

# 基于可调齿轮—五杆机构的仿袋鼠跳跃机器人运动步态分析

柴 辉, 李建华, 葛文杰

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 设计了一种可调齿轮—五杆仿袋鼠跳跃机器人, 实现了能量的可调. 利用 ADAMS 软件对机器人的结构参数进行了优选, 按姿态调整、储能、起跳腾空、着地复位的动作顺序对机器人一个跳跃循环过程中的运动步态进行了分析. 采用简化的双质量—非线性弹簧模型对起跳条件和质心受力情况进行了分析. 最后给出了仿真和实验结果, 证实了设计方案的可行性.

**关键词:** 能量可调; 参数优选; 步态分析

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

## Gait Analysis on Bionic Kangaroo-hopping Robot Based on Adjustable Geared Five-linkage Mechanism

CHAI Hui, LI Jianhua, GE Wenjie

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A bionic kangaroo-hopping robot based on adjustable geared five-linkage mechanism is designed in order to realize energy adjustable. Optimal selection of structure parameter of robot is accomplished by ADAMS software. The robot gait in a hopping cycle is also analyzed by the action sequence which includes attitude adjustment, energy storage, takeoff and flight, landing and reset. Simplified double mass-nonlinear spring model is established in order to analyze the takeoff condition and the forces on centroid. At last, the simulation and experiment results are given to prove the feasibility of the design.

**Keywords:** energy adjustable; optimal selection of parameter; gait analysis

### 1 引言 (Introduction)

以跳跃运动为主的动物中, 袋鼠具有奔跑速度高、能耗小、对地面环境要求低、运动平稳等优点<sup>[1]</sup>. 因而仿袋鼠跳跃机器人特别适合于星际探索、军事侦察以及反恐等有障碍物的复杂环境, 尤其是在星际探索中, 跳跃机器人能充分利用外星球表面重力加速度低于地球表面这一优势, 而且易实现小型化, 能高效、灵活地在星面上运动. 因此, 研究适合星面探测的仿袋鼠跳跃机器人具有重要的理论意义和广阔的应用前景.

由于跳跃机器人所需瞬间弹跳动力非常大, 用电机直接驱动难以满足这一要求, 更难适应太阳能供电电机驱动并产生仿生弹跳动力的要求, 所以必须从能量的积蓄和机构力变换的角度来解决. 目前, 国内外对弹跳机器人的研究中常采用四杆及对称五杆或六杆作为储能机构<sup>[2-4]</sup>, 虽然这些研究改变了储

能机构的弹跳力特性, 但这些研究所涉及的储能机构只具有单一的弹射功能, 储能大小唯一, 弹跳力不具有大小可调的仿生特性.

为此, 本文基于袋鼠生物跳跃运动机理和齿轮—连杆机构的变换特性, 提出了基于可调齿轮—五杆单自由度机构的仿袋鼠跳跃机器人模型, 并用 ADAMS 软件进行尺寸参数优选, 在此基础上, 对其进行跳跃运动步态分析和仿真及实验验证.

### 2 仿生弹跳机构模型 (Modeling of the bionic hopping mechanism)

图 1 所示为可调杆长的齿轮—五杆机构仿袋鼠跳跃机器人机构模型. 该仿袋鼠腿部跳跃机构是由躯干 1 (即由丝杠 1 与螺母 1' 组成可调长度杆 AE, 丝杠与螺母传动具有自锁性)、大腿 2、小腿 3 和脚杆 4 (即脚板 OD) 铰接组成的, 其中铰链 A、B 及 C 分别为机器人的髋关节、膝关节和踝关节, 各杆长

度比例符合袋鼠腿部运动结构尺寸的比例. 与杆3在C点固连的扇形齿轮3'以及杆5在O点处固连的扇形齿轮5'(图中细实线示出)分别在C点和O点与杆4铰接,从而形成了可调杆长的齿轮—五杆封闭式单自由度弹跳机构.

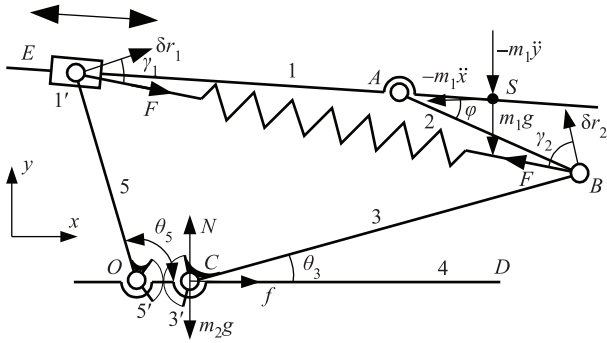


图1 机器人结构示意图

Fig.1 The frame schematic of robot structure

该弹跳机构的特点是:一方面利用齿轮—五杆组合机构丰富的运动特性实现仿生跳跃腿部的运动形态;另一方面利用该机构力变换特性将弹簧的线性力特性变换为仿生非线性的弹跳力的特性,并实现对储能大小的控制,获得更大弹跳效率.此外,采用闭式的弹跳机构,还能改善机构的结构刚度和负载能力.

### 3 机构结构参数的优选 (Optimization of the frame parameter)

为达到仿袋鼠生物体的运动形态及特征,根据机构稳定性的要求,该机器人机构的大腿2、小腿3、脚杆4的CD段以及躯体质心S距髋关节A的距离 $l_{AS}$ 的尺寸比例,应符合袋鼠的运动结构尺寸比例,即四者的长度之比为1:2:1.8:0.5<sup>[5]</sup>,故大腿连杆长度 $l_2$ 、小腿连杆长度 $l_3$ 、脚杆4的CD段长度 $l_{CD}$ 及 $l_{AS}$ 已确定.利用ADAMS软件,通过对仿袋鼠五杆跳跃机器人的动力学仿真,对其结构参数进行优选,即优选确定杆5的长度 $l_5$ 、扇形齿轮5'和扇形3'的齿数比 $r$ 及其中心距 $l_{OC}$ (即图1中O点和C点间的距离).其具体方法及步骤如下<sup>[6]</sup>:

1) 根据各杆工作极限位置,初步确定 $l_{OC}$ 和 $l_5$ 的取值范围.

2) 对 $l_{OC}$ 、 $l_5$ 和 $r$ 三个独立变量,任取2个变量,在它们的取值范围内各初选一个值,第3个变量在其取值范围内取不同的值,用ADAMS进行仿真,以研究该变量取值对机器人跳越性能及步态的影响.这里,为了模仿袋鼠的跳跃姿态并便于对比分析,仿真过程中,机器人的整体质量、弹簧的刚度及

伸长量均相同,而且起跳前,躯干的初始姿态角(其与水平线的倾角),髋关节、膝关节及踝关节相对位置角的取值均与袋鼠生物体运动参数基本一致.

3) 为了获得机器人的跳跃性能随其结构参数的变化曲线,利用Matlab对用ADAMS仿真得到的结果进行二次处理.

基于上述方法,仿真时,取机器人躯干质量为1.7 kg,其余各杆总质量为0.461 kg,弹簧刚度系数 $k = 2.2 \text{ N/mm}$ ,弹簧达最大伸长量时的弹簧力为314 N,这些参数在仿真过程中保持不变.大腿长度 $l_2$ 取100 mm,则 $l_3 = 200 \text{ mm}$ 、 $l_{CD} = 180 \text{ mm}$ 及 $l_{AS} = 50 \text{ mm}$ 按上述比例随之确定.得到机器人跳远度 $L$ (x轴方向)和跳高度 $H$ (y轴方向,这里约定机器人脚杆OD能够跳起的最大高度为机器人跳高度)随结构参数 $l_5$ 、 $r$ 及 $l_{OC}$ 的变化曲线,如图2~7所示.

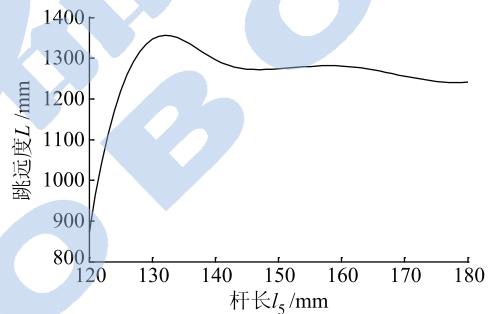


图2  $l_5$ 对跳远度的影响

Fig.2 The effect of  $l_5$  on jump distance

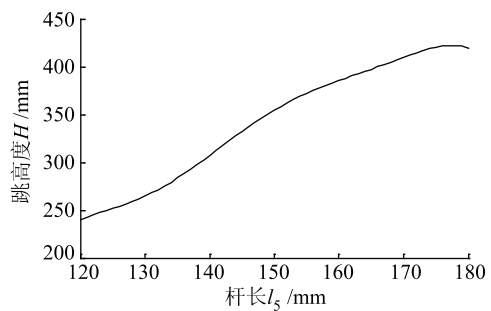


图3  $l_5$ 对跳高度的影响

Fig.3 The effect of  $l_5$  on jump height

在分析 $l_5$ 对跳跃性能的影响时, $r$ 值取0.25, $l_{OC}$ 值取40 mm.从图2可知,当 $l_5$ 小于130 mm时,随 $l_5$ 的增长,机器人跳远度 $L$ 迅速增大,当 $l_5$ 大于130 mm时, $L$ 随 $l_5$ 的增长而逐渐减小.又由图3可知,机器人跳高度 $H$ 随 $l_5$ 增长而逐渐增大.从能量的角度分析,在弹簧储能相同的情况下, $H$ 增大, $L$ 相应减小.但仿真中发现,当 $l_5$ 小于130 mm时,机器人在起跳后的降落过程中,其躯体存在后倾,使其跳远度 $L$ 随 $l_5$ 增长而增大,而不是随 $l_5$ 的增长而减小,当 $l_5$ 为120 mm时,机器人会以后倾的姿势落

地. 因此,  $l_5$  应结合设计要求在不小于 130 mm 的范围内选取.

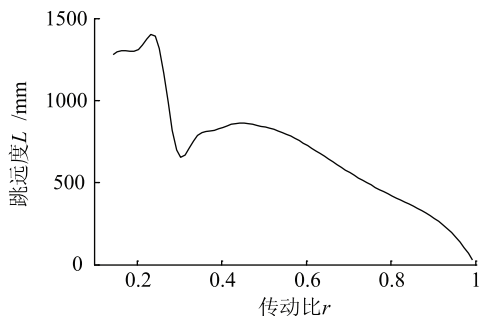


图 4  $r$  对跳远度的影响

Fig.4 The effect of  $r$  on jump distance

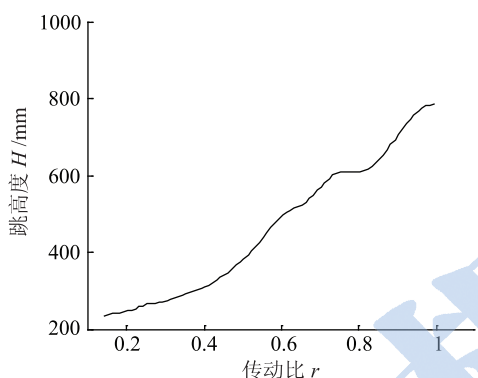


图 5  $r$  对跳高度的影响

Fig.5 The effect of  $r$  on jump height

在分析  $r$  对跳跃性能的影响时,  $l_5$  值取 130 mm,  $l_{OC}$  值取 40 mm. 从图 4 和图 5 可看出, 机器人的跳远度  $L$  随  $r$  增加而逐渐减小, 而跳高度  $H$  则随  $r$  增加而逐渐增大. 从仿真中还可发现, 当扇形齿轮齿数比  $r$  大于 0.8 时, 机器人竖直向上跳跃的能力增强; 当  $r$  接近 1 时,  $L$  近似为 0,  $H$  达到最大值. 因此, 综合考虑,  $r$  取值应小于 0.8.

在分析  $l_{OC}$  对跳跃性能的影响时,  $l_5$  值取 130 mm,  $r$  值取 0.25. 从图 6 和图 7 可看出, 机器人的跳远度  $L$  基本上不受齿轮 3' 和 5' 的中心距  $l_{OC}$  大小的影响, 但其跳高度  $H$  则呈现出较大的波动. 此外,

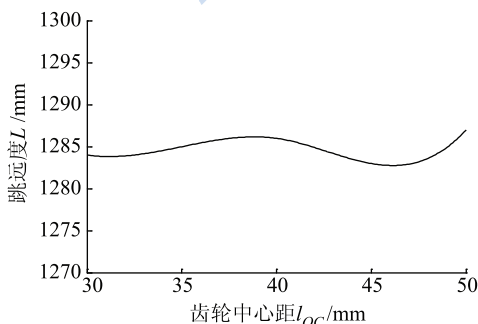


图 6  $l_{OC}$  对跳远度的影响

Fig.6 The effect of  $l_{OC}$  on jump distance

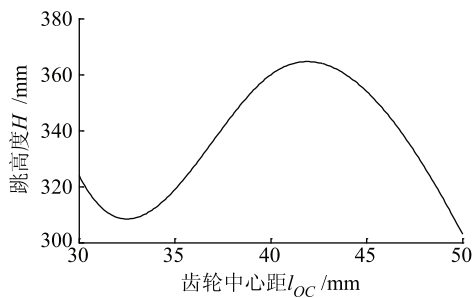


图 7  $l_{OC}$  对跳高度的影响

Fig.7 The effect of  $l_{OC}$  on jump height

从齿轮强度和结构紧凑性考虑,  $l_{OC}$  取值应在 40 mm 左右较为合理.

### 4 运动步态分析 (Gait analysis)

该仿袋鼠跳跃机器人的一个跳跃运动循环包括姿态调整、弹簧储能、起跳腾空和着地复位 4 个阶段. 在各阶段, 只对初始或终止的位姿有限制要求, 因此, 在进行运动学分析时, 可将各阶段视为定点控制问题. 为了便于控制和降低工作时对电源的要求, 各电机工作为顺序动作.

#### 4.1 姿态调整阶段

在伺服电机驱动下, 大腿与躯干间的夹角  $\varphi$  (图 1 中所示) 被调整为起跳状态下的值 (减小), 以完成姿态调整. 然后, 再利用锁定/释放机构将髋关节 A 锁定.

设图 1 所示机器人机构各杆的位置参数为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  及  $\theta_5$  (均为与  $x$  轴正向夹角), 此时, 脚杆 4 与地面接触,  $\theta_4 = 0$ . 而  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  及  $\theta_5$  均与时间  $t$  有关.

由各杆组成封闭矢量图, 可得机器人的位置方程为

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_5 \cos \theta_5 = l_{OC} + l_3 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_5 \sin \theta_5 = l_3 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

设在姿态调整前, 杆 3 及 5 的初始位置参数为  $\theta_{30}$  及  $\theta_{50}$ ; 而大腿  $AB$  相对躯干  $AE$  的初始姿态参数为  $\varphi_0$ , 其相对角速度为  $\omega$ ;  $l_1$  为点 A 和点 E 之间的距离, 其初始值为  $l_{10}$ , 终值为  $l_{11}$ ; 姿态调整时间为  $T_1$ ; 杆  $BC$  在姿态调整过程中从初始位置计, 转过的角度为  $\alpha$ , 则式 (1) 中

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{10} \\ \theta_5 &= \theta_{50} + 1/r\alpha \\ \theta_1 &= \varphi_0 - \omega t + \theta_2 - \pi \quad (0 \leq t \leq T_1) \\ \theta_3 &= \theta_{30} - \alpha \end{aligned}$$

将上述4个条件等式代入(1)式,整理得:

$$\begin{cases} l_5 \cos(\theta_{50} + 1/r\alpha) - l_{10} \cos(\varphi_0 - \omega t + \theta_2) - \\ l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos(\theta_{30} - \alpha) - l_{OC} = 0 \\ l_5 \sin(\theta_{50} + 1/r\alpha) - l_{10} \sin(\varphi_0 - \omega t + \theta_2) - \\ l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin(\theta_{30} - \alpha) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

当  $t$  在 0 和  $T_1$  之间取值时, 方程组 (2) 只含  $\alpha$  和  $\theta_2$  两个未知数, 求解可得各杆与  $x$  轴正向夹角随时间的变化规律, 进而确定姿态调整过程中各杆件的位姿.

#### 4.2 弹簧储能阶段

此阶段, 伺服电机驱动丝杠—螺母并带动弹簧进行能量的储存, 设储能时间为  $T_2$ , 螺母相对丝杠的移动速度  $v = (l_{11} - l_{10})/T_2$ , 则储能过程的矢量方程可表示为

$$\begin{cases} l_5 \cos(\theta_{50} + 1/r\alpha) - (l_{10} + vt) \cos(\varphi_0 - \omega T_1 + \\ \theta_2) - l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos(\theta_{30} - \alpha) - l_{OC} = 0 \\ l_5 \sin(\theta_{50} + 1/r\alpha) - (l_{10} + vt) \sin(\varphi_0 - \omega T_1 + \\ \theta_2) - l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin(\theta_{30} - \alpha) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

同理, 当  $t$  在 0 和  $T_2$  之间取值时, 解方程组 (3),

$$F = k \left( \sqrt{(l_5 \cos \theta_5 - l_{OC} - l_3 \cos \theta_3)^2 + (l_5 \sin \theta_5 - l_3 \sin \theta_3)^2} - l_0 \right) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \delta r_1 = l_5 \delta \theta_5 \\ \delta r_2 = l_3 \delta \theta_3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta \theta_5 / \delta \theta_3 = 1/r = \dot{\theta}_5 / \dot{\theta}_3 \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_S = l_5 \cos \theta_5 + l_{ES} \cos \theta_2 \\ y_S = l_5 \sin \theta_5 + l_{ES} \sin \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} l_5 \cos \theta_5 + l_{11} \cos \theta_1 = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 + l_{OC} \\ l_5 \sin \theta_5 + l_{11} \sin \theta_1 = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\gamma_1$  及  $\gamma_2$  分别为  $F$  与虚位移  $\delta r_1$  及  $\delta r_2$  的夹角,  $x_S$  及  $y_S$  分别为躯干质心  $S$  点的坐标值, 它们均可通过式 (10) 和几何关系表达为  $\theta_3$  及  $\theta_5$  的函数;  $g$  为重力加速度;  $l_0$  为弹簧原长;  $l_{ES}$  为  $E$  点和  $S$  点间的距离.

机器人起跳瞬间,  $N = 0$ , 则由式 (5) 可得

$$\begin{cases} \ddot{y}_S = \frac{m_1 + m_2}{m_1} g \\ \ddot{x}_S = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将式 (11) 以及条件等式 (6) ~ (10) 代入式 (4), 并经整理表示为仅含  $\theta_3$  或  $\theta_5$  的非线性方程. 这样,

可得储能阶段各杆件的位姿.

#### 4.3 起跳腾空阶段

电机控制能量锁定/释放机构动作, 失去对髋关节  $A$  的锁定作用, 在弹力  $F$ 、摩擦力  $f$  和地面支反力  $N$  的作用下, 机器人实现起跳. 为了便于分析起跳条件, 这里将仿袋鼠跳跃机器人简化为双质量—非线性弹簧系统, 即假设: 不计各杆件的转动惯量, 将杆  $OE$ 、 $OD$ 、 $BC$  和  $AB$  的整体质量  $m_2$  的质心简化在踝关节  $C$  点处, 躯干质量  $m_1$  集中在质心  $S$  点处. 机器人起跳瞬间, 脚杆 4 保持水平位姿, 起跳后, 在腾空初始阶段忽略弹簧的形变, 近似地认为机器人在腾空的整个过程中位姿保持不变.

根据动力学普遍方程, 可得起跳过程的动力学方程

$$F \cdot \delta r_1 \cdot \cos \gamma_1 + F \cdot \delta r_2 \cdot \cos \gamma_2 - m_1 g \cdot \delta y_S - m_1 \ddot{x}_S \cdot \delta x_S - m_1 \ddot{y}_S \cdot \delta y_S = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} N + m_1 \ddot{y}_S - m_1 g - m_2 g = 0 \\ f - m_1 \ddot{x}_S = 0 \\ f = \mu_S N \end{cases} \quad (5)$$

式中:

在机器人起跳过程的初始和终止位姿确定的情况下, 可得整个起跳过程中各杆的位姿.

另外, 机器人的跳远度  $L$  和跳高度  $H$  可表示为

$$L = 2 \int_0^{t_{\text{off}}} \ddot{y}_S dt \cdot \int_0^{t_{\text{off}}} \ddot{x}_S dt / g \quad (12)$$

$$H = \left( \int_0^{t_{\text{off}}} \ddot{y}_S dt \right)^2 / (2g) \quad (13)$$

其中,  $t_{\text{off}}$  为起跳时间.

机器人在起跳的初始阶段, 躯干质心上移, 沿  $x$  轴和  $y$  轴的速度分量逐渐增大, 由式 (11) 可知: 起跳时, 躯干质心加速度竖直方向分量与重力加速度同向, 沿  $y$  轴方向的速度已开始减小, 而沿  $x$  轴方向的速度达到最大值. 由式 (11) ~ (13) 可知, 为实现理想的跳远度和跳高度, 质量  $m_1$  应尽量大, 而质量  $m_2$  应尽量小.

当求出起跳瞬间  $\theta_3$  及  $\theta_5$  的值后, 即可求出起跳阶段各杆角度位置参数的取值范围, 再将它们代入式 (4), 便可求得机器人对应每个位姿下的质心的加速度值  $\ddot{x}_S$  和  $\ddot{y}_S$ , 进而可求得起跳过程中躯干质心

所受的合外力  $T$  为

$$T = m_1 \cdot \sqrt{\dot{x}_S^2 + \dot{y}_S^2} \quad (14)$$

起跳过程中质心的位移  $D_S$  可由式 (9) 及 (15) 得到

$$D_S = \sqrt{x_S^2 + y_S^2} - \sqrt{x_{S0}^2 + y_{S0}^2} \quad (15)$$

式中,  $x_{S0}$  和  $y_{S0}$  分别为起跳初始位置处质心  $S$  在整体坐标系中的位置.

#### 4.4 着地复位阶段

假设机器人能够平稳着地, 不发生倾倒. 着地后, 伺服电机反转, 带动螺母向躯干质心移动, 各杆又复位至姿态调整初始状态的位姿. 在此阶段, 首先要确定  $\theta_3$  和  $\theta_5$  的初值  $\theta_{31}$  和  $\theta_{51}$ , 根据动力学普遍方程可得

$$m_1 g \cdot \delta y_S - F \cdot \delta r_1 \cdot \cos \gamma_1 - F \cdot \delta r_2 \cdot \cos \gamma_2 = 0 \quad (16)$$

将式 (6) ~ (10) 代入式 (16), 可求得机器人着地复位阶段  $\theta_3$  的初值  $\theta_{31}$  或  $\theta_5$  的初值  $\theta_{51}$ . 复位阶段  $\theta_3$  和  $\theta_5$  终值与姿态调整阶段的初始值  $\theta_{30}$ 、 $\theta_{50}$  应相同.

在复位的过程中, 整个机构的自由度为 2, 而动作电机数为 1, 并且铰接点  $B$  和  $E$  之间存在弹簧约束, 该机构为亚确定输入机构. 令  $\Delta\theta_3$  及  $\Delta\theta_5$  分别为复位阶段杆 3 和杆 5 转过的角度, 则有

$$\begin{cases} \Delta\theta_3 = \theta_{30} - \theta_{31} \\ \Delta\theta_5 = \theta_{50} - \theta_{51} \end{cases} \quad (17)$$

由于螺母导程较小, 复位调整时间  $T_3$  较长, 并且弹簧刚度较大, 弹簧的伸长量主要是由躯干的质量引起的, 伸长量较小, 同时杆 3 和杆 5 转过的角度较小, 复位最终是使各杆件调整至姿态调整阶段的初始状态位姿, 这样, 就可将杆 3 和杆 5 的角速度大小近似定义为

$$\begin{cases} \omega_3 \approx \Delta\theta_3 / T_3 \\ \omega_5 \approx \Delta\theta_5 / T_3 \end{cases} \quad (18)$$

令  $v_1 = (l_{11} - l_{10}) / T_3$  为复位过程中螺母相对丝杠的滑移速度, 当  $0 \leq t \leq T_3$  时有

$$\begin{cases} l_5 \cos \theta_5 + (l_{11} - v_1 t) \cos \theta_1 = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 + l_{OC} \\ l_5 \sin \theta_5 + (l_{11} - v_1 t) \sin \theta_1 = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (19)$$

式 (19) 中的  $\theta_3$  和  $\theta_5$  可由下式求出

$$\begin{cases} \theta_3 = \theta_{31} + \omega_3 t \\ \theta_5 = \theta_{51} + \omega_5 t \end{cases} \quad (20)$$

当复位时间  $t$  在 0 和  $T_3$  之间取值时, 由式 (17) ~ (20) 可求出  $\theta_1$  及  $\theta_2$ , 进而可求得复位阶段整个过程中各杆件的位姿.

## 5 仿真及实验 (Simulation and experiment)

本文设计制作了仿袋鼠跳跃机器人原理样机, 如图 8 所示.

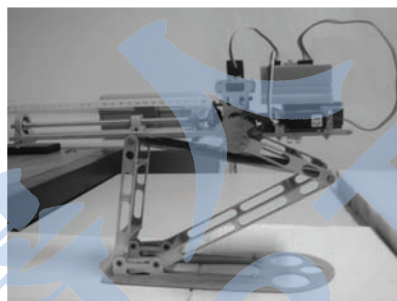


图 8 机器人静态照片

Fig.8 Static photo of robot

该样机在材料上主要采用硬铝, 其相关的结构参数为:  $l_{10} = 100$  mm,  $l_{11} = 225$  mm,  $l_2 = 100$  mm,  $l_3 = 200$  mm,  $l_{CD} = 180$  mm,  $l_{OC} = 40$  mm,  $l_5 = 130$  mm,  $l_0 = 192$  mm,  $l_{AS} = 50$  mm.

初始状态时,  $E$  点距躯干左端点的距离  $l_1 = 143$  mm,  $r = 7/33$ ,  $m_1 = 1.09$  kg,  $m_2 = 0.205$  kg,  $k = 0.53$  N/mm, 相关的时间及状态参数为:  $T_1 = 3.8$  s,  $T_2 = T_3 = 25$  s,  $\omega = 5^\circ/\text{s}$ ,  $\varphi_0 = 32.4^\circ$ ,  $\theta_{50} = 75^\circ$ ,  $\theta_{30} = 25^\circ$ .

根据第 4 节对各阶段的步态分析, 分别计算出各个阶段机器人的运动步态, 再将各阶段的运动步态连贯在一起便可得到机器人在一个跳跃运动循环过程中的运动步态示意图, 如图 9 所示.

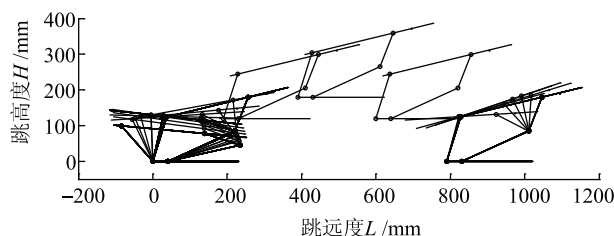


图 9 机器人跳跃运动步态示意图

Fig.9 The gait schematic of robot hopping motion

由式 (14), 可计算出机器人起跳过程中躯干所受的合外力  $T$  随躯干质心位移  $D_S$  变化的情况, 如图 10 所示. 从图中可看出, 机器人质心受力为非线性的. 这一特性较符合生物体起跳过程中质心的受力特性, 并且能够较好地改善机构的受力状况, 提高了机构的弹跳性能 [7].

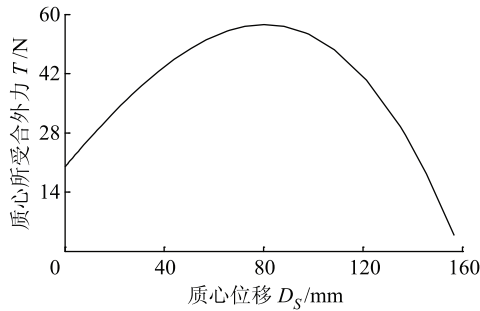


图10 位移—力曲线

Fig.10 Displacement-force curve

利用该样机进行机器人弹跳实验,实验照片如图11所示.其中左图为机器人腾空上升过程中的某一位姿,而右图为机器人在最高点附近的位姿,将图9和图11对比可知,由于分析腾空阶段时将机器人简化为分布在质心 $S$ 和脚部 $C$ 点处的两个集中质量,忽略了各杆的转动惯量,进而假设腾空过程中角 $\theta_4$ 的值为0.虽然腾空实验过程中,脚杆与 $x$ 轴正向夹角不为0,但实验中两质点 $S$ 和 $C$ 的运动轨迹与仿真计算分析结果基本吻合.

通过样机实验,检测得到机器人跳高度 $H$ 约为140 mm,跳远度 $L$ 约为700 mm,而由图9可知, $H$ 和 $L$ 的计算仿真结果分别为193 mm和790 mm.实验与仿真存在差异是由于仿真过程中对模型进行了简化,脚与接触物体间的摩擦、结构阻尼以及样机在加工和装配过程中存在的误差增加了运动副间的摩擦所引起的.



图11 机器人弹跳实验照片

Fig.11 Experimental photos of robot hopping

## 6 结论 (Conclusion)

针对行星表面巡游探测机器人的技术问题,基于袋鼠跳跃运动机理和机构运动及力变换特性,提出一种基于可调杆长的齿轮—五杆组合机构仿袋鼠间歇式弹跳机器人机构模型,并对其运动步态进行了分析.可得出以下结论:

1) 提出基于可调杆长的齿轮—五杆组合机构的仿袋鼠跳跃机器人机构,仿真分析和实验表明该机构具有较好的力学和运动仿生特性,验证了弹跳机构的可行性.

2) 通过控制螺母与丝杠的相对运动,不仅有效解决了机器人弹跳能量的积蓄和可调问题,而且实现了对躯干杆有效长度的可调性,进而可实现跳跃姿态的调节和跳跃运动步态及轨迹的可控.

3) 可调齿轮—五杆组合机构的结构参数对机器人的跳跃性能和步态有较大的影响,在对机器人增加倾倒复位机构后,结合动力学分析,可对齿轮—五杆组合机构进行优化和完善.

## 参考文献 (References)

- [1] Dawson T J, Taylor C R. Energetic cost of locomotion in kangaroos[J]. Nature, 1973, 246(5431): 313-314.
- [2] 陈东良, 吴磊, 王立权, 等. 仿生蝗虫跳跃机器人: 中国, 101058036A[P]. 2007-10-24.  
Chen Dongliang, Wu Lei, Wang Liquan, et al. Bionic locust hopping robot: China, 101058036A[P]. 2007-10-24.
- [3] 余杭杞. 仿蝗虫四足跳跃机器人的机构设计和运动性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
Yu Hangqi. Design and locomotion analysis on the locust-like quadruped jumping robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [4] Hale E, Schara N, Burdick J, et al. A minimally actuated hopping rover for exploration of celestial bodies[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 420-427.
- [5] 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(3): 22-26.  
Ge Wenjie, Shen Yunwen, Yang Fang. Hopping gait kinematics for bionic kangaroo-hopping robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 22-26.
- [6] 高海波, 张鹏, 邓宗全, 等. 新型八轮月球车悬架的研制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 85-92.  
Gao Haibo, Zhang Peng, Deng Zongquan, et al. Development of suspension frame of new eight-wheel lunar rover[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 85-92.
- [7] Fiorini P, Burdick J. The development of hopping capabilities for small robots[J]. Autonomous Robots, 2003, 14(2/3): 239-254.

## 作者简介:

柴 辉 (1984-), 男, 博士生. 研究领域: 仿生机器人, 计算机辅助设计.

李建华 (1955-), 男, 副教授, 硕士生导师. 研究领域: 机电产品智能数字化设计.

葛文杰 (1956-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 仿生机构学, 机械动力学及计算机辅助设计.