

# 仿生青蛙跳跃机器人的结构设计与分析

陈志凯, 王锋锋

金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年6月5日; 录用日期: 2024年8月9日; 发布日期: 2024年8月19日

## 摘要

跳跃机器人具有运动灵活性高、越障能力强等特点, 已成为仿生机器人的研究热点。本文所设计的机器人基于青蛙的结构特点及跳跃机理, 从解剖学和行为方式两方面研究青蛙的跳跃运动规律。本文通过分析青蛙骨骼结构、质量分布及其跳跃运动特征, 抽象出仿青蛙跳跃机器人的基本功能模块, 并对它进行了结构设计和运动学仿真。结果表明, 本文设计的仿生青蛙跳跃机器人能够实现稳定跳跃、运动控制和缓冲冲击力的效果。

## 关键词

仿生青蛙, 机器人, 建模仿真, 跳跃

# Structural Design and Analysis of the Bionic Frog Jumping Robot

Zhikai Chen, Fengfeng Wang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Jump robot has the characteristics of high motion flexibility and strong obstacle crossing ability, which has become the research hotspot of bionic robot. The robot designed is based on the structural characteristics and jumping mechanism of frog, the jumping movement law of frog is studied from both anatomy and behavior mode. We analyze the characteristics of frog bone structure, mass distribution and jumping movement, the basic functional modules of the frog jumping robot are abstract, and the structure design and kinematic simulation are conducted. The results show that the bionic frog jumping robot designed in this paper can achieve stable jump, motion control and buffer impact force.

文章引用: 陈志凯, 王锋锋. 仿生青蛙跳跃机器人的结构设计与分析[J]. 设计, 2024, 9(4): 463-469.

DOI: 10.12677/design.2024.94497

## Keywords

### Bionic Frog, Robot, Modeling and Simulation, Jumping

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

跳跃式仿生机器人是指模仿生物跳跃特点工作的机器人, 具有广阔的开发前景[1]。加拿大麦吉尔大学分析了柔性机器人的控制算法, 模仿动物利用肌肉、腱等弹性储能元素来降低耗能, 研制了具有柔性髌关节和腿的单腿跳跃机器人[2]。日本东京工业大学通过分析猫在爬墙过程中的跳跃动作, 研制了一种机器猫, 其跳跃动作不追求运动中整体达到的高度, 而是像猫那样通过四肢的协调动作越过障碍物[3]。美国斯坦福大学和俄亥俄州大学通过研究各种动物奔跑的运动步态和动力学特性, 以动物运动时耗能小, 腿部弹性储能和低惯量为目标, 合作研制出了一种机器人。哈尔滨工业大学通过分析蝗虫起跳的运动原理, 建立了机器人理论模型, 设计了分别基于电机和电磁铁驱动的两套样机[4]。上海交通大学模仿人体下肢设计了关节弹性步行机构, 在机器人的小腿中安置了弹性装置, 通过四组并联弹性元件和机器人腿外壳为机架的四连杆机构, 使机构具有缓冲储能效果[5]。西北工业大学分析了袋鼠的生物形态和运动机理, 提出了具有柔性脚趾的仿生袋鼠机器人机构模型, 并研究了全跳跃周期关节空间的轨迹规划, 为解决其跳跃、弹跳动力等关键技术奠定了理论基础[6]。

青蛙跳跃具有爆发性强、弹跳远的特点。其中, 青蛙前肢简化为一个主动肩关节和一个被动肘关节, 实现着路支撑缓冲和姿态调整的功能。后肢采用五杆机构作为腿部主体, 并增加脚掌以保证其稳定性, 通过电机控制实现跳跃动作, 具有较大的可行性[7]。目前已有研究中对于青蛙跳跃功能的实现: 第一种, 是直接通过电机旋转带动弹簧收缩来达到蓄能作用, 然后通过释放电机由弹簧快速拉动杆来驱动后腿来达到跳跃效果, 该机构可行性强, 但是蓄能不够多, 且费空间, 不太适合跳跃; 第二种, 是一种气动青蛙装置, 动力足够, 但是需要携带气瓶, 所占空间较多, 但是其腿部结构的连杆和减重设计值得参考; 第三种, 是使用手机蓝牙控制开发板, 达到控制仿生青蛙的目的。此外, 还有一种联动蛙腿结构, 在蛙腿部联动结构部分采用联动设计, 可以满足多个零件的同时运动。基于以上研究, 本文对青蛙生物特征和跳跃运动机理进行了分析, 对复杂的结构进行适当简化, 设计了一种面向跳跃运动的仿真青蛙机构模型, 并进行了结构设计和运动学仿真, 初步验证了跳跃性能和功能效果。

## 2. 青蛙结构与运动过程分析

### 2.1. 青蛙结构分析

青蛙身体分为头、躯干和四肢三部分, 体形短宽, 四肢强健, 无尾, 头形扁平而略尖, 游动时可减少阻力, 便于破水前进; 四肢发展不平衡, 前肢短小, 4指, 指间无蹼, 主要作用是撑起身体前部, 便于举首远眺, 观察四周; 后肢长大而强健, 5趾, 趾间有蹼, 适于游泳和在陆地上跳跃前进。青蛙的骨骼主要分为骨及软骨成分。骨架的功能包括提供对身体的支持, 保护脆弱的内部器官, 并为表面肌肉提供附着点。图1所示青蛙的骨骼结构, 前肢和后肢均为细长状, 质量主要分布在躯体部分, 整体质量约为20g, 其中身体质量约为15g, 占整体质量的四分之三。

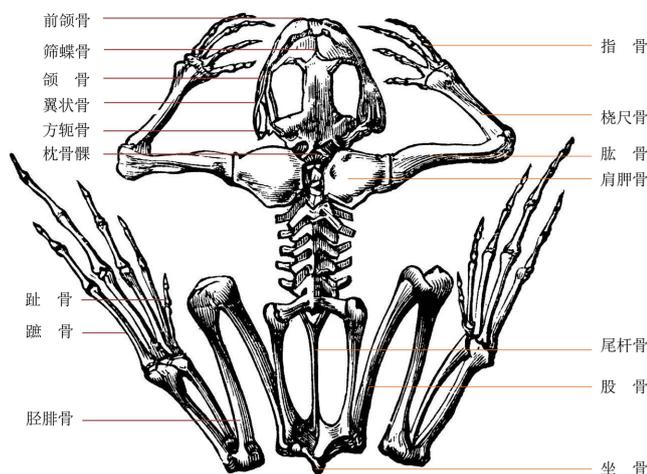


Figure 1. Frog skeleton  
图 1. 青蛙骨骼<sup>①</sup>

对跳跃起主要作用的腿部肌肉主要包括半膜肌、臀肌、股二头肌和腓肠肌。半膜肌是交错在臀部和膝部关节的关节肌肉，主要作用在臀部伸展中；臀肌是在臀部和膝部关节中伸展的关节肌肉，在膝部伸展中作用很大；股二头肌作用类似于臀肌；腓肠肌是羽状关节肌肉，通过脚底板的腱膜在膝和踝关节伸展，主要作用在踝关节。青蛙后肢的髌关节有 3 个自由度(屈伸、外展和内收、内旋和外旋)。膝关节、踝关节和跗跖关节各有 1 个自由度(屈曲和伸展)。前肢肩关节有 3 个自由度，肘关节和腕关节各有 1 个自由度。青蛙实际起飞阶段各关节的角度：髌关节屈伸运动 135°，外展内收运动 40°，内外旋运动先减少 10°再增加 40°，膝关节屈伸运动 155°，踝关节屈伸运动为 150°。跖关节的屈伸运动首先增加到 38°，然后减少到-30°。

## 2.2. 青蛙跳跃运动过程分析

青蛙的跳跃过程，如图 2 所示，主要分为三个阶段：起跳阶段、腾空阶段、着陆阶段。起跳过程中，首先青蛙质心降低，髌关节和膝关节强烈收缩，大腿和小腿几乎折叠在一起，接着后肢快速伸展，各个关节几乎同时开始张开，前肢顺势收回到身体两侧，最终脚尖离开地面，起跳过程结束蛙在起跳时会用力向后蹬，将身体向上推离地面。腾空阶段中，前肢伸出，后肢保持伸展状态，在空中，青蛙会利用腿部肌肉和身体转动来调整姿势，确保稳定地落地。着陆阶段中，手掌接触地面，前肢进行缓冲，后肢顺势收回。另外，青蛙在起跳离地的瞬间，后肢完全伸展。青蛙跳跃主要依靠两条后肢，同时伸展，提供跳跃时向前和向上的力，最终跳离地面。

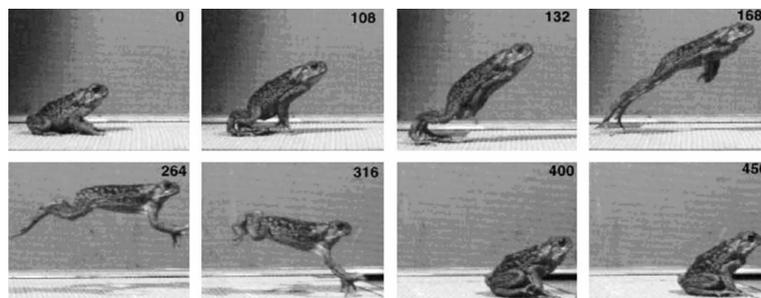


Figure 2. The leaping process of a frog  
图 2. 青蛙的跳跃过程<sup>②</sup>

### 3. 仿生青蛙跳跃机器人结构设计

#### 3.1. 储能装置设计

本文设计的仿生青蛙属于间歇性弹跳机器人, 选用弹簧蓄能采用拉簧, 具有高爆发性的优势。通过电机驱动一个缺齿齿轮来拉动齿条进行蓄能, 齿条通过主体外壳上的导向槽约束运动方向, 其上面链接又两个拉簧, 拉簧固定于主体上面, 拉着齿条往下滑, 齿条通过与大腿链接的齿轮啮合来带动大腿。跳跃蓄能装置如图 3 所示, 其传动过程为: 电机带动缺齿齿轮 - 缺齿齿轮有齿的部分带动齿条 - 齿条与拉簧对抗蓄能 - 齿条拉动大腿上的齿轮 - 大腿上的齿轮带动大腿 - 大腿联动整个后腿和前腿 - 缺齿齿轮到无齿的部位 - 齿条释放 - 带动大腿跳跃。

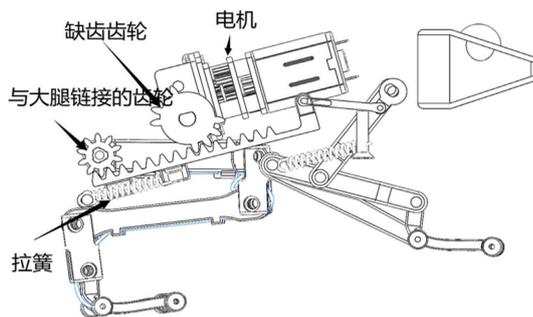


Figure 3. Bionic frog jumping energy storage device  
图 3. 仿生青蛙跳跃蓄能装置®

电机选型为 12 V 的 N20 减速电机, 减速比为 1030, 每分钟 16 转, 最大力矩为 3296 N·m。采用的是双电机驱动, 通过给两个电机不同方向的电流使电机朝同一个方向使力。此外, 这款电机的尺寸较小, 与同体型无刷电机和空心杯电机相比拥有更大的力矩。

#### 3.2. 青蛙腿部传动设计

通过不规则的槽孔来完成对齿轮和大腿的连接, 设计了三个槽孔是为了增大和力对抗的面积, 避免齿轮在长时间受力状态下导致的打滑。大腿和齿轮的接触长度设计得比较长, 几乎平分掉外壳预留的尾部的空间, 将齿轮设计得比较厚的原因是加大受力点, 避免打滑和损坏齿轮的情况发生。因为大腿起跳高度范围为  $0^{\circ}\sim 150^{\circ}$ , 因此只需要传动将近一小半的角度即可完成起跳动作, 所以设计齿轮模数为 0.8, 齿数为 10。

#### 3.3. 青蛙鳍足设计

青蛙的蛙腿运动过程可以分为推进, 滑行和复原三个阶段。在推进阶段, 蛙腿快速地向后蹬出, 膝关节和踝关节都逐渐打开, 形成推动力。在滑行阶段, 前腿和后腿保持静止状态, 呈现舒展状态, 减小阻力。在复原阶段, 后腿缓慢收缩至推进阶段前, 期间, 鳍足呈现收起状态, 从而减小水的阻力。在跳跃过程中青蛙鳍足会伸展开, 起到稳定整个身体的作用。考虑到鳍足主要作用在青蛙游泳的过程之中, 因此在采用了简化的鳍足设计, 如图 4 所示, 保留鳍足的减震作用, 舍弃了对跳跃影响较小的鳍作用。

### 4. 仿生青蛙跳跃机器人运动学仿真

#### 4.1. 运动学建模

综合以上设计, 仿生青蛙整体结构如图 5 所示。简化运动模型的单侧示意图如图 6 所示, 图中构件

1 为脚掌, 2 为踝关节, 构件 3 为小腿, 4 为膝关节, 构件 5 为大腿, 6 为后摆髌关节, 构件 7 为连接后摆髌关节和外摆髌关节的连接件, 长度为零, 8 为外摆髌关节, 构件 9 为躯体, 10 为青蛙中心(躯体质心, 近似为青蛙质心), 11 为肩关节, 构件 12 为大臂, 13 为肘关节, 构件 14 为小臂。

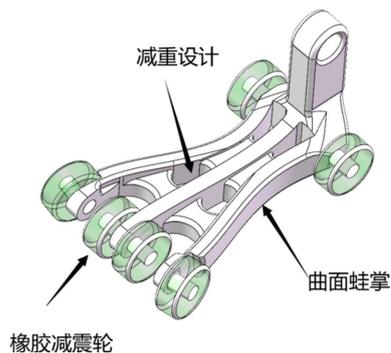


Figure 4. Simplified flipper design  
图 4. 简化的鳍足设计<sup>③</sup>

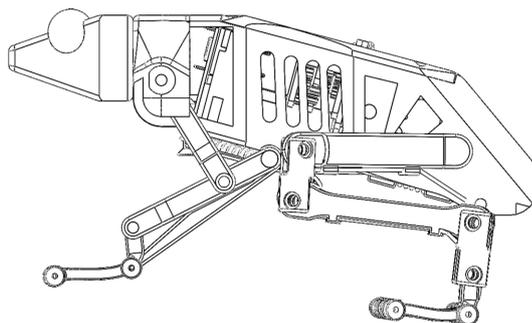


Figure 5. Overall structure  
图 5. 整体结构<sup>③</sup>

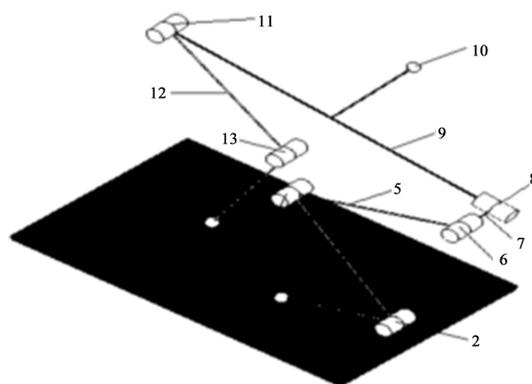


Figure 6. Simplified kinematic model  
图 6. 简化的运动学模型<sup>②</sup>

## 4.2. 仿真分析

首先, 使用 SolidWorks 中的 motion 插件进行仿真验证, 如图 7 所示。得到仿真运动的曲线图, 如图 8 所示。仿真曲线纵轴位移曲线图同真实青蛙重心位移图相似, 初步推断模型设计合理。

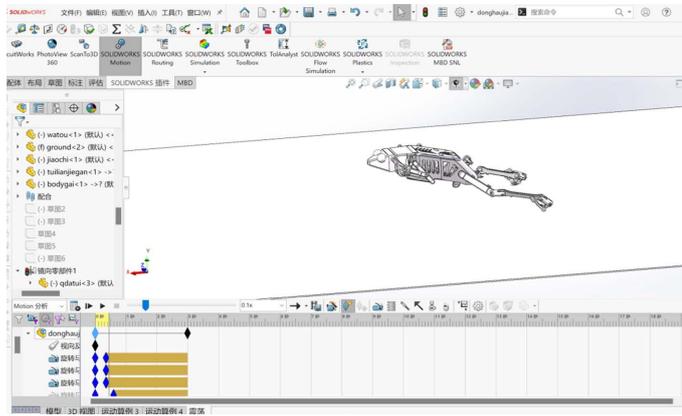


Figure 7. Simulation process  
图 7. 仿真过程<sup>③</sup>

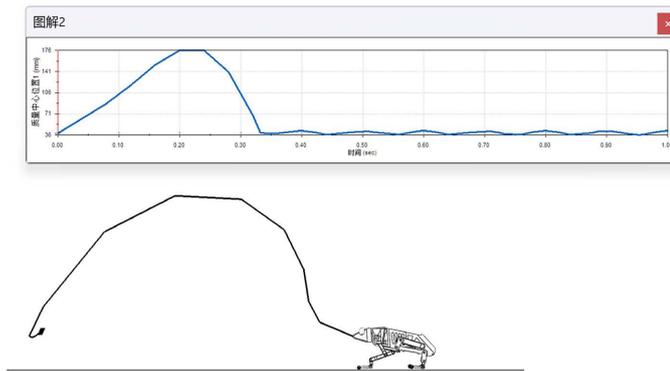


Figure 8. Simulating motion curves  
图 8. 仿真运动曲线<sup>③</sup>

接着, 使用 Adams 进行仿真实验验证, 采用交互式仿真方法, 设定时长为 5 秒, 分析步数为 120, 仿真界面及结果如图 9 所示。

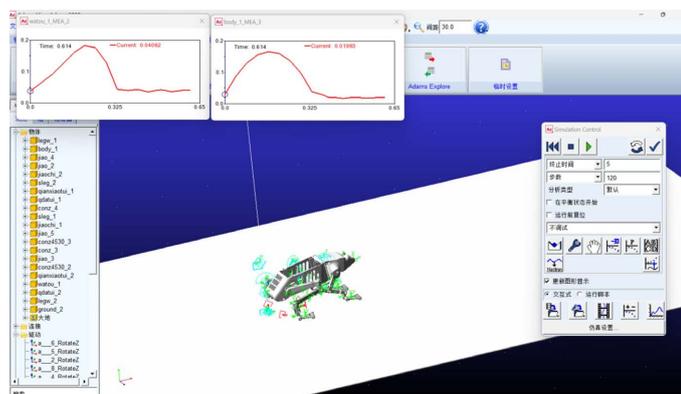


Figure 9. Interface and results of Adams simulation  
图 9. Adams 仿真界面及结果<sup>③</sup>

由仿真结果可知, 本文设计的仿生青蛙跳跃机器人, 其跳跃轨迹是一个抛物线, 在落地时附带惯性

向前移动。设计的电机驱动缺齿齿轮来拉动齿条进行蓄能, 齿条通过主体外壳上的导向槽约束运动方向, 上面连接两个拉簧, 拉簧固定于主体上面, 拉着齿条往下滑, 齿条通过与大腿链接的齿轮啮合来带动大腿。这样的设计可以使得青蛙进行跳跃, 这也符合了青蛙的跳跃过程中起跳阶段、腾空阶段和着陆阶段的姿态特征, 能够达到稳定跳跃和缓冲冲击力的效果。

## 5. 总结

本文基于对青蛙生物特征和跳跃运动机理的分析, 对于复杂的结构进行简化, 从建模到仿真再到电机操控实现青蛙跳跃。面向跳跃的仿生青蛙它能够完美拟合生物青蛙跳远曲线, 在运动过程中保持稳定的能量输入和输出, 实现越障功能, 运动灵活。当然, 此结构还需通过后续调试, 以获得更远的跳跃效果。

## 注 释

①图 1: 参考

[https://life.scnu.edu.cn/biology/jingpin/dwx/course\\_learn/chapter\\_16/chapter\\_1/learn/default.htm](https://life.scnu.edu.cn/biology/jingpin/dwx/course_learn/chapter_16/chapter_1/learn/default.htm)

②图 2、图 6: 引用文献[8]

③图 3~5、图 7~9 自绘

## 参考文献

- [1] 任毅豪. 仿青蛙机器人跳跃之力学分析与轨迹优化[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] 于庆国. 仿青蛙游动机器人软体致动器设计及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [3] 章沁然. 仿青蛙跳跃机器人的结构优化与运动综合[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2016.
- [4] 朱翔宇. 仿青蛙跳跃机器人稳定跳跃的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] 任毅豪, 郑亮. 仿青蛙机器人跳跃之力学分析与轨迹优化[J]. 力学季刊, 2017, 38(2): 289-295.
- [6] 王猛, 臧希喆, 樊继壮, 赵杰. 仿青蛙跳跃机器人运动学研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(1): 102-106.
- [7] 焦磊涛, 张伟, 仲军, 樊继壮, 王猛. 仿青蛙跳跃机器人的动力学分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科版), 2013, 29(6): 694-698.
- [8] 关山原野. 仿生机器蛙跳跃机理分析及运动仿真[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.