

文章编号: 1674-8190(2024)03-157-10

# 直升机腿式起落架机构动力学研究

刘昊林, 刘小川, 任佳, 王计真

(中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 多用途、智能化和强地形适应性是未来直升机发展的重要趋势。起落架是保障直升机起降安全的关键部件, 传统起落架的地形适应能力较差, 针对直升机在复杂地形环境下如何实现平稳着陆的难题, 利用仿生学设计理念设计一种腿式起落架系统。首先从腿式起落架设计需求出发, 对起落架构型进行分析并完成腿部结构设计; 然后基于设计的腿部机构, 完成其运动学分析和动力学分析, 建立相应模型, 以此作为腿式起落架运动控制的基础; 最后在实验室完成腿式起落架的运动测试, 证明了结构设计的合理性和着陆的稳定性。

**关键词:** 腿式起落架; 构型设计; 运动学分析; 动力学分析

中图分类号: V226; TP23

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.16

## Research on dynamics of helicopter leg landing gear mechanism

LIU Haolin, LIU Xiaochuan, REN Jia, WANG Jizhen

(National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research  
Institute of China, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Multipurpose, intelligent, and strong terrain adaptability are important trends in the development of helicopters in the future. The landing gear is a key component to ensure the safety of helicopter takeoff and landing. Due to the poor terrain adaptability of the traditional landing gear, a leg landing gear system is designed using the bionics design concept to solve the problem of the helicopter's smooth land observation in complex terrain environment. Starting from the design requirements of leg landing gear, the landing architecture is analyzed and the leg structure design is completed. Then, based on the designed leg mechanism, the kinematics analysis and dynamics analysis are completed, and the relevant models are established as the basis for the motion control of the leg landing gear. Finally, motion testing of the leg landing gear is completed in the laboratory, proving the rationality of the structural design and the stability in the landing.

**Key words:** leg landing gear; configuration design; kinematics analysis; dynamics analysis

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2024-05-14

基金项目: 航空科学基金(20184213011)

通信作者: 刘小川(1983-), 男, 博士, 研究员。E-mail: asri02@163.com

引用格式: 刘昊林, 刘小川, 任佳, 等. 直升机腿式起落架机构动力学研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 157-166.

LIU Haolin, LIU Xiaochuan, REN Jia, et al. Research on dynamics of helicopter leg landing gear mechanism[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 157-166. (in Chinese)

## 0 引言

随着直升机执行任务的复杂化和直升机技术的智能化,多用途、智能化和强地形适应性是未来直升机发展的重要趋势<sup>[1]</sup>。目前,中大型直升机主要采用轮式起落架,小型直升机主要采用滑橇式起落架,这两种起落架在起降过程中对地形环境要求苛刻,通常要求在平整、密实、静态的结构化地形完成起飞和着陆操作,必要时还需要建立专用的着陆场地<sup>[2-3]</sup>。机轮式和滑橇式起落架对着陆地形环境要求较高,现阶段通常根据直升机使用场景建立专用的起降平台,这使得直升机使用范围大大受限。当直升机在复杂环境或者难以找到平稳着陆的地形条件下工作时,这会使直升机起降受限,影响执行任务的效率。因此传统的直升机机轮式和滑橇式起落架需要改进,增强直升机对着陆环境的地形适应性并且扩大直升机应用范围,提升其起降过程的安全性。

传统形式起落架经过数十年发展,其构型设计已经接近理论性能极限。目前国内对于直升机自适应起落架的研究还处于探索阶段,部分设计方案仍处于概念阶段,亟需开展面向复杂地形自适应起落架的深入研究。所能查询到的相关研究成果主要来自国外。

国外,美国佐治亚理工学院的Kiefer等<sup>[4]</sup>在DARPA项目资助下率先研制了一套腿式自适应着陆系统,该套着陆系统由4条对称分布的机械腿构成,每条机械腿具有两个旋转自由度以保证空间运动能力,通过4条腿的协调动作实现直升机复杂地形的降落,并通过Monte Carlo仿真和实验,初步验证了该腿式起落架在复杂地形环境着陆的鲁棒性;俄罗斯斯科尔科沃创新中心的Sarkisov等<sup>[5]</sup>设计了一种铰接腿式起落架,该起落架由4条机械腿构成,每条腿有两个自由度,通过足端点对着陆区域进行估计,并能在复杂地形完成平稳着陆;瑞士苏黎世联邦理工学院的Stolz等<sup>[6]</sup>设计了一种腿式自适应起落架,每条腿都能实现单独力控,并在着陆阶段实现了每条腿的自主控制,基于78 kg级无人直升机平台完成着陆验证试验。

国内,南京航空航天大学的王晓晖等<sup>[7]</sup>设计了一种特殊地形液压伸缩杆式直升机起落架,通过控制液压杆伸缩来适应不同复杂地形,并举例说明了方法的可靠性和工程可实现性;郑州大学的

孟祥睿等<sup>[8]</sup>设计了一种全地形直升机起落架,每条腿由旋转机构、伸缩机构和传感器构成,通过传感器的参数来调整支撑腿的旋转角度和伸缩长度,从而实现直升机的全地形起降。

近年来,作者研究团队一直致力于地形自适应起落架技术研究。2018年,基于多旋翼无人机平台设计了一种腿式起落架,在斜面、台阶等多种复杂地形完成了飞行测试<sup>[9]</sup>;随后,基于180 kg无人直升机平台设计了一种六腿式起落架,在实验室和野外真实场景,验证了该腿式起落架的地形适应性<sup>[10]</sup>;由于腿部结构是由3个主动关节和1个被动弹簧组成的混合系统,在起落架着陆过程中,足端与地面接触,足端力实时变化,通过建立腿部动力学模型,结合运动学完成腿部动力学控制<sup>[11]</sup>。文献[11]针对仿生腿式起落架完成了着陆过程机体动力学分析建模与仿真,侧重于构型和运动学分析,给出了腿部动力学模型的矩阵形式,但未给出腿部动力学建模详细分析过程,本文聚焦腿部机构动力学研究,通过虚功原理完成腿部动力学详细推导过程。

通过对国内外研究现状的分析,自适应起落架的研究大都处于初步探索阶段,整体发展水平不高,只有少部分研制样机开展了测试;着陆方法以被动适应为主。因此,本文在研制腿式起落架物理样机的基础上,建立腿式起落架动力学模型,以期在起落架与复杂地形交互时实现腿部机构的高精度控制。

## 1 腿式地形自适应起落架

通过观察自然界中昆虫的栖落,结合足式机器人在结构、驱动、控制算法等方面的经验<sup>[12]</sup>,面向复杂地形着陆需求,本文设计一种腿式起落架以适应不同复杂地形的着陆,提高了直升机的应用范围。

颠覆直升机传统起落架设计理念,基于仿生学原理,设计的腿式起落架具备腿部结构行走、落区地形辨识、力反馈阻抗控制等功能,能够实现多种复杂非结构化地形的自适应着陆。通过在腿部设计不同材料/结构的缓冲吸能结构,提高了直升机紧急条件下坠撞的安全性<sup>[13-15]</sup>。直升机腿式起落架,作为多种高新技术融合的载体,具备足式机器人腿部运动控制、地形识别与重构等功能,使起

落架具备环境感知、着陆点规划、腿部结构条件与平衡等功能,大幅提高了直升机的应用范围和地形适应性<sup>[16]</sup>。

## 2 腿式起落架构型分析

面向复杂地形着陆需求,同时考虑着陆时单腿的承载,确定六足式起落架设计构型。直升机腿式起落架系统由相同的6条腿构成,对称分布在机体左右两侧,每条腿采用并联结构<sup>[17]</sup>。每条腿有三个自由度,保证其三维运动能力。通过编码器位置偏差生成力控信号,实现基于力的阻抗控制<sup>[18]</sup>。

根据构型设计方案,在满足直升机腿式起落架功能需求的基础上,优化腿部结构设计。在腿部结构减重的同时尽可能保证腿部运动空间和刚度,同时在满足起落架运动功能的基础上腿部结构尽可能简单,从而降低控制的难度。优化后腿部各主要结构,包括大腿连杆、小腿连杆、连接杆、摇臂结构如图1~图4所示。

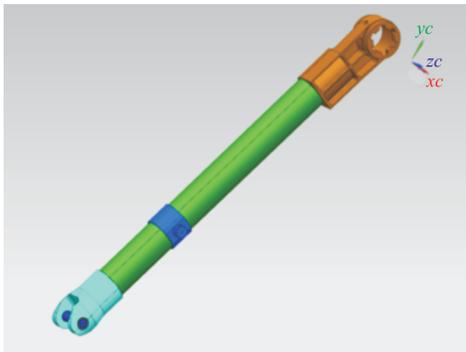


图1 大腿连杆结构图

Fig. 1 Thigh linkage structure

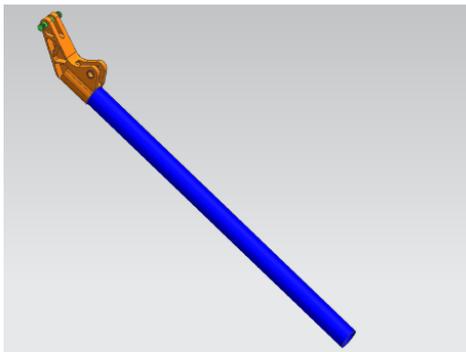


图2 小腿连杆结构图

Fig. 2 Shank linkage structure

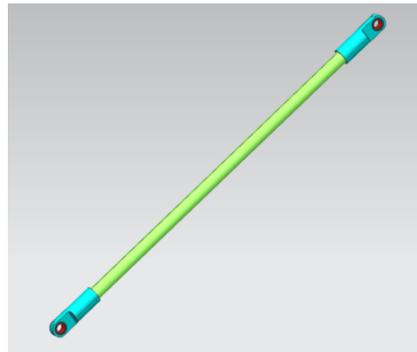


图3 连接杆结构图

Fig. 3 Connecting link structure

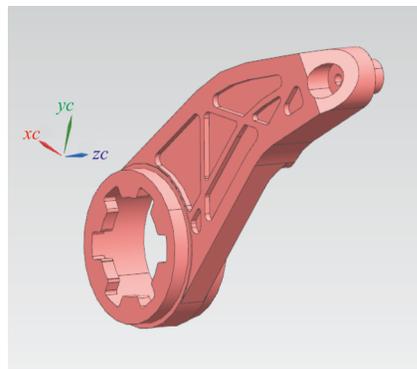


图4 摇臂结构图

Fig. 4 Rocker arm structure

此外,腿式起落架和直升机机体通过机架部件相连,机架部件结构如图5所示。

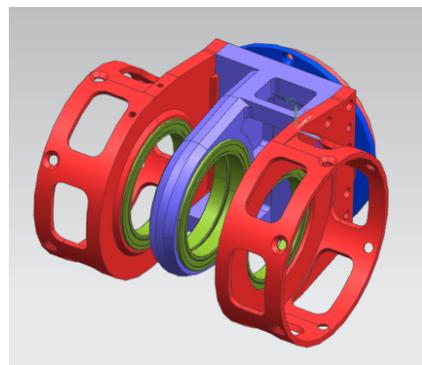


图5 机架部件结构图

Fig. 5 Rack components structure

在野外真实地形着陆时,为保证直升机机体着陆的稳定性,足端点设计为一个半径足够大的半圆形足底,使其与地面任何角度、位置接触时有足够大的接触面积和均匀的压力,以保证机身的稳定,防止腿部结构压力集中导致下陷,如图6所示。足底采用高摩擦系数橡胶,在提高着陆稳定

性的同时减少对机体的着陆冲击,通过高强度铝制法兰与小腿连杆连接。



图6 足底的结构图  
Fig. 6 Leg sole structure

腿部各部件连接处均采用高强度航空铝,连杆的中间部分选用碳纤维管,使腿式起落架整体质量较轻的同时,保证腿部结构强度。通过设计螺孔和配合,完成腿部结构装配,如图7所示。

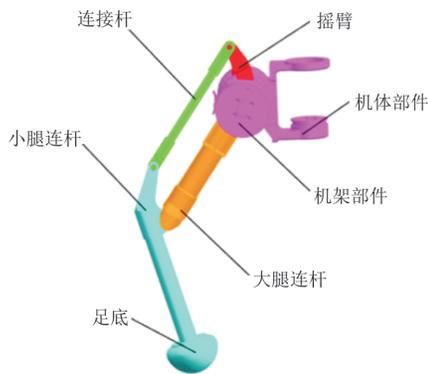


图7 腿部部件装配后的结构图  
Fig. 7 Leg structure after assembly

### 3 单腿运动学分析

腿式起落架单腿运动学是多腿运动学的基础,由于每条腿构型相同,完成单腿运动学分析即可实现腿式起落架的运动学建模。运动学是根据第2节设计的腿式起落架各部件,建立腿部各关节和足端点的位置关系,可分为正运动学和逆运动学。正运动学是已知各关节角度求解足端点位置,而逆运动学是正运动学的逆过程,将空间的运动转换为关节空间的运动,根据足端点反解各关节角度实现足端点期望的运动。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & 0 & \sin \theta_a \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_a & 0 & \cos \theta_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_t \cos \theta_t + L_s \cos \theta_s - d \\ L_t \sin \theta_t + L_s \sin \theta_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_t \cos \theta_t + L_s \cos \theta_s - d) \cos \theta_a \\ L_t \sin \theta_t + L_s \sin \theta_s \\ -(L_t \cos \theta_t + L_s \cos \theta_s - d) \sin \theta_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据式(2)建立的正运动学方程,在已知各关

### 3.1 腿部坐标系建立

单腿运动学分析首先要在腿部关节上建立坐标系,根据装配后的单腿结构,以腿部结构和机身的连接点A作为原点 $O_L$ ,F为足端点,建立单腿坐标系L,单腿坐标原点A到机架部件中心B的髌关节连杆长度为 $d$ ,髌关节转角为 $\theta_a$ ,大腿连杆CD长度为 $L_t$ ,大腿关节转角为 $\theta_t$ ,小腿连杆铰接点E到足端点F的长度为 $L_s$ ,小腿关节转角为 $\theta_s$ ,大腿连杆和小腿连杆构成平行四连杆机构BCDE,通过两个电机分别驱动BC杆和BE杆,建立的腿部坐标系如图8所示。

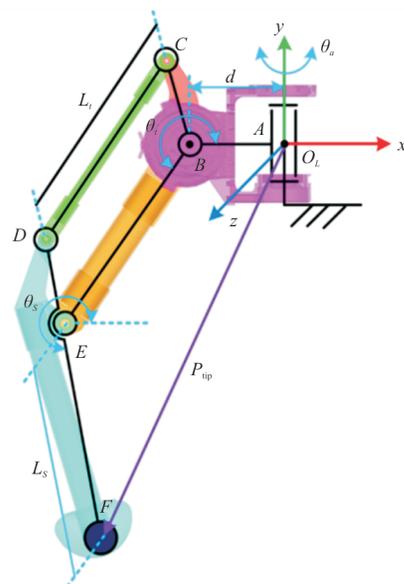


图8 仿生腿式起落架单腿坐标系  
Fig. 8 Single leg coordinate system of bionic leg landing gear

### 3.2 单腿运动学建模

正运动学建模是建立髌关节角、大腿关节角、小腿关节角和足端点位置的函数关系。根据3.1节建立的腿部坐标系,完成腿部结构的运动学分析,大腿关节转角为 $\theta_t$ ,小腿关节转角为 $\theta_s$ ,足端点F坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_t \cos \theta_t + L_s \cos \theta_s - d \\ L_t \sin \theta_t + L_s \sin \theta_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

髌关节转角为 $\theta_a$ 时,足端点F坐标为

节角度的情况下,可解出任一时刻各足端点F的位

置。而逆运动学是根据期望的足端点位置反解各关节角度,并使各足端点到达期望的位置。

逆运动学建模是正运动学的逆过程。已知足端点坐标 $(x, y, z)$ ,反解各关节转角。根据三角函数关系分析,髋关节转角 $\theta_a$ 、大腿关节转角 $\theta_t$ 和小腿关节转角 $\theta_s$ 可以表示为

$$\theta_a = \arctan\left(-\frac{z}{x}\right) \quad (3)$$

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{y}{\frac{x}{\cos\theta_a} + d}\right) - \arccos\frac{L_t^2 + \overline{BF}^2 - L_s^2}{2L_t\overline{BF}} \quad (4)$$

$$\theta_s = \theta_t + \pi - \arccos\frac{L_s^2 + L_t^2 - \overline{BF}^2}{2L_tL_s} \quad (5)$$

式中: $\overline{BF} = \sqrt{\left(\frac{x}{\cos\theta_a} + d\right)^2 + y^2}$ 。

由式(3)~式(5)可以得到髋关节转角 $\theta_a$ 、大腿关节转角 $\theta_t$ 和小腿关节转角 $\theta_s$ 的解析解,可用于足端点的实时数据计算各关节角度<sup>[11]</sup>。

$$\mathbf{r}_{c3} = \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \\ r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \\ r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \cos\theta_a \\ r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_{c4} = \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} L_a \cos\theta_s + r_4 \cos\theta_t \\ L_a \sin\theta_s + r_4 \sin\theta_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a \cos\theta_s + r_4 \cos\theta_t \\ L_a \sin\theta_s \cos\theta_a + r_4 \sin\theta_t \cos\theta_a \\ L_a \sin\theta_s \sin\theta_a + r_4 \sin\theta_t \sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{c5} = \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} L_t \cos\theta_t + r_5 \cos(\theta_s + \pi - \varphi_5) \\ L_t \sin\theta_t + r_5 \sin(\theta_s + \pi - \varphi_5) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_t \cos\theta_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \\ L_t \sin\theta_t \cos\theta_a - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5) \cos\theta_a \\ L_t \sin\theta_t \sin\theta_a - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5) \sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{R}_x(\theta_a)$ 为绕 $x$ 轴旋转矩阵; $\mathbf{R}_x(\theta_a) =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_a & -\sin\theta_a \\ 0 & \sin\theta_a & \cos\theta_a \end{bmatrix}。$$

设 $\mathbf{r}_{\text{tip}}$ 为足端点的位置向量:

$$\mathbf{r}_{\text{tip}} = \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} L_t \cos\theta_t + L_s \cos(\theta_s + \pi) \\ L_t \sin\theta_t + L_s \sin(\theta_s + \pi) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_t \cos\theta_t - L_s \cos\theta_s \\ (L_t \cos\theta_t - L_s \cos\theta_s) \cos\theta_a \\ (L_t \cos\theta_t - L_s \cos\theta_s) \sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

弹簧长度可以表示为

## 4 腿式起落架动力学分析

根据第3节建立的正逆运动学模型可以完成足端点笛卡尔空间到关节空间的互相变换。而驱动腿部连杆以期望的加速度和速度运动,需要建立腿部动力学模型来计算所需的驱动力(矩),以实现期望的运动<sup>[19]</sup>。

### 4.1 腿部位置分析

当足端受到足端接触力 $F_i$ 影响时,实际腿部广义关节位置向量 $\mathbf{q} = [\theta_a \ \theta_t \ \theta_s]^T$ 可以通过动力学方程获得。 $\mathbf{r}_{c1}$ 、 $\mathbf{r}_{c2}$ 、 $\mathbf{r}_{c3}$ 、 $\mathbf{r}_{c4}$ 、 $\mathbf{r}_{c5}$ 分别为髋关节、大腿、摇臂、连接杆和小腿的质心位置向量。在腿部坐标系 $\Omega_t$ 中,

$$\mathbf{r}_{c1} = \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_{c2} = \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} r_2 \cos\theta_t \\ r_2 \sin\theta_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 \cos\theta_t \\ r_2 \sin\theta_t \cos\theta_a \\ r_2 \sin\theta_t \sin\theta_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_p = \sqrt{L_a^2 + L_b^2 - 2L_aL_b \cos(\pi + \theta_s - \theta_t)} \quad (12)$$

### 4.2 腿部速度分析

腿部广义关节速度向量 $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\theta}_a \ \dot{\theta}_t \ \dot{\theta}_s]^T$ , $\boldsymbol{\omega}_{c1}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{c2}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{c3}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{c4}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{c5}$ 分别为髋关节、大腿、摇臂、连接杆和小腿的质心角速度向量。

$$\boldsymbol{\omega}_{c1} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{c2} = \boldsymbol{\omega}_{c1} + \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ -\dot{\theta}_t \sin\theta_a \\ \dot{\theta}_t \cos\theta_a \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{c3} = \boldsymbol{\omega}_{c1} + \mathbf{R}_x(\theta_a) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ -\dot{\theta}_s \sin \theta_a \\ \dot{\theta}_s \cos \theta_a \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据平行四连杆机构特点:

$$\boldsymbol{\omega}_{c4} = \boldsymbol{\omega}_{c2} \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{c5} = \boldsymbol{\omega}_{c3} \quad (17)$$

通过对位置向量微分,髋关节、大腿、摇臂、连

接杆和小腿的质心速度向量可以表示为

$$\dot{\mathbf{r}}_{c1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{c2} = \begin{bmatrix} -r_2 \sin \theta_t \dot{\theta}_t \\ r_2 \cos \theta_t \cos \theta_a \dot{\theta}_t - r_2 \sin \theta_t \sin \theta_a \dot{\theta}_a \\ r_2 \cos \theta_t \sin \theta_a \dot{\theta}_t + r_2 \sin \theta_t \cos \theta_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{c3} = \begin{bmatrix} -r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \dot{\theta}_s \\ r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \dot{\theta}_s \cos \theta_a - r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \sin \theta_a \dot{\theta}_a \\ r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \dot{\theta}_s \sin \theta_a + r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \cos \theta_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{c4} = \begin{bmatrix} -L_a \sin \theta_s \dot{\theta}_s - r_4 \sin \theta_t \dot{\theta}_t \\ (L_a \cos \theta_s \dot{\theta}_s + r_4 \cos \theta_t \dot{\theta}_t) \cos \theta_a - (L_a \sin \theta_s + r_4 \sin \theta_t) \sin \theta_a \dot{\theta}_a \\ (L_a \cos \theta_s \dot{\theta}_s + r_4 \cos \theta_t \dot{\theta}_t) \sin \theta_a - (L_a \sin \theta_s + r_4 \sin \theta_t) \cos \theta_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{c5} = \begin{bmatrix} -L_t \sin \theta_t \dot{\theta}_t + r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5) \dot{\theta}_s \\ [L_t \cos \theta_t \dot{\theta}_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \dot{\theta}_s] \cos \theta_a - [L_t \sin \theta_t - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5)] \sin \theta_a \dot{\theta}_a \\ [L_t \cos \theta_t \dot{\theta}_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \dot{\theta}_s] \sin \theta_a + [L_t \sin \theta_t - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5)] \cos \theta_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (22)$$

### 4.3 腿部加速度分析

将角速度向量和速度向量对时间求导,角加  
速度和加速度可以表示为

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{c1} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{c2} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ -\ddot{\theta}_t \sin \theta_a - \dot{\theta}_t \cos \theta_a \dot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_t \cos \theta_a - \dot{\theta}_t \sin \theta_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{c3} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ -\ddot{\theta}_s \sin \theta_a - \dot{\theta}_s \cos \theta_a \dot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_s \cos \theta_a - \dot{\theta}_s \sin \theta_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{c4} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{c2} \quad (26)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{c5} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{c3} \quad (27)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{c1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{c2} = \begin{bmatrix} -r_2 \sin \theta_t \ddot{\theta}_t \\ r_2 \cos \theta_t \cos \theta_a \ddot{\theta}_t - r_2 \sin \theta_t \sin \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \\ r_2 \cos \theta_t \sin \theta_a \ddot{\theta}_t + r_2 \sin \theta_t \cos \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix}' \quad (29)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{c3} = \begin{bmatrix} -r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \ddot{\theta}_s \\ r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \dot{\theta}_s \cos \theta_a - r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \sin \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \\ r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \dot{\theta}_s \sin \theta_a + r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \cos \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix}' \quad (30)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{c4} = \begin{bmatrix} -L_a \sin \theta_s \ddot{\theta}_s - r_4 \sin \theta_t \ddot{\theta}_t \\ (L_a \cos \theta_s \dot{\theta}_s + r_4 \cos \theta_t \dot{\theta}_t) \cos \theta_a - (L_a \sin \theta_s + r_4 \sin \theta_t) \sin \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \\ (L_a \cos \theta_s \dot{\theta}_s + r_4 \cos \theta_t \dot{\theta}_t) \sin \theta_a - (L_a \sin \theta_s + r_4 \sin \theta_t) \cos \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix}' \quad (31)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{c5} = \begin{bmatrix} -L_t \sin \theta_t \ddot{\theta}_t + r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5) \ddot{\theta}_s \\ [L_t \cos \theta_t \dot{\theta}_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \dot{\theta}_s] \cos \theta_a - [L_t \sin \theta_t - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5)] \sin \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \\ [L_t \cos \theta_t \dot{\theta}_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \dot{\theta}_s] \sin \theta_a + [L_t \sin \theta_t - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5)] \cos \theta_a \dot{\theta}_a \dot{\theta}_a \end{bmatrix}' \quad (32)$$

#### 4.4 连杆受力分析

弹簧上的力根据胡克定律可以表示为

$$F_p = K_p(L_{p0} - L_p) \quad (33)$$

$$T_a = K_a(\theta_{a0} - \theta_a) + B_a(\dot{\theta}_{a0} - \dot{\theta}_a) \quad (34)$$

$$T_t = K_t(\theta_{t0} - \theta_t) + B_t(\dot{\theta}_{t0} - \dot{\theta}_t) \quad (35)$$

$$T_s = K_s(\theta_{s0} - \theta_s) + B_s(\dot{\theta}_{s0} - \dot{\theta}_s) \quad (36)$$

式中: $L_{p0}$ 为弹簧初始长度; $T_a, T_t, T_s$ 分别为髋关节、大腿和小腿输出力矩; $\theta_{a0}, \theta_{t0}, \theta_{s0}$ 分别为髋关节、大腿和小腿初始驱动角度; $\dot{\theta}_{a0}, \dot{\theta}_{t0}, \dot{\theta}_{s0}$ 分别为髋关节、大腿和小腿初始角速度。

各杆件惯性力可以表示为

$$F_{ij} = [F_{ijx} \ F_{ijy} \ F_{ijz}]^T = m_j \mathbf{R}_w^L g - m_j \ddot{\mathbf{r}}_{cj} \quad (j=1, 2, \dots, 5) \quad (37)$$

各杆件惯性力矩可以表示为

$$\delta \mathbf{r}_{c3} = \begin{bmatrix} -r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \delta \theta_s \\ r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \delta \theta_s \cos \theta_a - r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \sin \theta_a \delta \theta_a \\ r_3 \cos(\theta_s - \varphi_3) \delta \theta_s \sin \theta_a + r_3 \sin(\theta_s - \varphi_3) \cos \theta_a \delta \theta_a \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\delta \mathbf{r}_{c4} = \begin{bmatrix} -L_a \sin \theta_s \delta \theta_s - r_4 \sin \theta_t \delta \theta_t \\ (L_a \cos \theta_s \delta \theta_s + r_4 \cos \theta_t \delta \theta_t) \cos \theta_a - (L_a \sin \theta_s + r_4 \sin \theta_t) \sin \theta_a \delta \theta_a \\ (L_a \cos \theta_s \delta \theta_s + r_4 \cos \theta_t \delta \theta_t) \sin \theta_a - (L_a \sin \theta_s + r_4 \sin \theta_t) \cos \theta_a \delta \theta_a \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\delta \mathbf{r}_{c5} = \begin{bmatrix} -L_t \sin \theta_t \delta \theta_t + r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5) \delta \theta_s \\ [L_t \cos \theta_t \delta \theta_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \delta \theta_s] \cos \theta_a - [L_t \sin \theta_t - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5)] \sin \theta_a \delta \theta_a \\ [L_t \cos \theta_t \delta \theta_t - r_5 \cos(\theta_s - \varphi_5) \delta \theta_s] \sin \theta_a + [L_t \sin \theta_t - r_5 \sin(\theta_s - \varphi_5)] \cos \theta_a \delta \theta_a \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\delta \theta_{c1} = \begin{bmatrix} \delta \theta_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\delta \theta_{c2} = \begin{bmatrix} \delta \theta_a \\ -\delta \theta_t \sin \theta_a \\ \delta \theta_t \cos \theta_a \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\delta \theta_{c3} = \begin{bmatrix} \delta \theta_a \\ -\delta \theta_s \sin \theta_a \\ \delta \theta_s \cos \theta_a \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\delta \theta_{c4} = \delta \theta_{c2} \quad (47)$$

$$\delta \theta_{c5} = \delta \theta_{c3} \quad (48)$$

通过足端位置向量,可以获得足端力的虚位移:

$$\delta \mathbf{r}_{tip} = \begin{bmatrix} -L_t \sin \theta_t - L_s \cos \theta_s \\ (L_t \cos \theta_t - L_s \cos \theta_s) \cos \theta_a \\ (L_t \cos \theta_t - L_s \cos \theta_s) \sin \theta_a \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$T_{ij} = [T_{ijx} \ T_{ijy} \ T_{ijz}]^T = -I_j \dot{\boldsymbol{\omega}}_{cj} - \boldsymbol{\omega}_{cj} \times (I_j \boldsymbol{\omega}_{cj}) \quad (j=1, 2, \dots, 5) \quad (38)$$

式中: $j=1, 2, 3, 4, 5$ 分别为髋关节、大腿、摇臂、连接杆和小腿; $m_j$ 为杆件 $j$ 的质量; $\mathbf{R}_w^L$ 为世界坐标系到腿部坐标系的变换矩阵; $I_j$ 为杆件 $j$ 的惯性力矩。

#### 4.5 虚位移分析

$\delta \boldsymbol{\theta}^T = [\delta \theta_a \ \delta \theta_t \ \delta \theta_s]^T$ 为广义虚位移, $\delta \mathbf{r}_{cj}$ 和 $\delta \boldsymbol{\theta}_{cj}$ 分别为杆件 $j$ 惯性力 $F_{ij}$ 和惯性力矩 $T_{ij}$ 的虚位移,可以表示为

$$\delta \mathbf{r}_{c1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\delta \mathbf{r}_{c2} = \begin{bmatrix} -r_2 \sin \theta_t \delta \theta_t \\ r_2 \cos \theta_t \cos \theta_a \delta \theta_t - r_2 \sin \theta_t \sin \theta_a \delta \theta_a \\ r_2 \cos \theta_t \sin \theta_a \delta \theta_t + r_2 \sin \theta_t \cos \theta_a \delta \theta_a \end{bmatrix} \quad (40)$$

通过弹簧长度,弹簧力的虚位移可以表示为

$$\delta L_p = \frac{L_a L_b}{L_p} \sin(\pi + \theta_s - \theta_t) \cdot (-\delta \theta_t + \delta \theta_s) \quad (50)$$

#### 4.6 动力学方程建立

根据达朗伯原理<sup>[13]</sup>,所有惯性力施加的外力,经过符合约束条件的虚位移,所做的虚功总和为零,可以得到:

$$F_p \delta L_p + T_a \delta \theta_a + T_t \delta \theta_t + T_s \delta \theta_s + \sum_{j=1}^5 (F_{ij}^T \delta \mathbf{r}_{cj} + T_{ij}^T \delta \boldsymbol{\theta}_{cj}) + F_g^T \delta \mathbf{r}_{tip} = 0 \quad (51)$$

将虚位移带入式(51),可以得到动力学方程的完整形式。分别用 $F_a, F_t$ 和 $F_s$ 代替虚位移 $\delta_a, \delta_t$ 和 $\delta_s$ 之前的系数部分,式(51)可以简化为

$$F_a \delta \theta_a + F_l \delta \theta_l + F_s \delta \theta_s = 0 \quad (52)$$

若  $F_a$ 、 $F_l$  和  $F_s$  同时为 0, 式(52)成立。用关节位置  $q$ 、关节速度  $\dot{q}$  和关节加速度  $\ddot{q}$  来得到动力学方程的一般矩阵形式<sup>[12]</sup>:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (53)$$

式中:  $M(q)$  为惯性系数矩阵;  $C(q, \dot{q})$  为离心力和哥氏力矢量;  $G(q)$  为重力矢量。

根据建立的动力学模型, 输出期望关节力矩  $\tau$  作用于腿部动作, 同时关节速度  $\dot{q}$  和关节加速度  $\ddot{q}$

改变反馈至动力学模型。

### 4.7 腿式起落架运动测试

基于所建立的模型, 在实验室环境完成腿式起落架的运动测试。腿式起落架成功模拟无人直升机在空中调整姿态后, 负载 180 kg 垂直下落缓冲着陆, 实验过程如图 9 所示, ①为着陆准备状态, ②和③为空中下降阶段, ④为腿全部触地瞬间, ⑤为运动到最低高度⑥的中间位置, ⑦为运动到最终稳定高度⑧的中间位置。

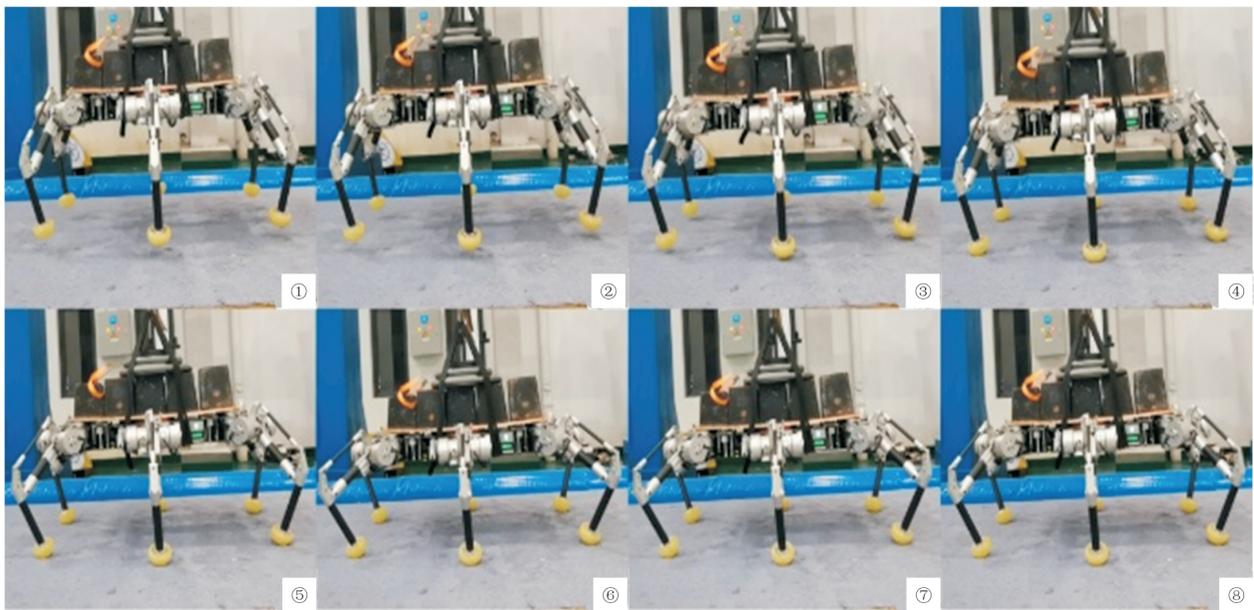


图9 平面地形着陆测试  
Fig. 9 Plane terrain landing test

着陆过程前向  $x$  足端力变化曲线如图 10 所示。

着陆过程侧向  $y$  足端力变化曲线如图 11 所示。

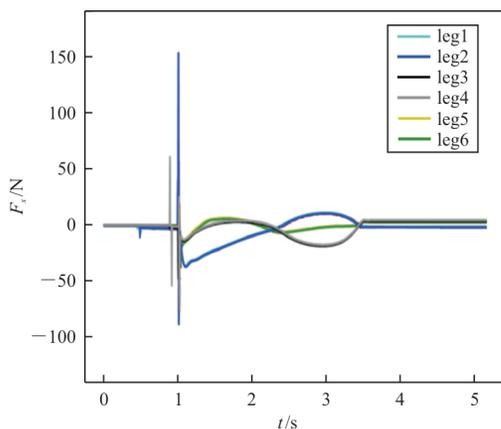


图 10 前向  $x$  足端力变化曲线  
Fig. 10 Forward  $x$  contact force change curve

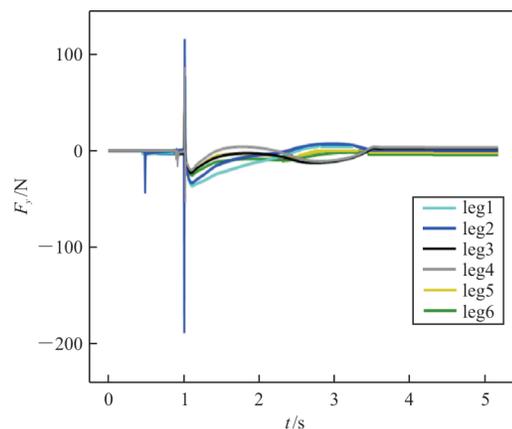


图 11 侧向  $y$  足端力变化曲线  
Fig. 11 Lateral  $y$  contact force change curve

着陆过程垂向 $z$ 足端力变化曲线如图12所示。

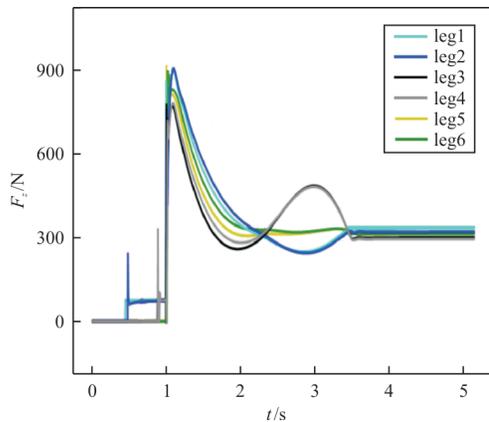


图12 垂向 $z$ 足端力变化曲线

Fig. 12 Vertical  $z$  contact force change curve

从图10~图12可以看出:空中下降阶段,在接触地面瞬间,触地腿的足端在3个方向有较大的接触力,在腿全部触地后进入姿态调整阶段,机体继续下降的同时减速,着陆缓冲至机体最低位置时速度为零,最终足端接触力趋于稳定且和机身总质量相等。

在足端触地后的整个着陆阶段,每条腿主动收缩以吸收着陆冲击能量,试验验证了足力分配算法的准确性,表明在缓冲着陆过程中机身可实现预期的着陆和调姿动作,同时验证了足力分配算法在倾斜地面着陆过程中的有效性。

## 5 结论

1) 通过分析直升机应用场景和需求,腿式起落架相较于传统形式起落架,具有主动缓冲、自主移动、可折叠、能适应复杂地形等诸多优点。

2) 在腿式起落架构型分析的基础上,建立腿部坐标系,通过几何法建立腿部运动学模型并通过虚位移原理建立腿部动力学模型,从而获得腿部位置和受力情况,为腿部机构控制奠定了基础。

3) 基于设计的腿部结构和建立的模型,完成腿式起落架的运动测试,验证了腿部机构设计的合理性和算法模型的有效性,实现了腿式起落架着陆缓冲和稳定着陆,显著拓宽了直升机的应用范围。

## 参考文献

- [1] 吴希明, 牟晓伟. 直升机关键技术及未来发展与设想[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(3): 1-10.  
WU Ximing, MU Xiaowei. A perspective of the future development of key helicopter technologies[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(3): 1-10. (in Chinese)
- [2] 杨婧, 詹月玫, 洪彬. 世界军用直升机装备现状及发展规划[J]. 直升机技术, 2020(3): 68-72.  
YANG Jing, ZHAN Yuemei, HONG Bin. Development status and plans of world military helicopter industry[J]. Helicopter Technique, 2020(3): 68-72. (in Chinese)
- [3] 罗贤明. 国内民用直升机发展前景探析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(3): 12-15.  
LUO Xianming. Prospect analysis of domestic civil helicopter development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(3): 12-15. (in Chinese)
- [4] KIEFER J, WARD M, COSTELLO M. Rotorcraft hard landing mitigation using robotic landing gear[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2016, 138(3): 1-10.
- [5] SARKISOV Y S, YASHIN G A, TSYKUNOV E V, et al. Dronegear: a novel robotic landing gear with embedded optical torque sensors for safe multicopter landing on an uneven surface[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1912-1917.
- [6] STOLZ B, BRÖDERMANN T, CASTIELLO E, et al. An adaptive landing gear for extending the operational range of helicopters[C]// 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). US: IEEE, 2018: 1757-1763.
- [7] 王晓晖, 南英. 基于仿生的适于特殊地形的直升机起落架设计[J]. 飞机设计, 2014, 34(4): 46-48, 52.  
WANG Xiaohui, NAN Ying. Helicopter landing gear design for special terrain based on bionics[J]. Aircraft Design, 2014, 34(4): 46-48, 52. (in Chinese)
- [8] 孟祥睿, 盛遵荣, 薛冰, 等. 全地形直升机起落架: CN205098463U[P]. 2015-05-15.  
MENG Xiangrui, SHENG Zunrong, XUE Bing, et al. Full topograp helicopter under carriage: CN205098463U [P]. 2015-05-15. (in Chinese)
- [9] REN Jia, WANG Jizhen, LIU Xiaochuan. Design and analysis of terrain-adaptive bionic landing gear system [C]// 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan: IEEE, 2018: 5504-5508.
- [10] 刘昊林, 刘小川, 任佳, 等. 无人直升机六足式起落架设计与控制算法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(4): 421-430, 439.

- LIU Haolin, LIU Xiaochuan, REN Jia, et al. Design and control algorithm of hexapod landing gear for unmanned helicopters [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(4): 421-430, 439. (in Chinese)
- [11] 刘昊林, 刘小川, 任佳, 等. 仿生腿式地形自适应起落架构型与动力学分析[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(9): 25-31. LIU Haolin, LIU Xiaochuan, REN Jia, et al. Biomimetic leg terrain adaptive takeoff and landing architecture and dynamic analysis [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(9): 25-31. (in Chinese)
- [12] 何东伦, 孙晓雪, 徐刘杰, 等. 仿生六足机器人的发展现状与应用[J]. *设备监理*, 2022, 73(6): 66-68, 87. HE Donglun, SUN Xiaoxue, XU Liujie, et al. Development status and application of bionic hexapod robot [J]. *Plant Engineering Consultants*, 2022, 73(6): 66-68, 87. (in Chinese)
- [13] MANIVANNAN V, LANGLEY J P, COSTELLO M, et al. Rotorcraft slope landings with articulated landing gear [C]// *Atmospheric Flight Mechanics*. USA: AIAA, 2013: 5160-5167.
- [14] ZHANG Xianpeng, LANG Lin, WANG Jian, et al. The quadruped robot locomotion based on force control [C]// *The 27th Chinese Control and Decision Conference*. Beijing: IEEE, 2015: 5440-5445.
- [15] GHIRINGHELLI G L, GUALDI S. Evaluation of a landing gear semi-active control system for complete aircraft landing [J]. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2004, 83(1): 21-31.
- [16] 刘富盛. 仿生六足机器人柔顺腿研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022. LIU Fusheng. Research on compliant legs of biomimetic hexapod robot [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022. (in Chinese)
- [17] 潘雨龙. 六足机器人单腿结构优化与运动学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021. PAN Yulong. Optimization and kinematics research on single leg structure of hexapod robot [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [18] 姚建涛, 陈新博, 陈俊涛, 等. 轮足式仿生软体机器人设计与运动分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5): 27-35. YAO Jiantao, CHEN Xinbo, CHEN Juntao, et al. Design and motion analysis of a wheel-walking bionic soft robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(5): 27-35. (in Chinese)
- [19] MANCINI F, DUBBINI M, GATTELLI M, et al. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6880-6898.

(编辑:马文静)