

人体上肢运动的 Kane 动力学模型

刘 卉

高云峰

(北京体育大学运动生物力学教研室, 北京 100084) (清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 建立了人体上肢 3 刚体 7 自由度的多刚体模型, 并应用 Kane 方法建立了上肢鞭打动作的物理模型, 计算出上肢各环节在鞭打动作过程中的肌肉力矩和关节反作用力. 实践证明, Kane 方法在描述和计算上肢运动的形式和力矩时具有列解方程规范简洁、编程计算方便高效的特点, 计算结果能够反映动作实际. 通过对棒球投掷动作上肢三个环节力和力矩进行计算与分析, 初步了解了上肢各环节在运动过程中肌肉力矩和关节反作用力与动作技术的关系.

关键词 动力学模型, Kane 方法, 上肢鞭打动作, 棒球投掷

1 引 言

人体在结构上是由关节将身体各环节相连, 因此在对人体运动进行研究时往往可将人体简化为环节链^[1]. 在体育动作中, 当希望环节链末端产生最大的速度和力量时, 肢体的运动形式往往表现为由近端环节到远端环节依次加速与制动, 各环节的速度也表现为由近端到远端的依次增加. 在我国, 人们把这种在克服阻力或自体位移过程中, 肢体各环节依次加速与制动, 使末端环节产生极大速度的动作形式称为鞭打动作^[2]. 这一词汇形象地描述了肢体运动时的形式以及运动员做动作时的感觉, 有助于运动员对动作的理解与掌握.

鞭打动作是许多体育技术动作的重要组成部分, 在我国体育界, 很多项目中的身体动作都被认为是鞭打动作. 如排球挥臂击球动作(包括发球和扣球)、标枪投掷技术、棒球投球动作、网球发球动作等. 甚至有学者认为, 由于人体可以看作是由肌肉和骨骼组成的链状系统, 在运动中要想使链条远端获得最大的速度, 总是表现为“鞭打”这种运动形式而绝不会是其它, 甚至人体的一切运动都可以用鞭打运动原理来解释^[3]. 不管这种说法能否被普遍接受, 但是对鞭打动作技术的研究将对提高相关项目的运动成绩、预防运动性损伤、设计专项训练方法等都有直接的指导作用.

本研究试图建立人体上肢环节链的 3 刚体 7 自由度的物理模型, 应用所测运动学数据和易于编程计算的 Kane 方法对上肢各环节运动的肌肉力矩进行计算, 并应用隔离法计算上肢各环节在关节处的

受力情况, 从而获得有关投掷运动和关节力变化的初步规律, 了解上肢鞭打动作时各环节运动的动力学机制.

2 上肢多刚体模型的建立

整个上肢可分为上臂、前臂和手(包括器械)三个部分, 根据上肢实际的生理结构和以往生物力学建模的经验, 建模时采取了以下的简化:

(1) 从解剖角度看, 上臂相对躯干的运动由胸锁关节、肩锁关节和肩关节三个关节的联合运动组成. 但在运动生物力学中, 一般将三个关节的运动都归结到肩关节, 并将肩关节简化为具有固定回转中心的球铰链, 不考虑由于上臂运动引起的肩关节旋转中心的游动.

(2) 将桡尺关节的运动归结到肘关节, 视为在肘关节绕前臂纵轴的旋转. 肘关节和腕关节可视为万向联轴节, 同样忽略旋转中心的游动.

(3) 三关节的铰接点分别位于肢体端面的中心.

(4) 手指部的运动忽略不计, 由于在实际的上肢鞭打动作过程中, 手指的运动和受力对整个手臂或器械的运动影响很小, 因此, 在建模型时把手看作一个整体, 忽略手指部分的自由度.

(5) 各环节惯性参数依郑秀瑗公布的中国成年人人体参数.

(6) 整个上肢的物理模型共有 3 个刚体、7 个转角, 即肩关节有 3 个转角: 收展角、屈伸角、旋内旋外角; 肘关节有 2 个转角: 屈伸角、旋内旋外角; 腕关节有 2 个转角: 收展角、屈伸角.

在绝大多数有关手臂的生物力学建模和国外一

些假人的制造中, 三关节均以固定回转中心的铰链来近似^[4,5]. 但在实际情况中, 人体的一些主要关节是特殊的生物铰, 并不能用通常的运动副来精确模拟. 如肘关节的转动并非绕一固定点的转动, 而是在三维空间中作非平面运动, 它的回转中心随着关节的转动可以形成一条空间三维曲线. 类似的发现也存在于肩关节. 但是, 由于 3 个关节回转中心的游动微乎其微, 游动对整个上肢的运动影响很小. 且如在建模时考虑游动, 会使以后的数学模型和编程计算大大复杂, 其结果可能会得不偿失. 因此在本研究的物理建模过程中, 将肩、肘和腕关节简化为具有固定回转中心的铰链.

根据以上简化, 建立人体上肢的 3 刚体 7 自由度的物理模型, 用多体系统动力学理论中的 Kane 方法得到显式形式的系统运动微分方程.

3 Kane 动力学分析

根据上述物理模型, 手臂投掷实质上是一个运动基座上的链状多刚体系统动力学问题^[6].

选择伪速度 u_1, u_2, u_3 分别为上臂绝对角速度的一个投影分量, 即

$$\begin{cases} u_1 = \omega_{0x}^* + \dot{q}_1 c_2 c_3 + \dot{q}_2 s_3 \\ u_2 = \omega_{0y}^* - \dot{q}_1 c_2 s_3 + \dot{q}_2 c_3 \\ u_3 = \omega_{0z}^* + \dot{q}_1 s_2 + \dot{q}_3 \end{cases}$$

另选择伪速度 u_4, u_5, u_6, u_7 分别为

$$\begin{cases} u_4 = \dot{q}_4, & u_5 = \dot{q}_5 \\ u_6 = \dot{q}_6, & u_7 = \dot{q}_7 \end{cases}$$

并可反解出

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = [(u_1 - \omega_{0x}^*)c_3 - (u_2 - \omega_{0y}^*)s_3]/c_2 \\ \dot{q}_2 = (u_1 - \omega_{0x}^*)s_3 + (u_2 - \omega_{0y}^*)c_3 \\ \dot{q}_3 = u_3 - \omega_{0z}^* - s_2[(u_1 - \omega_{0x}^*)c_3 - (u_2 - \omega_{0y}^*)s_3]/c_2 \\ \dot{q}_i = u_i, & i = 4, 5, 6, 7 \end{cases}$$

简记为 $\dot{q}_r = \dot{q}(u_r, q_r), (r = 1, 2, 3, \dots, 7)$

设作用于刚体 B_j 上的主动力系 (肌肉力、重力) 主矢在该刚体结构体系中的列阵为 \mathbf{R}_j , 对质心 C_j 的主矩在同一坐标系中的列阵为 \mathbf{T}_j , 则广义主动力为

$$F^{(r)} = \sum_{j=1}^3 (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{v}_j^{(r)} + \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_j^{(r)}), \quad r = 1, \dots, 7$$

刚体 B_j 的惯性力系主矢在 $O_j x_j y_j z_j$ 系中的列阵和惯性力系主矩在 $O_j x_j y_j z_j$ 系中的列阵分别为

$$\mathbf{R}_j^* = -m_j \mathbf{a}_j, \quad \mathbf{T}_j^* = -\mathbf{J}_j \cdot \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\omega}_j \times (\mathbf{J}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_j)$$

式中 m_j 为刚体 j 的质量, \mathbf{J}_j 为其中心惯量矩阵. 广义惯性力即为

$$F^{*(r)} = \sum_{j=1}^3 (\mathbf{R}_j^* \cdot \mathbf{v}_j^{(r)} + \mathbf{T}_j^* \cdot \boldsymbol{\omega}_j^{(r)}), \quad r = 1, \dots, 7$$

因此可得 Kane 动力学方程组

$$\begin{cases} F^{(r)} + F^{*(r)} = 0, & r = 1, 2, 3, \dots, 7 \\ \dot{q}_r = \dot{q}(u_r, q_r), & r = 1, 2, 3, \dots, 7 \end{cases}$$

方程组共有 14 个方程, 而方程中有 T_r, u_r, q_r 共计 21 个未知数. 当已知运动 q_r, u_r 时可以求出关节肌力矩 (正问题); 当已知关节肌力矩和初始条件时, 可求出 q_r, u_r (逆问题).

4 关节反力的计算

在 Kane 方程中, 不出现理想约束的约束反力, 因此应用基本力学定律对上肢三环节在关节处的受力情况进行分析并求解关节反力.

假设关节间作用力的作用点在关节面中心, 各环节受力情况如图 1 所示.

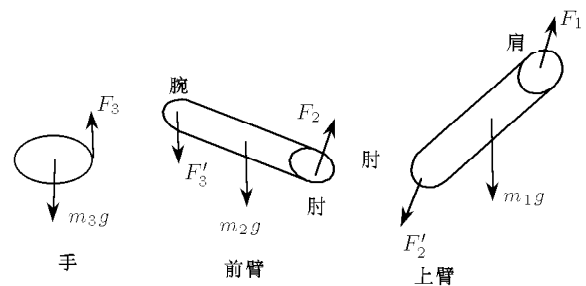


图 1 上肢各环节受力分析

5 棒球投球动作上肢动力学分析

应用瑞典产 QUALISYS-MCU500 红外远射测试系统 (6 个镜头) 对棒球投球动作过程进行测试, 获得运动员上肢各关节的运动学数据. 拍摄频率为 240 幅 /s. 测试对象为北京棒球队投手.

图 2 到图 7 是根据运动学测试数据应用上肢模型的 Kane 动力学分析计算出的结果, 各图显示了棒

球投掷动作过程中运动员上肢各环节所受力矩和关节反力的变化情况。

从图 2 可以看出，在“超越器械”阶段上臂的三维力矩均较小，说明较小的力矩就可使上臂处于适宜发力的位置。对比上臂在肩关节的运动情况可以看出，上臂处于水平外展位置并没有受到明显的力矩作用。当上臂加速水平内收时，肩关节出现了明显的屈肌力矩。伸肌力矩在水平内收动作尚未结束时已经出现，并在出手前后达到最大值。

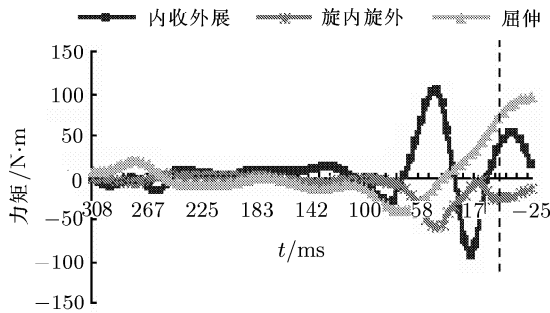


图 2 上臂所受力矩

图 3 是上臂在肩关节的受力情况。在上臂加速运动阶段，肩关节周围肌肉收缩，使上臂受到了较大的沿纵轴的压力。球出手时肩关节受到了较大的沿纵轴的压力和沿屈伸轴的力。在肘关节保持屈曲状态阶段，上臂在肘关节受到了沿 X_1 反方向力，这一力对于上臂重心的力矩将加速上臂向前水平内收。而肘关节加速伸展时，沿 X_1 轴力变为正值，该力对上臂重心的力矩将制动上臂的水平内收运动。同样地，球出手前上臂在肘关节受到的沿 Z_1 反方向的力对上臂重心的力矩可使上臂外展动作减速。

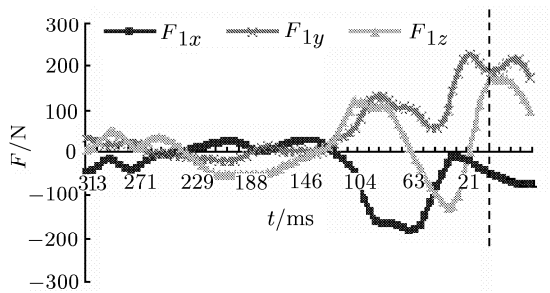


图 3 上臂在肩关节受力

肘关节肌力矩的形式如图 4 所示，前臂开始受屈肌力矩，之后出现较大的伸肌力矩。显然超越器械阶段运动员屈肘肌收缩来保持或产生肘关节的屈曲状态，而之后的肘伸展动作是伸肘肌主动收缩的结果。在球出手之前，伸肘肌力矩快速减小，并在球出手瞬间已变为肘屈肌力矩。

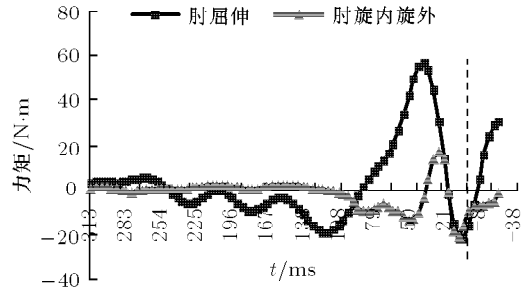


图 4 前臂所受力矩

图 5 是前臂在肘关节受力情况。在肘关节屈曲阶段，前臂在肘关节均受到沿 Z_2 (屈伸轴) 轴正方向的力，以及沿前臂纵轴 (Y_2 轴) 的压力。在肘关节伸展阶段，沿 Z_2 (屈伸轴) 轴的力变为负值，压力也在球出手时减少甚至变为拉力。沿 X_2 轴的力则始终为正值。

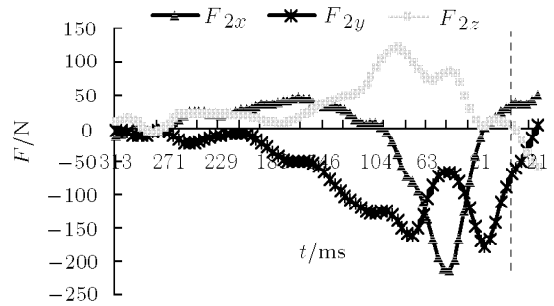


图 5 前臂在肘关节受力

图 6 是棒球投球过程中手在腕关节的肌肉力矩曲线。从图中可以看出，运动员虽有腕屈动作，但速度、幅度均较小，因此腕屈力矩也较小，且在球出手时变为伸展力矩，说明棒球运动员投掷时对腕关节有所控制。

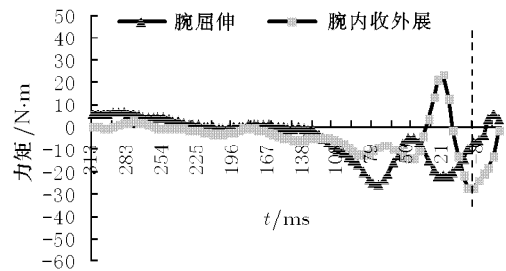


图 6 手所受力矩

图 7 是手在腕关节的受力曲线。

运动员球出手时均受到最大的沿手屈伸轴的力和最大的沿纵轴方向的力。显然球的高速出手给手一个巨大的反作用力，手在腕关节受到的力此时比上臂和前臂在肩、肘关节受到的力都要大，而腕关节的肌肉力量却是三个关节中最薄弱的，所以此时

腕关节最容易受伤.

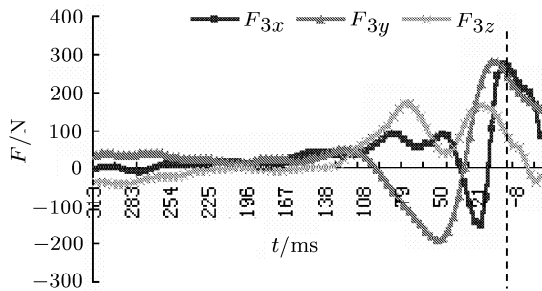


图7 手在腕关节受力情况

6 结论

(1) 对上肢3个环节及其连接进行了简化,建立了代表上肢的3刚体7个自由度的多刚体模型.实践证明所作的简化是可行的,模型可以代表人体上肢的主要运动形式和功能.

(2) 应用Kane方法对上肢多刚体模型进行分析计算,建立了描述上肢运动和计算运动力矩的物理模型.实践证明,Kane方法在描述和计算上肢多刚体运动的形式和力矩时具有列解方程规范简洁、编程计算方便高效的特点,计算结果能够反映动作实际.

(3) 对棒球投掷动作上肢3个环节力和力矩进行计算与分析,初步了解了上肢各环节在运动过程中肌肉力矩和关节反作用力与动作技术的关系.

参考文献

- 1 郑秀媛等. 运动生物力学进展. 北京: 国防工业出版社, 1998. 4~10 (Zheng Xiuyuan, et al. The Development in Biomechanics. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 4~10 (in Chinese))
- 2 李良标等. 运动生物力学. 北京: 北京体育大学出版社, 1991. 353~355 (Li Liangbiao, et al. Sport Biomechanics. Beijing: Beijing Sport University Press, 1991. 353~355 (in Chinese))
- 3 周酉元等. 人体运动与“鞭打”. 陕西体育科技, 1989(1): 87~92,78 (Zhou Youyuan, et al. Human movement and whiplash. *Shanxi Sports Science and Technology*, 1989(1): 87~92,78 (in Chinese))
- 4 高云峰, 刘颖. 体育运动中统一的人体多刚体模型. 工程力学, 2000(2): 142~144 (Gao Yunfeng, Liu Ying. A general rigid multi-body model of human body in athletics. *Engineering Mechanics*, 2000(2): 142~144 (in Chinese))
- 5 高云峰, 白桦等. 飞行弹射救生中的上肢受力及甩打运动研究. 力学与实践, 2000(2): 32~35 (Gao Yunfeng, Bai Hua, et al. Force and movement for upper limb in aircraft escape ejection. *Mechanics in Engineering*, 2000 (2): 32~35 (in Chinese))
- 6 贾书惠. 刚体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1987 (Jia Shuhui. Kinetic of Rigid. Beijing: Higher Education Press, 1987 (in Chinese))
- 7 刘宇. 人体多关节运动肌肉控制功能的生物力学分析. 台湾: 中国文化大学出版社, 1999 (Liu Yu. Biomechanical Analysis of Muscle Control of Human Multi-Joint Movement. Taiwan: Chinese Culture University Press, 1999 (in Chinese))
- 8 James G Andrews. On the relationship between resultant joint torques and muscular activity. *The American Journal of Sports Medicine*, 1982, 5: 361~367

KINETIC MODEL OF HUMAN UPPER LIMB MOVEMENT

LIU Hui

(Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

GAO Yunfeng

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Upper limb whiplash movement (ULWM) is one of the most important skills in many kinds of sports. A model of a three-segment kinetic chain consisting of upper arm, forearm and distal segment was established for kinetic calculation. Kane's method was used to get the resultant muscular moment and Newton's method to get the joint reaction force. It can be concluded that Kane's method can describe the upper limb model movement. And be used to calculate the muscular moment efficiently. The upper limb movement in baseball pitching was studied by this model and some relationships were found between reaction forces and kinetic data.

Key words kinetic model, Kane's equations, upper limb whiplash movement, baseball pitch