

·运动人体科学·

# 基于机器学习算法的杠铃高悬垂位实力抓举与 借力单杠双力臂动作的拮抗关系研究

石智勇, 徐异宁, 顾耀东  
(宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 基于借力单杠双力臂动作中的身体姿势变化设计其拮抗训练动作——杠铃高悬垂位实力抓举, 并使用机器学习算法验证与量化不同重量的杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双力臂动作的拮抗关系。招募有经验的综合体能训练爱好者 10 名, 通过线性传感器计与惯性测量单元采集借力单杠双力臂动作和杠铃高悬垂位实力抓举动作的运动生物力学数据, 使用一维统计参数映射(SPM1D)和动态时间规整(DTW)机器学习算法, 验证与量化两者之间的拮抗关系。结果显示: 两个动作在肩关节外展内收、内旋外旋、屈曲伸展以及肘关节内旋外旋上, 存在拮抗关系。当杠铃重量约 60% 1RM(1 次最大重量)时, 两个动作的动力学数据拟合度最佳; 当杠铃重量低于 60% 1RM 时, 两个动作的关节运动的拮抗关系更加显著。研究认为: 杠铃高悬垂位实力抓举动作与借力单杠双力臂动作存在拮抗关系, 可用其来优化借力单杠双力臂动作的训练效果, 但杠铃配重需要根据训练目标和训练者能力进行调整。当训练目标为提升上肢爆发力时, 可使用约 60% 1RM 的杠铃配重, 而当训练目标为提升借力单杠双力臂动作技巧时, 则可用低于 60% 1RM 的杠铃配重。  
**关键词:** 运动生物力学; 拮抗动作; 运动训练; 杠铃高悬垂位实力抓举; 借力单杠双力臂动作; 机器学习算法

中图分类号: G884 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2024)06-0140-09

## Study on the antagonistic relationship between barbell high-hang muscle snatch and kipping bar muscle-up based on machine learning algorithms

SHI Zhiyong, XU Yining, GU Yaodong  
(Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** This study aimed to design an antagonistic training movement, which was barbell high-hang muscle snatch for the kipping bar muscle-up based on changes in body posture, and then machine learning algorithms were also employed to validate and quantify the antagonistic relationship between these exercises under various loads. 10 young and experienced fitness enthusiasts were recruited to participate in this study. Biomechanics parameters for kipping bar muscle-up and barbell high-hang muscle snatch were collected by using linear sensors and inertial measurement units, and then one-dimensional statistical parametric mapping (SPM1D) and dynamic time warping (DTW) algorithms were applied to verify and quantify the antagonistic relationship between the two movements. The results showed that an antagonistic relationship was confirmed between the two movements in terms of shoulder joint abduction and adduction, internal and external rotation, flexion and extension, as well as elbow joint internal and external rotation. Optimal dynamic parameters fitting occurred at a barbell weight of approximately 60% 1RM (one-repetition maximum), while the most pronounced antagonistic kinematic relationship was observed

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 宁波市重大科技任务攻关项目 科技创新 2025 重大专项(2022Z196); 浙江省哲学社会科学规划领军人才培养课题 青年英才培育(22QNYC10ZD)。

作者简介: 石智勇(1993-), 男, 博士研究生, 研究方向: 运动生物力学。E-mail: 2201040005@nbu.edu.cn

at weights below 60% 1RM. The conclusion indicated that the barbell high-hang muscle snatch exhibits an antagonistic relationship to the kipping bar muscle-up and can be effectively used to optimize its training effect, but the load must be adjusted based on the objectives of training and individual capabilities. For enhancing upper limb explosive strength, a load around 60% 1RM will be recommended, whereas for improving skill of kipping bar muscle-up, lighter loads below 60% 1RM are advised.

**Keywords:** sports biomechanics; antagonistic movement; sports training; barbell high-hang muscle snatch; kipping bar muscle-up; machine learning algorithms

在运动科学和体育训练领域,借力单杠双力臂(图1(1))作为体操运动的基础动作,在体操训练中占据核心地位<sup>[1]</sup>。同时,该动作不仅涉及人体上肢和躯干的大多数关节的联合运动,包括肩关节、肘关节和腕关节,还需要躯干和骨盆的协调发力。因此,借力单杠双力臂动作在提升运动员的上肢与躯干的爆发力和协调性方面,表现出了极高的效率,极具训练价值,已被多种运动项目的专项体能训练所纳入,包括综合体能、游泳和篮球等<sup>[1-2]</sup>。

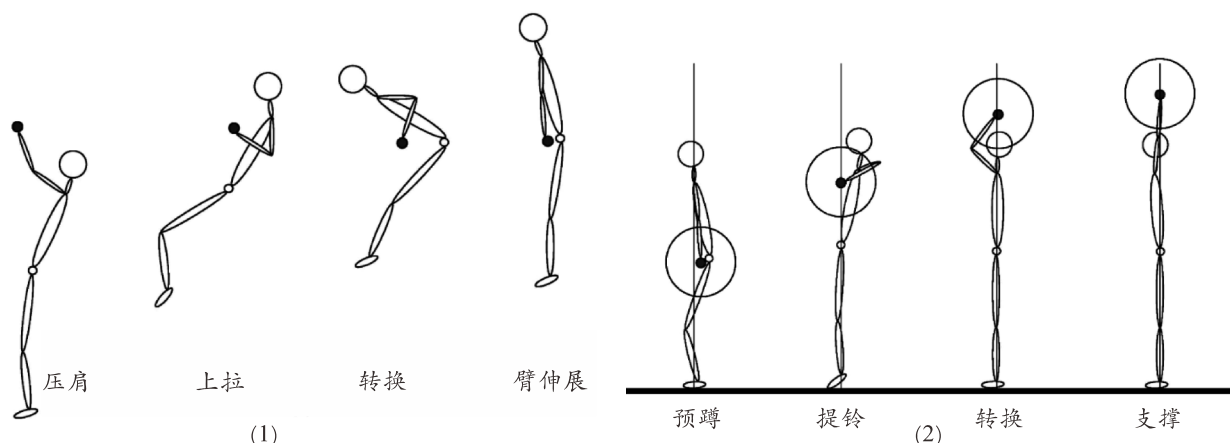
然而,正因为借力单杠双力臂动作涉及复杂的上肢和躯干关节运动及协调,因此,除体操项目外,借力单杠双力臂动作在其他运动项目的专项体能训练中,属于训练难度较高的动作之一<sup>[3]</sup>。对于训练者而言,掌握这一动作不仅需要良好的基础身体素质,还需通过大量的练习来熟练掌握相关动作技术。所以,虽然借力单杠双力臂动作拥有较高的训练价值,但在掌握该动作之前,训练者不得不冒着受伤的风险,消耗大量的时间和精力去掌握该动作,影响长期的训练收益<sup>[4]</sup>。因此,找到一种科学的途径,提升借力单杠双力臂动作学习及训练的效率,在不额外增加训练量和训练强度的前提下维持训练收益,是十分重要且有意义的。

拮抗训练作为一种重要的训练策略,旨在针对某个训练动作所涉及肌肉(群),选择某个特定的拮抗动作,对运动功能互为拮抗关系的肌肉(群)进行训练。这一策略的核心在于通过训练那些在生物力学上与主要运动相反的肌肉(群),以平衡肌肉(群)之间的力量和功能,从而提升运动表现,预防运动损伤<sup>[5]</sup>。拮抗训练涉及两个主要方面:其一是所采用的动作所涉及的肌肉(群)必须与原动作所涉及的肌肉(群)之间存在明确的运动功能上的拮抗关系,确保这两组肌肉在运动过程中产生相对的活动模式;其二是训练参数(如负荷、组数、每组次数和组间歇等)要与原训练参数相匹配,以确保训练效果的最大化<sup>[6]</sup>。之前的研究已经证实,通过在抗阻训练计划中合理增加拮抗训练,不仅可以提升相关关节的稳定性及运动表现,而且在促进肌肉之间的平衡、提高整体运动效率方面有显著效果,对于减少由肌肉不平衡导致的运动损伤更是具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

目前,拮抗训练中所采用的拮抗动作,主要针对单关节或双关节动作。其中,单关节动作的拮抗动作选择常基于肌肉(群)的运动解剖学特征,如站姿杠铃二头肌弯举的拮抗动作常选用站姿绳索下拉,坐姿膝伸展的拮抗动作常选用俯卧屈膝。而双关节动作的拮抗动作的选择常基于动作对外部负荷的作用效果,如卧推(即仰卧水平推,训练者以仰卧姿势将外部负荷在水平方向上推离身体,动作成分为肩关节水平内收结合肘关节伸展)的拮抗动作常采用俯身杠铃划船(即俯身水平拉,以俯身姿势将外部负荷在水平方向上拉近身体,动作成分为肩关节水平外展结合肘关节屈曲)。然而,由于复合动作的运动生物力学特征较为复杂,目前针对多关节复合动作的拮抗训练研究和探索是缺乏的,尤其是上肢和躯干,主要原因在于上肢和躯干的多关节复合动作所涉及的关节数量、关节类型以及协调模式,比下肢多关节复合动作更多更复杂。所以,借力单杠双力臂动作拮抗训练动作,仅仅依靠简单借鉴单关节和双关节动作的拮抗训练动作设计方法是不够的。

本研究基于“身体姿势”考量(即重点关注训练者在执行特定多关节复合动作过程中的身体姿势的变化,起源于人体运动控制理论中的程序控制理论,即运动由中枢神经系统预先设定的运动程序控制,包含执行特定运动所需的动作指令,不完全依赖于外界反馈<sup>[9]</sup>),发现奥林匹克举重训练中的杠铃高悬垂位实力抓举(图1(2))可能可以成为借力单杠双力臂的拮抗动作,因为在执行借力单杠双力臂的过程中,人体通过做功升高身体质心(COM)的位置,而在执行杠铃高悬垂位实力抓举的过程中,人体通过做功升高杠铃的位置。因此,执行借力单杠双力臂和杠铃高悬垂位实力抓举动作的过程中,单杠和杠铃相对于人体的运动轨迹相反——借力单杠双力臂动作过程中,单杠相对于人体从过顶位转换到髋部,而在杠铃高悬垂位实力抓举动作中,杠铃杆从髋部(即预蹲位)转换到过顶位<sup>[10-11]</sup>。基于这一发现,本研究假设杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双力臂动作存在拮抗关系,旨在通过运动生物力学分析和机器学习算法,探索、分析并量化两种

动作之间的拮抗关系。



(1)借力单杠双力臂；(2)杠铃高悬垂位实力抓举

图1 借力单杠双力臂和杠铃高悬垂位实力抓举动作

## 1 研究方法

### 1.1 研究设计和受测者招募

招募 10 名综合体能训练爱好者作为受测者,招募期为 2 周,受测者系自愿报名,纳入标准为:(1)年龄 18~25 岁,性别不限;(2)半年内无运动损伤史和临床高强度运动禁忌;(3)已熟练掌握借力单杠双力臂和杠铃实力抓举动作;(4)借力单杠双力臂连续完成最大次数不低于 5 次;(5)杠铃实力抓举 1 次可重复最大重量(1RM)不低于 60 kg。

受测者排除标准为:(1)年龄不符合纳入标准;(2)半年内有运动损伤史或高强度运动禁忌;(3)测试前 48 h 存在饮酒、熬夜等容易诱发运动中不良事件的风险因素;(4)存在焦虑、躁郁、抑郁等心理健康问题。

受测者报名后须填写相关登记表以记录其基础信息。受测者签署知情同意后,在研究人员的协助下进行借力单杠双力臂连续完成最大次数和杠铃实力抓举 1RM 测试。

最终,共有 12 名综合体能训练爱好者报名参与测试,最终 8 名符合要求的男性受测者参与测试,年龄( $21.2 \pm 1.2$ )岁,身高( $175.6 \pm 2.2$ )cm,体重( $70.3 \pm 6.6$ )kg,借力单杠双力臂连续完成最大次数( $7.2 \pm 3.2$ )次,杠铃实力抓举 1RM 为( $65.2 \pm 5.2$ )kg。

### 1.2 整体测试

所有受测者均被详细告知测试方案,并签署知情同意书,测试方案由宁波大学体育学院伦理委员会审查批准(编号:20240058)。

整体测试流程包含 6 个测试日,每 2 个测试日之间安排 2 日休息。每个测试日中,受测者须完成 5 组、每组 3 次的测试动作,每个测试日只进行 1 种动作的测试。测试动作顺序为:(1)借力单杠双力臂(采用国际

体操联合会标准,杠高 255 cm,杠长 240 cm,直径 2.8 cm);(2) 20 kg 杠铃高悬垂位实力抓举;(3) 30 kg 杠铃高悬垂位实力抓举;(4) 40 kg 杠铃高悬垂位实力抓举;(5) 50 kg 杠铃高悬垂位实力抓举;(6) 60 kg 杠铃高悬垂位实力抓举。测试过程中允许受测者使用握力带、腰带以及其他运动护具,其中杠铃高悬垂位实力抓举的测试采用国际举重联合会规定的奥林匹克举重专用杠铃和杠铃片,受测者须穿着专业举重鞋在举重台上完成测试。

### 1.3 测试流程

测试流程包括热身、主测试、冷身和放松整理 4 个步骤。(1)热身:受测者在测试前先进行 5 min 的功率自行车骑行,之后进行 5 min 全身动态拉伸。其间测试人员利用 6~20 分 Borg 自觉疲劳量表控制受测者的自觉疲劳程度,热身强度保持在量表分 8~10 分的范围<sup>[12]</sup>。(2)主测试:受测者以自觉舒适的热身方案,进行 2~3 组热身。待受测者向测试人员表示可以进行正式测试后,进行 5 组、每组 3 次的测试,组间休息为 3 min。(3)冷身:受测者进行 5 min 的功率自行车骑行,强度以受测者感到舒适为准。(4)放松整理:受测者可自主选择 10 min 的放松整理内容,如拉伸、泡沫轴按压或筋膜枪放松等。

### 1.4 数据采集

采集受测者进行借力单杠双力臂和不同重量杠铃高悬垂位实力抓举时的运动生物力学数据。(1)运动学数据,包括借力单杠双力臂动作过程中的人体质心(COM)垂直方向上的位移和速度、杠铃高悬垂位实力抓举动作过程中杠铃垂直方向上的位移和速度,以及所有测试动作中人体肩关节内收/外展角度、肩关节内旋或外旋角度、肩关节屈曲或伸展角度、肘关节内旋

或外旋角度和肘关节屈曲或伸展角度。(2)动力学数据,包括每位受测者杠铃高悬垂位实力抓举的1RM,以及正式测试中的杠铃重量、受测者输出力量、输出功率和对外做功。

其中,人体关节运动学数据由Xsens惯性运动捕捉系统(Xsens Technologies公司,荷兰)采集<sup>[13-14]</sup>,人体COM的运动学数据、杠铃的运动学数据、受测者输出力量、输出功率和对外做功由Gymaware力量功率测试系统(Gymaware公司,澳大利亚)采集。

### 1.5 数据处理和分析

首先,利用Jamovi统计分析软件(版本2.3.17, <https://www.jamovi.org>),采用配对样本 $t$ 检验,以 $\alpha=0.05$ 为统计学显著性标准,比较受测者在执行不同重量的杠铃高悬垂位实力抓举过程的时间、杠铃位移、相对总做功,杠铃速度、相对输出功率、相对输出力量均值和峰值,执行借力单杠双力臂动作过程的时间、身体COM位移、相对总做功,身体COM速度、相对输出功率、相对输出力量均值和峰值之间的统计学差异。

同时,为了探究两个动作中人体COM和杠铃在上升过程中位置变化以及人体输出力量和功率在时间序列上的差异,本研究采用一维统计参数映射(SPM1D)算法中的独立样本 $t$ 检验,以 $\alpha=0.05$ 为统计学显著性标准,对比不同重量的杠铃高悬垂位实力抓举和借力单杠双力臂动作中,人体COM和杠铃在垂直方向上的运动学数据以及相应的输出功率和力量数据<sup>[15-16]</sup>。

SPM1D算法在处理复杂运动学数据方面具有显著优势。具体而言,SPM1D允许全面地分析运动过程中的整个时间序列,而不仅限于有限的离散时间点。该优势对于本研究至关重要,因为多关节复合动作涉及连续、复杂的身体运动,其中运动学参数在整个动作执行周期内持续变化,使用SPM1D能够揭示这些连续变化过程中的统计学差异,为动作之间可能存在的拮抗关系提供全面的视角,提高了统计分析的全面性和准确性。

根据本研究假设,两个动作若存在拮抗关系,其关节运动学数据的变化趋势应该呈现反向匹配的特征,即杠铃高悬垂位实力抓举动作中某关节在某个自由度上的运动学数据经首尾倒置后,与借力单杠双力臂动作中该关节在该自由度上的运动学数据变化趋势一致。此外,在运动科学研究中,即使是相同的动作,不同个体执行时的节奏和速度往往存在差异,直接比较这些时间序列可能会忽略掉这种非同步性带来的影响。在本研究中,绝对负荷的不同和受测者之间运动能力的个体差异会导致动作完成时间的差异,继而导致在相同的采样率下,不同受试者完成一次动作所产

生的数据量存在差异,难以直接进行横向对比。因此,结合以上两点,本研究以借力单杠双力臂动作中肩关节(3个自由度:屈曲或伸展、内收或外展、内旋或外旋)和肘关节(2个自由度:屈曲或伸展、内旋或外旋)位对照,采用动态时间规整(DTW)算法,和首尾转置前后杠铃高悬垂位实力抓举动作中对应关节的运动学数据分别进行时序特征对比,通过计算数据序列之间的DTW距离,探究两个动作中肩关节和肘关节在不同自由度上的拮抗关系<sup>[17]</sup>。

DTW算法通过寻找最佳路径来量化两个时间序列数据之间的差异。由于本研究所采集的时间序列上的运动学数据属于二维数据,故采用欧式距离作为距离度量,计算公式如公式(1):

$$D_{(i,j)} = |x_i - y_j| \quad (1)$$

其中, $D(i,j)$ 为数据序列 $x$ 的第 $i$ 个数据值与数据序列 $y$ 的第 $j$ 个数据值之间的欧式距离。在求解每一个 $D(i,j)$ 后,通过公式(2)和公式(3)计算累积距离矩阵 $C(i,j)$ ,最后根据累积的距离矩阵计算数据序列 $x$ 和数据序列 $y$ 之间的DTW距离,DTW距离越小,表示两个序列之间的相似性越高<sup>[17]</sup>。

$$C_{\min} = \min\{C_{(i-1,j)}, C_{(i,j-1)}, C_{(i-1,j-1)}\} \quad (2)$$

$$C(i,j) = D(i,j) + C_{\min} \quad (3)$$

根据以上,DTW算法可以解决由于个体之间动作执行速度差异导致的时间序列对齐问题,DTW算法通过动态调整时间序列,使得两个序列在时间轴上进行最佳匹配,从而使比较更加合理和准确。本研究通过DTW算法,可以确保在比较两个动作的相应关节运动学数据时,时间序列之间的相对位置和变化趋势得到正确对齐,增强了对关节运动学数据分析的时序精度和比较有效性。

本研究所使用的SPM1D和DTW算法程序的构建,均使用Visual Code Studio软件(版本1.65.1,Microsoft公司,美国),在Python语言环境下编写。

## 2 结果与分析

### 2.1 杠铃和身体质心运动学和动力学数据

使用不同重量的杠铃执行高悬垂位实力抓举动作和完成借力单杠双力臂动作时杠铃和身体COM的运动学和动力学数据(包括动作耗时、位移、速度、输出功率及相对力量的峰值和均值)的描述统计结果见表1。结果显示,杠铃高悬垂位实力抓举动作和借力单杠双力臂动作中杠铃和身体COM的运动学和动力学数据的统计学差异,会受到杠铃配重的影响。数据表明,

杠铃高悬垂位实力抓举的动作耗时与借力单杠双力臂无显著性差异( $P>0.05$ ), 但杠铃 COM 位移显著大于借力单杠双力臂过程中人体 COM 的位移( $P<0.001$ )。此外, 杠铃高悬垂位实力抓举过程中, 人体对杠铃输出的功率峰值以及人体对杠铃施加的相对力量, 与借力单杠双力臂相比无显著性差异( $P>0.05$ )。但是, 杠铃高悬垂位实力抓举过程中人体输出功率均值和总做功显著大于借力单杠双力臂( $P<0.001$ )。由于仅 20 kg 杠铃配重下, 杠铃高悬垂位实力抓举动作耗时显著少于借力单杠双力臂( $P<0.05$ ), 因此人体输出功率峰值无显著差异的原因可能是在类似的动作完成时间内, 杠铃高悬垂位实力抓举动作中杠铃 COM 位移显著大于借力单杠双力臂过程中人体 COM 的位移, 但杠铃配重低于训练者体重。此外, 以 40 kg 杠铃进行高悬垂位实力抓

举的动作拥有最高的速度峰值( $3.05 \pm 0.08$ )  $m \cdot s^{-1}$ 、最高的输出功率( $3\ 201.03 \pm 1\ 061.52$ )  $J \cdot s^{-1}$  以及最高的相对输出力量( $14.84 \pm 2.86$ )  $N \cdot kg^{-1}$ , 并且和借力单杠双力臂动作中的相应数据相比最为接近。

使用不同重量的杠铃执行高悬垂位实力抓举动作和完成借力单杠双力臂动作时杠铃和身体 COM 的运动学和动力学数据的一维统计参数映射(SPM1D)独立样本  $t$  检验的结果如图 2 和图 3 所示, 结果显示, 杠铃高悬垂位实力抓举动作过程中, 杠铃的速度以及身体对杠铃所输出的功率, 在一维时间序列上和借力单杠双力臂借力单杠双力臂动作过程中的相应数据无显著差异(仅 30 kg、40 kg 和 50 kg 的杠铃高悬垂位实力抓举动作过程中存在细微差异, 且差异阶段所占动作周期的百分比远小于 5%)。

表 1 借力单杠双力臂和不同重量杠铃高悬垂位实力抓举身体和杠铃质心的运动学和动力学描述统计 ( $\bar{x} \pm s$ )

指标	借力单杠双力臂	杠铃高悬垂位实力抓举				
	(70.3±6.6) kg	20 kg	30 kg	40 kg	50 kg	60 kg
动作耗时/s	1.42±0.04	0.85±0.01 <sup>1)</sup>	1.03±0.13	0.99±0.01	1.43±0.06	1.85±0.28
位移/m	1.13±0.02	1.36±0.03 <sup>2)</sup>	1.40±0.01 <sup>2)</sup>	1.39±0.04 <sup>2)</sup>	1.44±0.01 <sup>2)</sup>	1.41±0.01 <sup>2)</sup>
速度峰值/( $m \cdot s^{-1}$ )	3.40±0.16	3.00±0.12 <sup>1)</sup>	2.95±0.14 <sup>1)</sup>	3.05±0.08	2.96±0.05 <sup>1)</sup>	2.74±0.05 <sup>2)</sup>
速度均值/( $m \cdot s^{-1}$ )	0.89±0.02	1.62±0.05 <sup>2)</sup>	1.46±0.07 <sup>2)</sup>	1.42±0.07 <sup>2)</sup>	1.09±0.07	0.82±0.08
输出功率峰值/kw	2.77±1.63	2.69±2.76	2.46±1.20	3.20±1.06	2.46±0.45	2.28±7.85
输出功率均值/kw	0.70±0.02	1.28±0.05 <sup>2)</sup>	1.14±0.07 <sup>2)</sup>	1.12±0.07 <sup>2)</sup>	0.86±0.07	0.65±0.08
相对力量峰值/( $N \cdot kg^{-1}$ )	15.79±0.72	14.22±1.21	12.26±0.65	14.84±2.86	13.42±0.87	14.35±1.08
相对力量均值/( $N \cdot kg^{-1}$ )	9.73±0.04	9.68±0.01	9.66±0.04	9.67±0.09	9.77±0.01	9.73±0.07
总做功/kJ	0.89±0.02	1.07±0.03 <sup>2)</sup>	1.10±0.01 <sup>2)</sup>	1.09±0.04 <sup>2)</sup>	1.13±0.01 <sup>2)</sup>	1.12±0.01 <sup>2)</sup>

1)借力单杠双力臂动作相比,  $P<0.05$ ; 2)与借力单杠双力臂动作相比,  $P<0.001$

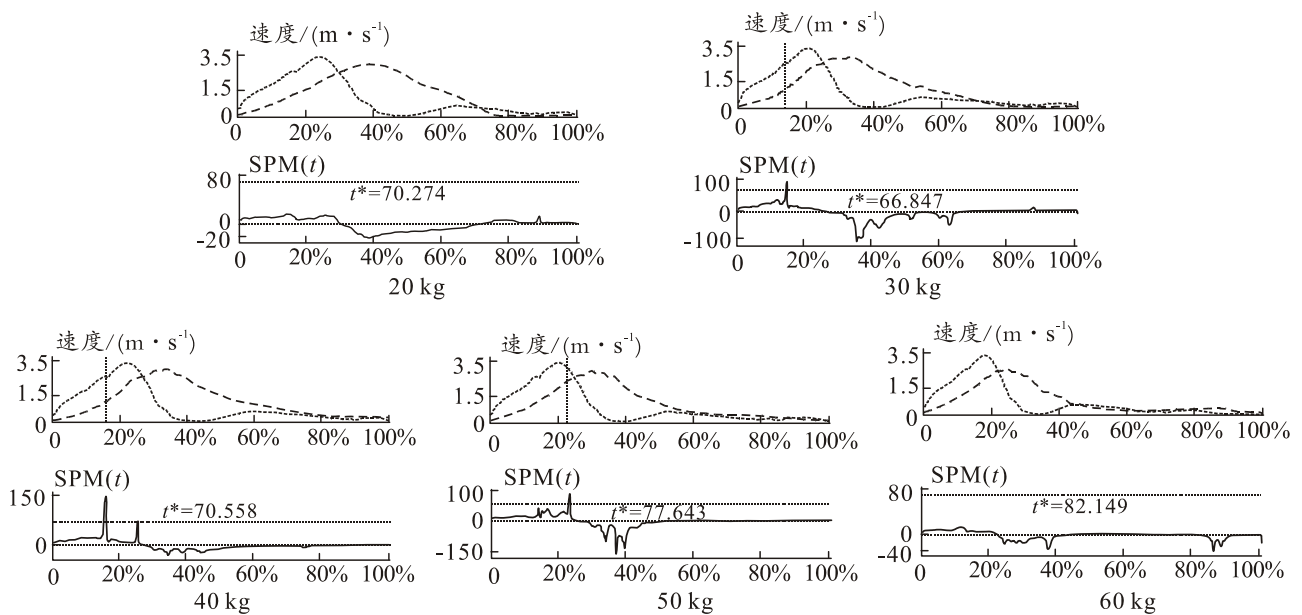


图 2 不同重量杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双力臂身体质心和杠铃速度 SPM1D 独立样本  $t$  检验结果

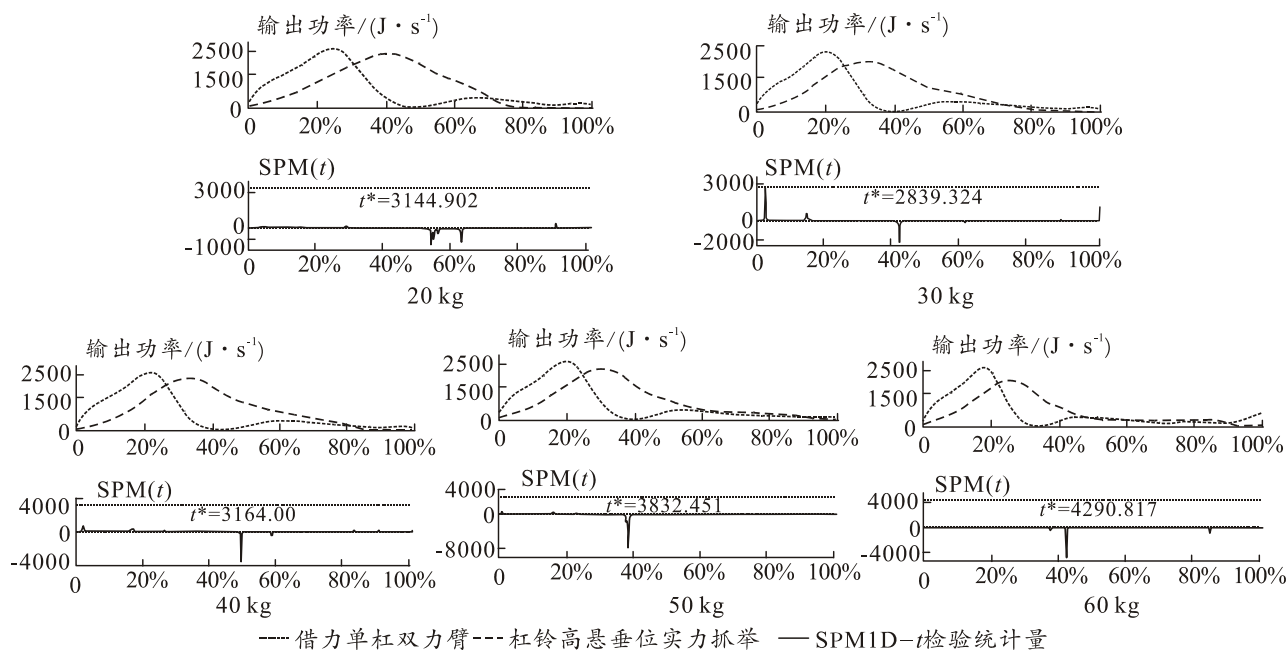


图 3 不同重量杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双力臂输出功率 SPM1D 独立样本  $t$  检验结果

### 2.2 关节运动学

使用不同重量的杠铃执行高悬垂位实力抓举动作和完成借力单杠双力臂动作时肩关节和肘关节运动学数据在整个动作周期内的描述统计如表 2 所示。结果表明, 肩关节活动范围方面, 单杠双力臂动作最高, 额状面( $26.53 \pm 3.59 \sim 122.25 \pm 0.94$ )°, 水平面( $-33.84 \pm 1.57 \sim 61.41 \pm 4.94$ )°, 矢状面( $-31.19 \pm 2.53 \sim 105.98 \pm 4.00$ )°; 而 60 kg 配重杠铃高悬垂位实力抓举动作高于其他配重, 额状面( $16.63 \pm 1.14 \sim 140.51 \pm 3.97$ )°, 水平面( $-12.26 \pm 0.87 \sim 44.26 \pm 1.60$ )°, 矢状面( $8.74 \pm 1.17 \sim 110.01 \pm 3.61$ )°。肘关节活动范围方面, 40 kg 配重杠铃高悬垂位实力抓举动作与单杠双力臂动作在水平面和整体运动范围上最为接近, 借力单杠双力臂, 水平面( $27.57 \pm 0.55 \sim 94.32 \pm 0.00$ )°, 矢状面( $12.12 \pm 3.62 \sim 78.60 \pm 5.85$ )°; 40 kg 杠铃高悬垂位实力抓举: 水平面( $32.40 \pm 1.35 \sim 110.79 \pm 8.17$ )°, 矢状面( $5.55 \pm 0.15 \sim 56.42 \pm 2.42$ )°。

使用不同重量的杠铃执行高悬垂位实力抓举动作和完成借力单杠双力臂动作时肩关节和肘关节运动学数据之间的 DTW 距离计算结果如表 3 所示。表 3 详细报告了通过动态时间规整(DTW)算法所计算的使用不同重量的杠铃执行高悬垂位实力抓举动作和完成借力单杠双力臂动作时, 肩关节和肘关节运动学的 DTW 距离。结果表明, 30 kg 杠铃高悬垂位实力抓举动作过程中, 肩关节外展内收(转置前 1 213.35, 转置后 624.21)、肩关节内旋外旋(转置前 2 991.57, 转置后 663.10)、肩关节屈曲伸展(转置前 4 558.73, 转置后 1 278.94), 以及肘关节内旋外旋(转置前 3 760.13, 转置后 1 801.99)和屈曲伸展(转置前 766.41, 转置后 525.11)的运动学数据经过首尾转置后, 和借力单杠双力臂动作中对应关节在该自由度上运动学数据的 DTW 距离大幅减小(减小 8396.85, 减小幅度 63.18%)。

表 2 借力单杠双力臂和不同重量杠铃高悬垂位实力抓举肩关节和肘关节运动学描述统计<sup>1)</sup>( $\bar{x} \pm s$ ) (°)

指标		杠铃高悬垂位实力抓举					
		借力单杠双力臂 (70.3±6.6) kg	20 kg	30 kg	40 kg	50 kg	60 kg
肩关节 外展(+)/内收(-)	最小值	26.53±3.59	19.04±0.66	17.56±0.07	17.02±1.01	15.84±0.64	16.63±1.14
	最大值	122.25±0.94	123.96±1.95	125.46±1.32	133.51±1.84	135.23±3.10	140.51±3.97
肩关节 外旋(+)/内旋(-)	最小值	-33.84±1.57	-4.25±1.14	-4.41±1.01	-5.95±1.71	-7.77±1.57	-12.26±0.87
	最大值	61.41±4.94	43.28±4.85	43.19±1.59	36.05±3.76	47.53±2.44	44.26±1.60
肩关节 屈曲(+)/伸展(-)	最小值	-31.19±2.53	9.79±0.33	7.67±3.30	7.17±0.41	4.06±1.35	8.74±1.17
	最大值	105.98±4.00	86.35±7.14	76.63±4.02	80.38±0.78	90.83±1.28	110.01±3.61
肘关节 内旋(+)/外旋(-)	最小值	27.57±0.55	29.13±1.36	31.61±1.59	32.40±1.35	34.58±1.92	37.80±0.42
	最大值	94.32±0.00	138.42±2.50	134.84±0.35	110.79±8.17	126.92±1.26	119.45±1.01
肘关节 屈曲(+)/伸展(-)	最小值	12.12±3.62	6.22±0.43	5.27±0.34	5.55±0.15	5.45±0.32	4.60±1.19
	最大值	78.60±5.85	66.58±2.54	61.00±1.84	56.42±2.42	60.18±3.27	69.43±2.31

1)以解剖位为 0°

表 3 不同重量杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双臂肩关节和肘关节运动学 DTW 距离

负荷	关节	动作	转置前 DTW 距离	转置后 DTW 距离	DTW 距离和差值	DTW 距离和减小百分比
20 kg	肩关节	内收外展	1 209.06	920.85	10 684.14	60.17%
		内旋外旋	3 972.24	923.73		
		屈曲伸展	6 427.13	1 077.65		
	肘关节	内旋外旋	5 116.64	1 858.54		
		屈曲伸展	1 031.68	2 291.84		
		内收外展	1 213.35	624.21		
30kg	肩关节	内旋外旋	2 991.57	663.10	8 396.85	63.18%
		屈曲伸展	4 558.73	1 278.94		
		内旋外旋	3 760.13	1 801.99		
	肘关节	屈曲伸展	766.41	525.11		
		内收外展	1 003.24	588.67		
		内旋外旋	3 539.43	1 163.13		
40 kg	肩关节	屈曲伸展	5 795.93	1 284.22	9 040.69	58.70%
		内旋外旋	4 280.21	1 034.15		
		屈曲伸展	783.20	2 291.14		
	肘关节	内收外展	1 339.00	447.32		
		内旋外旋	2 922.41	779.45		
		屈曲伸展	4 317.30	2 096.04		
50 kg	肩关节	内旋外旋	3 614.38	3 864.23	5 716.80	43.69%
		屈曲伸展	891.29	180.54		
		内收外展	1 398.22	453.05		
	肘关节	内旋外旋	2 945.86	844.23		
		屈曲伸展	4 317.65	2 934.54		
		内旋外旋	3 005.75	2 944.34		
60 kg	肩关节	屈曲伸展	927.69	150.98	5 268.04	41.83%
		内旋外旋	2 945.86	844.23		
		内收外展	1 398.22	453.05		
	肘关节	内旋外旋	3 005.75	2 944.34		
		屈曲伸展	4 317.65	2 934.54		
		内收外展	1 398.22	453.05		

### 3 讨论

本研究通过运动生物力学分析和机器学习算法,探索、分析并量化了不同重量杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双臂动作之间的拮抗关系。

本研究发现,杠铃高悬垂位实力抓举与借力单杠双臂动作,在上肢主要关节的部分自由度上存在一定的拮抗关系,分别为肩关节外展内收、肩关节内旋外旋、肩关节屈曲伸展以及肘关节内旋外旋。其中,肩关节作为人体最复杂的关节之一,通过联合肩锁关节、胸锁关节、肩胛胸廓关节以及盂肱关节的运动,实现 3 个自由度上复杂活动,其联合肘关节的内旋外旋和屈伸,贡献了人体上肢大动作的重要成分<sup>[18-19]</sup>。肩关节和肘关节运动学上的拮抗关系,反映了相关肌肉在执行力量输出和运动控制时的复杂协调。单杠双臂动作的“压肩”阶段,肩关节快速伸展,肱三头肌长头收缩发力,肱二头肌(肘关节屈肌)储存弹性势能,在后续的屈肘“上拉”阶段产生更大的力量,实现身体 COM 的快速上升。类似地,在杠铃高悬垂位实力抓举动作的“提铃”阶段,肩关节快速外展、屈

曲和外旋,同时肘关节快速屈曲,肱三头肌(肘关节伸展肌群)在该过程中储存弹性势能,在后续的推举支撑阶段产生更大的力量。这种拮抗关系的存在,从根本上反映了肌肉群在执行复杂动作时的动态平衡和力量分配,确保了关节稳定性和运动效率<sup>[20-22]</sup>。因此,单杠双臂和杠铃高悬垂位实力抓举动作在肩关节和肘关节上所存在的拮抗关系,在运动生物力学和运动解剖学视角下是合理的。

本研究发现,动力学方面,针对单杠双臂动作,40 kg 杠铃(约 61.5% 1RM)高悬垂位实力抓举与其的拮抗关系最显著。40 kg 杠铃高悬垂位实力抓举动作不仅拥有最高的速度峰值、最高的输出功率峰值以及最高的相对输出力量,并且和借力单杠双臂动作中的相应数据相比,在数值上最为接近。此外,虽然不同重量的杠铃高悬垂位实力抓举的输出功率峰值与单杠双臂动作相比均无显著性差异( $P>0.05$ ),但是 40 kg 杠铃高悬垂位实力抓举的输出爆发力峰值和相对力量峰值是最高的,考虑到研究中不同重量的杠铃高悬垂位实力抓举的相对力量均低于单杠双臂,可以认为 40 kg

杠铃高悬垂位实力抓举过程中人体对杠铃所输出的相对力量与单杠双力臂动作最接近。该发现符合力量训练中的力-速度关系,即在一定范围内,随着负荷的增加,最大功率输出在某一点达到峰值<sup>[23]</sup>。对于杠铃高悬垂位实力抓举动作,40 kg的负荷为运动者提供了足够的阻力来增强肌肉力量和爆发力,同时保持较高的运动速度,这对于提升运动表现至关重要。这一点通过生物力学的分析得到了支持,因为最高的功率输出表明了肌肉在该负荷下的最优力量-速度组合,从而促进力量和爆发力的提升<sup>[24-25]</sup>。该结果意味着,如果训练目的是提升力量或爆发力(功率)运动表现,那么使用40 kg杠铃高悬垂位实力抓举作为单杠双力臂动作的拮抗训练内容较为合适。

本研究DTW数据表明,关节运动学方面,20 kg和30 kg杠铃(约30.8%和46.2%1RM)的杠铃高悬垂位实力抓举动作与单杠双力臂动作的拮抗关系最显著,该结果意味着,若以练习动作或预防损伤为训练目的,可以用更轻的杠铃高悬垂位实力抓举作为单杠双力臂动作的拮抗训练内容。在较轻的负荷下,关节能够以更接近自然运动模式的方式运动,这有助于提升关节的稳定性和肌肉的协调性,从而有效预防损伤<sup>[26-27]</sup>。据此,本研究认为,对于多关节复合动作,拮抗训练动作的强度或负荷并非越大越好(与其他重量相比,接近1RM重量的杠铃高悬垂位实力抓举并无明显优势),过大的负荷可能不利于保持高效和正确的运动模式,导致训练效果的降低或增加受伤风险<sup>[28]</sup>。在实际训练中,选择适宜的负荷对于优化训练效果和保障训练安全至关重要,这要求对运动者的个体差异和具体训练目标进行综合考虑<sup>[29]</sup>。

本研究发现,尽管单杠双力臂动作难度较高,但20~40 kg的杠铃高悬垂位实力抓举相对容易执行。这意味着,在身体疲劳累积或因伤病、疼痛导致相关关节受限,无法完成复杂或难度较大的训练动作时,选择难度较低的拮抗训练动作可以作为一种策略,既能获得训练收益,又能降低受伤风险<sup>[30-32]</sup>。这一策略与运动训练中“降阶”方法的思路一致,其合理性在于,它允许运动者在保持训练连贯性的同时,适应身体的当前状态,避免过度训练和潜在的损伤<sup>[33-34]</sup>。

综上,杠铃高悬垂位实力抓举动作与借力单杠双力臂动作存在拮抗关系,可用其来优化借力单杠双力臂动作的训练效果。但是,在实际训练中,应根据训练的目标和训练者当下的能力调整杠铃配重:当以提升上肢爆发力为训练目标时,可使用约60%1RM的负荷作为杠铃配重来配合借力单杠双力臂训练,而当以提升借力单杠双力臂动作技巧为训练目标时,则可用

低于60%1RM的负荷作为杠铃配重。

## 参考文献:

- [1] UUSI-RASI K, KARINKANTA S, KANNUS P, et al. Does long-term recreational gymnastics prevent injurious falls in older women? A prospective 20-year follow-up [J]. *BMC Geriatrics*, 2020, 20(1): 37-46.
- [2] LAAKSO L A, SCHUSTER J G. Dynamic correspondence of the hang power clean to skating starts in men's ice hockey[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2021, 43(4): 1-8.
- [3] WALKER C W, BRUENGER A J, TUCKER W S, et al. Comparison of muscle activity during a ring muscle up and a bar muscle up[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2023, 16(1): 1451-60.
- [4] SHI Z, SUN D. Conflict between weightlifting and health? The importance of injury prevention and technology assistance[J]. *Physical Activity and Health*, 2022(1): 1-4.
- [5] 杨紫暄. 拮抗肌训练与高强度间歇训练对高中男子赛艇运动员竞赛成绩的影响研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2021.
- [6] 金成平, 李少丹, 夏青. 论运动训练理论科学问题的认知[J]. *体育学刊*, 2016, 23(6): 116-121.
- [7] 廖丽萍. 肩内旋拮抗肌群等速离心训练对肌力均衡性和挥臂速度的影响[D]. 北京: 北京体育大学, 2016.
- [8] FINK J, SCHOENFELD B J, SAKAMAKI-SUNAGA M, et al. Physiological responses to agonist-antagonist superset resistance training[J]. *Journal of Science in Sport and Exercise*, 2021, 3(4): 355-63.
- [9] MORRIS M E, SUMMERS J J, MATYAS T A, et al. Current status of the motor program[J]. *Physical Therapy*, 1994, 74(8): 738-48.
- [10] 杨雪. 跑酷练习手段对高校攀岩运动员专项身体素质及攀爬技术影响的实验研究[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2022.
- [11] 但林飞, 李建设, 石智勇, 等. 精英举重运动员级别调整的关键技术特征变化研究: 以石智勇69、73 kg级抓举为例[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(7): 24-32
- [12] BORG E, BORG G, LARSSON K, et al. An index for breathlessness and leg fatigue[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2010, 20(4): 644-50.
- [13] WEAKLEY J, CHALKLEY D, JOHNSTON R, et al. Criterion validity, and interunit and between-day reliability of the FLEX for measuring barbell velocity during commonly



- used resistance training exercises[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2020, 34(6): 1519-1524.
- [14] ORANGE S T, METCALFE J W, MARSHALL P, et al. Test-retest reliability of a commercial linear position transducer (GymAware PowerTool) to measure velocity and power in the back squat and bench press[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2020, 34(3): 728-737.
- [15] PATAKY T C. One-dimensional statistical parametric mapping in Python[J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2012, 15(3): 295-301.
- [16] 梅齐昌, 相亮亮, 李建设, 等. 基于一维统计参数映射分析跑者跑步地面反作用力差异[J]. *医用生物力学*, 2021(5): 684-691.
- [17] WANG S. Pattern-matching kinematic analysis of glide phase after start with different techniques in medley swimming: An Olympic champion case[J]. *Physical Activity and Health*, 2022, 6(1): 246-256.
- [18] 黄逸飞, 朱俊俊, 董双鹏, 等. 肩关节典型运动分析[J]. *医用生物力学*, 2023(6): 1254-1259.
- [19] 傅夏威, 汪滋民. 肩袖修补的生物力学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2023(2): 396-401.
- [20] 张锋, 田浩楠, 周越, 等. 同期力量和耐力训练的神经肌肉和分子生物学适应研究进展[J]. *中国运动医学杂志*, 2023(4): 318-327.
- [21] ALESSANDRO C, BARROSO F O, PRASHARA A, et al. Coordination amongst quadriceps muscles suggests neural regulation of internal joint stresses, not simplification of task performance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(14): 8135-8142.
- [22] 闫慧云, 邓云锋, 杨威, 等. OpenSim 对跳跃动作上下肢肌肉协调性的仿真分析[J]. *机械科学与技术*, 2023(4): 573-579.
- [23] COMFORT P, JONES P, A. THOMAS C, et al. Changes in early and maximal isometric force production in response to moderate-and high-load strength and power training [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2022(3): 593-599.
- [24] 廖开放, 高崇, 杨威, 等. 基于速度的力量训练: 应用基础与训练效果[J]. *上海体育学院学报*, 2021, 45(11): 90-104.
- [25] GARC í A-RAMOS A, SUZOVIC D, P é REZ-CASTILLA A. The load-velocity profiles of three upper-body pushing exercises in men and women[J]. *Sports Biomechanics*, 2021, 20(6): 693-705-87.
- [26] CARTIER T, RAO G, VIEHWEGER E, et al. Evolution of muscle coordination and mechanical output throughout four weeks of arm cranking submaximal training[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2023(3): 541-551.
- [27] JEPPE BO L, THOR EINARA, LARS BO A. Strength training as superior, dose-dependent and safe prevention of acute and overuse sports injuries: A systematic review, qualitative analysis and meta-analysis[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2018, 52(24): 1557-1563.
- [28] SURAKKA J, ALANEN E, AUNOLA S, et al. Effects of external light loading in power-type strength training on muscle power of the lower extremities in middle-aged subjects[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2006, 27(6): 448-455.
- [29] 邱俊强, 路明月, 张君, 等. 运动促进健康: 个性化精准解决方案[J]. *北京体育大学学报*, 2022, 45(10): 2-18.
- [30] 胡平安. 疫情防控背景下智力障碍学生网络体育课程的设计、实施与管理研究[C]//第十二届全国体育科学大会论文摘要汇编——墙报交流(学校体育分会). 北京: 中国体育科学学会, 2022: 679-680.
- [31] TEIXEIRA J E, FORTE P, FERRAZ R, et al. Monitoring accumulated training and match load in football: A systematic review[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(8): 3906-3953.
- [32] WANG X, MA S, ZHANG Y. Modelling and simulation analysis of training effect and electromyogram change of track and field athletes based on biomechanics[J]. *International Journal of Nanotechnology*, 2022(6-11): 1058-1074.
- [33] 姜宏斌. 功能性训练概念辨析与理论架构的研究述评[J]. *体育学刊*, 2015, 22(4): 125-131.
- [34] G. 格雷戈里·哈夫, N. 特拉. NSCA-CSCS 美国国家体能协会体能教练认证指南[M]. 王雄, 闫琪, 周爱国等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2021: 14, 804.