

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.01.007

# 仿蚱蜢跳跃机器人腿部结构与性能分析

熊勇刚, 成威, 龚琦, 田万鹏

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 以跳跃性能出色的蚱蜢为仿生原型, 分析蚱蜢腿部的生理结构, 建立仿蚱蜢后腿结构模型。根据蚱蜢的身体结构特点, 以曲柄滑块机构模仿蚱蜢腿部肌腱, 以弹簧模仿腿部关节的半月板结构并作为储能机构, 仿生设计了一种具有高爆发和出色的跳跃性能的腿部弹跳机构模型。并从动力学和运动学两方面对该模型进行了分析, 采用 Matlab 数值计算的方法证明了所设计模型的合理性。最后, 将模型导入 ADAMS 中进行虚拟样机实验分析, 结果显示模型在高爆发、跳跃性能等方面具有较好的优越性。

**关键词:** 仿蚱蜢跳跃机器人; 结构设计; 跳跃结构; 半月板; ADAMS

**中图分类号:** TP24

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2021)01-0048-08

**引文格式:** 熊勇刚, 成威, 龚琦, 等. 仿蚱蜢跳跃机器人腿部结构与性能分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 48-55.

## Design and Performance Analysis of Bionic-Grasshopper Jumping Robot Legs

XIONG Yonggang, CHENG Wei, GONG Qi, TIAN Wanpeng

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Taking the grasshopper with excellent jumping performance as the bionic prototype, an analysis has been made of the physiological structure of the grasshopper's legs, thus establishing the structure model of the grasshopper's hind legs. Based on the analysis of the characteristics of the grasshopper's physical structure, the crank slider mechanism is used to imitate the grasshopper leg tendons, with the spring applied to the imitation of the meniscus structure of the leg joints as an energy storage mechanism, thus designing a bionic model of a leg with high burst and excellent jumping performance. A further analysis has been made of the model in terms of dynamics and kinematics, with the method of Matlab numerical calculation used to prove the rationality of the designed model. Finally, the model is imported into ADAMS for virtual prototype experiment analysis. The results show that the model is characterized with a distinctive advantage in high burst and jumping performance.

**Keywords:** grasshopper jumping robot; structural design; jumping structure; meniscus; ADAMS

### 1 研究背景

相比于轮式、步行和履带式等移动模式, 跳跃运动具有更好地适应非结构化地形、更加快速地越障和

避让危险的优势。因此, 在察探地形、探寻矿石和侦察敌情等领域之中, 跳跃机器人拥有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。同时, 由于跳跃机器人可以轻松地越过数倍于自身尺寸的障碍物, 这使得它在面对不平整地形上能

收稿日期: 2020-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51345005), 株洲市科技专项基金资助项目(株科发[2018]61号-03)

作者简介: 熊勇刚(1966-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机械设计和仿生方面的教学与研究, E-mail: xygyxj@163.com

发挥出更大的优势。因而, 跳跃机器人逐渐进入机械设计领域研究者的视野中, 现已成为机械设计研究的热门领域之一。

蚱蜢、蝗虫、跳蚤、袋鼠、松鼠等生物因表现出了优秀的运动性能, 都可以被作为跳跃机器人的仿生对象。如陈东良等<sup>[2]</sup>通过研究蝗虫的后腿结构特性, 以具有仿生特性的四连杆结构模拟蝗虫的后腿结构, 以弹簧为储能结构, 设计出仿蝗虫跳跃机器人。实验测得该机器人具有良好的跳跃性能, 其跳跃高度可达 20 cm, 跳跃距离可达 80 cm。倪虹等<sup>[3]</sup>基于蝗虫的跳跃性能和力学特性, 设计出以六连杆结构为腿部机构的仿生跳跃机器人。实验测得该机器人的跳跃高度能达到自身高度的 129%。王欣等<sup>[4]</sup>通过对蝗虫的生理结构进行分析, 采用双摇杆机构模拟蝗虫后腿结构, 并且通过优化算法对其结构进行了优化。国立首尔大学研制的仿跳蚤跳跃机器人, 利用记忆合金模拟跳蚤的后腿肌肉伸缩过程, 并且以四连杆结构为基础设计出机器人的后腿机构。该跳跃机器人的质量仅为 1.1 g, 身长 2 cm, 却可以实现相当于自身 30 倍的跳跃高度<sup>[5]</sup>。加州大学伯克利分校科研人员以平面八连杆机构为基础, 结合串联弹簧驱动器, 研制出了平均每隔 0.58 s 便可以实现一次跳跃的机器人 Salto<sup>[6-7]</sup>。王永健等<sup>[8]</sup>通过对松鼠的生理结构和运动机理进行研究, 并且基于柔性脚趾设计出一种松鼠腿部跳跃机构, 最后以实验证明了该机构能有效地模拟松鼠的跳跃特性。然而在大自然之中, 与其他仿生对象相比, 蚱蜢的跳跃性能更为优异, 其跳跃距离能达到自身长度的 15~30 倍<sup>[9-10]</sup>。加之蚱蜢在空中可以通过翅膀调整姿态, 并且落地时的缓冲性能良好, 因而成为了众多学者的研究对象。

本研究拟以蚱蜢为仿生研究对象, 通过分析蚱蜢运动机理和后足的生理结构, 仿生设计一种具有高爆发和出色的跳跃性能的腿部跳跃机构, 然后对跳跃机构进行简化, 根据运动学分析方法建立蚱蜢跳跃运动模型, 并且从动力学和运动学的角度对模型进行分析与计算。最后, 通过 ADAMS 虚拟样机, 对设计的跳跃机构进行仿真实验, 以证明其在爆发性和跳跃性能方面的优越性。

## 2 蚱蜢跳跃机构模型的建立

### 2.1 蚱蜢腿部结构与运动机理

蚱蜢与自然界中大多数能够跳跃的生物类似, 起跳的能量主要由发达的后足肌肉收缩提供。腿节、胫节、跗足 3 部分构成蚱蜢的后足, 其中跗足起稳定和支撑躯体的作用, 并通过跗关节与胫节连接, 腿节通

过膝关节与胫节连接, 通过肌腱的伸缩拉动胫节绕膝关节转动, 腿节通过髁关节与身体相连。蚱蜢后足的结构如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

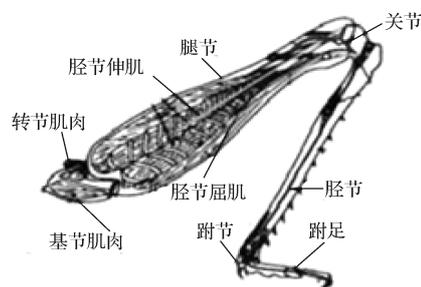


图 1 蚱蜢后足的生物结构模型  
Fig. 1 Biological structure model of grasshopper hind feet

胫节伸肌和胫节屈肌是蚱蜢后足肌肉的主要组成部分, 其相互配合, 使胫节绕关节向腿节方向转动, 从而完成蚱蜢的起跳过程。已有研究表明, 在蚱蜢的后足膝关节处有一个与弹簧相似的半月板结构, 蚱蜢在起跳前依靠腿节的肌肉收缩带动半月板, 在起跳瞬间释放出半月板中积蓄的能量, 让胫节快速后摆, 完成起跳动作。图 2 所示为一个完整的蚱蜢起跳过程示意图。

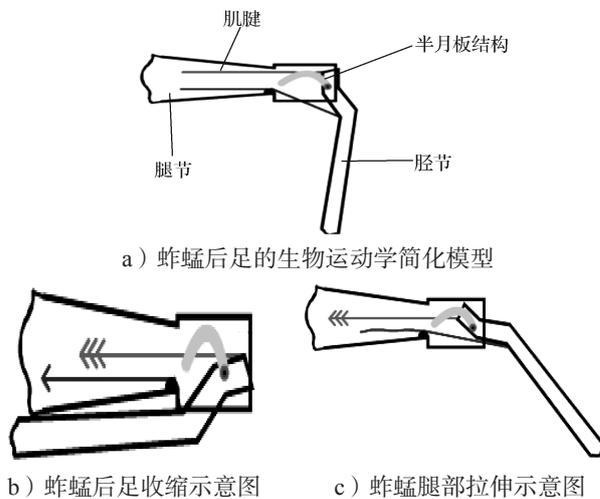


图 2 蚱蜢起跳阶段后足运动示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the hind foot movement of the grasshopper in the take-off phase

### 2.2 蚱蜢跳跃机构建模

基于对蚱蜢生理结构和运动机理的分析, 仿生设计了蚱蜢后足机构模型, 如图 3 所示。蚱蜢跳跃机构模型主要包括 4 部分: 弹簧装置、减震系统、三连杆和曲柄滑块结构。在起跳阶段, 通过拉动曲柄滑块结构使弹簧装置蓄力, 并拉动胫节完成蓄力阶段, 随后释放弹簧, 依靠弹簧的瞬间释放使模型对地面产生极大的作用力, 从而使模型获得最大的起跳速度。

在落地阶段，通过减震系统，缓冲对地面的冲击力，并且为第二次起跳积蓄能量。

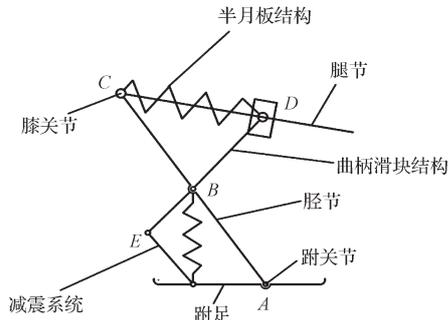


图3 蚱蜢跳跃机构模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of grasshopper jumping mechanism model

### 3 跳跃机构的建模分析

#### 3.1 运动学建模与分析

对所设计的蚱蜢腿部跳跃机构模型进行简化，将各关节简化为自由度为1的转动副。 $l_1$ 绕固定点 $O$ 转动， $l_1$ 和 $l_2$ 绕跗关节点 $A$ 转动， $l_2$ 和 $l_3$ 绕膝关节点 $B$ 转动， $l_3$ 和 $l_4$ 绕髌关节点 $C$ 转动。采用运动学分析方法<sup>[12]</sup>建立如图4所示的运动学模型，其中 $X_0$ - $Y_0$ 是基坐标系， $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 分别为跗足、胫节、腿节、躯体。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 分别为跗足与地面夹角、跗足角、膝关节脚、髌关节角。

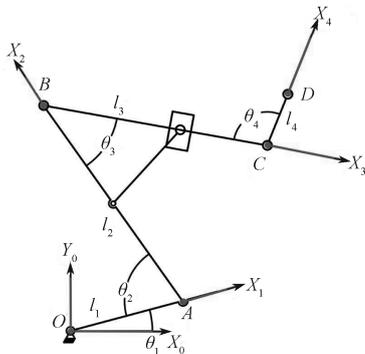


图4 蚱蜢腿部机构运动模型简图

Fig. 4 Sketch of the movement model of the grasshopper leg mechanism

两相邻连杆之间的齐次变换矩阵如下：

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\pi - \theta_2) & -\sin(\pi - \theta_2) & 0 & l_2 \cos(\pi - \theta_2) \\ \sin(\pi - \theta_2) & \cos(\pi - \theta_2) & 0 & l_2 \sin(\pi - \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\pi - \theta_3) & -\sin(\pi - \theta_3) & 0 & l_3 \cos(\pi - \theta_3) \\ \sin(\pi - \theta_3) & \cos(\pi - \theta_3) & 0 & l_3 \sin(\pi - \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos(\pi - \theta_4) & -\sin(\pi - \theta_4) & 0 & l_4 \cos(\pi - \theta_4) \\ \sin(\pi - \theta_4) & \cos(\pi - \theta_4) & 0 & l_4 \sin(\pi - \theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

机器人各关节关于基坐标系 $O X_0 Y_0 Z_0$ 的位姿可由下式计算得：

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} {}^0A_n & {}^0h_n \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, n=1, 2, 3, 4.$$

式中： ${}^0A_n$ 为关节坐标系相对于 $X_0$ - $Y_0$ 坐标系的旋转矩阵； ${}^0h_n$ 为各关节坐标系相对于 $X_0$ - $Y_0$ 坐标系的位移矢量； $\mathbf{0}$ 、 $\mathbf{1}$ 均为分块矩阵。

髌关节的变换矩阵为

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_{1-2-3} & -s_{1-2-3} & 0 & h_x \\ s_{1-2-3} & c_{1-2-3} & 0 & h_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中 $(h_x, h_y)$ 为髌关节的位置坐标，且

$$\begin{cases} h_x = l_3 \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) - l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \cos \theta_1, \\ h_y = l_3 \sin(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \sin \theta_1. \end{cases} \quad (1)$$

将蚱蜢腿部关节角度的离散数值<sup>[13]</sup>通过Matlab进行多项式曲线拟合后，得到如图5所示的各关节角度变化规律曲线。

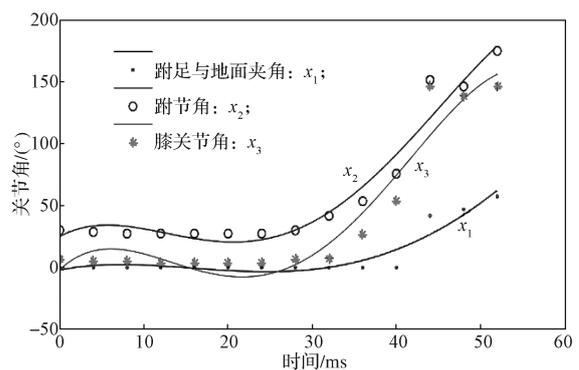


图5 蚱蜢起跳阶段关节角度变化规律曲线

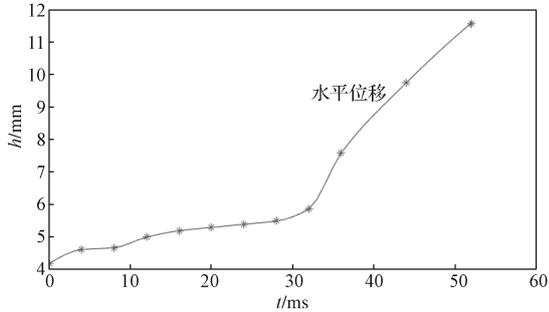
Fig. 5 Regular curves of the joint angle change of grasshopper during the take-off phase

将图5中蚱蜢起跳阶段的各关节角度和表1<sup>[14]</sup>所示蚱蜢的腿部尺寸代入机构运动学表达式(1)中。基于Matlab对表达式进行编程计算，得到起跳阶段蚱蜢腿部关节在 $X$ 方向和 $Y$ 方向的位移变换曲线，如图6所示。

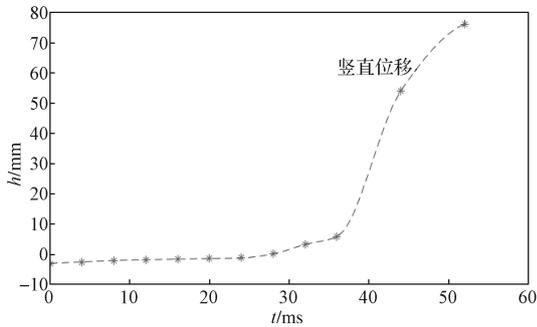
表 1 蚱蜢腿部尺寸

Table 1 Grasshopper leg sizes mm

跗节 $l_1$	胫节 $l_2$	腿节 $l_3$	躯体 $l_4$
5	26	27	50



a) 髋关节 X 方向位移



b) 髋关节 Y 方向位移

图 6 髋关节位移曲线

Fig. 6 Hip joint displacement curve

把蚱蜢仿真中得到的髋关节的数据与图 6 进行对比分析, 发现两者的曲线变化趋势基本上一致, 这表明模型在运动学方面的分析是正确的。

在跳跃机器人的研究中, 发现影响跳跃机器人弹跳性能的主要因素为弹跳高度和起跳速度。因此从运动学角度来说, 微分分析对于弹跳机构的研究也是必不可少的。在机器人学中, 利用雅可比矩阵对跳跃机器人进行微分运动求解是最常用的手段之一, 一般采用雅可比矩阵把关节速度和机构末端的笛卡尔速度关联起来<sup>[14]</sup>, 即

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\theta)\dot{\mathbf{Q}}(\theta) \text{ 或 } \begin{bmatrix} dv_x \\ dv_y \end{bmatrix} = [\mathbf{J}] \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{v}$  为结构末端笛卡尔速度;  $\mathbf{J}(\theta)$  为雅可比矩阵;  $\dot{\mathbf{Q}}(\theta)$  为结构关节在关节空间的速度。

为了表明仿蚱蜢跳跃机构的运动学特性, 课题组选取髋关节为对象进行研究, 通过 Matlab 对机器人起跳阶段的运动学进行数值计算, 然后分析髋关节在起跳阶段的速度变化。数值计算步骤如下: 采用最小二乘拟合方法对图 6 中的关节角度数据进行处理, 得到各关节的运动函数, 将运动函数进行微分求解,

得到角速度  $\dot{\mathbf{Q}}(\theta)$ ; 其次, 由髋关节的变换矩阵, 得到雅可比矩阵  $\mathbf{J}(\theta)$ ; 最后, 把身体参数代入前文研究成果中, 通过 Matlab 对表达式 (2) 进行编程求解。图 7 是求解所得的髋关节在起跳阶段的速度曲线图。

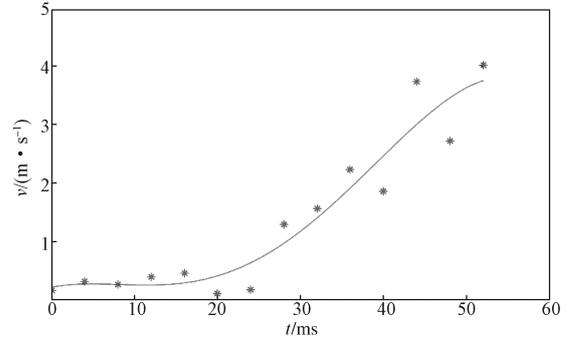


图 7 起跳阶段髋关节速度曲线

Fig. 7 Hip joint velocity curve during the take-off phase

由图 7 可以看出, 一个完整的起跳过程可以分为两个阶段: 起跳前期 (0~28 ms), 此阶段髋关节速度变化不明显, 主要是腿节肌肉的蓄力。起跳后期 (28~52 ms), 在伸肌和屈肌的共同作用下, 各骨骼关节快速展开, 膝关节半月板中存储的能量迅速释放, 让髋关节速度快速增大, 进而以最大的起跳速度离开地面。

将图 7 所示起跳阶段速度与髋关节起跳阶段仿真结果 (如图 8 所示) 进行对比, 发现两者的变化趋势大体上一致, 从而证明了所建立的仿蚱蜢腿部结构模型的合理性与可行性。

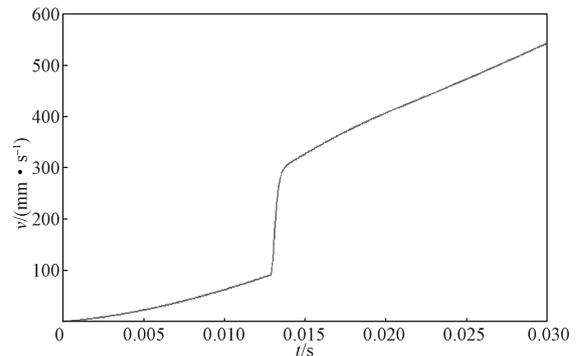


图 8 起跳阶段髋关节速度仿真曲线

Fig. 8 Hip joint velocity simulation curve during the take-off phase

### 3.2 动力学建模与分析

从能量的角度对动力学分析是拉格朗日方程的优点之一。拉格朗日方程的建立是基于对模型的动能和势能的求解, 再对其进行微分求解, 可以获得各关节的输出力矩。根据拉格朗日方程, 由模型的运动学模型建立蚱蜢后腿的动力学模型, 如图 9 所示, 其中弹簧装置和滑块没有画出。

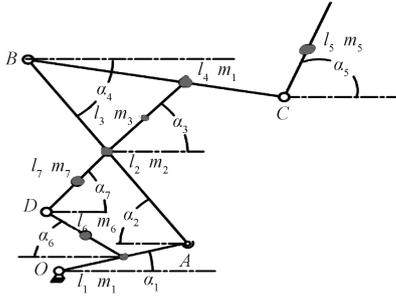


图9 蚱蜢腿部机构动力学模型

Fig. 9 Dynamics model of grasshopper leg mechanism

重新定义模型的各关节角度, 有利于拉格朗日方程的导出, 则进行如下定义:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \theta_1, \\ \alpha_2 = \theta_2 - \theta_1, \\ \alpha_3 = \theta_2 - \theta_1, \\ \alpha_4 = \theta_2 - \theta_1 - \theta_3, \\ \alpha_5 = \pi - \theta_4 - \theta_2 + \theta_1 + \theta_3, \\ \alpha_6 = \theta_2 - \theta_1, \\ \alpha_7 = \theta_2 - \theta_1. \end{cases}$$

系统的总动能  $T$  由如下两部分组成: 连杆质心角速度产生的动能  $E_k$  和连杆质心线速度产生的动能  $E_p$ , 即

$$T = E_k + E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^7 I_i \dot{\alpha}_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^7 m_i \dot{r}_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^7 I_i \dot{\alpha}_i^2 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (3)$$

式中:  $m_i$  为各连杆的质量;  $r_i$  为各连杆的质心速度, 且  $\dot{r}_i^2 = \dot{r}_{xi}^2 + \dot{r}_{yi}^2$ ;  $I_i$  为各连杆的质心转动惯量;  $\dot{\alpha}_i$  为各关节的转动角速度;  $Q_1 \sim Q_7$  分别代表各杆件的平动动能, 且

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{2} I_1 \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{8} m_1 l_1^2 \dot{\alpha}_1^2, \\ Q_2 &= \frac{1}{2} I_2 \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[ l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \right], \\ Q_3 &= \frac{1}{2} I_3 \dot{\alpha}_3^2 + \frac{1}{2} m_3 \left[ l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{4} l_3^2 \dot{\alpha}_3^2 + l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + l_1 l_3 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_3 \cos(\alpha_1 - \alpha_3) + \frac{1}{4} l_2 l_3 \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_3 \cos(\alpha_2 - \alpha_3) \right], \\ Q_4 &= \frac{1}{2} I_4 \dot{\alpha}_4^2 + \frac{1}{2} m_4 \left[ l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{4} l_4^2 \dot{\alpha}_4^2 + 2l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + l_1 l_4 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_4 \cos(\alpha_1 - \alpha_4) + l_2 l_4 \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_4 \cos(\alpha_2 - \alpha_4) \right], \end{aligned}$$

$$Q_5 = \frac{1}{2} I_5 \dot{\alpha}_5^2 + \frac{1}{2} m_5 \left[ l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + l_4^2 \dot{\alpha}_4^2 + \frac{1}{4} l_5^2 \dot{\alpha}_5^2 + 2l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + 2l_1 l_4 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_4 \cos(\alpha_1 - \alpha_4) + l_1 l_5 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_5 \cos(\alpha_1 - \alpha_5) + 2l_2 l_4 \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_4 \cos(\alpha_2 - \alpha_4) + l_2 l_5 \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_5 \cos(\alpha_2 - \alpha_5) + l_4 l_5 \dot{\alpha}_4 \dot{\alpha}_5 \cos(\alpha_4 - \alpha_5) \right],$$

$$Q_6 = \frac{1}{2} I_6 \dot{\alpha}_6^2 + \frac{1}{2} m_6 \left[ \frac{1}{4} l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{4} l_6^2 \dot{\alpha}_6^2 + \frac{1}{2} l_1 l_6 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_6 \cos(\alpha_1 - \alpha_6) \right],$$

$$Q_7 = \frac{1}{2} I_7 \dot{\alpha}_7^2 + \frac{1}{2} m_7 \left[ \frac{1}{4} l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + l_6^2 \dot{\alpha}_6^2 + \frac{1}{4} l_7^2 \dot{\alpha}_7^2 + l_1 l_6 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_6 \cos(\alpha_1 - \alpha_6) + \frac{1}{4} l_1 l_7 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_7 \cos(\alpha_1 - \alpha_7) + l_6 l_7 \dot{\alpha}_6 \dot{\alpha}_7 \cos(\alpha_6 - \alpha_7) \right].$$

以机构附足与大地接触点  $O$  点为零势能点, 系统的总势能  $G$  由各杆件的重力势能和弹簧的弹性势能  $P_s$  组成, 令储能弹簧弹性系数为  $K_1$ , 减震弹簧弹性系数为  $K_2$ , 求得系统势能为

$$G = \frac{1}{2} K_1 \Delta x_1^2 + \frac{1}{2} K_2 \Delta x_2^2 + \sum_{i=1}^7 m_i g h_i = P_s + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7. \quad (4)$$

式中:  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  分别为两弹簧的形变量;  $g$  为重力加速度;  $h_i$  为各连杆质心垂直坐标位置;  $K_1$  为储能弹簧弹性系数;  $K_2$  为减震弹簧弹性系数;  $P_1 \sim P_7$  分别代表各杆件的重力势能, 且

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2} m_1 g l_1 \sin \alpha_1, \\ P_2 &= m_2 g \left( l_1 \sin \alpha_1 + \frac{1}{2} l_2 \sin \alpha_2 \right), \\ P_3 &= m_3 g \left( l_1 \sin \alpha_1 + \frac{1}{2} l_2 \sin \alpha_2 + \frac{1}{2} l_3 \sin \alpha_3 \right), \\ P_4 &= m_4 g \left( l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \alpha_2 + \frac{1}{2} l_4 \sin \alpha_4 \right), \\ P_5 &= m_5 g \left( l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \alpha_2 + l_4 \sin \alpha_4 + \frac{1}{2} l_5 \sin \alpha_5 \right), \\ P_6 &= m_6 g \left( \frac{1}{2} l_1 \sin \alpha_1 + \frac{1}{2} l_6 \sin \alpha_6 \right), \\ P_7 &= m_7 g \left( \frac{1}{2} l_1 \sin \alpha_1 + l_6 \sin \alpha_6 + \frac{1}{2} l_7 \sin \alpha_7 \right). \end{aligned}$$

则拉格朗日函数如下式所示:

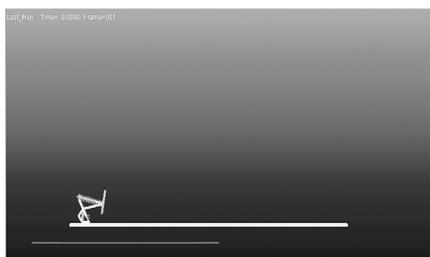
$$L = T - G. \quad (5)$$

将动能方程 (3) 与势能方程 (4) 代入式 (5) 中, 并做微分处理, 得到各关节的输出力矩, 为

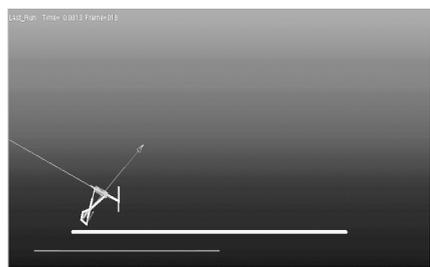
$$M_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_i}. \quad (15)$$

### 4 腿部机构动力学仿真分析

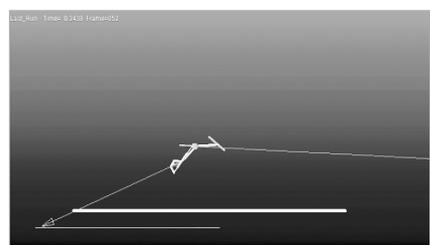
利用虚拟样机软件 ADAMS 对三维模型进行仿真和验证<sup>[15]</sup>, 在仿真过程中, 将所有杆件假设为刚性结构, 且在运动过程中不存在变形。仿真模型将跗足、胫节和腿节分别设置为 5, 25, 27 mm。在虚拟样机软件中, 通过观察模型跳跃运动轨迹得到如图 10 所示的仿真跳跃动态变化图, 将其与实验现象对比, 可发现其基本符合蚱蜢后足跳跃过程。



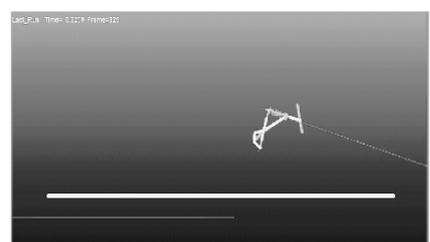
a) 模型起跳阶段



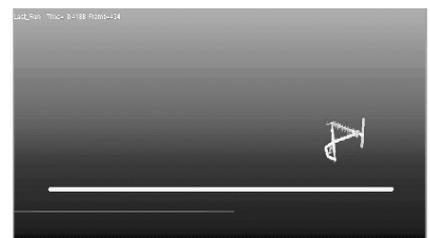
b) 模型腾空阶段 1



c) 模型腾空阶段 2



d) 模型腾空阶段 3



e) 模型腾空阶段 4

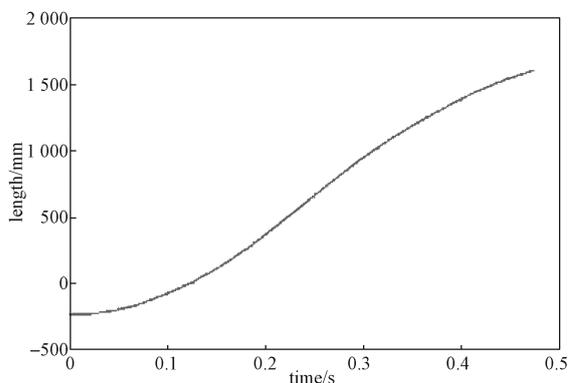


f) 模型落地阶段

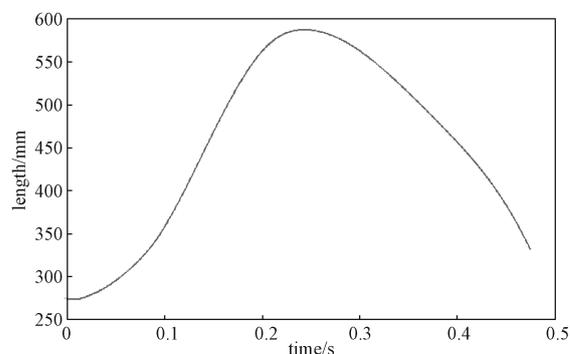
图 10 模型仿真跳跃动态变化图

Fig. 10 Simulation jumping dynamic diagram of the model

图 11 所示为通过仿真结果分析得到的质心位移变换图, 从图中可以看出, 在 0~0.050 s 内, 模型处于起跳阶段, 此时模型水平、竖直位移增长速度较为缓慢。在 0.050~0.472 s 内, 机器人处于腾空阶段, 在此阶段机器人的水平位移不断增大, 竖直位移先快速增大, 并在 0.240 s 达到最大跳跃高度, 然后减小。0.472 s 为模型抵达地面的时间。在整个跳跃过程中, 位移曲线较为平滑, 说明在跳跃过程中机构模型稳定性较好, 且没有发生翻转现象。跳跃机构的最大跳跃距离约为 1.84 m, 最大跳跃高度约为 31.5 cm, 这一过程基本与蚱蜢的跳跃特性相似, 因而证明了所设计模型的合理性。



a) 质心 X 方向位移



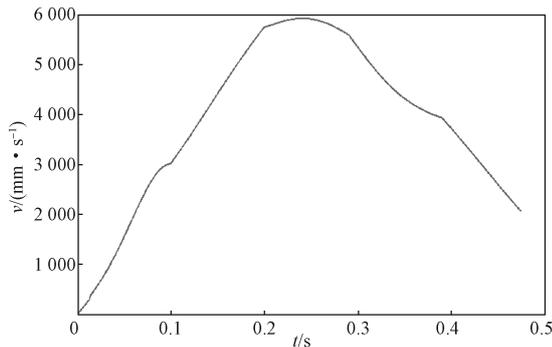
b) 质心 Y 方向位移

图 11 质心位移变换仿真曲线

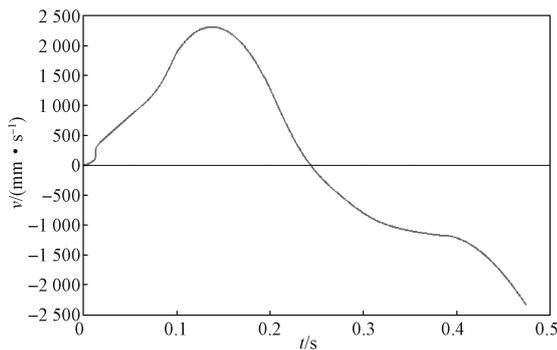
Fig. 11 Simulation curves of centroid displacement transformation

图 12 为质心 X 方向和 Y 方向的速度变化曲线图,

从图中可以看出，在0~0.05 s内，模型质心Y方向速度发生突变，且在极短的时间内迅速上升，体现了模型在起跳阶段的爆发性和突然性。模型Y方向速度在0.14 s时达到峰值，其后开始呈下降趋势，并且在0.24 s减小到0 mm/s。0.240~0.472 s为模型落地阶段，在这个阶段模型速度变化较为平稳，没有出现较大的波动，说明在落地阶段模型的稳定性较好，这为模型进行连续跳跃提供了基础。



a) 质心 X 方向速度

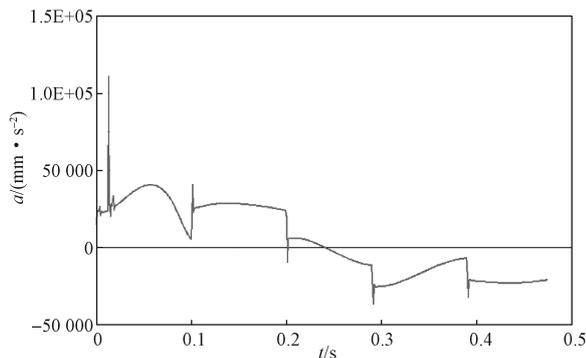


b) 质心 Y 方向速度

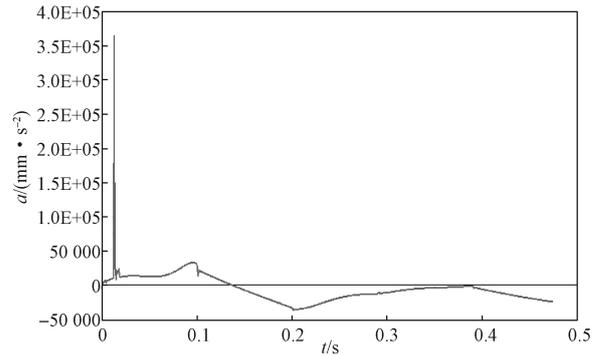
图 12 质心速度变化仿真曲线

Fig. 12 Simulation curve of centroid velocity change

图 13 是质心 X 方向和 Y 方向的加速度曲线，其中 0~0.05 s 为模型起跳到离开地面阶段。由图可知，加速度在 0~0.05 s 内产生突变，这是由于模型膝关节中弹簧存储的能量被迅速释放所引起的，体现了模型在起跳阶段的爆发性。



a) 质心 X 方向加速度

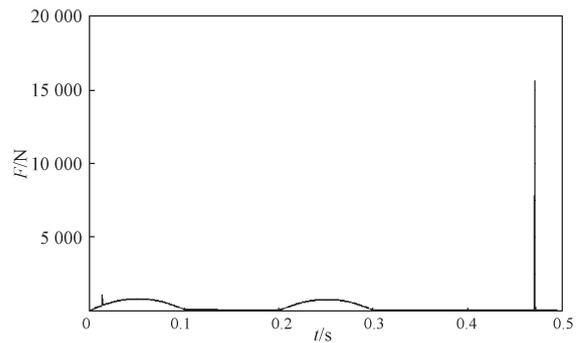


b) 质心 Y 方向加速度

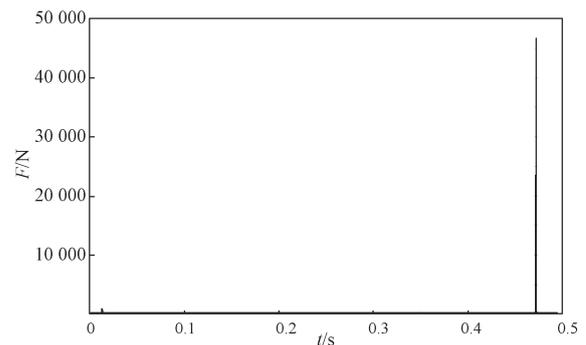
图 13 质心加速度仿真曲线

Fig. 13 Centroid acceleration simulation curve

图 14 为有减震系统跗关节受力图和无减震系统跗关节受力图，0.472 s 为模型抵达地面时间。从图中可以看出，当模型抵达地面瞬间，跗关节受到极大的地面冲击力，而减震系统可以减轻一半以上的对跗关节的地面冲击力，从而使模型落地更为平稳，这一结果证明了此模型具有优越的跳跃性能。



a) 有减震系统跗关节受力图



b) 无减震系统跗关节受力图

图 14 跗关节受力图

Fig. 14 Tarsal joint force diagram

### 5 结语

本研究分析了蚱蜢腿部结构组成，并以曲柄滑块结构模拟蚱蜢腿部肌腱、以弹簧装置模拟腿部膝关节的半月板结构，仿生设计出仿蚱蜢跳跃机器人的腿部结构模型。对模型进行运动学分析，并通过 Matlab

数值计算, 得到蚱蜢起跳阶段髁关节位移和速度曲线, 与 ADAMS 仿真实验结果进行对比, 发现两者的变化趋势大体一致, 证明了所设计的仿蚱蜢腿部跳跃机构模型的合理性和可行性。研究结果也表明: 在 ADAMS 仿真实验中, 机构模型的跳跃距离可达到 1.84 m, 跳跃高度可达 31.5 cm, 基本与蚱蜢的运动特性相似, 且在跳跃过程中, 模型稳定性能较好, 并未有翻转现象发生, 表明模型机构具有优异的跳跃性能。在起跳阶段起跳速度发生突变, 体现了模型在起跳阶段的爆发性和突然性。

本文通过对蚱蜢生理结构和运动机理进行研究分析, 设计了蚱蜢腿部跳跃结构模型, 为进一步对结构进行优化奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 莫小娟, 葛文杰, 赵东来, 等. 微小型跳跃机器人研究现状综述 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 109-123.  
MO Xiaojuan, GE Wenjie, ZHAO Donglai, et al. Research Status of Miniature Jumping Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 109-123.
- [2] 陈东良, 吴磊, 王康, 等. 仿蝗虫弹跳腿机构研究 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(2): 166-169.  
CHEN Dongliang, WU Lei, WANG Kang, et al. Research on Mechanisms of Locust's Jumping Legs[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(2): 166-169.
- [3] 倪虹, 甄永乾, 汪延成, 等. 蝗虫起跳运动分析及仿生机构研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 7-13.  
NI Hong, ZHEN Yongqian, WANG Yancheng, et al. Bio-Jumping Mechanism Inspired from Locust Take-Off Jumping[J]. Vibration and Shock, 2014, 33(2): 7-13.
- [4] 王欣, 邹光明, 周世凡, 等. 仿蝗虫机器人的弹跳腿结构设计与优化 [J]. 机械设计与制造, 2019 (增刊 1): 126-130.  
WANG Xin, ZOU Guangming, ZHOU Shifan, et al. Design and Optimization of the Locust-Inspired Jumping Robot Leg[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019(S1): 126-130.
- [5] KOH J S, JUNG S P, NOH M, et al. Flea Inspired Catapult Mechanism with Active Energy Storage and Release for Small Scale Jumping Robot[C]//Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on. Karlsruhe: IEEE, 2013: 26-31.
- [6] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic Vertical Jumping Agility via Series-Elastic Power Modulation[J]. Science Robotics, 2016, 1(1). doi:10.1126/scirobotics.aag2048.
- [7] HALDANE D W, PLECNIK M, YIM J K, et al. A Power Modulating Leg Mechanism for Monopedal Hopping[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Daejeon: IEEE, 2016: 9-14.
- [8] 王永健, 冯宝林, 殷磊. 基于松鼠腿部特性的跳跃机理研究与仿生设计 [J]. 机械研究与应用, 2018, 31(6): 158-162.  
WANG Yongjian, FENG Baolin, YIN Lei. Research on Jumping Mechanism and Bionic Design Based on Characteristics of Squirrel Leg[J]. Mechanical Research and Application, 2018, 31(6): 158-162.
- [9] HEITLER W J. How Grasshoppers Jump[D]. Scotland: The University of St Andrews, 2007.
- [10] BENNET-CLARK H C. The Energetics of the Jump of the Locust Schistocerca Gregaria[J]. The Journal of Experimental Biology, 1975(63): 33-83.
- [11] 熊勇刚, 彭未来, 熊凯旋, 等. 蚱蜢仿生机器人腿部结构分析与设计 [J]. 科技与创新, 2018(23): 1-5.  
XIONG Yonggang, PENG Weilai, XIONG Kaixuan, et al. Analysis and Design of the Bionic-Grasshopper Jumping Robot Leg[J]. Technology and Innovation, 2018(23): 1-5.
- [12] CRAIG J J. 机器人学导论 [M]. 俞超, 李成群, 陈心颐, 等译. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 106-124.  
CRAIG J J. Introduction to Robotics Mechanics and Control[M]. YUN Chao, LI Chengqun, CHEN Xinyi, et al. translated. 3rd ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 106-124.
- [13] 尹军茂, 陈殿生, 沈奇. 仿蝗虫跳跃机构设计与分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(10): 1348-1353, 1359.  
YIN Junmao, CHEN Diansheng, SHEN Qi. Design and Analysis of Locust-Like Jumping Mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(10): 1348-1353, 1359.
- [14] 邱满. 蚱蜢跳跃机理的仿生研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.  
QIU Man. Bionic Research on Grasshopper Jumping Mechanism[D]. Zhuzhou: Journal of Hunan University of Technology, 2015.
- [15] 贾长治, 殷军辉, 薛文星, 等. MD ADAMS 虚拟样机从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 39-98.  
JIA Changzhi, YIN Junhui, XUE Wenxing, et al. MD ADAMS Virtual Prototyping[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 39-98.

(责任编辑: 廖友媛)