

文章编号: 1674-8190(2024)03-045-07

仿生四足六旋翼无人机自适应着陆性能分析

周乐¹, 尹乔之^{1,2}, 魏小辉^{1,3}, 孙文宇¹, 梁伟华¹, 聂宏^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 直升机动力学全国重点实验室, 南京 210016)

(3. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要: 旋翼无人机在民用和军用领域被广泛应用, 但传统橇式起落架在复杂地形下难以起降, 为了扩大旋翼无人机的降落面积和应用范围, 设计一种仿人腿式两级缓冲自适应起落架。通过对仿生腿的正逆运动学分析, 提出一种自适应起落架姿态调整策略; 建立仿生四足六旋翼无人机着陆动力学模型, 基于多体动力学软件 simcenter 3D 开展着陆动力学仿真, 并与传统橇式起落架进行着陆性能对比研究。结果表明: 着陆腿式的两级缓冲自适应起落架及其姿态调整策略, 能够使滚转角减小 95.69%, 过载系数降低 34.06%, 两级缓冲自适应起落架在面对复杂地形时具备主动调节姿态安全着陆的地形适应能力和极好的减震缓冲能力。

关键词: 旋翼无人机; 仿生着陆腿; 自适应起落架; 着陆动力学

中图分类号: V279

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.04

Analysis of adaptive landing performance of bionic four-legged hexacopter UAV

ZHOU Le¹, YIN Qiaozhi^{1,2}, WEI Xiaohui^{1,3}, SUN Wenyu¹, LIANG Weihua¹, NIE Hong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(3. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The classic sled-type landing gear is difficult to take off and land in challenging terrain, with the widespread usage of rotor unmanned aerial vehicle (UAV) in both civil and military domains. A two-stage buffered adaptive landing gear similar to a human leg is designed to increase the landing area and application range of rotor UAV. An adaptive landing gear attitude adjustment strategy is proposed by analyzing the positive and negative kinematics of the bionic leg. A bionic four-legged hexacopter UAV landing dynamics model is established, the landing dynamics simulation is carried out using the multi-body dynamics software simcenter 3D, and the model is compared with the conventional sled landing gear. The results show that the two-stage cushioned adaptive landing gear in the landing leg style and its attitude adjustment strategy can reduce the roll angle by 95.69% and overload coefficient by 34.06%. The two-stage cushioned adaptive landing gear has excellent shock absorption and cushioning capability in complex terrain.

Key words: rotor UAV; bionic landing legs; adaptive landing gear; landing dynamics

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(52375102, 52275114); 教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220126); 中国博士后科学基金资助项目(2021M691565); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2023005); 航空科学基金(202000410520002); 南京航空航天大学前瞻布局科研专项资金资助; 国防卓越青年基金(2018-JCJQ-ZQ-053); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 魏小辉(1978-), 男, 博士, 教授。E-mail: wei_xiaohui@nuaa.edu.cn

引用格式: 周乐, 尹乔之, 魏小辉, 等. 仿生四足六旋翼无人机自适应着陆性能分析[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 45-51, 70.

ZHOU Le, YIN Qiaozhi, WEI Xiaohui, et al. Analysis of adaptive landing performance of bionic four-legged hexacopter UAV [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 45-51, 70. (in Chinese)

0 引言

旋翼无人机具有易部署、低成本、垂直起降和定点悬停等优势,在野外探测、灾害救援和边境巡逻等民用和军用领域都被广泛应用^[1-2]。

起落架作为飞行器地空交接的核心部件,是保证飞行器起飞和着陆安全的关键。与固定翼飞行器相比,旋翼无人机不需要长而直的跑道,但需要在平坦的区域进行起降^[3]。平整场地降低了起落架的设计要求,但限制了飞行器在自然复杂地形环境下的起降能力^[4]。传统的旋翼无人机起落架常采用橇式设计^[5],其结构简单、重量较轻,但对于着陆地形的要求比较高,需要地面平坦且倾斜角度小,因此传统无人机起落架在面对砾石、斜坡等复杂地形时通常无法正常起降。现有的解决办法是建造专门的起降平台使无人机往返来完成起降过程^[6],但对于灾难救援和野外探测等任务,需要无人机在倾斜地形或野外不平的地面上起降,这种解决办法严重限制了无人机的使用范围^[7]。

随着执行任务的现代化和复杂化的程度不断提高,对飞行器的要求越来越高^[8]。为适应复杂野外环境着陆和复杂应用场景的需求,提高旋翼无人机的地形和环境适应能力,国内外开展了自适应起落架的研究来克服着陆地形对其的限制,拓宽旋翼飞行器的适用范围。Boix等^[9]设计出一种利用比例铰接式的起落架,通过驱动电机主动调节起落架的结构以适应复杂地形;Stolz等^[10]提出了一种结构简单的四腿单自由度起落架,电机和制动器并联布置以减轻硬着陆期间电机的冲击力;桑喆等^[11]采用单自由度四杆机构,设计了一种针对小型无人直升机的仿生起落架;张伟哲等^[12]在传统无人机起落架设计方案的基础上提出了设计更改方案,验证了其工程可行性和地形自适应方面的改善作用;刘昊林等^[13]设计了一种基于多连杆机构的仿生腿式起落架系统,实现了其在复杂地形上的平稳着陆。

目前研究的自适应起落架大多数采用简单连杆的可移动起落架,刚性框架的固定设计会产生较大冲击力,但是大多数小型无人机设计中很少考虑冲击力的影响,针对小型无人机的自适应起落架缓冲结构设计比较简单。随着旋翼无人机用途的不断拓展,无人机的重量和下沉速度也逐渐增大,对自适应起落架的设计要求也越来越高。

Zhang K等^[14]将Sarrus减震器和软着陆垫与一自由度驱动机构集成在一起构成起落架系统以适应不同的表面结构,并降低冲击载荷;Ni X等^[15]设计了一种新型的带被动缓冲结构的多旋翼无人机四腿起落架,验证了其自适应着陆和缓冲能力。为了促进旋翼无人机在各种地形结构、天气条件、着陆模式和速度下的动态着陆,着陆机构不仅需要适应不同的地形结构,还应该具有较好的吸收冲击能量的缓冲功能。

本文基于形态仿生的理念^[16]设计一种新型两级缓冲自适应仿生腿式起落架,据此建立六旋翼无人机着陆动力学模型,基于simcenter 3D开展着陆动力学仿真,并传统橇式起落架进行着陆性能对比。

1 构型设计

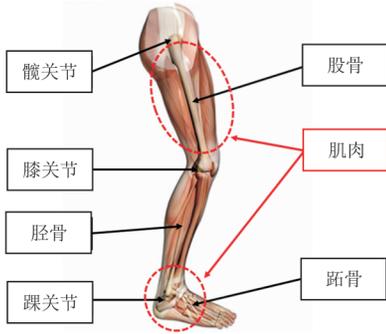
为了保证旋翼无人机在面对复杂地形时能够自适应着陆,本文采用四腿式结构,设计一种新型两级缓冲自适应仿生腿式起落架,该结构既能提供一定的稳定性,又能提高着陆时的承载能力,四个支腿的结构完全相同且相对于旋翼无人机的重心位置中心对称分布。

本文设计的两级被动缓冲结构用于模仿人的腿和脚的运动机制,如图1所示,人的腿和脚由骨骼、肌肉和肌腱等构成,而在现代研究中,肌肉和肌腱被视为弹簧等弹性元件,通过弹性弯曲和拉伸来存储和耗散能量。两级缓冲自适应起落架的单腿结构主要由电机、股骨臂、胫骨臂、跖骨臂、上缓冲器、下缓冲器、连接件和足垫组成。电机设置在连接件与股骨臂的连接关节处,并将该主动关节命名为髌关节,通过电机驱动起落架单腿调整髌关节角度,股骨臂和跖骨臂与胫骨臂连接处的两个被动关节分别命名为膝关节和踝关节。

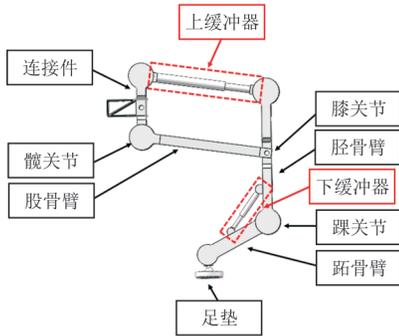
上缓冲器两端分别与连接件和胫骨臂铰接,用于模仿股骨与胫骨之间的肌肉和肌腱,与股骨臂平行布置构成平行四边形结构;下缓冲器两端分别与胫骨臂和跖骨臂铰接构成三角形,用于模仿胫骨与跖骨之间的肌肉与肌腱,吸收和耗散降落时的冲击能量。

为了提高两级缓冲自适应起落架对地面的适应能力,将足垫与跖骨臂通过球铰连接在一起,保证旋翼无人机在着陆时有较大的接触面和接触压

力。足垫形状采用平底形,增大了无人机降落时的触地面积,避免压力集中产生下陷现象,材料采用橡胶制作,在保证仿生着陆腿稳定的同时,又能为起降落提供额外的缓冲减震功能。



(a) 人体腿和脚的解剖视图



(b) 两级缓冲自适应起落架单腿结构

图 1 两级缓冲自适应起落架仿生原理
Fig. 1 Bionic principle of two-stage cushioned adaptive landing gear

本文主要研究两级缓冲自适应起落架的着陆性能,因此忽略旋翼空气动力学对机体的影响和结构之间的连接件,且认为部件之间连接可靠。

2 运动学模型和调整策略

2.1 坐标系的建立

为了清晰地描述两级缓冲自适应起落架的运动状态,对本文所用到的坐标系进行定义。旋翼无人机前后、左右对称且四个支腿相对于旋翼无人机的重心位置中心对称,定义机体坐标系为 b 系,记为 $O_b X_b Y_b Z_b$,机体坐标系的原点与机体重心重合,如图 2 所示。定义单腿坐标系为 l 系,记为 $O_l X_l Y_l Z_l$,股骨臂与机身连接处为单腿坐标系 l 的坐标原点,如图 3 所示。

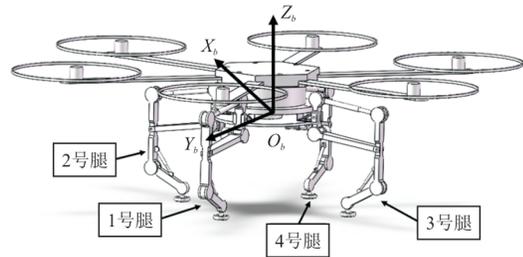


图 2 机体坐标系

Fig. 2 Body coordinate system

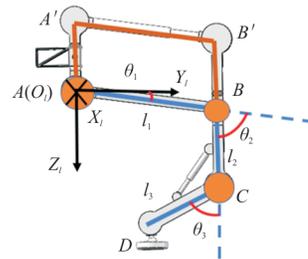


图 3 单腿坐标系

Fig. 3 Single leg coordinate system

2.2 单腿运动学建模

运动学正解在单腿坐标系中是根据腿部各关节的角度求解足端点的位姿,设股骨臂长度 AB 为 l_1 ,髌关节角度为 θ_1 ,胫骨臂长度 BC 为 l_2 ,膝关节角度为 θ_2 ,跖骨臂长度 CD 为 l_3 ,踝关节角度为 θ_3 。旋翼无人机在空中悬停调整腿部姿态时,髌关节作为主动关节带动被动关节膝关节转动,而另一被动关节踝关节只在着陆后发生转动,故在悬停阶段不考虑踝关节的角度变化,两个缓冲器作为被动缓冲器无压缩或拉伸行程,单腿模型可简化为一个单自由度模型。在 $Y_l O_l Z_l$ 平面内,足端坐标为 (y, z) 。

$$\begin{cases} y = l_1 \cos \theta_1 - l_3 \sin \theta_3 \\ z = l_1 \sin \theta_1 + l_2 + l_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

在单腿坐标系中,逆运动学是正运动学分析的逆过程,可以根据足端点的位姿来求解腿部髌关节的角度,以此来控制髌关节转动完成预先规划的足端轨迹运动。

髌关节角度为

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{y}{z} - \cos^{-1} \frac{l_1^2 + z^2 + y^2 - l_2^2 - l_3^2 - 2l_2 l_3 \cos \theta_3}{2l_1 \sqrt{y^2 + z^2}} \quad (2)$$

根据平行四边形结构的运动规律,被动关节膝关节的角度为

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_1 \quad (3)$$

2.3 两级缓冲自适应起落架调整策略

复杂地形(如砾石、凹坑等)的地形数据可以通过叠加使用相对高度差和相对坡角来描述,因此复杂地形大致可以简化为两类,即高度差地形和斜坡地形。高度差为 5 cm、坡角为 15°的落震仿真简化模型如图 4 所示。

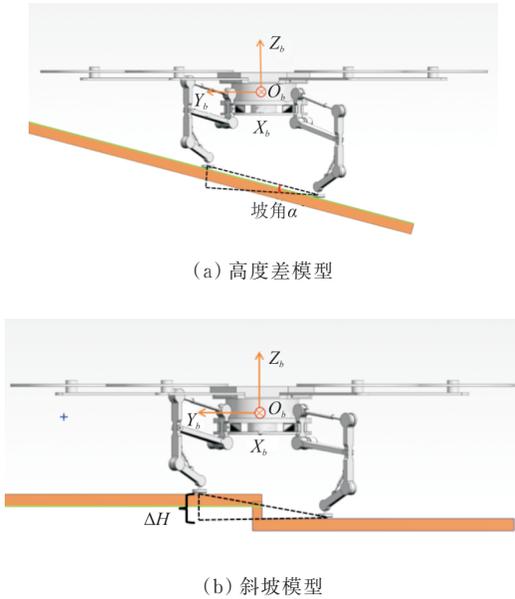


图 4 复杂地形简化模型

Fig. 4 Simplified models for complex terrain

基于上述简化模型,本文提出一种着陆腿的姿态调整策略,其目的是保证着陆时四个支腿同时触地且机体保持水平状态。在悬停过程中,无人机的主水平面与世界坐标系的水平面保持平行,足垫在腿部坐标系的坐标为 (x, y, z) 。通过支腿上的传感器获取到地形数据后,电机驱动股骨臂转动,胫骨臂和跖骨臂在 $Y_l O_l Z_l$ 面内运动,且胫骨臂始终平行于 Z_l 轴保持竖直状态,足垫坐标更改为 $(x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ 以适应未知的复杂地形。

3 着陆动力学模型

3.1 传统撬式起落架

传统撬式起落架是旋翼无人机机体上的固定

结构,在面对复杂地形时通常无法实现两滑橇同时着陆。针对传统撬式起落架建立着陆模型,如图 5 所示。

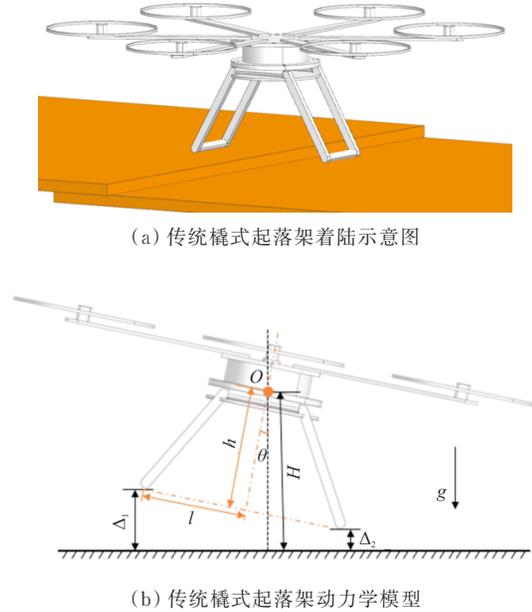


图 5 传统撬式起落架着陆模型

Fig. 5 A traditional skid landing gear landing model

根据单边约束条件:

$$\begin{cases} \Delta_1 = H - h \cos \theta + l \sin \theta \geq 0 \\ \Delta_2 = H - h \cos \theta - l \sin \theta \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 为旋翼无人机质心 O 点到水平地面的投影距离; h 为质心沿机体轴向到传统撬式起落架底部的距离; l 为两个滑橇跨距的一半; θ 为旋翼无人机的滚转角; Δ_1 、 Δ_2 分别为两个滑橇距着陆面的距离。

系统的动力学方程为

$$\begin{cases} m\ddot{L} = f_1 + f_2 \\ m\ddot{H} = F_1 + F_2 - mg \\ J_o\ddot{\theta} = f_1(h \cos \theta - l \sin \theta) + f_2(h \cos \theta + l \sin \theta) + F_1(h \sin \theta + l \cos \theta) + F_2(l \cos \theta - h \sin \theta) \end{cases} \quad (5)$$

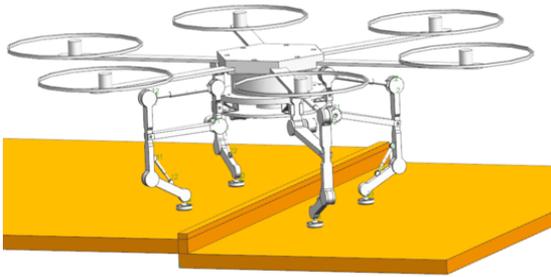
式中: m 为旋翼无人机的质量; L 为 O 点在水平地面上的投影点到左侧滑橇底部投影点的距离; J_o 为旋翼无人机绕过质心且垂直于运动平面的轴的转动惯量; F_1 、 F_2 为两个滑橇受到着陆面的法向冲击力; f_1 、 f_2 为两个滑橇受到的切向摩擦力。

F_1 、 F_2 与 Δ_1 、 Δ_2 满足线性互补条件^[17]:

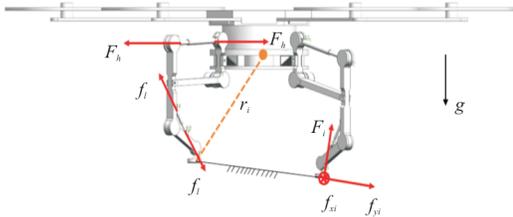
$$\begin{cases} F_i \geq 0 \\ \Delta_i \geq 0 \end{cases} \quad (i=1, 2) \quad (6)$$

3.2 两级缓冲自适应起落架

两级缓冲自适应起落架在面对复杂地形时可以主动调节腿部姿态,实现四个支腿同时着陆,其着陆模型如图6所示。



(a) 两级缓冲自适应起落架着陆示意图



(b) 两级缓冲自适应起落架动力学模型

图6 两级缓冲自适应起落架着陆模型

Fig. 6 Two-stage buffered adaptive landing gear landing model

起落架上受到的扭矩和力可以表示为

$$\begin{cases} M = \sum_{i=1}^4 r_i \times (F_i + f_i) \\ F = mg + \sum_{i=1}^4 (F_i + f_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中: r_i 为足端到旋翼无人机质心的矢量; m 为旋翼无人机的质量; F_i 和 $f_i = f_{xi} + f_{yi}$ 为每个足端所受到的法向冲击力和切向摩擦力。

缓冲器可等效为一阶弹簧阻尼系统,套筒和活塞产生的力由两部分组成,一个是套筒与活塞之间相对运动而产生的弹性力,另一个是由相对速度产生的阻尼力,其表达形式可以表示为

$$F_b = K\delta + C\nu \quad (8)$$

式中: F_b 为缓冲器产生的力; K 为弹簧刚度; δ 为套筒与活塞的相对位移; C 为阻尼系数; ν 为套筒与活

塞的相对速度。

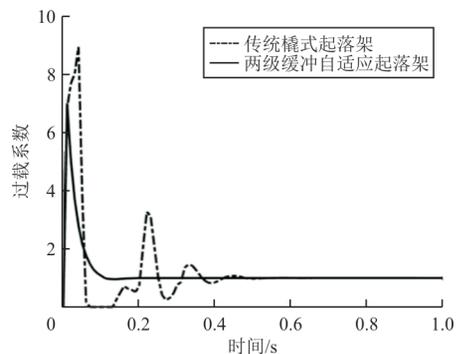
对比式(5)、式(7)可知,两级缓冲自适应起落架着陆动力学模型与传统橇式起落架最大的区别在于:传统橇式起落架固定的构型导致旋翼无人机在面对任何地形时底部到无人机质心的矢量始终是一个定值^[5],而两级缓冲自适应起落在面对不同地形时可以根据传感器获得的地面参数来自适应地调整起落架姿态,因此每条支腿的足端到无人机质心的矢量是一个变化的值,保证了两级缓冲自适应起落架具备安全着陆的地形适应能力;橇式起落架主要通过与地面发生碰撞来耗散能量^[18],而两级缓冲自适应起落架在此基础上还可以通过缓冲器压缩行程来达到快速耗散能量的目的。

4 落震仿真对比分析

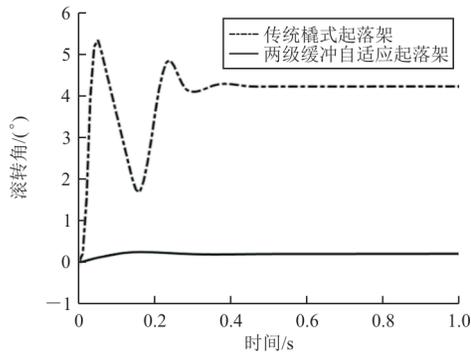
为了分析两级缓冲自适应起落架面对复杂地形时的着陆性能,分别对传统橇式起落架和两级缓冲自适应起落架进行高度差和斜坡两种地形的落震仿真。定义过载系数为地面法向冲击力与整机重量的比值,机体滚转角沿 X_b 轴正方向为正,旋翼无人机质心处的速度沿 Z_b 轴的正方向为正。

4.1 高度差地形

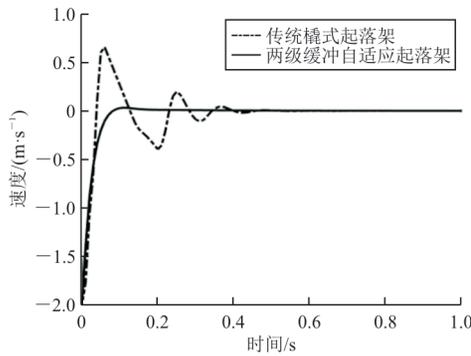
在simcenter 3D动力学软件中建立5 cm高度差的地面模型,分别导入两级缓冲自适应起落架和传统橇式起落架虚拟旋翼无人机,进行着陆速度为2 m/s的落震试验动态仿真,传统橇式起落架与两级缓冲自适应起落架在高度差地形上着陆时过载系数、机体滚转角和质心速度的变化曲线如图7所示。



(a) 过载系数



(b) 机体滚转角



(c) 质心速度

图 7 5 cm 高度差地形着陆模拟曲线对比
Fig. 7 Comparison of 5 cm height difference terrain landing simulation curve

从图 7(a)可以看出:两级缓冲自适应起落架的过载系数最大值相较于传统橇式起落架降低了 21.79%,且没有出现起落架离地现象;从图 7(b)可以看出:两级缓冲自适应起落架在着陆时机体滚转角相较于传统橇式起落架降低了 95.69%,且变化平稳;从图 7(c)可以看出:两级缓冲自适应起落架足端触地后,旋翼无人机质心处的反弹速度相较于传统橇式起落架降低了 96.97%。

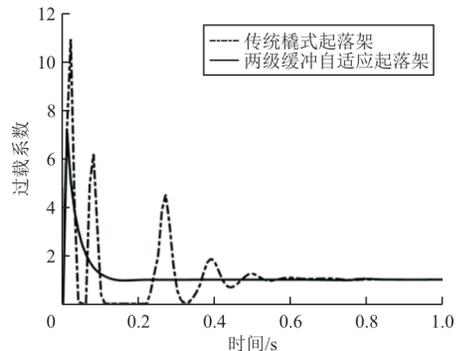
传统橇式起落架和两级缓冲自适应起落架在 5 cm 高度差地形上着陆时,过载系数、机体滚转角和触地反弹后质心速度最大值的结果对比如表 1 所示。

表 1 高度差地形着陆结果对比
Table 1 Comparison of altitude difference terrain landing results

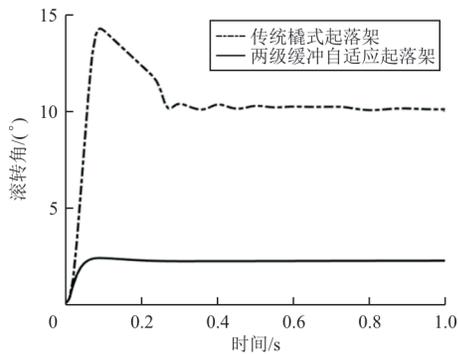
构型	过载系数	机体滚转角/(°)	质心速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
传统橇式	8.95	5.34	0.66
两级缓冲自适应	7.00	0.23	0.02

4.2 斜坡地形

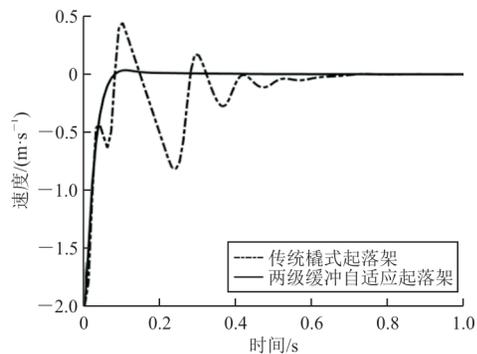
在 simcenter 3D 动力学软件中建立 15° 坡角的斜坡模型,分别导入两级缓冲自适应起落架和传统橇式起落架旋翼无人机,进行着陆速度为 2 m/s 的落震试验动态仿真。传统橇式起落架与两级缓冲自适应起落架在斜坡地形上着陆时过载系数、机体滚转角和质心速度的变化如图 8 所示。



(a) 过载系数



(b) 机体滚转角



(c) 质心速度

图 8 15° 坡角地形着陆模拟曲线对比
Fig. 8 Comparison of 15° slope terrain landing simulation curve

从图 8(a)可以看出:两级缓冲自适应起落架的过载系数最大值相较于传统橇式起落架降低了

34.06%,且没有出现起落架离地现象;从图8(b)可以看出:两级缓冲自适应起落架在着陆时对机体滚转角的影响相较于传统橇式起落架降低了83.57%,且变化平稳;从图8(c)可以看出:两级缓冲自适应起落架足端触地后,旋翼无人机质心处的反弹速度相较于传统橇式起落架降低了93.33%。

传统橇式起落架和两级缓冲自适应起落架在15°斜坡地形上着陆时,过载系数、机体滚转角和触地反弹后质心速度的最大值的对比结果对比如表2所示。

表2 斜坡地形着陆结果对比
Table 2 Comparison of slope terrain landing results

构型	过载系数	机体滚转角/(°)	质心速度/(m·s ⁻¹)
传统橇式	10.98	14.30	0.45
两级缓冲自适应	7.24	2.35	0.03

与传统橇式起落架相比,两级缓冲自适应起落架在高度差地形和斜坡地形上着陆时无明显反弹离地现象,且过载系数最大降低了34.06%,说明双缓冲自适应起落架具有较好的着陆缓冲性能,能够有效减小冲击载荷;机体滚转角最大降低了95.69%,有利于旋翼无人机的复飞;过载系数、机体滚转角和质心速度均只有一个峰值,变化趋势较为平稳且均在0.02s左右达到稳态值,说明两级缓冲自适应起落架相较于传统橇式起落架在面对复杂地形时具备安全着陆的地形适应能力。

5 结论

1) 本文设计的具有两级缓冲的自适应起落架,提高了旋翼无人机在复杂自然地形环境下的起降能力。

2) 基于几何方法建立了单腿的正逆运动学分析数学模型,并据此提出了两级缓冲自适应起落架的姿态调整策略。

3) 建立的传统橇式起落架和两级缓冲自适应起落架的着陆动力学模型,选择高度差地形和斜坡地形进行着陆速度为2m/s的落震仿真,过载系数最大降低34.06%,能够有效地减小冲击载荷,滚转角最大减小了95.69%,有利于旋翼无人机复飞,触地反弹的速度可以忽略不计,证明了两级缓

冲自适应起落架在面对复杂地形时具备安全着陆的地形适应能力。

参考文献

- [1] 刘峰, 喻辉, 高鸿渐, 等. 重载四旋翼无人机结构优化设计与强度计算[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 99-106.
LIU Feng, YU Hui, GAO Hongjian, et al. Structural optimization design and strength calculation of heavy-duty quadrotor UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 99-106. (in Chinese)
- [2] HU D, LI Y, XU M, et al. Research on UAV adaptive landing gear control system[J]. Journal of Physics, 2018(1): 1061.
- [3] TANG H, TIAN C, ZHANG D. A novel terrain adaptive landing gear robot[J]. Journal of Physics, 2021(1): 1342.
- [4] TANG H, ZHANG D, GAN Z. Control system for vertical take-off and landing vehicle's adaptive landing based on multi-sensor data fusion[J]. Sensors, 2020, 20(16): 1-20.
- [5] PENG C, CHOWDHURY A M M B, CHENG J, et al. Development of a robotic landing system for uavs applied in various terrains[C]// International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. US: American Society of Mechanical Engineers, 2020: 83990.
- [6] REN J, WANG J, LIU X. Design and analysis of terrain-adaptive bionic landing gear system[C]// 2018 37th Chinese Control Conference. US: IEEE, 2018: 5504-5508.
- [7] REN Jia, WANG Jizhen, LIU Xiaochuan, et al. Terrain-adaptive bionic landing gear system design for multi-rotor UAVs[C]// 2019 Chinese Control And Decision Conference. Nanchang: IEEE, 2019: 5757-5762.
- [8] 吴蔚. NASA明确未来25年航空研究工作重点[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 81-82.
WU Wei. NASA clarifies aeronautical research priorities in the next 25 years[J]. Aeronautical Science and Technology, 2020, 31(4): 81-82. (in Chinese)
- [9] BOIX D M, GOH K, MCWHINNIE J. Modelling and control of helicopter robotic landing gear for uneven ground conditions[C]// 2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems. US: IEEE, 2017: 60-65.
- [10] 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. US: IEEE, 2018: 1757-1763.
- [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 Jizhou, et al. Bionic landing gear design of small unmanned helicopter[J]. Modern