamma_t / m \\ v_{yt+\Delta t} = v_{yt} - \Delta t \cdot R_t \cdot \sin \gamma_t / m - g \cdot \Delta t \end{cases};$$

$$\begin{cases} S_{xt+\Delta t} = S_{xt} + \Delta t(v_{xt} + v_{xt+\Delta t})/2 \\ S_{yt+\Delta t} = S_{yt} - \Delta t(v_{yt} + v_{yt+\Delta t})/2 \end{cases}$$

那么,  $t$  时刻人体质心  $C^*$  的位置

$$\begin{cases} d_{xt} = d_{x0} + S \\ d_{yt} = d_{y0} + S_{yt} \end{cases}$$

$t + \Delta t$  时刻地面反作用力的方向为:

$$\gamma_{t+\Delta t} = -\arctan(d_{yt}/d_{xt})$$

### 1.2 支撑过程中人体受地面反作用力模型

运用仿真计算, 需要地面反作用力作为模型的动力, 而现在已知人体与地面的冲量, 这样就必须确定水平阻力与水平动力的转折点( $t_2$ )及腾空瞬间点( $t_3$ ), 运

用迭代法确定  $t_2$ 、 $t_3$ 。本研究以迭代值偏差  $|t_2 - t_3| < \Delta t$  来控制迭代结束。在收敛问题上，每次改变的时间步长  $\Delta t = 0.002$  s，以此保证迭代收敛，否则迭代发散。现假设  $0 \sim t_1$  作为冲击阶段， $t_1 \sim t_2$  段为前支撑阶段， $t_2 \sim t_3$  为后支撑阶段(见图 4)，同时又假定人体模型与地面相互作用的冲量是一定的，那么，冲击、前支撑、后支撑 3 阶段的冲量分别为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ，故可认为模型的整个踏跳过程是由这 3 个阶段平均力控制下完成的。

$$R_1 = \sqrt{I_{x_1}^2 + I_{y_1}^2} / t_1, R_2 = \sqrt{I_{x_2}^2 + I_{y_2}^2} / (t_2 - t_1), R_3 = \sqrt{I_{x_3}^2 + I_{y_3}^2} / (t_3 - t_2)$$

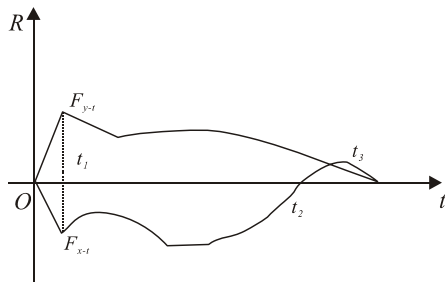


图 4 踏跳过程中力-时间变化

### 1.3 目标函数优化

根据跳远踏跳运动技术原理，运动员不论采用何种技术，目的都是为获得最大远度，因此，以跳远距离作为优化着板时人体姿态的目标函数(如图 5)。

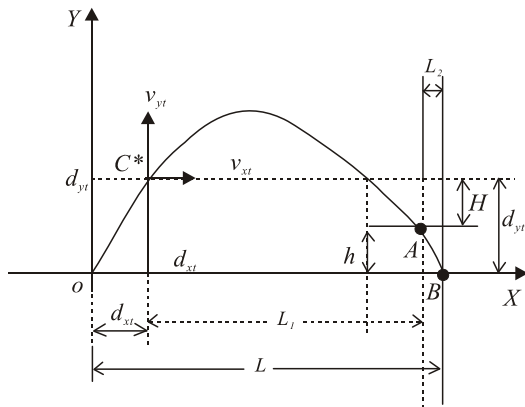


图 5 人体腾空后重心轨迹曲线

现假设 A 为脚落入沙坑时人体重心 C\* 位置，跳远远度 L 由 3 部分构成：腾起时刻质心离原点水平距离  $d_{xt}$ 、腾空距离  $L_1$  及着地距离  $L_2$ ，即  $L = d_{xt} + L_1 + L_2$ 。由于着地距离主要由人体落入沙坑时的姿势决定，本研究将其视为常数 K(对某具体运动员)，由抛物线运动规律可得：

$$-H = v_{yr} \cdot g \cdot t^2 / 2 \Rightarrow \text{空中飞行时间 } t = (v_{yr} + \sqrt{2gh + v_{yr}^2}) / g,$$

又因为： $H = d_{yr} - h$ ，所以有：

$$L = K + d_{xt} + v_{xr}(v_{xr} + 2g(d_{yx} - h) + v_{yr}^2) / g \quad (1)$$

由图 1 设着地时刻： $A_1(x_1, y_1)$ 、 $A_2(x_2, y_2)$ 、 $A_3(x_3, y_3)$ 、 $A_4(x_4, y_4)$ 、 $A_5(x_5, y_5)$ ，而着地时刻着地小腿质心坐标  $W_1(p_1, q_1)$ 、大腿质心坐标  $W_2(p_2, q_2)$ ，整个着地腿质心坐标  $W_3(p_3, q_3)$ ，摆动腿小腿质心坐标  $W_4(p_4, q_4)$ ，摆动腿大腿质心坐标  $W_5(p_5, q_5)$ ，整个摆动腿质心坐标  $W_6(p_6, q_6)$ ，着地腿与摆动腿的共同质心坐标  $W_7(p_7, q_7)$ ，上躯干+双臂质心坐标  $W_8(p_8, q_8)$ ，人体总质心坐标  $W(d_{xt}, d_{yt})$ 。

设左右小腿长为  $l_1$ ，左右大腿长为  $l_2$ ，躯干长为  $l_3$ ，于是我们可以获得：

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \cos \beta_1, y_1 = l_1 \sin \beta_1; \\ x_2 &= -l_1 \cos \beta_1 - l_2 \cos(\beta_2 - \beta_1), y_2 = l_1 \sin \beta_1 + l_2 \sin(\beta_2 - \beta_1); \\ x_3 &= -l_1 \cos \beta_1 - l_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) - l_2 \cos(\beta_4 + \beta_2 - \beta_1), \\ y_3 &= l_1 \sin \beta_1 + l_2 \sin(\beta_2 - \beta_1) - l_2 \sin(\beta_4 + \beta_2 - \beta_1); \\ x_4 &= -l_1 \cos \beta_5 - l_1 \cos \beta_1 - l_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) - l_2 \cos(\beta_4 + \beta_2 - \beta_1), \\ y_4 &= l_1 \sin \beta_1 + l_2 \sin(\beta_2 - \beta_1) - l_2 \sin(\beta_4 + \beta_2 - \beta_1) + l_1 \sin \beta_5; \\ x_5 &= -l_3 \cos \beta_3 - l_1 \cos \beta_1 - l_2 \cos(\beta_2 - \beta_1), \\ y_5 &= l_3 \cos \beta_3 + l_1 \sin \beta_1 + l_2 \sin(\beta_2 - \beta_1). \end{aligned}$$

质心位置递归算法：

$p_1 = x_1 / (1 + \lambda_1), q_1 = y_1 / (1 + \lambda_1)$ 。(  $\lambda_1$  表示中国人惯性参数小腿质心位置占小腿环节长度的百分比)

$p_2 = (x_2 + \lambda_2 x_1) / (1 + \lambda_2), q_2 = (y_2 + \lambda_2 y_1) / (1 + \lambda_2)$ 。(  $\lambda_2$  表示中国人惯性参数大腿质心位置占大腿环节长度的百分比)。

于是可推出：整个着地腿的质心坐标  $(p_3, q_3)$  为：

$$\left( \frac{(1 + \lambda_1)x_2 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3) + x_1, (1 + \lambda_1)y_2 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3)y_1}{(1 + \lambda_1)(1 + \lambda_2)(1 + \lambda_3)}, \frac{(1 + \lambda_1)y_2 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3)y_1}{(1 + \lambda_1)(1 + \lambda_2)(1 + \lambda_3)} \right),$$

其中  $\lambda_3 = m_2 / m_1$ ， $m_2$  为大腿质量， $m_1$  为小腿足质量。

同理可推出摆动腿质心坐标  $(p_6, q_6)$ ：

$$\left( \frac{(1 + \lambda_1)x_2 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3)x_3 + (\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)x_4, (1 + \lambda_1)y_2 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3)y_3 + (\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)y_4}{(1 + \lambda_1)(1 + \lambda_2)(1 + \lambda_3)}, \frac{(1 + \lambda_1)y_2 + (\lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3)y_3 + (\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)y_4}{(1 + \lambda_1)(1 + \lambda_2)(1 + \lambda_3)} \right)。$$

据此可以推出着地腿与摆动腿的合质心坐标：

$W_7((p_3 + p_6) / 2, (q_3 + q_6) / 2)$ ，上躯干+双臂质心坐标  $W_8(p_8, q_8)$  可表述为： $W_8((x_5 + \lambda_4 x_2) / (1 + \lambda_4), (y_5 + \lambda_4 y_2) / (1 + \lambda_4))$ ，其中  $\lambda_4$  近似看作是中国人躯干质心位置相对于躯干长度的百分比，于是可以推出人体总质心坐标  $W(d_{xt}, d_{yt})$  为：

$$\left( d_{xt} = \frac{(2x_5 + 2\lambda_4 x_2 + \lambda_5(p_3 + p_6))}{2(1 + \lambda_4)(1 + \lambda_5)}, d_{yt} = \frac{2y_5 + 2\lambda_4 y_2 + \lambda_5(q_3 + q_6)}{2(1 + \lambda_4)(1 + \lambda_5)} \right),$$

其中  $\lambda_5=m_2/m_1$ ,  $m_1$  为上躯干+双臂质量,  $m_2$  两条腿质量和。

(说明:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_4$  由清华大学郑秀媛等研究获得的中国人体惯性参数数据获取)

于是可以获得远度  $L$  表达式:

$$L=[2x_5+2\lambda_4x_2+\lambda_5(p_3+p_6)]/[2(l+\lambda_4)+(l+\lambda_5)]+v_{xt}\left[ v_{yt}+\sqrt{2g[(2y_5+2\lambda_4y_2+\lambda_5(q_3+q_6))/(2(l+\lambda_4)(l+\lambda_5))-h]+v_{yt}^2}\right]/g \quad (2)$$

表达式(2)右边完全由着板时模型各环节的姿态角、相对角速度及人体惯性参数决定,而对同一运动员,其人体惯性参数可认为是常数,也就是说,运动员以不同的环节姿态和不同的环节摆动速度着板将会直接影响踏板时人体总重心的位置和速度,进而影响腾起时人体重心位置和速度,并最终导致跳远距离  $L$  的改变。

### 2 数值计算及结果分析

本研究的人体惯性参数采用清华大学郑秀媛等研究获得的中国人体惯性参数数据,运动学参数取自 2010 年 3 月全国室内田径锦标赛(南京站),以 8.27 m 夺得男子跳远冠军并一举打破了由跳远名将黄庚保持 14 年之久的全国室内纪录的苏雄锋的相关参数。对该运动员的比赛现场进行拍摄并对其动作进行运动学图像解析。

#### 2.1 踏跳着地时刻人体模型各环节对跳远距离的影响

现假设人体模型各环节的角速度为一定值,现以不同的环节姿态着板,为了确定着板时各环节的姿态角对成绩的影响,现系统地改变  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ ,若每次改变其中一个参数,保持其它 4 个参数为某个给定值,来探讨各环节姿态角对跳远距离  $L$  的影响,并据跳远距离  $L$  的变化幅度确定主要作用的环节。

图 6 显示 3 条曲线,从中可获得如下信息:

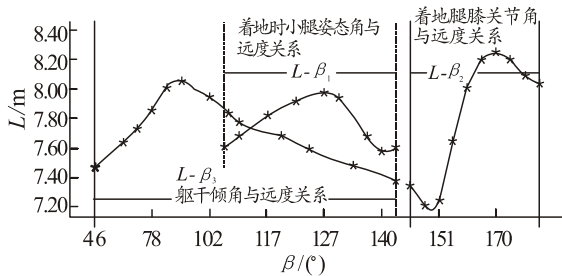


图 6 跳远距离分别与着地时的小腿角、膝关节角及躯干角的变化关系

1)  $L-\beta_1$  曲线显示了踏跳远度受着地小腿姿态角的影响,它表明了 3 个方面特点:当给定了  $\beta_2=171^\circ$ 、 $\beta_3=97^\circ$ 、 $\beta_4=56^\circ$ 、 $\beta_5=102^\circ$  (附:这 4 个迭代初值是目前能查阅到的相关文献中公布的优秀跳远运动

员取得最好成绩时这 4 个角情况均值<sup>[9-12]</sup>,下面的两种讨论情况有关迭代初值取法相同),小腿腿姿态角  $\beta_1$  的有效区间在( $116^\circ \sim 145^\circ$ ),若  $\beta_1 < 116^\circ$  时,动作宣告失败,意旨着板时人体重心位置偏高,踏跳时间过短且已小于规定的时间(本研究定为 80 ms,该时间设置是依据相关文献报道:即著名跳远运动员比蒙、刘易斯的踏跳时间(90 ms)基础上再下降 10 ms<sup>[9-10]</sup>);当  $\beta_1 > 146^\circ$  时,动作宣告失败,这是因为重心偏低,踏跳时间已超出规定时间的上限(本研究踏跳时间上限在一般优秀运动员踏跳时间 120 ms 基础上,加 3 个标准差值,即 150 ms 为上限)<sup>[13]</sup>;当  $\beta_1$  约为  $127^\circ$  左右,远度  $L$  取值最大。

2)  $L-\beta_2$  曲线显示踏跳远度受着地腿膝关节角的影响,亦有 3 个特点:给定了  $\beta_1=125^\circ$ 、 $\beta_3=97^\circ$ 、 $\beta_4=56^\circ$ 、 $\beta_5=102^\circ$ ,当  $\beta_2 < 145^\circ$  时,动作失败,说明着地时膝角太小(据查相关文献,多数优秀运动员最大缓冲膝角不小于  $143^\circ$ ),随着着地后的进一步缓冲,这样人体重心过于偏低,起跳时间延长(大于规定时间的上限),这是起跳失败根原;当  $\beta_2$  有效区间为( $145^\circ \sim 179^\circ$ )时,起跳成功,且当  $\beta_2$  约为  $173^\circ$  左右时,远度  $L$  值达到最大;当  $\beta_2$  超过  $179^\circ$  情况下,着地腿膝关节几乎在伸直状态下着地,导致重心过度偏高,引起踏跳时间小于规定时间上限,故动作失败。

3)  $L-\beta_3$  曲线显示了躯干倾角对  $L$  的影响,有如下特点:给定  $\beta_1=125^\circ$ 、 $\beta_2=171^\circ$ 、 $\beta_4=56^\circ$ 、 $\beta_5=102^\circ$ ,当  $\beta_3 < 46^\circ$ ,着地时,人体过分前倾,导致重心偏高,踏跳时间偏短,动作失败;当  $\beta_3$  取值约为  $90^\circ$  左右时,对应的  $L$  值最大;当  $\beta_3 > 143^\circ$  时,动作失败,此时,人体着地上体过分后仰,导致重心偏低,踏跳时间延长并超过极限标准。

图 7 显示出两条曲线,从中可以获取如下信息:

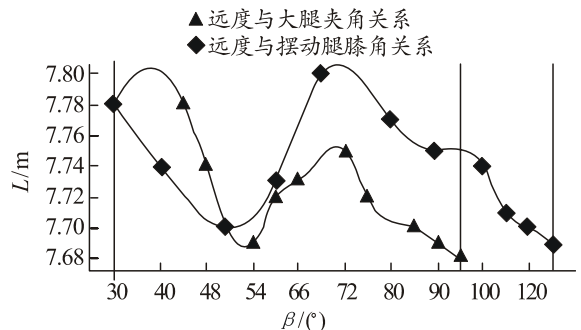


图 7 跳远距离与摆动腿膝角及大腿夹角关系

1) 从  $L$ -摆动腿膝角之间关系看出:给定  $\beta_1=125^\circ$ 、 $\beta_2=171^\circ$ 、 $\beta_3=96^\circ$ 、 $\beta_4=56^\circ$ ,当摆动腿  $\beta_5$  处于( $30^\circ \sim 50^\circ$ )时,远度  $L$  呈下降趋势,当  $\beta_5$  处于( $50^\circ \sim$

75°),  $L$  呈上升趋势, 当  $\beta_3$  处于(75° ~ 120°)时,  $L$  又呈下降趋势; 当  $\beta_3$  低于 30° 时, 对远度不利, 当  $\beta_3$  大于 120°, 动作失败, 此时摆动腿的姿态角过于打开, 使踏跳时间过于延长; 似乎当  $\beta_3=70^\circ$  时, 远度  $L$  有最大值。

2)  $L$ -两大腿夹角之间关系与  $L$ -摆动腿膝角之间关系几乎有类似的特征: 此时, 给定  $\beta_1=125^\circ$ 、 $\beta_2=171^\circ$ 、 $\beta_3=96^\circ$ 、 $\beta_5=96^\circ$ , 远度  $L$  有两个峰, 第 1 个峰当大腿夹角  $\beta_4$  处于(30° ~ 50°)时, 第 2 个峰当大腿夹角  $\beta_4$  处于(50° ~ 95°)时, 第 1 个峰值比第 2 个峰值大; 当  $\beta_4$  大于 95° 时, 动作失败, 此时着地两腿打开过大, 使踏跳时间过于延长。

综合分析图 7 中的两条曲线, 可以认为: 摆动腿膝角及两大腿夹角与远度  $L$  的关系似乎不存在明显的规律性, 但当摆动腿膝角及两大腿夹角都处于(70° ~ 75°)时, 远度  $L$  可能获取最大值, 且影响作用同步, 这是一个有趣的结论。

### 2.2 踏跳着板时刻踏跳腿着板姿态优化分析

现以苏雄锋下肢环节长度作为已知量:  $l_1=0.443$  m(小腿长)、 $l_2=0.406$  m(大腿长)、 $l_3=0.721$  m(躯干长)、 $l_4=0.443$  m(摆动腿的小腿长)、 $l_5=0.406$  m(摆动腿的大腿长)、 $m=72.00$  kg、 $d_{\max}=1.20$  m 时, 可得到以下一些优化结果:

- 1)  $\beta_1=128^\circ$ 、 $\beta_2=178^\circ$ 、 $\beta_3=96^\circ$ 、 $\beta_4=69^\circ$ 、 $\beta_5=102^\circ$ ,  $L=7.97$  m;
- 2)  $\beta_1=131^\circ$ 、 $\beta_2=178^\circ$ 、 $\beta_3=90^\circ$ 、 $\beta_4=60^\circ$ 、 $\beta_5=103^\circ$ ,  $L=8.21$  m;
- 3)  $\beta_1=127^\circ$ 、 $\beta_2=176^\circ$ 、 $\beta_3=81^\circ$ 、 $\beta_4=58^\circ$ 、 $\beta_5=101^\circ$ ,  $L=8.39$  m。

从上述 3 个优化结果看, 第 3 个优化结果是值得庆祝的, 它比苏雄锋的实际成绩提高了 12 cm。可见, 通过改变踏跳着地瞬时运动员的 5 个主要着地姿态角, 是可以使受试者获得最佳的远度, 从而为运动员修正技术动作、提高运动成绩提供非常有益的参考。

## 3 讨论

踏跳过程中, 人体经过着板、缓冲支撑及蹬伸支撑(其中还包括摆动腿的屈膝前摆)。根据起跳技术的阶段划分, 起跳的第 1 阶段是起跳脚踏上跳板, 而着板时人体质心位置会影响起跳效果, 其标志是着板角和人体质心到支撑点的距离, 因而将着板角定义为人体着地时重心与支撑点的连线与地面所成的夹角<sup>[11]</sup>。因此, 着板角反映了着地时人体重心位置情况, 该夹角越小表示重心越低, 反之, 则重心越高。本研究采用广义坐标系, 为了研究方便将着板角定义为踏跳腿着地瞬时膝

关节与着地中心点连线与  $X$  轴正向夹角, 两种定义其实质基本相同, 后一种定义意指着板角越大, 重心越低; 反之, 则重心越高。

为了进一步探讨着板角的重要性, 我们给定了躯干角和摆动腿的姿态角, 而对着板角  $\beta_1$  分别取 120°、128°、132° 和 136° 4 组值, 再深入分析着地腿膝角 ( $\beta_2$ ) 与远度  $L$  的关系(见图 8); 同样地, 又分别选取着地腿膝角( $\beta_2$ )为 150°、160°、170° 和 180° 4 组值, 从另一方面再深入分析了着地角与远度的关系(见图 9)。综合图 8、9 的特征, 不难发现: 1)着板时踏跳腿姿态角的不同配合可以得到相同的远度; 2)当着地腿膝角( $\beta_2$ )在(145° ~ 178°)时, 若膝角固定, 远度随着板角增加而增加; 3)当着地角在(114° ~ 145°)时, 若着地角固定, 远度  $L$  随膝角的增加而增加; 4)当着板角超出 135° 时, 此时着地腿膝角要求较大才能获得最佳的  $L$ , 否则动作失败。因此, 本研究认为, 在人体着板的姿态角中, 着板角最为重要, 但不是唯一重要的, 它只能代表着地时人体的重心位置, 不能完全反映着地时人体的姿态, 有关文献及体育学科一些相关教科书中都强调用着板角来衡量着板技术优劣未免太片面, 若以着板时人体各环节的姿态角, 特别是踏跳腿的姿态角( $\beta_1$ 、 $\beta_2$ )来衡量着板技术则更为全面。

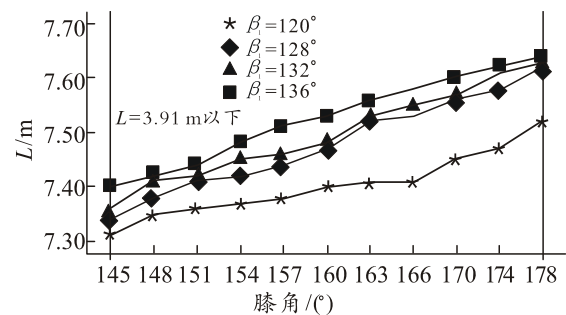


图 8 在 4 种着地角情况下改变膝角引起远度变化曲线

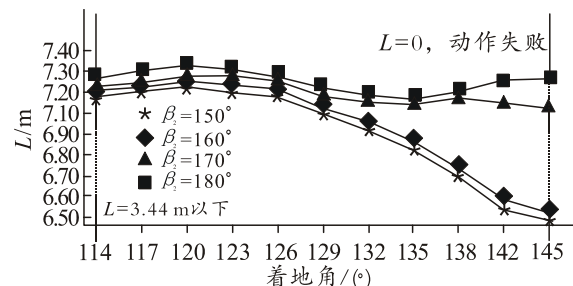


图 9 在 4 种膝角情况下改变着地角所引起远度变化曲线

对踏跳支撑阶段的研究中, 还有相当多的学者认为起跳腿的缓冲作用、躯干倾角及摆动腿膝角最为重要, 而把跳远起跳时的缓冲幅度作为评定缓冲能力和起跳技术的重要指标<sup>[12, 14-15]</sup>。本研究认为对于不同的

个体躯干角、大腿夹角及摆动腿膝角3个姿态角应该有不同的组合,不存在统一的最佳模式,而且从3个姿态角与 $L$ 的关系图来看,其重要性不如踏跳腿的姿态角( $\beta_1$ 、 $\beta_2$ )。摆动腿的重要性不在于姿态角的大小,而更强调其摆动的速度及制动,还有就是摆动与蹬伸间的协调配合。

本研究迭代结果中亦表明起跳时间是非常重要的指标之一,时间低于80 ms及高于150 ms, $L$ 大大缩小,甚至无解(动作失败)。由此可见,踏跳时间对支撑缓冲最大肌力的获得,及对蹬伸时最大功率的发挥和支撑缓冲阶段、蹬伸阶段的紧密衔接都具有非常重要的作用,因此起跳时间是评定起跳效果的一个极重要的因素。运动实践中,有时强调快速起跳,缩短起跳时间应该是有条件的,缩短起跳时间应该是确保在充分缓冲的前提下,而这又与运动员自身身体条件密不可分,有些优秀运动员下肢弹性好,起跳时间短,但缓冲动作并不明显。故缓冲的充分与否,不能完全以跳远者腿部的姿态角为依据,更要考虑运动员肌肉非代谢能的利用才是最为重要的。

#### 参考文献:

- [1] 禹小时. 跳远起跳效果评价指标的分析[J]. 上海体育学院学报, 1999, 23(2): 66-69.
- [2] 章碧玉. 对提高我国跳远有效成绩有效途径的探讨[J]. 体育科学, 1997, 17(3): 37-40.
- [3] 邓泽祥. 中国跳远运动员的高助跑速度利用率引起的思考[J]. 广州体育学院学报, 2002, 22(2): 52-54.
- [4] 黄志平. 对广西第九届运动会跳远比赛的技术分析[J]. 体育科技, 2002, 23(1): 15-17.
- [5] ittenburg J W. 多刚体系统动力学[M]. 谢传锋, 译. 北京: 北京航空学院出版社, 1986: 34-38, 93-140.
- [6] 洪嘉振. 运动生物力学计算机仿真研究[J]. 体育科学, 1989, 9(3): 56-60.
- [7] Matthew T G. Pain, John H Challis. Wobbling mass in influence on impact ground reaction forces: a simulation model sensitivity analysis[J]. Journal of Applied Biomechanics, 2004, 20(3): 309-316.
- [8] Adrian lee, Philip Gand Neil F. A biomechanics analysis of the last stride, touchdown, and take off characteristics of the men's long jump[J]. Journal of Applied Biomechanics, 1994, 10(1): 61-78.
- [9] 郭元奇. 对高水平跳远运动员专项速度训练模式的探讨[J]. 北京体育大学学报, 2003, 23(5): 694-696.
- [10] 劳开勇, 谢征鸣, 袁治平. 制约我国男子跳远成绩的多种因素分析[J]. 中国体育科技, 2004, 40(6): 5-6.
- [11] 彭春政, 袁建国. 跳远运动员专项成绩与专项身体素质相关关系的研究[J]. 中国体育科技, 2004, 40(4): 3-6.
- [12] 曹军. 中外优秀男子跳远运动员跳远技术参数的回归分析[J]. 哈尔滨体育学院学报, 2006(2): 115-117.
- [13] 王东亚. 我国优秀男子跳远运动员平跑速度对跳远成绩影响因素的研究[J]. 北京体育大学学报, 2005, 25(8): 1149-1150.
- [14] Linthorne N P. Optimum release angle in the shot put [J]. Journal of Sports Sciences, 2001, 19(3): 359-372.
- [15] Alvarez, Prieto J G. Jumping performance, isometric force and muscle characteristics in non athletic young men[J]. Journal of Human Movement Studies, 1998, 35(4): 101-117.