

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.024

磁铁和弹簧共同蓄能的仿生青蛙动力学仿真分析

伍文均^a,王敏^b,陈聪聪^b,吴迅^a,崔昊磊^a

(西南科技大学 a. 制造科学与工程学院; b. 工程技术中心,四川 绵阳 621010)

摘要:为提高仿蛙机器人的跳跃性及稳定性等性能,设计一种磁铁和弹簧共同蓄能的仿生青蛙结构。综合运用 SoildWorks、ABAQUS、Admas 等软件,通过三维建模、静力学分析和动力学仿真,对该仿蛙结构的稳定性、跳跃高度和跳跃距离进行分析。仿真结果表明:该仿生青蛙可跳跃高度为 0.046 3 m,跳跃距离为 0.107 3 m,且转向时前腿平稳性较好。与只用弹簧系统蓄能的结构相比,该仿蛙结构的跳跃性和稳定性都得到大幅提高。

关键词:仿生青蛙;弹簧磁铁共同蓄能;动力学仿真;跳跃性能

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0124-05

Dynamic Simulation Analysis of Bionic Frog with Energy Storage Jointly Achieved by Magnets and Springs

WU Wenjun^a, WANG Min^b, CHEN Congcong^b, WU Xun^a, CUI HaoLei^a(a. School of Manufacturing Science and Engineering; b. Engineering Technology Center, Southwest University of
Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to improve the properties such as jump performance and stability of the frog imitation robot, this research designed a bionic frog structure with energy storage jointly achieved by magnet and spring. By using SoildWorks, ABAQUS, Admas and other software for three-dimensional modeling, static analysis and dynamic simulation, the stability, jump height and jump distance of the frog structure were analyzed. The simulation results show that the jump height of the bionic frog is 0.046 3 m, the jump distance is 0.107 3 m, and the front legs have good stability when turning. Compared with enery storage achieved solely by springs, the jump performance and stability of the frog structure are greatly improved.

Keywords: bionic frog; energy storage jointly achieved by magnets and springs; dynamic simulation; jump performance

0 引言

随着科技的飞速发展,仿生机器人已经在各行各业中得到了广泛应用。作为一种两栖动物,青蛙具有体积小、质量轻、跳跃能力优越、越障能力出色等特点,因此被众多仿生学者所关注。仿蛙机器人^[1-2]具有良好的自适应性,在水下探测、军事侦察、污染清理等方面具有重大研究意义和现实价值。而探索新的蓄能方式提高仿蛙机器人的跳跃性能是当前研究的热点。目前,国外仿蛙机器人是利用气动、液压^[3]蓄能装置驱动青蛙后腿^[4],在机器人身体保持平稳时,利用四肢的协调性进行跳跃。而国内研究主要集中在如何加强仿蛙机器人的跳跃性能方面,且仅限于整体结构的改变上,仍然利用弹簧等原有蓄能装置驱动青蛙后腿。运用磁铁辅助弹簧共同蓄能的仿蛙机器人

能够较好地提高跳跃性能,越障能力也得到大幅度提高。同时,将前腿设计成摇杆型转向结构,脚掌部位增加减震轮,可使仿蛙机器人具有更好的机动性和减震性。基于此,设计一种磁铁和弹簧共同蓄能的仿蛙结构,旨在提高仿蛙机器人的跳跃性及稳定性等性能。

1 结构组成

仿蛙机器人的整体结构较为复杂,为提升设计过程中的容错率,采用整体结构模块化方式进行设计^[5-8],除电机座和减震轮以外,把仿蛙结构分成前腿、蓄能装置、后腿 3 部分,如图 1 所示。通过控制器连接滑索的电机正转带动滑索收缩^[9],使后腿进行蓄能,初始状态利用磁铁斥力作为青蛙跳跃的启动力,然后释放弹簧所储存的势能^[10],提供跳跃动力,达到仿蛙跳跃的效果。当

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(202210619014)

第一作者简介:伍文均(2003—),男,四川广安人,本科,研究方向为机械设计制造及其自动化,2786154374@qq.com。

通信作者简介:王敏(1990—),女,四川绵阳人,讲师,硕士,研究方向为机械结构设计、表面处理, xgxyqwm@163.com。

后腿蓄能完成后,该仿蛙结构被限制在 40 mm×60 mm×60 mm 的空间范围内。该仿蛙结构前腿为曲柄摇杆的改进结构,通过驱动连接前腿机构的电机正反转控制前腿的转向机构左右转动,当曲柄轮运动时,带动摇杆运动,使青蛙前腿跟着左右移动。为增加青蛙运动的稳定性,在青蛙的前脚处,增加了两组减震轮,当青蛙跳跃落地后,减震轮向前滑动以此进行减震^[11]。当青蛙完成一次跳跃后,电机随即正转带动滑索再次收缩,蓄能装置再次蓄能,当蓄能完成后,青蛙即可再次跳跃。

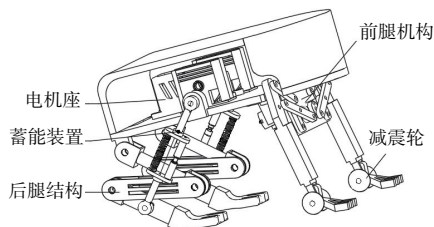


图1 整体结构示意图

蓄能装置由弹簧和套筒组件组成,当电机带动滑索驱动时,后腿通过滑索进行线驱动,后腿被压缩,此时,弹簧也被压缩,第一级套筒组件里安装的同极相对的磁铁也被压缩。根据同极相斥原理,上级磁铁会受到推力。其计算公式为

$$F = \frac{\mu_0}{4S \left(\frac{H}{\delta} \right)^2} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; H 为磁体磁动势,单位 AT; S 为磁体表面积,单位 m^2 ; δ 为气隙,单位 m。

2 仿真模型建立

2.1 仿真材料分析

在 Admas 软件中建立动力学^[12] 仿真模型时,需要对青蛙的结构材料进行设置。为了贴合实际应用,需要选用高强度、质量轻的碳纤维材料。因此,在仿真模型建立前,利用 ABAQUS 有限元分析软件对碳纤维中性能较好的 Hexcel AS4C(3 000 丝)材料进行分析。

以后腿前臂为例进行分析,在 ABAQUS 有限元分析软件中把指定材料设置到相应小腿上,作为该结构所用材料。该材料设置的相关属性如表 1 所示。

表1 Hexcel AS4C(3 000 丝)属性

参数	数值
密度/(kg/m^3)	1 780
弹性模量/(N/m^2)	2.1×10^5
泊松比	0.307
切变模量/(N/m^2)	3×10^{10}
抗拉强度/(N/m^2)	9×10^8
失效准则	最大切应力准则

设置材料前,在前臂与上臂和腕连接处设置铰链进行连接端的约束,同时对铰接处的两端设置平均压力。完成后对该零件进行网格划分,以四边形网格为主,由于该零件形状不规整,需要对其进行区域划分,再对每个区域进行网格布种,完成后直接对零件进行网格划分,再进行分析处理。

当在后腿前臂铰接侧面处施加 3 N 的载荷时,其应力应变分析结果如图 2 所示。

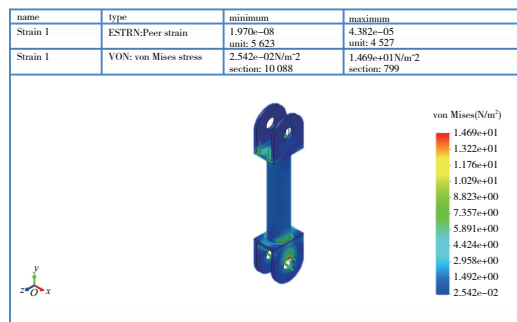


图2 后腿前臂受力应力应变图

当受到初始压力时,后腿前臂具有最小负应变,压力逐渐增大后,铰链处发生位移,当移动到死点位置处,压力增加到最大,此时具有最大负应变,由此,可计算出相应的最小、最大应力为

$$\sigma_{\{\min \max\}} = \varepsilon_{\{\min \max\}} E \quad (2)$$

根据 ABAQUS 计算结果可知,后腿前臂在 3 N 载荷的作用下结构最大压力 $\sigma_{\max}$ 显著低于许用压力 $[\sigma]$,因此,该受力情况下对 Hexcel AS4C 材料力学性能的影响可忽略不计。

图 3 为后腿前臂受力位移改变量。由分析结果可知,最大偏离位移为 1.093 mm,该程度的偏离位移对整体结构无任何影响。

由此可知,Hexcel AS4C(3 000 丝)具有高强度的特点,且密度低,可作为该青蛙仿真模型的材料。

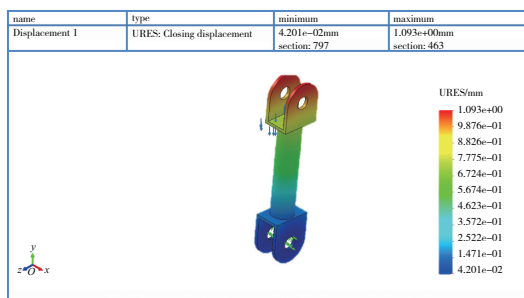


图3 后腿前臂受力位移改变量图

2.2 仿真模型参数设置

将该仿生青蛙模型导入 Admas 中,对各零件之间的连接设置运动副,给前后腿^[13]和地面之间设置接触。由于在 Admas 中磁铁的材料设定后,没有相互之间的斥力,因此,把磁铁斥力等效于一个释放压力,把压力函数设置为 $\text{step}(\text{time}, 0, 10.6, 0.05, 0)$,把作用于弹簧的力设置成 $\text{step}(\text{time}, 0.05, 4.20, 0.30, 0)$,以磁铁斥力和弹簧压力进行驱动,从而实现跳跃仿真模拟。当跳跃完成后,在前腿曲柄与电机的转动副上将角速度设置成 $180.0d * \text{time}$,以此分析前腿结构的转向性及减震性。详细参数设置如表 2 所示。

表2 参数设置

参数	数值
材料	Hexcel AS4C
结构质量/kg	0.3
弹簧刚度/(N/m)	60
阻尼系数	0
磁力函数	$\text{step}(\text{time}, 0, 10.6, 0.05, 0)$
弹簧力函数	$\text{step}(\text{time}, 0.05, 4.20, 0.30, 0)$
弹簧原长/mm	90
第一级轴套长度/mm	10
曲柄角速度 MOTION_1	$180.0d * \text{time}$

该仿生青蛙跳跃仿真时长为 1 s,分析步数设置为 1 000;前腿运动仿真时长为 1 s,分析步数设置为 800。则动力学仿真模型如图 4 所示。

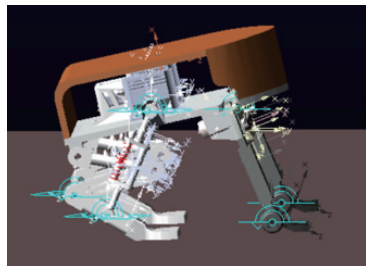


图4 Admas 仿真模型

3 仿真结果分析

通过 Admas 软件进行动力学分析^[14],将其仿真数据导入 Origin 软件中绘制图形,得出仿生青蛙二维跳跃轨迹如图 5 所示。可以看出,该仿蛙结构后腿处为起跳原点,跳跃高度(后腿处最低点离地面的距离)可达 0.046 3 m,跳跃距离可达 0.107 3 m。当后腿蓄能完成后,青蛙的跳跃轨迹类似于一个斜抛运动。青蛙在空间中的跳跃如图 6 所示。

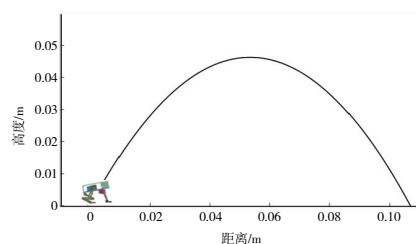


图5 青蛙跳跃轨迹二维视图

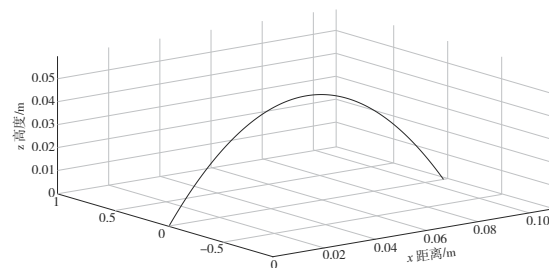


图6 青蛙跳跃轨迹三维视图

3.1 蓄能装置能量变化特征

蓄能装置磁铁能量释放与距离关系如图 7 所示。由此可知,当后腿压缩后,磁铁之间距离为 0,当能量开始释放后,磁铁之间通过变力推动后腿伸展,当两块磁铁分别运动到第一级轴套顶端时,两者之间距离为 10 mm,磁铁之间释放能量为 0.053 J。

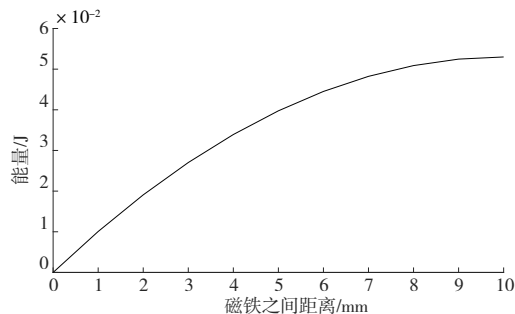


图7 磁铁能量释放与距离变化的关系

蓄能装置弹簧的弹性势能变化如图 8 所示。

当后腿压缩时,弹簧的压缩量为 70 mm,此时弹簧的弹性势能为 0.146 J,磁铁之间的能量释放后,弹簧的弹性势能也随之释放,弹簧的弹性势能逐渐降低,直至弹性势能为 0。

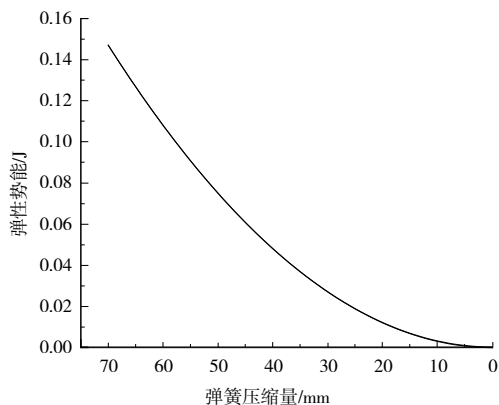


图8 蓄能装置弹性势能变化

3.2 青蛙位移变化特征

仿生青蛙在 z 轴上的位移随时间的变化如图9所示。可以看出,在 0.293 3 s 时,青蛙脚掌离地,开始跳跃,在 0.397 0 s 时,青蛙跳跃到最高点,脚掌最低点距离地面 0.046 3 m。在 0.495 0 s 时跳跃结束,青蛙后脚着地。

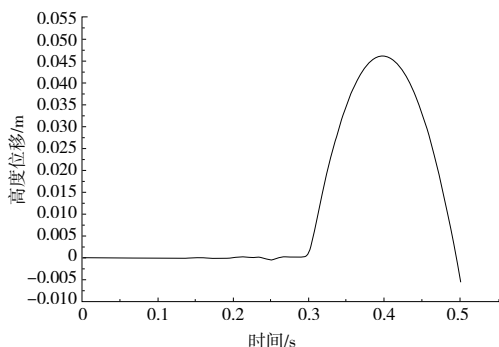


图9 青蛙跳跃高度随时间的变化

仿生青蛙在 x 轴上的位移随时间的变化如图10所示。可以看出,当青蛙在跳跃前其跳跃位移有些许波动,这是由于仿生青蛙蓄能装置能量释放时整体结构的晃动引起的,不会影响后续的跳跃过程。在 0.293 3 s 时,仿生青蛙开始跳跃,在 x 轴方向上以 0.549 0 m/s 的速度匀速前进,持续时间为 0.201 7 s,在 x 轴方向上跳跃最远距离为 0.107 3 m。

3.3 前腿角速度和位移变化特征

仿生青蛙前腿转向的角速度和位移变化特征如图11所示。可以看出,前腿在 xOy 平面中,从 x

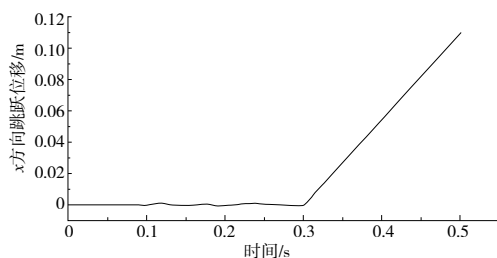


图10 青蛙跳跃距离随时间的变化

轴方向转到 y 轴方向后再返回。位移在 0.50 s 时达到最大,速度分别在 0.237 s 和 0.763 s 达到正向和逆向最大。受减震轮影响,位移和速度在 y 轴方向上的变化有较小波动,但并不影响前腿转向结果。

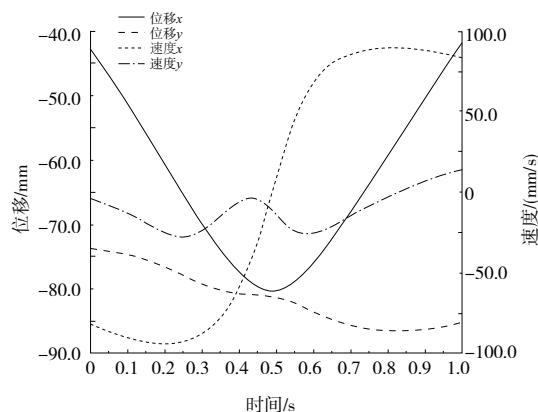


图11 青蛙前腿转向的角速度和位移变化特征

3.4 青蛙跳跃能量变化特征

仿生青蛙的重力势能、动能随时间的变化如图12、图13所示。可以看出,当蓄能装置能量释放完成后,仿生青蛙开始跳跃。在开始跳跃之前,动能和势能都存在波动,这是由于蓄能装置能量释放并将能量转换为动能所致,但对青蛙起跳无影响。该仿生青蛙跳跃时初始重力势能为 0,跳跃过程中最大动能为 0.197 6 J。在 0.397 0 s 时,达到最高跳跃高度 0.046 3 m,此时动能降至最低 0.045 5 J。

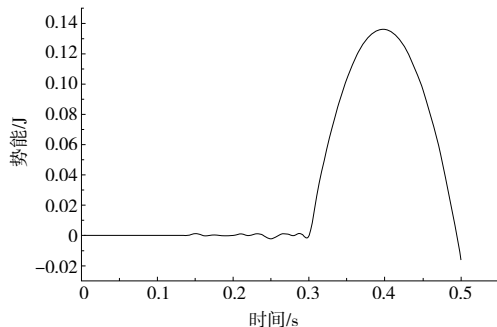


图12 重力势能随时间变化特征

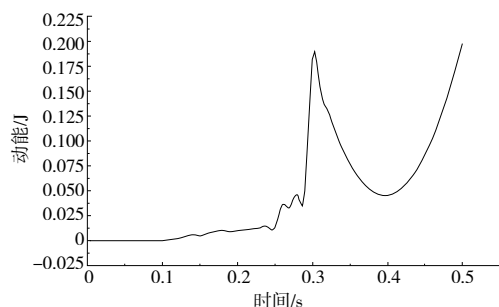


图 13 动能随时间变化特征

将原有弹簧蓄能的跳跃性能和磁铁、弹簧共同蓄能的青蛙跳跃性能作比较,如表 3 所示。可以看出,弹性系数较大的弹簧蓄能的腿部结构,跳跃性能仍不及弹簧弹性系数较小的磁铁、弹簧共同蓄能的腿部结构。综上所述,利用弹簧和磁铁共同蓄能作为仿生青蛙后腿蓄能装置是可行的。

表 3 弹簧蓄能和磁铁、弹簧共同蓄能的跳跃性能

类型	弹簧弹性系数 $K/(N \cdot m)$	跳跃高度 h/m	跳跃距离 x/m
弹簧	2 200	0.009 29	-
弹簧和磁铁	60	0.046 30	0.107 3

4 结语

1) 利用 Admas 多次仿真得到,弹簧的能量释放和磁铁之间的能量释放都是呈抛物线形式,当能量释放完成后,青蛙离地开始跳跃。

2) 青蛙跳跃时,其轨迹呈抛物线。在 x 轴方向上,速度恒定,位移匀速增加;在 z 轴方向上,速度先匀减速至 0,后匀加速至初始速度,高度先升高后降低。

3) 前腿向 x 轴转向后再转回,角速度先正向增大后正向减小,随后再反向增大、再反向减小。其转向时的平稳性较好。

4) 利用弹簧和磁铁共同对青蛙腿部蓄能,其跳跃高度为 0.046 3 m,跳跃距离为 0.107 3 m。与

只用弹簧蓄能的结构相比,该仿生青蛙结构跳跃性能更好。

参考文献:

- [1] 北方工业大学. 仿青蛙跳跃机器人;CN102806951B[P]. 2015-08-12.
- [2] 安徽工业大学. 一种仿生青蛙机器;CN114940223B[P]. 2023-08-01.
- [3] 卢晴勤,留沧海,刘佳生,等. 液压驱动六足跳跃机器人仿真分析[J]. 机械设计与制造,2015(8):200-205.
- [4] 葛文杰,沈允文,杨方. 仿袋鼠柔性跳跃机器人的驱动力特性研究[J]. 中国机械工程,2006,17(8):857-861.
- [5] 李庆中,李晓丹,于福杰,等. 介电弹性体式蛙型仿生软体机器人设计[J]. 兵工学报,2022,43(1):140-147.
- [6] 汪久根,鄢建辉. 仿生机械结构设计[J]. 润滑与密封,2003,28(2):35-36.
- [7] 王松,苑明海,黄锦婷,等. 蛙跳机器人的结构设计与仿真分析[J]. 机械与电子,2017,35(9):69-72.
- [8] 孔振文,周文祥,祝向阳. 不同轮对组合的转向架动力学性能分析[J]. 机械制造与自动化,2022,51(1):38-41.
- [9] 胡海燕,王鹏飞,孙立宁,等. 线驱动连续型机器人的运动学分析与仿真[J]. 机械工程学报,2010,46(19):1-8.
- [10] 杨小传,胡海拉,王培聪,等. 单足弹跳机器人弹跳机构设计与弹跳动力学分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2006,45(4):504-508.
- [11] 肖竟成. 仿青蛙前足运动规律的缓冲装置结构设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [12] 葛文杰. 仿袋鼠跳跃机器人运动学及动力学研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [13] 赵铁军,袁振宇. 仿猫腿部跳跃机构设计与仿真分析[J]. 机械工程师,2020(9):1-4,7.
- [14] 阳碧慰,王敏. 旋转牵引式降落伞弹射系统动力学仿真与分析[J]. 机械科学与技术,2023,42(5):694-701.

收稿日期:2024-01-30