She ji 设计进展, 2026, 11(5), 321-328
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/sheji
https://doi.org/10.12677/sheji.2026.115029

Hans汉斯

仿生机械蛙设计

——基于对青蛙跳跃运动分析的设计

谢　豪，林菲菲，秦飞杨，孙永康，陈　鲁，张朝刚

江汉大学智能制造学院，湖北　武汉

收稿日期：2026年9月25日；录用日期：2026年10月22日；发布日期：2026年10月29日

摘　要

这项研究把青蛙当作仿生原型，着重剖析其骨骼系统、跳跃动力学机制，依据工程应用需求，创新性地研发出了仿生机械蛙。经由对青蛙骨骼肌肉协同作用机制展开系统研究，对涵盖前肢、后肢、躯干、足部的整体结构做了优化设计，建立出了高效的跳跃运动执行机构。该仿生机械蛙具备结构精简、传动高效、运动稳定、可扩展性强等特性，在教育教学、科学研究、特种作业等应用场景，展现出了明显的技术优势与市场潜力。

关键词

仿生青蛙，仿生机械

Bionic Mechanical Frog Design

—Based on the Analysis of Frog Jumping Movements

Hao Xie, Feifei Lin, Feiyang Qin, Yongkang Sun, Lu Chen, Chaogang Zhang

School of Intelligent Manufacturing, Jianghan University, Wuhan Hubei

Received: September 25, 2026; accepted: October 22, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

Taking the frog to be the core of biomimetic research, a new design drawing for a biomimetic machinery frog is hence put forward. The present writing is established upon the frog's skeletal frame structure and the mechanism of its jumping movement, meanwhile also considering the actual demands of application scenarios. Through taking apart and checking the component and matching mode of the frog's skeleton muscles, an optimized structure design for the fore limbs, hind limbs, body trunk and foot parts is obtained. After that, a complete system which is used for carrying out the jumping movement has been built. The designed mechanical frog features a It has a compact and

文章引用: 谢豪, 林菲菲, 秦飞杨, 孙永康, 陈鲁, 张朝刚. 仿生机械蛙设计[J]. 设计进展, 2026, 11(5): 321-328.
DOI: 10.12677/sheji.2026.115029

a, a high, high transmission efficiency, it has, it has, stable, stable movement performance, and it has a strong, strong functional expansion capacity for a strong capacity for functional expansion. It possesses important application worth and bright market future in domains like education display, scientific research tests, and special working activities.

Keywords

Bionic Frog, Bionic Machine

Copyright © 2026 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

仿生学是一门把生物学和工程技术连接起来的交叉学科，依靠生物体的形态特点、结构设计、运动机制，给智能装备和机器人系统的创新研发开拓了新的道路[1]。以青蛙这种典型的两栖动物来说，它出色的跳跃能力主要源自发达的后肢结构，这种特别的骨骼排列形式、肌肉协同作用机制、能量转换效率，为跳跃型机器人的设计与优化给出了宝贵的生物原型参照[2]。

在仿生机器人技术不断发展的进程当中，生物运动机理一直都是学者们非常关注的重要课题[3]。此次研究把青蛙当作仿生原型，进而设计并开发出了具备优异弹跳性能的机械蛙系统[4]。这个仿生装置有着多种应用价值：在教学实践里，它的机械结构能够非常生动地展现生物力学原理，于科学研究中，它可以取代活体样本去进行运动学实验，从而避免出现动物伦理方面的问题，在实际应用场景下，依靠其出色的弹跳能力、地形适应性，它能够承担起狭小空间探测、灾害救援等相关任务。本文所取得的研究成果会为高性能仿生跳跃装备的研发给予重要的技术参考[5]。

2. 设计方案与工作原理

2.1. 总体方案设想

针对青蛙骨骼系统、运动模式予以研究，同时参照相近物种运动特征，本研究确定了三个关键设计目标。

1) 仿生程度颇高：是以活体蛙类作为原型，在精简机械结构的基础之上，尽可能地保留了蛙类的外形特征、关节运动模式。

2) 动力性能表现出色：借助对动力系统选型予以优化，以此保证机器人拥有达成跳跃动作所需要的瞬时功率输出能力。

3) 结构优化：运用构件精简、布局优化这样的设计策略，机械蛙的跳跃性能还有运动稳定性都得到了提高。

2.1.1. 青蛙原型分析

本研究针对青蛙生物力学机制展开考察，从形态学特征、运动学特性这两个方面进行系统研究[6]。依据骨骼肌系统的解剖学分布情况来完成外形仿生设计，结合运动相位特征制定驱动控制策略，以此保障机械蛙的运动行为能够与生物原型达到高度吻合的状态[7]。

2.1.2. 静态原型分析

从解剖学方面进行观察，蛙类的躯体结构主要是由前肢、躯干部、后肢这三个部分共同构成的，在

这当中，四肢所呈现出的形态特征具备着比较重要的分类学研究意义与价值[8]。

骨骼系统所包括的主要部分为前肢和后肢。前肢骨骼架构是由肱骨、桡骨、尺骨、腕骨、掌骨、指骨共同构成，而后肢骨骼则是由股骨、胫骨、腓骨、跗骨、跖骨及趾骨组成[9]。测量得出的数据显示，肱骨跟桡尺骨的长度比例比较相近，股骨与胫腓骨的长度关系同样如此。从功能解剖学方面来看，指骨和趾骨主要负责接触支撑的力学功能，其具体形态特征见图 1。

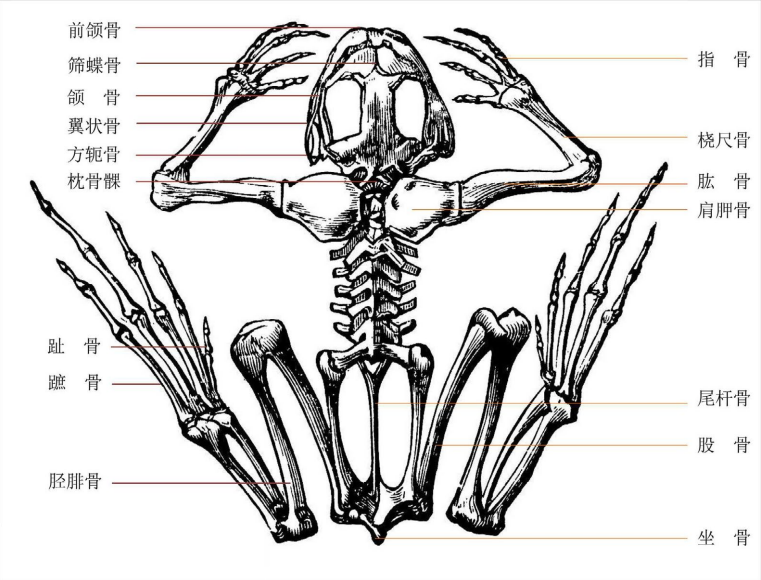


Figure 1. Side view of the skeleton
图 1. 骨骼侧视图[①]

对于关节配置方面来说，前肢是由肩关节、肘关节、腕关节组合而成的，其中肩关节具备 3 个旋转自由度，而其他关节仅仅只有 1 个自由度。后肢涵盖着髋关节、膝关节、踝关节和跗跖关节，髋关节同样拥有 3 个自由度，其余关节各自有 1 个自由度。

从肌肉解剖学的方面加以审视后可以发现，后肢的肌群主要是由臀肌、半膜肌、股二头肌、腓肠肌所共同构成的。在这些肌肉当中，臀肌和半膜肌会协同进行工作，从而对髋关节和膝关节的伸展运动起到作用[10]。而呈现出羽状结构的腓肠肌，在踝关节伸展的进程里发挥着关键的功效，能够为跳跃动作供给主要的动力来源[11]。

2.1.3. 动态原型分析

依据运动学的相关分析可以知道，青蛙进行跳跃时候的过程能够划分成四个接连的阶段，分别是准备姿态做出调整、出现爆发式起跳、于空中进行滑翔、缓冲着陆。

准备动作方面，下肢关节呈现出比较明显的屈曲状态，其中股骨与胫骨在躯干下方形成了类似折叠的姿态，跗跖关节的屈曲角度大约达到了 120˚。前肢也会参与到支撑过程当中，并且协助进行方向的调整[12]。

在起跳这个过程当中，后肢所储存的弹性势能快速地转变为动能，各个关节从屈曲的状态转变成为伸展运动，进而推动身体重心向前移动并且脱离地面，在这个时候前肢协同参与进来以此来维持运动的平衡。

在腾空的过程当中，前肢呈现出伸展的状态朝着前方进行延伸，与此同时后肢的各个关节逐渐地屈

曲，借助对肢体姿态的调节来改变身体的转动惯量，以此维持飞行过程中的姿态稳定。

在着陆这个过程当中，前肢会率先触碰地面，其目的在于吸收冲击力，紧接着后肢会慢慢收回，与此同时身体重心也会跟着向后肢转移，最终会恢复到开始时的姿态，以此为后续的跳跃动作做好相应准备[7]。

2.2. 总体机械设计

结合生物特征与工程实现条件，确定以下设计原则：

1) 轻量化设计包括精简冗余构件、优化杆件截面尺寸等方式，能够有效减轻结构自身重量，进而降低驱动系统的能耗。

2) 简化设计：把次要运动关节予以整合来降低自由度，进而提高系统的控制稳定性。

3) 复合驱动方案：电机与弹簧共同发挥作用，电机承担精确扭矩调节任务，弹簧负责快速能量释放，以此在控制精度跟动态响应间达成平衡。具体结构见图 2。

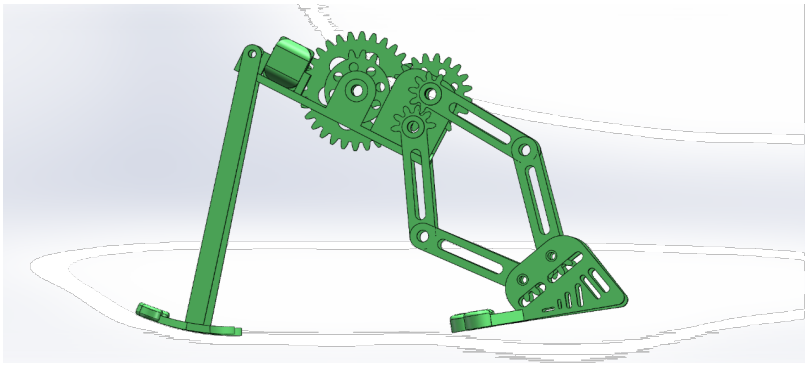


Figure 2. Overall mechanical design three-dimensional model
图 2. 总体机械设计三维模型[②]

2.3. 工作原理及结构

对青蛙骨骼系统进行简化分析，同时结合其运动轨迹实时监测数据，本研究从结构模型和运动特征两方面探究青蛙跳跃生物力学机制，依据探究结果完成仿生青蛙初始结构方案设计。

2.3.1. 设计要求

仿生青蛙的整体质量必须要严格把控。要是质量过大，就会使得驱动系统的负荷有所增加，为了满足结构强度方面的要求，各个杆件的厚度、传动轴的直径都需要相应地增大，这样一来就会致使整体结构的尺寸超出标准，无法符合竞赛规范。经过全面的思考，本设计把产品质量指标设定在了 600 克左右。

从仿生学的视角着手进行研究，此项研究着重对青蛙的跳跃运动特性予以模拟。青蛙于自然界中的跳跃行为具备爆发力这一特性，怎样借助机械结构设计达成与之相似的起跳爆发性能，成为了本方案里的关键技术难题。

在对仿生青蛙运动性能进行评估之时，原地跳远距离乃是衡量其跳跃能力的一项关键指标。优化水平跳跃距离的设计方案，对于提高仿生青蛙整体性能意义重大。

2.3.2. 动力源的选择

当下仿生跳跃机器人的动力系统设计主要运用电机、液压、气压这三种驱动方式。鉴于产品尺寸的限定，液压驱动和气压驱动在密封性能、运行稳定性方面有着比较明显的欠缺，如此一来电机驱动便成

为了更为合适的选择。

该电机驱动系统可以精准调控输出扭矩，进而达成出色的运动性能。电机本体有着重量轻、便于安装携带的特性，并且占用空间比较小。按照赛事规定，工作电压要控制在 24 V 以内，对输出功率的要求不高，这完全契合青蛙机器人的使用需求。

纯电机驱动的跳跃机制依靠电机扭矩直接传递到地面，借助反作用力来实现起跳，不过这种方式能量转换效率不高。本研究运用电机－弹簧复合驱动方案，把电机当作主动力源来提供持续扭矩，同时将弹簧用作能量存储与释放装置。弹簧材料具有高弹性、易变形的特性，能在微小形变状况下瞬间释放巨大弹力，进而提高仿生青蛙跳跃的爆发性能。这种复合驱动方式有效优化了系统的能量转化效率。

综上所述，这里选择电机和弹簧结合的驱动方式。

2.3.3. 弹簧的位置分布

通过运用运动学建模来展开相关分析，本研究得以获取青蛙起跳过程中的关键参数。见图 3 能够看出，在起跳的起始阶段，地面反作用力的数值相对较小，这一情况与 Calow、Alexander 的研究结果相契合。随着起跳动作不断持续推进，该力的数值会渐渐增大，一直到达到峰值，之后在离地瞬间会快速衰减至零。

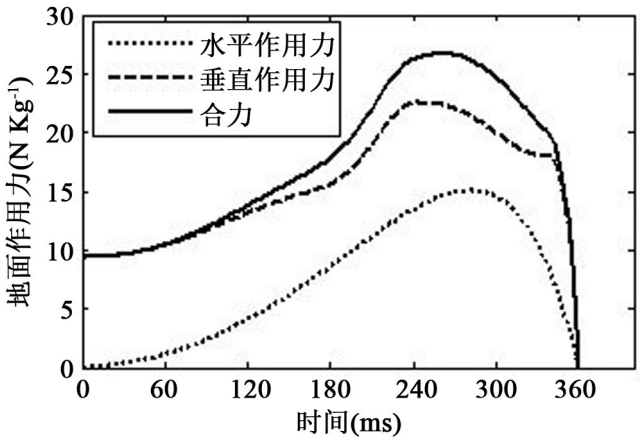


Figure 3. Force analysis of the frog's jumping process
图 3. 青蛙跳跃过程受力分析[②]

从实验获取的数据能够明确看出，在青蛙起跳的那一刹那，青蛙与地面所形成的初始角度近乎 60˚。面对这种情形，要对弹簧力予以分解，把它分解成水平方向的分量 F_x 、垂直方向的分量 F_y ，这二者的具体关系借助下面的公式(2.1)呈现出来：

$$F_x = 27N, F_y = 23N \tag{2.1}$$

在明确弹簧安装角度之后，要把弹簧的两端分别固定到仿青蛙跳跃机器人后肢的大腿部分、小腿部位。弹簧安装的位置对于机器人的跳跃性能有着关键作用。从图 2 可以看出，当弹簧放置在大腿和小腿的质心之处时，经过力学分析可知，把拉簧安装在大腿与小腿的中间位置是最为合适的。在这种状态下，处于初始站立的时候，拉簧和地面会形成 60˚的夹角，这样就能达成最佳的起跳效果。

在本研究当中，拉簧被安装于大腿与小腿之间，其目的在于对起跳性能予以优化。此种布置方式与放置于两小腿之间或者两大腿之间的方案相比较而言，具备显著优势。首先，在初始站立阶段，拉簧与地面呈 60˚夹角，如此一来能够大幅度增加弹簧的可压缩行程。其次，该配置能够充分运用弹簧的弹性势

能，为起跳动作提供更为充足的能量储备，从而实现最佳的起跳效果。

在本研究里大腿、小腿的长度都被设定成 35.25 mm，选取 25 mm 的拉簧当作弹性元件。当起跳的时候弹簧会伸长到 49 mm，依据公式能够推导出满足 60˚起跳角度的必要条件。

$$\cos\alpha = \frac{x^2 + y^2 - 16^2}{2xy} = 0.5 \tag{2.2}$$

若想提高跳远距离，增强弹簧在水平方向的推力颇为关键，故而把拉簧安装在大腿与小腿之间是比较合适的做法，见图 4。

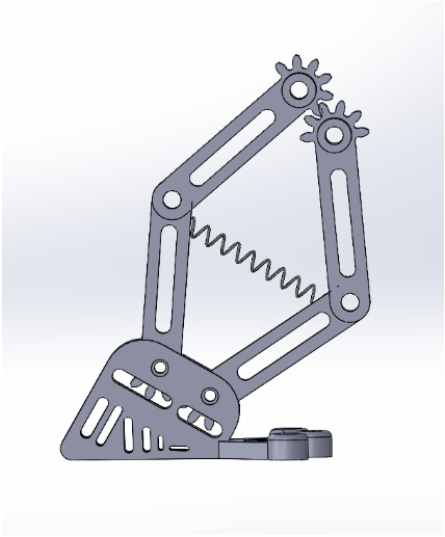


Figure 4. Spring placement scheme
图 4. 弹簧布置位置方案[②]

2.3.4. 传动系统设计方案

此次研究运用电机与弹簧复合驱动方案，依照对称布置原则达成了单侧驱动系统的设计工作。图 5 呈现出了该单侧驱动系统具体的结构设计情况。

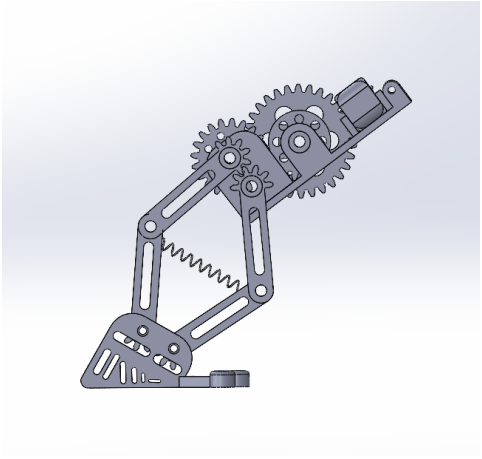


Figure 5. Drive system schematic diagram
图 5. 驱动系统示意图[②]

这个传动系统是由驱动电机 1、四个标准直齿齿轮构成的，其中 4 号齿轮是经过特殊设计的不完全齿轮。它的工作原理是这样的：电机 1 输出转矩，依靠其传动轴上的齿轮 2 来驱动左侧的齿轮 3 进行旋转，和齿轮 2 同轴安装的不完全齿轮 4 会带动左侧的齿轮 5 产生运动，在这个过程当中拉簧会被逐步拉伸。当不完全齿轮 4 旋转到与齿轮 5 脱离啮合的位置时，二者会突然分开，此刻被拉伸的拉簧会快速回弹，释放所储存的弹性势能，进而完成整个起跳动作。

2.3.5. 电机选型

依据力学分析所获得的结果可以看出，青蛙起跳时整个身体的合力与水平面所形成的夹角大约是 60˚，此种情况也就表明弹簧的最佳安装角度应当设定为 60˚。当把仿生青蛙的自重确定为 4 kg 时，借助式(2.3)来进行计算能够知道，弹簧在拉伸进程中需要予以提供的最小弹性力是：

$$F = \frac{M}{\cos 60^{\circ}} = 45\mathrm{N} \tag{2.3}$$

从式(2.4)推导得出的结果来看，当需要消除传动系统摩擦等因素所产生的影响时。通过借助补偿系数 α 对拉簧作用力的计算进行修正。是一种可行的方式。这样做能使拉簧作用力的计算结果更加精确。减少传动系统摩擦等因素对计算结果的干扰。从而在相关计算中得到更符合实际情况的拉簧作用力数值。

$$F' = F \times \alpha = 56N \tag{2.4}$$

依据公式进行计算能够得出，当弹簧的伸长量达到 13.75 毫米的时候，与之相对应的弹性系数。

$$K = \frac{F'}{\Delta x} = 3.5\ \mathrm{N/m} \tag{2.5}$$

2.3.6. 齿轮传动设计

要是想要确定两对传动齿轮的分配方案，那么第一步就得计算系统的总传动比。根据齿轮传动效率是 0.98、滚动轴承效率是 0.8 这样的参数设定，借助式(2.7)就能够求出系统的总传递效率 η 总。

$$\eta_{总} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 = 0.615 \tag{2.6}$$

根据式(2.8)所展示的驱动电机输入转矩、滚筒输出转矩、总传动比之间存在的数学关系，把具体参数代入该式当中，就能够得出总传动比的数值。

$$i_{总} = \frac{T_{输出}}{\eta_{总} \times T_{输入}} = 3.6 \tag{2.7}$$

确定好总传动比之后，要依据设计需求合理分配两级齿轮减速比。齿轮 4 有不完全齿轮特殊结构，每次传动旋转角度小于 360 度，所以与之啮合的齿轮 5 在脱离啮合前要尽量多转动。基于此设定齿轮 3 与齿轮 4 的传动比 i_2 为 1，把齿轮 1 与齿轮 2 的传动比 i_1 取值设为 3。

依据传动系统的设计方案，减速装置运用两对齿轮组合达成降速增扭的功能，经过传动链传递之后，滚筒输出的转矩要满足不低于 1 N.m 的技术要求。在驱动电机选型时，综合思考转速范围、外形尺寸等因素，最后确定选用 N2 型电机，其具体技术参数可见表 1。

Table 1. Drive motor parameters
表 1. 驱动电机参数

额定电流	额定电压	扭矩	转速	重量
300 mA	12 V	2.0 g * cm	80 r/min	9 g

3. 总结展望

此项研究依据青蛙的生物力学特性并结合结构仿生学原理开发出仿生跳跃机器人，其采用电机－弹簧混合驱动机制。运用 SolidWorks 完成三维建模后借助 ADAMS 软件平台对运动学和动力学特性进行仿真验证。实验数据显示该机械蛙有优化的结构设计、高效的传动系统、理想的跳跃性能，为仿生跳跃机器人研发提供新技术方案。后续研究可从几方面推进：其一，以选择轻量化材料并进行结构优化降低整体重量，其二，集成智能控制系统提高运动轨迹精确控制能力，其三，针对野外作业需求完善防护设计拓展其在环境探测与应急救援等领域实际应用。

4. 致谢

本研究过程中，张朝刚教授与秦工教授于方案设计、数值仿真、论文写作方面给予了悉心指导，在此特致以诚挚谢意，同时，江汉大学智能制造学院提供了先进的实验设备，并给予技术保障，对此表示感谢，另外，课题组成员在整个研究过程中密切配合，尤其是在三维建模、样机装配还有系统调试等环节提供了协作支持，在此对他们表达衷心的感激。

注　释

①图 1 来源：网页引用，https://html.hanspub.org/file/1181255-rId12.jpeg?20240819013924

②图 2~5 来源：作者自制

参考文献

[1] 李保江, 朱剑英. 弹跳式机器人研究综述[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 803-807.

[2] 许宏岩, 付宜利, 王树国, 刘建国. 仿生机器人的研究[J]. 机器人, 2004, 26(3): 283-288.

[3] 张秀丽, 郑浩峻. 机器人仿生学研究综述[J]. 机器人, 2002, 24(2): 188-192.

[4] 顾益聪. 仿青蛙跳跃机器人的设计和研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2021.

[5] Lombard, W.P. and Abbott, F.M. (1907) The Mechanical Effects Produced by the Contraction of Individual Muscles of the Thigh of the Frog. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, **20**, 1-60. https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1907.20.1.1

[6] 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.

[7] 王猛. 仿青蛙跳跃机器人的研制[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[8] 刘载淳. 欠驱动跳跃机器人的运动轨迹规划及试验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[9] 田为军. 德国牧羊犬步态动力学分析与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2008.

[10] Calow, L.J. and Alexander, R.M. (1973) A Mechanical Analysis of a Hind Leg of a Frog (*Rana temporaria*). *Journal of Zoology*, **171**, 293-321. https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1973.tb05341.x

[11] 赵锡芳. 机器人动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.

[12] 李保江. 弹跳机器人动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(1): 76-80.