

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.006

扬子鳄在水平硬质基底爬行的运动学与动力学研究

吴晔¹, 于建强¹, 李磊¹, 潘涛², 李进超³

(1. 中国电子科技南湖研究院 机器人实验室, 浙江 嘉兴 31400;

2. 安徽师范大学 生命科学学院, 安徽 芜湖 241000;

3. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:探讨扬子鳄在水平硬质基底上爬行时的运动学与动力学特征。通过高精度运动捕捉系统, 结合力传感器平台, 记录扬子鳄在水平面匀速爬行的步态特征和四肢的地面反力。结果表明: 扬子鳄在水平硬质基底爬行时, 后肢的支撑方式更接近“直立”, 而前肢更接近“匍匐”, 这种“直立”姿态有助减少关节力矩。在步态的基础上, 结合扬子鳄爬行时四肢的地面反力, 发现扬子鳄的前肢主要起到了制动的作用, 而后肢主要起推进作用。通过强化学习对机器人进行训练, 复现了鳄鱼的步态。研究有助于深入理解鳄类动物的运动模式和生态适应性, 并为仿生机器人设计提供理论参考。

关键词: 扬子鳄; 仿生学; 生物运动力学; 步态特征; 地面反力

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0035-05

Study on Kinematics and Dynamics of Chinese Alligator Crawling on Horizontal Hard Substrates

WU Xuan¹, YU Jianqiang¹, LI Lei¹, PAN Tao², LI Jinchao³

(1. Robotics Laboratory, China Nanhu Academy of Electronics and Information Technology, Jiaxing 314000, China;

2. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This study discusses Chinese alligators' kinematic and dynamics characteristics during crawling on a horizontal, rigid, flat surface. Using a high-precision motion capture system combined with a force sensor platform, the gait patterns and ground reaction forces of the limbs during steady-speed crawling on a flat surface was recorded. The results indicate that the hindlimbs adopt a more cursorial posture, while the forelimbs are closer to a sprawling, which helps to reduce joint torques. Based on the gait patterns and the ground reaction forces of the limbs, it is found that the forelimbs primarily function for braking, while the hindlimbs mainly contribute to propulsion. The robot was trained by reinforcement learning and the gait of alligator was reproduced. This study is conducive to in-depth understanding of the locomotion patterns and ecological adaptations of crocodilian species and provides a theoretical reference for the design of bio-inspired robots.

Keywords: Chinese alligator; bionic; biomechanics; gait characteristics; ground reaction

0 引言

扬子鳄 (*Alligator sinensis*) 是中国特有的鳄类, 起源于中生代, 因此被称为爬行动物的“活化石”。作为古老的爬行动物, 它的运动行为和动力学机制对理解爬行动物的演化及其适应环境的能力具有重要的参考意义。国内对于扬子鳄的研究主要集中在栖息分布、生活习性等领域^[1-6], 却几乎没有关于扬子鳄运动行为学方面的研究。

作为与扬子鳄同属下的密河鳄, 已积累了其在运动行为学领域相当丰富的研究成果。ARIAS

等^[7-9]开展了密河鳄在不同地形下爬行时的实验, 揭示了其在复杂环境中采用的运动策略。IIJIMA 等^[10-12]则对不同年龄阶段、体型变化下的密河鳄在陆地爬行中的步态特征与肢体力学进行了比较研究, 发现其通过四肢内收缩机制来抵抗体质量增加所带来的负载变化。PENA 等^[13]从能量代谢角度对这一机制进行了进一步阐释。WALTER 等^[14]的研究则由动态转向静态, 探讨了密河鳄在泥泞环境中如何维持自身支撑。BAIER 和 COLLETT 等^[15-16]的研究则由动态转向静态, 探讨了密河鳄在泥泞环境中如何维持自身支撑。

基金项目: 国防基础科研计划资助项目 (JCKY2023210C002)

第一作者简介: 吴晔 (1987—), 男, 安徽合肥人, 副研究员, 博士, 研究方向为仿生黏附和爬壁机器人, wuxuan@cnaeit.com。

此外,HUNT^[17]研究了密河鳄的视觉;RODRIGUES等^[18]探讨了密河鳄的下颚结构;SWORDS等^[19]则关注了密河鳄的攀爬能力。

扬子鳄与密河鳄在生物分类上处于同一属下的不同种,其结构与运动表现上必然存在相近之处。但目前国内外对于扬子鳄在运动行为学方面的研究还未开展。本文依托南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所提供的2×5大型力测量阵列,研究亚成年扬子鳄在水平硬质基底爬行运动行为与动力学,填补了扬子鳄这一物种在生物运动力学领域的空白,并为后续相关研究打下一定基础。

1 材料与方法

1.1 实验对象

扬子鳄,脊索动物门(Chordata),爬行纲(Reptilia),鳄形目(Crocodylia),鼈科(Alligatoridae),鼈属(*Alligator*)。实验用扬子鳄3只(体质量分别为3.52 kg、3.90 kg、4.24 kg,体长分别为95 cm、101 cm、107 cm)。扬子鳄源自安徽芜湖大江扬子鳄繁育基地,从基地运送到实验场地,用巴沙鱼片养殖于大水箱中,温度维持在29°,湿度在50%~60%,定期打开窗帘使鳄鱼接受一定时间太阳光照。

1.2 运动学数据与力学数据采集

在运动行为的拍摄和力的测量期间,如图1所示,用有机玻璃制作的透明通道限制鳄鱼的运动,使其保持直线运动以便于摄像机记录运动图像。

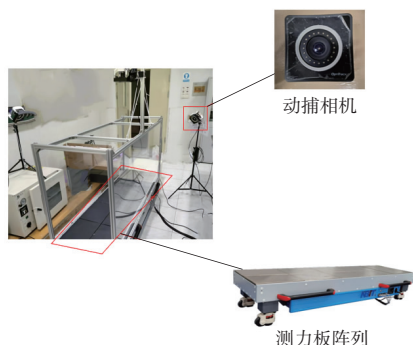


图1 实验台实物图

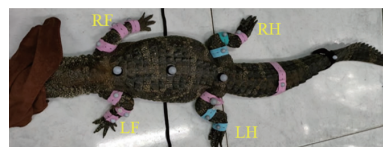
4台高速相机(Optitrack P17W,帧率为30~360帧/s,分辨率为1 664×1 008(px),色彩为灰度)组成相机矩阵,布置在行走通道周围。4台相机采用直接线性变换(DLT)方法。在DLTdv8^[20]

中依次点击静态坐标台的端点以及追踪标定杆一端的反光点,再将得到的二维点坐标导入EasyWand5中完成3D相机的构建。

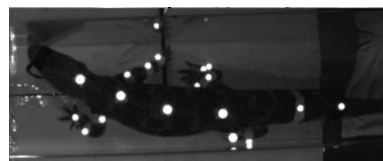
测力平台采用2×5三维测力板阵列(图1),尺寸为1 770 mm×550 mm×390 mm,量程($F_x/F_y/F_z$)为4 000 N/4 000 N/4 000 N,分辨率($F_x/F_y/F_z$)为4 N/4 N/4 N,精度($F_x/F_y/F_z$)不大于0.2%FS。

1.3 实验过程

实验前在扬子鳄的关节处贴上反光标记点,以便于视频观察及后续运动学数据处理,如图2所示。图2中RF为右前肢,LF为左前肢,RH为右后肢,LH为左后肢。盖上头巾遮蔽扬子鳄视线能在附上标记点时使其保持安静。由于扬子鳄到新环境会有部分应激反应,人为的扰动会让扬子鳄保持警惕并停止爬行,故实验中扬子鳄被置于爬行通道一端,之后人员撤离,并远离扬子鳄视线范围,四周用围栏挡住,只留一条爬行通道,如图3所示,让扬子鳄沿着这条通道自由爬行。



(a) 扬子鳄反光标记点分布



(b) 动捕相机灰度图像

图2 扬子鳄的前处理

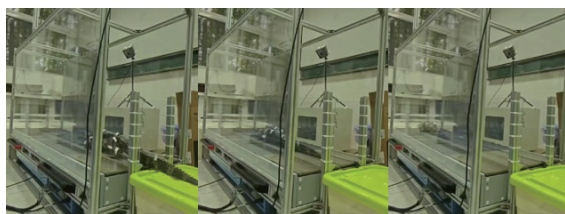


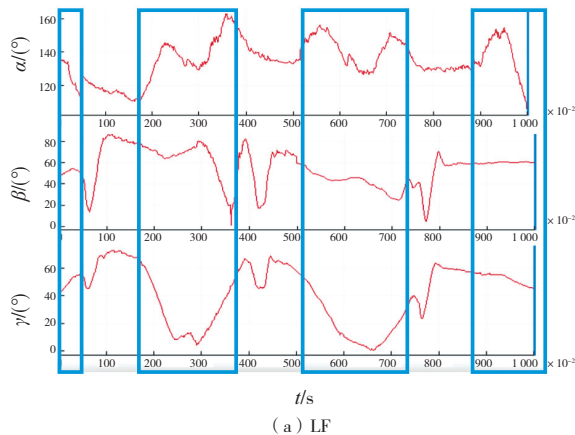
图3 扬子鳄爬行过程

2 结果

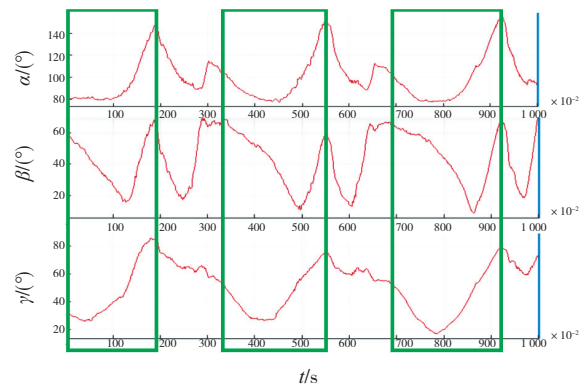
如图4所示(框线中代表支撑相),从时间维度上看,前腿的占空比(一个步态周期中支撑相占比时间)要远大于后腿的占空比(前腿约68%,后腿约40%)。同侧前、后肢(LF与LH)存在短暂

的支撑相重合时间,实际运动中表现为前肢向后摆动快要离开地面时,后肢先前摆动与地面接触,前后脚掌此时距离达到最小值。对侧前、后肢(RF与LH)的支撑相和摆动相有着大幅度重合,但后肢的摆动相和支撑相相对前腿都稍稍滞后一段时间,且在LF支撑相开始阶段,RF与LH支撑相快要结束时,三者的支撑相存在短暂的重合时间,这意味着鳄鱼在水平爬行的步态是一种介于对角步态与三角步态之间的过渡步态。

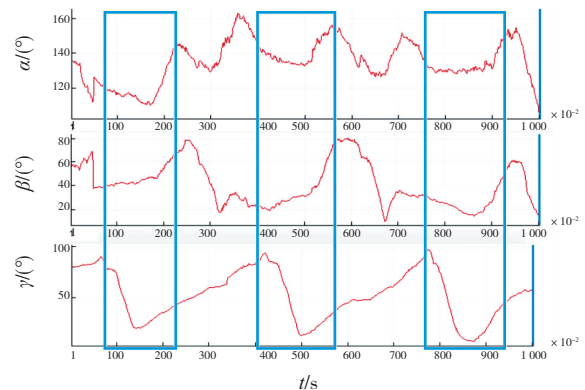
从空间维度上看,前肢(LF和RF)的 α 、 β 、 γ 几乎相同(α 、 β 、 γ 定义如图5所示),但前后肢的 α 、 β 、 γ 却存在着一定差异。以对侧前、后肢为例(RF与LH,如图5和表1所示),在支撑相时,后肢的 α 最大值与前肢相差不大,但后肢的 α 最小值却明显大于前肢。这意味在支撑相时,鳄鱼大腿与小腿的内收幅度要远小于大臂与小臂的内收幅度,越小的内收幅度意味着鳄鱼的步态越偏向“高走”步态,而不是“匍匐”步态。这种步态通过减小力臂长度,使支撑腿关节处的力矩大大减小,与运动相关肌肉及软组织承受的载荷下降。



(a) LF



(b) RF



(c) LH

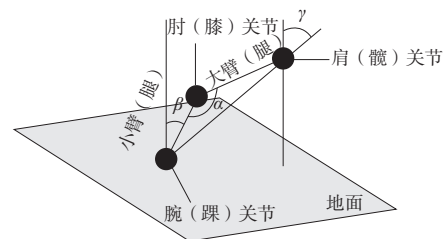
图4 鳄鱼爬行时 α 、 β 、 γ 随时间变化图

图5 鳄鱼肢体关节角度定义示意图

表1 鳄鱼在水平面爬行四肢 α 、 β 、 γ 范围单位: ($^{\circ}$)

关节	支撑相						摆动相					
	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	$\gamma_{\min}$	$\gamma_{\max}$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	$\gamma_{\min}$	$\gamma_{\max}$
LF	82.3	160.2	4.2	80.7	7.7	61.6	96.1	160.2	16.7	80.7	48.3	61.6
RF	79.2	153.4	5.3	68.4	11.2	79.2	90.1	153.4	18.8	68.4	56.1	69.2
LH	135.0	153.2	20.3	61.4	17.6	62.2	129.5	156.7	18.7	64.7	18.2	65.4
RH	134.2	152.2	21.4	63.6	19.2	65.2	129.4	155.7	19.2	68.3	17.3	64.5

根据 REILLY 对幼年密河鳄(吻肛长 220 mm)的分析,密河鳄在跑步机上爬行时(速度为 0.146 m/s),支撑相阶段 α 前肢为 $130^{\circ} \sim 160^{\circ}$,后肢 α 为 $65^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 。这说明密河鳄的大臂与小

臂的内收幅度相较扬子鳄更大,而大腿与小腿则恰恰相反,密河鳄的大腿和小腿内收幅度更小。产生二者差异的原因可能与实验个体的年龄和结构都有一定关系。

鳄鱼爬行时前肢与后肢的地面反力如图 6 所示。由于鳄鱼爬行时同侧腿存在一段短暂的同时为支撑相的时期,且该时期两侧腿距离最近(空间距离 10 cm 左右),力传感器平台单块测力板长度为 35 cm,故单块测力板上测得的数据中大多包含同时前肢和后肢共同作用的地面反作用力,而不是单腿的地面作用反力,反映在地面反作用力曲线上会出现一个小波峰(波谷)。

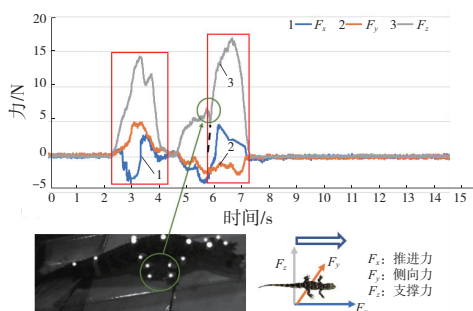


图 6 鳄鱼爬行时前后肢先后爬过同一块测力板上的地面反作用力

推进力方面,前肢与后肢的推进力峰值相近(前肢推进力峰值为 -4.0 N,后肢推进力峰值为 4.9 N),如图 7(a)所示,鳄鱼前肢刚接触到地面时,小臂与前进方向的夹角大于 90° ,故此时推进力向与前进方向相反,起阻碍前进作用;在这之后,小臂与前进方向夹角不断减少,达到 90° ,此时推进力正好为 0;在这之后继续减小,与前进方向呈锐角,此时推进力方向与前进方向相同,起到驱动前进作用。如图 7(b)所示,鳄鱼的后肢与地面开始接触时与前进方向夹角就略小于 90° ,并随着时间延长而慢慢减小,故后肢始终起推进作用。由力对时间的积分得到冲量可知,由于前肢小臂刚接触地面时与前进方向的夹角大于 90° ,抵消了大部分前进方向的冲量,故整个步态周期中前肢对于前进的贡献较小(16.2%),而后肢对于前进的贡献占了绝大部分(83.8%)。

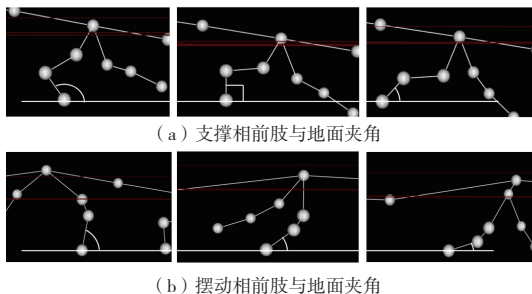


图 7 爬行时四肢的运动规律

侧向力方面,前肢与后肢侧向力方向相反,这主要与腰部扭动有关。虽然前肢侧向力峰值大于后肢(前肢侧向力峰值为 5.0 N,后肢侧向力峰值为 2.4 N),但二者在一个步态周期中冲量的代数之和约等于 0。支撑力方面,前肢与后肢的支撑力峰值存在一定差距(前肢支撑力峰值为 14.9 N,后肢支撑力峰值为 17.2 N),但鳄鱼后肢支撑相持续时间相对前肢较短,对时间积分得到冲量表明,前肢对支撑体质量方面的贡献略大于后肢(前肢 54.4%,后肢 45.6%)。

近年来,深度强化学习(DRL)技术已经在各个领域内展现其优越性。强化学习的核心思想是通过神经网络模拟策略的运行从而获得最大化奖励,这种特殊的“试错”机制和生物进化过程中的“适者生存”非常类似。

利用强化学习工具对爬行类多自由度的机器人进行训练。使用与实验环境相同的水平硬质地面,机器人选择具有 24 个自由度的多关节匍匐类构型,底层使用传统 PD 控制器模拟生物的阻抗效果。使用近端策略优化算法(PPO)对于强化学习进行迭代,由于机器人状态空间较为单一,本文 ActorCritic 框架选择 $256 \times 128 \times 128$ 的浅层神经网络。在支持大规模并行训练的仿真器 IsaacGym 上进行训练,显卡使用 RTX4090 训练约 20 h,图 8(a)为训练过程中的展示。

本文发现,在预设奖励函数不包括“扭动腰部”的奖励函数时,机器人仍然会产生扭动腰部的情况。如图 8(b)所示,机器人所产生腰部运动情况与本文所发现的扬子鳄腰部运动情况非常吻合。尽管扬子鳄扭动腰部的幅度较小,但是仍然对其运动起着关键性的作用,这一点对于机器人仍然适用。同时,尽管本文没有设计如 CPG 一样强制性的震荡控制结构,但是提取了机器人关节位置、关节速度、足地接触力等信息后,其数据仍然出现了节律性的变化规律。这和前文所述关于扬子鳄的运动和动力机制非常相似。更进一步,如图 8(c)所示,本文在设计“对角步态”函数后,机器人并没有产生预想的完全“对角步态”的情况,其运动周期停留在“对角步态”与“三角步态”之间,这种过渡步态的产生也证明了扬子鳄在进化过程中,可能由于扬子鳄的运动范围限制从而产生这种特殊的运动机制。

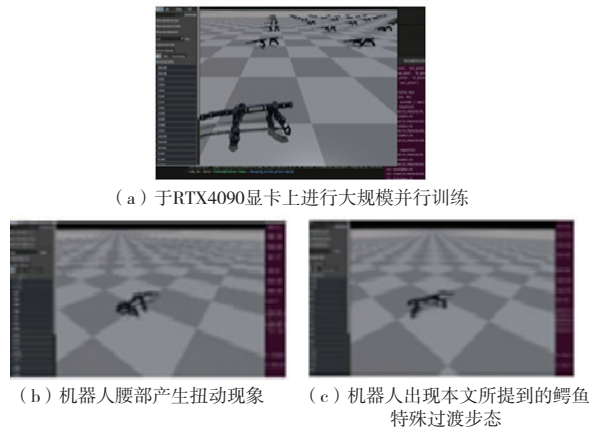


图8 利用强化学习对机器人进行训练

3 结语

本文以亚成体扬子鳄为研究对象,开展扬子鳄在水平硬质基底爬行的运动行为与动力学研究。实验结果表明:扬子鳄在水平面爬行的步态是一种介于对角步态和三脚步态之间的过渡步态,前肢的占空比相较后肢更大,同时在支撑相时前肢的内收幅度相较后肢更大,这意味着后肢更接近“直立”,这可能是因为后肢的支撑力峰值力相较前肢更大且后肢长度大于前肢,这两点将导致后肢关节处的力矩大幅增加,而采取这种接近“直立”式的姿态能有效减少关节力矩。在步态的基础上,结合扬子鳄爬行时四肢的地面反作用力,发现扬子鳄的前肢推进力方向先是与前进方向相反,而后逐渐过渡到与前进方向相同,说明扬子鳄的前肢主要起到了制动的作用,而后肢主要起推进作用。

本文的数据范式可以为机器人模仿学习和强化学习提供新的数据先验思路,所总结的爬行生物特有的运动学和动力学规律可以作为机器人运动设计的关键依据,让仿生机器人如真实生物一般在狭小的空间穿行,或者在泥泞、沼泽和浅滩等复杂环境中运动。

参考文献:

- [1] 刘聪,陶启荣,赵晓燕,等. 扬子鳄 CXCL8 基因的生物信息学分析及表达量测定[J]. 中国兽医科学, 2024, 54(5): 641-649.
- [2] PAN T, MIAO J S, SUN K, et al. Genomic insights and the conservation potential of captive breeding: the case of Chinese alligator [J]. Science Advances, 2025, 11(14): e7980.
- [3] SUN H J, CHEN M Y, CHANG Q Q, et al. Microbial

diversity and composition on the surface of Chinese alligator eggs with different phenotypes during artificial incubation [J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16: 1567353.

- [4] SUN K, LI W G, FAN G W, et al. Ecological networks of allometric growth, feeding behavior and gut microbiota in Chinese alligator hatchlings [J]. Asian Herpetological Research, 2024, 15(2): 104-114.
- [5] WANG C, LI C C, LIU P, et al. The impact of host development and density stress on the diversity of microbial communities in the gut and its surrounding environment of the Chinese alligator [J]. Ecology and Evolution, 2024, 14(7): e11667.
- [6] YANG L Y, LING J N, LU L L, et al. Identification of suitable habitats and priority conservation areas under climate change scenarios for the Chinese alligator (*Alligator sinensis*) [J]. Ecology and Evolution, 2024, 14(6): e11477.
- [7] ARIAS A, MENDOZA E, AZIZI M. Alligators use elastic energy storage in ankle extensors during steady state walking [J]. Integrative and Comparative Biology, 2023, 63(Suppl.1): 20-27.
- [8] ARIAS A, PENA M, AZIZI M. Upright limb posture reduces muscle work during locomotion [J]. Integrative and Comparative Biology, 2024, 64(Suppl.1): 22-31.
- [9] ARIAS A A, AZIZI E. Modulation of limb mechanics in alligators moving across varying grades [J]. 2023, 226(22): jeb246025.
- [10] IJIMA M, DARLINGTON J, MUNTEANU V D, et al. Scaling of gait, limb posture, forces, and inertial properties in terrestrial locomotion of American alligators across a thousand-fold increase in body mass [J]. Integrative and Comparative Biology, 2023, 63(3): 664-680.
- [11] IJIMA M, DARLINGTON J, VLIET K, et al. Terrestrial locomotion of American alligators across body size ranging three orders of magnitude [J]. Integrative and Comparative Biology, 2023, 63(Suppl.1): 213-214.
- [12] IJIMA M, MAYERL C J, DAVID MUNTEANU V, et al. Forelimb muscle activation patterns in American alligators: insights into the evolution of limb posture and powered flight in archosaurs [J]. Journal of Anatomy, 2024, 244(6): 943-958.
- [13] PENA M, CAO Q, SHAYEGH O, et al. Proximo-distal gradient in limb muscle architecture and in vivo mechanical function in alligators [J]. Integrative and Comparative Biology, 2023, 63(Suppl.1): 353-359.

(下转第 49 页)

- 工程学报. (2025-05-13) [2025-09-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242552>.
- [2] 艾精文,党晓婧,吕启深,等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):122-128.
- [3] 郝宇亮,陈家伟,李宣健楠,等. 特高压交流 GIL 气密性检测分析和试验研究[J]. 高压电器,2025,61(7):203-207,233.
- [4] 陈允,邱宁,崔博源,等. 特高压 GIS 断路器用管型绝缘拉杆的国产化研制与性能验证[J/OL]. 高电压技术, (2025-06-12) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250068>.
- [5] 周录波,田嘉鹏,王栋. 融合历史案例与监测数据的 GIS 设备智能状态评估[J]. 高压电器,2025,61(9):50-57.
- [6] 张滢滢,郝艳捧,米鸿儒,等. GIS 绝缘子固化特征与缺陷产生机理研究进展[J/OL]. 高电压技术, (2025-08-29) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250476>.
- [7] 李鹏,雷雨秋,刘宗杰,等. 基于决策树算法的断路器弹簧操动机构振动诊断技术[J]. 高压电器,2021,57(9):1-8,18.
- [8] 赵陈琛,张国钢,刘洁,等. 基于物理信息和迁移网络的高压断路器弹簧操动机构机械参数辨识及故障诊断[J/OL]. 电工技术学报, (2025-07-14) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250521>.
- [9] 范兴明,许洪华,李涛,等. 基于 SMA-VMD 和能量熵的高压断路器故障诊断[J]. 高电压技术,2024,50(12):5248-5258.
- [10] 刘煜,刘宇,朱文才,等. 高压断路器操动机构液压阀控系统流场动态特性[J]. 液压与气动,2025,49(3):73-80.
- [11] 雷琴,王永良,李宁,等. 碟簧液压操动机构的建模与仿真[J]. 液压与气动,2015,39(1):92-95,100.
- [12] 周仙娥,史芳颖,康子雄,等. 断路器用液压操动机构储能碟簧的可靠性研究[J]. 高压电器,2015,51(1):98-104.
- [13] 刘焱,崔博源,占自涛,等. 液压碟簧操动机构机械特性仿真与试验研究[J]. 高压电器,2019,55(6):15-22,30.
- [14] 蒋龙,张润田,陈静,等. 一种液压操动机构动密封结构的优化改进[J]. 液压气动与密封,2021,41(3):66-70.
- [15] 李抒灿,陈蔚芳,李苗苗. 安装过盈量和水压对唇形密封圈密封性能的影响研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):48-51,63.
- [16] 王玺,仲健林,夏文嘉,等. 组合密封圈密封性能仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):130-133.
- [17] 曹艳科,王浩先,王旭,等. 大型国产气动 Y 型密封圈在机械压力机上的应用[J]. 润滑与密封,2016,41(5):139-141,145.
- [18] 尚新胜,李梦婷,张兆想,等. 内置环形弹簧的橡胶密封性能分析及参数优化研究[J/OL]. 润滑与密封, (2025-08-20) [2025-09-17]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.th.20250820.1125.004>.
- [19] 卢海城,王昊杰,张荣,等. 哑铃型充气橡胶密封圈密封性能研究[J/OL]. 润滑与密封, (2025-06-30) [2025-09-17]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260>.
- [21] 李铁,张全民,熊焱然,等. 碟簧液压机构关键部件动态特性分析[J]. 液压与气动,2025,49(8):79-88.
- [21] 张璐凡,姜薄士,张鹏启,等. 宏微运动平台导轨架模态分析及优化设计[J/OL]. 机械设计与制造, (2025-08-08) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20250808.001>.

收稿日期:2023-12-04

(上接第 39 页)

- [14] WALTER C, CRAMBERG M, YOUNG B A. The gator grapple: pedal anchoring in the American alligator (*Alligator mississippiensis*) [J]. *Amphibia-Reptilia*, 44(3):313-323.
- [15] BAIER D, TURNER M, TRAMMELL E, et al. XROMM analysis of the distal forelimb of *Alligator mississippiensis* during the high walk [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2023, 63(Suppl.1):27-28.
- [16] COLLETT A. Ontogeny-induced shape changes in the proximal femur of the American alligator (*Alligator mississippiensis*) [C]. *SICB 2023 Annual Meeting Abstracts. Integrative and Comparative Biology*, 2023, 63(Suppl.1):354.
- [17] HUNT T. The ontogeny of visual fields in *Alligator mississippiensis* [C]. *SICB 2024 Annual Meeting Abstracts. Integrative and Comparative Biology*, 2024, 64(Suppl.1):240.
- [18] RODRIGUES J, BARTER S, DAS R. Biomechanical analysis of an alligator mandible structure [M]//Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials. Cham:Springer Nature Switzerland,2024:141-151.
- [19] SWORDS A, CRAMBERG M, PARKER S, et al. Alligatorascension: climbing performance of *Alligator mississippiensis* [J]. *Amphibia-Reptilia*, 45(1):37-44.
- [20] HEDRICK T L. Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2008,3(3):034001.

收稿日期:2024-11-05