

再谈拔河比赛中的力学分析¹⁾

张伟伟²⁾ 杜秀丽 赵子龙

(太原科技大学力学系, 太原 030024)

摘要 本文建立了拔河运动员的受力模型, 分析了拉绳倾角、身体倾角、运动员姿态等因素对拔河结果的影响规律。结果表明, 抬高拉绳有利于增大我方的最大静摩擦力; 较小的身体倾角有利于减小拉绳的拉力矩, 但需要综合考虑拉绳倾角的影响; 手臂弯曲后可减小拉绳的拉力矩; 腿部微弯会同时导致拉力矩和重力矩减少, 但通过脚蹬地, 可将腿部力量转化为拉力从而增加对抗力量。

关键词 拔河, 力学分析, 摩擦因数, 平衡

中图分类号: O39 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-20-235

MECHANICAL ANALYSIS OF TUG-OF-WAR GAMES¹⁾

ZHANG Weiwei²⁾ DU Xiuli ZHAO Zilong

(Mechanics Department, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract In this paper, the mechanics model of the athletes in tug-of-war is established. The influences of the rope inclination, the body inclination and the athlete's posture on the result of the tugofwar are discussed in detail. Some suggestions are put forward for the tug-of-war: raising the draw rope will help increase the maximum static friction and increase the chance of winning; a smaller body inclination is helpful to reduce the pulling moment of the rope, but the rope inclination angle has to be considered; bending the arm can reduce the tensile moment; a slight bending of the leg will decrease both the tensile moment and the gravity moment, but by pedaling the ground, the leg strength can be converted into the tensile force, which can increase the countervailing force.

Key words tug-of-war, mechanics principle analysis, friction coefficient, equilibrium

据《墨子·鲁问》记载^[1], 在楚越战争期间, 由于越国位于楚国下游河流, 越国失利可顺流而退。鲁班为帮助楚国发明了“钩强”, 以“钩”住逃跑的越国船只。后来, 为了训练这一战术而形成了一种称之为“牵钩”的游戏。世界上许多国家都流行拔河, 只是规则不同。1900—1920 年之间, 拔河曾是奥运会比赛项目, 但因缺乏统一规则于 1920 年被取消^[2]。1960 年, 由英国、瑞典等国正式成立国际拔河联合会 (Tug of War International Federation, TWIF), 1965 年开始

举办欧洲锦标赛, 1975 年开始举办世界锦标赛。此后欧洲锦标赛和世界锦标赛每年交替进行。由牛顿第三定律知道, 拔河双方所受的拉绳拉力始终相同, 但同样的力施加于双方却产生出了不同的效果。李林等^[3]对拔河中队员运动分为平动和转动, 通过受力分析比较了摩擦力与重力矩在拔河过程中的重要作用, 但该分析没能对拔河运动的训练提出建议。本文仍将拔河队员运动分为平动和转动, 补充讨论运动员身体倾角和拉绳倾角, 以及手臂、腿部弯曲等因素对

2020-06-01 收到第 1 稿, 2020-08-09 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金 (11872261), 山西省自然科学基金 (201801D121012) 和晋城科技预研项目 (20198035) 资助。

2) 张伟伟, 教授, 主要研究方向为结构损伤检测、力学史与方法论。E-mail: zwwps@126.com

引用格式: 张伟伟, 杜秀丽, 赵子龙. 再谈拔河比赛中的力学分析. 力学与实践, 2021, 43(2): 313-315

Zhang Weiwei, Du Xiuli, Zhao Zilong. Mechanical analysis of tug-of-war games. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(2): 313-315

拔河比赛的影响,为拔河训练提供一些理论参考。

1 拔河模型及受力分析

如图1所示为一对一拔河中一方的受力模型,为了简化,当人的姿态确定后将其视为刚体模型,受力包括:拉绳的拉力 F_L ,地面对运动员的支撑力 F_N ,重力 G ,摩擦力 F_f 。并引入下列参数:拉绳与水平线的夹角 γ ,人体向后倾角 θ ,人体重心 O ,绳拉力在人体上的作用点 D ,且 $L_0 = |OD|$, $L = |OE|$ 。

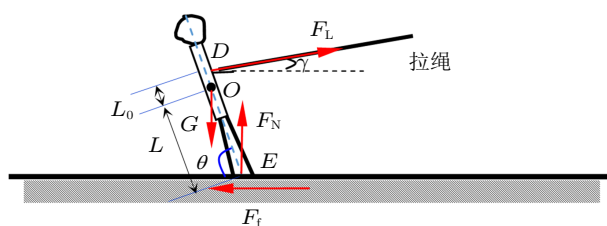


图1 拔河运动员姿态及受力分析图

拔河过程可分为僵持阶段和运动阶段,运动阶段又可以分为平动和转动两种形式^[3]。考虑处于僵持阶段,列出平衡方程

水平方向

$$F_L \cos \gamma = F_f \quad (1)$$

竖直方向

$$F_L \sin \gamma + F_N = G \quad (2)$$

对 E 点的矩平衡

$$GL \cos \theta - F_L(L + L_0) \sin(\gamma + \theta) = 0 \quad (3)$$

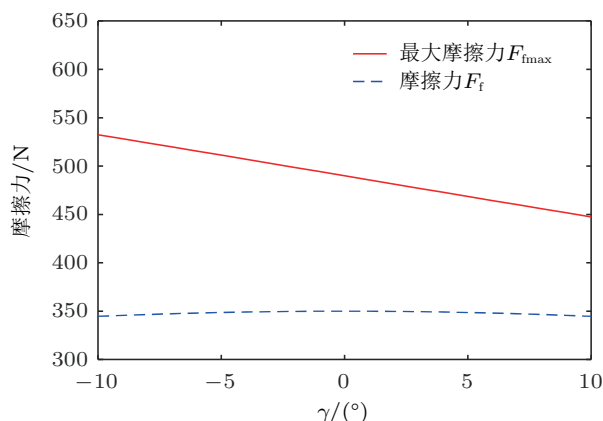
当双方用力拉动对方时,绳拉力由0逐渐增加,摩擦力也随之增加,当一方的摩擦力先达到最大静摩擦力时,也将先达到由僵持转向平动的临界状态,即

$$F_f = F_{f\max} \quad (4)$$

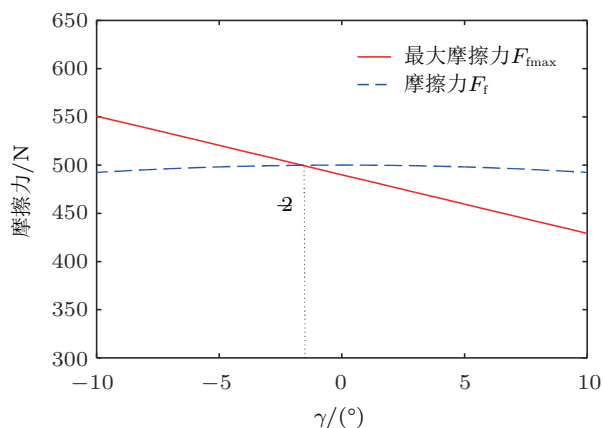
这里, $F_{f\max}$ 表示最大静摩擦力,以 μ 表示静摩擦因数,有 $F_{f\max} = \mu F_N = \mu(G - F_L \sin \gamma)$ 。一般情况下, γ 取值很小,大约在 $(-10^\circ, 10^\circ)$ 之间,该区间内 $F_{f\max}$ 为减函数,意味着 γ 越小越有利于增加最大静摩擦力。从受力上看,当 $\gamma < 0$ 时,拉力 F_L 使得正压力增加,也就增加了最大静摩擦力 $F_{f\max}$;相反,当 $\gamma > 0$ 时,拉力 F_L 会减小正压力,从而减小最大静摩擦力 $F_{f\max}$ 。综合式(1)、式(2)和式(4),可知不被拉动时 γ 应满足条件

$$\cos \gamma + \mu \sin \gamma \leq \frac{\mu G}{F_L} \quad (5)$$

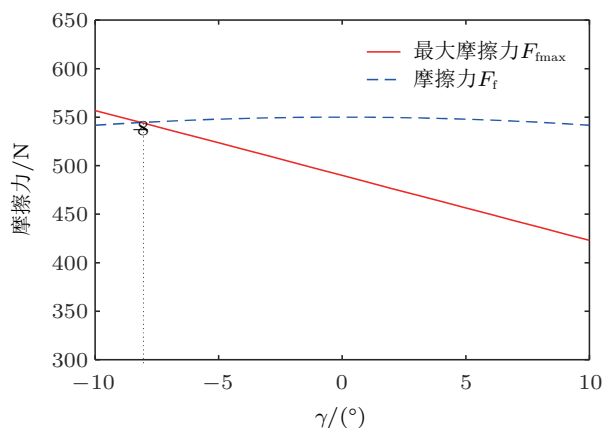
式(5)取等号时为临界状态。为了直观地观察 γ 的临界值,假定 $G = 700 \text{ N}$, $\mu = 0.7$,画出不同拉力作用下摩擦力随 γ 的变化曲线,如图2(a)~图2(c)所示。可见,当拉力较小时无论 γ 取何值都不会被拉动,如图2(a)所示。当拉力 $F_L = 500 \text{ N}$ 时, $\gamma = -2^\circ$ 为临界状态,如图2(b)所示。当拉力 $F_L = 550 \text{ N}$ 时, $\gamma = -8^\circ$ 为临界状态,如图2(c)所示。



(a) $F_L = 350 \text{ N}$



(b) $F_L = 500 \text{ N}$



(c) $F_L = 550 \text{ N}$

图2 不同拉力作用下摩擦力随拉绳倾角的变化关系

拔河中的拉绳要么水平、要么倾斜。当拉绳水平时, 双方的 γ 角均为 0, 此时 $F_L = \mu G$, 如果双方体重和摩擦因数完全相同, 将同时达到临界状态。当拉绳倾斜时, 双方的 γ 角必然为一正一负、且大小相等。可以证明 $\cos \gamma + \mu \sin \gamma$ 在 $(-10^\circ, 10^\circ)$ 之间为增函数, 因此, 在一定的拉力作用下, 若我方 γ 取负, 对方 γ 取正, 对方将率先超出条件 (5), 我方获胜机会增加。比赛中, 一方队员一旦坐在地上就很容易被拉动, 正是因为坐在地上时 γ 角较大, 影响效果明显。

当最大静摩擦力足够大时, 虽然拉力不能使运动员滑动却有可能拉动身体前倾, 人为了确保身体平衡, 会向前挪动脚步从而输掉比赛。身体前倾就是身体发生了转动, 这一过程可以看作是绳拉力矩和重力矩的较量, 将其分别记为绳拉力矩

$$M_L = F_L (L + L_0) \sin(\gamma + \theta) \quad (6)$$

重力矩

$$M_G = GL \cos \theta \quad (7)$$

当 $M_L > M_G$ 时就有可能输掉比赛。根据文献 [3], θ 的取值范围大致在 $(30^\circ, 90^\circ)$, 该范围内 M_L 为增函数 (γ 取值很小), M_G 为减函数。身体后倾可使 θ 取较小值, 达到减小拉力矩、增大重力矩的目的。由式 (3) 可知, 当拉绳倾角 γ 和拉力 F_L 确定后, 可求出身体发生转动的临界倾角, 记为 θ_c 。当 θ 小于 θ_c 时, 拉力矩小于重力矩, 将不会被拉动。设队员身高为 1.78 m 时, 因重心大概位于人体高度的 56% 左右, 近似有 $L = 1$ m, $L_0 = 0.2$ m, 因 γ 很小, 令其为 0, 拉力取值设定在 350 N ~ 700 N 之间, 求解不同拉力下的 θ_c , 如图 3 所示。显然, 在该取值范围内, θ_c 随拉力 F_L 近似线性递减, 这说明拉力越大, 保持平衡所需的 θ 就越小。不过, 也应注意到身体倾角越小, 有可能导致 γ 为正, 从而减小最大静摩擦力。因此, 需要综合考虑 θ 和 γ 的取值。

最后, 在拔河中弯曲手臂肘部紧贴腰部, 拉力作用点位于腰部, 而将手臂展开拉力沿着手臂作用, 作用点在肩部, 这说明 L_0 可以通过弯曲和伸展手臂调整。同时 L 也可以通过微弯腿部来调整。由式 (6) 和式 (7) 可以看出, 减小 L_0 也就减小了绳拉力矩的力臂, 从而减小拉力矩。微弯腿部减小 L 虽然同时减

小了拉力矩和重力矩, 不过腿部微弯后再蹬地, 由于身体后倾, 可将腿部力量转换为拉绳的拉力, 这相比于手臂拉力可大大增加 F_L 的值, 因此微弯腿部虽然会损失重力矩, 但有利于蹬地发力, 可将腿部力量转化为拉力从而增加对抗力量。

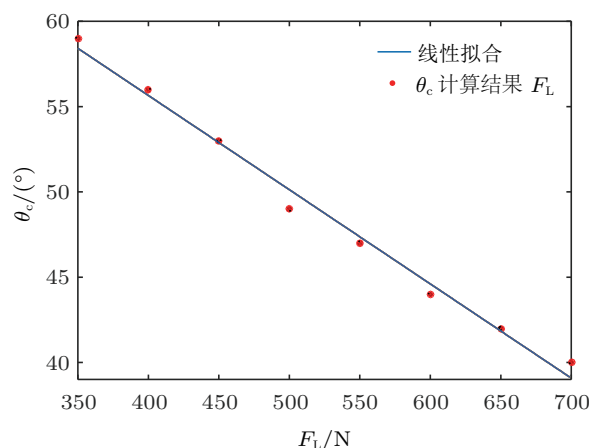


图 3 身体临界倾角与绳拉力之间的关系

2 结论

本文通过建立一对一的拔河模型, 分析了拉绳倾角 γ , 身体倾角 θ , 以及身体姿态对拔河比赛的影响规律。结果表明抬高拉绳, 使我方拉力斜向下时有利于增大我方最大静摩擦力, 并减小对方最大静摩擦力; 较小的身体倾角有利于减小拉绳拉力矩、增加重力矩, 但需要综合考虑拉绳倾角的影响; 从运动员的姿态考虑, 手臂应弯曲后紧贴腰部以减小拉力矩; 腿部微弯虽然会导致拉力矩和重力矩同时减小, 但通过脚蹬地, 可将腿部力量转化为拉力 F_L , 间接影响比赛结果。在实际比赛中, 虽然上述各量的可调整范围都非常小, 但如果力量相当时, 适时地根据对方的姿态和状况做出有利于我方的调整, 恰当的运用力学原理, 微弱的优势也会成为取胜的关键。

参 考 文 献

- 杜汉华. 拔河与襄樊. 湖北文理学院学报, 2008, 29(4): 88
- 洪巨流. 短命的拔河. 体育文化导刊, 1988(2): 8-8
- 李林, 石文星. 拔河史话与力学分析. 力学与实践, 2000, 22(5): 73-75
- Li Lin, Shi Wenxing. Tug-of-war, its history and mechanics analysis. *Mechanics in Engineering*, 2000, 22(5): 73-75 (in Chinese)

(责任编辑: 胡 漫)