

doi: 10.7690/bgzdh.2019.03.018

# 六足机器人爬楼步态与仿真

熊一帆, 曹维清, 周克栋

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为提高六足机器人对楼梯障碍物的适应能力, 设计一种半圆型腿式的六足机器人。根据机器人的结构特点, 规划了六足机器人爬楼梯中的四足步态。基于步态规划, 分析和建立了四足步态的运动学模型。通过对各条腿的支撑相角度和摆动相角度的调整, 用 ADAMS 软件对机器人进行了动态仿真。仿真结果表明: 六足机器人结构设计合理, 在四足步态下能实现连续爬楼梯, 且机器人的机体质心位移曲线在时间上连续光滑, 验证了运动学模型的有效性。

**关键词:** 六足机器人; 步态规划; 运动分析; 仿真

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Gait Planning and Analysis of 6 Legged Robot in Stair Climbing

Xiong Yifan, Cao Chuqing, Zhou Kedong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the adaptability of the 6 legged robot to the staircase obstacles, a semicircular leg type 6 legged robot is designed. According to the structure characteristics of the robot, the 4 legged gait of the 6 legged robot climbing staircase is planned. Based on gait planning, the kinematic model of quadruped gait is analyzed and established. By adjusting the rotation angle and swing angle of each leg, the dynamic simulation of the robot is carried out with ADAMS software. The simulation results show that the structure design of the 6 legged robot is reasonable, the quadruped gait with climbing stairs can achieve continuous climbing stairs, and the centroid displacement curve of the robot continually keep smoothly as time goes by, which validates the validity of the kinematics model.

**Keywords:** 6 legged robot; gait planning; dynamics analysis; simulation

### 0 引言

近年来, 足式机器人的研究得到了越来越多的关注和热捧。由于其具有良好的越障能力和适应能力, 多足机器人在军事侦查、火星探测和灾难救援等领域被广泛应用。目前, 国内外对足式或混合式机器人在不平坦地形的越障能力和适应能力的研究较多, 对机器人爬楼梯的研究较少。关于爬楼机器人的研究大多采用足式<sup>[1-2]</sup>、腿履复合<sup>[3]</sup>或者轮腿复合<sup>[4-5]</sup>结构, 存在结构比较复杂、适应能力不强、灵活性和机动性比较差等缺点。为实现多足机器人稳定高效地爬楼梯功能, 笔者设计一种新型的爬越楼梯的六足机器人, 并对爬楼步态进行了仿真分析。

### 1 六足机器人结构设计

笔者设计的六足机器人如图 1 所示。该机器人主要由六条半圆形足和一个扁平狭长的机身外壳组成。机器人机身里面装有 6 个伺服电机、控制器、各类传感器构成控制系统。机身里面的电机、控制

器、传感器都均匀分布, 保证六足机器人重心位于中间靠近前足位置。半圆形腿采用具有一定柔性的铝合金材料, 外侧贴附橡胶防滑。如图 2, 六足机器人整体结构尺寸: 机身长 510 mm、宽 200 mm、高 80 mm; 半圆弧腿半径 80 mm、厚度 3 mm, 宽度 20 mm。此外, 六足分为前、中、后腿各 2 条, 均匀分布机身两侧; 腿的转动轴距机身下底面为 30 mm 距上顶面为 50 mm (防止六足机器人爬楼梯时下底面不接触碰撞到楼梯边缘); 为了避免半圆弧腿运动时发生干涉, 中间腿较前后腿向外突出 30 mm; 且前后腿轴心相距 450 mm。

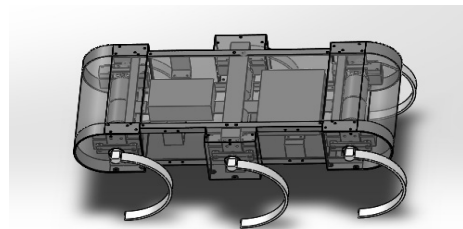


图 1 六足机器人结构设计

收稿日期: 2018-11-03; 修回日期: 2018-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61503186); 机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLRS2016KF09)

作者简介: 熊一帆(1993—), 男, 湖北人, 硕士, 从事智能机器人研究。

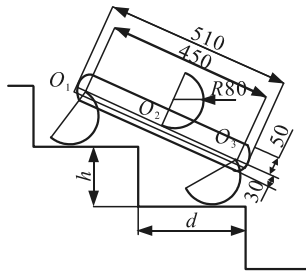


图 2 六足机器人尺寸参数

## 2 爬楼梯步态规划

六足机器人常见步态有三足步态、四足步态和波动步态<sup>[6]</sup>。针对爬楼环境对速度和稳定性的要求，笔者选择四足步态。

### 2.1 步态参数设置

在六足机器人运动中，腿的运动状态可以分为支撑相和摆动相 2 种。支撑相是腿与地面接触的状态。摆动相是腿离开地面，处于空转时的状态。当腿从支撑相进入摆动相时，或当腿从摆动相进入支撑相时，这种临界状态称为极限位置。

在机器人步态分析中，对于各类步态参数<sup>[7]</sup>都有相关的数学定义。为了便于阐述，对步态参数进行描述如下：

1) 支撑角  $\varphi_z$ 、支撑角速度  $\omega_z$ 、支撑时间  $t_z$ ：一个周期内，腿在支撑相上，驱动轴转动角度为支撑角  $\varphi_z$ ；驱动轴转动角速度为支撑角速度  $\omega_z$ ；腿处于支撑相的时间为支撑时间  $t_z$ ；

2) 摆动角  $\varphi_b$ 、摆动角速度  $\omega_b$ 、摆动时间  $t_b$ ：一个周期内，腿在摆动相上，驱动轴转动角度称为摆动角度  $\varphi_b$ ，驱动轴转动的角速度为摆动角速度  $\omega_b$ ，腿处于摆动相的时间为摆动时间  $t_b$ ；

3) 周期  $T$ 、占地系数  $\beta$ ：驱动轴转动一周的时间  $T$  称为周期；支撑时间与周期  $T$  的比值称为占地系数，即  $\beta = \frac{t_z}{T} = 1 - \frac{t_b}{T}$ ；

4) 稳定系数  $\delta$ ：机器人行进过程中处于支撑状态的腿平均个数称为稳定系数  $\delta$ ，假设机器人的腿总数为  $N$ ，则  $\delta = N\beta$ 。

对于不同步态，稳定系数和平均速度不同，出于速度、灵活性和稳定性的考虑，六足机器人在爬楼梯时采用四足步态，腿着地构成矩形， $\delta = 4$  稳定性和移动速度都处于良好。

### 2.2 爬楼梯四足步态规划

爬楼梯时，四足步态将六条腿分为 3 组：前面

两足 ( $L_1$ 、 $R_1$ )、中间两足 ( $L_2$ 、 $R_2$ )、后面两足 ( $L_3$ 、 $R_3$ )。每组的两条腿运动相位一样。如图 3 所示，六足机器人爬楼梯上的四足步态的步骤：

1) 机器人处于初始状态时，假设机器人后足刚好与楼梯接触，中间足刚要离开，前足处于支撑相中间某位置(如图 3(a)所示)。此时三足都与楼梯台阶接触，设这时刻为爬楼梯的第 1 种极限位置。

2) 机器人六条腿继续逆时针转动，后足进入支撑相，与前足支撑起机器人，中间足离开台阶表面进入摆动相(如图 3(b)所示)。

3) 前足刚要离开台阶表面，中间足刚好接触楼梯，后足处于支撑相中间某位置(如图 3(c)所示)，设此时刻为第 2 种极限位置。

4) 中间足进入支撑相，与后足支撑起机器人，前足进入摆动相(如图 3(d)所示)。

5) 机器人后足刚要离开台阶，前足转完摆动相刚好接触台阶，中间足转动到支撑相中间某位置(如图 3(e)所示)，设此时为第 3 种极限位置。

6) 前足进入支撑相，与中间足支撑起机器人，后足进入摆动相(如图 3(f)所示)。

7) 机器人回到图 3(a)所示状态，这样从 (a)→(b)→(c)→(d)→(e)→(f)→(a) 为爬楼梯四足步态的一个周期。

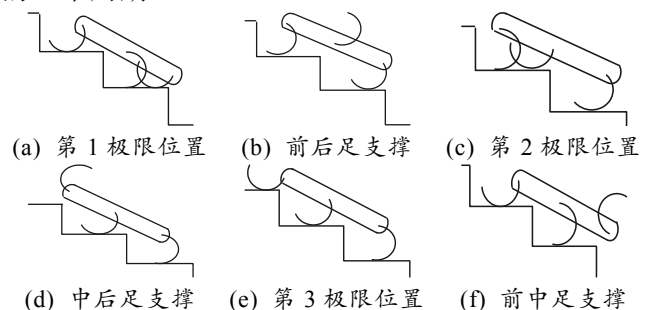


图 3 六足机器人爬楼梯的四足步态

六足机器人按照上述步骤，3 组足依次进行相位变化，每完成一个周期运动，六足机器人整体前进一个台阶。在爬楼梯的四足步态中，任意时刻至少有 4 条腿处于支撑相，占空比为 1/3，占地系数为 2/3，稳定系数为 4，机器人爬楼梯的四足步态各足相位<sup>[8]</sup>如图 4。其中：粗实线表示支撑相，空白处表示摆动相。

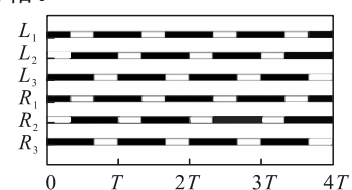


图 4 爬楼梯四足步态各足相位

### 3 爬楼梯步态的运动分析

根据上述步态分析，六足机器人爬楼的四足步态有 3 个极限位置(即腿支撑相和摆动相切换)：前足开始进入支撑相，中间足刚好进入摆动相；中间足开始进入支撑相，后足刚好进入摆动相；后足开始进入支撑相，前足刚好进入摆动相。机器人在爬楼运动中，实际上是在 3 个极限位置状态的相互转化过程，所以分别以 3 个极限位置建立数学模型，求出各状态下的相关参数。

如图 5 所示，第 1 种极限位置运动状态，中间足正好直立，离开楼梯台阶面进入摆动相，后足刚好上台阶进入支撑相。设后足进入支撑相时，与地面接触的点  $P_1$  到台阶边缘的距离为  $b_3$ ，支撑相角度为  $\theta_3$ ，六足机器人  $O_1$  到  $O_3$  ( $O_3'$  为半圆后足的圆心) 的距离为  $L$ ，半圆腿半径为  $R$  台阶高度为  $h$ ，台阶深度为  $d$ 。设  $\angle O_3 O_3' P = \psi_3$ ，后足轴心  $O_3$  到台阶地面的距离为  $j$ ， $O_3$  到  $O_3' P_3$  的距离为  $e_3$ ，此时机器人倾斜角度为  $\gamma$ ， $O_1 O_3$  在水平方向和垂直方向的投影分别为  $n$ 、 $m$ ， $O_3' O_3$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi_3$ 。

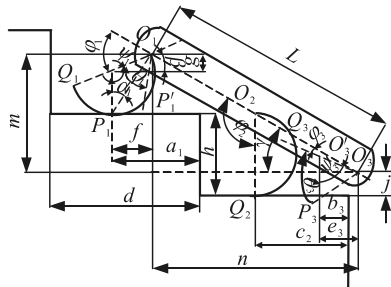


图 5 第 1 种极限位置运动状态

图中的尺寸关系有：

$$\left. \begin{aligned} \psi_3 &= \pi - 2\theta_3 \\ j &= R + R\cos 2\theta_3 \\ e_3 &= R\sin 2\theta_3 \\ \sin\gamma &= \frac{2R - 2R\cos 2\theta_3}{L} \\ m &= 2R - 2R\cos 2\theta_3 \\ n &= \sqrt{L^2 - (2R - 2R\cos 2\theta_3)^2} \\ \varphi_3 &= \arcsin \frac{2R - 2R\cos 2\theta_3}{L} + \frac{\pi}{2} - 2\theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

设此时刻前足轴心  $O_1$  垂直距离前足的圆心  $O_1'$  为  $g$ ，前足轴心  $O_1$  水平距离圆心  $O_1'$  为  $f$ ， $\angle O_1 O_1' B = \beta_1$ 、 $\angle O_1 O_1' P = \psi_1$ 、 $\angle O_1' O_1 P = \alpha_1$ 、 $O_1' O_1$  与

$O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi_1$ 。此时前足与楼梯接触点为  $P_1$ ， $P_1$  距楼梯边缘为  $a_1$ 。

图中尺寸关系有：

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \arcsin \frac{2R - R\cos 2\theta_3 - h}{R} \\ \psi_1 &= \arcsin \frac{2R - R\cos 2\theta_3 - h}{R} + \frac{\pi}{2} \\ \alpha_1 &= \frac{\pi}{4} - \frac{\arcsin \frac{2R - R\cos 2\theta_3 - h}{R}}{2} \\ f &= \sin 2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\arcsin \frac{2R - R\cos 2\theta_3 - h}{R}}{2} \right) R \\ a_1 &= \sqrt{L^2 - (2R - 2R\cos 2\theta_3)^2} - \sin 2\theta_3 R - b_3 + \\ &\quad \sin 2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\arcsin \frac{2R - R\cos 2\theta_3 - h}{R}}{2} \right) R - d \\ \varphi_1 &= \arcsin \frac{2R - R\cos 2\theta_3 - h}{R} + \\ &\quad \arcsin \frac{2R - 2R\cos 2\theta_3}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

此时中间足正好直立，设与楼梯接触点为末端点  $Q_2$ ，接触点  $Q_2$  到楼梯边缘的距离为  $c_2$ 。 $O_2' O_2$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi_2$ 。

图中尺寸关系有：

$$\left. \begin{aligned} c_2 &= \frac{1}{2} \sqrt{L^2 - (2R - 2R\cos 2\theta_3)^2} + \\ &\quad b_3 - \sin 2\theta_3 R \\ \varphi_2 &= \arcsin \frac{2R - 2R\cos 2\theta_3 - h}{R} + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

如图 6 所示，第 2 种极限位置运动状态，中间足刚好摆动相结束，进入支撑相，前足刚好支撑相结束，离开楼梯进入摆动相。

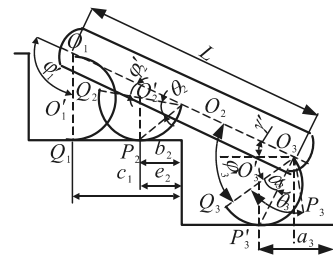


图 6 第 2 种极限位置运动状态

以后足为研究对象，设后足与台阶接触点为

$P'_3$ ,  $P'_3$  到台阶边缘的距离为  $a_3$ , 此时六足机器人倾斜角为  $\gamma'$ ,  $\angle Q_3 O_3 P'_3 = \alpha_3$ ,  $O'_3 O_3$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi'_3$ 。

图中尺寸关系有:

$$\left. \begin{aligned} a_3 - b_3 &= 2(\theta_3 - \alpha_3)R \\ L \cos \gamma' &= c_1 + d - a_3 + R \cos \left( \pi - \frac{\pi}{2} - 2\alpha_3 \right) \\ L \sin \gamma' &= 2R + h - R - R \cos 2\alpha_3 \\ \varphi'_3 &= \gamma' + \frac{\pi}{2} - \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由上式可以求得  $\gamma'$ 、 $a_3$ 、 $\alpha_3$ 、 $\varphi'_3$ 。

以中间足为研究对象, 设中间足与楼梯刚接触的点为  $P_2$ ,  $P_2$  到台阶边缘的距离为  $b_2$ , 此时中间足圆心到驱动轴心  $O_2$  的距离为  $e_2$ 。中间足的摆动相角度为  $\theta_2$ ,  $O'_2 O_2$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi'_2$ 。

图中尺寸关系有:

$$\left. \begin{aligned} c_2 - b_2 &= \theta_2 \cdot 2R \\ e_2 &= R \cdot \sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} L \cos \gamma' &= c_1 + (e_2 - b_2) \\ c_1 &= a_1 + 2R\alpha_1 + R \sin 2\theta_2 \\ \varphi'_2 &= \gamma' - \left( \frac{\pi}{2} - (\pi - 2\theta_2) \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由上式可以求得:  $b_2$ 、 $e_2$ 、 $\theta_2$ 、 $\varphi'_2$ 。

以前足为研究对象, 前足  $O'_1 O_1$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角

$$\varphi'_1 = \gamma' + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

如图 7 所示第 3 种极限位置运动状态, 前足刚好摆动相结束, 进入支撑相, 后足刚好支撑相结束, 离开楼梯进入摆动相。

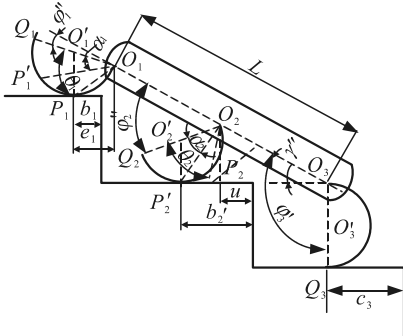


图 7 第 3 种极限位置运动状态

以前足为研究对象, 设此时刻机器人倾斜角为

$\gamma''$ , 前足支撑相角度为  $\theta_1$ , 接触点  $P_1$  到台阶边缘的距离为  $b_1$ , 前足的圆心  $O'_1$  到驱动轴心的水平距离为  $e_1$ , 前足  $O'_1 O_1$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi''_1$ , 且直立后足  $O_3 O'_3$  到台阶边缘的距离为  $c_3$ 。机器人从第 3 极限位置变动到第 1 极限位置, 前腿转过的弧长

$$L_{RR'} = a_1 - b_1 = 2(\theta_1 - \alpha_1) \quad (7)$$

图中尺寸关系有:

$$\left. \begin{aligned} c_3 &= b_3 + 2R\theta_3 \\ e_1 &= \sin 2\theta_1 R \\ L \cos \gamma'' &= d - c_3 + d - e_1 + b_1 \\ L \sin \gamma'' &= R + \cos 2\theta_1 R + 2h - 2R \\ \varphi''_1 &= \gamma'' - \left( 2\theta_1 - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式(7)、(8)求得:  $\gamma''$ 、 $\theta_1$ 、 $b_1$ 、 $e_1$ 、 $c_3$ 、 $\varphi''_1$ 。

以中间腿为研究对象, 此时刻中间足与台阶的接触点为  $P'_2$ , 到台阶边缘的距离为  $b'_2$ , 驱动轴心  $O_1$  到台阶边缘的距离为  $u$ ,  $\angle Q_2 O_2 P'_2 = \alpha_2$ , 中间足  $O'_2 O_2$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角为  $\varphi''_2$ 。

图中尺寸关系有:

$$\left. \begin{aligned} c_2 - b'_2 &= 2\alpha_2 R \\ b'_2 &= u + \cos \left( \frac{\pi}{2} - 2\alpha_2 \right) R \\ \frac{1}{2} L \cos \gamma'' - (d - c_3) &= u \\ \varphi''_2 &= \gamma'' + \frac{\pi}{2} - 2\alpha_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由上式求得  $b'_2$ 、 $u$ 、 $\alpha_2$ 、 $\varphi''_2$ 。

以后足为研究对象, 前足  $O'_3 O_3$  与  $O_1 O_3$  所在直线的夹角

$$\varphi''_3 = \gamma'' + \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

根据步态分析, 六足机器人爬楼梯的四足步态成周期运动, 从第 1 种极限位置状态到第 2 种极限位置状态再到第 3 种极限位置状态, 最后再回到第 1 种极限位置状态。假设机器人做周期性运动, 每次每条足相对于每个台阶接触的位置相同。假设机器人爬楼初始状态为第一极限位置, 其中后足与台阶接触点  $P_3$  为已知量(即  $b_3$ 、 $\theta_3$  已知)。又因为机器人基本尺寸  $R$ 、 $L$  已知, 则可求得 3 种极限位置各个足所对应的角度位置与台阶高度  $h$  和深度  $d$  之间

的相对关系，即在前、中、后各足各状态下的角度位置： $\varphi_1$ 、 $\varphi_1'$ 、 $\varphi_1''$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_2'$ 、 $\varphi_2''$ 、 $\varphi_3$ 、 $\varphi_3'$ 、 $\varphi_3''$  与  $h$ 、 $d$  之间的相对关系。

#### 4 爬楼梯四足步态仿真分析

根据前面的运动建模分析，对于不同尺寸的楼梯，机器人可以通过改变爬楼的支撑相角度与楼梯相协调<sup>[9]</sup>。本次仿真实验取最常见的楼梯，台阶深度 280 mm、高 160 mm、倾斜角度 29.7°。根据前面的运动分析，可以得到机器人一个周期内在各个时间段各腿支撑角、摆动角、支撑角速度、摆动角速度、支撑时间、摆动时间。假设从第 1 种极限位置运动到第 2 种极限位置所用时间为  $t_0$ ，前腿处于支撑相，支撑时间  $t_{z1} = t_0$ ，支撑角度  $\varphi_{z1} = \varphi_1' - \varphi_1$ ，

支撑角速度  $\omega_{z1} = \frac{\varphi_1' - \varphi_1}{t_0}$ ；中间腿处于摆动相，摆动时

间  $t_{b2} = t_0$ ，摆动角度  $\varphi_{b2} = 2\pi + \varphi_2' - \varphi_2$ ，摆动角速度  $\omega_{b2} = \frac{2\pi + \varphi_2' - \varphi_2}{t_0}$ ；后腿处于支撑相，支撑时间

$t_{z3} = t_0$ ，支撑角度  $\varphi_{z3} = \varphi_3' - \varphi_3$ ，支撑角速度  $\omega_{z3} = \frac{\varphi_3' - \varphi_3}{t_0}$ 。假设从第 2 种极限位置到第 3 种极限

位置所用时间为  $t_1$ ，前腿处于摆动相，摆动时间  $t_{b1}' = t_1$ ，摆动角度  $\varphi_{b1}' = 2\pi + \varphi_1'' - \varphi_1'$ ，摆动角速度  $\omega_{b1}' = \frac{2\pi + \varphi_1'' - \varphi_1'}{t_0}$ ；中间腿处于支撑相，支撑时间

$t_{z2}' = t_1$ ，支撑角度  $\varphi_{z2}' = \varphi_2'' - \varphi_2'$ ，支撑角速度  $\omega_{z2}' = \frac{\varphi_2'' - \varphi_2'}{t_0}$ ；后腿处于支撑相，支撑时间  $t_{z3}' = t_1$ ，

支撑角度  $\varphi_{z3}' = \varphi_3'' - \varphi_3'$ ，支撑角速度  $\omega_{z3}' = \frac{\varphi_3'' - \varphi_3'}{t_0}$ ；

假设从第 3 种极限位置到第 1 种极限位置所用时间为  $t_2$ ，前腿处于支撑相，支撑时间  $t_{z1}'' = t_2$ ，支撑角度  $\varphi_{z1}'' = \varphi_1 - \varphi_1''$ ，支撑角速度  $\omega_{z1}'' = \frac{\varphi_1 - \varphi_1''}{t_2}$ ；中间腿

处于支撑相，支撑时间  $t_{z2}'' = t_2$ ，支撑角度  $\varphi_{z2}'' = \varphi_2 - \varphi_2''$ ，支撑角速度  $\omega_{z2}'' = \frac{\varphi_2 - \varphi_2''}{t_2}$ ；后腿处于

摆动相，摆动时间  $t_{b3}'' = t_2$ ，摆动角度  $\varphi_{b3}'' = 2\pi + \varphi_3 - \varphi_3''$ ，摆动角速度  $\omega_{b3}'' = \frac{2\pi + \varphi_3 - \varphi_3''}{t_2}$ 。

基于 ADANMS<sup>[10]</sup>仿真结果如图 8—10 所示。

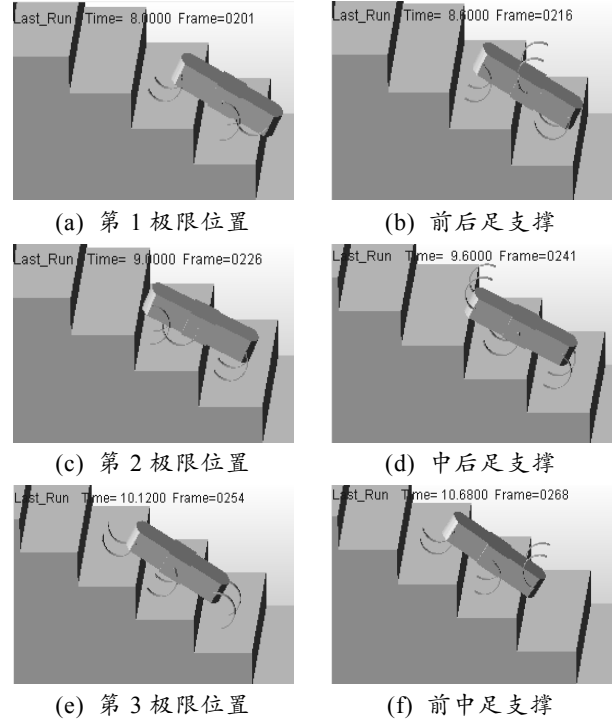


图 8 爬楼梯中四足步态运动仿真截图

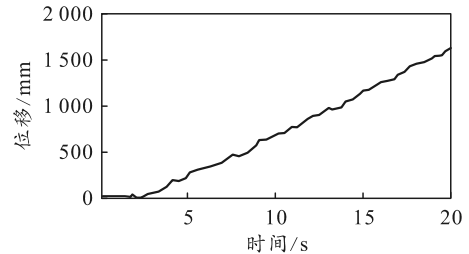


图 9 爬楼梯中四足步态机器人质心 X 向水平位移

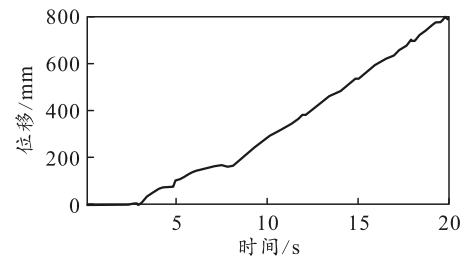


图 10 爬楼梯四足步态机器人质心 Z 向垂直位移

由图 9 和图 10 可以看出：六足机器人能较为稳定匀速地爬上楼梯，前面不规则的部分为机器人刚开始上楼梯时的步态调整。仿真实验结果表明：该六足机器人采用四足步态能爬越一般楼梯，验证了机器人设计的合理性和数学建模的有效性。

## 5 结论

笔者设计了一种半圆形腿的六足机器人，对该机器人爬楼梯的四足步态进行步态规划和运动建模，并通过 ADAMS 进行仿真实验。实验结果证明了六足机器人结构设计的合理性、运动分析的准确性和爬楼梯的四足步态的可行性，为进一步研制物理样机和爬楼的控制算法提供了理论依据。

### 参考文献：

- [1] HERBERT S D, DRENNER A, PAPANIKOLOPOULOS N. Loper: A quadruped-hybrid stair climbing robot[Z]. 2008: 799-804.
- [2] MOORE E Z, CAMPBELL D, GRIMMINGER F, et al. Reliable stair climbing in the simple hexapod 'RHex'[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA. IEEE, 2002: 2222-2227.
- [3] VU Q H, KIM B S, SONG J B. Autonomous stair climbing algorithm for a small four-tracked robot[C]//

\*\*\*\*\*  
(上接第 70 页)

从图 9—图 11 可看出：第 14、21、28 发弹的运动规律与前两发弹类似，对应的速度和位移在不同时刻都出现了较大的变化，随后又恢复平稳，表明各发弹均成功完成交接。各发弹分别在 0.381 1、0.530 5 和 0.682 3 s 进行交接。

后 3 发弹进行交接的仿真结果与通过前两发弹推算得到的交接时间数据对比如表 2 所示。

表 2 仿真结果与推算结果的时间对比 s

类别	第 <i>i</i> 发弹		
	14	21	28
仿真	0.381 1	0.530 5	0.682 3
理论推算	0.376 5	0.526 3	0.676 1
误差分析/%	0.46	0.79	0.92

从表中可看出：各发弹理论推算的交接时间均低于仿真值，这是由于仿真时弹跟中间构件会存在碰撞和摩擦，从而使弹的交接时间偏大了，但是仿真值与理论推算值之间的误差均小于 1%。等到弹鼓转到第 2 圈时，第 2 圈的第一发弹又回到了第 1 圈的第一发弹的位置（即每转一圈弹的交接误差就会消除）。

## 4 结论

笔者对弹鼓供弹装置回转部分的驱动特性进行研究，得出驱动回转部分的最大驱动力矩约为 2 335 N·m；接着对弹鼓供弹装置在恒速状态下，炮弹从

International Conference on Control, Automation and Systems. IEEE, 2008: 2356-2360.

- [4] 乔凤斌, 杨汝清. 六轮移动机器人爬楼梯能力分析[J]. 机器人, 2004, 26(4): 301-305.
- [5] 朱坚民, 李付才, 李海伟, 等. 轮腿式爬楼梯移动机器人的设计及运动特性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(20): 2722-2730.
- [6] 谭兴军. 偏心轮腿六足机器人设计与分析[D]. 重庆: 西南大学, 2011: 1-65.
- [7] 陈兴芳. 预顺腿仿生六足机器人控制系统的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2011: 1-59.
- [8] 于常娟, 张明路, 李满宏. 六足仿生机器人步态规划与足端可达空间分析[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(5): 53-55.
- [9] 孔子文, 张世武, 许昱. 六足机器人爬楼梯步态规划[J]. 机械与电子, 2014(9): 77-80.
- [10] 康玉辉. 基于虚拟样机技术的六轮腿移动机器人研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 1-60.

弹鼓到直线供弹单元的交接运动进行了仿真，得到了弹在不同时间的速度和位移曲线图。结果表明：28 发弹都能成功地交接到直线供弹单元上，并且总的交接误差不超过 1%；因此，在满载状态下，该弹鼓供弹装置能保证 392 发弹的交接过程平稳安全。该研究为后续电机选型和多数量弹的成功交接提供了一定的参考依据。

### 参考文献：

- [1] 戴劲松, 姜铁牛, 王茂森, 等. 现代小口径自动炮设计理论与方法[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011: 399.
- [2] 刘杰, 李慧, 李强. 弹鼓传动系统设计及其受力分析[J]. 机械传动, 2015, 39(2): 67-69, 83.
- [3] 王杰, 续彦芳, 毛虎平. 弹鼓式供弹系统隔板的拓扑优化研究[J]. 机械管理开发, 2014, 29(1): 58-60.
- [4] 刘志桐, 戴劲松, 王茂森. 无链供弹装置交接误差分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 85-88.
- [5] 张克猛, 张义忠. 理论力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2016: 70-71.
- [6] 濮良贵, 陈国定, 吴国立. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 322.
- [7] 张相炎. 火炮自动机设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 411-412.
- [8] DEAN C K, DONALD L M, RONALD C R. 系统动力学—机电系统的建模与仿真[M]. 4 版. 刘玉庆, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006: 36-37.