

骆驼越沙机理初步分析*

庄继德 裘熙定 王志浩 徐佩君 骆建聪
(吉林工业大学)

提 要 本文分析了驼体和驼足对沙地的适应性,借助微细动作分析仪,进行了骆驼沙地运动动作剖析及驼足与沙相互作用研究,初步揭示了骆驼高越沙功能的机理。

关键词 骆驼 通过性 仿生 越野车辆

一 前 言

我国沙漠广阔,仅新疆的塔克拉玛干沙漠就占地 32 万平方公里。现已勘察表明,这些地区蕴藏着大量油气和矿产资源,如塔里木盆地预测的石油资源、天然气资源分别占我国已探明的油气资源蕴藏量的 $1/7$ 和 $1/4$ 。因此,研制高通过性的沙地运输车辆,开发和利用这些地区的资源,将大大促进国民经济建设。

由车辆—地面系统力学可知,车辆在松软地面上通过性是由土壤机械特性和行走机构的相互作用特性所决定的。在实际中,传统的越野车辆在沙地行驶时,在行走装置作用下,沙子流动严重,下陷深,运动阻力大,行驶效率低,使车辆难以或无法通过。多年来,国内外对这一问题采用传统方法,进行了广泛的研究,取得了一定成绩,如采用了大直径低气压宽轮胎、拱形轮胎、超宽履带等,车辆的沙地通过能力有所提高,但尚未很好解决。车辆工作者正努力寻求有效的途径。

生活在沙漠地带的骆驼,经过不断进化,对沙漠环境具有很强的适应能力。这不仅表现在它的耐饥渴、耐高温机能,还体现在沙地高通过能力。因而,研究骆驼适应沙漠的特异结构、运动方式及优异本领,并从仿生学原理出发,用骆驼越沙机理指导沙地车辆设计,无疑是提高越野车辆沙地通过性的有效途径。

本文分析了驼体和驼足对沙地的适应性,借助微细动作分析仪进行了骆驼沙地运动动作剖析及驼足与沙相互作用的研究,初步揭示了骆驼高越沙功能的机理。

二 适应于沙地行走的体态

牛马的体躯长度,一般都大于个体高度,或二者接近相等,故体型多呈长方型或正方形。而骆驼则体躯长度明显比体高短 20~30cm,体长指数(体长与体高之比)平均不过

* 国家教委博士点基金资助项目。

** 本文得到了骆驼专家宁夏农学院的苏学轼教授指导,在内蒙古科尔沁沙地进行骆驼运动学录像以及图象处理得到了我校人机工程实验中心的宋焕金、王同国、吕荣华老师的帮助,在此表示衷心感谢。

83%~89% (乘用马多在100%以上)。肢长指数 (肢长与体高之比) 平均可高达59% (乘用马不过50.8%), 因此, 其体型呈明显的高方型结构。四肢长使运动步幅大、质心高, 躯短使地面的支持面小, 质心移出支持面省力。因此, 尽管作为运动底基的沙地松软易滑、流动性大、强度低, 骆驼行走却能有较快速度和较大的持久力。

骆驼的前肢, 有长而峻立 (与水平面成 $66^\circ \sim 75^\circ$) 的肩胛骨和短而斜的上膊骨, 以强大的肌群与躯体相连, 以缓冲地面冲击力, 减轻振动, 有利于负重。后躯短而斜的尻 (与水平面成 47°), 股部与躯体分离, 股径较长, 肌肉长收缩力大, 股骨与水平面成 74° (马为 $80^\circ \sim 84^\circ$), 后膝关节内角为 $131^\circ \sim 132^\circ$, 飞节内角 $142^\circ \sim 150^\circ$ (马为 $140^\circ \sim 150^\circ$), 后腰上卷, 这些使后肢便于前伸, 增大步幅和发挥推进力。在骆驼行进中, 前肢所支承的体重较后肢大, 而后肢的推进力较前肢大。因而, 前后肢的物理模型可描述成图1所示⁽²⁾。从上可知, 骆驼长肢短躯的特殊体型以及前后肢不同形态和受力状况是沙地行走的理想选择。

由于骆驼的特殊体型, 骆驼的运动步法与其他四足动物有所不同。借助微细动作分析仪分析骆驼运动可知, 慢步行走时, 三腿和同侧腿支承驼体的时间较多, 速度低时, 有极短时间是四腿支承。如以 $V=1.33\text{m/s}$ 慢步行走时, 在一个运动周期内, 同侧腿支承时间比例为22%, 三条腿76%, 四条腿2%。中速和快速行驶时, 采用侧对步, 即一后腿抬起后, 紧接着同侧前腿也迅速抬起, 驼体绝大多数时间由同侧腿支承。如 $V=3.21\text{m/s}$ 时, 同侧腿支承时间比例为84%, $V=3.81\text{m/s}$ 时, 则为90%。骆驼疾驰时, 单腿支承时间较多, 并有悬空期。如 $V=5.81\text{m/s}$ 时, 单腿支承时间比例为47%, 双腿为26%, 三腿为23%, 悬空期为4%。

骆驼的主要步法是慢步, 运动过程中, 重心变动稳定, 易保持驼体稳定, 四肢疲劳较少。骆驼快行时, 主要采用对侧步, 这种步法不仅可避免因后肢较前肢长而引起的运动干涉, 还可加大步幅, 提高速度。实际上, 侧对步并不稳定, 其他动物很少采用, 这与骆驼运动时可以用头颈来调节平衡有关, 因而用此步法迅速省力。骆驼疾驰时, 常用的是袭步, 运动中, 头颈伸长上下活动以保持身体平衡, 缩短躯以迅速行进, 此步法需要消耗较大体力, 因而不大常用, 只在撒欢、惊群和迅速起步时常用。

骆驼行进中, 后足落地点总在同侧前腿足印的前方, 并且随速度提高, 两足印的距离加大。如 $V=1.30\text{m/s}$ 时, 后足印较同侧前足印超出约28cm, $V=3.21\text{m/s}$ 时, 超出约118cm, $V=6.18\text{m/s}$ 时, 超出约143cm。这与骆驼行走的步幅大及步幅随速度提高而增大有关。

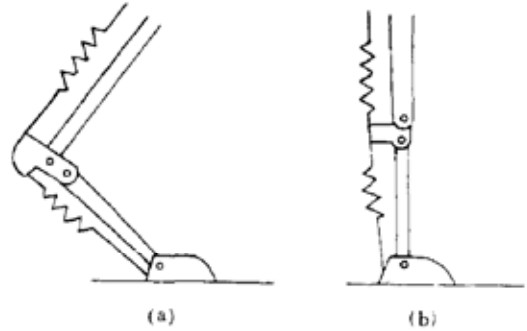


图1 物理模型 (a) 后肢 (b) 前肢

Fig.1 Models of (a) a hind limb (b) a fore limb

三 运动平衡的自动调节

骆驼的颈长约 1m, 是头长的 2 倍, 尻长的 3 倍。长而灵活的头颈, 不仅可以调节驼体质心来实现起卧动作, 而且在行走、上下坡和转弯活动中起到了调节平衡的作用。非洲撒哈拉沙漠的鸵鸟也是身高颈长, 跑步时总是将颈伸长成一直线来调节身体平衡。骆驼上坡时, 头颈前伸, 使质心前倾, 下坡时, 头颈后仰, 使质心落于腰荐部。行进时, 利用头颈上下摆动以变换质心, 这样, 不但可以增加持久力, 而且有利于增大步幅。分析得到, 骆驼在平坦沙地行进中, 头与颈的相连点在一个运动周期内, 相对于平坦沙面的上下摆动值, 在 $V=1.30\text{m/s}$ 时, 约 10cm, $V=3.33\text{m/s}$ 时, 约 13cm, $V=6.18\text{m/s}$ 时, 约 25cm。可见, 速度越高, 头颈的摆动越大, 平衡作用越明显。因而, 尽管驼体高而不稳, 但借助长而灵活的颈, 骆驼在沙地行走时, 矫健自如。

四 特异的具有增面固沙的驼足

地球上陆地动物, 在长期进化中, 其行走部分与活动环境达到了最佳配合。不同生存环境的动物, 其足的特性也不同。如有些经常行走在硬路面上的动物, 足呈硬质, 这是因为硬路面动物在行进过程中, 地面变形小, 硬质足也不会有很大变形而消耗较多的能量。但当硬质足动物在软路面上行走时, 地面有较大变形, 尤其在松散沙地, 势必压强大, 陷入深, 从而阻力大, 疲劳快, 速度低。

誉为“沙漠之舟”的骆驼, 因适应沙漠的生活条件, 其指(趾)枕和蹄的结构非常特殊。驼足有二指(趾), 图 2 为驼足指骨简图。驼足第 1、第 2 指(趾)已蜕化消失, 第 3、第 4 指(趾)发育完全, 每指(趾)有三个指(趾)节。指(趾)端有指(趾)枕和蹄。指(趾)枕发达, 位于近指(趾)节远半段, 中指(趾)节和远指(趾)节掌侧部, 如图 3 所示⁽³⁾。第 3 和第 4 指(趾)的指(趾)枕位于中指(趾)节和近指(趾)节的部分互相连在一起。蹄很小, 位于远指(趾)节背侧部和前端。

指(趾)枕表皮角质层很厚, 第 3、第 4 指(趾)枕表皮的角质层连在一起形成一厚而坚实的角质盘, 如图 4 所示⁽⁴⁾, 指(趾)枕垫是指(趾)枕的弹性装置。中心脂肪垫、轴侧脂肪垫、远轴侧脂肪垫三个脂肪垫后部与弹性纤维垫相连构成一个整体成为一个指(趾)枕。

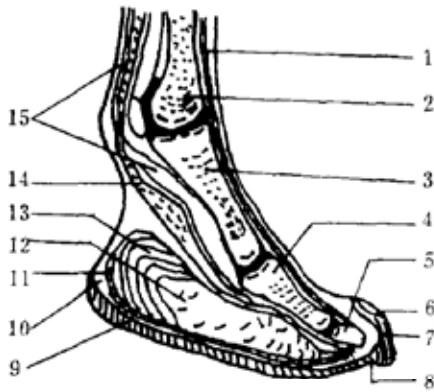
前足盘大而圆, 后足盘稍小呈卵圆形。足盘前沿有两个角质的钩状蹄甲, 除作为起卧支点外, 有固定指(趾)枕之作用, 防止在沙地行走后滑。

驼足以指(趾)枕与地面接触, 当驼足着地时, 指(趾)枕垫受压向周围扩张, 以增大与地面的接触面积(最大时, 指枕围为 68~71.5cm, 宽为 19~20cm, 趾枕围为 60~65cm, 宽为 17cm), 当指(趾)抬起时, 因压力减小, 指(趾)枕回缩直至原状(此时, 指枕围缩至 62~65.5cm, 宽减至 16.5~17cm, 趾枕围缩至 55~60cm, 宽减至 14.5~



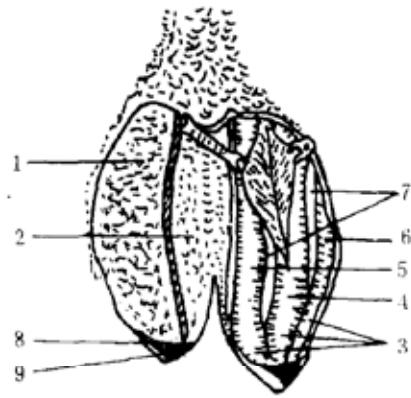
图 2 驼足指骨

Fig.2 Bones of camel
fore foot



- 1.指伸肌腱 2.掌骨 3.近指节骨
- 4.中指节骨 5.远指节骨 6.蹄襻
- 7.蹄壁 8.蹄底 9.指枕角质层 10.指枕真皮层
- 11.纤维鞘 12.中心脂肪垫 13.弹性纤维垫
- 14.指深屈肌腱支 15.指浅屈肌腱支

图3 骆驼第4指纵切面



- 1.指枕角质层 2.指枕真皮层
- 3.指枕皮下层 4.中间弹性纤维脂肪
- 5.轴侧弹性纤维脂肪 6.远轴侧弹性纤维脂肪
- 7.弹性纤维脂肪中隔 8.蹄底角质层
- 9.蹄壁角质层底缘

图4 骆驼指枕 (分层切开)

Fig.3 Longitudinal section of the fourth fore digital

Fig.4 Camel fore pad (section layer upon layer)

15cm), 又可利于运步。

考察驼足在沙地和油泥上的接地形状发现, 接触中部有一圆滑的凸部, 即驼足入沙后, 足面中部呈一凹形, 这样足下沙子流动较小, 具有固沙作用。

五 驼足对沙作用的特殊方式

驼足入沙时, 驼足作用在沙地上的力由零逐渐变大, 直至最大值。随着足逐渐抬起, 足对沙地的作用力逐渐变小, 当足完全离开沙面时, 力变为零。由上节分析知, 驼足入沙时面积渐增, 出沙时渐减。因而驼足下应力, 数值低变化小, 使得下陷浅。

由微细动作分析得到, 驼足入沙时, 驼足面与沙表面几乎平行, 这样, 驼足对沙土扰动小, 足附近沙子流动轻微。出沙时, 驼足以两个角质的钩状蹄甲为支点, 驼足面与沙面成角度转动离开沙面, 这样, 不仅减少了对沙土扰动, 而且有利于推进力的发挥。

由表层沙土承载能力及下陷机理研究⁽⁵⁾可知, 行走装置在沙地上引起下陷的原因, 不仅是由于行走部分对沙土的压实, 更主要的是由于行走部分作用而引起的沙土流动。

因而, 具有增面固沙的驼足与沙的相互作用方式, 最大程度地减小了沙土压实和流动而引起的下陷, 降低了运动阻力, 提高了行走效率。

六 结 语

生活在沙漠地带的骆驼, 经过不断进化, 对沙漠环境具有很强的适应能力。这不仅表现在它的耐饥渴、耐高温机能, 还体现在沙地高通过能力。骆驼的高方体型、前后肢不同形态和受力状况、长而灵活的头颈、具有增面固沙的驼足及其与沙作用方式, 以及骆驼的运动方式是骆驼在沙地上行走迅速省力的关键因素。研究骆驼越沙机理, 并从仿生学原理出发, 用以指导沙地行走机械设计, 将大大提高行走机械的沙地通过性。

参 考 文 献

- (1) 苏学轼: 中国双峰驼体态与生态环境, 《家畜生态》, 1989.2.
- (2) R. MCN Alexander, The role of tendon elasticity in the locomotion of camel J. Zool. Lond (1982) 198, 293~313.
- (3) 崔 燕: 双峰驼指(趾)枕和蹄的结构, 甘肃农业大学硕士论文, 1985.
- (4) 郭和以、马仲华: 骆驼指(趾)枕和蹄的结构, 《中国兽医科技》, 1987.7.
- (5) 桂龙明: 表层沙土承载能力及行走机械载荷 — 下陷机理研究, 吉林工大硕士论文, 1989.6.

Primary Study on the Ability for Camel to Travel on Sand

Zhuang Jide Qiu Xiding Wang Zhihao Xu Peijun Luo Jiancong
(Jilin University of Technology)

Abstract

In this paper, the adaptability of camel body and its foot to sand is analysed. The procedure of camel locomotion on sand is studied by using micromotion analyzer, and the interaction between camel foot and sand is also studied. Then the mechanism of ability of camel locomotion on sand has primarily been revealed.

Key words Camel Trafficability Bionics Off-road vehicle