

# 液压四足机器人单腿竖直跳跃步态规划

高炳微,王思凯,高元锋

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080)

**摘要:**针对机器人跳跃运动落地时冲击力大的问题,面向竖直跳跃运动,以液压四足机器人单腿为研究对象,建立液压驱动四足机器人单腿运动学模型,并分别对机器人单腿处于起跳相、落地相和腾空相时进行轨迹规划;根据关节参数,通过运动学逆解求得驱动函数,利用仿真软件 ADAMS 进行竖直跳跃步态仿真;搭建单腿实验平台,进行实验验证,依据得到的动态特性,分析步态规划的准确性及合理性,为后续液压四足机器人动步态的研究提供设计和控制依据。

**关键词:** 液压四足机器人;单腿;跳跃步态;运动学分析;轨迹规划

中图分类号: TH137 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 99

## Single leg vertical hopping gait planning for hydraulic quadruped robot

Gao Bingwei, Wang Sikai, Gao Yuanfeng

(School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large impact force when the robot falls to the ground in jumping motion, in this paper facing to the vertical jumping movement, taking hydraulic quadruped robot single leg as research object, the single leg motion kinematics model of the hydraulic quadruped robot is established, and the trajectory planning when the single leg of the robot is in take-off phase, flight phase and falling phase is carried out. According to the joint parameters, the driving function is obtained through inverse kinematics solution, and the simulation software ADAMS is used to simulate the vertical hopping gait. The experiment platform for single leg was set up and experiment verification was carried out. According to the obtained dynamic characteristics, the accuracy and rationality of gait planning are analyzed, which provides the design and control basis for the following study of the dynamic gait of hydraulic quadruped robot.

**Keywords:** hydraulic quadruped robot; single leg; hopping gait; kinetics analysis; trajectory planning

## 1 引言

液压四足机器人具有四足动物高灵活性、高适应性和高动态性等特有的品质,能够适应多种复杂环境。因此,液压四足机器人因其优良的综合性能成为当前人们研究的主要对象<sup>[1]</sup>。

机器人机动性、动态性的优劣则取决于对其动步态的规划,跳跃步态作为最为典型的一种动步态,对其进行深入研究无疑具有很重要的意义。国内外众多国家对液压四足机器人单腿跳跃步态展开了相关研究,并相继研发出多台物理样机<sup>[2]</sup>。Marc H. R.<sup>[3]</sup>于1986年研究了

单足机器人的动步态,并提出了基于弹簧负载倒立摆模型的简单实用的三分控制方法,即把机器人的状态划分为跳跃状态、前进运动状态和姿态调整状态3个部分,并分别进行了控制,取得了很好的效果,实现了平坦地形和斜坡地形下的对角步态行走;Singh S. P. N. 等人<sup>[4]</sup>设计了基于椭圆轨迹的四足机器人足端轨迹,实现了四足机器人的跳跃步态;Sorokin S. V. 等人<sup>[5]</sup>通过对髋关节力矩的控制实现了对单腿机器人的 Bound 步态控制;Kim H 等人<sup>[6]</sup>建立了平面五连杆模型,使用反演控制法实现了欠驱动四足机器人单腿 Bound 步态的仿真。

在此背景下,我国也提出了研发液压四足仿生机器人的科技计划,山东大学的孟健等人<sup>[7]</sup>针对控制四足机

机器人的奔跑问题,提出了一种基于跳跃步态的奔跑控制方法,通过腿部的快速小幅度摆动实现四足机器人的跳跃运动,最终通过仿真和实验验证,证实了该方法的有效性和正确性;华中科技大学的钟剑锋等人<sup>[8]</sup>针对跳跃运动冲击大的特点,基于仿生学设计了一种液压驱动四足机器人单腿结构,提出了基于3次曲线轨迹跟踪的跳跃方法,并进行了MATLAB和ADAMS的联合仿真研究,验证了此种跳跃方法的有效性;西北工业大学的张雪峰等人<sup>[9]</sup>针对四足机器人在非结构环境下的高速、高机动性的要求,提出了一种液压驱动的单腿结构模式,并采用PD迭代学习控制算法对机器人腿部关节进行了轨迹跟踪控制,实现了机器人单腿的周期性跳跃。这些研究推动了我国四足机器人的快速发展。但是,国内四足机器人在负载能力、环境适应性、步态行走及抗冲击等方面还有很大的不足<sup>[10]</sup>。因此,我国需要尽快开展相关研究工作,在相关理论和关键技术方面有所突破<sup>[11]</sup>。

由于四足机器人各条腿结构相同,在研制过程中,往往事先设计出一条腿来进行实验测试。单腿跳跃与四足prank步态类似,实现单腿跳跃运动有助于获得一些实测参数,优化四足机器人腿部机械结构,是研究四足机器人复杂运动的必备前提,对其整体控制也有一定的参考价值<sup>[12]</sup>。

因此,本文以液压四足机器人单腿为研究对象,基于单腿模型进行了正运动学的推导和逆运动学的求解,并对单腿跳跃步态进行了轨迹规划。同时通过ADAMS对机器人的跳跃步态进行了仿真分析。并搭建机器人单腿实验平台,对跳跃步态进行实验验证。为后续高性能液压驱动四足机器人的步态规划及控制提供了一定的方法和理论指导。

## 2 机器人单腿运动学建模

### 2.1 单腿D-H坐标系建立

采用D-H法对液压驱动四足机器人单腿进行运动学分析,其建立的单腿D-H坐标系如图1所示。

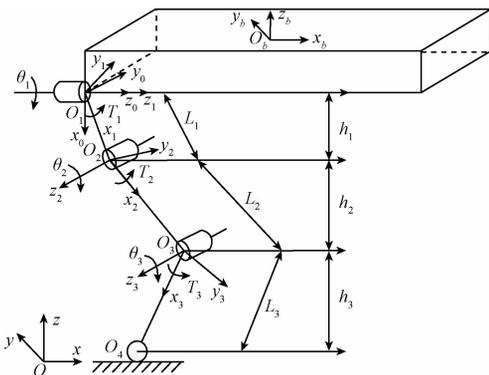


图1 单腿运动学模型

Fig.1 Single leg kinematics model

在图1的单腿D-H坐标系中,腿部相邻坐标系间的关系定义如下:

- 1) 关节转角  $\theta_i$  是相邻两关节轴线间的夹角,即相邻两坐标系  $X$  轴之间的转角;
- 2) 连杆长度  $L_i$  是相邻两关节轴线之间的距离,即从  $Z_{i-1}$  到  $X_i$  的交点沿  $X_i$  轴到第  $i$  坐标系的原点所偏置的距离;
- 3) 连杆扭角  $\alpha_i$  是相邻两关节公垂线间的夹角,即  $Z_{i-1}$  与  $Z_i$  间的转角。
- 4) 连杆距离  $d_i$  是  $Z_{i-1}$  与  $Z_i$  间的距离,即从第  $i-1$  坐标系的原点沿  $Z_{i-1}$  轴到  $Z_{i-1}$  轴和  $X_i$  轴交点的距离。

### 2.2 单腿正运动学建模

四足机器人单腿正运动学就是根据腿部关节转角和结构参数,求出足端坐标系相对于机体坐标系的位姿及相互间变换矩阵<sup>[13]</sup>。

通过足端和机体之间相邻坐标系变换矩阵相乘可得出足端坐标系相对于机体坐标系的变换矩阵,即:

$${}^A T_D = {}^A T_B \cdot {}^B T_C \cdot {}^C T_D \quad (1)$$

横摆关节坐标系  $\{O_0\}$  相对于机体质心坐标系  $\{O_b\}$  的变换矩阵如下所示:

$${}^b T_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -a \\ 0 & 1 & 0 & -b \\ -1 & 0 & 0 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $2a$ 、 $2b$  及  $2c$  分别表示躯干的长宽高。

根据所建模型结构参数及转换关系可知坐标系  $\{O_1\}$  相对于坐标系  $\{O_0\}$ ,经过了绕  $Z$  轴转动  $\theta_1$  角,转换矩阵如下:

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

髋关节坐标系  $\{O_2\}$  相对于横摆关节坐标系  $\{O_1\}$ ,经过了绕  $Y$  轴转动  $\theta_2$  角,然后沿  $X$  轴平移  $L_1$ ,转换矩阵如下:

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 1 & L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

膝关节坐标系  $\{O_3\}$  相对于髋关节坐标系  $\{O_2\}$ ,经过了绕  $Z$  轴转动  $\theta_3$  角,然后沿  $X$  轴平移  $L_2$ ,转换矩阵如下:

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 1 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

机器人足端坐标系  $\{O_4\}$  相对于膝关节坐标系  $\{O_3\}$ , 沿  $X$  轴平移  $L_3$ , 转换矩阵如下:

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将前述机器人足端与机体质心之间的转换矩阵相乘便可得到足端坐标系  $\{O_4\}$  在机体质心坐标系  $\{O_b\}$  中的位姿矩阵为:

$${}^bT_4 = {}^bT_0 {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} -s_{23} & -c_{23} & 1 & -L_2s_2 - L_3s_{23} - a \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23} & c_1 & L_1s_1 + L_2s_1c_2 + L_3s_1c_{23} + b \\ -c_1s_{23} & c_1s_{23} & s_1 & -(L_1c_1 + L_2c_1c_2 + L_3c_1c_{23}) - c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过对机器人腿部的正运动学分析, 可以计算出其足端的运动空间, 以便于确定所设计的机器人结构是否满足运动要求, 如果不满足要求, 进行结构调整优化, 通过计算可初步判断结构设计具有一定的可行性, 为后续机器人的跳跃步态规划提供了理论指导。

### 2.3 单腿逆运动学建模

在液压驱动机器人步态及运动控制中, 机器人的运动通常是通过给定液压缸位移量来控制的, 并且液压缸位移与关节转角之间的传动比是恒定的, 若要提高机器人单腿的控制精度, 需对其进行逆运动学求解, 以便获得整个过程各液压缸变量以及关节转动量<sup>[14]</sup>。

式(7)已建立了机器人单腿的运动学方程。足端位置与姿态是已知的, 关节角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  则可通过反变换法来确定。

假设机器人足端在坐标系中的位姿为:

$$A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

可以得到:

$$A = {}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (9)$$

运动学分析不涉及足端姿态关系, 因此可以不考虑足端姿态变化, 为节省计算时间, 将式  ${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$  两边同乘  ${}^0T_1^{-1} \times {}^1T_2^{-1}$  可得:

$$({}^0T_1^{-1})({}^1T_2^{-1})({}^0T_4) = {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (10)$$

在此将足端姿态变化关系用矩阵  $R$  代替, 其中:

$$({}^0T_1^{-1})({}^1T_2^{-1})({}^0T_4) = \begin{bmatrix} c_2(p_ys_1 + p_xc_1 - L_1) - p_zs_2 \\ -s_2(p_ys_1 + p_xc_1 + L_1) - p_zc_2 \\ p_yc_1 - p_xs_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 + L_3c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & L_3s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由对应关系可知式(11)和(12)相等, 因此有:

$$c_2(p_ys_1 + p_xc_1 - L_1) - p_zs_2 = L_2 + L_3c_3 \quad (13)$$

$$-s_2(p_ys_1 + p_xc_1 + L_1) - p_zc_2 = L_3s_3 \quad (14)$$

$$p_yc_1 - p_xs_1 = 0 \quad (15)$$

由式(15)可解得:

$$\theta_1 = \arctan P_y/P_x \quad (16)$$

将式(13)与(14)分别平方相加, 联立并整理得到:

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{(p_xc_1 + p_ys_1 - L_1)^2 + p_z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \right) \quad (17)$$

式(14)可改写为:

$$\sqrt{(p_ys_1 + p_xc_1 + L_1)^2 + p_z^2} \sin(\theta_2 + \varphi) = -L_3s_3 \quad (18)$$

其中:

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{p_z}{p_ys_1 + p_xc_1 + L_1} \right) \quad (19)$$

由式(14)可求得:

$$\theta_2 = - \left( \sin^{-1} \frac{-L_3s_3}{(p_xc_1 + p_ys_1 - L_1)^2 + p_z^2} - \varphi \right) \quad (20)$$

式(16)、(17)、(20)即为四足机器人单腿3个关节的逆运动学之解。若已知机器人足端在机体质心坐标系下的坐标为  ${}^b\mathbf{p}_k = [{}^b p_x, {}^b p_y, {}^b p_z]^T$ , 则可用上述的转换矩阵及上述逆求解方程进行求解。

### 3 单腿跳跃步态规划

机器人的运动轨迹规划是通过机器人运动学解算法解出其各个关节的变量, 并将关节角度驱动转换成液压缸位移驱动, 通过液压缸位移闭环控制实现机器人的步态运动<sup>[15]</sup>。

四足机器人的动态稳定性和运动在根本上都是要通过机器人与地面间的交互作用来实现, 机器人足端与地面的冲击力对机器人的稳定性有重要影响。因此, 所规划的足端轨迹需满足: 机器人抬腿零冲击, 落地软着陆, 足端轨迹、关节速度和加速度变化平滑, 足端与地面接触时无滑动<sup>[16]</sup>。

机器人在竖直跳跃过程中始终保持竖直状态, 可分为起跳相、腾空相和落地相3个阶段。由于机器人在起跳相和落地相时, 机器人腿部足端没有轨迹, 始终与地面坐标系固定, 足端与地面间无相对滑动和相对弹动产生, 因此, 在起跳相和落地相时规划的是髌部质心的运动轨

迹;而在腾空相时,机器人的足端与地面分离,足端和髋部坐标系均不固定,此时需要同时规划足端和髋部质心的运动轨迹。其腿部坐标如图2所示。

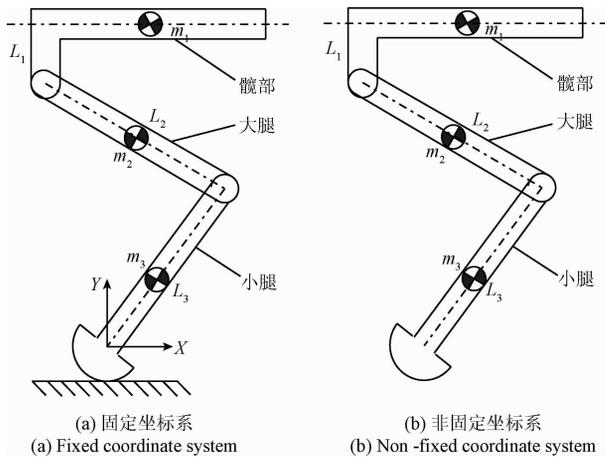


图2 腿部坐标系

Fig.2 Coordinate system of single leg

本文以液压四足机器人单腿运动学模型为基础,在固定坐标系下采用五次多项式的轨迹规划方法,在非固定坐标系下采用抛物线加复合摆线的轨迹规划方法。

### 3.1 起跳机器人运动轨迹规划

起跳相时,机器人的足端与地面始终接触,从而足端与地面坐标系固定,因此本文规划的是髋部质心的运动方程,由于机器人只在竖直方向上进行跳跃,髋部质心在水平方向上的位移为0,于是只需规划髋部质心在竖直方向上的运动。

起跳阶段,机器人髋部质心应满足的条件如下:

- 1) 初始时高度为  $h_0$ , 离地时刻  $t_1$  达到高度值  $h_1$ ;
- 2) 初始时速度为 0, 离地时刻  $t_1$  的速度达到  $v_1$ ;
- 3) 初始时加速度为 0, 离地时刻  $t_1$  的加速度变为  $-g$ ;

由于要尽量减小跳跃过程中足端与地面的冲击力,通过比较各种插值函数,最终选择采用五次多项式对其进行轨迹拟合。五次多项式的形式如下:

$$y_q(t) = c_0^q + c_1^q t + c_2^q t^2 + c_3^q t^3 + c_4^q t^4 + c_5^q t^5 \quad (21)$$

式中:  $y_q(t)$  为起跳相髋部质心在竖直方向的位移,  $c_i^q$  为拟合参数。

对式(21)求一阶导数及二阶导数可求得竖直方向髋部质心对应的速度、加速度函数如下:

$$\dot{y}_q(t) = c_1^q + 2c_2^q t + 3c_3^q t^2 + 4c_4^q t^3 + 5c_5^q t^4 \quad (22)$$

$$\ddot{y}_q(t) = 2c_2^q + 6c_3^q t + 12c_4^q t^2 + 20c_5^q t^3 \quad (23)$$

### 3.2 落地机器人运动轨迹规划

在机器人腿部下降压缩过程,足端冲击力过大会则会对腿部传感器和机械结构造成损伤,因此需要通过落地

运动规划来尽量减少足端冲击力。在此借鉴“软着陆”的思想,对其运动轨迹进行合理的规划,并结合腿部弹簧具有的一定缓冲作用,将足端冲击力控制在合理的范围之内。在落地相阶段,机器人髋部质心应满足的条件如下:

- 1) 下降落地阶段,位置由  $h_1$  变为  $h_0$ ;
- 2) 下降落地结束时,速度由  $-v_1$  变为 0;
- 3) 下降落地阶段,加速度由  $-g$  变为 0。

根据对机器人单腿跳跃过程的分析,其上升起跳阶段与下降落地阶段运动过程是一致的,在下将落地阶段同样采用五次多项式进行轨迹规划,其竖直方向髋部质心的运动方程为:

$$y_l(t) = c_0^l + c_1^l t + c_2^l t^2 + c_3^l t^3 + c_4^l t^4 + c_5^l t^5 \quad (24)$$

式中:  $y_l(t)$  为起跳相髋部质心在竖直方向的位移,  $c_i^l$  为拟合参数。

同理,对式(24)求一阶导数及二阶导数可求得竖直方向髋部质心对应的速度、加速度函数如下:

$$\dot{y}_l(t) = c_1^l + 2c_2^l t + 3c_3^l t^2 + 4c_4^l t^3 + 5c_5^l t^4 \quad (25)$$

$$\ddot{y}_l(t) = 2c_2^l + 6c_3^l t + 12c_4^l t^2 + 20c_5^l t^3 \quad (26)$$

### 3.3 腾空机器人运动轨迹规划

腾空相时机器人足端与地面不再接触,足端运动轨迹随着腿部各构件的运动而产生变化,因此,需要同时规划髋部质心和足端的轨迹方程。

腾空相时,机器人髋部质心在竖直方向做抛物线运动,其运动方程为:

$$y_{ik}(t) = v_1 t - \frac{1}{2} g t^2 + h_1 \quad (27)$$

式中:  $y_{ik}(t)$  为腾空相髋部质心在竖直方向的位移,  $h_1$  为起跳时刻髋部质心的竖直位置,  $v_1$  为起跳时刻髋部质心在竖直方向的速度。

为了减小当足端抬起和着地过程中足端与地面之间的冲击力,足端轨迹采用复合摆线来进行规划。同样,由于机器人仅在竖直方向上进行跳跃,因此足端在水平方向的位移量也为 0,只考虑足端竖直方向的轨迹。根据所设定的机器人的跳跃高度,足端在竖直方向的运动方程为:

$$y_{iz}(t) = \frac{h}{2} \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_f} \times t\right) \right) \quad (28)$$

式中:  $y_{iz}(t)$  为腾空相足端在竖直方向的位移,  $h$  为足端跳跃的高度,  $t_f$  为腾空时间。

机器人在腾空相时足端与地面分离,必须通过髋部质心和足端的相对轨迹来规划腿部各关节的运动。

## 4 单腿跳跃步态仿真

针对所建模型,利用 ADAMS 进行仿真。设置地面

环境以模拟真实的路况。根据机器人的实际运动情况来添加各个关节的约束和相应的驱动。并依据前面进行的轨迹规划推导出的轨迹函数,通过运动学求解、矩阵变换,推导出各个驱动对应的驱动函数,将其输入到ADAMS 样机后,机器人便可以按照所规划的步态进行运动。如图3所示为腿部跳跃过程。

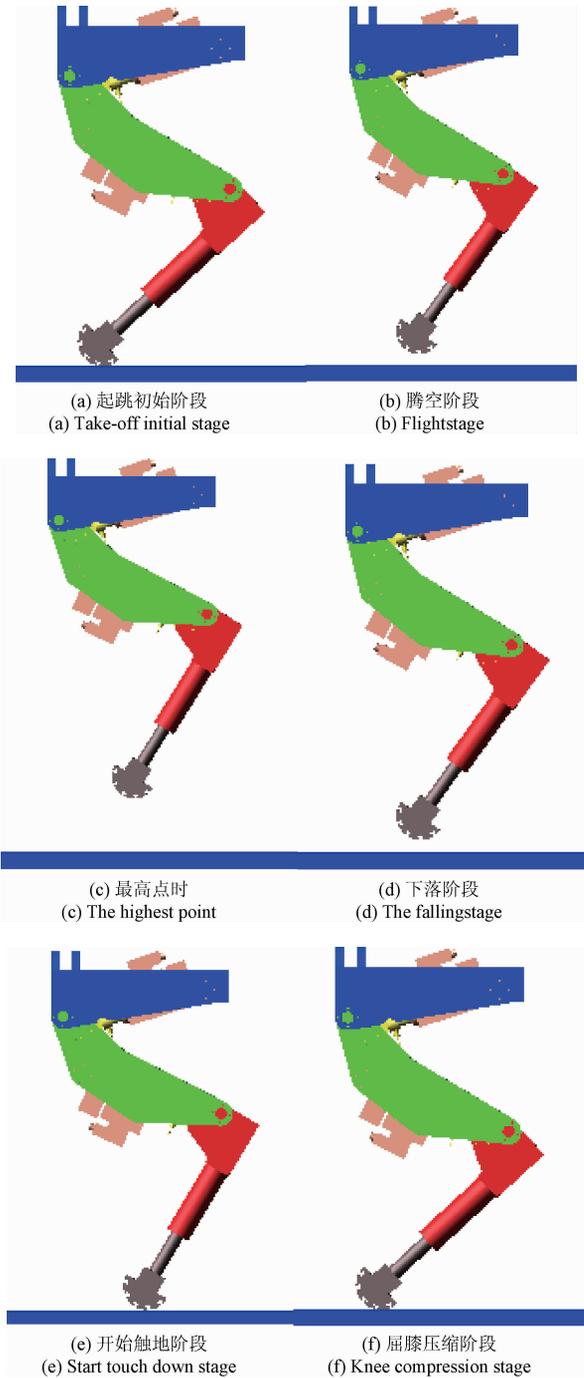


图3 单腿的跳跃步态仿真

Fig.3 Jumping gait simulation of single leg

从图3中可以看出,液压四足机器人单腿经过起跳、腾空和落地阶段,实现了跳跃。其机体质心位移曲线如图4所示。

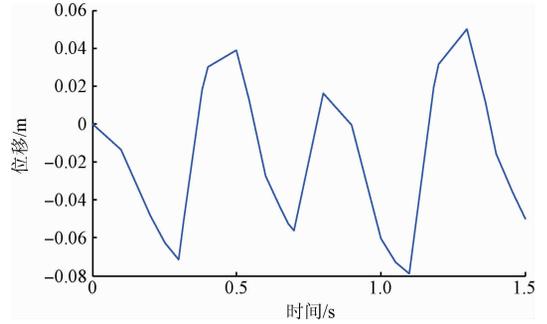


图4 质心位移曲线

Fig.4 Displacement curve for the centroid center of the body

由图4可知,机体质心轨迹经历了下降压缩和上升起跳的过程,且到达最高处时速度减速明显,整体呈现周期性运动。

腿部末端与地面接触力曲线是反映机器人足端落地冲击力大小的指标,曲线如图5、6所示。图5所示为给机器人一个随意跳跃信号得到的足端冲击力曲线,图6所示为步态规划后得到的冲击力曲线。

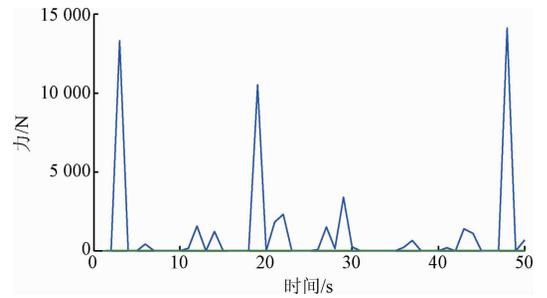


图5 任意跳跃信号足端与地面接触力曲线

Fig.5 The contact force curve between the leg and ground for any jump signals

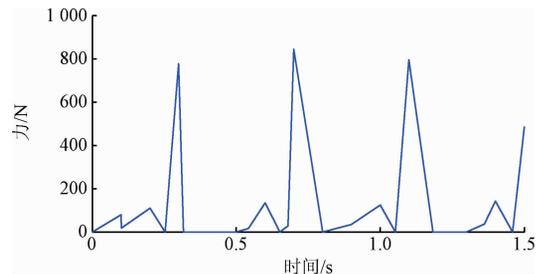


图6 规划后足端与地面接触力曲线

Fig.6 The contact force curve between the leg and ground after gait planning

由图5与6对比可知,当前规划得到的驱动函数下足端冲击力有了明显的减小,腾空相时,腿部接触力为零,只在起跳相和落地相时有接触力,说明所设计的步态规划方法能够实现机器人的跳跃步态,而且能够有效地降低足端与地面的冲击。

### 5 单腿跳跃步态实验

为了进一步验证单腿跳跃步态的合理性,需在实际机器人单腿实验平台上进行实验验证。搭建了液压四足机器人单腿实验样机及与之配套的实验设施。为了配合实验的进行,利用约束架对机器人单腿结构进行约束,将机器人髋部固定在约束架上。单腿的竖直弹跳运动由髋关节和膝关节液压缸的联合驱动完成(横摆关节被约束架固定),因此,以液压驱动四足机器人单腿实验台为对象,通过控制器采用前面所规划的步态方法对其进行运动规划控制,进而完成机器人单腿竖直弹跳运动实验,其跳跃过程单腿运动轨迹如图7所示。



(a) 起跳初始阶段 (a) Take-off initial stage (b) 腾空阶段 (b) Flight stage



(c) 最高点时 (c) The highest point (d) 下落阶段 (d) The falling stage



(e) 开始触地阶段 (e) Start touch down stage (f) 屈膝压缩阶段 (f) Knee compression stage

图7 实际机器人单腿运动轨迹

Fig. 7 The actual single leg trajectory of the robot

从图7中可以看出,液压四足机器人单腿从初始状态经过起跳、腾空、落地直至回到初始位置,共经历了触地起跳阶段、腾空阶段、落地缓冲阶段,实现了跳跃,从实验过程中可以看出,跳跃过程中没有较大的冲击或震动,各关节间运动协调,进一步证明了所规划的步态的准确性和合理性。

### 6 结 论

以液压四足机器人单腿为研究对象,通过D-H坐标法,对其进行了运动学分析及求解。根据仿生学,模拟动物的真实跳跃情况,对其进行步态规划,分别对机器人起跳相、落地相和腾空相进行规划,从而得到起跳相和落地相髋部质心处的运动轨迹,以及腾空相髋部质心和足端的运动轨迹。对单腿跳跃步态进行仿真,得到了机体质心位移曲线和足端与地面接触力曲线,同时在单腿实验平台上进行了实验,仿真和实验均验证了跳跃步态规划的正确性和合理性。

### 参考文献

[1] 高申勇, 许方镇, 郭鸿杰. 基于弹簧模型的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 796-803.  
GAO SH Y, XU F ZH, GUO H J. Research on mobile robots' path planning based on a spring model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 796-803.

[2] 杨超峰. 液压四足机器人的步态规划研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
YANG CH F. Research on gait planning for a hydraulic quadruped robot [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 22-35.

[3] MARC H R. Running with symmetry [J]. The

- International Journal of Robotics Research, 1986, 5(4): 3-19.
- [4] SINGH S P N, WALDRON K J. Attitude estimation for dynamic legged locomotion using range and inertial sensors [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 1663-1668.
- [5] SOROKIN S V, NIELSEN J B, OLHOFF N. Analysis and optimization of energy flows in structures composed of beam elements [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2001, 22(1): 3-11.
- [6] KIM H, WON D, KWON O, et al. Foot trajectory generation of hydraulic quadruped robots on uneven terrain [C]. International Conference on Automation Control, 2008: 3021-3026.
- [7] 孟健, 李贻斌, 李彬. 四足机器人跳跃步态控制方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2015, 45(3): 30-33. MENG J, LI Y B, LI B. Bound gait controlling method of quadruped robot[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2015, 45(3): 30-33.
- [8] 钟建锋, 罗欣, 余益君. 足式机器人单腿跳跃仿真与实验[J]. 机械与电子, 2014, 33(4): 60-64. ZHONG J F, LUO X, YU Y J. Simulation and experiment of vertical hopping of a single legged robot[J]. Machinery and Electronics, 2014, 33(4): 60-64.
- [9] 张雪峰, 秦现生, 冯华山, 等. 液压驱动四足机器人单腿竖直跳跃运动分析与控制[J]. 机器人, 2013, 35(2): 32-35. ZHANG X F, QIN X SH, FENG H SH, et al. Motion analysis and control of a single leg of hydraulically actuated quadruped robots during vertical hopping[J]. Robot, 2013, 35(2): 32-35.
- [10] 徐雪松, 杨胜杰, 陈荣元. 复杂环境移动群机器人最优路径规划方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 274-282. XU X S, YANG SH J, CHENG R Y. Dynamic differential evolution algorithm for swarm robots search path planning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2): 274-282.
- [11] 温淑慧, 郑维. 未知环境下基于 Elman 网络力控制的移动机器人避障研究[J]. 控制工程学报, 2013, 2(4): 60-63. WEN SH H, ZHENG W. Research of mobile robot obstacle avoidance in unknown environment based Elman network force control[J]. Control Engineering of China, 2013, 2(4): 60-63.
- [12] 余伶俐, 龙子威, 周开军. 基于贝塞尔曲线的机器人非时间轨迹跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1564-1572. YU L L, LONG Z W, ZHOU K J. Non-time trajectory tracking method based on Bezier curve for robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1564-1572.
- [13] JIANG ZH Y, LI M T, GUO W. Running control of quadruped robot in trotting gait [C]. IEEE 5th International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2011: 172-177.
- [14] 尹贵, 张小栋, 陈江城, 等. 模型不确定的下肢康复机器人轨迹跟踪自适应控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1750-1757. YIN G, ZHANG X D, CHEN J CH, et al. Trajectory tracking adaptive control of the lower limb rehabilitation robot with model uncertainty [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11): 1750-1757.
- [15] 柴汇, 孟建, 荣学文, 等. 高性能液压驱动四足机器人 SCalf 的设计与实现[J]. 机器人, 2014, 36(4): 385-391. CHAI H, MENG J, RONG X W, et al. Design and implementation of SCalf, an advanced hydraulic quadruped robot [J]. Robot, 2014, 36(4): 385-391.
- [16] 王立鹏. 液压四足机器人驱动控制与步态规划研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014. WANG L P. Research on control and gait planning for a hydraulic quadruped robot [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

### 作者简介



高炳微, 分别在 2010 年、2013 年和 2015 年于哈尔滨理工大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为哈尔滨理工大学讲师, 主要研究方向为电液伺服控制和液压四足机器人。

E-mail: gaobingwei\_happy@163.com

**Gao Bingwei** received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin University of Science and Technology in 2010, 2013 and 2015, respectively. Now she is a lecturer in Harbin University of Science and Technology. Her main research interest includes electro-hydraulic servo control and hydraulic quadruped robot.



王思凯, 2015 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 现为哈尔滨理工大学硕士生, 主要研究方向为液压四足机器人。

E-mail: abc@123.com

**Wang Sikai** received his B. Sc. degree in 2015 from Harbin University of Science and Technology. Now he is a master student in Harbin University of Science and Technology. His main research interest is hydraulic quadruped robot.