仿生腿式地形自适应起落架构型与动力学分析

刘昊林,刘小川,任佳,王计真,杨正权

(中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要:针对垂直起降飞行器在复杂地形环境下实现平稳着陆的难题,利用仿生学设计理念,以无人直升机 为对象,设计了一种基于多连杆机构设计的仿生腿式起落架系统。通过对腿部机构进行运动学分析和动力 学分析,建立相关模型,在此基础上,进行仿生腿式起落架的运动控制。首先,从无人直升机的着陆稳定 性和承载能力出发,对仿生腿式起落架机械构型进行分析,并介绍了腿部各部分结构。然后,针对仿生腿 腿部结构,通过几何法完成对腿部正运动学和逆运动学的求解,建立足端位置与驱动关节角度之间的映射 关系。最后,基于运动学模型及四连杆运动学特性,对机体和单腿进行了动力学分析,并建模。通过建立 的运动学和动力学模型,结合设计的起落架结构,完成动力学仿真,实现了仿生腿式起落架在复杂地形环 境下的平稳着陆,验证了结构的合理性和模型的准确性。

关键词: 仿生腿; 起落装置; 构型设计; 运动学; 动力学 中图分类号: V216 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)09-0025-07 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.09.005

Mechanism Configuration and Dynamic Analysis of Bionic Legged Terrain Adaptive Landing Gear

LIU Hao-lin, LIU Xiao-chuan, REN Jia, WANG Ji-zhen, YANG Zheng-quan

(Laboratory of Aero Structures Impact Dynamics, AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: This paper aims to achieve a steady landing of a vertical take-off and landing aircraft in complex terrain environment. Taking the unmanned helicopter as the object, a bionic leg landing gear system based on the design of multi-link mechanism is designed by using the concept of bionics. Through the kinematics and dynamics analysis of the leg mechanism and related established modeling, the motion control of the bionic leg landing gear is carried out. Firstly, from the landing stability and carrying capacity of unmanned helicopter, the mechanical configuration of bionic leg landing gear is analyzed and the structure of each part of the leg is introduced. Then, according to the bionic leg structure, the forward kinematics and inverse kinematics of the leg are solved by the geometric method, and the mapping relationship between the foot position and the driving joint angle is established. Then based on the kinematic model and the kinematic characteristics of the four-bar linkage, the

· 25 ·

收稿日期: 2022-06-24;修订日期: 2022-07-27

Received: 2022-06-24; Revised: 2022-07-27

基金项目: 航空科学基金项目(20184123011)

Fund: Aeronautical Science Foundation of China (20184123011)

作者简介:刘昊林(1995-),男,硕士,工程师,主要研究方向为仿生机电与智能控制。

Biography: LIU Hao-lin (1995-), Male, Master, Engineer, Research focus: bionic electromechanical and intelligent control.

通讯作者:刘小川(1983-),男,博士,研究员,主要研究方向为结构冲击动力学。

Corresponding author: LIU Xiao-chuan (1983-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: structural impact dynamics.

引文格式: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):025-031.

LIU Hao-lin, LIU Xiao-chuan, REN Jia, et al. Mechanism Configuration and Dynamic Analysis of Bionic Legged Terrain Adaptive Landing Gear [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 025-031.

dynamics analysis and modeling of the body and the single leg are carried out. The kinematics and dynamics model are combined with the designed landing gear structure to complete the dynamics simulation. Therefore, the steady landing of the bionic leg landing gear in complex terrain environment is realized to verify the rationality of the structure and accuracy of the model. **KEY WORDS:** bionic leg; landing gear system; mechanism configuration; kinematics; dynamics

随着直升机的发展和普及,直升机在军事、工业、 农业、医疗、救援等诸多领域凸显出良好的应用前景。 现阶段的直升机起落架主要采用轮式起落架和滑橇 式起落架,由于机动性和灵活性较差,导致直升机起 降时对地面的平整度和坡角要求较高,在遇到某些特 殊地形(如乱石滩、斜坡坡度较大等崎岖地形条件) 可能面临无法正常起降这一困难,传统的直升机已经 难以满足要求^[1]。因此,传统起落架对复杂地形的适 应能力较差,现有的措施多是在有必要的地方建造专 门的直升机起降平台,这给直升机进行野外作业及救 援工作带来诸多不便。当直升机在救援及执行任务 时,经常会遭遇恶劣气候环境及崎岖地形,这会导致 直升机无法飞行和起降。因此,亟需开展面向复杂地 形自适应的新概念起落架,增强直升机对着陆环境的 地形适应性,降低直升机风险,使直升机能够自主完 成更复杂的飞行任务。

考虑直升机起降过程和飞行昆虫栖落的诸多相 似性,借鉴多足机器人在腿部设计、驱动与控制等方 面的成熟技术^[2],创造性地提出一种基于智能仿生腿 的地形自适应起落架,可满足直升机在非结构地面的 自适应起降需求。

美国国防先进计划局(DARPA)于2015年率先 开展了"自适应起落架"项目[3],该技术能够使直升 机在更为崎岖、倾斜的地面完成着陆,从而能够显著 提高直升机的应用范围。佐治亚理工大学在 DARPA 支持下,展开了深入的研究。2015 年,基于四足仿 生腿结构,研制了一种名为"Robotic Landing Gear" 的起落架^[4],以摆脱直升机只能在平坦地面起降的限 制。这套着陆系统在机身两侧对称布置了4只有触觉 传感器的机械足,可以协调工作,根据着陆区域,在 控制器下可以摆出最佳的落地角度,使得飞行器在非 结构的地面、台阶和斜坡上降落^[5],并且通过仿真验 证了整个起落装置在不确定环境下着陆的鲁棒性^[6]。 之后又于 2018 年提出了一种利用线缆驱动的机器人 腿式四杆起落架装置,通过实验证明了该装置具备 20°斜坡平稳降落的能力^[7]。2017 年,俄罗斯的研究 团队研究了一种"蜂腿"式四旋翼无人直升机起落架 [8],属于铰接机械腿式起落架,并通过实验证明了旋 翼直升机在不同坡度、不同平面、不同台阶面的地形 剖面估计以及平稳着陆。

我国在传统起落架领域取得了显著成果,但对于 地形自适应起落架研究起步较晚,基本处于理论研究 阶段。2014年,南京航空航天大学设计出一种带有3 个液压伸缩杆的起落架^[9],通过控制每根液压杆长度 来实现复杂崎岖地形的起降。2015年,郑州大学设 计了一种四腿式全地形直升机起落架^[10],通过压力传 感器控制腿旋转和伸缩实现全地形着陆。2016年, 合肥工业大学设计了一种针对小型无人直升机的仿 生起落架^[11],该起落架采用单自由度四杆机构,并对 设计结构的强度进行了校核,最后分析了设计的可行 性。2018年,哈尔滨工业大学设计了一种前三点式 地形自适应起落架^[12],通过控制每条支撑腿的上下支 腿实现在复杂地形的降落,搭建模拟实验系统验证了 起落架系统的可行性。

地形自适应起落架基于仿生学设计,具备地形信息识别、足底压力反馈、自身姿态监控及多腿独立驱动控制等特性,能够实现复杂地形自适应起降、晃动舰面平稳着舰,且在垂直起降飞机抗坠毁设计方面具有先天优势。地形自适应起落架技术,是新型武器装备多用途、强适应、智能化的发展诉求,融合了激光雷达主动地形辨识、IMU/GPS 机身位置姿态监控、仿生腿式起落架协同控制等先进技术,是垂直起降飞机起落架设计的重要前进方向,也是未来垂直起降飞机设计亟待突破的一项关键技术。

1 构型分析与结构设计

根据设计构型展开仿生腿式起落架机构设计,考 虑无人直升机对着陆稳定性的要求、着陆冲击和负 载,采用六腿式起落架类型^[13],既能保证良好的稳定 性,也可以提高承载能力,在短距离移动时,有更好 的稳定性保证。同时,每条腿采用并联结构,配合智 能感知驱动单元可实现高动态阻抗控制。仿生起落架 腿的部件即腿机构各个连杆部件,包括大腿连杆、小 腿连杆、连接杆、摇臂和足垫。根据机构方案,对腿 部各结构进行了机械详细设计,如图1所示。此外, 仿生起落架腿部件还包括了2个用于连接各驱动单 元和探测器机身的机架部件,如图2所示。

为满足着陆时,整个探测器不下陷到柔软的土壤 中去,需要进行仿生起落架腿足底设计。这里设计了 一个直径足够大的半圆球足底,如图 3 所示。采用半 圆球设计的优点是,无论探测器与地面以何种角度接 触,都可以保证有较大的接触面和均匀的接触压力, 避免了压力集中导致的下陷问题。此外,棕色足底为 塑料材料制成,蓝色部件为航空铝材料,负责将足底 与小腿杆件连接到一起。



C 连接杆 C 播臂 图 1 仿生起落架腿个连杆部件的 CAD 设计图 Fig.1 CAD design drawing of bionic landing gear leg link components: a) thigh link; b) shank link; c) connecting link; d) rocker arm



图 2 机架部件的 CAD 设计图 Fig.2 CAD design drawing of rack components

以上各部件均采用轻质材料加工。大腿连杆、小腿连杆和连接杆的中间圆柱管采用碳纤维制造。其他部件采用航空铝材料,通过数控 CNC 加工成形,使得整体结构的质量较轻。通过设计合适的螺孔,可以将腿部各个连杆部件装配在一起。完整的装配结果如图 4 所示。

2 运动学分析

仿生起落架运动学,是针对机器人机构,定义其



图 3 仿生起落架腿足底的 CAD 设计图 Fig.3 CAD design of the bionic landing gear leg sole

输入与输出关系,以建立空间几何学模型,主要包括 腿部正逆运动学模型和机体运动学模型。建立仿生起 落架的运动学模型,是进行机构性能设计与分析的基 础,也是实现着陆缓冲控制和行走控制的前提。

2.1 坐标系建立

根据第1节仿生腿起落架机构的单腿结构,每条 单腿有3个自由度,保证了腿部机构具有三维空间运 动的能力。机器人的单腿构型如图5所示。该机器人 6条腿具有相同的构型,对称分布于身体两侧。单腿



图 4 腿部部件装配后的 CAD 设计图 Fig.4 CAD design drawing of leg after assembly

是一个五杆机构和串联旋转副组成的混联结构,大腿 杆件、小腿、小腿驱动杆件、连接杆构成平行四边形 结构 BCDE,该机构由电机连接减速器分别驱动 BC、 BE 2 个杆件。定义图 5 中腿部坐标系为 Ω_L ,髋关节 电机轴轴线上 A 点为腿部坐标系 Ω_L 的坐标原点;定 义足端坐标系为 Ω_F ,足端点 F 点为足端系 Ω_F 的坐标 原点。

机器人整体构型与全身坐标系如图 6 所示。机器 人前后、左右对称,各向同性性能优异。定义地面坐 标系为 Ω_W ,机体坐标系为 Ω_B ,机体坐标系原点与机 体几何中心重合,初始时机体坐标系 Ω_B 与地面坐标 系 $\Omega_{\rm W}$ 重合。依次定义 6 条腿的坐标系,左前腿腿坐 标系为 $\Omega_{\rm FL}$,右前腿腿坐标系为 $\Omega_{\rm FR}$,左腿腿坐标系 为 $\Omega_{\rm L}$,右腿腿坐标系为 $\Omega_{\rm R}$,左后腿腿坐标系为 $\Omega_{\rm RL}$, 右后腿腿坐标系为 $\Omega_{\rm RR}$



图 5 仿生腿式起落架单腿构型 Fig.5 Single-leg configuration of bionic leg landing gear



图 6 机器人坐标系统 Fig.6 Robot coordinate system

2.2 单腿运动学建模

机器人运动学正解是求解足端点相对于机体的 位置和姿态^[14],在单腿坐标系中是根据腿部各关节角 度求解足端点的位姿,由 2.1 节建立的腿坐标系进行 正运动学建模。设髋关节连杆 *AB* 长度为 *d*,髋关节 旋转角为 θ_a,大腿连杆 *BE* 长度为 *L*_t,大腿关节角为 θ_t ,小腿连杆铰点 *EF* 的长度为 *L*_s,小腿关节角为 θ_s , 在 *xy* 平面内,足端点 *F* 坐标 $(x',y',z')^T$ 为:

$$\begin{bmatrix} x'\\y'\\z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{t}\cos\theta_{t} + L_{s}\cos\theta_{s} - d\\L_{t}\sin\theta_{t} + L_{s}\sin\theta_{s}\\0 \end{bmatrix}$$
(1)

髋关节绕y轴旋转 θ_a 时,足端点坐标 $(x,y,z)^T$ 为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{a} & 0 & \sin\theta_{a} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{a} & 0 & \cos\theta_{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{t}\cos\theta_{t} + L_{s}\cos\theta_{s} - d \\ L_{t}\sin\theta_{t} + L_{s}\sin\theta_{s} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{t}\cos\theta_{t} + L_{s}\cos\theta_{s} - d)\cos\theta_{a} \\ L_{t}\sin\theta_{t} + L_{s}\sin\theta_{s} \\ -(L_{t}\cos\theta_{t} + L_{s}\cos\theta_{s} - d)\sin\theta_{a} \end{bmatrix}$$
(2)

由此可根据各关节角求出足端点在腿坐标系下的坐标。逆运动学是正运动学分析的逆过程,可根据 足端点的位姿来反解腿部各个关节角度^[15]。在实际运 动控制中,足端轨迹规划结合逆运动学求解各关节角 的变化,保证足端点按照期望的足端轨迹运动。

髋关节转动角度可以由式(2)获得:

$$\theta_{\rm a} = \arctan\left(-\frac{z}{x}\right) \tag{3}$$

足端点在 xy 平面内坐标为:

$$\begin{bmatrix} x'\\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{\cos\theta_a}\\ y \end{bmatrix}$$
(4)

又有:

$$\angle ABF = \arctan\left(\frac{y'}{x'+d}\right)$$
 (5)

在直角三角形中,由勾股定理可得,BF的长度为:

 ${}^{W}_{O}\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma\\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma\\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix}$

 $p_{A} = (x, y, z)^{T}$ 为足端点在机体坐标系中位置,可 以根据 ${}^{W}_{0}R$ 姿态变换矩阵求得足端点在世界坐标系 中的位置。

3 动力学分析

3.1 机体动力学分析

本文设计的仿生腿式地形自适应起落架可以看 作是一种多自由度的闭环运动机构^[16]。着陆过程中仿 生起落架受力如图 7 所示,力矩和力可以用式(12) 表示。

$$\begin{cases} \tau = \sum_{i=1}^{6} (\mathbf{r}_{com} + \mathbf{r}_{ti}) \times F_i \\ F = mg + \sum_{i=1}^{6} F_i \end{cases}$$
(12)

式中: m 为仿生起落架的质量; F_i 为支撑腿所受的垂向支持力; r_{com} 为重心到机体坐标系的偏移向量; r_{ti} 为机体坐标系到足端点的向量。通过调节足端接触力 F_i 分配来控制机体状态稳定,通过 PID 控制器调节力矩 τ 来控制机体的俯仰角和滚转角。

$$\overline{BF} = \sqrt{\left(x'+d\right)^2 + y'^2} \tag{6}$$

在 △ BEF 中,由余弦定理可得:

$$\angle EBF = \arccos \frac{L_{\rm t}^2 + \overline{BF}^2 - L_{\rm s}^2}{2L_{\rm t}\overline{BF}}$$
(7)

$$\angle BEF = \arccos \frac{L_{\rm s}^2 + L_{\rm t}^2 - \overline{BF}^2}{2L_{\rm t}L_{\rm s}}$$
(8)

将式(5)和(7)代人式(9),可以得到大腿关 节角 θ_{to}

$$\theta_{t} = \angle ABF - \angle EBF \tag{9}$$

将式(8)和(9)代入式(10),可以求得小腿 关节角 θ_s:

$$\theta_{\rm s} = \theta_{\rm t} + \pi - \angle BEF \tag{10}$$

式(3)、(9)、(10)为单腿运动学逆解,只要给 定仿生腿各足端在机体坐标系中的坐标,即可根据运 动学逆解求得腿部大腿、小腿和髋关节的关节角角 度。通过求得的各关节角,可控制各关节完成预先规 划的足端轨迹实现预期运动。

设 Ω_0 为机体坐标系, Ω_W 为世界坐标系, ${}^W_0 R$ 是 从世界坐标系到身体坐标系的旋转姿态矩阵, 机体坐 标系 Ω_0 纵向滚动为 α , 前向俯仰为 β , 侧向偏航为 γ , 则机体坐标系 α 、 β 、 γ 可以通过读取惯性导航单元 IMU 角度实时获取。定义旋转姿态矩阵 ${}^W_0 R$ 为:





3.2 单腿动力学分析

分析单腿动力学时,选取广义坐标系为各关节角 θ_a 、 $\theta_i 和 \theta_s$,足端受外力 F_i 处于平衡状态时,腿部位 姿只与关节角度有关,与时间无关,即为定常约束。 此时虚位移 δ_r 包含实位移 dr,推导时可以视为相同 直接替换^[17]。 主动力包括关节主动施加的力矩 r 以及足端受到的外力 F_i ,其中关节力矩的元功可以表示为式 (13)。

$$\mathrm{d}W_{\tau} = \tau^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\theta \tag{13}$$

外力 F_i 的元功可以表示为:

 $\mathrm{d}W_{F_i} = F_i^{\mathrm{T}} \mathrm{d}r = F_i^{\mathrm{T}} J \mathrm{d}\theta \tag{14}$

又根据虚功原理可知, 主动力做虚功为 0:

 $\delta W_{\tau} + \delta W_{F_i} = T_a \delta \theta_a + T_t \delta \theta_t + T_s \delta \theta_s +$

$$\sum_{j=1}^{5} \left(F_{lj}^{\mathrm{T}} \delta r_{cj} + T_{lj}^{\mathrm{T}} \delta \theta_{cj} \right) + F_{i}^{\mathrm{T}} \delta r_{ti}$$
⁽¹⁵⁾

用 F_a 、 F_t 和 F_s 代替虚位移 δ_{θ_a} , δ_{θ_t} 和 δ_{θ_s} 前面的 系数,可以表示为:

$$F_a \delta \theta_a + F_t \delta \theta_t + F_s \delta \theta_s = 0 \tag{16}$$

若 F_a 、 F_t 和 F_s 同时等于 0,式(16)成立。因此 分别令 F_a 、 F_t 和 F_s 为 0,可以用关节位置 q,关节速 度 \dot{q} 和关节加速度 \ddot{q} 来得到单腿动力学方程的一般 形式,见式(17)。

$$\tau = \boldsymbol{M}(q)\ddot{q} + \boldsymbol{C}(q,\dot{q}) + \boldsymbol{G}(q) \tag{17}$$

式中: *M*(*q*)是惯性系数矩阵,主要与关节加速度 *q* 有关; *C*(*q*,*q*)是离心力和哥氏力矢量,主要与关节 速度 q 有关; G(q)是重力矢量,主要与关节位置有关 的保守力有关; τ 是根据建立的动力学方程,让关节 按照既定轨迹运动,每个关节需要施加的力矩。通过 建立的动力学模型,从期望的位置、速度和加速度计 算出每个关节需要施加的力矩τ,进而实现仿生腿式 起落架的运动控制。

3.3 动力学仿真分析

当无人直升机准备着陆时,需要提前通过运动学 分析对仿生腿式起落架的每条腿的腿部姿态进行规 划,以更好地适应地形实现平稳着陆。之后通过建立 的动力学模型,在关节空间内对仿生腿式起落架的每 个关节进行控制。在 ADAMS 动力学仿真软件建立虚 拟样机和各种地形环境,在 Matlab/Simulink 中建立 着陆控制、角度控制、足力分配和阻抗控制等控制模 块向 ADAMS 输入控制参数,ADAMS 仿真结果数据 输出到 Matlab/Simulink,实现机械系统和控制系统的 闭环交互。在 ADAMS 中分别建立平面地形、坡面地 形和连续起伏的复杂地形,并分别进行着陆仿真,如 图 8 所示。由仿真结果可以看出,第2节所设计的腿 部构型和建立的模型,在下降过程中完成了腿部位姿 的调节和关节运动控制,并在落地时平稳地与地面接 触,达到了预期的仿真效果。



图 8 在仿真条件下各种地形环境着陆 Fig.8 Landing in various terrain environments under simulation

4 结语

本文从垂直起降飞行器对起降环境的需求出发, 提出了一种基于智能仿生腿的地形自适应起落架,并 应用于无人直升机,极大地拓展了垂直起降飞行器的 适用范围。

1)在分析垂直起降飞行器对起降环境需求的基础上,结合地形自适应起落架技术的要求和设计指标,确定了六腿式起落架系统的构型设计方案。从整体机械设计方案出发,介绍了机械腿主要机构部分的机械结构。

2)在机械结构分析的基础上,完成了机器人运动学分析。首先建立了单腿坐标系和整机坐标系,并 通过几何法建立了单腿运动学模型,求解了单腿正逆运动学方程和机体位姿变换矩阵,以此作为机器人步 态规划和控制的理论基础。

3)基于运动学模型及四连杆运动学特性,使用虚 功原理作为动力学建模的方法,对装置单腿和机体进 行动力学分析,以此作为自适应着陆控制算法的基础, 并在 ADAMS 仿真环境中验证了结构的合理性和模型 的准确性,为后续研究地形自适应着陆奠定了基础。

参考文献:

- 刘向尧, 詹家礼. 国内中小型无人机起落缓冲装置的 研究现状与展望[J]. 贵州农机化, 2018(3): 24-31.
 LIU Xiang-yao, ZHAN Jia-li. Research Status and Prospect of Take-off and Landing Buffering Device for Small and Medium Uav in China[J]. Guizhou Agricultural Mechaniation, 2018(3): 24-31.
- [2] 熊蓉. 仿生腿足式机器人的发展 [J]. 机器人技术与应

用, 2017(2): 29-36.

XIONG Rong. Development of Bionic Leg Robot[J]. Robot Technique and Application, 2017(2): 29-36.

- [3] KIEFER J, WARD M, COSTELLO M. Rotorcraft Hard Landing Mitigation Using Robotic Landing Gear[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control,2016, 138(3): 031003.
- [4] MANIVANNAN V, LANGLEY J P, COSTELLO M, et al. Rotorcraft Slope Landings with Articulated Landing Gear[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference. Virginia: AIAA, 2013: 5160.
- [5] LANGLEY J, COSTELLO M. Ground Resonance Mitigation of Rotorcraft with Articulated Robotic Landing Gear: A Preliminary Investigation[J]. American Helicopter Society, 2016(2): 361-378.
- [6] KIM D, COSTELLO M. Virtual Model Control of Rotorcraft with Articulated Landing Gear for Shipboard Landing[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Virginia: AIAA, 2016.
- [7] 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.
- [8] DI LEO C V, LEON B, WACHLIN J, et al. Cable-Driven Four-Bar Link Robotic Landing Gear Mechanism: Rapid Design and Survivability Testing[C]//2018 AIAA/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Virginia: AIAA, 2018.
- [9] 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.
 WANG Xiao-hui, NAN Ying. Helicopter Landing Gear Design for Special Terrain Based on Bionics[J]. Aircraft Design, 2014, 34(4): 46-48.
- [10] 孟祥睿,盛遵荣,薛冰,等.全地形直升机起落架: CN205098463U[P].2016-03-23.
 MENG Xiang-rui, SHENG Zun-rong, XUE Bing, et al. Full Topography Helicopter Undercarriage: CN205098463U[P].2016-03-23..
- [11] 桑喆, 江斌, 杨记周, 等. 小型无人直升机仿生起落架

设计[J]. 现代制造技术与装备, 2016(2): 79-81.

SANG Zhe, JIANG Bin, YANG Ji-zhou, et al. Design of Bionic Landing Gear for Small Unmanned Helicopter[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016(2): 79-81.

- [12] 桑喆, 江斌,杨记周,等.小型无人直升机仿生起落架 设计[J].现代制造技术与装备,2016(2):79-81.
 SANG Zhe, JIANG Bin, YANG Ji-zhou, et al. Design of Bionic Landing Gear for Small Unmanned Helicopter[J].
 Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016(2): 79-81.
- [13] 李满宏,张明路,张建华,等. 六足机器人关键技术综述[J]. 机械设计, 2015, 32(10): 1-8.
 LI Man-hong, ZHANG Ming-lu, ZHANG Jian-hua, et al. Review on Key Technology of the Hexapod Robot[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(10): 1-8.
- [14] 陈刚. 六足步行机器人位姿控制及步态规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
 CHEN Gang. Position-Posture Control and Gait Planning of Six-Legged Walking Robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [15] 姜宏超,刘士荣,张波涛.六自由度模块化机械臂的逆运动学分析[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(7): 1348-1354.
 JIANG Hong-chao, LIU Shi-rong, ZHANG Bo-tao. In-

JIANG Hong-chao, LIU Shi-rong, ZHANG Bo-tao. Inverse Kinematics Analysis for 6 Degree-of-Freedom Modular Manipulator[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(7): 1348-1354.

- [16] HUTTER M, GEHRING C, JUD D, et al. ANYmal a Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2016.
- [17] 宋小科,杨晓钧. 基于虚功原理的 4PUS-1RPU 并联机构动力学分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(6): 25-30.
 SONG Xiao-ke, YANG Xiao-jun. Dynamics Analysis of a 4PUS-1RPU Parallel Manipulator by the Principle of Virtual Work[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(6): 25-30.

责任编辑:刘世忠