液压驱动六足跳跃机器人仿真分析

卢晴勤,留沧海,刘佳生,唐开强
(西南科技大学 制造科学与工程学院,四川 绵阳 621010)

摘 要:介绍了一种液压驱动跳跃六足机器人的模型,分别进行了该机器人侧面双腿和正面双腿竖直跳跃运动学分析与动力学分析。采用D-H法,提出了一种液压驱动六足跳跃机器人模型,并建立了其着地和腾空两阶段的运动学分析模型;采用拉格朗日方程分析其动力学,得到了该机器人结构在运动过程中各关节的输出力矩特性。最后基于Adams软件对双腿跳跃六足机构和其质心轨迹进行了仿真,分析了其跃障能力,优化了两种跳跃方式的跳跃倾角,并比较了这两种跳跃方式效率,仿真结果验证了六足机构的运动平稳性,较好的越障能力,侧腿跳效率更优,获得侧面和正面双腿跳跃的最佳倾角,为后续研究工作提供了理论支撑。

关键词:六足机器人;液压驱动;跳跃;动力学;运动学;倾角
中图分类号:TH16;TP242 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-3997(2015)08-0200-06

Simulation Analysis of Jumping Hexapod Robot Drived with Hydraulic

LU Qing-qin, LIU Cang-hai, LIU Jia-sheng, TANG Kai-qiang
(School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Sichuan Mianyang 621010, China)

Abstract: *A model of six jumping legs drived with hydraulic is built, then kinematic analysis and dynamics analysis of vertical jump of facade legs and side legs of the robot are established. Using* D-H *method, analysis model of hexapod robot is proposed, and the model of a kinematic analysis of its land and vacated is established; kinetic analysis using Lagrange equation of leg, has got the structure of the output torque characteristics of leg joints during exercise. Finally, based on* Adams, *leg mechanisms and its centroid trajectory are simulated, capability of jump barrier is analyzed, and the tilt angle of two kinds of jumping way is optimized, and the efficiency of two kinds of jumping way is compared. Simulation results show its movement stability, better ability to jump barrier structures, get optimum tilt angle, obtain the conclusion that efficiency of side legs of the robot is better, and provide theoretical support for follow-up research.*

Key Words: **Hexapod Robot; Hydraulic Driven; Jump; Dynamics; Kinematics; Tilt Angle**

1 引言

多足机器人能够在崎岖的山路上行走、跑跳,可以完成轮式或履带式所不能完成的非结构性环境中的运输作业,所以这类机器人在森林采伐、矿山开采、水下建筑、核工业、军事运输及探测、星球探测等许多行业有着非常广阔的应用前景[1-2]。对于现有的纯步行足式、轮式和履带式运输工具是一种全新突破。国外多足跳跃机器人技术发展较早,技术成熟,国外有很多机构和大学均已经有优秀性能且能用于实际的多足跳跃机器人。国内多足跳跃机器人虽然起步晚,但是进展迅速,很多大学和研究机构均对多足跳跃机器人技术有较深入的研究[3-7]。基于多足机器人双机械腿协调运动的分析较少[8-9],进行了双机械腿运动分析。

充分利用液压驱动功率重量比大、机构紧凑及利于过载保护等优点,设计了一款液压驱动的六足跳跃机器人。其中,液压驱动用于髋关节和膝关节的传动,液压驱动能很好地满足这两个关节要承受重力方向的冲击作用力的工作要求。建立了其三维模型简图,同时采用D-H法着重研究其着地和腾空两阶段的运动学分析和动力学分析,并对双腿跳跃六足机构和其质心轨迹进行了仿真优化,分析了其跃障能力,优化了两种跳跃方式的跳跃倾角,比较了这两种跳跃方式效率,验证了该六足跳跃机器人的运动平稳性,较好的越障能力,得到了这两字跳跃方式的最佳倾角,侧腿跳效率更优,这为多足机器人的研究提供理论基础,同时也为多足跳跃机器人的运动控制提供参考。

2 模型建立

移动机器人主要有两种运动方式,一种靠轮子或履带驱动,

来稿日期:2015-01-20
基金项目:西南科技大学重点项目(14zx1115)
作者简介:卢晴勤,(1989-),女,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向:六足跳跃机器人;
留沧海,(1966-),男,福建泉州人,博士研究生,教授,主要研究方向:机电一体化、智能机械等

一旦地势凹凸不平,轮子或履带驱动的机器人将无法发挥应有的作用;另外一种是仿生的爬行或步行方式,但结构复杂,运动缓慢。此外就是一直以来很难解决的跳跃式机器人,跳跃机器人与轮动、步行机器人相比具有显著的优势,可以越过几倍于自身的台阶、沟渠等障碍物,但其起跳时蹬地的力量,腾空时重心的平稳,落地时的平稳性都是很难有效的控制,因此跳跃机器人都只是在试验阶段,没有得到广泛的应用。通过对一些动物跳跃运动的分析和借鉴其他跳跃机构并进行优化设计,提出自己的跳跃式机构,合理的设计跳跃机器人腿。

跳跃机器人不仅要求机器人要跳的高、跳得远,更重要的是要求机器人在跳跃的过程以及落地时能够保持身体的稳定性,不会发生翻倒或倾斜,并为下次的跳跃做好准备。采用液压缸实现能量存储和瞬间释放,完成起跳。采用在空中调整该机器人的位姿,保证机器人在跳跃过程中重心的平稳和落地过程中不会侧翻。机器人腿采用液压缸驱动能够调整跳跃方向,提高其运动灵活机动性。机器人足端采用球铰结构,使机器人足端落地时具有良好的缓冲作用,减少地面对支撑腿的强大冲击力以及机器人质心的倾翻力矩,显著改善机器人运动过程中的姿态稳定性能。

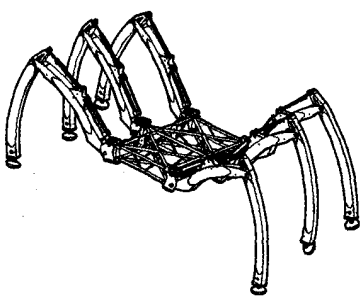


图 1 六足机器人三维模型

Fig.1 The Hexapod Robot 3D Model

3 运动学分析

3.1 侧面双机械腿运动学分析

触地阶段是足尖从接触地面到跳离地面的过程,腾空阶段是足尖离地后到着地前的过程,双机械腿竖直跳跃研究可分别按这两个阶段建模来进行分析。六足机器人双机械腿竖直跳跃的一种情况,如图 2 所示。即六足机器人侧面双机械腿同时竖直跳跃情况。双机械腿与单机械腿相比,不同的是分析运动学时要考虑双机械腿之间的协作运动。图 2 所示双机械腿同时竖直跳跃时等同于图 3 中的机械腿竖直跳跃。采用 D-H 法对触地阶段和腾空阶段液压驱动六足机器人侧面双腿进行运动分析,建立三维模型,如图 3 所示。

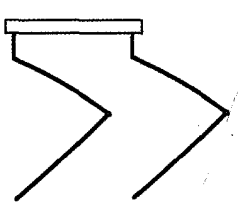
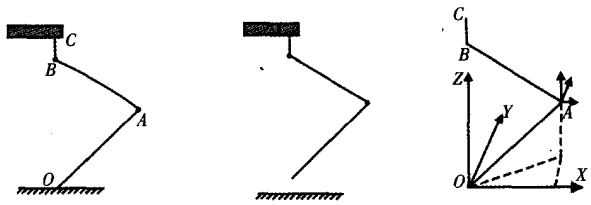


图 2 侧面双腿机构模型

Fig.2 The Side Legs Institutional Model



(a)触地阶段　(b)腾空阶段　(c)三维机构简图

图 3 单腿机构模型及坐标系

Fig.3 Leg Institutional Model and Coordinate

在坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中,机械腿躯体质心 B 点的坐标可表示为如下方程:

$$x=L_1\cos\theta_{11}\cos\theta_{12}+L_2\cos\theta_{21}\cos\theta_{22}$$

$$y=L_1\cos\theta_{11}\sin\theta_{12}+L_2\cos\theta_{21}\sin\theta_{22}$$

$$z=L_1\sin\theta_{11}+L_2\sin\theta_{21}$$

对躯体质心 B 点的坐标求导得到质心位置的速度方程如下:

$$\dot{x}=-(L_1\sin\theta_{11}\cos\theta_{12}\omega_{11}+L_1\cos\theta_{11}\sin\theta_{12}\omega_{12})-(L_2\sin\theta_{21}\cos\theta_{22}\omega_{21}+L_2\cos\theta_{21}\sin\theta_{22}\omega_{22})$$

$$\dot{y}=-(L_1\sin\theta_{11}\sin\theta_{12}\omega_{11}+L_2\sin\theta_{21}\sin\theta_{22}\omega_{21})+(L_1\cos\theta_{11}\cos\theta_{12}\omega_{12}+L_2\cos\theta_{21}\cos\theta_{22}\omega_{22})$$

$$\dot{z}=L_1\cos\theta_1\omega_{11}+L_2\cos\theta_{21}\omega_{21}$$

对速度方程求导得到加速度:

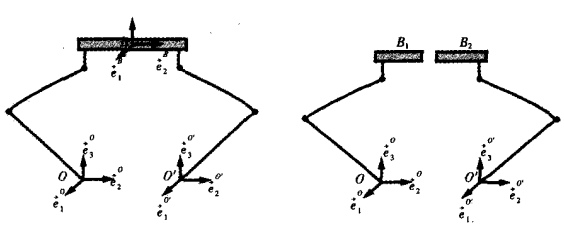
$$\ddot{x}=-L_1\cos\theta_{11}\cos\theta_{12}\cdot(\omega_{11}^2+\omega_{12}^2)+2L_1\sin\theta_{11}\sin\theta_{12}\cdot\omega_{11}\omega_{12}-L_1\sin\theta_{11}\cos\theta_{12}\alpha_{11}-L_1\cos\theta_{11}\sin\theta_{12}\alpha_{12}-L_2\cos\theta_{21}\cos\theta_{22}\cdot(\omega_{21}^2+\omega_{22}^2)+2L_2\sin\theta_{21}\sin\theta_{22}\cdot\omega_{21}\omega_{22}-L_2\sin\theta_{21}\cos\theta_{22}\alpha_{21}-L_2\cos\theta_{21}\sin\theta_{22}\alpha_{22}$$

$$\ddot{y}=-L_1\cos\theta_{11}\sin\theta_{12}\cdot(\omega_{11}^2+\omega_{12}^2)-2L_1\sin\theta_{11}\cos\theta_{12}\cdot\omega_{11}\omega_1-L_1\sin\theta_{11}\sin\theta_{12}\alpha_{11}+L_1\cos\theta_{11}\cos\theta_{12}\alpha_{12}-L_2\cos_{21}\sin\theta_{22}\cdot(\omega_{21}^2+\omega_{22}^2)-L_2\sin\theta_{21}\cos\theta_{22}\cdot\omega_{21}\omega_{22}-L_2\sin\theta_{21}\sin\theta_{22}\alpha_{21}+L_2\cos\theta_{21}\cos\theta_{22}\alpha_{22}$$

$$\ddot{z}=-L_1\cos\theta_{11}\omega_{11}^2+L_1\cos\theta_{11}\alpha_{11}-L_2\cos\theta_{21}\omega_{21}^2+L_2\cos\theta_{21}$$

3.2 正面双机械腿运动学分析

根据六足机器人双机械腿的实际运动情况,选用双机械腿相对位姿不变并同时运动的情况分析。建立模型,如图 4 所示。假设双机械腿携带一机身,设该机身为 B,取其质心为 O_B,建立基座系$\{O_B\ \vec{e}_N^{\,B}\}$,固定在 B 上,基$\{O_B\ \vec{e}_N^{\,O}\}$和基$\{O_B\ \vec{e}_N^{\,O'}\}$间的相对位姿不变。



(a)双机械腿位姿不变　(b)双机械腿等价两个单腿

图 4 双机械腿模型

Fig.4 Double Mechanical Legs Model

为了建立双机械腿的速度约束方程,假设将机身 B 分开,就

形成两个单机械腿机构。如图4(b)所示。分开后的机身 B 变为 B_1 和 B_2,质心点 B 变为 b 和 b',但这两点实际是重合的。则 B_1 点的角速度和 b 点的速度在 $\{O\ \vec{e}_N^{\,O}\}$ 中的投影可以表示成:

$$\omega_{B_1}=J_2\dot{q}$$

$$v_b=J_1\dot{q}$$

同理可知 B_2 点的角速度和 b' 点的速度可表示成:

$$\omega_{B_2}=J_2'\dot{q}'$$

$$v_{b'}=J_1'\dot{q}'$$

其中,$\dot{q}'$、J_1'、J_2' 与 $\dot{q}$、J_1、J_2 有类似的定义。

因为 B_1 和 B_2 是重合的,所以可得双机械腿协作运动的速度约束方程:

$$A\dot{Q}=0$$

其中:

$$A=\begin{bmatrix} J_2 & -J_2' \\ J_1 & -J_1' \end{bmatrix},\dot{Q}=\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{q}' \end{bmatrix}$$

用同样的方式可求得加速度约束方程,B_1 点的角加速度和 b 点的加速度在 $\{O\ \vec{e}_N^{\,O}\}$ 中的投影可以表示为:

$$\alpha_b=\dot{J}_1\dot{q}+J_1\ddot{q}$$

$$\varepsilon_{B_1}=\dot{J}_2\dot{q}+J_2\ddot{q}$$

同理,通过 B_2 点的角加速度和 b' 点的加速度可表示成:

$$\alpha_{b'}=\dot{J}_1'\dot{q}'+\dot{J}_1'\ddot{q}'$$

$$\varepsilon_{B_2}=\dot{J}_2'\dot{q}'+\dot{J}_2'\ddot{q}'$$

由运动学关系可知 $\varepsilon_{B_1}=\varepsilon_{B_2}$,$\alpha_b=\alpha_{b'}$,则有:

$$\dot{J}_1\dot{q}+J_1\ddot{q}=\dot{J}_1'\dot{q}'+\dot{J}_1'\ddot{q}'$$

$$\dot{J}_2\dot{q}+J_2\ddot{q}=\dot{J}_2'\dot{q}'+\dot{J}_2'\ddot{q}'$$

可得:$\dot{A}\dot{Q}+A\ddot{Q}=0$

其中:$\dot{A}=\begin{bmatrix} \dot{J}_2 & -\dot{J}_2' \\ \dot{J}_1 & -\dot{J}_1' \end{bmatrix},\ddot{Q}=\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{q}' \end{bmatrix}$

4 动力学分析

假设,机体在竖直跳跃运动过程中保持竖直,机体质心、大腿质心和小腿质心在竖直平面内运动;触地阶段机器人足尖与地面坐标系固定,不发生相对滑动和相对弹动,且整个触地阶段分为触地—屈膝压缩—伸膝爆发3个阶段。根据竖直跳跃时,单腿足尖是否触地,可分为着地和腾空2个阶段,并分别建立动力学模型。

4.1 着地阶段

着地阶段机构分析模型,如图5所示。大腿质心的偏移角度为 q_2 和小腿质心的偏移角度为 q_1,其质量分别为 m_2 和 m_1,臀关节、膝关节和地面力矩分别为 τ_3、τ_2、τ_1。

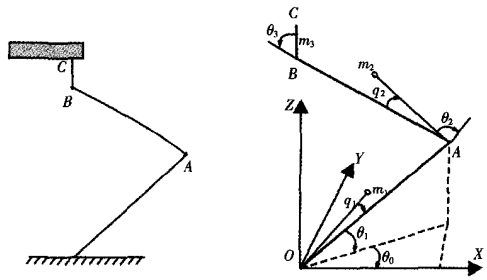


图5 三维机构简图

Fig.5 Three-Dimensional Institutional Diagram

由图5可得,杆 i 质心坐标向量为:

$$\vec{r}_i=x_i\vec{i}+y_i\vec{j}+z_i\vec{k}$$

$$\vec{r}_1=\left(\frac{1}{2}L_1\cos(\theta_1+q_1)\cos\theta_0\right)\vec{i}+\left(\frac{1}{2}L_1\cos(\theta_1+q_1)\sin\theta_0\right)\vec{j}+\left(\frac{1}{2}L_1\sin(\theta_1+q_1)\right)\vec{k}$$

$$\vec{r}_2=\cos\theta_0\left(L_1\cos(\theta_1+q_1)+\frac{1}{2}L_2\cos(\theta_1+\theta_2-q_2)\right)\vec{i}+\sin\theta_0\left(L_1\cos(\theta_1+q_1)+\frac{1}{2}L_2\cos(\theta_1+\theta_2-q_2)\right)\vec{j}+\left(L_1\sin(\theta_1+q_1)\frac{1}{2}L_2\sin(\theta_1+\theta_2-q_2)\right)\vec{k}$$

$$\vec{r}_3=\cos\theta_0\begin{pmatrix} L_1\cos(\theta_1+q_1)+L_2\cos(\theta_1+\theta_2-q_2)+ \\ \frac{1}{2}L_3\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3) \end{pmatrix}\vec{i}+\sin\theta_0\left(L_1\cos(\theta_1+q_1)+L_2\cos(\theta_1+\theta_2-q_2)+\frac{1}{2}L_3\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3)\right)\vec{j}+\left(L_1\sin(\theta_1+q_1)+L_2\sin(\theta_1+\theta_2-q_2)+\frac{1}{2}L_3\sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3)\right)\vec{k}$$

运用拉格朗日方程求解六足机器人单腿动力学问题,对于六足机器人单腿系统而言,拉格朗日函数 L 定义为腿部所有杆件的总动能和总势能之差。即可得单腿系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} \tau_i=\dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial\dot{\theta}_i}\right)-\dfrac{\partial L}{\partial\theta_i} \\ L=E_k-E_p \end{cases}$$

式中:τ_i—第 i 个关节的输出力矩。

其中:

$$\begin{cases} \vec{v}_i=\dot{\vec{r}}_i=\dot{x}_i\vec{i}+\dot{y}_i\vec{j}+\dot{z}_i\vec{k}=l_i\vec{\omega}_i \\ E_k=\sum_{i=1}^{3}E_{ki}=\sum_{i=1}^{3}\frac{1}{2}m_i\vec{v}_i^{\,2}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}m_i\left(\dot{x}_i^2+\dot{y}_i^2+\dot{z}_i^2\right) \\ E_p=\sum_{i=1}^{3}E_{pi}=\sum_{i=1}^{3}m_igz_i \end{cases}$$

着地阶段地面动力约束可表示为:

$$\begin{cases} F_{ox}^{s}=\sum_{i=1}^{3}m_i\ddot{x}_i \\ F_{oz}^{s}=\sum_{i=1}^{3}\left(m_i\ddot{z}_i+m_ig\right) \end{cases}$$

式中:F_{ox}^{s}、F_{oz}^{s}—地面对足尖的水平反作用力(摩擦力)和垂直反作用力。

其中,分别为触地关节、膝关节和髋关节的输出力矩,髋关节和膝关节是液压传动方式,可根据两关节的输出力矩求得两关节的液压缸输出力的变化特性。

4.2 腾空阶段

由于液压驱动结构模式下的腾空单腿的质心偏移，建立了液压驱动单腿动力学机构模型,如图 6 所示。

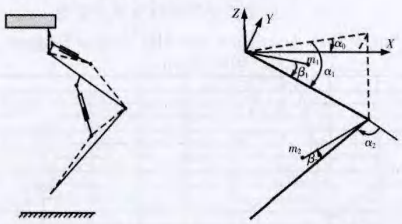


图 6 单腿腾空阶段动力学分析机构简图

Fig.6 Leg Kinetic Analysis of Mechanism in the Flight Phase

此时,大腿的质心偏移角度为 β_1、和小腿的质心偏移角度为 β_2,其质量分别为 m_1 和 m_2,臀关节和膝关节驱动扭矩 τ_1' 和 τ_2' 可表示为:

$$\begin{cases} \tau_i' = \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L'}{\partial \dot{\alpha}_i'}\right) - \dfrac{\partial L'}{\partial \alpha_i} \\ L' = E_k' - E_p' \end{cases}$$

式中:τ_i'—第 i 个关节的输出力矩。

其中:

$$\begin{cases} \vec{r}_1' = \left(\dfrac{1}{2}L_1'\cos(\alpha_1-\beta_1)\cos\alpha_0\right)\vec{i} + \left(\dfrac{1}{2}L_1'\cos(\alpha_1-\beta_1)\sin\alpha_0\right)\vec{j} - \\ \left(\dfrac{1}{2}L_1'\sin(\alpha_1-\beta_1)\right)\vec{k} \\ \vec{r}_2 = \cos\theta_0\left(L_1'\sin(\alpha_1-\beta_1) + \dfrac{1}{2}L_2'\cos(\alpha_1+\alpha_2+\beta_2)\right)\vec{i} + \\ \sin\theta_0\left(L_1'\cos(\alpha_1-\beta_1) + \dfrac{1}{2}L_2'\cos(\alpha_1+\alpha_2+\beta_2)\right)\vec{j} - \\ \left(L_1'\sin(\alpha_1-\beta_1) + \dfrac{1}{2}L_2'\sin(\alpha_1+\alpha_2+\beta_2)\right)\vec{k} \\ \vec{v}_i' = \dot{\vec{r}}_i' = \dot{x}_i'\vec{i} + \dot{y}_i'\vec{j} + \dot{z}_i'\vec{k} = L_i'\vec{\omega}_i' \\ E_k' = \sum_{i=1}^{3} E_{ki}' = \sum_{i=1}^{3} \dfrac{1}{2} m_i' \vec{v}_i'^2 = \dfrac{1}{2}\sum_{i=1}^{3} m_i'\left(\dot{x}_i'^2 + \dot{y}_i'^2 + \dot{z}_i'^2\right) \\ E_p' = \sum_{i=1}^{3} E_{pi}' = \sum_{i=1}^{3} m_i' g z_i' \end{cases}$$

5 Adams 仿真结果

在 Adams 中导入该六足机器人的三维模型，在设置参数的过程中,分别定义各关节的参数,对该六足机器人正面双腿和侧面双腿跳跃分别进行运动仿真。

六足机器人三维模型:长 5000mm,宽 1500mm,高 1500mm,质量 1000kg。

图 7 侧面双腿跳跃示意图

Fig.7 The Side Legs Jump Schematic Diagram

图 8 正面双腿跳跃示意图

Fig.8 The Facade Legs Jump Schematic Diagram

六足机器人两种跳跃方式,如图 7、图 8 所示。其中,六足机器人侧面双腿跳跃的示意图,如图 7 所示。六足机器人正面双腿跳跃的示意图,如图 8 所示。在 5.1 和 5.2 仿真结果中,虚线表示膝关节,实线表示髋关节。

5.1 侧面双腿跳跃仿真结果

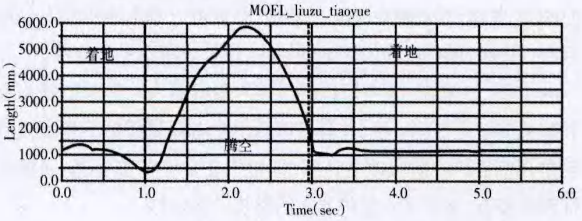


图 9 机体质心运动轨迹图

Fig.9 Machine Centroid Trajectory Diagram

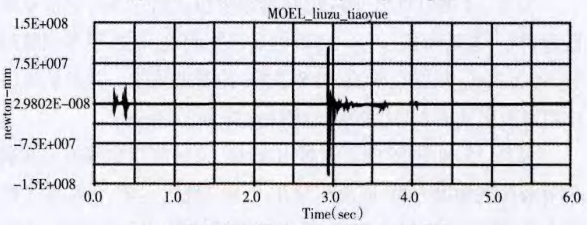


图 10 左侧双腿膝关节和髋关节力矩图

Fig.10 Left Legs Knee and Hip Torque Diagram

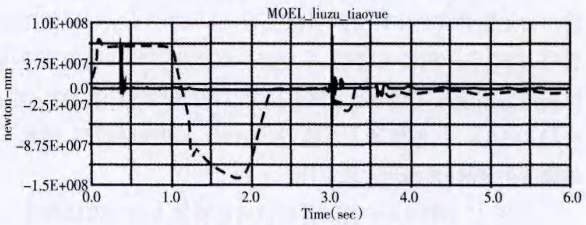


图 11 右侧双腿膝关节和髋关节力矩图

Fig.11 Right Legs Knee and Hip Torque Diagram

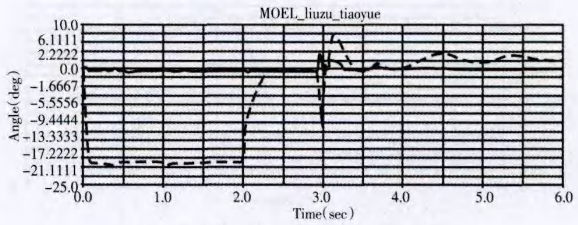


图 12 左侧双腿膝关节和髋关节转角图

Fig.12 Left Legs Knee and Hip Rotation Angle Diagram

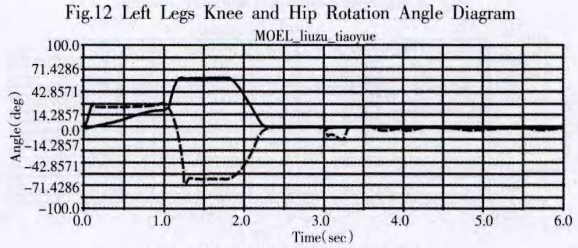


图 13 右侧双腿膝关节和髋关节转角图

Fig.13 Right Legs Knee and Hip Rotation Angle Diagram

从图 9 可以看出（0~1.0)s 着地阶段,(1.0~2.95)s 为腾空阶段,(2.95~6.0)s 为着地阶段。并且从该图中可以看出其质心高度的最大变化差约为 4680mm。

从图 10 和图 11 中可以看出该机器人在(0~0.4)s,左双腿膝关节和髋关节液压缸输出力矩,左双腿在 0.4s 时跳跃起来,使得右双腿成为整个机器人的支撑,从而在 0.4s 时,右双腿髋关节受到一个冲击力矩,如图 11 所示。在(0.4~1.0)s,右双腿着地屈膝储能。在(1.0~2.95)s,右双腿蹬地腾空,使得整个机器人腾空,在此阶段,右双腿膝关节液压缸输出力矩,使得右双腿在空中改变位姿,保证整机落地的稳定性。在(2.95~6.0)s,可以看出左双腿在 2.95s 时着地,右双腿在 3.0s 时着地,并且可以看出该机器人着地后有一段缓冲时间,缓解了地面冲击,保证整机运动稳定性。

在图 12 和图 13 中可以看出该六足机器人左右双腿膝关节和髋关节转角变化平稳,并且可以看出左右双腿膝关节和髋关节转角在整机腾空阶段改变位姿,即整机在空中调整姿态,回到最佳着地姿态,保证了六足机器人的整机的稳定性。

5.2 正面双腿跳跃仿真结果

从图 14 可以看出（0~1.2)s 着地阶段,(1.2~1.8)s 为前双腿跃起,机身翻转阶段,(1.8~2.2)s 为后双腿起跳阶段,包含屈膝过程,(2.2~3.8)s 为腾空阶段,(3.8~5.0)s 为着地阶段。并且从该图中可以看出其质心高度的最大变化差约为 2750mm。

从图 15 和图 16 中可以看出在(0~1.2)s 前双腿膝关节和髋关节液压缸输出力矩,使前双腿在 1.2s 时跳跃起来,带动整个机器人机身翻转。在(1.8~2.2)s,后双腿屈膝储能,从而有图 14 中的后双腿起跳阶段;并且在(1.8~2.2)s,前双腿膝关节和髋关节液压输出力矩使其在空中改变前双腿位姿。在(2.2~3.8)s,后双腿蹬地腾空,使得整个机器人腾空,并且前后双腿膝关节和髋关节液压缸输出力矩使其在空中改变机体位姿，保证整机落地的稳定性;在(3.8~5.0)s 时,该机器人着地,着地后有一段缓冲时间,缓解了地面冲击,保证整机运动稳定性。

在图 17 和图 18 中可以看出该六足机器人前后双腿膝关节和髋关节转角变化平稳,保证整机运动稳定性。

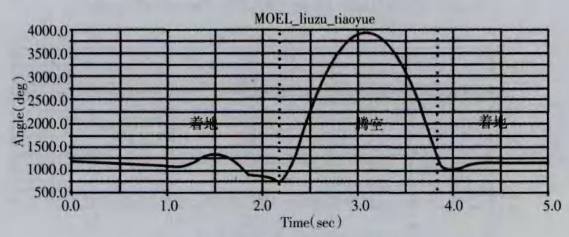


图 14 机体质心运动轨迹图

Fig.14 Machine Centroid Trajectory Diagram

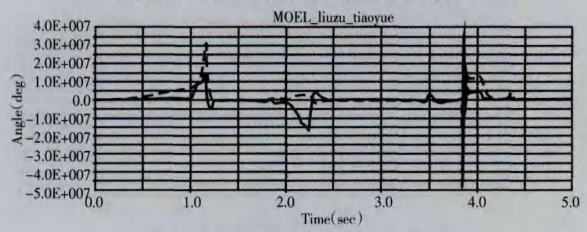


图 15 前双腿膝关节和髋关节力矩图

Fig.15 Front Legs Knee and Hip Torque Diagram

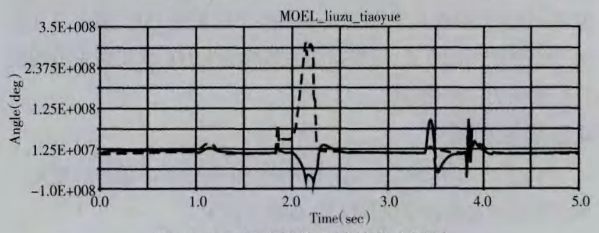


图 16 后双腿膝关节和髋关节力矩图

Fig.16 Rear Legs Knee and Hip Torque Diagram

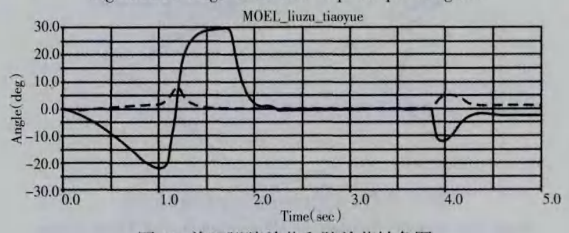


图 17 前双腿膝关节和髋关节转角图

Fig.17 Front Legs Knee and Hip Rotation Angle Diagram

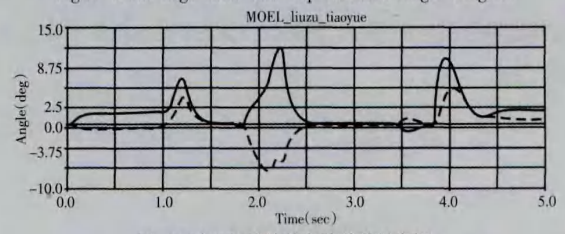


图 18 后双腿膝关节和髋关节转角图

Fig.18 Rear Legs Knee and Hip Rotation Angle Diagram

5.3 跳跃倾角优化结果

侧面双腿跳跃和正面双腿跳跃时的倾角示意图,如图 19 所示。跳跃倾角是整个机器人起跳前,机身与地面的夹角。侧面双腿跳跃和正面双腿跳跃时的倾角优化图,如图 20、图 21 所示。图 20 中侧腿跳在倾角达到 0.65rad 时,获得最大跳跃高度 5300mm,所以侧腿跳的最佳倾角为 0.65rad。图 21 中正腿跳在倾角达到 1.0rad 时获得最大跳跃高度 4400mm，所以正腿跳的最佳倾角为 1.0rad。在表 1 中,对比正面和侧面双腿跳跃的驱动力和跳跃高度,可以看出侧面双腿跳跃效率更优,所以侧面双腿跳跃方式更好。

(a)侧腿跳的倾角示意图　(b)正腿跳的倾角示意图

图 19 跳跃倾角示意图

Fig.19 Jumping Inclination Angle Schematic Diagram

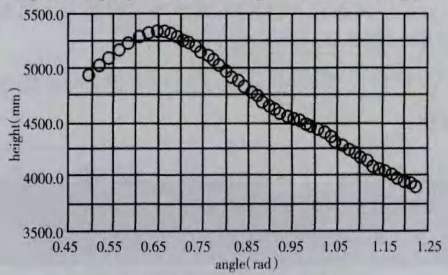


图 20 侧面双腿跳跃倾角图

Fig.20 Side Legs Jumping Inclination Angle Diagram

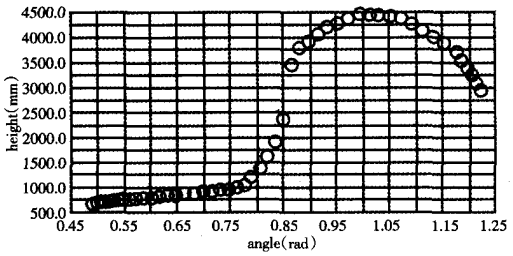


图 21 正面双腿跳跃倾角图

Fig.21 Facade Legs Jumping Inclination Angle Diagram

表 1 两种跳跃方式效率比较

Tab.1 Comparison of Jump Efficiency of Two Methods

	驱动力	高度
侧面双腿跳跃	2*108 N	4680mm
正面双腿跳跃	4.5*108 N	2750mm

6 结论

根据六足机器人模型建立了侧面双腿和正面双腿运动简图，进行了其竖直跳跃运动学分析与动力学分析。接着基于 Adams 软件对该液压驱动的六足机器人侧面双腿和正面双腿跳跃，以及其质心轨迹进行了仿真，分析了其跃障能力，优化了两种跳跃方式的跳跃倾角，比较了这两种跳跃方式效率，仿真结果验证了该机器人结构的运动平稳性，较好的越障能力，得到侧腿跳的最佳倾角为 0.65rad，正腿跳的最佳倾角为 1.0rad；对比正面和侧面双腿跳跃，获知侧面双腿跳跃效率更优，更适合该六足机器人跳跃；这为多足机器人的研究提供理论基础，同时也为多足跳跃机器人的运动控制提供参考。

参考文献

[1] Semini C, Tsagarakis N G, Guglielmino E. Design and experimental evaluation of the hydraulically actuated prototype leg of the HyQ robot [C]// Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2010: 3640-3645.

[2] Li Yi-bin, Li Bin, RuanJiu-hong. Research on the development of quadruped walking robot. advanced intelligent mechatronics [J]. Proceedings, IEEE International Conference, 2010: 592-602.

[3] 李贻斌，李彬，荣学文. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划[J]. 山东：山东大学学报，2011.
(Li Yi-bin, Li Bin, Rong Xue-wen. Mechanical design and gait planning of a hydraulically actuated quadruped bionic robot[J]. Shandong: Shandong University of Journal, 2011.)

[4] Zhang X, Qin X, Feng H. Motion analysis and control of a single leg of hydraulically actuated quadruped robots during vertical hopping [J]. Robot, 2013, 35(2): 135-141.

[5] 雷静桃，高峰，崔莹. 多足步行机器人的研究现状及展望[J]. 机械设计，2006, 23(9): 1-3, 44.
(Lei Jing-tao, Gao Feng, Cui Ying. Multilegged walking robot research status and prospects[J]. Mechanical Design, 2006, 23(9): 1-3, 44.)

[6] 樊重庆，董海军，葛文杰. 液动仿袋鼠弹跳机器人单腿动力学分析及仿真[J]. 机械设计与制造，2012(5): 177-179.
(Fan Chong-qing, Dong Hai-jun, Ge Wen-jie. Hydraulic robot jumping kangaroo leg dynamics analysis and simulation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(5): 177-179.)

[7] M.C.Garcia-Lopez, E.Gorrostieta. Kinematic analysis for trajectory generation in one leg of a hexapod robot[J]. Procedia Technology, 2012(3): 342-350.

[8] S Soyguder, H Alli. Kinematic and dynamic analysis of a hexapod walking running bounding gaits robot and control actions[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012(2): 444-458.

(上接第 199 页)

(Hu Zeng, He Guo-qi, Wang Zheng, Chen Wu-hui. Design of wheel arrangement of single-drive carbon-free car based on Adams software[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013(7): 53-56.)

[2] 王政，何国旗，胡增. 基于 ADAMS 软件的无碳小车转向机构设计[J]. 湖南工业大学学报，2013(9): 28-32.
(Wang Zheng, He Guo-qi, Hu Zeng. Design of carbon-free car steering mechanism based on ADAMS software[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013(9): 28-32.)

[3] 刘润，朱先勇，李志东. 基于弹簧约束的无碳小车转向机构的建模与仿真[J]. 机械设计，2013(9): 24-27.
(Liu Run, Zhu Xian-yong, Li Zhi-dong. Carbon-free car steering mechanism modeling and simulation based on spring constraint[J]. Journal of Mechanical Design, 2013(9): 24-27.)

[4] 季元进，任利惠，顾建. 利用变心齿轮传动的无碳小车的机构创新设计[J]. 机械设计，2013(9): 71-74.
(Ji Yuan-jin, Ren Li-hui, Gu Jian Innovationa lstructure designo fcarbon-freecar byusing center-changed geart echnique [J]. Journal of Machine Design, 213(9): 71-74.)

[5] 王斌，王衍，李润莲. 无碳小车的创新性设计[J]. 山西大同大学学报：自然科学版，2012(2): 59-62.
(Wang Bin, Wang Yan, Li Run-lian. Innovational design of carbon-free-car [J]. Journal of Shanxi Datong University: NaturalScience, 2012(2): 59-62.)

[6] 陈晓东，石雁南，张莉莉. 无碳小车的设计、制作与创新实践[J]. 实验室研究与探索，2013(12): 92-95.
(ChenXiao-dong, ShiYan-nan, Zhang Li-li. The design, manufacture and innovative practice of carbon free Car[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013(12): 92-95.)

[7] 曹斌，张海波，朱华炳. 基于槽轮机构的 8 字轨迹无碳小车设计[J]. 合肥工业大学学报：自然科学版，2014(6): 661-665.
(Cao Bin, Zhang Hai-bo, Zhu Hua-bing. Design of carbon-free car based on Geneva mechanism driving in 8-shaped track [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2014(6): 661-665.)

[8] 胡红英，于金普，包耳. 无碳小车结构设计与分析[J]. 大连民族学院学报，2013(9): 500-504.
(Hu Hong-ying, Yu Jin-pu, Bao Er. Structure design and analysis of carbon-freecars[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2013(9): 500-504.)

[9] 陈立平，张云清，任卫群. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用[M]. 北京：清华大学出版社，2005.
(Chen Li-ping, Zhang Yun-qing, Ren Wei-qun. Mechanical System Dynamics Analysis and ADAMS Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)

[10] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 第 2 版. 北京：国防工业出版社，2013.
(Li Zeng-gang. ADAMS Introductory Explanation and Example[M]. The second edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.)