

基于刚柔耦合模型的仿生鸭机器人运动分析*

牛岩¹ 石立伟^{1†} 郭书祥²

(1.北京理工大学 医学技术学院,北京 100081)

(2.北京理工大学 生命学院,北京 100081)

摘要 通过 Hypermesh 有限元软件及 Adams 动力学软件建立了所设计的一种仿生鸭机器人的刚柔耦合模型以更好地模拟真实的运行工况.计算了小腿的动态受力及形变情况,并分析了影响蹼足运动参数的两种因素,即小腿结构是否形变及腿部关节摩擦系数.结果表明:在机器人运行过程中,小腿满足强度和刚度要求;小腿形变导致的蹼足运动学参数误差会使机器人运行时的精确性变差;对关节进行润滑可以减小机器人移动时受到的冲击.仿真计算结果可为后续机器人结构优化提供数据参考.

关键词 仿生鸭机器人, 有限元, 刚柔耦合, 动力学分析, 关节摩擦

中图分类号:TP242

文献标志码:A

Kinematics Analysis of Duck-inspired Robot Based on Rigid-Flexible Coupling Model*

Niu Yan¹ Shi Liwei^{1†} Guo Shuxiang²

(1.Beijing Institute of Technology, School of Medical Technology, Beijing 100081, China)

(2.Beijing Institute of Technology, School of Life Science, Beijing 100081, China)

Abstract In order to better simulate practical conditions, a rigid-flexible coupling model of a designed duck-inspired robot was established using Hypermesh and Adams which are finite element software and dynamics software respectively. The dynamic stress and deformation of the shank were calculated. And two factors impact on the kinematics parameters of the webbed foot were analyzed, namely the deformation of shank and the friction coefficient of the leg joints. The results showed that during the operation of the robot, the shank met the requirements for strength and stiffness. The kinematics parameter error of webbed feet caused by the deformation of the shank will affect the accuracy during motion. Lubricating at joints can decrease the shock of robot. The simulation results can provide reference for the subsequent optimization of robot structures.

Key words duck-inspired robot, finite element method, rigid-flexible coupling, dynamic analysis, joint friction

2022-12-28 收到第 1 稿,2023-03-19 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(62273042, 61773064, 61503028), National Natural Science Foundation of China (62273042, 61773064, 61503028).

† 通信作者 E-mail:shiliwei@bit.edu.cn

引言

仿生学是生物科学和工程技术相结合的一门学科,通过学习观察、模仿复制和再造生物系统的结构、功能、工作原理及控制机制,来改进现有的或创造新的机械、仪器、建筑和工艺过程^[1].近年来,由于机器人工作任务逐渐复杂,对机器人性能要求的逐渐提高,学者们开始借鉴自然界的动物的运动模式,并开拓出仿生机器人这一研究领域.

仿生机器人的设计灵感来自于动物精妙的结构和灵巧的动作.此外,它们还具有一些优势,如越障能力强,机动性高,跨介质移动迅速等^[2-3].运动学与动力学分析是仿生机器人研究的基础工作之一^[4,5].学者们对仿生机器人的运动学分析做了大量的研究工作.

王晓磊等^[6]基于零冲击原则规划的足端轨迹,计算并绘制了仿真计算与理论计算的结果误差曲线,验证了所推导仿生四足机器人的运动学正反解的正确性.张春燕等^[7]基于 Jansen 连杆机构设计了一种多足仿生机器人,以运动学解为基础对腿部结构的曲柄长度及机架水平倾角进行了优化.陈贵亮等^[8]对所设计的仿猫机器人起跳过程中的运动学与动力学进行分析,并验证了提高机器人跳跃效率的方法.王晓磊等^[9]分析了串并混联四足仿生机器人的步长与驱动液压缸输出力之间的关系,及不同步态参数对能耗的影响,得出降低机器人能耗的方法.

上述研究表明,运动学与动力学分析对仿生机器人研究极为重要,但鲜有学者考虑机构的变形对机器人末端产生的影响,这是因为传统机器人多采用安全裕度过大的结构以保证结构刚度.这样的结构也会伴随机器人能耗高、适应性差等问题.为提高机器人推进效率,降低机器人的能耗,提高机器人的承载能力,需要对机器人的自身结构进行轻量化设计.但轻量化设计后的结构在运动过程中会产生一定程度的柔性振动^[10],进而对机器人整体产生一定的影响.此外,在机器人实际运行过程中,推进机构的关节处会不可避免地受到摩擦力的影响,摩擦力作为常见的干扰因素,会影响整个腿部推进机构的稳定性.学者们多通过理论推导和仿真分析的方式分析了摩擦力带来的影响^[11-13].

刚柔耦合建模分析方法近年来逐渐成为主要的动力学分析方法之一.该方法可以考虑机器人部

分零件的柔性特性,获得更接近实际工况的计算结果^[14-15].其在计算效率和计算精度两方面要整体优于使用单一动力学分析或静力学分析方法.

鸭子作为常见的一种游禽,有着优秀的环境适应性和推进效率^[16].因此,本文设计了一种仿生鸭机器人.为更真实的模拟仿生鸭机器人在运动过程中的受力情况,本文采用刚柔耦合建模方法,对机器人陆上步态中小腿结构的应力及变形情况进行分析,同时计算机构变形及关节摩擦对运动学与动力学性能的影响.分析结果可为后续工作中对仿生鸭结构的优化设计提供理论参考.

1 刚柔耦合模型建立

本文所设计的仿生鸭机器人采用串联机构进行推进,主要由大腿、小腿、足蹼三部分组成,如图1所示.其中每个关节处均安置一个舵机以控制相应机构的运动.其中小腿主要负责向脚蹼传递由大腿产生的扭矩及扩大腿部的运动范围.为尽可能地减小腿部机构运动时的惯量及在水下运动时受到的阻力,小腿设计为由两 U 形板通过螺栓连接而成.该部件的性能决定了推进机构能否实现预期的

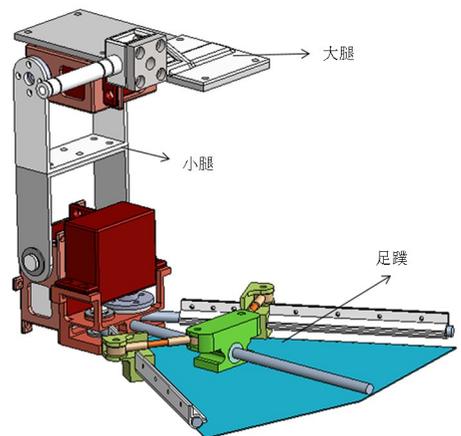


图1 仿生鸭机器人推进结构

Fig.1 Propulsion structure of duck-inspired robot

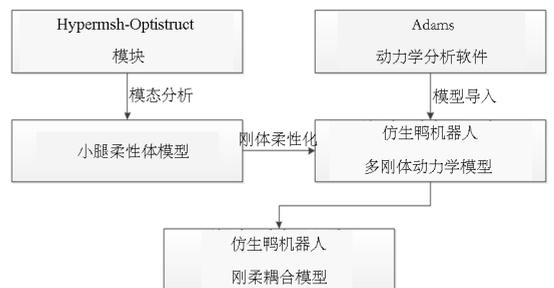


图2 刚柔耦合多体动力学分析流程图

Fig.2 Technology roadmap of rigid-flexible coupling multi-body dynamic simulation

功能,因此,有必要验证小腿结构在运动过程中的强度及刚度.此外,由于该部件的结构特点,在仿真过程中需考虑其变形产生的影响.因此,本文将小腿结构建立为柔性体,进行刚柔耦合多体动力学分析.该仿真分析流程如图 2 所示.

1.1 柔性体模型建立

本文使用有限元分析软件 Hypermesh 中的 Optistruct 模块进行小腿柔性体模型的建立.该零件采用 45 号钢,其材料属性如表 1 所示.

表 1 45 号钢材料属性
Table 1 Example

物理属性	数值
杨氏模量/GPa	210
泊松比	0.3
密度/($g \cdot cm^3$)	7.85



图 3 小腿部件的柔性体模型

Fig.3 The flexible model of component of shank

采用四节点四面体单元对小腿模型剖分,在圆孔处对网格进行加密以使离散网格更接近原实体模型形状.剖分后的有限元模型共有 5412 个节点,16576 个单元.在关节孔处分别建立固定点以作为多体动力学计算中柔性体与相邻刚体的连接点.采用蜘蛛网法在柔性体关节孔处建立刚性区域以传递其他刚体施加给柔性体的力.在进行刚柔耦合动力学计算时,要求柔性体具有模态等零件的固有属性,因此对该柔性体模型进行 15 阶模态的计算并保留.图 3 所示为小腿部件的柔性体模型.

1.2 多体动力学模型建立

将所生成的柔性体导入至多体动力学分析软件 Adams 中,将已经建立完成的仿生鸭多体动力学模型中的小腿部件替换为柔性体部件,并施加相同的运动副.由于左右腿步态仅相位不同,因此,仅将左腿中的小腿刚体替换为柔性体.图 4 为建立完成的多体动力学模型.在 Adams 中,使用旋转驱动代替舵机的驱动作用.将旋转驱动分别施加在腿部关节处,使用“STEP”函数定义各舵机的旋转角度随时间变化的关系,以实现机器人预期的运动.该机器人在陆地上每完成一周行走需完成右脚抬起左脚蹬地与左脚抬起右脚蹬地两个步行动作,共耗时四秒.蹠足与地面间的相互作用需分为法向行为与切向行为,其中法向行为采用碰撞函数方法,即由于两物体在运动时的相互渗透而产生接触力作用;切向行为采用库伦摩擦函数,动摩擦系数为 1.8.

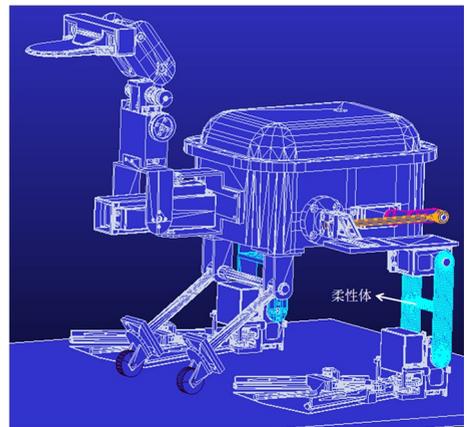


图 4 仿生鸭机器人多体动力学模型

Fig.4 Multi-body dynamic model of duck-inspired robot

2 仿生鸭机器人小腿结构动态响应分析

验证小腿结构强度与刚度是否满足需求时,常选取最危险的工况进行静力分析,但该方法不考虑结构在运动过程中的受到的动态作用.为使零件仿真计算结果更接近于实际情况,本节采用刚柔耦合建模分析方法,计算小腿零件在陆上步行运动过程中受到的应力及发生的形变.

图 5 为机器人运动至 2.81s 时,小腿结构的应力云图.此时,小腿在整个运动周期中受到最大的等效应力,为 39.97MPa,发生位置在踝关节电机输出轴处.由于在该时刻下,左脚处于落下阶段,在与

地面接触时会产生一定的冲击导致小腿结构受到的等效应力最大,但该值小于45号钢的屈服极限,满足机器人的强度要求。

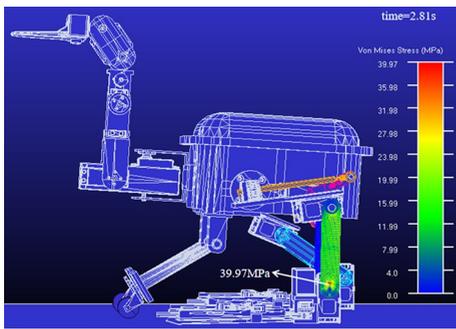


图5 小腿最大应力云图

Fig.5 Distribution of maximum stress of shank

图6为机器人运动至0.84s时,小腿结构的形变云图.此时,小腿结构在整个运动周期中发生最大的形变,为0.068mm,位置处于踝关节电机输出轴的下端.由于该时刻下,机器人左腿处于蹬地状态,该腿部姿态导致小腿边缘处的形变过大.但该形变量较小,满足机器人的刚度要求。

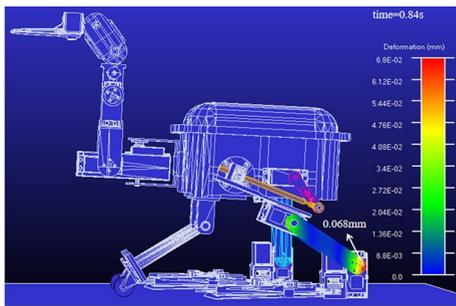


图6 小腿动态形变云图

Fig.6 Distribution of maximum deformation of shank

综上,机器人小腿结构的强度与刚度均满足要求,但后续工作可以继续优化机器人陆上步态或增加缓冲装置,进而减小小腿结构受到的等效应力及发生的形变量。

3 仿生鸭机器人运动学误差分析

仿生鸭机器人蹠足能否准确到达期望的位置是实现预定步态的关键.通常,机器人的蹠足位置通过正运动学方法进行理论推导,但该方法是一种理想模型,不考虑每个机构的变形及关节处的摩擦等因素.但在机器人实际运行过程中,上述因素产生的干扰是不可避免的.因此,本节主要分析上述因素对蹠足运动学参数的影响。

3.1 小腿形变引起的运动学误差

设仿生鸭机器人前进方向为 x 轴,垂直地面方向为 y 轴.为更清楚地分析小腿弹性形变引起的运动学误差,设置机器人行走三个周期.图7为仿生鸭机器人分别建立为多刚体模型与刚柔耦合模型时,蹠足质心 x 轴方向的位移对比图.在整个运动过程中,小腿结构发生弹性变形时会使机器人前进的位移产生不同程度的误差,当机器人运行至9.61s时产生的误差最大,为3.49mm.误差会随着机器人的前进而累积,在第三个周期结束时,机器人前进距离误差达到1.44mm。

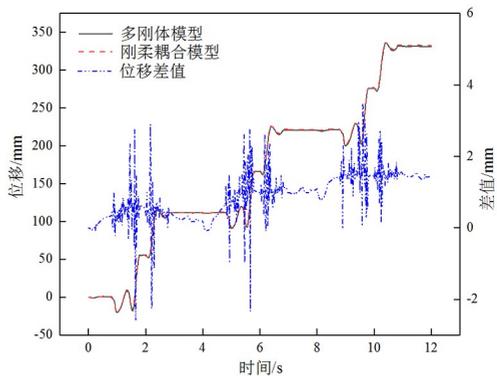


图7 蹠足质心 x 方向位移对比曲线

Fig.7 Comparison curve of x -direction displacement of webbed foot centroid

图8为蹠足质心 y 轴方向的位移对比图.在左腿抬起的过程中,蹠足质心 y 方向位移均有不同程度的误差,当运行至4.95s时,误差达到最大,为4.62mm.虽然该方向下对于机器人最终到达位置不会产生影响,但过大的误差会导致蹠足距地面过远,进而影响机器人的运动平衡,使机器人有翻倒的风险。

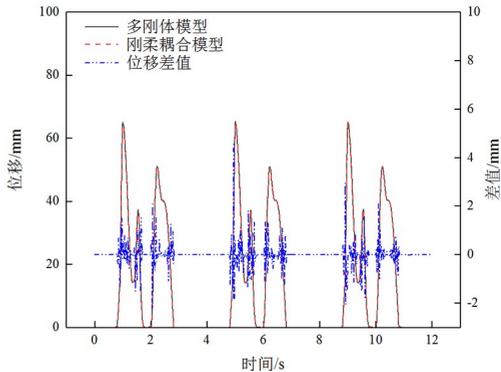


图8 蹠足质心 y 方向位移对比曲线

Fig.8 Comparison curve of y -direction displacement of webbed foot centroid

图 9 和图 10 分别为蹼足质心 x 轴与 y 轴方向的加速度对比图.对于 x 方向加速度,当机器人为多刚体模型时,蹼足质心加速度波动范围为 $-22.41 \sim 14.93\text{m/s}^2$,而当小腿为柔性体时,波动范围增加至 $-44.93 \sim 42.75\text{m/s}^2$,极差增加了 134.81%.而对于 y 方向加速度,蹼足质心加速度波动范围由 $-30.24 \sim 35.90\text{m/s}^2$ 变为 $-107.38 \sim 140.51\text{m/s}^2$,极差增加了 274.80%.小腿发生形变会使蹼足质心加速度的波动加剧,且对 y 方向加速度变化影响更大.蹼足加速度的变大会使机器人在运动过程中的稳定性变差,同时腿部结构受到的惯性力变大进而影响结构的强度与刚度.因此,在后续工作中,应对结构继续优化以减小腿部结构的振动.

表征零件受到冲击力的大小与速度变化的快慢,具有更大的实际意义,因此本节选取蹼足质心加速度进行计算与分析.

表 2 仿生鸭机器人关节属性
Table 2 Properties of joint of duck-inspired robot

名称	运动副	构件 1	构件 2
髋关节	旋转副	防水外壳	大腿
膝关节	旋转副	大腿	小腿
踝关节	旋转副	小腿	蹼足

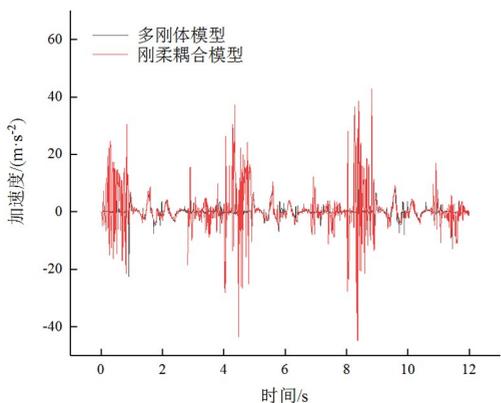


图 9 蹼足质心 x 方向加速度对比曲线
Fig.9 Comparison curve of x -direction acceleration of webbed foot centroid

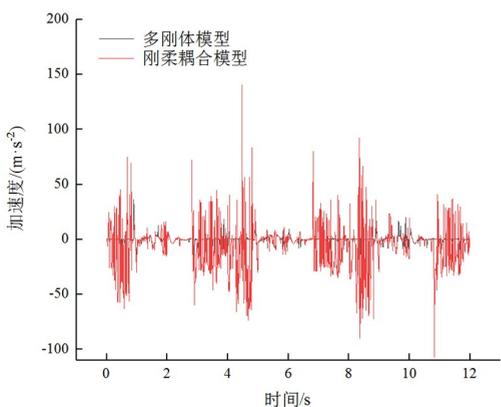


图 10 蹼足质心 y 方向加速度对比曲线
Fig.10 Comparison curve of y -direction acceleration of webbed foot centroid

3.2 关节摩擦引起的运动学误差

该仿生鸭机器人腿部结构共包括三个关节,各关节位置及施加运动副如表 2 所示.分别设置各运动副的动摩擦系数为 0.1、0.2 及 0.3,分析关节摩擦系数对机器人运动学误差的影响.由于加速度能够

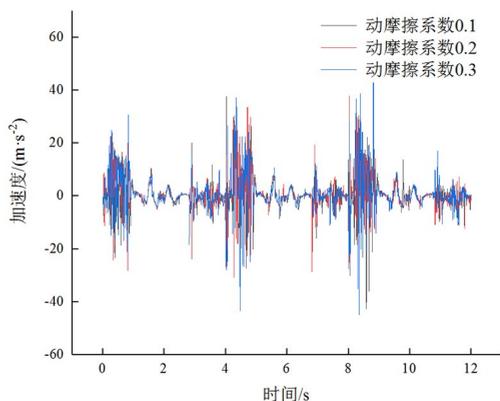


图 11 不同关节摩擦系数对蹼足质心 x 方向加速度对比曲线
Fig.11 Comparison curve of x -direction acceleration of webbed foot centroid under different friction coefficient

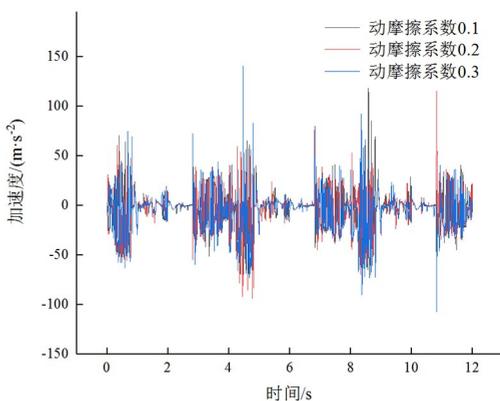


图 12 关节摩擦对蹼足质心 y 方向加速度影响曲线
Fig.12 Comparison curve of y -direction acceleration of webbed foot centroid under different friction coefficient

图 11 与图 12 分别为不同关节摩擦系数下,左腿蹼足质心加速度对比曲线.对于蹼足质心 x 方向加速度,随着动摩擦系数的增加,加速度极差先减小后增大,且系数为 0.3 时,极差最大.当动摩擦系数为 0.2 时,极差最小,为 68.53m/s^2 ,相较动摩擦系数 0.3 时降低了 21.84%.对于 y 方向加速度,随着动摩擦系数的增加,加速度极差也在增加,当动摩擦系数为 0.1 时,极差最小为 191.82m/s^2 ,相比动摩擦系数 0.3 时降低了 22.62%.动摩擦系数的减

小会增加机器人的运动稳定性.因此,在陆上步态下,可以对关节进行适当的润滑以降低机器人加速度的波动,进而减小对机器人的冲击.

4 结论

本文建立了所设计的仿生鸭机器人的刚柔耦合模型,分析了小腿结构在运动过程中受到的应力及产生的形变.对比了在多刚体模型下与刚柔耦合模型下蹠足质心运动学参数的差异,及刚柔耦合模型下不同动摩擦系数对蹠足加速度的影响,得出如下结论:

(1)该仿生鸭机器人在运动过程中,应力及形变最大值发生位置均在踝关节电机输出轴处,且满足强度与刚度需求.

(2)当小腿发生形变时,机器人的前进方向及与地面垂直方向的位移量会产生一定的误差,并影响机器人运动的精确性与平稳性.同时,该仿生鸭机器人蹠足质心的加速度的波动也明显增加.

(3)当腿部关节动摩擦系数减小时,蹠足加速度的波动均有不同程度的减小.当机器人在陆地上行走时,可以对关节进行适当的润滑以减小机器人移动时受到的冲击.

在未来,将参考本文仿真结果对机器人小腿结构进行优化.设计并在关节处安装弹性驱动器以降低机器人在移动时受到的扰动,并搭建机器人样机以进行实验验证.

参考文献

- [1] 简珣. 仿生机器人研究综述及发展方向 [J]. 机器人技术与应用, 2022(3): 17-20.
- [2] BAI X J, SHANG J Z, LUO Z R, et al. Development of amphibious biomimetic robots [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2022, 23(3): 157-187.
- [3] REN K, YU J C. Research status of bionic amphibious robots: a review [J]. Ocean Engineering, 2021, 227: 108862.
- [4] 刁斌斌, 徐鉴, 何健锋, 等. 一款仿蚯蚓机器人的纤维驱动特性建模与辨识 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(2): 1-11.
DIAO B B, XU J, HE J F, et al. Actuation feature modeling and identification of a fiber-driven earth-
- worm-like robot [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(2): 1-11. (in Chinese)
- [5] 周柏李, 方虹斌, 徐鉴. 模块化可重构机器人动力学研究进展 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(1): 1-17.
ZHOU B L, FANG H B, XU J. Advances in dynamics of modular reconfigurable robots [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(1): 1-17. (in Chinese)
- [6] 王晓磊, 刘祥, 张强池. 一种仿生四足机器人腿部机构的运动学分析与验证. 机械设计与制造, 2023, No.384(02): 286-289+294.
WANG X L, LIU X, ZHANG Q C. Kinematic analysis and verification of leg mechanism on a bionic quadruped robot [J]. Mechanical Design and Manufacture, 2023, 384(2): 286-289+294. (in Chinese)
- [7] 张春燕, 丁兵, 何志强, 等. 转盘式多足仿生机器人的运动学分析及优化 [J]. 工程设计学报, 2022, 29(3): 327-338.
ZHANG C Y, DING B, HE Z Q, et al. Kinematics analysis and optimization of rotary multi-legged bionic robot [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(3): 327-338. (in Chinese)
- [8] 陈贵亮, 庄昌瑞, 杨冬, 等. 对仿猫跳跃机器人起跳过程中腰部作用的分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3629-3634.
CHEN G L, ZHUANG C R, YANG D, et al. Analysis of waist function in cat-like robot take-off process [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3629-3634. (in Chinese)
- [9] 王晓磊, 金振林, 李晓丹, 等. 串并混联四足仿生机器人动力学建模与分析 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 401-412.
WANG X L, JIN Z L, LI X D, et al. Dynamic modeling and analysis of serial-parallel hybrid quadruped bionic robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 401-412. (in Chinese)
- [10] 尹海斌. 刚柔耦合动力学——轻量化协作机器人设计与控制的力学基础——解读《机器人刚柔耦合动力学》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(24): 3020-3023.
- [11] 管恋哲, 张振山, 崔国华, 等. 考虑关节摩擦的刚柔耦合机械臂末端抖动模拟与分析 [J]. 机床与液压, 2022, 50(21): 54-58.
GUAN L Z, ZHANG Z S, CUI G H, et al. Simula-

- tion and analysis of end vibration of rigid-flexible coupling manipulator considering joint friction [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(21): 54—58. (in Chinese)
- [12] 李研彪, 郑航, 孙鹏, 等. 考虑关节摩擦的 5-PSS/UPU 并联机构动力学建模及耦合特性分析 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(3): 43—52.
LI Y B, ZHENG H, SUN P, et al. Dynamic modeling with joint friction and research on the inertia coupling property of a 5-PSS/UPU parallel manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(3): 43—52. (in Chinese)
- [13] 山显雷, 程刚. 考虑关节摩擦的 3SPS+1PS 并联机构显式动力学建模研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(1): 28—35.
SHAN X L, CHENG G. Explicit dynamic modeling of a 3SPS+1PS parallel manipulator with joint friction [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 28—35. (in Chinese)
- [14] 虞沈林, 陈刚. 驾驶机器人换挡机械手刚柔耦合运动分析 [J]. *汽车工程*, 2018, 40(6): 733—740+748.
YU S L, CHEN G. Rigid-flexible coupling kinematics analysis of shifting manipulator for robot driver [J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(6): 733—740+748. (in Chinese)
- [15] 李金良, 张斌, 舒翰儒, 等. 下肢外骨骼康复机器人刚柔耦合分析与仿真 [J]. *机床与液压*, 2022, 50(7): 118—122.
LI J L, ZHANG B, SHU H R, et al. Rigid-flexible coupling analysis and simulation of lower limb exoskeleton rehabilitation robot [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(7): 118—122. (in Chinese)
- [16] 张晓冬, 李媛媛. 鸭脚趾触地阶段的运动学建模与分析 [J]. *机电产品开发与创新*, 2022, 35(2): 87—90.
ZHANG X D, LI Y Y. Kinematics modeling and analysis of duck's toe touching the ground [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2022, 35(2): 87—90. (in Chinese)