

## 星面探测仿生间歇式跳跃机器人设计及实现

柏 龙, 葛文杰, 陈晓红, 寇 鑫

(西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 设计了一种面向行星表面探测的小型间歇式仿生跳跃机器人. 利用机构学中变胞思想及齿轮-连杆闭链机构的力转换特性, 提出了一种杆长可控的非对称齿轮-六杆仿袋鼠跳跃机构. 对其间歇式跳跃过程进行了分析, 并针对跳跃能力和起跳躯干姿态平稳性进行了机构构型与尺寸优化设计. 基于优化设计结果, 进行了跳跃机器人运动仿真分析和样机试验. 结果表明, 该仿生跳跃机器人具有非线性递增的弹跳动力、平稳的起跳姿态以及较高的能量利用效率, 可通过太阳能供电、单一微小电机驱动实现间歇式跳跃运动.

**关键词:** 行星探测; 行星机器人; 腿型机器人; 跳跃机器人; 弹跳机器人

中图分类号: TP242

文献标识码: B

文章编号: 1002-0446(2012)-01-0032-06

### Design and Implementation of a Bio-inspired Intermittent Hopping Robot for Planetary Surface Exploration

BAI Long, GE Wenjie, CHEN Xiaohong, KOU Xin

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A small and bio-inspired intermittent hopping robot is designed for planetary surface exploration. Based on the fundamentals of metamorphic mechanisms and the force-transforming characteristics of geared linkages containing closed kinematic chains, a kangaroo-inspired hopping mechanism of the robot with controllable link-length and asymmetric geared six-bar linkage is proposed. The intermittent hopping process of the mechanism is analyzed, and the configuration and dimension parameters of the robot are optimally designed for improving the hopping capabilities and the stability of the robot's trunk in take-off phase. Based on the results of optimal design, the dynamic simulation analysis and prototype experiment are implemented. The results show that the bio-inspired hopping robot has such capabilities as nonlinearly increasing driving force, stable jumping posture and high mechanical energy utilization efficiency, and can realize intermittent jumping by using solar energy power and a single micro-motor.

**Keywords:** planetary exploration; planetary rover; legged robot; hopping robot; jumping robot

## 1 引言 (Introduction)

跳跃机器人越障、适应复杂地形地貌及有效承载的能力强, 易小型化, 在行星表面的低/微重力环境下其移动能力具有明显优势, 特别适合用作星面探测机器人或子母式探测车的子体探测系统<sup>[1-3]</sup>.

根据跳跃运动方式, 跳跃机器人可分为连续式和间歇式跳跃机器人两种. 前者的研究<sup>[4-5]</sup>主要集中在动力学分析及平衡控制; 后者的研究<sup>[6-7]</sup>则主要集中在机构设计, 较为关注机器人的实用性. 目前用于行星探测的跳跃机器人研究多为间歇式跳跃方式, 研究热点为跳跃机构设计、驱动方式、跳跃性能及功能实现等问题<sup>[3,5,8]</sup>. 其中, 美国加州理工学院研制的蛙形跳跃机器人<sup>[9-11]</sup>常被当作典型设计来

分析, 该机器人采用了对称齿轮-六杆闭链跳跃机构, 将弹簧递减特性的线性动力变换为非线性递增特性的弹跳动力, 有效地解决了跳跃机器人提前起跳和效率低的问题, 并为用微小功率电机驱动获得高效弹跳动力提供了解决思路. 但其跳跃机构仍属于一般弹射原理, 与实际仿生对象的生物学特征不符, 且存在能量锁定/释放装置不够稳定, 以及落地时总是机身先撞地等问题.

为此, 本文以设计一种不仅能实现间歇式跳跃, 且满足星面探测所需太阳能供电、驱动电机数少及电机功率小的要求, 并能完成平稳起跳的跳跃机器人机构为目标, 基于袋鼠的双足并拢(类单足)跳跃运动及其运动稳定性机理<sup>[12-13]</sup>和齿轮-连杆组合机

构丰富的运动及力变换特性，采用机构学中变胞的思想，提出了一种杆长可控的非对称齿轮-六杆组合机构的仿生间歇式跳跃机器人机构。

## 2 仿生跳跃机器人机构建模 (Mechanism modeling of the bio-inspired hopping robot)

袋鼠为单足跳跃运动模式，具有跳跃速度及跳高跳远度大、跳跃运动稳健及能耗低的独特优势。其跳跃运动生物结构主要由躯干和 大腿、小腿及脚趾骨以及肌肉、肌腱及韧带等组成，是一个刚柔并济的弹跳系统<sup>[12-13]</sup>。一般仿袋鼠跳跃运动机构可抽象为刚柔耦合的多自由度开链机构，但为了减少其驱动电机数并简化结构和控制，且使其跳跃运动形态和弹跳动力具有仿生特点，及有助于解决其跳跃平稳性和效率等问题，本文提出了用单自由度的非对称齿轮-六杆闭链机构作为其仿生间歇式跳跃机构(图 1)。

该单自由度齿轮-六杆组合闭链机构由杆 1、2、3、4、5 及可控长度杆 6 和两对齿轮 2' 与 6' 及 3' 与 5' 组成。其中杆 1、2、3、4 分别代表袋鼠的躯干、大腿、小腿及脚趾(脚掌与脚趾视为一个构件)，且各杆长度比例与袋鼠肢体尺寸比例相一致，而杆 5 及 6 则为其闭链的封闭杆；铰链 A、B 及 C 则分别相当于袋鼠的髋关节、膝关节及踝关节。杆 6 的长度可控是通过电机-丝杠螺母传动装置 6'' 来实现的。

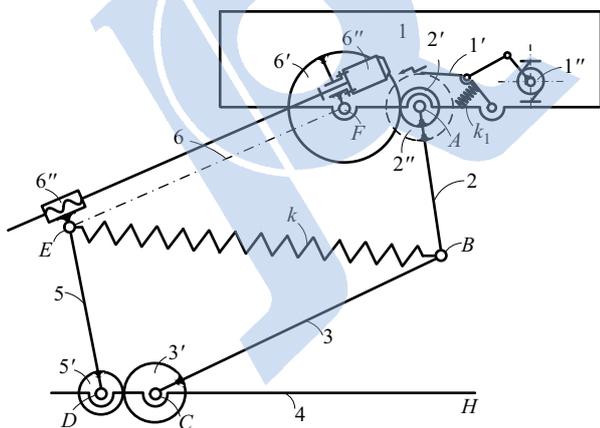


图 1 仿生跳跃机器人机构模型

Fig.1 Mechanism modeling of the bio-inspired hopping robot

## 3 机构间歇式跳跃过程 (Intermittent hopping process of the mechanism)

该仿生跳跃机器人的间歇式跳跃运动过程包括调姿、储能、跳跃及着地 4 个阶段(图 2)。利用电机-丝杠螺母传动装置 6'' 的电机反向转动使螺母回移，并通过绳索传动(图 1 中略)来拉动杆 2 逆时针

方向转动，并靠棘爪 1' 在弹簧  $k_1$  作用下锁定位置，当杆 2 复位时，电机-丝杠螺母传动装置 6'' 的电机正向转动使杆 6 长度增加并同时使储能弹簧伸长而完成调姿与储能；释放跳跃时，通过控制电机 1'' 驱动拨杆使棘爪 1' 松开，机构被突然释放，从而完成跳跃与腾空落地的间歇式跳跃过程。

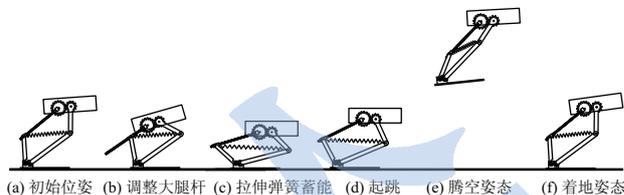


图 2 间歇式跳跃过程

Fig.2 Process of intermittent hopping

取图 1 中脚板杆 4 为固定参考系即支架时，该跳跃机构为齿轮-六杆变胞源机构，具有 2 个自由度，其机构拓扑结构为 6R-1P-2G (G 为齿轮副)。调姿时，该跳跃机构为 6R-1P-2G 结构；储能时，杆 1 与 2 相对位置被锁定，齿轮 2' 与 6' 也被固定，跳跃机构转变为单自由度 4R-1P-1G 机构；储能完成时，电机停止驱动丝杠螺母传动装置，跳跃机构转变为自由度为 0 的机构；当棘爪 1' 松开后，从起跳到着地过程中，跳跃机构转换为单自由度的 6R-2G 机构；当着地之后，跳跃机构再次进行调姿，此时机构变回 6R-1P-2G 结构状态。因此，在跳跃过程的不同阶段，跳跃机构的拓扑结构与自由度均发生改变，具有变胞特性<sup>[14]</sup>。通过该变胞特性，该机构可用 1 个微小功率的电机进行驱动而实现能量积蓄与释放及起跳姿态调整功能的一体化。

## 4 机构构型与尺寸优化设计 (Optimization design of the mechanism's configuration and dimensions)

跳跃机器人的跳跃性能取决于其跳跃机构的跳高跳远度和运动稳定性。而其性能的主要影响因素是跳跃机构的蓄能能力、起跳角度及躯干姿态。其中跳跃机构的蓄能能力又取决于储能弹簧的刚度系数和伸长量大小以及跳跃机构的构型和尺寸参数。储能弹簧刚度系数越大，跳跃机构的弹簧蓄能能力越大，但同时也更易发生提前起跳，使其能量利用效率降低。故本文以储能弹簧拉伸量最大和起跳躯干姿态平稳为优化目标，以起跳方向等因素为约束条件，对跳跃机构的尺寸参数进行优化设计。

### 4.1 目标函数与设计变量

仿生跳跃机器人机构在起跳阶段的初始位姿(实线)和离地前位姿(虚线)如图 3 所示，躯干和

脚底板分别为杆1和杆4(均略去了齿轮副). 为增大弹簧拉伸量, 将弹簧的另一端安装在辅助杆5延长线(杆7)的P点上. 该延长杆7与杆5夹角为 $15^\circ$ , 以避免跳跃机构初始位姿出现死点. 图中主要参数:  $\theta_i$ 、 $\theta'_i$ 分别为起跳阶段杆*i*初始位姿和离地前位姿的位置转角,  $\theta_{ij}$ 、 $\theta'_{ij}$ 分别为起跳阶段杆*i*与*j*初始位姿和离地前位姿的夹角,  $i_1$ 为踝关节处齿轮副的传动比,  $i_2$ 为髋关节处齿轮副的传动比,  $\beta$ 为躯干起跳角度,  $\gamma_i$ 为杆*i*任意位置相对于其初始位置的转角,  $l_i$ 为杆*i*长度,  $s_6$ 为变长杆6的长度.

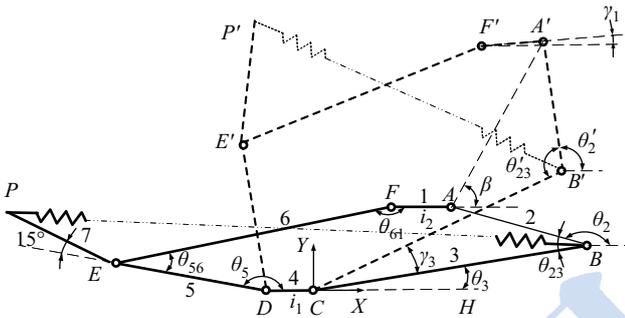


图3 跳跃机构起跳阶段的始末位姿

Fig.3 Postures of the hopping mechanism in the beginning and the end of take-off phase

根据跳跃机构初始位姿的尺寸约束关系, 可知:

$$l_3 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 + l_4 - l_1 - l_5 \cos \theta_5 - s_6 \cos \theta_6 = 0 \quad (1)$$

$$l_3 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2 - l_5 \sin \theta_5 - s_6 \sin \theta_6 = 0 \quad (2)$$

由式(1)和(2)可求出由  $l_i (i=1, \dots, 5)$ 、 $s_6$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  表示的  $\theta_5$  和  $\theta_6$ .

同样根据跳跃机构离地前位姿的尺寸约束关系, 可知:

$$l_3 \cos(\theta_3 + \gamma_3) - l_2 \cos(\theta'_{23} - \theta_3 - \gamma_3) - s_6 \cos(\theta_6 + \gamma_1 + \frac{\theta_2 + \theta_3 + \gamma_3 - \theta'_{23} + \gamma_1}{i_2}) + l_4 - l_5 \cos(\theta_5 - \frac{\gamma_3}{i_1}) - l_1 \cos \gamma_1 = 0 \quad (3)$$

$$l_3 \sin(\theta_3 + \gamma_3) + l_2 \cos(\theta'_{23} - \theta_3 - \gamma_3) - s_6 \sin(\theta_6 + \gamma_1 + \frac{\theta_2 + \theta_3 + \gamma_3 - \theta'_{23} + \gamma_1}{i_2}) - l_5 \sin(\theta_5 - \frac{\gamma_3}{i_1}) - l_1 \sin \gamma_1 = 0 \quad (4)$$

由式(3)和(4)可求出由  $l_i (i=1, \dots, 5)$ 、 $s_6$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta'_{23}$ 、 $\theta_5$ 、 $\theta_6$ 、 $i_1$  及  $i_2$  表示的  $\gamma_1$  和  $\gamma_3$ . 进而可求

得:

$$l_{B'P'} = l_3^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_7^2 + 2l_3l_4 \cos(\theta_3 + \gamma_3) - 2l_3l_5 \cos(\theta_5 - \frac{\gamma_3}{i_1} - \theta_3 - \gamma_3) - 2l_4l_5 \cos(\theta_5 - \frac{\gamma_3}{i_1}) + 2l_5l_7 \cos 15^\circ - 2l_4l_7 \cos(\theta_5 - \frac{\gamma_3}{i_1} + 15^\circ) - 2l_3l_7 \cos(\theta_5 - \frac{\gamma_3}{i_1} + 15^\circ - \theta_3 - \gamma_3) \quad (5)$$

$$l_{BP} = l_3^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_7^2 + 2l_3l_4 \cos \theta_3 - 2l_3l_5 \cos(\theta_5 - \theta_3) - 2l_4l_5 \cos \theta_5 + 2l_5l_7 \cos 15^\circ - 2l_4l_7 \cos(\theta_5 + 15^\circ) - 2l_3l_7 \cos(\theta_5 + 15^\circ - \theta_3) \quad (6)$$

由式(5)和(6)可求得弹簧拉伸量  $\Delta l_{BP}$  为

$$\Delta l_{BP} = l_{B'P'} - l_{BP} \quad (7)$$

根据式(1)~(6), 式(7)中  $\Delta l_{BP}$  为由  $l_i (i=1, \dots, 5, 7)$ 、 $s_6$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta'_{23}$ 、 $i_1$  及  $i_2$  组成的关系式.

将起跳角度  $\beta$  控制在一定范围内, 以弹簧拉伸量  $\Delta l_{BP}$  (即起跳与离地两位姿时弹簧长度的差值) 最大和躯干姿态与水平方向的摆转角  $\gamma_1$  最小为优化目标. 则目标函数可表述为

$$f_1(\mathbf{X}) = -\Delta l_{BP} \quad (8)$$

$$f_2(\mathbf{X}) = |\gamma_1| \quad (9)$$

为实现仿袋鼠的跳跃运动形态, 该仿生跳跃机构的大腿杆2与小腿杆1的尺寸比例应与袋鼠生物肢体的尺寸比例一致, 且根据机构的两对齿轮传动中心距、初始位姿(即积蓄能量后准备起跳的收拢状态)及起跳结束时杆2与3相对位姿的要求, 即可确定此跳跃机构的尺寸参数  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、 $l_7$  与位置参数  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta'_{23}$ , 则跳跃机构的杆5长度  $l_5$ 、杆6长度  $s_6$  以及两对齿轮的传动比  $i_1$  和  $i_2$  为该优化设计的设计变量, 即

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [l_5, s_6, i_1, i_2]^T \quad (10)$$

## 4.2 约束条件

(1) 几何尺寸约束

组成跳跃机构的各杆件形成封闭矢量约束:

$$h_1(\mathbf{X}) = l_3 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_1 + l_4 - x_1 \cos \theta_5 - x_2 \cos \theta_6 = 0 \quad (11)$$

$$h_2(\mathbf{X}) = l_3 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2 - x_1 \sin \theta_5 - x_2 \sin \theta_6 = 0 \quad (12)$$

(2) 运动性能约束

为使跳跃机器人躯干平稳地向前上方以接近 45° 角度弹跳, 将起跳角度  $\beta$  限定范围, 即

$$g_1(\mathbf{X}) = |\beta - 45^\circ| - 15^\circ \leq 0 \quad (13)$$

式中:

$$\beta = \arctan \frac{A'_y - A_y}{A'_x - A_x}$$

$$A'_y = l_3 \sin(\theta_3 + \gamma_3) + l_2 \sin(\theta'_{23} - \theta_3 - \gamma_3)$$

$$A_y = l_3 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2$$

$$A'_x = l_3 \cos(\theta_3 + \gamma_3) - l_2 \cos(\theta'_{23} - \theta_3 - \gamma_3)$$

$$A_x = l_3 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2$$

为避免初始位姿出现死点而影响弹簧释放, 设辅助杆 5 和杆 6 初始姿态为  $\theta_5 \leq 175^\circ$ 、 $\theta_6 \geq 10^\circ$ , 即

$$g_2(\mathbf{X}) = \theta_5 - 175^\circ \leq 0 \quad (14)$$

$$g_3(\mathbf{X}) = 10^\circ - \theta_6 \leq 0 \quad (15)$$

4.3 数学模型

根据式 (1) ~ (15), 可得仿生跳跃机器人的尺寸优化设计数学模型为

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \\ \min f_i(\mathbf{X}) \\ \text{s.t. } g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \\ h_k(\mathbf{X}) = 0 \end{cases} \quad (i, k = 1, 2; j = 1, 2, 3) \quad (16)$$

4.4 优化设计结果

设定初始参数  $l_1 = 35 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 80 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 160 \text{ mm}$ 、 $l_4 = 25 \text{ mm}$ 、 $l_7 = 70 \text{ mm}$ 、 $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 165^\circ$ 、 $\theta_3 = 10^\circ$ 、 $\theta'_{23} = 165^\circ$ . 使用 Matlab 的优化工具箱函数 fminimax 求解式 (16), 得到的优化设计结果经圆整后如表 1 所示.

表 1 优化设计结果

Tab.1 Results of optimization design

尺寸变量	$l_5$ /mm	$s_6$ /mm	$i_1$	$i_2$
求解最优值	80.90	155.90	0.28	6.37

根据跳跃机构各杆的尺寸约束关系, 可求出跳跃机器人的运动学方程, 代入上述参数值, 并给定小腿杆 1 转角数据, 则可得到起跳过程姿态 (图 4). 图 4 中, 小腿杆与大腿杆从“蹲伏”姿态逐步“展开”至极限位置, 躯干从重心较低的位置以接近平动的姿态快速上升, 与袋鼠在着地起跳阶段的腿部运动较为相似, 说明了该跳跃机构采用单自由度能初步实现袋鼠跳跃运动的姿态模拟. 该跳跃机器人的起跳角度为  $57.5^\circ$ , 符合起跳角度目标范围.

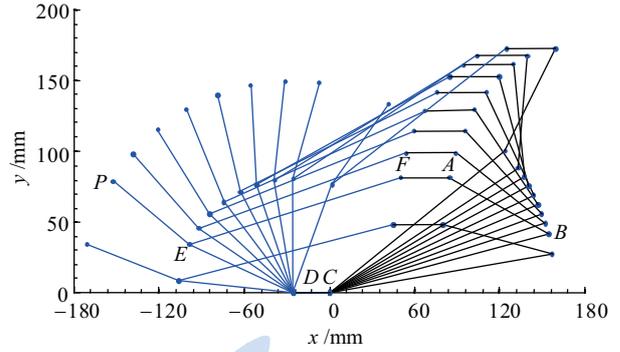


图 4 跳跃机器人起跳阶段位姿

Fig.4 Postures of the hopping robot in take-off phase

将辅助杆 5 延长至 P 点, 跳跃机器人的外形尺寸变化不大, 仅在起跳初始姿态时弹跳机构的水平宽度约增加 1/5, 但却对安装在 B 和 P 点的弹簧的伸长量影响显著. 图 4 中该仿生跳跃机器人的弹簧伸长量达到了 239.8 mm, 而若将弹簧安装在 B、E 点则弹簧拉伸量仅 139.2 mm, 故改善效果明显且有利于小型化.

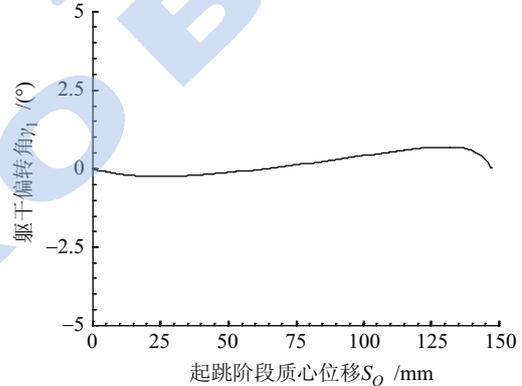


图 5 起跳阶段  $\gamma_1$  变化曲线

Fig.5 Variation of  $\gamma_1$  in take-off phase

图 5 为躯干在起跳过程中其摆转角  $\gamma_1$  变化曲线. 图中可见, 躯干以水平姿态为初始状态, 在起跳过程中其摆转角波动很小 (最大值仅为  $0.68^\circ$ ), 说明其运动姿态很平稳.

由图 4 可知,  $l_{BP}$  由  $l_5$  和  $s_6$  决定, 而跳跃姿态主要受  $i_1$  和  $i_2$  影响. 由于后续研究将考虑用  $i_2$  为传动比来调节跳跃机器人的跳跃跳远度以满足星面复杂地形的多跳跃步态需求, 故这里侧重研究在  $i_1$  影响下  $l_5$ 、 $s_6$  和  $\Delta l_{BP}$  的关系. 取  $i_2 = 6.37$  (计算最优值), 将  $l_5$  和  $s_6$  作为变量, 取其中一个变量为有限个值, 而另一个变量为连续变量, 以满足式 (11) ~ (15) 及  $\gamma_1$  不大于  $10^\circ$  为运动约束, 当  $i_1$  依次取 0.2、0.28 和 0.4 时, 可求出该有限个值所对应的  $\Delta l_{BP}$  及其最大值. 则可分别得到  $l_5$ 、 $s_6$  和  $\Delta l_{BP}$  最大值的关系曲线如图 6 和 7 所示. 由图可见,  $\Delta l_{BP}$  最大值曲线呈

上凸形状, 当  $l_5$  为 70 ~ 95 之间和  $s_6$  为 145 ~ 170 之间时,  $\Delta l_{BP}$  最大值较大, 且当  $i_1$ 、 $l_5$ 、 $s_6$  取计算最优值时达到峰值. 一方面验证了理论计算的有效性, 另一方面说明在  $i_1$  影响下, 为增加  $\Delta l_{BP}$ ,  $l_5$ 、 $s_6$  并不需要取太大的值, 这极有利于跳跃机构小型化.

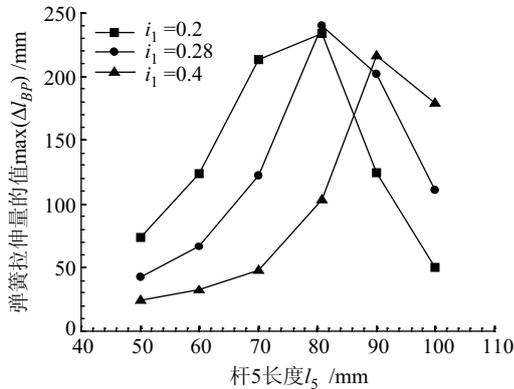


图 6  $i_2 = 6.37$  时,  $l_5$  和  $\Delta l_{BP}$  最大值的关系曲线  
Fig.6 Relationship of  $l_5$  and  $\max(\Delta l_{BP})$ , while  $i_2 = 6.37$

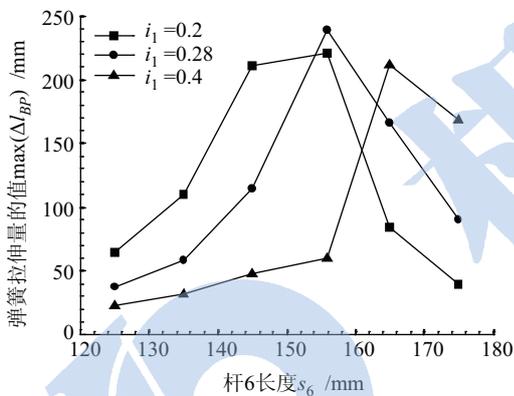


图 7  $i_2 = 6.37$  时,  $s_6$  和  $\Delta l_{BP}$  最大值的关系曲线  
Fig.7 Relationship of  $s_6$  and  $\max(\Delta l_{BP})$ , while  $i_2 = 6.37$

### 5 仿真与实验 (Simulation and experiment)

根据跳跃过程分析与优化设计得到的结构尺寸, 利用 ADAMS 软件对该仿生跳跃机器人进行了实体建模, 并进行了跳跃运动仿真 (图 8). 仿真结果与步态及运动分析一致, 表明该跳跃机器人实现跳跃的可行性.

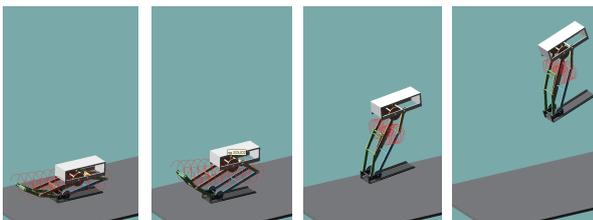


图 8 机器人仿真模型跳跃过程  
Fig.8 Hopping process of the robot's simulation model

通过 ADAMS 仿真测量得到的起跳过程脚趾受到的地面支撑反力变化曲线 (图 9), 可看出该跳跃

机构随弹簧能量释放过程其弹跳力呈现持续递增的变化特性, 即机器人处于持续起跳加速过程. 而在弹簧能量释放末期, 其支撑反力值急剧下降, 表明该弹跳机构即将腾空离地, 这时其能量也即将释放完成. 这一规律与袋鼠的地面反力测试结果比较吻合 [13], 故验证了该跳跃机构具有仿生弹跳力的特性, 且其能量利用效率较高.

根据上述跳跃机器人机构优化和仿真分析结果, 并考虑结构刚度、紧凑、轻量化要求, 运动构件均采用铝合金材料并采用数控线切割机整体切割加工而成, 所设计并试制的跳跃机器人试验样机如图 10 所示.

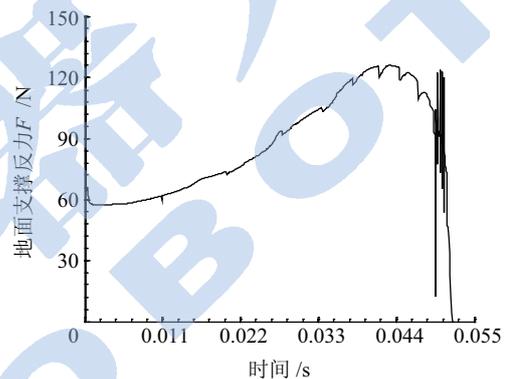


图 9 机器人脚趾受到的地面支撑反力  
Fig.9 Supporting counterforce acting on the robot's foot



图 10 跳跃机器人试验样机  
Fig.10 Experimental prototype of the hopping robot

该跳跃机器人试验样机总质量为 1.3 kg, 采用 MultiFLEX™2-AVR 控制器作为控制系统, 用 Pro-Motion CDS5500 机器人伺服电机作为驱动电机, 用单晶硅超薄太阳能电池与锂聚合物电池作为供电系统, 用 PT2262/2272 芯片作为无线遥控模块, 并在脚底板上安装了转向装置, 使跳跃机器人可根据动作规划调整起跳方向. 它可实现半人工干预模式的跳跃过程, 如图 11 所示, 即跳跃过程由机器人自主完成, 起跳方向根据人为决策遥控实现.

在样机试验过程中, 采用 MIKROTRON GmbH 公司的 MotionBLITZ Cube 高速摄像系统, 以每秒

120 帧速度进行拍摄, 所得视频的截图如图 12. 由图可见, 该样机跳跃过程的运动姿态与理论和仿真分析结果一致. 实验测试结果为: 样机可实现太阳能电池供电、微电机驱动的自主跳跃, 落地倾翻后能自主站立复位, 跳远度约为 1 m, 跳高度约为 0.3 m. 其跳跃度可达自身尺寸的 4 ~ 6 倍, 显示出良好的跳跃性能. 此外, 该机器人起跳过程为平动运动, 落地时脚底板先触地, 极有利于避免跳跃机器人机载探测仪器的损伤、增强腾空拍照作业和抗软土下陷的能力, 并为今后深入研究并突破跳跃机器人稳定落地的技术难关提供了可能性.

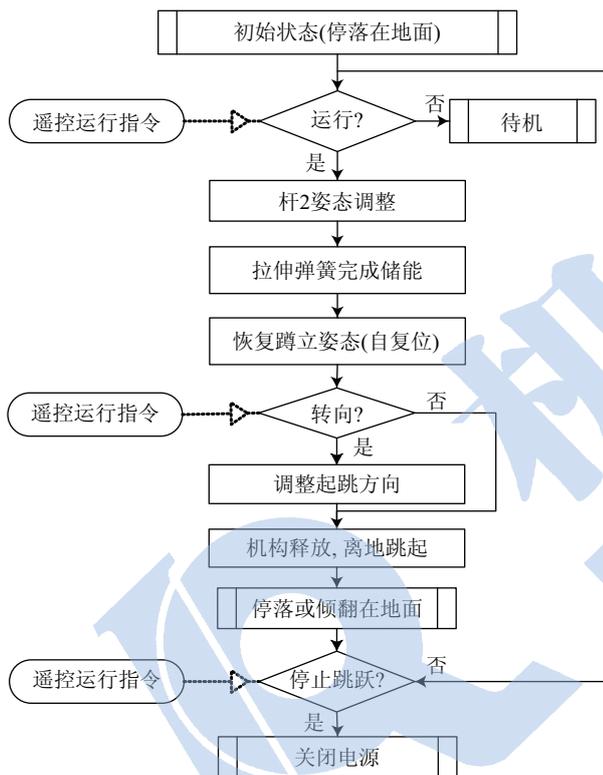


图 11 试验样机试验流程  
Fig.11 Experimental process of the prototype

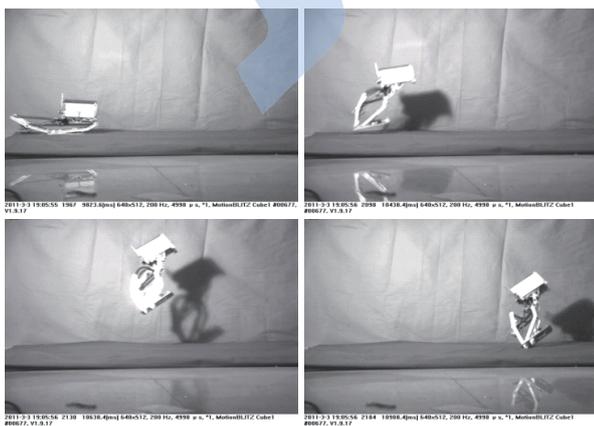


图 12 试验样机跳跃过程  
Fig.12 Hopping process of the prototype

## 6 结论 (Conclusion)

(1) 提出了一种杆长可控的非对称齿轮-六杆仿生跳跃机器人机构, 通过仿真与试验证明, 该单自由度闭链跳跃机构具有仿生物腿型多自由度开链跳跃机构的起跳运动形态和递增弹跳动力的特性, 且能量利用率较高, 可用作间歇式星面探测跳跃机器人的机构.

(2) 采用了具有力变换特性的非对称齿轮-六杆机构及提出了基于变胞思想的能量积蓄与释放技术, 使跳跃机构使用单一微小功率电机驱动实现了起跳调姿、能量积蓄与释放等功能的一体化, 且结构紧凑轻巧, 控制简单可靠.

(3) 对机构构型和尺寸进行了优化, 提高了机构的蓄能能力及弹跳性能. 弹簧安装在辅助杆延长端, 相较弹簧直接安装在关节处, 具有明显优势.

## 参考文献 (References)

- [1] Kaplan M H, Seifert H. Hopping transporters for lunar exploration[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1969, 6(3): 917-922.
- [2] Schilling K, Jungius C. Mobile robots for planetary exploration[J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(4): 513-524.
- [3] 柏龙, 葛文杰, 陈晓红, 等. 用于行星探测的跳跃机器人研究[J]. *机器人*, 2009, 31(4): 311-319.  
Bai L, Ge W J, Chen X H, et al. Research on hopping robot for planetary exploration[J]. *Robot*, 2009, 31(4): 311-319.
- [4] Raibert M H. *Legged robots that balance*[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.
- [5] Sayyad A, Seth B, Seshu P. Single-legged hopping robotics research - A review[J]. *Robotica*, 2007, 25(5): 587-613.
- [6] Scarfogliero U, Stefanini C, Dario P. The use of compliant joints and elastic energy storage in bio-inspired legged robots[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(3): 580-590.
- [7] Armour R, Paskins K, Bowyer A, et al. Jumping robots: A biomimetic solution to locomotion across rough terrain[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2007, 2(3): 65-82.
- [8] 刘壮志, 席文明, 朱剑英, 等. 弹跳式机器人研究[J]. *机器人*, 2003, 25(6): 568-573.  
Liu Z Z, Xi W M, Zhu J Y, et al. Research on jumping robots[J]. *Robot*, 2003, 25(6): 568-573.
- [9] Fiorini P, Hayati S, Heverly M, et al. A hopping robot for planetary exploration[C]//*IEEE Aerospace Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 153-158.
- [10] Burdick J, Fiorini P. Minimalist jumping robots for celestial exploration[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(7/8): 653-674.
- [11] Fiorini P, Cosma C, Confente M. Localization and sensing for hopping robots[J]. *Autonomous Robots*, 2005, 18(2): 185-200.
- [12] 葛文杰, 沈允文, 杨方. 仿袋鼠机器人跳跃运动步态的运动学[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(5): 22-26.  
Ge W J, Shen Y W, Yang F. Hopping gait kinematics for bionic kangaroo-hopping robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 22-26.

为基座姿态角的变化曲线, 表明基座姿态随着机械臂运动发生相应的耦合变化。

## 5 结论 (Conclusion)

本文在回避动力学奇异的 FFSR 轨迹规划方面, 采用运动方程分解并构造迭代函数的方法, 避免直接求解逆广义雅可比矩阵, 将 FFSR 动力学奇异转化为运动学奇异问题。仿真运动规划结果表明, FFSR 可以在存在动力学奇异的 PDW 区域内, 完成笛卡儿空间轨迹规划任务。这种间接求解 FFSR 逆运动学的方案为 FFSR 回避动力学奇异轨迹规划研究提供了一种新的途径。

## 参考文献 (References)

- [1] 崔乃刚, 王平, 郭继峰, 等. 空间在轨服务技术发展综述[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 805-811.  
Cui N G, W P, Guo J F, et al. A review of on-orbit servicing[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 805-811.
- [2] 柳长安, 李国栋, 吴克河, 等. 自由飞行空间机器人研究综述[J]. 机器人, 2002, 24(4): 380-383.  
Liu C A, Li G D, Wu K H, et al. Research summarizing of free flying space robot[J]. Robot, 2002, 24(4): 380-383.
- [3] Ellery A. An engineering approach to the dynamic control of space robotic on-orbit servicers[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2004, 218(G2): 79-97.
- [4] Moosavian S A A, Papadopoulos E. Free-flying robots in space: An overview of dynamics modeling, planning and control[J]. Robotica, 2007, 25(5): 537-547.
- [5] Dubowsky S, Papadopoulos E. The kinematics, dynamics, and control of free-flying and free-floating space robotic systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 531-543.
- [6] Umetani Y, Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 303-314.
- [7] Papadopoulos E, Dubowsky S. On the nature of control algorithms for free floating space manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(6): 750-758.
- [8] Tchon K, Muszynski R. Singular inverse kinematic problem for robotic manipulators: a normal form approach[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(1): 93-104.
- [9] Lian G Y, Sun Z Q, Mu C D. Optimal motion planning passing through kinematic singularities for robot arms[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4349-4354.
- [10] Papadopoulos E. On the dynamics and control of space manipulators[D]. Cambridge, CA, USA: MIT, 1991.
- [11] Xi F, Fenton R. On the inverse kinematics of space manipulators for avoiding dynamic singularities[J]. Transactions of the ASME – Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, 119(2): 340-346.
- [12] 丁希仑, 战强, 解玉文. 自由漂浮的空间机器人系统的动力学奇异特性分析及其运动规划[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 474-477.  
Ding X L, Zhan Q, Xie Y W. Dynamic singularity analysis and motion planning of free-floating space robot systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 474-477.
- [13] Pandey S, Agrawal S. Path planning of free-floating prismatic jointed manipulators[J]. Multibody System Dynamics, 1997, 1(1): 127-140.
- [14] 吴勃英, 王德明, 丁效华, 等. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 73-75.  
Wu B Y, Wang D M, Ding X H, et al. The principle of numerical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003: 73-75.
- [15] 付宜利, 张福海, 王树国, 等. 载体姿态无扰的自由漂浮空间机器人运动学特性研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1858-1864.  
Fu Y L, Zhang F H, Wang S G, et al. Research on kinematic characteristic of free floating space robot with zero-disturbance spacecraft attitude[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1858-1864.

## 作者简介:

- 张福海 (1977-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 空间机器人技术, 仿生机器人技术.
- 付宜利 (1966-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 空间机器人技术, 医疗机器人技术.
- 王树国 (1958-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人技术, 生物医学工程.

(上接第 37 页)

- [13] Alexander R M, Vernon A. The mechanics of hopping by kangaroos (Macropodidae)[J]. Journal of Zoology in London, 1975, 177(2): 265-303.
- [14] 戴建生, 丁希仑, 邹慧君. 变胞原理和变胞机构类型[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 7-12.  
Dai J S, Ding X L, Zou H J. Fundamentals and categorization of metamorphic mechanisms [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 7-12.

## 作者简介:

- 栢龙 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 机构学, 仿生机器人及其控制.
- 葛文杰 (1956-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机械原理与机构学, 仿生机器人学, 机械动力学及计算机辅助设计.