

## 膝关节水中屈伸运动时的生物力学特征分析

杨林

(郑州大学 体育系, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为观察目前普遍使用的膝关节水下康复训练法过程中下肢肌肉功能以及膝关节运动学特点, 以体育院校的 20 名健康大学生为研究对象(女 10 名、男 10 名), 采用表面肌电仪记录受试者分别进行单次膝关节最大屈伸运动和连续多次重复性屈伸运动时股四头肌(股内侧肌、股外侧肌)和腓绳肌(股二头肌、半腱肌)的肌电信号, 同时采用常速摄像机在水下记录膝关节运动(拍摄频率 25 Hz)。结果表明在膝关节进行连续重复性屈伸运动时, 在运动初始阶段拮抗肌的肌电活动低于主动肌, 随后拮抗肌活动逐渐升高直到最大。而在膝关节单次屈伸运动中, 主动肌的肌电活动在膝关节产生运动前激活达到最大, 并且在整个运动范围内单次屈伸运动时拮抗肌肌电活动都比连续重复性屈伸运动时低, 但是在运动范围的后期单次运动时主动肌的肌电活动水平要高于重复运动时。在两种康复训练模式下, 膝关节角速度曲线模式以及峰值角速度值都相似。结果说明: 水下单次屈伸运动有利于锻炼主动肌, 在重复性连续多次屈伸膝关节时, 主动肌活动逐渐减弱, 拮抗肌增强, 这种训练模式有利于前交叉韧带损伤病人的康复。

**关 键 词:** 运动生物力学; 膝关节屈伸运动; 水下; 表面肌电

中图分类号: G804.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2013)04-0134-06

### An analysis of the biomechanical characteristics of knee joints when they are doing flexion and extension underwater

YANG Lin

(Department of Physical Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to observe the functions of lower limb muscles and the kinematic characteristics of knee joints during underwater knee joint rehabilitation training universally used nowadays, the author selected 20 healthy college students (10 female students and 10 male students) as his research subjects from a physical education institute, recorded the electromyographic signals of the quadriceps femoris muscles (vastus medialis muscle, vastus lateralis muscle) and hamstring muscles (biceps femoris muscle, semitendinosus muscle) of the testees by using a surface electromyography when the testees were doing one time maximum knee joint flexion and extension and continuously repeated multi-times knee joint flexion and extension respectively, and recorded knee joint movement underwater (at a shooting frequency of 25 Hz) by using constant speed cameras. The author revealed the following findings: when knee joints were doing continuously repeated flexion and extension, at the initial stage of movement, the myoelectric activity of antagonistic muscles was lower than that of agonistic muscles, later, the activity of antagonistic muscles gradually increased to the maximum; while during one time knee joint flexion and extension, the myoelectric activity of agonistic muscles was activated to the maximum before knee joints moved, and in the entire range of movement, the myoelectric activity of antagonistic muscles was lower than that produced during continuously repeated flexion and extension, but in the late period of movement, the level of myoelectric activity of agonistic muscles produced during one time movement was higher than that produced during repeated movement; under the two rehabilitation training modes, the angular speed mode and peak angular speed of knee joints were similar. The said findings indicate the followings: one time underwater flexion and extension is conducive to the exercising

of agonistic muscles; when doing continuously repeated multi-times knee joint flexion and extension, the activity of agonistic muscles gradually weakens, antagonistic muscles are enhanced; such a training mode is conducive to the rehabilitation of patients having an injured anterior cruciate ligament.

**Key words:** sports biomechanics; knee joint flexion and extension; underwater; surface myoelectricity

水中训练法已经被广泛地应用在神经肌肉康复中,因为水的浮力作用可以减少肢体自身的重力作用对身体关节造成的影响<sup>[1]</sup>。从生物力学的角度来说,可以为骨骼肌机能紊乱的患者提供水中康复训练的方案。尽管有一些学者已经使用水下训练方法研究了不同游泳技术风格时的水流动力学、肌肉功能<sup>[2]</sup>、运动学特征<sup>[3]</sup>,但是很少有文献报道使用该研究方法来研究水中康复训练时肌肉功能变化。Kaneda 等<sup>[4]</sup>和 Masumoto 等<sup>[5]</sup>研究了受试者在深水中行走时下肢的表面肌电特征。Fujisawa 等<sup>[6]</sup>和 Kelly 等<sup>[7]</sup>研究了正常健康受试者在水下运动和陆地运动时肩关节肌肉进行等长收缩和动力性收缩时肌肉的电活动情况,他们发现同一动作在水下运动时的肌电活动强度要低于陆地上。同样 Poyhonen 等<sup>[8]</sup>在研究股四头肌进行最大等长收缩和次最大等长收缩时也发现了类似的结果。而我国关于水下康复治疗研究主要集中在对脑卒中偏瘫患者肢体运动功能恢复和水中运动健身效果研究上<sup>[9-10]</sup>。

根据水流动力学原理,在水中运动的肢体会受到阻力和浮力的作用,阻力与肢体运动方向相反,这个阻力主要是由于肢体前面的涡流产生的,称为涡流阻力。而且水中阻力与肢体运动速度之间呈非线性关系,与速度的平方呈反比关系。浮力总是与物体的运动速度方向垂直,当肢体在水中向下快速运动时,产生的阻力会变大<sup>[11-12]</sup>。身体可以在静水中运动也可以在流动水流中运动,为了产生向前的动力,身体需要努力地相反方向划水<sup>[13]</sup>。在水中康复时,重复多次的运动过程中由于水流的运动会使肢体运动变得容易或者受阻,最近的研究表明当运动肢体与水流方向相反时会产生额外的阻力<sup>[14]</sup>,在肢体运动范围开始阶段由于肢体的运动会增加肢体阻力水的质量,进而需要克服较大的阻力,而在运动范围的结束阶段由于肢体周围的水继续流动,因而会帮助肢体继续运动。

为了观察不同水流条件和不同运动模式对神经肌肉功能的影响,本研究以健康的男性和女性为研究对象,观察其膝关节在水中进行单次屈伸运动和多次重复屈伸运动下股内侧肌、股外侧肌、股二头肌、半腱肌的肌电活动以及膝关节的运动学特征。从水力学角度来说,单次膝关节屈伸运动的启动相当于在静水中运动,而多次重复膝关节屈伸运动相当于在流动水流中运动。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究以 20 名健康的大学生为研究对象,其中男 10 名,身高( $175.8 \pm 2.3$ ) cm,体重( $68.6 \pm 7.1$ ) kg,年龄( $21.3 \pm 0.6$ )岁。女 10 名,身高( $164.2 \pm 3.8$ ) cm,体重( $56.3 \pm 5.3$ ) kg,年龄( $20.7 \pm 2.1$ )岁。受试者下肢没有肌肉损伤病症。

### 1.2 研究方法

#### 1) 实验仪器与材料。

ME6000 表面肌电仪、防水套件、防水电极采用厂家推荐的 Ambu R-00-S 电极、Sony 常速摄像机 1 台、自制不锈钢坐椅 1 把、胶布。

#### 2) 实验设计。

在正式实验前,让受试者熟悉实验过程,包括令受试者在陆地上进行肌肉最大等长收缩,在水中进行最大随意动力性收缩。开始正式实验,选取受试者的左腿进行测试,记录左腿的股外侧肌、股内侧肌、股二头肌和半腱肌表面肌电信号。首先在陆地上进行各块肌肉的最大等长收缩测试,记录到的肌电数据主要用于肌电信号标准化处理,受试者坐在测力器上,髋关节  $90^\circ$ 、膝关节  $90^\circ$ ;令受试者进行膝关节伸肌(股内侧肌和股外侧肌)的最大等长收缩,共测试 3 次,每次持续 3 s,每次之间休息 1 min;做完伸肌后休息 5 min 测试屈肌最大收缩,受试者换为俯卧位,用同样的方法测量股二头肌和半腱肌的最大等长收缩值。陆上等长收缩测量完成后,休息 15 min 后进行水下测试,水温为  $30^\circ\text{C}$ ,测量在游泳池边完成,将普通钢制椅固定在游泳池边,椅子浸在水面以下,受试者坐在椅子上时胸部以下浸在水中,用固定带将受试者的髋关节和大腿固定防止产生额外运动,髋关节  $90^\circ$ ,每名受试者调整前后位置使得膝关节中心点与椅子沿的距离为 3 cm,这样当小腿屈曲到与椅子沿接触时基本保证右腿膝关节运动范围  $0^\circ \sim 120^\circ$ ,膝关节完全伸直时膝关节屈曲角度为  $0^\circ$ ,而当下肢小腿与椅子沿接触时为屈曲  $120^\circ$ ,受试者的动作从膝关节屈曲  $120^\circ$  位置开始,然后进行膝关节伸展运动,完成伸展运动后再进行屈膝运动。受试者熟悉水下环境后开始进行运动,首先进行 4~6 次的次最大随意动力性收缩的热身活动,然后受试者进行 2 次单一的膝关节屈伸运动,尽最大努力进行对抗静水阻力,膝关节做屈曲动作之

后等待水面平静后再做伸膝动作。单一屈伸运动后休息 15 min, 进行连续重复多次屈伸实验, 尽最大努力完成 6~8 次连续的屈伸运动。此处的单一屈伸运动的关键指的是一次膝关节屈曲完成后, 等待一段时间后水流平稳再进行膝关节的伸展运动; 而连续重复多次屈伸运动中, 动作关键是膝关节一次尽力伸展后随即进行屈曲运动。

### 3) 数据采集。

实验前将 Ambu R-00-S 表面电极贴在受试者待测肌肉的肌腹处, 同时用胶布把电极加固, 两个记录电极的距离为 2 cm, 参考电极置于附近的骨性突起处, 4 个参考电极位置分别为股骨内外侧髌和胫骨内外侧髌, 电极线使用防水、透明的胶带和薄膜包裹与水相隔, 采用遥测测量方式。

为了获得运动下肢的运动学参数, 将一台 Sony 摄像机置于专门拍摄运动员水下技术的游泳池观测窗内, 摄像机拍摄频率为 25 Hz, 调节摄像机的主光轴使其与膝关节运动平面垂直, 保证膝关节的运动过程能够全部被收录进去, 摄像机距离受试者 2.5 m。将拍摄到动作范围图像进行数字解析, 获取受试者膝关节运动过程中的角速度、加速度指标进行分析。

摄像与肌电的同步化过程通过仪器自身的内触发同步功能来完成, 肌电采样频率 1 000 Hz, 摄像采样频率 25 Hz。因此, 在膝关节的运动范围内能够找到对应的肌电活动。

### 4) 数据处理。

在陆地上进行最大等长收缩期间, 以峰值力出现为中心点, 其左右 1 000 ms 为窗口, 对表面肌电信号求平均值, 将其作为肌电标准化处理的基准值。在水中测量的肌电信号进行全波整流, 然后进行肌电平均化(Average sEMG, aEMG), 窗口长度为 20 ms, 也就是将每 0.02 s 内的肌电值取平均, 然后进行标准化处理, 即将这个肌电平均值与该块肌肉对应的最大肌电幅值相除, 最后将数据表示为 aEMG 的百分数。由于本次试验预观察膝关节水下运动时股前肌群和股后肌群肌电的总体变化情况, 所以在进行标准化处理后, 再将股内侧肌和股外侧肌的 aEMG 百分数取平均值, 以代表股前肌群的肌电情况, 将股二头肌和半腱肌的 aEMG 百分数取平均值代表股后肌群的肌电情况。在 6~8 次的连续多次重复实验中, 选择膝关节峰值角速度最大的一次作为进一步的分析。

由于将受试者膝关节的屈伸运动范围控制在  $120^{\circ}$ , 为了便于研究将其 10 等分, 即将膝关节的运动分为 10 个时相, 每个时相相当于经历了  $12^{\circ}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 膝关节单次屈伸运动时的肌电特征

图 1 为男女受试者膝关节单次水下屈伸运动时, 不同关节角度下对应的肌电特征(本文中所有图的实线为平均值, 虚线为所对应的 1 倍标准误)从图 1 中可以看出, 在膝关节产生运动前股前肌群和股后肌群就已经出现了峰值电位, 在膝关节产生运动前的 200 ms 内, 肌电就出现了峰值, 随后肌电幅值逐渐降低。膝关节屈曲和伸展动作时肌电模式相近, 无论是股前肌群还是股后肌群当作为拮抗肌时电活动都很低。

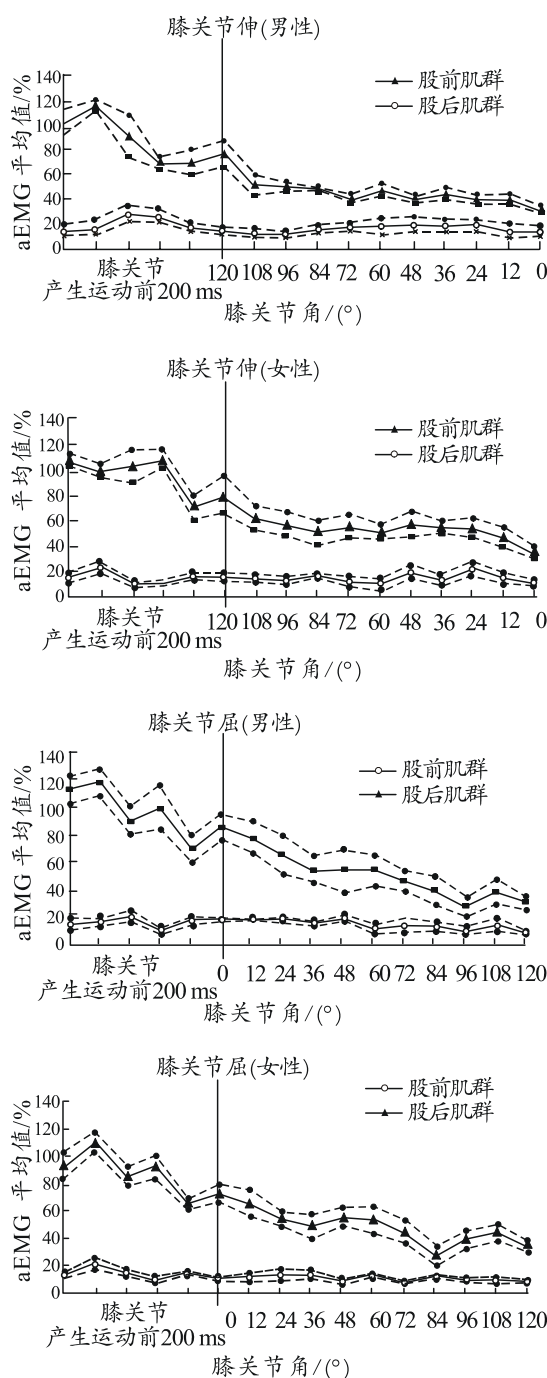


图 1 男女受试者膝关节单次水下屈伸时肌电特征

### 2.2 膝关节连续多次屈伸运动时的肌电特征

图 2 是受试者连续多次屈伸运动时，股前肌群和股后肌群的肌电活动随膝关节角度变化的关系图。本研究中以最初的膝关节屈曲 120° 为初始位，以完全伸直时为运动末，运动末膝关节屈曲角度为 0°。在膝关节伸的阶段，不管是男性还是女性的主动肌电活动最大值都出现在膝关节屈曲 120° 时，也就是伸展运动刚开始的时刻，然后随着膝关节逐渐伸展的进行，股前肌群的肌电幅值逐渐降低，对于男性受试者来说，这种肌电幅值下降现象一直持续到膝关节屈曲角度为 24°，而对于女性来说，一直持续到 36° 左右，之后肌电幅值维持不变。在膝关节伸展过程中，作为拮抗肌的股后肌群其电活动逐渐增加，对于男性受试者来说从膝关节处于屈曲位 120° 时就开始增加，一直持续到膝关节为屈曲角度为 24° 时。对于女性受试者来说从膝关节屈曲角度为 96° 时开始明显增加。股后肌群在伸展动作中，屈曲角度为 36° 以后的角度下男性受试者的肌电活动要高于女性，以及在屈曲动作的初始阶段，男性股后肌群电活动要高于女性受试者。

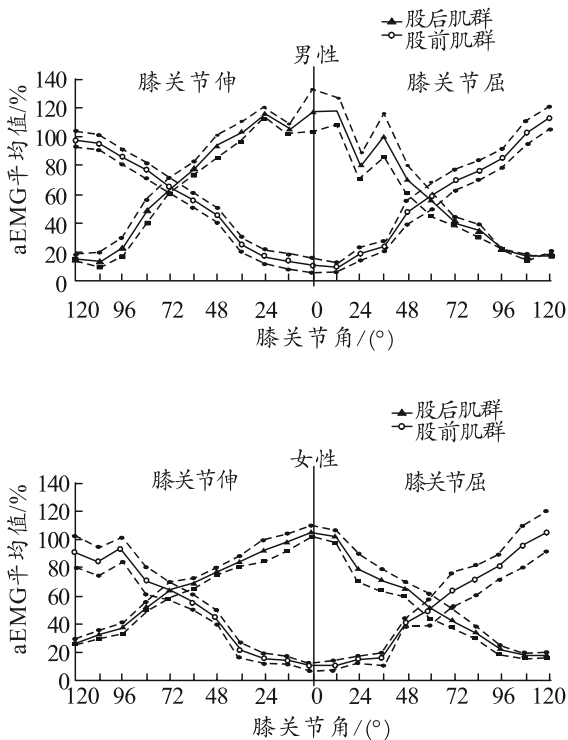


图 2 受试者膝关节水下连续屈伸运动时肌群肌电特征

在膝关节屈曲阶段，主动肌股前肌群肌电活动逐渐增加，直到膝关节运动末屈曲为 120° 时，达到最大。而作为拮抗肌的股后肌群电活动在膝关节完全伸直状态时最大，然后电活动逐渐降低，直到膝关节达到 96° 时降到最低。

### 2.3 膝关节水下单次和连续多次屈伸运动时膝关节速度特征

图 3 是受试者膝关节水下单次屈伸运动时角速度特征，从图 3 中可以看出，男女受试者的膝关节角速度无论在伸膝还是屈膝动作下都比较接近，在伸膝动作中男性受试者膝关节峰值角速度为(485.6 ± 55.3) (°) /s，峰值角速度出现的角度为 72°，女性受试者为(465.7 ± 62.1) (°) /s，对应的膝关节角度为 84° 时。而在屈膝动作中，男性受试者屈膝时的峰值角速度为(415.3 ± 43.7) (°) /s，对应膝关节角度为 84°，女性受试者峰值角速度为(381.4 ± 45.7) (°) /s，对应的膝关节角度为 96°。

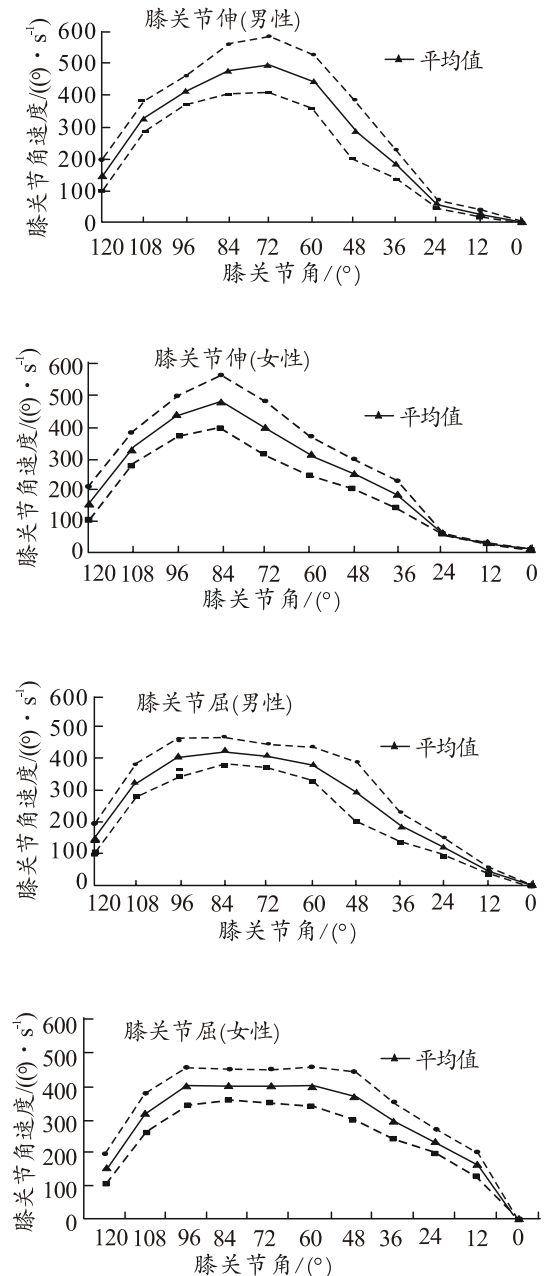


图 3 受试者膝关节水下单次屈伸运动时角速度特征

图 4 为受试者膝关节水下连续多次屈伸运动时角速度特征, 在伸膝阶段, 男性受试者峰值角速度为  $(495.3 \pm 92.2) ^\circ /s$ , 女性受试者峰值角速度为  $(435.2 \pm 58.3) ^\circ /s$ , 都出现在膝关节角为  $60^\circ$  时。在屈膝阶段, 男性受试者峰值角速度为  $(390.3 \pm 92.2) ^\circ /s$ , 女性受试者峰值角速度为  $(361.2 \pm 58.3) ^\circ /s$ , 都出现在膝关节角为  $84^\circ$  时。并且在膝关节屈曲动作时, 会有一个速度恒定期, 在  $60^\circ \sim 96^\circ$  之间。

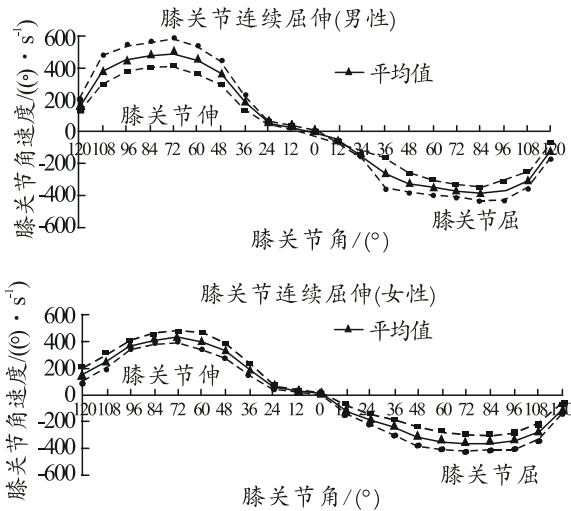


图 4 受试者膝关节水下连续多次屈伸运动时膝关节角速度特征

### 3 讨论

本研究的数据表明两种相对不同的水流状态对男性和女性受试者下肢膝关节的神经肌肉功能有特殊的效应。在连续多次的屈伸运动中, 两组受试者的主动肌都突然激活到最大, 然后激活程度逐渐下降, 而相对应的拮抗肌激活程度逐渐上升, 直到最大(见图 2)。相反, 在单次屈伸运动的整个运动范围内, 两组受试者拮抗肌的肌电活动一直处于较低水平(见图 1)。从运动学数据来看, 在两种运动方式下, 膝关节角速度变化的趋势是相近的(见图 3 和图 4)。

#### 3.1 肌电与水流动力学

在图 1 和图 2 中可以看出在两种不同运动方式下肌电模式的主要差别。在连续多次屈伸运动中, 主动肌肌电活动一开始最大然后逐渐减弱, 主要是由于在连续多次运动中会引起膝关节周围大量的水流速度增大, 这样增大的水流在运动方向上可以协助肢体的运动, 因而导致了主动肌肌电活动降低。而在运动范围的终末阶段, 为了突然制动改变运动方向需要克服水流的推动力, 拮抗肌需强烈收缩, 因此在多次连续收缩时的运动终末阶段拮抗肌的肌电活动达到最大。由图 2 中可以看出股前肌群和股后肌群分别作为拮抗肌时, 在离心收缩条件下, 表现出很高的肌电活动。

在膝关节单次屈伸运动中, 膝关节是纯粹的向心运动。在膝关节运动最后的  $20^\circ \sim 30^\circ$  时, 拮抗肌的肌电活动非常低, 这说明在运动范围终末仅需要最小的制动效应。在静水中对运动腿产生的阻力主要是由腿后面的涡流产生的阻力。另外, 由于水的黏滞性和高密度性, 使得水阻止下肢的运动。因此, 水团(water masses)加速运动被耽搁了, 也就不能像连续多次屈伸运动中那样在运动范围终末由于水团的加速运动而引起下肢运动速度的显著增大, 从而使拮抗肌不必产生更加强烈的电活动。膝关节在产生运动前, 主动肌就提前产生了较高水平的电活动, 这可能提示静水压通过作用于皮肤上的各种感受器使神经肌肉功能更加高效, 另外还有一种解释就是下肢为了加速运动, 需要克服水团的惯性以及浮力等作用力, 因此主动肌提前激活, 从而能获得最佳的加速效果。

相反, 在最大连续多次膝关节屈伸运动中, 肌肉离心收缩之后马上进入向心收缩状态, 就好比在牵张收缩循环中肌肉的工作情况一样<sup>[17]</sup>, 肌肉的收缩状态彼此之间存在着互相影响。与膝关节单次屈伸运动相比, 连续多次屈伸运动时可能会出现一些神经生理学效应。水下测量膝关节伸展时角速度最大值只有  $510 ^\circ /s$ 。因此, 在水下牵张收缩循环运动期间, 阻止角速度增大的神经抑制机制可能是导致主动肌电活动下降以及拮抗肌电活动增加的原因。

#### 3.2 运动学分析

单次屈伸运动与连续多次屈伸运动时, 膝关节峰值角速度以及角速度变化的模式相近。在膝关节水下屈伸运动中, 最大伸膝角速度为  $510 ^\circ /s$ , 超过了屈膝过程中的速度最大峰值  $430 ^\circ /s$ , 这可能是由于股前肌群的收缩力要比股后肌群强造成的。而且伸膝动作与屈膝动作相比(从  $90^\circ$  到  $0^\circ$  的过程中), 伸膝动作有浮力的协助, 所以也可能造成伸膝的角速度峰值要高于屈膝的角速度峰值。有学者报道在蛙泳蹬腿动作中膝关节角速度峰值可以达到  $850 ^\circ /s$ <sup>[3]</sup>。从本研究结果还能看出, 在屈膝动作过程中, 不管是单次还是连续多次的屈伸运动中的屈膝动作, 膝关节角速度在大部分时间内始终保持在一个恒定值, 关节角速度有一个稳定的平台期(见图 2 和图 4)。这可能说明了肌肉的收缩似乎是适应了变化的水流阻力, 可见膝关节在水中屈曲动作是一个等速运动过程, 等速运动对于肌肉损伤的康复过程大有益处。本研究发现男女受试者在屈膝运动过程中膝关节角速度没有差异, 其原因可能是尽管男性受试者的肌肉力量更强, 但是通常来说女性的下肢更短, 使得膝关节角速度提高, 而且男性下肢和足的面积更大从而使下肢受到的阻力更大, 使

得男女受试者膝关节角速度没有差异。

### 3.3 膝关节水下康复意义

本研究中, 膝关节水下连续多次最大力量的伸-屈运动中, 股四头肌(股前肌群)的活动水平逐渐下降, 同时伴随着腘绳肌(股后肌群)的活动水平逐渐提高, 这种训练模式是膝关节康复的典型训练模式。其中拮抗肌——腘绳肌积极活动可以维持膝关节的稳定性, 因此, 这种水中康复训练模式对于前交叉韧带手术的病人是有益处的, 这种训练模式可以避免膝关节伸展到  $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$  时承受较高负荷<sup>[8]</sup>, 因为有学者研究发现水中屈伸运动时可以降低关节的压缩力, 尤其是膝关节髌骨关节面的压力<sup>[9]</sup>。

本研究获得的生物力学数据表明水的流动属性改变了下肢膝关节屈伸运动过程中股前肌群和股后肌群的神经肌肉功能。水下单次屈伸运动有利于锻炼主动肌, 在重复性地连续多次屈伸膝关节运动时, 主动肌活动逐渐减弱、拮抗肌增强, 这种训练模式有利于前交叉韧带损伤病人的康复。

### 参考文献:

- [1] Harrison R, Bulstrode S. Percentage weight bearing during partial immersion in the hydrotherapy pool[J]. *Physiotherapy Practice*, 1987, 3(2): 60-63.
- [2] Clarys J P. Hydrodynamics and electromyography: ergonomics aspects in aquatics[J]. *Appl Ergon*, 1985, 16(1): 11-24.
- [3] Keskinen K L, Eriksson E, Komi P V. Breaststroke swimmer's knee. A biomechanical and arthroscopic study[J]. *Amer J Sports Med*, 1980, 8(4): 228-231.
- [4] Kaneda K, Wakabayashi H, Sato D, et al. Lower extremity muscle activity during deep-water running on self-determined pace[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2008, 18(6): 965-972.
- [5] Masumoto K, Takasugi S, Hotta N. Electromyographic analysis of walking in water in healthy humans[J]. *Journal of Psychological Anthropology and Applied Human Science*, 2004, 23(4): 119-127.
- [6] Fujisawa H, Suenaga N, Minami A. Electromyographic study during isometric exercise of the shoulder in head-out water immersion[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 1998, 7(5): 491-494.
- [7] Kelly B T, Roskin L A, Kirkendall D T, et al. Shoulder muscle activation during aquatic and dry land exercises in nonimpaired subjects[J]. *J Orthop Sports Phys Therapy*, 2000, 30(4): 204-210.
- [8] Poyhonen T, Keskinen K L, Hautala A, et al. Human isometric force production and electromyogram activity of knee extensor muscles in water and on dry land[J]. *Europ J Appl Phys*, 1999, 80(1): 52-56.
- [9] 肖红. 中年女子水中运动的健身效果[J]. *体育学刊*, 2003, 10(5): 52-53.
- [10] 葛宁, 丁飞. 水下康复疗法对脑卒中偏瘫患者肢体运动功能恢复的影响[J]. *现代康复*, 2001, 5(6): 84-87.
- [11] Abbiss C R, Peiffer J J, Netto K J, et al. Reliability of surface EMG measurements of the quadriceps during maximal isometric contractions following water immersion[J]. *J Musculoskelet Res*, 2006, 10(4): 197-203.
- [12] Barela A M F, Duarte M. Biomechanical characteristics of elderly individuals walking on land and in water[J]. *J Electromyogr Kines*, 2008, 18(3): 446-454.
- [13] 马勇, 郑伟涛. 我国水上运动器材流体动力性能研究进展[J]. *体育学刊*, 2008, 15(2): 78-81.
- [14] Kaneda K, Wakabayashi H, Sato D, et al. Lower extremity muscle activity during different types and speeds of underwater movement[J]. *J Physiol Anthropol*, 2007, 26(2): 197-200.
- [15] Ceillie Caspersen, Petter A Berthelsen, Mari Eik. Added mass in human swimmers: age and gender differences[J]. *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(12): 2369-2373.
- [16] Wickham J B, Brown J M M. The function of neuromuscular compartments in human shoulder muscles[J]. *J Neurophysiol*, 2012, 107(1): 336-345.
- [17] Taube, Wolfgang, Leukel, et al. How neurons make Us jump: the neural control of stretch-shortening cycle movements[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 2012, 40(2): 106-115.
- [18] Rafael F, Toran D, Kevin E, et al. Cruciate ligament loading during common knee rehabilitation exercises[J]. *Journal of Engineering in Medicine*, 2012, 226(9): 670-680.
- [19] Lu Tung-wu, Chien Hui-lien, Chang Ling-ying, et al. Enhancing the examiner's resisting force improves the validity of manual muscle strength measurements: application to knee extensors and flexors[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2012, 26(9): 2364-2371.