

Mechanical Structure Design and Motion Performance Analysis of a Bionic Frog Robot

Yuxuan Wang Hao Mei Shiwei Hou

School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

This study designs a bionic frog robot that achieves efficient jumping motion by simulating the biomechanical characteristics of frogs. The robot employs an eight-bar linkage mechanism in the hind legs to mimic the hip, knee, ankle, and tarsal joints of a frog, precisely controlling joint angle variations for energy storage and release. The energy storage mechanism utilizes rope-driven and pulley systems, combined with a dead-point release mechanism, to ensure accurate energy release. Through five iterations of development, the physical prototype's jumping distance increased from 21 cm to 75 cm, validating the effectiveness of the design improvements. Dynamic analysis indicates that the optimized structure significantly enhances energy conversion efficiency and motion stability. The research provides theoretical and practical insights for the application of bionic robots in complex environments.

Keywords

Bionic Frog Robot; Eight-Bar Linkage Mechanism; Rope-Driven; Dead-Point Release; Dynamic Analysis

仿生青蛙机器人的机械结构与运动性能分析

王语暄 梅颢 侯士伟

武汉理工大学交通与物流工程学院, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

本研究设计了一种仿生青蛙机器人, 通过模拟青蛙的生物力学特性, 实现了高效的跳跃运动。机器人采用八连杆后腿机构, 模拟青蛙腿部的髋关节、膝关节、踝关节和跗关节, 精确控制关节角度变化以实现能量的存储与释放。储能机构采用绳驱动与滑轮组合, 结合死点释放机构, 确保能量的精准释放。通过五次迭代开发, 物理样机的跳跃距离从21厘米提升至75厘米, 验证了设计改进的有效性。动力学分析表明, 优化后的结构显著提升了能量转换效率与运动稳定性。研究结果为仿生机器人在复杂环境中的应用提供了理论依据与实践参考。

关键词

仿生青蛙机器人; 八连杆机构; 绳驱动; 死点释放; 动力学分析

1 引言

仿生青蛙机器人通过模拟青蛙的生物力学特性, 实现了高效的跳跃运动, 展现出优异的环境适应性和能源利用效率。在低重力环境(如外太空)中, 其运动性能优势尤为显著^[1], 成为学术界的研究热点。

韩国 Konkuk University 先进技术融合系的 Quoc-Viet Nguyen 等人研发了一款7克重的仿蝗虫跳跃机构原型^[2]。实验表明, 该原型可实现垂直跳跃高度为自身尺寸的14倍(约71cm), 水平跳跃距离为自身尺寸的20倍(约100cm)。然而, 能量释放时机的精准性不足, 导致运动轨迹稳定性欠佳。

赵凯等人提出了一种仿生曲柄滑块跳跃机构的设计与

动力学分析^[3]。该机构在起跳阶段产生的地面反作用力与蝗虫的力学特性相似, 有效降低了过早离地的可能性。然而, 该研究未考虑空气阻力等环境因素, 缺乏对能量转换效率的定量分析, 且未涉及着陆后的姿态恢复问题, 限制了其在复杂环境下的应用潜力。

哈尔滨工业大学机器人与国家系统重点实验室研发了一种新型仿生青蛙机器人跳跃机构, 采用单自由度六连杆结构作为后肢驱动系统, 通过扭转弹簧与不完全齿轮的协同作用, 实现能量储存与快速释放功能^[4]。但单自由度设计限制了运动灵活性, 难以精确模拟真实青蛙的多关节协调运动, 进而影响其在复杂地形中的适应性。

本文所述的仿生青蛙机器人采用八连杆后腿机构, 模拟青蛙腿部的髋关节、膝关节、踝关节和跗关节, 通过精确控制关节角度变化实现能量的存储与释放, 显著提升了跳跃性能。其储能机构采用绳驱动与滑轮相结合的方式, 利用死点释放机构实现能量的精准释放, 提高了跳跃效率和稳

【作者简介】王语暄(2005-), 女, 中国江西赣州人, 在读本科生, 从事仿生机械结构与性能研究。

定性。

2 机器人结构设计

2.1 青蛙跳跃过程分析

青蛙腿部包含髌关节、膝关节、踝关节和跗关节，协同完成复杂的伸展与收缩动作。跳跃初始阶段为状态1，髌关节收缩后腿，准备跳跃；随后髌关节伸展，膝、踝、跗关节快速伸展，将能量转化为推动力。跳跃完成后为状态2，各关节收缩，协助稳定着陆^[5]。

本机器人采用八连杆机构模拟青蛙腿部的股骨、胫腓骨和跗骨，重现其相对运动与连接方式，确保动力学特性与真实青蛙相似，并利用弹簧模拟肌肉，实现能量的储存与释放，为跳跃提供动力。同时，创新性地引入死点释放机构，保持腿部收缩状态，优化能量释放，显著提升跳跃距离。

2.2 仿生青蛙机构设计

2.2.1 腿部机构设计

仿生青蛙腿部运动机制可划分为三个主要阶段：能量储存阶段、能量转换阶段和起跳阶段。在能量储存阶段，股骨与胫腓骨形成最小锐角，该几何构型有利于机械能的储存与积累。较小的关节角度可降低能量损耗，提高储能效率。能量转换阶段表现为腿部关节角度逐渐增大，储存能量向运动能量转化，该过程遵循能量守恒定律。系统通过精确控制能量释放速率，优化能量转换效率。起跳阶段中，腿部达到最大钝角，系统完成地面反作用力的作用过程，进入腾空运动阶段。该阶段的运动特性直接影响跳跃高度和距离等关键性能指标，系统通过优化腿部连杆机构的运动学参数提高能量利用率。

仿生青蛙腿部运动系统中，连杆3通过固定点O₁、O₂与机体结构刚性连接。系统越过死点位置后，连杆1以O₁为旋转中心产生角位移，形成平面连杆传动机构。连杆2、4、5、6构成闭式运动链，其几何约束关系将弹性元件的线性收缩力转化为连杆6的定向运动。四连杆机构的运动学特性确保了能量传递路径的优化，实现了机械能的高效转化与输出。

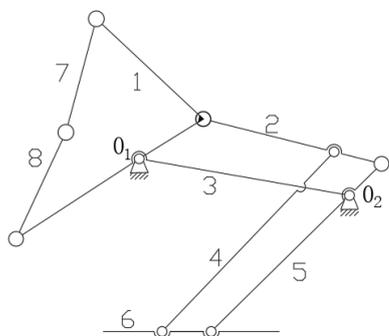


图 1-1 仿生青蛙腿部机构示意图

2.2.2 储能机构设计

仿生青蛙储能机构基于绳驱动原理，通过机械传动实

现能量储存。舵机输出力矩驱动钢丝绳运动，使轴2与轴3间的路径长度减小，同时轴1与轴2间距增大，对弹性元件产生拉伸作用。该机构通过钢丝绳的路径变化将旋转运动转化为线性位移，完成机械能储存。绳驱动机构的结构特性使其具有较高的能量传递效率，其力学性能直接影响系统的运动输出。

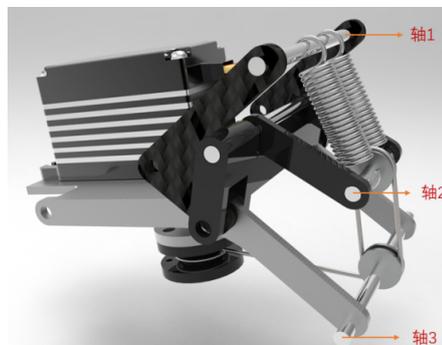


图 1-2 储能机构渲染图

2.2.3 死点释放机构设计

仿生青蛙释放机构采用死点原理设计，其核心机制基于腿部蹬地起跳运动特性。连杆1绕O₁旋转，导致轴1与轴3间距减小。机构在轴1与轴3间设置限位支撑杆及辅助限位支撑杆，用于约束两轴间距变化。弹簧拉伸过程中，连杆1绕O₁的驱动力矩随拉伸距离增加而增大，限位支撑杆与辅助限位支撑杆间的相互作用力相应增强。

储能阶段，轴2与拉杆连接，推杆绕O₁顺时针旋转。当推杆与限位支撑杆接触时，系统产生机械扰动，破坏死点平衡状态，实现储存能量的快速释放。该机构通过精确控制死点位置，确保能量释放的时机与强度，完成仿生青蛙的跳跃动作。

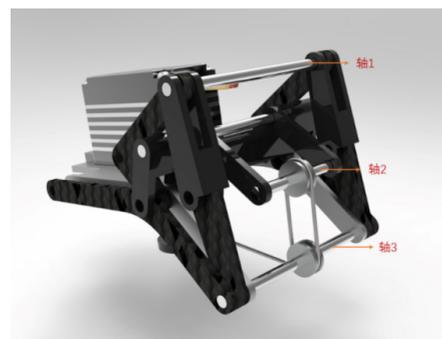


图 1-3 死点释放机构渲染图

2.2.4 支撑前腿设计

仿生青蛙机器人前腿系统具有多重功能特性，其设计直接影响整体运动性能。前腿机构需适应多种地面条件，同时实现稳定性控制与导航功能。前腿的主要力学功能包括支撑、缓冲和姿态调节。

前腿承担机器人的静态载荷支撑任务，在跳跃周期中提供必要的力学支撑。着陆过程中，前腿机构通过弹性元件

和阻尼结构吸收冲击能量，降低对主体结构的动态载荷。在跳跃准备阶段和空中运动过程中，前腿参与姿态调整，通过主动控制维持系统稳定性。前腿的结构设计和运动特性对机器人的运动效能具有决定性影响。

3 机器人动力学分析

3.1 机器人跳跃效率及稳定性分析

在仿生青蛙机器人系统的设计中，跳跃效率和稳定性是衡量其运动性能的关键指标^[6]。跳跃效率主要体现在机器人能够将能量有效地转化为跳跃动能，从而获得更大的跳跃距离；而稳定性则体现在机器人能够在起跳、空中姿态调整和落地过程中保持动态平衡。这两个性能指标均与系统所受的总力矩密切相关。因此，分析总力矩的构成及其对系统运动状态的影响，对于优化机器人结构设计和控制策略具有重要意义。

如图 2-1 所示，在青蛙跳跃的动力学分析中，地面反作用力与质心之间的垂直距离会产生一个力矩 M_F ，其表达式为：

$$M_F = -J \times \alpha$$

其中， J 表示转动惯量， α 为角加速度。同时，系统在运动过程中会产生惯性力矩 M_G ，其表达式可表示为：

$$M_G = F \times H \times \frac{\sin \theta}{\sin \alpha}$$

式中， H 为质心高度， θ 为起跳角度， α 为后腿与地面的夹角。为实现平稳着陆，系统需满足力矩平衡条件 $\sum M \geq 0$ 。值得注意的是，当系统进行前空翻运动时，跳跃距离呈现增大的趋势。

地面反作用力 F 与后腿连杆机构的受力方向相反，这表明系统的力学特性与后腿机构的设计参数密切相关。参数 α 和 H 的取值与系统重心位置存在直接关联。降低质心高度 H 和减小后腿与地面的夹角 α ，能够有效减少惯性力矩 M_G 的数值，从而使总力矩更易于满足平衡条件，显著改善机器人的跳跃效率和稳定性。

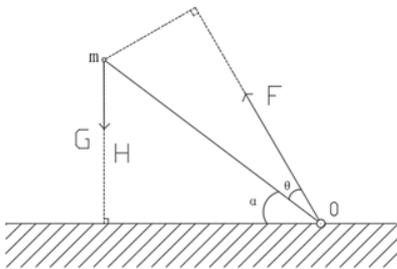


图 2-1 机器人整体受力简图

3.2 机器人腿部连杆机构运动学分析

为对仿生青蛙机器人腿部连杆机构进行运动学分析，将各连杆表示为矢量，并建立如图所示的坐标系。该腿部机构可分解为三个四连杆机构：1-2-3-4、2-3-5-6 和 5-6-7-

8。以下分别对这三个四连杆机构进行位置、速度和加速度分析。

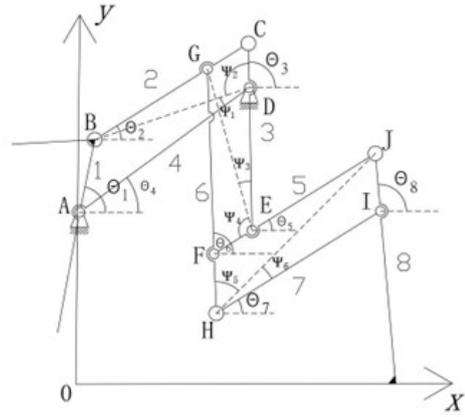


图 2-2 机器人腿部八连杆机构简图

3.2.1 1-2-3-4 四连杆机构分析

(1) 位置分析

对于封闭环路 ABCDA，其矢量方程为：

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4 \quad (1-1)$$

其复数形式为：

$$l_1 e^{i\theta_1} + l_2 e^{i\theta_2} = l_3 e^{i\theta_3} + l_4 e^{i\theta_4} \quad (1-2)$$

分离实部和虚部，得到非线性方程组：

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos \theta_4 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 \end{cases} \quad (1-3)$$

由于方程组 (1-3) 为非线性，直接求解较为复杂，可采用几何方法求解。连接 BD，得到以下关系：

$$\begin{cases} l_{BD}^2 = l_1^2 + l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos(\theta_1 - \theta_4) \\ \varphi_1 = \arcsin \left[\frac{l_1}{l_{BD}} \sin(\theta_1 - \theta_4) \right] \\ \varphi_2 = \arccos \left(\frac{l_{BD}^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_{BD} l_3} \right) \\ \theta_3 = \pi - \varphi_1 - \varphi_2 + \theta_4 \\ \theta_2 = \arcsin \left(\frac{l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 - l_1 \sin \theta_1}{l_2} \right) \end{cases} \quad (1-4)$$

(2) 速度分析

对式 (1-2) 关于时间 t 求导，得到速度关系：

$$l_1 w_1 e^{i\theta_1} + l_2 w_2 e^{i\theta_2} = l_3 w_3 e^{i\theta_3} \quad (1-5)$$

分离实部和虚部，得到：

$$\begin{cases} l_1 w_1 \cos \theta_1 + l_2 w_2 \cos \theta_2 = l_3 w_3 \cos \theta_3 \\ l_1 w_1 \sin \theta_1 + l_2 w_2 \sin \theta_2 = l_3 w_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1-6)$$

将其表示为矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = w_1 \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 \\ -l_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

通过求解矩阵方程，可得到角速度 w_2 、 w_3 。

(3) 加速度分析

对式 (1-2) 关于时间 t 求二阶导数，得到加速度关系：

$$\begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -w_2 l_2 \cos \theta_2 & w_3 l_3 \cos \theta_3 \\ -w_2 l_2 \sin \theta_2 & w_3 l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = w_1 \begin{bmatrix} w_1 l_1 \cos \theta_1 \\ w_1 l_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

通过求解矩阵方程，可得到角加速度 α_2 、 α_3 。

3.2.2 2-3-5-6 四连杆机构分析

通过对封闭环路的矢量方程进行位置、速度和加速度分析，可得到以下结果：

位置关系：

$$\begin{aligned} \theta_5 &= -\pi + \phi_3 + \phi_4 + \theta_3 \\ \theta_6 &= \arcsin\left(\frac{l_{EG}}{l_6} \sin \phi_4\right) + \theta_5 \end{aligned}$$

角速度关系：

$$\omega_5 = f(\omega_2, \omega_3), \quad \omega_6 = g(\omega_2, \omega_3)$$

角加速度关系：

$$\alpha_5 = h(\alpha_2, \alpha_3, \omega_2, \omega_3), \quad \alpha_6 = k(\alpha_2, \alpha_3, \omega_2, \omega_3)$$

其中， f, g, h, k 为由矩阵方程求解得到的函数关系。

3.2.3 5-6-7-8 四连杆机构分析

通过对封闭环路 $FHIJF$ 的矢量方程进行位置、速度和加速度分析，可得到以下结果：

位置关系：

$$\begin{aligned} \theta_7 &= -\phi_5 - \phi_6 + \theta_6 \\ \theta_8 &= -\arcsin\left(\frac{l_{HJ}}{l_8} \sin \phi_6\right) + \theta_7 + \pi \end{aligned}$$

角速度关系：

$$\omega_7 = m(\omega_5, \omega_6), \quad \omega_8 = n(\omega_5, \omega_6)$$

角加速度关系：

$$\alpha_7 = p(\alpha_5, \alpha_6, \omega_5, \omega_6), \quad \alpha_8 = q(\alpha_5, \alpha_6, \omega_5, \omega_6)$$

其中， m, n, p, q 为由矩阵方程求解得到的函数关系。

通过对三个四连杆机构的位置、速度和加速度分析，可以全面描述仿生青蛙机器人腿部连杆机构的运动学特性。这些分析结果为机构优化设计和运动控制提供了理论依据。

4 实物实验

在物理样机开发过程中，首先利用三维模型输出各种工程图纸，随后采购原材料并加工各零部件。各模块经过装配和调试后，完成了五代样机的制作。

第一代仿生青蛙跳跃机器人完成组装并成功进行跳跃测试，实现了 21 厘米的跳跃距离。第二代仿生青蛙机器人在重新设计改进后完成组装并成功进行跳跃测试，跳跃距离提升至 36 厘米。第三代仿生青蛙机器人优化触发机构后，成功完成组装并进行了跳跃测试，跳跃距离达到了 43 厘米。第四代仿生青蛙机器人优化腿部连杆机构后，跳跃距离进一步增加至 62 厘米。第五代仿生青蛙进一步优化动力系统和腿部连杆机构，以提升跳跃效率和距离，最终实现了 75 厘米

的跳跃。

通过五次迭代开发，样机的跳跃性能显著提升，验证了设计改进的有效性。

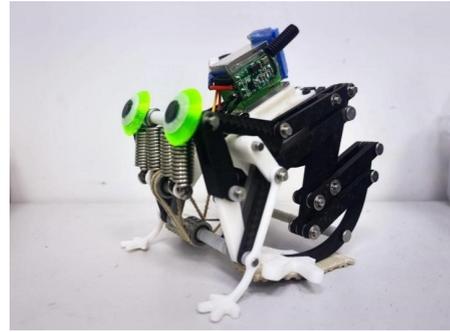


图 3-1 仿生青蛙物理样机

5 结论

(1) 基于仿生学原理，采用八连杆后腿机构模拟青蛙腿部的多关节运动，成功复现了其复杂的伸展与收缩动作。通过绳驱动储能与死点释放机构的结合，实现了能量的高效存储与精准释放，显著提升了机器人跳跃性能。该设计为复杂环境下机器人的运动机构设计提供了新的思路。(2) 通过对仿生青蛙机器人腿部连杆机构的运动学分析，全面描述了其位置、速度和加速度特性。动力学分析表明，优化后的结构在能量转换效率与运动稳定性方面表现优异。通过调整重心位置与优化后腿机构设计，显著改善了机器人的跳跃效率和稳定性，为后续机构优化与控制策略提供了理论依据。

(3) 经过五次迭代开发，物理样机的跳跃性能显著提升，最终跳跃距离达到 75 厘米。实验结果验证了设计改进的有效性，证明了仿生设计在机器人领域的应用潜力。未来研究可进一步优化机构设计，提升机器人在多地形环境中的适应性与运动性能。

参考文献

- [1] JIA Y, SUN Z Z, ZHENG Y, et al. Overview on development of planetary rover technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 419-427.
- [2] Quoc-Viet Nguyen, Hoon Cheol Park, Design and Demonstration of a Locust-Like Jumping Mechanism for Small-Scale Robots, Journal of Bionic Engineering, Volume 9, Issue 3, 2012, Pages 271-281.
- [3] Z. Kai, Y. Junmao, C. Diansheng and W. Tianmiao, "Design and kinematics simulation for bionic crank-slider mechanism of jumping robot," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guangzhou, China, 2012, pp. 796-801.
- [4] 任毅豪. 仿青蛙机器人跳跃之力学分析与轨迹优化[D]. 哈尔滨工业大学, 2017
- [5] 陈智翔. 青蛙跳跃仿生运动学及动力学研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015
- [6] 李杨. 仿蛙弹跳机器人的轨迹规划及落地稳定性分析[D]. 浙江理工大学, 2018